

磁気テープの高密度化についての考察

- MRヘッド対応磁気テープの開発指針 -

長尾 信*

Consideration on Recording Density Increase in Magnetic Tape - Development Strategy of Magnetic Recording Tape for MR-head -

Makoto NAGAO*

Abstract

In order to dramatically increase the recording density of magnetic tape systems, MR head must be used. Specifications for 3Gbits/sq in coated magnetic recording tape design with MR head is studied. A candidate for a metal particulate tape (MP tape) design is that magnetic particle length=40nm, Hc=2500Oe. $r=150\text{Gauss} \cdot \mu\text{m}$ and $t=60\text{nm}$. Although MP is considered to be applicable for this media, BaF is more suitable.

1. はじめに

近年の情報量はFig. 1に示すように巨大で2P Byteを越えており¹⁾, その保存には一巻当たりの容量が大きく, ビット当たりの価格が安い特長を有する磁気テープが使用されている。

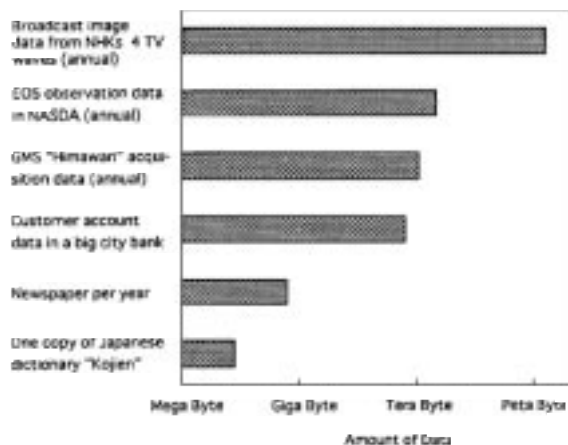


Fig. 1 Mass-scale data archival in Japan

本誌投稿論文 (受理1998年9月21日)

*富士写真フイルム (株) 記録メディア事業部
記録メディア研究開発センター
〒250-0001 神奈川県小田原市扇町2-12-1

*Research & Development Center
Recording Media Products Div.
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Ohgi-cho, Odawara, Kanagawa 250-0001, Japan

情報量は今も急激に伸び続けており, 磁気テープの一層の高密度化, 大容量化が望まれている。

磁気テープは10年10倍の割合で体積記録密度 (面記録密度に磁気テープの厚みを考慮した記録密度) を向上させてきているが, 他の記録媒体も容量を増加させてきており, HDの場合, その面記録密度の増加率は10年100倍である。このまま, この傾向が続くと, いずれ磁気テープの牙城を除々に揺るがしかねない。

記録密度の大きな飛躍には従来使用されてきたインダクティブヘッドに代わり, HDですでに使用されている高感度なMRヘッドを高感度な状態で使用することが必要であり, その検討が本格化され出してきた²⁾。

ここではMRヘッド対応のATOMM (当社のオリジナル技術である超薄層塗布法で作成した磁気記録媒体)^{3) 4) 5)}の仕様を考察し, 開発指針, 課題を求める。また, 比較のためにATOMMと真空成膜法で作成した媒体との違いを示す。

2. 前提条件

ここでは前提となる面記録密度, 記録の割り振り, 記録方法, 信号処理について記す。

面記録密度

磁気テープは体積密度に特徴を有するが, それを構成する面記録密度はほとんど磁性層の性能, すなわち磁気ヘッドの種類に依存するのに対し, 磁気テープの厚み方向には, 主に使用するベース厚みが寄与し, 磁気ヘッドの種類に依存しない。このため, ここでは面記録密度を考える。

目標とする面記録密度として3Gbits/sq inとした。これは現行の磁気テープDVCLP (DVCのLPモード) の最高密度の約8倍に相当する。

記録密度の割り振り

面記録密度は、磁気ヘッドが走行する方向の記録密度 (線記録密度, 最短記録長さは反転間隔と呼ぶ) とそれと直角方向 (トラック密度, 記録長さはトラック幅と呼ぶ) の積となる。最短記録面積が正方形に近づくほど、S/Nが大きく取れるが、トラック幅が狭くなることからトラッキングがむずかしくなる。HDは磁気テープよりもトラック幅を狭くしており、高密度が進むにつれその傾向を強めている。

