

磁気転写特性に及ぼすマスター・スレーブ間スペーシングの影響

Influence of the Spacing between Master and Slave Media on Magnetic Contact Duplication Characteristics

杉田龍二・小峰啓史・村野井徹夫・西川正一*・安永正*・長尾信*

茨城大学工学部, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1(〒316-8511)

*富士写真フイルム(株), 神奈川県小田原市扇町 2-12-1(〒250-0001)

R. Sugita, T. Komine, T. Muranoi, M. Nishikawa*, T. Yasunaga*, and M. Nagao*

Dept. of Media and Telecomm. Eng., Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

*Recording Media Products Div., Fuji Photo Film Co., Ltd., 2-12-1 Ogicho, Odawara, Kanagawa 250-0001, Japan

In the patterned master magnetic contact duplication technique, the spacing between master and slave media seriously affects the duplication characteristics. When a slave medium with coercive squareness S^* of 0.43 was duplicated by using a master medium with a pattern width L of 2.5 μm and a magnetic layer thickness of 1 μm , it was found from experiments and simulation that the spacing loss factor K is about 30 dB. The reason for this small value is that the recording demagnetization in the duplication process is very weak. It is shown by simulation that a higher S^* value in slave media is advantageous for the patterned master magnetic contact duplication.

Key words: magnetic contact duplication, servo-writing, hard disk

1. はじめに

パターンマスター磁気転写法は、ハードディスクにサーボ信号を高速かつ安価に形成する有力な手段である^{1)~9)}。この方法により、マスター媒体の凹凸パターンに対応した磁化パターンをスレーブ媒体に形成することができ、磁気ヘッドで記録した場合と同等品質の信号が記録できることが確認されている。パターンマスター磁気転写法における記録特性には、磁気ヘッド記録におけるヘッド・媒体間スペーシングと同様に、マスター・スレーブ間スペーシングが大きな影響を及ぼすことが予想される。しかし、この影響については、まだ全く報告されていない。

そこで本研究では、マスター・スレーブ間スペーシングが磁気転写特性に及ぼす影響について、実験とコンピュータシミュレーションにより明らかにする。

2. 実験方法及びシミュレーション方法

実験に用いたマスター媒体は、Si 基板上に $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ 膜(飽和磁化 $M_s = 1900 \text{ emu/cm}^3$, 保磁力 $H_c \approx 70 \text{ Oe}$, 透磁率 $\mu \approx 100$)をストライプ状に形成したものであり、ストライプパターンの幅(以下パターン幅 L と記す)は 2.5 μm , ストライプの長さは

パターン幅に比べて十分に長い 7 mm である。また隣接ストライプ間の間隔は L と同じ 2.5 μm , ストライプパターンの厚み(マスター磁性層厚 t)は 0.2 及び 1 μm とした。磁気転写時にマスター・スレーブ間にスペーシングを設けるため、マスター媒体表面にスパッタリング法によって非磁性の Mo 膜を形成した。その膜厚は 0, 0.2 μm , 0.4 μm 及び 0.6 μm とした。スレーブ媒体としては、DVC (Digital Video Cassette) 用蒸着テープ (ME テープ)を使用した。ME テープの磁性層厚、飽和磁化、長手方向保磁力は、それぞれ 0.2 μm , 500 emu/cm^3 , 1.5 kOe である。

磁気転写の際には、まずスレーブ媒体としての ME テープをテープ走行方向に一樣に初期磁化し、次にこのスレーブ媒体にパターン幅方向を初期磁化方向と一致させてマスター媒体を接触させ、初期磁化と反対向きに直流転写磁界 H_a を印加した。転写された磁化状態の観察はビッター現像法及び磁気力顕微鏡 (MFM) により行った。

また、マスター媒体のみが単独に存在する状況で直流磁界 H_a を印加したときの、マスター媒体近傍の磁界分布を有限要素法により求め、スペーシング依存性を推定した。ここで、 H_a はマスターストライプパターンの幅方向に印加し、パターン長さはパターン幅 L よりも十分に長いと仮定して 2 次元近似計算を行った。隣接ストライプ間隔は L と同じにした。

