

## ヘッド / 2 層膜垂直記録媒体系における記録層内の反磁界

## Demagnetizing Field in the Recording Layer of a Perpendicular Head / Double-Layer Medium System

相沢はる奈・鷹栖幸子・品川公成・法橋滋郎\*

東邦大学理学部, 千葉県船橋市三山 2-2-1 (〒274-8510)

\*早稲田大学理工学総合センター, 東京都新宿区大久保 3-4-1 (〒169-8555)

H. Aizawa, S. Takanosu, K. Shinagawa, J. Hokkyo\*

Faculty of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi-shi, Chiba 274-8510

\*Advanced Research Institute of Science &amp; Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

To estimate the demagnetizing field in the recording layer of a double-layer perpendicular medium as a function of the thickness and permeability of the underlayer, a finite element simulation for an arctangent magnetization was performed by solving the Maxwell equation for a 2D model of a head and double-layer medium system, and compared with the demagnetizing field obtained from an analytical formula. In addition, a recorded magnetization and a demagnetizing field were simulated for an SPT head and double-layer medium system, and compared with those for the arctangent magnetization. As a result, it was found that the demagnetizing field decreases drastically due to the multiple images induced between the head and the underlayer, and that the recorded magnetization becomes asymmetrical as the coercive force of the recording layer decreases.

**Key words:** FEM simulation, perpendicular double-layer medium, SPT head, demagnetizing field

## 1. はじめに

記録層に軟磁性層を積層したキーパー媒体における面内記録では, 記録層からの磁束がキーパー層を還流するため, 記録層の反磁界が減少し, 熱安定性が向上する<sup>1)</sup>. 垂直記録においては軟磁性層上に垂直磁化膜を形成した 2 層膜媒体が, 記録の高感度化, 高分解能化, 記録における反磁界の低減の観点から重要である.

磁化された単層媒体の近傍にヘッドが置かれた場合, その磁化によりヘッドに鏡像磁化が誘起され, その鏡像が反磁界に影響を与える. 記録層に軟磁性の下地層を積層した 2 層膜媒体においても同様のことが起こり, 2 層膜媒体の近傍にヘッドが置かれた場合においてはヘッドと下地層の間の鏡像磁化の反復により, 記録層内の反磁界に更に影響を与える<sup>2)</sup>.

そこで本論文では, まずヘッド・2 層膜媒体系の磁界分布解析法<sup>2)</sup>と数値計算法 (有限要素法) を併用することにより, ヘッド・2 層膜媒体系の反磁界分布に対する系のパラメータ依存性を調べた. 次に SPT ヘッド/2 層膜媒体系での記録状態のシミュレーションを行い, 記録過程を通して得られた記録磁化を用いて反磁界分布を調べた.

## 2. 計算方法

計算には, 2 次元 (トラック幅方向 ( $z$  方向) を無限大,  $x$  方向: 媒体走行方向,  $y$  方向: 媒体面垂直方向), 静磁場近似のもと Maxwell の方程式より導いた Poisson 方程式

$$-\operatorname{div}(\mu^{-1} \operatorname{grad} A_z) = J_z + (\operatorname{rot} M)_z \quad (1)$$

を用い, これを有限要素法で解くことにより, 数値計算を行った. ここで,  $A_z$  はベクトルポテンシャル,  $J_z$  は電流密度,  $M$  は磁化,  $\mu$  は透磁率である.

まず, 下地層の膜厚  $\delta_b$  が有限の場合における記録層内の反磁界の値を, 記録層に arctan 型の磁化を固定し  $J_z = 0$  のもと解くことにより求め,  $\delta_b = \infty$  の場合の解析式より求めた反磁界と比較した.

また SPT ヘッドによる記録状態のシミュレーションでは,  $J_z$  に記録電流密度の値を与え, 式 (1) を解いて記録磁化, 及び記録層内の反磁界を求め, arctan 型の磁化及びその反磁界と比較した.

