
柔軟なスピントラスタ配置からなる
超高密度磁気記録メディアの研究

課題番号：11305027

平成11年度～平成12年度

科学研究費補助金(基盤研究(A)) (2) 研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 中村 慶久

(東北大学・電気通信研究所・教授)

東北大学図書



00021003581

附属図書館

柔軟なスピクラスタ配列からなる
超高密度磁気記録メディアの研究

課題番号：11305027

平成11年度～平成12年度
科学研究費補助金（基盤研究(A).(2)）
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 中村慶久
(東北大学・電気通信研究所・教授)

研究課題名 : 柔軟なスピクラスタ配列からなる超高密度磁気記録メディアの研究

課題番号 : 11305027

研究期間 : 平成 11 年度～平成 12 年度

研究種目名 : 科学研究費補助金 (基盤研究(A).(2))

研究組織 : 研究代表者 : 中村 慶久 (東北大学電気通信研究所・教授)
研究分担者 : 村岡 裕明 (東北大学電気通信研究所・教授)
研究分担者 : 島津 武仁 (東北大学電気通信研究所・助手)
研究分担者 : 渡辺 功 (東北大学電気通信研究所・助手)

研究経費	平成 11 年度	35,000 千円
	平成 12 年度	6,000 千円
	計	41,000 千円

研究成果の概要

柔軟なスピクラスタ配列からなる超高密度磁気記録メディアの実現のためには、スピクラスタの特性や大きさを決定する粒子の大きさ・形状と、粒子の磁化機構、活性化体積などの関係を、磁化の熱擾乱の影響を考慮しながら明らかにする必要がある。一方で、スピクラスタ配列を利用した信号ビットをメモリとして実際に記録するためには、メディアの研究のみならず、配列を制御する磁気ヘッド、あるいは信号再生に関する研究等も必要となる。

ここでは、本研究の成果の内、スピクラスタメディアに関する成果の要点を述べる。その研究成果の詳細、ならびに、磁気ヘッドあるいは信号処理に関する成果は、本報告に添付した発表論文を参照されたい。

1. スピクラスタの磁氣的微細構造と熱緩和

1) はじめに

垂直磁気記録媒体は、次世代の高密度磁気記録媒体(磁気ハードディスク)として検討が続けられており、研究レベルでは既に50 Gbits/inch²の面記録密度が達成されている¹⁾。さらなる高密度記録の実現には、垂直記録媒体の低ノイズ化と熱安定性の両立が必要不可欠な課題である。

100 Gbits/inch²を超えるスピクラスタ配列を利用した垂直記録媒体を実現するためには、記録分解能の向上、オーバーライト特性の改善などの目的から、媒体の記録層の厚みは20 nmあるいはそれ以下に低減することが必要であると予想される。また、媒体ノイズ低減の目的から、その結晶粒径は現状よりもさらに小さな10 nmあるいはそれ以下に抑える必要がある。このように膜厚が薄く且つ粒径の小さな薄膜記録媒体では、媒体の構造制御が技術的に大きな課題である。一方、このような薄膜媒体では、磁化の熱擾乱が静的な磁気特性に与える影響が非常に大きくなるため、媒体の磁気特性を評価する際は、磁気特性を決定している構造的要因と熱擾乱の影響とを分けて議論することが重要となる。

我々は、室温における磁化の熱擾乱の影響を評価するため、高速な磁界変化速度を有するパルス磁界を用いた磁化率の測定を通して、磁化の熱擾乱が垂直媒体の磁気特性に及ぼす影響を明らかにしてきている²⁾⁴⁾。今回は、CoCr系垂直媒体を例に、その磁化機構と磁化の熱擾乱について考察し、低ノイズ化と熱安定性を両立するために必要となる磁気特性の検討を行った。

2) 実験方法

試料には、CoCrPt系薄膜媒体とCoCrTa薄膜媒体を用いた。CoCrPt系薄膜媒体の記録層組成はCo₇₀Cr₂₀Pt₁₀、Co₆₈Cr₂₀Pt₁₀Ta₂、Co₆₆Cr₂₀Pt₁₀B₄であり、dcマグネトロンスパッタ装置により、15 nmのTi₉₀Cr₁₀をシード層として作製した。CoCrTa薄膜媒体は、100 nmのNiP薄膜を製膜した2.5インチφガラスディスク基板に、UHVのdcマグネトロンスパッタ法により作製した。記録層の組成はCo₇₇Cr₁₉Ta₄であり、5 nmのTiシード膜を用いて作製した。磁化曲線の計測ならびに10 Oe/sの磁界変化速度における残留磁化曲線の測定はVSMにより行った。10⁸ Oe/sの磁界変