3. 結果及び考察

3.1 転写実験結果

スレーブ媒体を 6 kOe の磁界で初期磁化し、これに、スペーシングとしての Mo 膜の膜厚の異なるマスター媒体を接触させて、2 kOe の直流転写磁界 H_a を初期磁化方向と逆向きに印加して転写を行った。今回スレーブ媒体として使用した ME テープにとって 2 kOe は最も優れた転写が行われる磁界である。一般に、転写磁界をスレーブ媒体の保磁力よりもやや高い値に設定したときに最も優れた転写が行われる¹⁾。

Fig. 1 に、マスター磁性層厚 $t = 1 \mu\text{m}$ のマスター媒体を用いて磁気転写した後、ビッター現像したスレーブ媒体の表面写真を示す。(a), (b), (c), (d)は、それぞれ Mo 膜厚が 0, 0.2 μm , 0.4 μm 及び 0.6 μm のマスター媒体を用いて転写されたもので

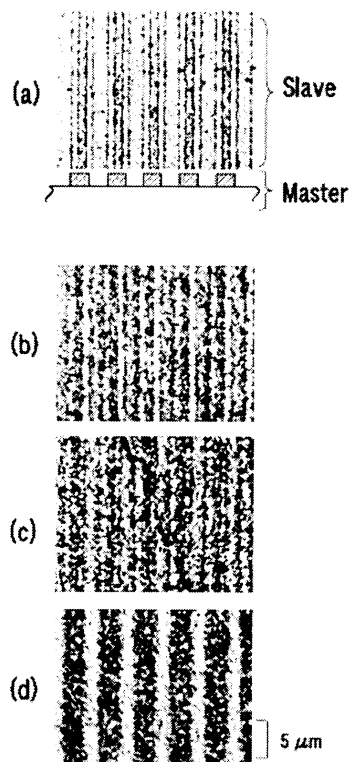


Fig. 1 Bitter patterns of slave media duplicated by using master media with t of $1\ \mu\text{m}$ and spacings of (a) 0, (b) $0.2\ \mu\text{m}$, (c) $0.4\ \mu\text{m}$, and (d) $0.6\ \mu\text{m}$.

ある。なお、ME テープ表面には $0.01\ \mu\text{m}$ 程度の突起と、 $0.01\ \mu\text{m}$ 程度の保護膜が形成されている。それゆえ、実際のマスター・スレーブ間スペーシングは、Mo 膜厚に約 $0.02\ \mu\text{m}$ を加えた値になっていることになるが、これは誤差範囲とみなし、以下、Mo 膜厚を転写記録のマスター・スレーブ間スペーシング(以下、転写スペーシング、あるいはスペーシングという)とする。Fig. 1 から、磁性粒子がマスターパターンのエッジに対応する部分に付着しており、その状態が、スペーシングが増加するに伴って不鮮明になっていくことがわかる。

Fig. 1 からスペーシングの影響が明瞭に出ていることがわかるが、さらに、定量化するために MFM により転写磁化状態を測定した。実測した MFM データを高速フーリエ変換(FFT)し、その基本波の振幅のスペーシング依存性を Fig. 2 に示す。このグラフを用いて、転写時のスペーシング損失 L_s が

$$L_s\ (\text{dB}) = -K \cdot d / \lambda$$

に従うと仮定して転写時のスペーシング損失係数 K を求めると $29\ \text{dB}$ となった。ここで d , λ は、それぞれ転写スペーシング及び記録基本波波長(マスターストライプパターンの周期 $2L$ ($= 5.0\ \mu\text{m}$))である。

ヘッド記録の場合、一般に記録ヘッドギャップ長が小さく、これと記録ヘッド・媒体間スペーシング d_t が互いに近い値をもっているために、ヘッドの記録の分解能(ヘッド磁界強度の媒体走行方向に対する傾斜)に対して d_t の影響が大きく、その結果、