## 3. 計算モデル

数値計算と解析解の比較では, Table 1 の計算モデル 1 のようなパラメータの媒体とギャップの無いブロック型のヘッドを使用した. 記録層の磁化は

$$M_z(x) = (2 M_r / \pi) \tan^{-1}(x/a) \quad (a = 12 \text{ nm}) \quad (2)$$

のような分布を与え, 媒体下地層および, ヘッドの有無によらず磁化の値は一定とした. また磁気浮上量は 15 nm とした. 次に, SPT ヘッド/2 層膜媒体系でのシミュレーションでは Table 2 の計算モデル 2 に示すような SPT ヘッドと 2 層膜媒体を使用した. 媒体磁化モデルには一軸異方性をもつ単磁区粒子である Stoner-Wohlfarth 粒子の集合体モデルを用いた<sup>3)</sup>. ここでは粒子数を 256 個とし異方性磁界  $H_k$  及び保磁力  $H_c$  の平均値とその標準偏差を  $\overline{H_k} = 970$  [kA/m],  $\Delta H_k = 40$  [kA/m],  $\overline{H_c} = 254, 318, 652$  [kA/m],  $\Delta H_c = 20$  [kA/m] としガウス分布させた. Fig. 1

Table 1 Parameters of Model 1.

| Block-type head            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Height                     | 32 $\mu\text{m}$         |
| Width                      | 6 $\mu\text{m}$          |
| Rela. permeability $\mu_h$ | 1500 (Const.)            |
| Medium                     |                          |
| Recording layer            |                          |
| Thickness $\delta$         | 30 nm                    |
| Underlayer                 |                          |
| Thickness $\delta_b$       | 0, 10, $\dots$ , 1000 nm |
| Rela. permeability $\mu_b$ | 1, 40, 100, 1000         |

Table 2 Parameters of Model 2.

| SPT head                   |                    |
|----------------------------|--------------------|
| Main pole width            | 400 nm             |
| Rela. permeability $\mu_h$ | 1500 (Const.)      |
| Medium                     |                    |
| Recording layer            |                    |
| Thickness $\delta$         | 30 nm              |
| Saturation mag. $M_s$      | 250 kA/m           |
| Corecivity $H_c$           | 254, 318, 652 kA/m |
| Underlayer                 |                    |
| Thickness $\delta_b$       | 30 nm              |
| Rela. permeability $\mu_b$ | 100 (Const.)       |

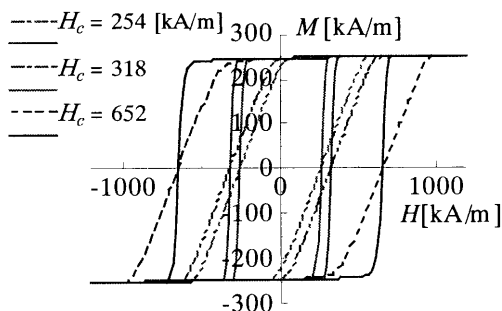


Fig. 1 M-H loops of the recording layer.

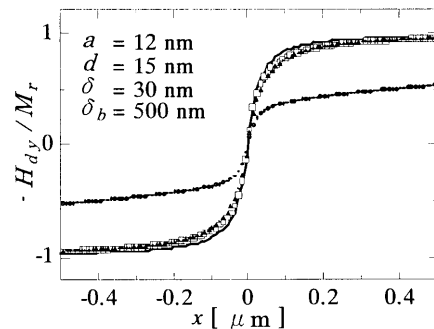
にシミュレーションに用いた垂直方向の M-H 曲線（実線）を示した。Fig. 1 の点線は反磁界を考慮した VSM 測定に相当する M-H 曲線である。  $H_c = 318, 652 \text{ kA/m}$  の媒体では角型比がほぼ 1 になり、  $H_c = 254 \text{ kA/m}$  の媒体は角型比が 0.9 と若干低くなっている。垂直記録では角型比が 1 に近い媒体が望ましいが、角型比が少し低くなった媒体との記録磁化の違いが比較できるように、この 3 つの媒体を用いて計算した。ここで記録には保磁力の約 2 倍の磁界を用い、磁気浮上量は 15 nm とした。また計算に用いたヘッドと下地層の B-H 特性は線形とし、飽和の影響は無視した。