化速度における残留保磁力の測定は、パルス磁界を用いた VSM を用いた。この装置は、ハヤマ社に協力を得て自作した装置である。垂直磁気異方性の大きさは、トルク磁力計を用いて評価した。

3) 実験結果及び考察

① 磁化の熱擾乱と残留磁化曲線

Fig.1-1 には、CoCrPtTa 薄膜媒体を例に、 10^8 Oe/s 台ならびに 10 Oe/s の各磁界変化速度においてそれぞれ測定した残留磁化曲線を、磁化曲線と共にした。大きな磁界変化速度で測定した残留磁化曲線は高磁界側に大きく張り出しており、残留保磁力が増加している。ここで、それぞれの磁界変化速度における残留保磁力 H_r の値を基に、次に示す Sharrock の式^{5),6)}を用いて磁化の熱擾乱を評価した。

$$H_r(t') = H_0 [1 - \{kT/(K_u V) \ln(f_0 t' / 0.693)\}^n] \quad (1)$$

ここで、 f_0 は周波数因子であり、ここでは 5×10^9 Hz とした。 T は絶対温度、 k はボルツマン定数、 K_u は一軸磁気異方性、 V は磁化反転の単位体積をそれぞれ示す。べき乗の指数 n の値は、磁化容易軸方向と印加磁界方向の関数であるが^{6),7)}、垂直媒体では両者が平行であるため、後述の角度依存性の測定を除き 0.5 を用いている。 H_0 は、周波数因子における H_r の値に対応し、熱擾乱の影響を差し引いた H_r 値を意味する。また、 t' は、 H_r と同じ大きさの磁界を印加した際に、磁化の熱擾乱により平均的な磁化が 0 となるために必要な時間を意味する^{5),6)}。今回の実験では、各磁界変化速度における H_r の測定値を基に、Flanders と Sharrock により報告されている現象論的な解析式⁵⁾を用いて t' を算出し、Fig.1-2 に示すように(1)式にフィッティングすることで H_0 ならびに $K_u V/kT$ の値を求めた。ここで、 10^8 Oe/s 台の磁界変化速度で測定した残留保磁力を H_r^p と定義する。

Fig.1-1 を見ると、 10^8 Oe/s 台の残留磁化曲線は、印加磁界が小さな領域では磁化量がほとんど変化せず、ある大きさの印加磁界以上になると磁化が反転し始めている。これは、飽和残留磁化の値が既に熱擾乱により減衰していることを示している。磁化曲線の傾きは 4π と近似出来るため、図中に示したように、この媒体のニュークリエーション磁界を H_n と定義した。同様に、 H_0 の値から磁化の熱擾乱が無い場合

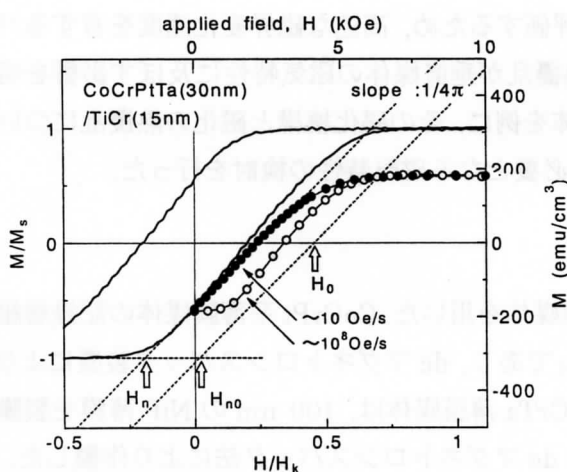


Fig. 1-1 Remanence curves of CoCrPtTa perpendicular medium.

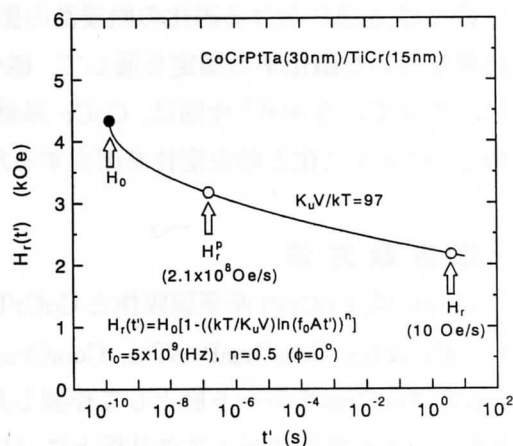


Fig. 1-2 $H_r \sim t'$ plots for the CoCrPtTa perpendicular medium.

