Influence of Saturation Magnetization of a Master Disk on Its Perpendicular Magnetic Contact Duplication Characteristics

T. Murata, A. Izumi, T. Komine, and R. Sugita

Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken 316-8511, Japan

The influence of saturation magnetization of a master disk on its perpendicular magnetic contact duplication characteristics was investigated by using the two-dimensional finite element method. An investigation of bit printing (where the duplication field is applied in a direction perpendicular to the disk plane) and edge printing (where the duplication field is applied in an in-plane direction), revealed the following points. In bit printing, the influence of saturation magnetization of a master disk on perpendicular duplication characteristics is very small when the duplication field is nearly equal to the coercivity of the slave (4 kOe), which is the optimum field. On the other hand, in edge printing, the duplication characteristics are better for high saturation magnetization of a master disk than for low saturation magnetization. The cause of this difference in the influence of saturation magnetization of a master disk is the demagnetizing field of the master. In bit printing, the influence of saturation magnetization of a master disk is small because of the high demagnetizing field coefficient, while in edge printing, the influence of saturation magnetization of a master disk is large because of the low demagnetizing field coefficient.

Key words: magnetic contact duplication, perpendicular magnetic recording media, servo signal, servo writing

マスターディスクの飽和磁化が垂直磁気転写特性に及ぼす影響

村田剛史・和泉昭彦・小峰啓史・杉田龍二

茨城大学工学部, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 (〒316-8511)

1. はじめに

ハードディスクの高密度化, 大容量化が進み, 垂直磁気記録方式を採用したハードディスクの実用化が始まっている。また, サーボ信号を高速に書き込む方法である磁気転写法¹⁾を, 垂直記録媒体へ適用すべく研究が行われている²⁻⁵⁾。磁気転写法は, マスターディスクの磁性層が転写時に印加する磁束を吸い込む現象を利用して, マスターディスクの凹凸パターンをスレーブディスクに磁化の変化として転写するものである。転写の際には, マスターディスクからの強い磁場が必要であるため, マスターディスクが有する磁性層の飽和磁化が転写特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし, 磁気転写に用いるマスターディスクの飽和磁化が垂直磁気転写特性に及ぼす影響は, まだ明らかになっていない。また, 垂直記録媒体への磁気転写法としては, 転写磁場を媒体膜面の垂直方向に印加するビット転写と, 面内方向に印加するエッジ転写²⁾の2通りがあり, いずれの方法においても垂直磁気転写が可能である。しかし, 両転写法の優位性等はまだ明らかになっていないと言えない。そこで本研究では, 2次元有限要素法を用いて, マスターディスクの飽和磁化が垂直磁気転写特性に及ぼす影響を, 両転写法について比較しつつ検討を行った。

2. シミュレーション方法

ビット転写においては, 一方向に初期磁化したスレーブディスクにパターンニングされた磁性層を有するマスターディスクを接触させ, 初期磁化と反対向きに転写磁場を印加する。これにより, マスター磁性層接触部では磁場が強くなるため初期磁化が反転され, 一方, 非接触部では磁場が弱くなり初期磁化が保存される。その結果, マスターディスクのパターンがスレーブディスクに転写される。エッジ転写においては, 消磁状態のスレーブディスクにマスタ

Fig. 1 Simulation model.

ーディスクを接触させ, 媒体膜面内方向に転写磁場を印加する。すると, マスター磁性層エッジ部で強い垂直磁場成分が現れ, これにより, スレーブディスクが垂直方向に磁化される。なお本研究では, 垂直磁気転写特性における第1次近似として, 両転写法における磁場及び磁化の垂直成分のみを考慮する。両転写法における記録層表面の磁場分布を求め, 磁場の垂直成分分布及びFig. 2に示されるスレーブディスクにおける垂直磁化膜の垂直方向ヒステリシス曲線⁴⁾から, 転写された垂直方向磁化分布を求めた。

シミュレーションに用いたモデルをFig. 1に示す。また, マスターディスク及びスレーブディスクの磁気特性及び膜厚 δ をTable

1 に示す。マスターディスクのビット長を 100 nm とした。垂直磁化膜は、マスターディスクの磁性層から 10 nm 離れて SUL に接して配置した。なお系の対称性より、Fig. 1 の破線で囲まれた、マスター磁性層を 1/2 含む領域を計算領域とした。ビット転写では転写磁場を z 方向に、エッジ転写では x 方向に印加した。マスター磁性層の飽和磁化 M_s を 490, 1000, 1500, 1900 emu/cm³ と変えた。マスター磁性層及び SUL とともにヒステリシス曲線は飽和を考慮して折れ線で近似し、いずれも透磁率を 100 とした。また、マスター磁性層それぞれの M_s における飽和磁場 H_s は、62, 127, 190, 240 Oe, SUL の H_s は 102 Oe である。