磁気テープはHDより精度良くトラッキングすることを目指すため、この記録密度の割り振りは最も高い記録密度の磁気テープであるDVCLPに準じる (BPI/TPI = 27) こととする。

記録方法

磁気テープの記録方法には、トラック間にガードバンドを設けて記録する方法とガードバンドを設けずに隣り合うトラックと角度をずらして記録するアジマス記録が存在するが、ここでは高密度記録に適したアジマス記録を前提とする。

信号処理

実際に使用される再生信号は信号処理が施されたものになる。信号処理の種類によって、磁気テープに実際に記録された線記録密度 (FRPI) よりも信号処理が行われた後の線記録密度 (BPI) が高密度なる場合と、逆に低くなる場合がある。ここではBPIがFRPIより大きくなる信号処理の使用、具体的には1.7符号を考えて、 $BPI = 1.33 * FRPI$ とする。

以上の前提から媒体上の仕様はTable 1となる。

Table 1 Track Width and Magnetic Flux Change

面密度 Gbits/ sq in	商品名 設計方針	BPI/ TPI	トラック		線記録密度		反転 間隔 μm	膜厚 μm
			密度 (トラック ピッチ) KTPI	幅 μm	ビット 密度 kBPI	反転 間隔 密度 kFRPI		
3.00	HD	11	16.9	1.5	185	*139	*0.18	0.03
0.38	DVCLP	27	3.8	6.7	102	102	0.25	0.10
3.00	均等配分	27	10.6	2.4	286	220	0.12	0.08

*1.7符号が使用されているとして計算

3. 設計

ここでは磁性層膜厚、磁性粒子サイズ、磁束、抗磁力を設定する。この妥当性については次章で検証する。

磁性層膜厚

磁性層膜厚は一般に薄いほど記録の分解能は向上するが、薄すぎると反転間隔内に含まれる磁性粒子数が

減少しS/Nが小さくなる。磁性層膜厚が反転間隔の1/2程度の場合に、記録された信号の磁界が最も有効に磁気記録媒体の外に出るため、ここでは磁性層膜厚は反転間隔の1/2に設定する。

磁性粒子サイズ

磁性粒子の形態はS/Nに影響を及ぼす。3Gbits/sq inを達成しているHD, ME (蒸着テープ), ATOMMにおける粒子サイズ, 形状をTable 2に示す。ここでMPIはDVCLPの性能を有するメタル磁性体, BaFはバリウムフェライト磁性体を表す。

Table 2 Comparison of Magnetic Particle and Domain Size

	HD	ME	ATOMM	
			MP	BaF
形態	20Φ * 30	5*5*5*20個 ⁽⁶⁾⁷⁾	16Φ * 80	30Φ * 10
粒子体積(nm ³)	9420	2500	16077	7065
体積規格化	1	0.3	1.7	0.8

これよりBaFの体積はHD並であり、かつこれをランダムに配向にした場合には記録方向 (磁気テープの長手方向) への長さもHD並といえる。しかし、MPIは磁性体の体積がHDの約2倍大きいこと、長手方向に3倍強いことがわかる。

磁性粒子形状に関連したS/Nには反転体積内の磁性粒子数が多いほどS/Nが大きく、磁性粒子の長さが長いほど再生の損失が大きくなるため、磁性粒子の長さを短くすること、体積を小さくして粒子数を増やすことが必要となる。

粒子数によるS/Nは

$$S/N = 10 * \log N$$

ここで N: 磁性粒子数

磁性粒子長による再生損失L_iは

$$L_i = \log [\sin (l/2T) / (l/2T)]$$

ここで l: 磁性粒子長

T: 反転間隔

で表される⁹⁾。

ここでは粒子数によるS/Nが30dB以上を確保できること、すなわち1000個以上存在すること、および磁性粒子長はDVCLP同等のL_iであると仮定する。

結果をTable 3に示す。磁性粒子長は40nmとなる。

Table 3 Number of Magnetic Particles per Magnetic Flux Volume

	反転 間隔 μm	膜厚 μm	反転間隔 体積 μm ³	反転 間隔/ 粒子長	粒子 長 nm	粒子 体積 nm ³	粒子数 /反転 間隔体積
3G HD	0.18	0.03	0.008	9.1	30	9,000	920
DVCLP	0.25	0.10	0.167	3.1	80	16,000	4,700
MP	0.12	0.06	0.017	3.1	40	8,000	1,000
BaF	0.12	0.06	0.017	3.1	20	7,000	1,100