のニュークリエーション磁界 H_{n0} を近似的に求めることが出来る. この媒体の場合, H_{n0} は正であり, 熱擾乱が無い場合の残留磁化はほぼ飽和磁化 M_s の値に近い(即ち角型比が 1 に近い)ことを示している.

② 粒子の磁化機構と残留保磁力

媒体の磁化の熱擾乱を物性的に議論するためには, 熱擾乱を妨げる磁気ポテンシャルを与えている粒子の磁化機構を明確にすることが必要である. そこで, 粒間の交換相互作用が小さな CoCrTa 垂直媒体の残留保磁力の角度依存性を測定し, 粒子の磁化機構について検討した.

測定には CoCrTa(20nm)/Ti(5nm)垂直媒体²⁾を用いた. X線回折の結果, c軸の角度分散を示す hcp-(002)面のロックンクカーブの半値幅 $\Delta\theta_{50}$ は 8.5 度程度であった. また, 回転ヒステリシス積分 R_h ならびに TEM による構造解析から, 5nm の Ti 下地膜を用いた CoCrTa 媒体の粒間の交換相互作用は, 粒界への Cr の偏析により非常に小さいことが明らかとなっている^{2),8)}. なお, 平面 TEM 像から求めたこの媒体の膜面内方向の粒径は 約 11 nm であった.

Fig.1-3 左図には, S-W 型の磁化機構における, 平均磁化容易軸方向の残留保磁力 H_r^{S-W} と異方性磁界 H_k の比の値を $\Delta\theta_{50}$ に対して示した. 計算では, 粒子の c 軸の角度分散を正規分布であると仮定し, X線回折のロックンクカーブに対応すると仮定した. H_r^{S-W}/H_k の値は c 軸の僅かな角度分散により大きく低下し, 測定に用いた媒体の c 軸の分散角度 $\Delta\theta_{50}=8.5^\circ$ では 0.8 程度にまで減少する. また, Fig.1-3 右図には, $\Delta\theta_{50}=0^\circ$ ならびに 8.5° の場合について, H_r^{S-W}/H_k の値を平均磁化容易軸方向と磁界印加方向のなす角度 ϕ に対して示した. 平均磁化容易軸ならびに磁化困難軸方向の近傍では, H_r^{S-W}/H_k の値は, c 軸の僅かな角度分散により大きく低下する.

Fig.1-4 には, CoCrTa(20nm)/Ti(5nm)垂直媒体の H_r , H_r^p ならびに H_c の測定値と, これらの値を基に解析した H_0 の角度依存性を示した. 解析における(1)式の n 値は Pfeiffer の近似式⁷⁾から各 ϕ における値を求めて用いた. 図中には比較のため, H_r^{S-W} ($\Delta\theta_{50}=8.5^\circ$) の角度依存性も示している. 計算にあたっては, 磁気トルクの飽和値から求めた H_k の値 5.68kOe ($H_k=2K_u/M_s$, $K_u=1.17 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, $M_s=412 \text{ emu/cm}^3$) を用いた.

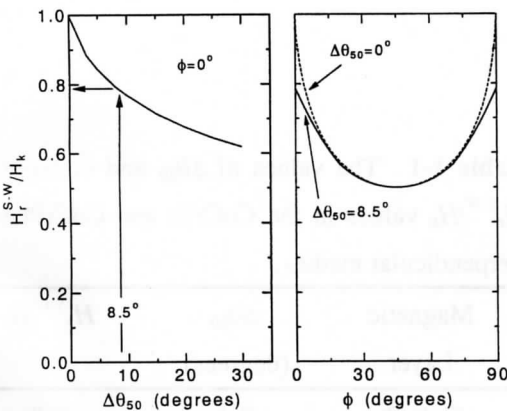


Fig. 1-3 Calculated dependence of H_r^{S-W}/H_k on $\Delta\theta_{50}$ (left figure) and on ϕ (right figure).

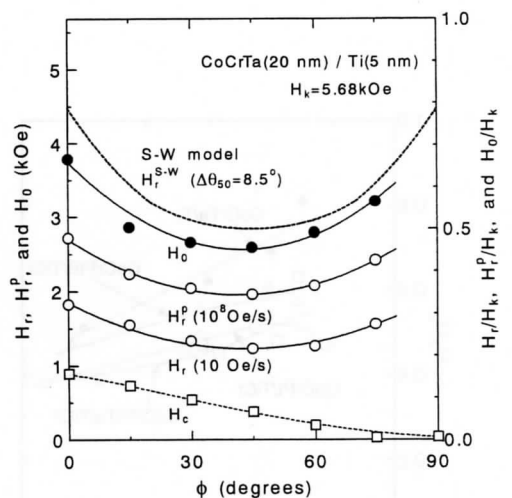


Fig. 1-4 Angular dependence of H_c , H_r , H_r^p and H_0 for the CoCrTa/Ti perpendicular media, together with that of H_r^{S-W} .