次に、マスター磁性層中心位置における磁束密度、反磁場、磁化及び反磁場係数を求めた。反磁場は、マスター磁性層の B-H 曲線を用いて計算した。

Table 1 Magnetic properties and thickness of master and slave disks.

		M_s [emu/cm ³]	H_c [kOe]	δ [nm]
Master disk		490~1900	0	100
Slave disk	Recording layer	500	4	20
	SUL	800	0	200

Fig. 2 Hysteresis loop of a perpendicular magnetic film of a slave disk in the perpendicular direction.

3. シミュレーション結果及び考察

3.1 ビット転写特性のマスターディスク M_s 依存性

飽和磁化 490 emu/cm³ のマスターディスクに、4 kOe の膜面垂直方向転写磁場を印加した場合に、スレーブディスクに転写された磁化の垂直成分 M_z を Fig. 3 に示す。同図の縦軸はスレーブディスクの飽和磁化 M_s で規格化してある。なお、ここで初期磁化されたマスターディスクの M_z/M_s を -1 としている。マスター磁性層との接触部で磁化が反転し、非接触部では初期磁化が保存されていることがわかる。

Fig. 3 Magnetization distribution of the slave disk in the case of bit printing with a duplication field of 4 kOe using a master disk with a saturation magnetization of 490 emu/cm³.

マスターディスクの飽和磁化を 490, 1000, 1500, 1900 emu/cm³ と変えた場合の、スレーブディスクに転写された磁化の転写磁場依存性を Fig. 4 に示す。同図の縦軸は、Fig. 3 における磁化の最大値と最小値の差 $\Delta M_z / M_s$ である。 $\Delta M_z / M_s = 2$ のとき、スレーブディスクの磁化が上向き、下向きとも飽和していることを示している。なお、 $\Delta M_z / M_s$ が大きいほど高い再生出力が得られると考えられるので、大きな $\Delta M_z / M_s$ ほど転写特性が優れていると言える。

ビット転写において転写磁場は、従来、スレーブディスクの保磁力 (4 kOe) 付近が最適とみなされていた⁵⁾。Fig. 4 から、この最適転写磁場付近では、転写特性のマスターディスク M_s 依存性はほとんど見られず、マスターディスクの M_s が 490 emu/cm³ の場合にわずかに劣化する程度であることがわかる。これは、ビット転写ではマスターディスクの反磁場係数が大きいため、マスターディスクが吸収する磁束の量が、マスターディスクの M_s によってほとんど変わらないためだと推定される (反磁場係数に関しては、3.4 節で考察する)。しかし、転写磁場を強くすると転写特性のマスターディスク M_s 依存性が見られる。マスターディスクの M_s が 490 emu/cm³ と低い場合、強い転写磁場で転写特性が大きく劣化する。これは、マスターディスクの M_s が低い場合、転写磁場が強くなるとマスターディスクが飽和するために、マスターディスクとの非接触部における磁化も書き換えられるためである (マスターディスクの磁化に関しては、3.3 節で考察する)。マスターディスクの M_s が高い場合は、転写磁場を強くしてもマスターディスクは飽和しないが、マスターディスクとの接触部の磁化は飽和値になり、かつ非接触部の磁化も書き換えられることにより、接触部と非接触部との差が減り転写特性が劣化する。

Fig. 4 Dependence of $\Delta M_z / M_s$ on the duplication field H_a in the case of bit printing.

3.2 エッジ転写特性のマスターディスク M_s 依存性

飽和磁化 1900 emu/cm³ のマスターディスクに、4 kOe の面内方向転写磁場を印加した場合に、スレーブディスクに転写された磁化の垂直成分 M_z を Fig. 5 に示す。マスター磁性層エッジ部近傍でスレーブディスクが垂直方向に磁化されていることがわかる。

Fig. 5 Magnetization distribution of the slave disk in the case of edge printing with a duplication field of 4 kOe using a master disk with a saturation magnetization of 1900 emu/cm³.