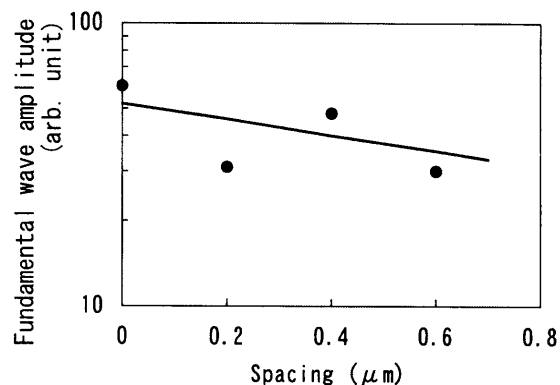


Fig. 2 Relation between the fundamental wave amplitude of data measured by MFM and the spacing.

記録スペーシング損失 L_r を $L_r\ (\text{dB}) = -K_r \cdot d_t / \lambda$ と表わしたときの記録スペーシング係数 K_r は一般に大きくなる ($> 50\ \text{dB}$)。さらにヘッド・媒体間相対速度が大きい場合には、記録信号の周波数が高くなるので、記録ヘッドコアの渦電流損失など動的な影響を受けて、さらに K_r は大きくなる。それに対して本転写方式で得られた $K = 29\ \text{dB}$ はかなり小さい。これは、本転写方式では、ヘッドギャップ長に相当するマスターの隣接パターン間隔(パターン幅 L と同じ)が転写スペーシング d に比較して非常に大きいために、マスターからの磁界分布に与える d の影響はヘッド記録の場合よりも小さく、さらに静的な記録であるために転写時の減磁(転写記録減磁)が少ないことによるものと考えられる。従って、スペーシングの観点からは、磁気ヘッド記録よりも転写記録の方が優れた記録が実現できると言える。

3.2 シミュレーションによるスペーシング損失係数の見積り

マスター媒体のみが単独に存在する状況で直流磁界 H_a を印加したときの、マスター媒体近傍の磁界分布を有限要素法により求め、これから転写特性を推定すると実験結果と良く一致することがわかっているので^{8),10)}、ここでも同様のシミュレーションによってスペーシング損失係数 K を推定する。なお、文献⁸⁾、¹⁰⁾のシミュレーションにおいてはスレーブ媒体の磁気特性は考慮しなかったが、ここではスレーブ媒体のヒステリシス曲線を考慮する。

Fig. 3 にシミュレーションの際のマスター媒体の磁性層の構成を示す。 L がパターン幅であり、紙面に対して垂直方向に、無限に長い磁性膜が図のように配置されている。 t が磁性膜の膜厚である。計算では磁性層の M_s , H_c , μ をそれぞれ $1900\ \text{emu/cm}^3$, $0\ \text{Oe}$ 及び 100 とした。

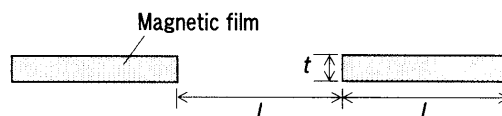


Fig. 3 Magnetic film configuration of the master media used in the simulation.

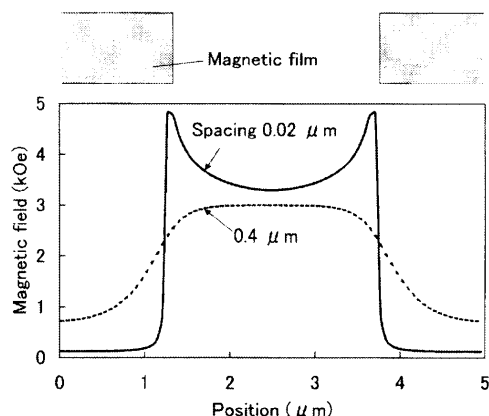


Fig. 4 Simulated magnetic field H_{totalx} near a master medium with L of $2.5 \mu\text{m}$ and t of $1 \mu\text{m}$.