H_r の角度依存性は、 H_r^{S-W} と変化の傾向は似ているが、その絶対値は1/2以下である。しかし、 H_0 の角度依存性は、 H_r^{S-W} とかなり良く一致していることがわかる。このことは、粒間の交換相互作用の小さなCoCrTa 媒体では、磁化の熱擾乱を差し引いた磁気特性は、c 軸の角度分散を考慮した S-W 型粒子の磁化機構によりほぼ近似できることを示している。即ち、熱擾乱を議論する上で必要な磁気ポテンシャルの大きさとして、近似的に S-W 型の磁化機構を想定することが妥当であると考えられる。これは、CoCrPt 等の CoCr 系の垂直媒体において共通な事象であると考えられる。一方、定量的に詳しく見ると、 ϕ が 0 に近い角度領域における H_0 の値は H_r^{S-W} よりも小さい。

Fig.1-5 には、CoCrTa ならびに CoCrPt 系の薄膜媒体の、膜面垂直方向($\phi=0$)の H_0/H_k の値を膜厚に対して示した。また、Table1-1 には、各媒体の $\Delta\theta_{50}$ の値(膜厚 20nm)を示した。図中には対応する H_r^{S-W}/H_k の値も示してある。

Fig.1-5 を見ると、いずれの媒体でも、膜厚の低下に伴い H_0/H_k の値は増加している。膜厚が 30 nm 程度以下の粒子内部の磁化機構はほぼコヒーレントであると推察され²⁾、粒子内部の磁化機構の違いが H_0/H_k の膜厚依存性に結びついている可能性は低いと考えられる。一方、保磁力近傍では、磁化が局部的に静磁氣的粒間相互作用(双極子相互作用)により結合しており、この相互作用は膜厚が薄くなるほど弱くなる。また、膜厚の低下により隣接粒子間の接触面積が低下することで、残存する粒間交換相互作用が粒子の磁化過程に与える影響も小さくなるものと予想される。したがって膜厚の低下に伴う H_0/H_k の増加は、主に粒間相互作用の低下に起因するものと考えられる。また、Table1-1 と Fig.1-5 を比較すると、いずれの媒体の H_r^{S-W}/H_k の値も 0.7 以上の値であるが、実験により求められた H_0/H_k の値は 0.5~0.7 程度と H_r^{S-W}/H_k 値よりも小さい。この H_0/H_k と H_r^{S-W}/H_k の差は、主に粒間相互作用の存在に起因するものと考えられる。CoCrPtB の $\Delta\theta_{50}$ の値は、CoCrPt 系の中で最も大きく c 軸の角度分散が大きい。しかし、 H_0/H_k の値は他の CoCrPt 系よりも大きな値を示している。このことは、CoCrPt への B の添加は、粒間の交換相互作用の低下に非常に有効であることを示している。CoCrTa 薄膜媒体の H_0/H_k の値は CoCrPt 系よりも大きい³⁾、CoCrTa と CoCrPtB の $\Delta\theta_{50}$ の違いを考慮すると、CoCrPtB の粒間の交換相互作用は CoCrTa と同程度である可能性を示唆している。

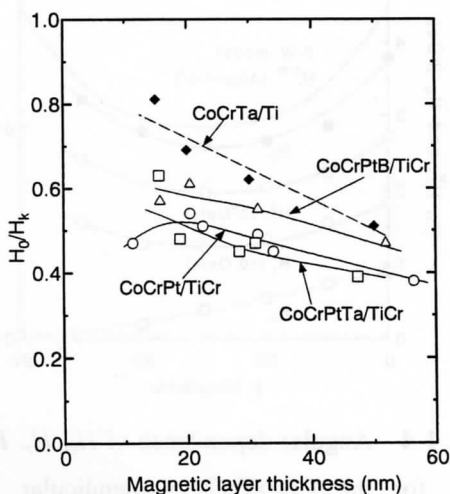


Fig. 1-5 Thickness dependence of the H_0/H_k of the CoCr based perpendicular media.

Table 1-1 The values of $\Delta\theta_{50}$ and corresponding H_r^{S-W}/H_k values in the CoCrTa and CoCrPt based perpendicular media. .