マスターディスクの飽和磁化を 490, 1000, 1500, 1900 emu/cm³ と変えた場合、スレーブディスクに転写された磁化の転写磁場依存性を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から、マスターディスクの M_s が 490 emu/cm³ の場合は、転写磁場を強くしても転写特性はほぼ変わらないが、 M_s が 1000 emu/cm³ 以上の場合、転写磁場を強くすると転写特性が向上し飽和する傾向があることがわかる。飽和する磁場の値は $M_s = 1000$ emu/cm³ よりも、1500, 1900 emu/cm³ の方が高い。なお、 $M_s = 1500$ 及び 1900 emu/cm³ の場合、 H_a が 6 kOe 以上で飽和しているのは、 $\Delta M_z / M_s \approx 2$ となり、スレーブディスクの磁化が飽和しているためである。Fig.

4 と Fig. 6 を比較すると、マスターディスクの M_s 依存性は、ビット転写よりもエッジ転写の方が大きい。これは、エッジ転写ではビット転写の場合に比べてマスターディスクの反磁場係数が小さいので、マスターディスクの M_s が大きいほど磁束を吸収する量が増えるためだと考えられる。そのため、マスターディスクエッジ部から発生する磁場の垂直成分もマスターディスクの M_s が高いほど強くなり、転写特性が向上する(反磁場係数に関しては、3.4 節で考察する)。

なお、ビット転写においては $\Delta M_z / M_s$ の最大値が 1.2 程度であるのに対し(Fig. 4)、エッジ転写では $\Delta M_z / M_s = 2$ が得られている(Fig. 6)。この点から、エッジ転写の方がビット転写よりも転写特性が優れていると言える。

Fig. 6 Dependence of $\Delta M_z / M_s$ on the duplication field H_a in the case of edge printing.

3.3 マスター磁性層の磁化

3.2 節におけるビット転写及びエッジ転写のマスターディスク M_s 依存性の相違の原因を調べるために、まず、マスターディスクが有する磁性層の磁化を計算した。Figs. 7, 8 に、ビット転写及びエッジ転写におけるマスター磁性層中心位置の磁化の転写磁場依存性を示す。これらの図では、マスターディスクの飽和磁化 M_s をパラメータとしている。

Fig. 7 において、最適転写磁場とみなせるスレーブディスクの保磁力 (4 kOe) 付近の磁化を見ると、いずれのマスターディスク M_s においてもほぼ同じ値になっていることがわかる。これより、Fig. 4 において、最適転写磁場付近の転写特性がマスターディスクの M_s によってほとんど変わらないのは、マスターディスクの磁化が M_s によらずほぼ同じ値であり、マスターディスクに集中する磁束の量が同程度であるためだと考えられる。また、 M_s が 490 emu/cm³ の場合、転写磁場が 4 kOe でマスターディスクが飽和している。これが、マスターディスクの M_s が 490 emu/cm³ の場合に、強い転写磁場で転写特性が大きく劣化することである。

Fig. 8 から、マスターディスクの M_s が 490, 1000 及び 1500 emu/cm³ の場合、それぞれ 2, 4 及び 6 kOe で飽和していることがわかる。Fig. 6 においては $M_s = 1500$ emu/cm³ と 1900 emu/cm³ の差は見られないが、これは、スレーブディスクの保磁力が 4 kOe であるためであり、より高保磁力のスレーブディスクに対しては $M_s = 1900$ emu/cm³ の方が優れていることが、Fig. 8

から予想される。Figs. 7, 8 を比較すると、ビット転写及びエッジ転写において、各転写磁場におけるマスターディスク磁化の値が異なっているが、これは、マスターディスクの反磁場が影響しているものと考えられる。この点に関して、次節でマスター磁性層中の反磁場について考察する。

Fig. 7 Dependence of the magnetization at the center of the master disk on the duplication field in the case of bit printing.

Fig. 8 Dependence of the magnetization at the center of the master disk on the duplication field in the case of edge printing.