BaF: ランダム配向

磁束 (r)

MRヘッドは磁気抵抗効果 (外部からの磁界でMR素子中の磁化の向きが変わり、その抵抗が変化する効果) を利用している。磁気抵抗は下記の式で変化する。

$$R=R_0+ R\cos^2$$

動作原理をFig. 2に示す。抵抗変化は外部磁界が零に対して対称であること、零付近の変化はゆるやかであること、かつ限られた動作範囲を有していることがわかる。極性の判別と感度の向上のためにバイアス磁界 (H_b) を印加して使用している。重要なことは、ある磁界付近で出力が敏感に変化することである。

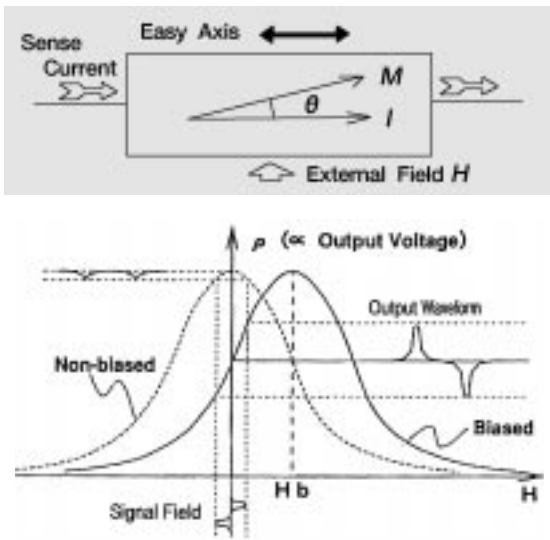


Fig. 2 Operational mechanism of MR head ¹⁰⁾

高感度なMRヘッドはMR素子として薄いFeNi膜を使用しているため、飽和しやすい。それを避けるため、小さな磁束 r を有した磁気テープが望まれる。ここでは実際に商品化されている3Gbits/sq inのHDの r 150Gauss・μmに合わせることにする。Table 4にその場合の r と現行の値との比を示す。これよりMPの r は従来の30%、BaFで60%となっていることがわかる。

抗磁力 (H_c)

高過ぎるH_cは磁気ヘッドで十分な記録ができなくなり、オーバーライトが劣化するが、それ以外の特性は高H_cが良い。

この媒体に適合する記録用の磁気ヘッドを考える。

Table. 4 Magnetic Flux of MP and BaF

	Φr	
	Gauss・μm	現行比
3G HD	150	
DVCLP	500	1
MP	150	0.30
BaF	150	0.63

磁気ヘッドの磁極先端の磁気飽和が深刻にならないためには、

$$H_0 \leq 0.6B_{sm}$$

ここで H₀ : 記録に必要な磁界

B_{sm} : 磁極の磁束密度

H_cの磁気記録媒体が十分記録されるためには、

$$H_0 \geq 3H_c$$

との関係を満たす必要があることが知られている。

B_{sm}として実用化されている15000Gaussを当てはめると、H_c 3000 Oeは記録可能となるが、ここではH_cとしてMPのチャンピオンデータの2500Oeを設定しておく。