Magnetic Layer	$\Delta\theta_{50}$ (degrees)	H_r^{S-W}/H_k
CoCrPt	9.4	0.78
CoCrPtTa	11.2	0.76
CoCrPtB	13.3	0.73
CoCrTa	8.5	0.79

シード層による配向制御などによりc軸の角度分散を5度程度に抑えても、Fig.1-3に示すように H_0/H_k の値は 0.8~0.85 程度にしか高めることが出来ない。したがって、製膜プロセスの改善などにより CoCrPt 系媒体の粒間交換相互作用を CoCrTaと同程度まで低減させ、且つ、c軸の垂直配向性を高めた場合でも、実現可能な H_0/H_k の値は、膜厚 20nm の場合で、0.7 程度であると推察される。

一方、VSM 等により測定される H_c の値は磁化の熱擾乱により H_0 よりも大きく低下する。熱安定性が維持できる限界 ($K_u V/kT=80$ と仮定) にまで粒径の低下を図った垂直媒体では、 H_c は H_0 の半分程度に低下することが(1)式より見積もられる。したがって、熱安定性を維持出来る限界 ($K_u V/kT=80$) まで粒径の微細化(低ノイズ化)を図った膜厚 20nm の垂直媒体において、実現し得る H_c/H_k の最大値は、0.35 程度であると考えられる。

③ 高記録密度における熱安定性

Fig.1-6 には、 $K_u V/kT$ の膜厚依存性を示す。いずれの媒体の $K_u V/kT$ の値も、膜厚の低下に伴って単調に低下している。ここで、膜厚 30nm の CoCrPt 薄膜媒体の $K_u V/kT$ の値は、B あるいは Ta の添加により 300 程度から 100 程度にまで低下している。Table1-2 には電子顕微鏡写真から求めたこれらの媒体の平均結晶粒径と、膜厚 30nm における K_u の値を示した。CoCrPt 薄膜媒体の結晶粒径は約 14nm であるが、Ta および B の添加により 10nm および 8nm までそれぞれ低下しており、これらの添加が粒径の微細化に有用であることを示している。また、 K_u の値は B あるいは Ta の添加により大きく低下している。両添加元素による $K_u V/kT$ の低下は、主に、結晶粒径と K_u の低下に起因するものと考えられる。

一方、これらの元素添加による結晶粒径の低下と粒間相互作用の低下により、膜厚 30nm の媒体の 200kFCI における S/N は、Ta の添加により約 6dB、B の添加により約 8dB、それぞれ改善されている。しかし、いずれの媒体の $K_u V/kT$ の値も 100 程度と十分な熱安定性が予測されるにも係わらず、低記録密度において大きな信号の時間減衰が観測され、その値は CoCrPtTa の場合で約 8%/decade にも達している。

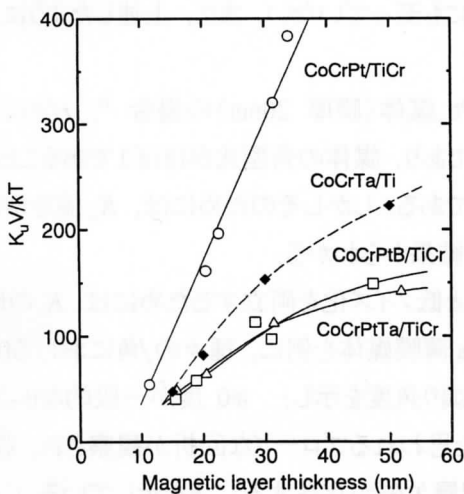


Fig.1-6 The dependence of $K_u V/kT$ of the CoCrTa and CoCrPt based media on the magnetic layer thickness

Table 1-2 Grain size of the CoCrTa and the CoCrPt-(Ta,B) media.

Magnetic Layer	Grain size (nm) by TEM	K_u (30nm) ($\times 10^6 \text{ erg/cm}^3$)
CoCrPt	~14	2.20
CoCrPtTa	~10	1.47
CoCrPtB	~8	1.60
CoCrTa	~11	1.22

(記録密度 2kFCI における値)。

本実験における $K_u V/kT$ の評価は残留保磁力の磁界変化速度依存性から求めている。残留保磁力近傍では、局所的な磁化は静磁氣的相互作用(双極子相互作用)により強く結合しており熱的にも安定である。この磁化状態は高記録密度時における転移領域においても同様であることから、解析された $K_u V/kT$ の値は高密度記録時における熱安定性を示していると考えられる。しかし、低記録密度における熱安定性は $K_u V/kT$ の議論だけでは十分ではない。