#### 4. 計算結果

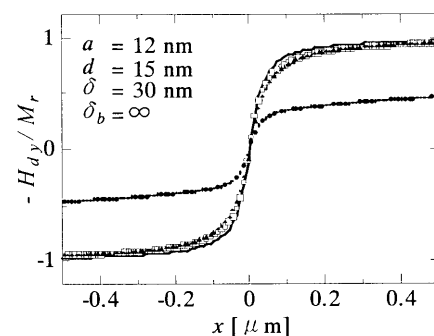
##### 4.1. 数値計算と解析式との比較

##### 4.1.1 ヘッド / 下地膜の有無による反磁界の比較

Fig.2 a に  $\delta_b = 500 \text{ nm}$  とした場合の arctan 型の磁化のつくる記録層内の反磁界の分布を  $x = -0.5 \sim 0.5 \mu\text{m}$  の範囲で示す。



a) Numerical calculation



b) Analytical calculation

—  $\mu_b = 1, \mu_h = 1$   
 $\square$   $\mu_b = 1, \mu_h = 1500$   
 $\triangle$   $\mu_b = 100, \mu_h = 1$   
 $\cdot$   $\mu_b = 100, \mu_h = 1500$

Fig. 2 Demagnetizing factor in a perpendicular recording layer with soft magnetic layer  $\delta_b = 500$ .

$\mu_b = 1$  の場合は単層媒体を表し、  $\mu_h = 1$  の場合はヘッドが媒体の近傍にない場合を表している。単層媒体単独の場合における反磁界の値（実線）と比べ、単層媒体の近傍にヘッドがある場合と 2 層膜媒体のみの場合における反磁界の値にはあまり差が見られない。これに対し 2 層膜媒体の近傍にヘッドがある場合には、反磁界が大きく減少していることが確認できる。

Fig.2 b は解析式<sup>2)</sup>より求めた  $\delta_b = \infty$  の場合における記録層内の反磁界の分布を示す。これと Fig.2 a を比較することにより、ヘッドの有無、媒体下地層の有無のどの場合においても  $\delta_b = 500 \text{ nm}$  と  $\delta_b = \infty$  の結果はほぼ一致することが分かった。このように 2 層膜媒体の近傍にヘッドが存在すると ( $\mu_b = 100, \mu_h = 1500$ )、単層膜媒体系 ( $\mu_b = 1, \mu_h = 1$  及び  $\mu_b = 1, \mu_h = 1500$ ) 及び 2 層膜媒体単独の場合 ( $\mu_b = 100, \mu_h = 1$ ) に比べて  $x \approx 500 \text{ nm}$  付近でも反磁界は約半分に減少している。しかし解析解<sup>2)</sup>から 2 層膜媒体-ヘッド系で  $d \neq 0$  のとき、更に  $x$  が増加すると反磁界は増加し、  $x \rightarrow \infty$  では反磁界は単層媒体系及び 2 層膜媒体単独の反磁界 ( $4\pi M_r$ ) に一致することが導かれる。ただし、2 次元計算では磁界の減衰が著しく緩慢になるので、ここでの結果は 3 次元効果を考慮すべき狭トラック時に成立するとは限らない。以下では次元性が問題になり難い磁化遷移近傍で議論する。

### 4.1.2 反磁界の下地層膜厚依存性

Fig.3 には、媒体の実用化の観点から下地層の比透磁率  $\mu_b$  が 100 と比較的小さくヘッドが媒体の近傍にある場合における  $\Delta H_d$  の下地層膜厚依存性を示す。ここで  $\Delta H_d$  は単層媒体に対する 2 層膜媒体の反磁界の減少量、