Table 5に設定した値をまとめて示す。

4. 設定値の妥当性の検証

前章で設定した物性値を分解能、Channel density、熱安定性から見て、その妥当性を検証する。

分解能とChannel density

分解能は記録電流が逆転したときの遷移幅に依存する。反転の磁化M(x)を

$$M(x) = 2M_R \cdot \tan^{-1}(x/f)$$

ここで f : 遷移勾配パラメータ

で表すとFig. 3に示すように記録電流が反転した時の反転幅は πfとなる。

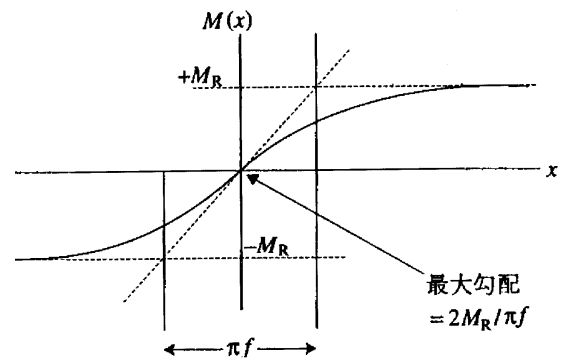


Fig. 3 Magnetization transition

Table. 5 Specification of 3Gbits/sq in Magnetic Recording Tape

	トラック幅 μm	反転間隔 μm	膜厚 μm	ビット体積		反転間隔 / 粒子長	粒子長 nm	粒子体積		粒子数 / ビット	Φr		H _c Oe
				μm ³	相対			nm ³	相対値		Gauss μm	相対値	
3G HD	1.5	0.18	0.03	0.008	0.05	9.0	20	9,000		900	150		2300
DVCLP	6.7	0.25	0.10	0.168	1.00	3.1	80	16,000	1.0	4,700	500	1.0	2250
MP	2.4	0.12	0.06	0.017	0.10	3.1	40	8,000	0.5	1,000	150	0.3	2500
BaF	2.4	0.12	0.06	0.017	0.10	6.0	20	7,000	1.0	1,100	150	0.6	2500

磁気ヘッドの磁界勾配の最大値のところでは記録が決まるとすると、そのときのfは

$$f=2 \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{Mr}{Hc} \cdot \left(\frac{d+f}{2} \right)^{0.5} \right]$$

ここで d : 磁気ヘッドと磁性層間のスペーシング
: 磁性層の膜厚

で表される。

上記の f を用いて半値幅PW50は

$$PW50=2 \left[\frac{(d+f)(d+f+g)^2}{4} \right]^{0.5}$$

ここで g : 再生用磁気ヘッドのギャップ長
で計算できる⁸⁾。

Channel Density (Dch) は

$$Dch = PW50 / Tf$$

で定義され、高密度記録では不可欠なPR (Partial Response) 検出の適応の可能性とその種類を選択する際に活用される。

たとえば、EPR4, E²PR4のPR検出ではそれぞれDch 2, 2.31が適応可能である。

d=0.04 μm, g=0.2 μmとして計算したPW50とDchの値をTable 6に示す。

Table 6 PW50, Dch

	Hc Oe	Φr (=Brδ) Gauss ・ μm	Φr/Hc Gauss ・ μm / Oe	f μm	pw50 μm	Dch
3G HD	2300	150	0.067	0.13	0.21	1.2
DVCLP	2250	500	0.222	0.31	0.40	3.4
MP, BaF	2500	150	0.060	0.14	0.23	1.9

Dchは2以下となっており、今回のPW50はPR処理が可能である値になっていることがわかる。

Fig. 4にBr /HcとPW50の関係を示す¹¹⁾。

今回設定した3Gbits/sq inの仕様は1Gbits/sq inと10Gbits/sq inの間に位置していることがわかる。

上述の2点からBr, δ, Hcの設定は妥当性が高いと判断できる。

熱安定性

磁性粒子が微小になりすぎると温度の擾乱のエネルギーが一個の磁化の方向を保持するエネルギーに勝り、記録された磁化が揺らぐ現象、super-paramagnetismが生じる。高密度記録を実現するためには克服しなければならない課題である。