また、この静磁氣的な磁化結合により、解析された $K_u V/kT$ の値は、 K_u と結晶体積の単純積から予想される値よりも大きいことが推察される。粒間の交換相互作用が小さな CoCrTa あるいは CoCrPtB 薄膜においても、解析により求められた $K_u V/kT$ の値は、 K_u と結晶粒体積(膜厚方向の結晶粒数は1と仮定)の単純積より求めた値よりも 1.8 程度大きな値となっている。

④ 低密度記録における熱安定性

低記録密度においても十分な再生出力の熱安定性を得るためには、磁化曲線の角型比を1に近づけることで残留磁化状態における非可逆磁化率を低下させること¹⁰⁾が重要である。

反磁界係数を最も厳しい条件である 4π とした場合に、角型比が1であることを、Fig.1-1 における H_n が正となる条件であると近似すると、

$$H_n = H_r - 4\pi M_s > 0 \quad (2)$$

即ち、

$$H_k / 4\pi M_s > H_k / H_r \quad (3)$$

ここで、膜厚 20nm、高密度の熱安定性 $K_u V/kT = 80$ の条件下では、上述したように H_k/H_r の値は $1/0.35 \sim 3$ となる。 $H_k/4\pi M_s$ は $K_u/2\pi M_s^2$ と等価であるから、角型比を1に維持するためには K_u の値を $2\pi M_s^2$ の3倍以上にする必要があることになる。またこれらの条件を満足するような臨界値を求めると、粒径 10nm の媒体において、 $K_u = 2.2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、 $M_s = 340 \text{ emu/cm}^3$ 、 $H_k = 12.9 \text{ kOe}$ 、 $H_r = 4.3 \text{ kOe}$ となる。

Fig.1-7 は検討した全ての媒体の K_u と M_s の値を示した。いずれの Pt 系媒体の $K_u/2\pi M_s^2$ の値も 2~2.4 であり、3 よりも小さい。実際にこれらの薄膜媒体の角型比は1に達しておらず最大で 0.8 程度であった。B あるいは Ta の添加は、粒径あるいは粒間の交換相互作用の低下に効果的であるが、 K_u と M_s の値を(特に膜厚 20nm 以下で)大きく低下させ、 $K_u/2\pi M_s^2$ 値の増加にも至っていない。また、上述したように、いずれの CoCrPt 系媒体の H_n/H_k の値も 0.6 以下である。

高野等により報告されている 50Gbits/inch² の CoCrPt 媒体(膜厚 20nm)の場合¹⁾、 $H_k = 12.5 \text{ kOe}$ 、 $M_s = 250 \text{ emu/cm}^3$ ($K_u = \sim 1.6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$)、 $K_u/2\pi M_s^2 = \sim 4$ であり、媒体の角型比がほぼ1であることと対応している。更なる高密度化のためには粒径の低下が必要である。しかしそのためには、 K_u 値を増加させ $K_u V/kT$ 値を高く維持することが必要であることが、上記の結果からわかる。

以上のことから、CoCrPt 系薄膜媒体において熱安定性と低ノイズ化を両立するためには、 K_u の増加が必要不可欠である。Fig.1-8 には、膜厚 30nm の CoCrPtTa 薄膜媒体を例に、種々の角における θ -2 θ 回折の結果を示した。ここで ϕ は、 θ -2 θ スキャン時の基板の煽り角度を示し、 $\phi = 0$ 度が一般的な θ -2 θ 回折測定に対応する。 $\phi = 70$ 度近傍には、fcc(111)からの回折と思われるブロードな回折が観察され、膜中に、fcc 格子の層が存在する(hcp 格子中に非常に高密度な積層欠陥が存在する)ことを示している。Co 系合金の fcc 相の結晶磁気異方性は hcp 相よりも1桁以上低下することから、hcp 結晶粒内部の fcc 格子層(積層欠陥)が K_u の低下に大きく結びついていると考えられる。 K_u の増加には、膜組成の最適化の他に、新たなシード層の導入などにより、hcp 相を安定に形成することが重要となる。

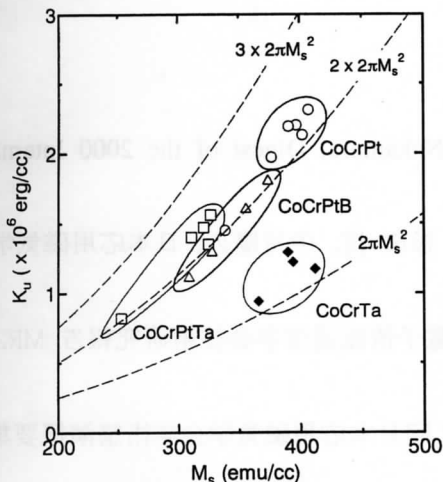


Fig.1-7 The values of K_u and M_s for the CoCrPt based perpendicular media.