3.4 マスター磁性層中の反磁場

Figs. 9, 10 に、ビット転写及びエッジ転写におけるマスター磁性層中の反磁場 H_d のマスターディスク M_s 依存性を示す。

Figs. 9, 10 から、マスターディスクの M_s が高い場合、転写磁場を強くすると反磁場も強くなることがわかる。マスターディスクの M_s が低い場合には、マスターディスクが飽和するため、高転写磁場にしても、反磁場は強くならない。

また、ビット転写とエッジ転写を比較すると、反磁場に明らかな違いが見られる。この点についてさらに詳細に調べるために、反磁場係数を求めた。Fig. 11 にビット転写及びエッジ転写におけるマスターディスクの反磁場係数 N を示す。なお、反磁場係数 N はマスターディスク中心部にお

ける反磁場を、マスターディスク中心部の磁化の 4π 倍で割ることにより求めた。反磁場係数 N は、ビット転写では約 0.59、エッジ転写では約 0.32 である。これより、ビット転写よりもエッジ転写の方が、反磁場係数が低い状態で動作していることがわかる。このことから、ビット転写では反磁場係数が大きいために、マスターディスクの飽和磁化の影響は小さく、エッジ転写では反磁場係数が小さいために、マスターディスクの飽和磁化の影響が大きいと結論付けられる。

反磁場係数が異なる理由は、磁場の印加方向にある。ビット転写ではマスターディスク媒体膜面垂直方向に磁場を印加するため、膜厚方向にはマスター磁性層は一つしかなく、更に、マスター磁性層が面内方向に無限に広がっているために、反磁場係数は大きくなる。一方エッジ転写では、媒体膜面内方向に磁場を印加するため、面内方向にはマスター磁性層が無限に並び、マスター磁性層面内方向端面に表れる磁極が互いに引き合うため、全体としてみると反磁場係数が小さくなる。

Fig. 9 Dependence of $-H_d$ on the saturation magnetization of the master disk in the case of bit printing.

Fig. 10 Dependence of $-H_d$ on the saturation magnetization of the master disk in the case of edge printing.

Fig. 11 Demagnetizing field coefficients in the cases of bit printing and edge printing.

3.5 ビット転写及びエッジ転写の適応性

ビット転写は、単磁極ヘッド記録と同様な再生波形であるため、現状のサーボ信号記録方式を、できるだけ信号処理系などのドライブ側における変更を少なくして、転写方式に切り替えることが可能である。一方、エッジ転写は、再生波形が単磁極ヘッド記録と異なるので、この方法をサーボ信号記録法として採用するためには、信号処理系の変更も必要と考えられる。しかし、エッジ転写の方がビット転写よりも、転写特性が優れているため、より高密度の垂直ハードディスクに対しては、エッジ転写の方が適しているものと予想される。

4. まとめ

垂直磁気記録媒体に磁気転写する際に、マスターディスクの飽和磁化が垂直磁気転写特性に与える影響を、2次元有限要素法シミュレーションを用いて、ビット転写（媒体膜面の垂直方向に転写磁場を印加）及びエッジ転写（媒体膜面の面内方向に転写磁場を印加）に対して検討し、次のことが明らかになった。

ビット転写において、最適転写磁場とみなせるスレーブディスク保磁力（4 kOe）付近における転写特性は、マスターディスクの飽和磁化の影響はほとんど見られない。一方、エッジ転写においては、マスターディスクの飽和磁化が高いほど優れた転写特性が得られる。このようにマスターディスクの飽和磁化の影響が異なる理由は、マスターディスクの反磁場にあり、ビット転写では反磁場係数が大きいため飽和磁化の影響が小さく、エッジ転写では反磁場係数が小さいため、飽和磁化の影響が大きい。

謝辞 本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)産業技術研究助成事業、及び日本学術振興会科学研究費(基盤研究 C16560291)の支援により行いました。謝意を表します。また、ご協力、有益なご議論を頂きました長尾信氏を始めとする富士フイルム(株)の皆様に深謝致します。

References

- 1) R. Sugita, O. Saito, T. Muranoi, M. Nishikawa and M. Nagao: *J. Appl. Phys.*, **91**, 8694 (2002).
- 2) A. Saito, T. Hamada, T. Ishida, Y. Takano, and E. Yonezawa: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2195 (2002).
- 3) M. Nishikawa, S. Wakamatsu, K. Ichikawa, T. Usa, M. Nagao, T. Ishioka, T. Yasunaga, T. Komine, R. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2612 (2006).
- 4) A. Saito, T. Ono, and S. Takenoiri: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 2234 (2003).
- 5) A. Izumi, Y. Nagahama, T. Komine, R. Sugita, and T. Muranoi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 184 (2006)

2006年9月28日受理, 2007年1月23日採録