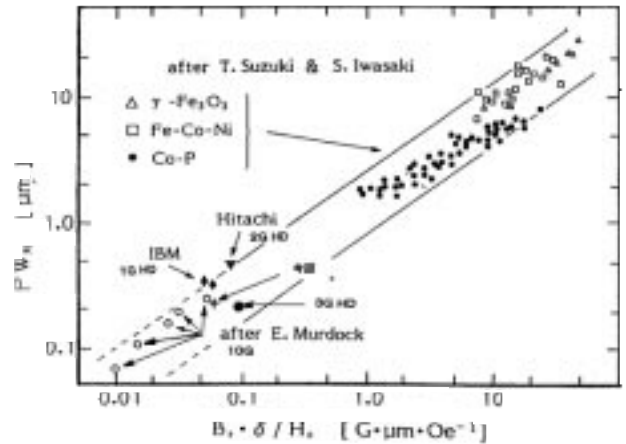


Fig. 4 Relationship between pw50 and Br · δ / Hc

これに関して次に示す熱安定性指標が提案されており、この値 (60又は100) 以上でないと長期間の記録の保持ができないことが理論的、実験的に求められている¹²⁾¹³⁾。

$$\text{熱安定指標} = Ku \cdot V / kT$$

ここで Ku : 磁気異方性エネルギー

V : 磁化単位体積

(磁的に独立した最小の体積)

k : ボルツマン定数

T : 温度

MPでのKuの発生機構は形状異方性であることがわかっている。磁性粒子を回転楕円体で近似すると、形状異方性Kuは下記の式が適応できる。

$$Ku = (Nb - Na) \cdot Is$$

ここで Nb, Na : 反磁場係数

Is : 単位体積当たりの磁束密度

ここで、飽和磁束密度は残留磁束密度に比例すること、磁性粒子の充填密度は従来と同等であること、磁性粒子表面の非磁性層の厚みを3nmとすること、微粒子化する前のKuの値は、鈴木などが実験で求めている値、MP : $2.4 \cdot 10^6$ erg/cc¹⁴⁾を用いること、として微粒子化した場合のKuを推定する。

また、Hcも形状異方性に起因しており、Kuに比例するので現有の値2250Oeから比例で求める。さらに磁性粒子はここまで検討してきた長軸長のみ50%カットしたものに、従来の形状に比例した形状のまま体積を50%に縮小したものも計算する。

この前提から求めたKuV/kTとHcの値をTable 7に示す。両者ともに熱安定性は限界近傍であり、Hcは大き

Table 7 Thermal Stability and Hc

	長軸長 nm	短軸長 nm	長軸 / 短軸	Na - Nb	Ku *10 ⁶ erg/cc	粒子体積 (磁性部) *10 ⁻¹⁷ cc	Is 相対値 於3G	KuV / kT	Hc Oe	
DVCLP	80	16	5.0	5.4	2.40	1.61	0.98	1.00	569	2250
長軸のみ*0.5	40	16	2.5	3.6	0.74	0.80	0.45	0.46	80	689
長短軸共に*0.79	63	13	5.0	5.4	1.02	0.79	0.42	0.43	103	956

く低減する。これより、課題はKu, Hcの向上であることがわかった。

Kuを向上させるためには、その起源を形状異方性だけでなく、結晶異方性の付与などを考える必要があるかも知れない。なお、BaFは微粒子化する必要がないことから、この点においても高密度化に適した磁性粒子といえる。

5. ここで触れなかったが重要な点

いくつか存在するが、特にここでは3点について記す。

サイドフリンジ

トラック幅が狭くなると磁気ヘッドのサイドエッジからの磁界の漏れによる記録 (side fringe) が問題となる。強い一軸の磁気異方性を有する磁気テープが必要となる。

磁気テープ上の欠陥

高密度記録になると小さなサイズの欠陥も問題となる。工程のクリーン強化などが必要になる。

ヘッド研磨性

許容されるヘッド研磨量はMRヘッドの種類に依存する。最も高感度なシールド型MRヘッドではMR素子が磁気テープに接していること、MR素子の厚みが変わるとバイアス磁界が最適値からずれることなどからきわめて少ないヘッド研磨量しか許されない。磁気ヘッドなどへのコンタミを少なくすることを含め、ヘッド研磨量を低減することが必要となる。

6. 真空成膜媒体との差

磁性粒子の数と膜厚

真空成膜の1例としてFig. 5にスパッタによるHDの磁性層の断面を記す。コラムは基板に垂直に成長しており、膜厚を薄くしてもコラムの数すなわち磁性粒子の数は変化しないことがわかる。

MEの場合はコラムの中に複数の磁氣的に結合した磁性粒子が存在するといわれているため、スパッタの場合ほど単純ではないが、膜厚に比例して磁性粒子数が減少しない可能性を有している。