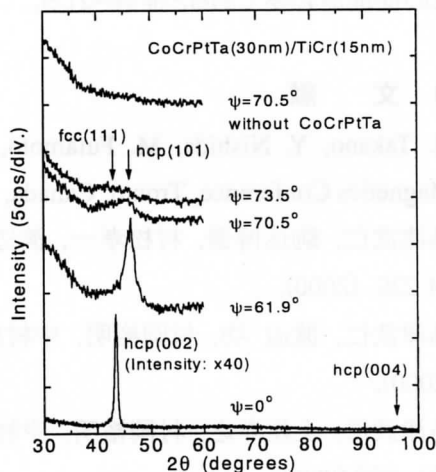


Fig.1-8 XRD patterns for CoCrPtTa(30nm)/TiCr perpendicular media. Here, ψ is the tilt angle about a line in the sample surface normal to the θ and 2θ axes.

一方で、垂直媒体における高密度化を、必要とされる磁気特性から議論する上では次の点を留意すべきである。①式(3)では膜面垂直方向の反磁界係数を 4π として取り扱っているが、狭トラック化が進行すると反磁界係数は急激に低下するため¹¹⁾、必要となる K_u 値は $2\pi M_s^2$ の3倍よりも小さくなる。②上述したように、高密度記録時における $K_u V/kT$ の値は、局所的な磁化の静磁気的な相互作用により、単純に K_u 値と単位体積(結晶粒径) V から計算した値よりも大きいものと推察される。特に、垂直二層膜媒体では、裏打ち軟磁性層が転移領域の磁化を安定化させることも期待される。したがって、高密度化のために要求される媒体の磁気物性定数は、面内媒体とは全く逆に、高密度化するほど(特に狭トラック化するほど)、条件が緩やかになる。垂直媒体の場合には、この点を考慮した媒体設計も重要であると考えられる。

4) まとめ

パルス磁界を用いた媒体の熱擾乱の解析を通して、次のことが明らかとなった。

- (1) 粒間交換相互作用を低減させた CoCrTa 薄膜媒体を用いた実験の結果、熱擾乱の影響が無い場合の残留保磁力の角度依存性は、粒子の磁化容易軸の角度分散を考慮に入れた S-W 型磁化反転における計算結果とほぼ一致した。このことは、熱擾乱を議論する上で必要な磁気ポテンシャルの大きさとして、近似的に S-W 型の磁化機構を想定することが妥当であることを裏付けている。
- (2) 製膜プロセスの改善などにより、CoCrPt 系媒体の粒間交換相互作用を CoCrTa と同程度まで低減させた場合でも、CoCrPt 系の垂直媒体で実現可能な H_0/H_k の値は、膜厚 20nm の場合で、0.7~0.8 程度であると推察される。
- (3) ビット内部の反磁界係数が 4π となる垂直媒体において最も厳しい条件で角型比を1に維持するためには、 K_u の値を $2\pi M_s^2$ の3倍以上にする必要がある。
- (4) CoCrPt 系の低記録密度における熱安定性と低ノイズ化を両立するためには、 K_u の増加と粒間相互作用のさらなる低下が必要不可欠な要因である。 K_u 値の増加には、組成の最適化の他に、hcp 構造の安定

形成の促進が必要であると推察される。

5) 文 献

- 1) H. Takano, Y. Nishida, M. Futamoto, H. Aoi and Y. Nakamura, Digest of the 2000 International Magnetism Conference, Tronto, Canada, AD-06 (2000).
- 2) 島津武仁, 駒込博泰, 村松孝一, 渡辺 功, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久, 日本応用磁気学会誌, 24 239, (2000).
- 3) 島津武仁, 渡辺 功, 村岡裕明, 中村慶久, 杉田 愷, 電子情報通信学会技術研究報告 MR2000-4 (2000).
- 4) 島津武仁, 上住洋之, 村岡裕明, 中村慶久, 他, 第 24 回日本応用磁気学会学術講演概要集 280, 281, 282 (2000).
- 5) P. J. Flanders and M. P. Sharrock, *J. Appl. Phys.*, **62**, 2918 (1987).
- 6) M. P. Sharrock, *J. Appl. Phys.*, **76**, 6413 (1994).
- 7) H. Pfeiffer, *Phys. Status Solidi A* **118**, 295 (1990).
- 8) T. Shimatsu, S. J. Greaves, K. Muramatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Sugita and Y. Nakamura, *IEEE Trans. Magn.*, (in press).
- 9) E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Trans. Roy. Soc. (London)*, **A240**, 599 (1948).
- 10) R. Street and J. C. Woolley, *Proc. Phys. Soc.*, **A62**, 562 (1949).
- 11) 田口 香, 山川清志, 本多直樹, 大内一弘, 日本応用磁気学会誌, 24 335, (2000).