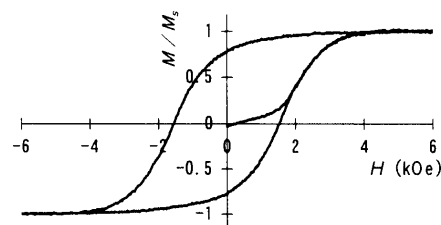


Fig. 5 Hysteresis curve of an ME tape.

Fig. 4 にシミュレーションにより求めた、 L が $2.5 \mu\text{m}$ 、 t が $1 \mu\text{m}$ のマスター媒体近傍の磁界分布を示す。図中の 2 本の曲線は、それぞれ磁性膜表面から約 $0.02 \mu\text{m}$ 及び $0.4 \mu\text{m}$ 離れた面における磁界分布である。これらの磁界分布は、それぞれスペーシングが $0.02 \mu\text{m}$ 、及び $0.4 \mu\text{m}$ の場合にスレーブ媒体に転写された磁化状態を推定するのに用いる。この計算において 2 kOe の一様磁界 H_a を Fig. 3 の左から右の向き (x 方向の正の向き) に印加している ($|H_a| \equiv H_a = H_{ax}$)。Fig. 4 の縦軸は H_{total} のマスター磁性膜のストライプパターン幅方向成分 H_{totalx} を示している。ここで、 H_{total} は印加磁界 H_a によって磁化されたマスター磁性膜によって生ずる磁界 H_{master} と H_a との和である (従って、 $H_{totalx} = H_{masterx} + H_a$)。横軸は位置 x であり、図の上部に磁性膜の位置を示してある (隣接ストライプパターン間隔の中心を $x = 2.5 \mu\text{m}$ としている)。

次に、Fig. 4 に示される分布を有する磁界で転写されたスレーブ媒体の磁化分布を推定する。スレーブ媒体である ME テープのヒステリシス曲線は Fig. 5 の形をしており、この図を用いて、Fig. 4 の磁界により転写された磁化を推定する。なお今回はスレーブ媒体の反磁界を無視して考察する。ME テープの磁性層厚は $0.2 \mu\text{m}$ であり、記録されるビット長は $2.5 \mu\text{m}$ であるので、第 1 次近似的には反磁界を無視して考える。

Fig. 5 はスレーブ媒体 (ME テープ) の磁化の長手方向成分 (x 方向成分) の磁界に対するヒステリシス曲線を示す。保磁力角型比 S' は 0.43 である。ME テープは、転写磁界 H_a を印加

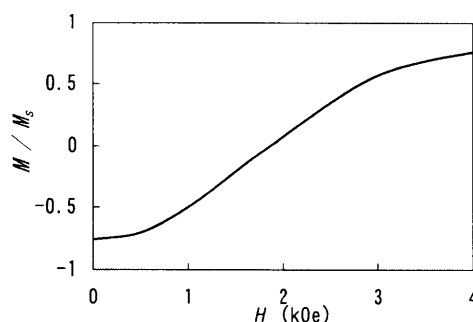


Fig. 6 Relation between the magnetization and applied magnetic field for an initially magnetized slave medium.

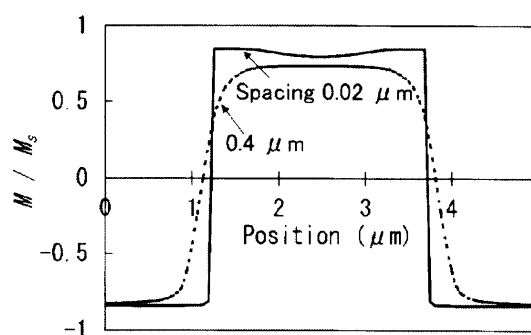


Fig. 7 Estimated magnetization of a slave medium duplicated by using master media with spacings of $0.02 \mu\text{m}$ and $0.4 \mu\text{m}$, $L = 2.5 \mu\text{m}$ and $t = 1 \mu\text{m}$.