$\Delta H_d = |H_d(\delta_b) - H_d(\delta_b = 0)|$  であり、Fig.1 で反磁界の値の差が最大になる  $x = 0.1 \mu\text{m}$  付近の値を用いた。また点線は  $\delta_b = \infty$  (解析解) の場合の  $\Delta H_d$  である。

$\Delta H_d$  は  $\delta_b = \infty$  の場合に対して、 $\delta_b = 100 \text{ nm}$  以下では大きく異なるが、 $\delta_b = 100, 200, 500, 1000 \text{ nm}$  では  $\delta_b = \infty$  の場合に対して  $\Delta H_d$  は 25%, 12%, 8.5%, 3% の減少にとどまっている。

### 4.1.3 反磁界の比透磁率依存性

Fig.4 に  $\delta_b = 40, 100, 1000 \text{ nm}$  の 3 つの媒体における、反磁界の比透磁率依存性を示す。縦軸には先程と同じ  $\Delta H_d$  を用いた。

下地層の膜厚により、反磁界の減少量  $\Delta H_d$  の値は異なるものの、 $\mu_b = 100$  以上では  $\Delta H_d$  の  $\mu_b$  に対する変化率は小さくなる。

## 4.2 SPT ヘッド / 2 層膜媒体系でのシミュレーション

### 4.2.1 SPT ヘッドの磁界分布

Fig.5 に SPT ヘッドの磁界分布を示す。ここで主磁極は

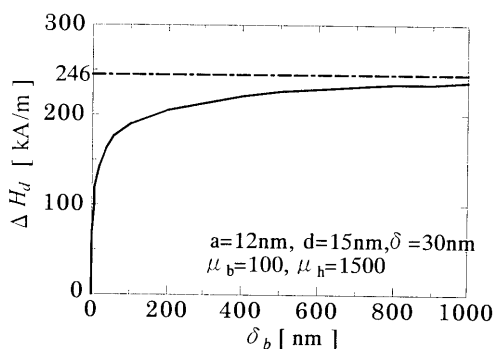


Fig. 3 Demagnetizing field difference between single-layer and double-layer media vs. soft magnetic layer thickness  $\delta_b$ .

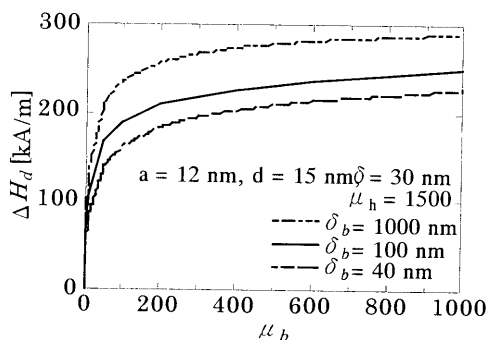


Fig.4 Demagnetizing field difference between single-layer and double-layer media vs. soft magnetic permeability  $\mu_b$ .

$x = 2 \sim 2.4 \mu\text{m}$ , 補助磁極は  $x = -3.2 \sim 0 \mu\text{m}$  の領域にある。また、 $\Delta y$  は主磁極表面に対する補助磁極表面の引っ込み量の差である。

$\Delta y = 0$  においては、補助磁極側に大きな逆向きの磁界が発生しており、 $\Delta y$  の値が大きくなるとともに、逆向きの磁界が減少していくことが分かる。