Fig. 5 Cross section of the magnetic layer made by sputtering

NLTS

真空成膜媒体では薄くしても磁性粒子の数を確保できることから、ここで示した設定よりも薄い設定になると推定されること、MEでは垂直磁気異方性を有していることの2点から、真空成膜媒体のNLTSはMPを用いたATOMMよりも小さくなると推定される¹⁵⁾。しかし、BaFは垂直磁気異方性を付与できるので真空成膜に近いNLTSをとりうる能力を有していると思われる。

表面性

塗布法ではベースが有する粗大突起を軽減できる。粗大突起はMRヘッドと接触してTAを引き起こす原因となる。

磁気記録媒体の表面の材質

MRヘッドの場合はインダクティブヘッドよりも磁気ヘッドに対する研磨量を小さくする必要が生じるが、真空成膜媒体の表面はDLC (Diamond Like Carbon) で磁気ヘッドの表面の材質と同じである。

塗布では広い範囲から研磨材料を選べるため、真空成膜媒体より有利と考えられる。

7. まとめ

MRヘッドを用い、市販の約8倍の密度である3Gbits/sq inの密度のATOMMの仕様、課題、留意点、真空成膜媒体との差を考察した。

仕様と課題

MP

- ・磁性粒子の長軸長の短縮：40nm (現行の50%)
- ・高Hc：2500Oe (現行の110%. 長軸長短縮による低下の補償と上乘せ)
- ・低 r ：150Gauss・ μ m (現行30%)
- ・薄層：60nm (現行の60%)

BaF

- ・MRヘッドに適している。

留意点

- ・最も大きいものは媒体の r に直接に影響を及ぼすMRヘッドの最適動作範囲である。

真空成膜との差

- ・真空成膜は薄層にしても粒子数が減少しがたいことから低 r 、低ノイズ/S/N媒体を作成しやすい。
- ・MRヘッドの表面のDLCを削らない材料を広い範囲から選択できることが塗布媒体の強みと思われる。

以上の考察から、3Gbits/sq inは課題はあるものの達成可能な記録密度領域に思われる。特に、BaFはMRヘッド適性が高い磁性粒子と判断できる。早い時期に3Gbits/sq inが達成されることを期待したい。

謝辞

記録メディア研究開発センターの方々には議論と一部のデータの提供をいただいた。感謝致します。

参考文献

- 1) 鈴木俊行, 日本応用磁気学会誌, 21, 1114 (1997)
- 2) T.Ozue, T.Shirai, T.Saito, T.Ikegami, H.Kano, S.Onodera, IEEE Tran. Magn., 34, 1492 (1997)
- 3) S.Shibata, N.Chino, T.Sato, and Chikamasa, FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT, No. 37, 107 (1992)
- 4) H.Inaba, K.Ejiri, K.Masaki, and T.Kitahara, IEEE Trans. Magn., 34, 1666 (1998)
- 5) 斉藤真二, 安永正, 野口仁, 遠藤靖, 柏木朗, 日本応用磁気学会誌, 22, 1196 (1998)
- 6) H.J.Richter, IEEE Trans. Magn., 29, 21 (1993)
- 7) T.Takayama and K.Yosida, J. Mag. Soc. Jpn., 13 Suppl. S1, 819 (1989)
- 8) J.C.Mallinson, The Foundations of Magnetic Recording, 2nd ed., Academic press (1993)
- 9) M.P.Sharrock, IEEE Trans. Magn., 26, 193 (1990)
- 10) 山田一彦, 日本応用磁気学会誌, 16, 636 (1992)
- 11) 大内一弘, 講演会「記録メディア・機器の要素技術の現状と将来」資料1 (1994)
- 12) Pu-L.Lu and S.H.Charapy, IEEE Trans. Magn., 30, 4230 (1994)
- 13) 細江譲, 日本応用磁気学会第103研究会資料, 7 (1998)
- 14) 鈴木俊行, 信学技報, MR97, 55 (1997)
- 15) H.Muraoka, K.Sato, Y.Sugita and Y. Nakamura, 日本学術振興会磁気記録第144委員会資料, No133, 2 (1998)