する前に H_a と逆向きに初期磁化され、 $-M_r$ (M_r : ME テープの残留磁化) になっている (Fig. 5 のヒステリシス曲線において、負側の縦軸との交点の値 ($-M_r$) になっている)。この状態の ME テープにマスター媒体を接触させて転写磁界 H_a を印加することにより、ME テープには Fig. 4 に示される磁界 H_{totalx} が初期磁化と逆向きに加わる。これにより、ME テープの磁化は、Fig. 5 の横軸が H_{totalx} になるまでヒステリシス曲線のメジャーループに沿って変化し、転写プロセス完了時には転写磁界が 0 になるので、そこからマイナーループに沿って減少し、 $H = 0$ における磁化が残る。これが転写された磁化となる。

この転写された磁化を次のようにして見積もる。まず、スレーブ媒体に -6 kOe の磁界をかけて $-M_r$ に初期磁化する。次に、正の磁界を印加した後、磁界を 0 としたときのスレーブ媒体の磁化を振動試料型磁力計 (VSM) により測定する。この測定により求めた磁化と正磁界との関係を Fig. 6 に示す。なお、スレーブ媒体の透磁率はマスター媒体の透磁率に比べて大幅に小さいので、スレーブ媒体があっても Fig. 4 の磁界分布は変わらないと仮定する。Fig. 6 を用いて、Fig. 4 の縦軸の磁界に対応する磁化を求めると、これがスレーブ媒体に転写された磁化となり、Fig. 7 のようになる。Fig. 7 の縦軸はスレーブ媒体に残る転写磁化、横軸は Fig. 4 に対応した位置を表わす。Fig. 7 の

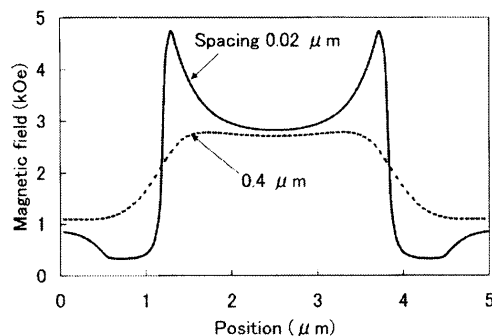


Fig. 8 Simulated magnetic field H_{totalx} near a master medium with $L = 2.5 \mu\text{m}$ and $t = 0.2 \mu\text{m}$.

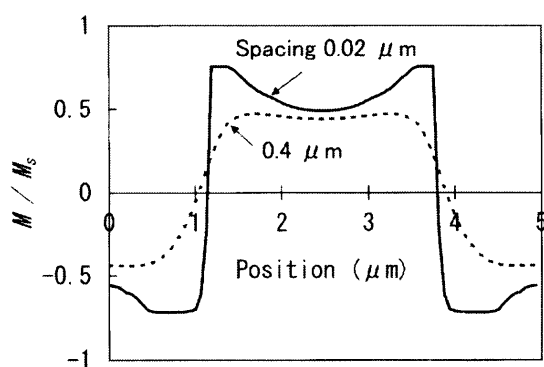


Fig. 9 Estimated magnetization of an ME tape duplicated by using master media with spacings of $0.02 \mu\text{m}$ and $0.4 \mu\text{m}$, $L = 2.5 \mu\text{m}$, and $t = 0.2 \mu\text{m}$.

波形を FFT し、その基本波の振幅からスペーシング損失係数 K は 30 dB と求まった。これは、前節の実験値に非常に近い値であり、ここで述べたシミュレーション方法により実験結果を良く予測できることがわかる。

3.3 スペーシング損失のマスター膜厚依存性

以上の実験結果及びシミュレーション結果から、シミュレーションによって磁気転写特性のスペーシング依存性がかなり正しく推定できることがわかったので、本節ではマスター磁性層厚が薄くなった場合のスペーシング損失について主にシミュレーションにより検討する。