この結果より、補助磁極付近での逆向きの磁界の影響を避けるため、媒体が主磁極に対して補助磁極と逆の方向に移動するようにシミュレーションを行った。

### 4.2.2 記録磁化および反磁界の arctan 型の磁化との比較

Fig.6 a, b, c に 3 つの媒体における SPT ヘッドによる記録磁化と arctan 型の磁化との比較を示す。

記録磁界が反転する前の記録磁化によりつくられる反磁界の影響により、記録磁化が遷移の中心に関して非対称になっている<sup>4)</sup>。しかし保磁力が大きくなる程この非対称性は緩和されて、磁化転移パラメーター  $a$  は小さくなる。ここで  $2a$  は磁化転移領域で磁化が  $\mp M_r/2$  になる  $x$  座標間の距離である。角型比の低い ( $H_c = 254 \text{ kA/m}$ ) 媒体においては、記録時には  $-M_s$  ( $M_s$ : 飽和磁化) まで磁化され、ヘッドが媒体から離れると、反磁界が回復するため  $-M_r$  になるが、遷移領域付近では反磁界が小さい為にほぼ  $-M_s$  にとどまっている。

Fig.7 a, b, c に 3 つの媒体における記録磁化と arctan 型の磁化のつくる反磁界の比較を示す。

記録磁化分布と比べて、反磁界分布の非対称性は緩和されており、特に  $H_c$  の高い媒体では、記録磁化のつくる反磁界と arctan 型の磁化のつくる反磁界はほぼ一致する。

## 5. まとめ

垂直 2 層膜媒体の記録層内の反磁界に関する数値計算と解析解より、以下のことが分かった。

- 1) 記録、再生時にヘッドがあると反磁界が大きく減少する。その結果、単層媒体に対する 2 層膜媒体の下地層による反磁界の減少量  $\Delta H_d$  は、下地層の膜厚

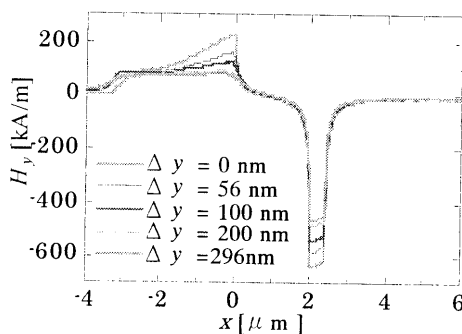


Fig.5 Perpendicular magnetic field distribution of SPT head as a function of  $\Delta y$  (see text).

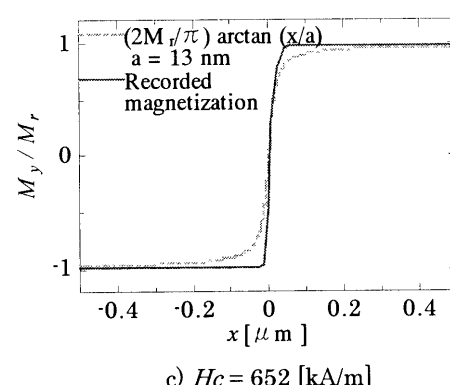
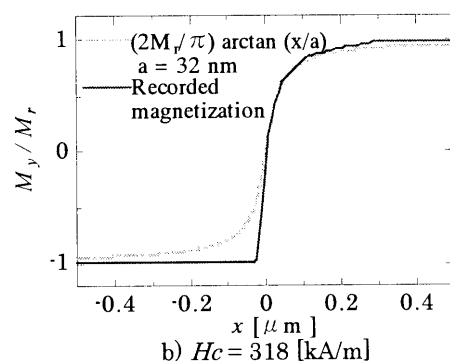
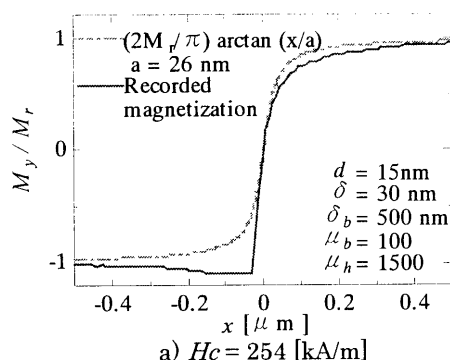


Fig. 6 Recorded magnetization profiles (solid lines) and arctangent magnetization profiles (dotted lines) of an isolated transition.

$\delta_b = 500 \text{ nm}$  では膜厚  $\infty$  (解析解) の約 92 %, 膜厚  $\delta_b = 100 \text{ nm}$  でも膜厚  $\infty$  (解析解) の約 75 % になる。

- 2) 下地層の比透磁率  $\mu_b = 100$  以上であれば, 下地層膜厚  $\delta_b = 100 \text{ nm}$  であっても,  $\Delta H_d$  の値は解析式の 80 % 以上になる。以上の結果より  $\delta_b \geq 100 \text{ nm}$ ,  $\mu_b \geq 100$  であれば, 記録層内の反磁界は解析式を用いてほぼ見積もることが出来る。

また, SPT ヘッド/2 層膜媒体系でのシミュレーションの結果より, 以下のことが分かった。

- 3) 主磁極表面に対する補助磁極表面の引っ込み量により, 補助磁極の主磁極側から出る磁界に大きな差がある。
- 4) 記録磁化  $M_r$  の分布は記録過程での反磁界により, 磁化遷移領域で非対称な形になる。
- 5) 記録層の保磁力が大きくなる程磁化転移幅は小さくなり, かつ非対称性は緩和する。その為保磁力の大きな

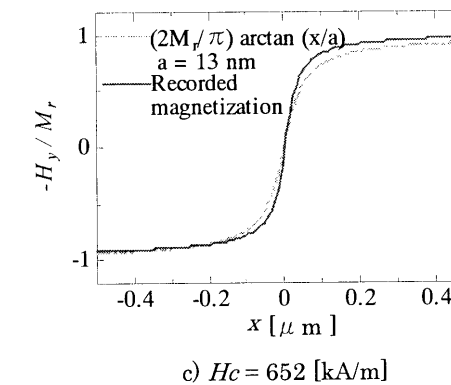
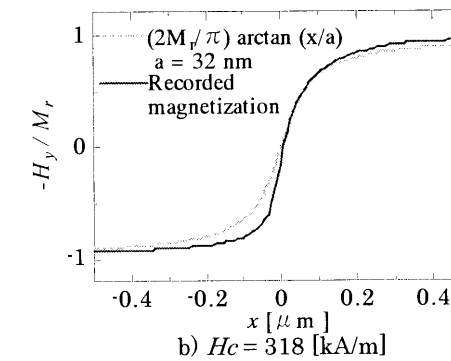
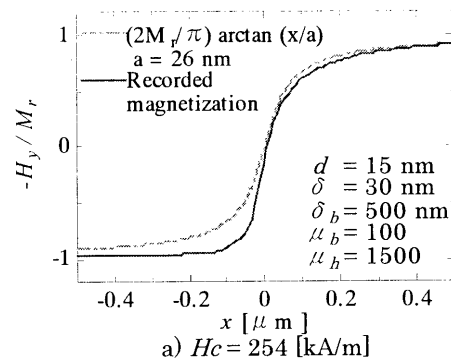


Fig. 7 Demagnetizing field profiles for recorded magnetizations and arctangent magnetizations in Fig. 6.

体においては, 反磁界の観点から磁化を arctan 型に近似することは有効である。

## 謝 辞

本研究を行うに当たって, 情報ストレージ研究推進機構による研究助成, ならびにシミュレーションプログラム MAGRAS を使用させて頂きました日立製作所に深謝致します。

## 文 献

- 1) S.Takanosu, A.Matsuo, N.Fujiwara, S.Iida, and K.Shinagawa : *J. Mag. Soc. Jpn.*, 24,359 (2000)
- 2) J.Hokkyo, H.Hokkyo, H.Matsudera, K.Yamada, and T.Osaka : *Digests of the 23rd Annual Conference on Magnetics in Jpn.* P.26 (1999)
- 3) I.A.Beardsley : *J.Appl.Phys.*, 53,2582 (1982).
- 4) J.Hokkyo : *Proc. of Sendai Symposium of Magnetic Recording*, P.47 (1982)

2002 年 10 月 7 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録