前節では $L = 2.5 \mu\text{m}$, $t = 1 \mu\text{m}$ のマスター媒体を検討したが、ここではこれよりも薄い、 $L = 2.5 \mu\text{m}$, $t = 0.2 \mu\text{m}$ のマスター媒体について前節と同様のシミュレーションを行う。Fig. 8 に、シミュレーションにより求めた、 $L = 2.5 \mu\text{m}$, $t = 0.2 \mu\text{m}$ のマスター媒体近傍の磁界分布を示す。図中の 2 本の曲線は、それぞれ磁性膜表面から約 $0.02 \mu\text{m}$ 及び $0.4 \mu\text{m}$ 離れた面における磁界分布である。縦軸は Fig. 4 と同様に H_{totalx} である。

次に、Fig. 8 に示される分布を有する磁界で転写されたスレーブ媒体の磁化分布を、前節と同様にして推定すると、Fig. 9

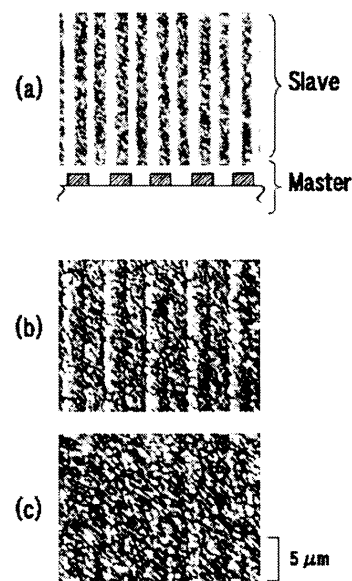


Fig. 10 Bitter patterns of slave media duplicated by using master media with $t = 0.2 \mu\text{m}$ and with spacings of (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $0.2 \mu\text{m}$, and (c) $0.4 \mu\text{m}$.

のようになる。Fig. 9 の波形を FFT し、その基本波の振幅からスペーシング損失係数 K は 39 dB となり、 $t = 1 \mu\text{m}$ のマスターの場合の 30 dB よりも大きくなっている。すなわち、磁気転写においてはスペーシング損失はマスター磁性層厚に依存し、マスター磁性層厚が厚い方がスペーシングの観点から有利であることが推定される。Fig. 10 に、実際に L が $2.5 \mu\text{m}$, t が $0.2 \mu\text{m}$ のマスター媒体を用いて転写を行った場合のビッター現像写真を示す。(a), (b), (c) は、それぞれマスター媒体表面に形成した Mo 膜厚が 0 , $0.2 \mu\text{m}$ 及び $0.4 \mu\text{m}$ のマスター媒体を用いて転写したものである。Fig. 10 から、(b), (c) においては、磁性粒子の付着がかなり不鮮明になっており、 $t = 1 \mu\text{m}$ のマスター媒体を用いて転写した場合のビッター現像写真 Fig. 1 と比較すると、明らかにスペーシングの影響が大きくなっていることがわかる。

3.4 スペーシング損失のスレーブ磁気特性依存性

ここではスレーブ媒体のヒステリシス曲線の形状が異なった場合のスペーシング損失について、前節と同様にシミュレーションにより推定する。マスター媒体としては $L = 2.5 \mu\text{m}$, $t = 1 \mu\text{m}$ を想定する。スレーブ媒体のヒステリシス曲線としては Fig. 11 を想定する。これは保磁力角型比 S^* が Fig. 5 に示されるヒステリシスの 0.43 よりも大きく、 0.68 となっている。

Fig. 7 の磁化分布を求めた場合と同様にして、Fig. 4 と Fig. 11 から転写後にスレーブ媒体に残る転写磁化の分布を求めると、Fig. 12 が得られる。Fig. 12 の波形を FFT し、その基本波の振幅からスペーシング損失係数 K は 12 dB と求まった。これから S^* が大きい方が、転写特性に及ぼすスペーシングの影響が小さくなることが期待される。

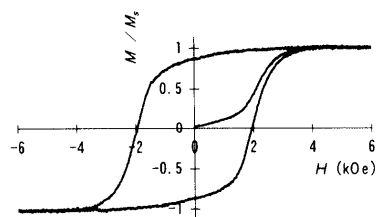


Fig. 11 Hysteresis curve of a slave medium with a higher S^* than that in Fig. 5.

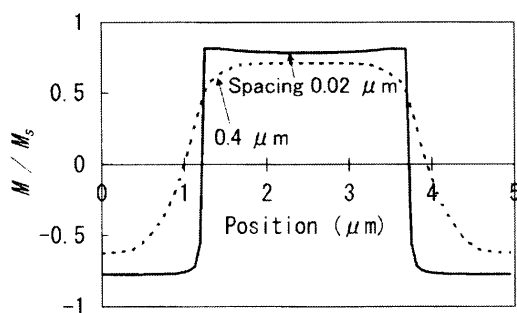


Fig. 12 Estimated magnetization of a slave medium with a higher S^* than an ME tape duplicated by using master media with spacings of $0.02\ \mu\text{m}$ and $0.4\ \mu\text{m}$, $L = 2.5\ \mu\text{m}$, and $t = 1\ \mu\text{m}$.

4. まとめ

パターンマスター磁気転写法において、マスター・スレーブ間スペーシングが磁気転写特性に及ぼす影響を検討し、次のことが明らかになった。

(1) パターン幅 L が $2.5\ \mu\text{m}$ で磁性層厚 t が $1\ \mu\text{m}$ のマスター媒体とスレーブ媒体としての ME テープを用いて、マスター・スレーブ間スペーシングを変化させて転写実験を行った結果、転写記録のスペーシング損失係数 K は $29\ \text{dB}$ であることがわかった。これをシミュレーションによっても検討したが、実験とほぼ

一致する $K = 30\ \text{dB}$ が得られた。磁気ヘッド記録に比べこのように K がかなり小さい理由は、磁気ヘッド記録では一般に記録ヘッドギャップ長と記録ヘッド・媒体間スペーシングが近い値をもつので、媒体の記録磁化分布がスペーシングの影響を大きく受けるのに対して、磁気転写ではマスター媒体の隣接ストライプ間隔がスペーシングに比べて非常に大きいために、スレーブ媒体の転写磁化分布に対するスペーシングの影響が小さく、さらに磁気転写が静的記録であるためであると考えられる。

(2) 磁気転写におけるスペーシング損失にはマスター磁性層厚が影響を及ぼし、磁性層厚が厚い方がスペーシング損失係数が小さかった。

(3) スレーブ媒体の保磁力角型比 S^* もスペーシング損失に影響し、 S^* が大きい方がスペーシング損失係数が小さいことがシミュレーションにより推定された。

謝 辞 本研究の一部は、日本学術振興会平成 16 年度科学研究費（基盤研究 C16560291）の助成により行われた。

References

- 1) R. Sugita, T. Kinoshita, O. Saito, T. Muranoi, M. Nishikawa and M. Nagao, *IEEE Trans. Magn.*, **36**, p.2285 (2000).
- 2) M. Nishikawa, K. Komatsu, M. Nagao, A. Kashiwagi and R. Sugita, *ibid.*, p.2288.
- 3) R. Sugita, O. Saito, Y. Nakamura, T. Muranoi, M. Nishikawa and M. Nagao, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, p.643 (2001).
- 4) A. Saito, K. Sato, Y. Takano and E. Yonezawa, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, p.1389 (2001).
- 5) B. R. Baker, *J. Appl. Phys.*, **91**, p.8691 (2002).
- 6) R. Sugita, O. Saito, T. Muranoi, M. Nishikawa and M. Nagao, *ibid.*, p.8694.
- 7) M. Nagao, T. Yasunaga and R. Sugita, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, p.68 (2003).
- 8) R. Sugita, T. Muranoi, M. Nishikawa and M. Nagao, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, p.241 (2003).
- 9) H. Suzuki, H. Komoriya, Y. Nakamura, T. Hirahara, T. Yasunaga and M. Nishikawa, *9th JOINT MMM/INTERMAG CONFERENCE*, EB-11 (2004).
- 10) R. Sugita, T. Komine, T. Muranoi, M. Nishikawa, T. Yasunaga and M. Nagao, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, p.231 (2004).

2004 年 10 月 4 日受理, 2005 年 1 月 14 日採録