2. CoPrTb/CoCrTa 複合膜スピクラスタ-垂直媒体

ニュークリエーション型 CoPrTb アモルファス薄膜を用いた垂直スピクラスタ配列の実現と、その磁気記録メディアの作製・基礎特性の評価について検討した。

Fig.2-1 には、作製した CoPrTb アモルファス薄膜単一膜の垂直磁気異方性 K_u の値を CoPrTb 膜厚に対して示した。図中には、種々の製膜条件で作製した結果が示してある。CoPrTb 膜の K_u 値は、10nm 以下の膜厚においても大きな値を維持し、比較的高ガス圧の 30mTorr で製膜した場合には、10nm においても約 $4 \times 10^6 \text{erg/cm}^3$ (H_k 値で約 23kOe) の値を示している。この値は、同程度の膜厚の CoCrPt よりも 2.5~3 倍程度大きい。しかし、Fig.2-2 に示した同薄膜の磁化曲線に見るように、CoPrTb 単一膜の保磁力は製膜条件などにほとんど依存せず 0.5~0.8kOe 程度の値を示し、高い K_u 値を活かした磁気特性の導出には至らなかった。

CoPrTb 膜の磁化反転単位を小さくし、薄膜媒体としての優れた特性を引き出すためには、製膜条件による金属組織の制御だけでは限界がある。そこで、シード層としてグラニューレー系の CoCrTa 薄膜媒体を使用し、CoPrTb 膜と CoCrTa 膜の界面における交換相互作用により、CoPrTb 膜の磁化反転単位を低下させる試みを行った。

Fig.2-3 には、二種類の膜厚構成比で作製した CoPrTb/CoCrTa 複合膜の磁化曲線を示した。図中には、CoCrTa 単一膜の結果も示してある。CoPrTb 単一膜の磁化曲線は、Fig.2-2 に示したように、角型比がほぼ1であり磁化反転が非常に急峻であるが、CoCrTa 膜の上に製膜することで磁化曲線が傾き、CoPrTb 膜の膜厚比率を低下させるほど磁化曲線の傾きが増すことがわかる。この磁化曲線の傾きは、磁化反転の最小単位の大きさに強く依存しており、一般には、磁化曲線が傾いているほど磁化反転単位が小さいことを示唆する。

CoPrTb 単一膜に比較して複合膜の磁化反転単位が低下していることを明確にするため、Fig.2-4 には、 ΔM プロットの結果を、また、Fig.2-5 には、回転ヒステリシス損失 W_c の印加磁界の逆数 $1/H$ に対する依存性を示した。CoPrTb 単層膜の ΔM は急峻な正の極大を示し、交換相互作用により磁化が膜面内で広

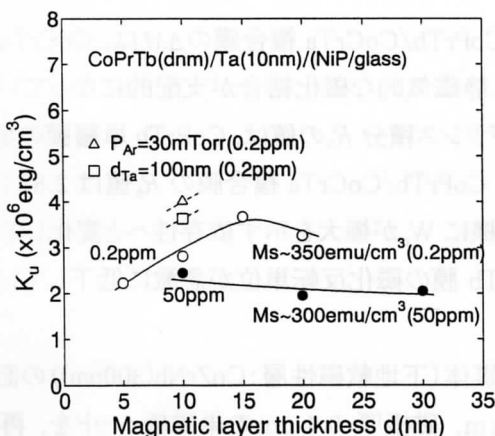


Fig.2-1 Thickness dependence of K_u for CoPrTb amorphous single-layer media.

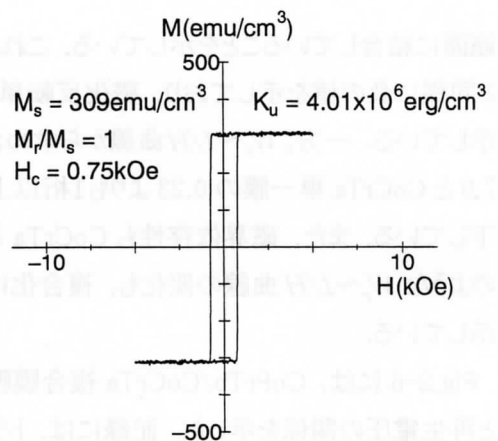


Fig.2-2 Magnetization curve of the CoPrTb amorphous single-layer medium.

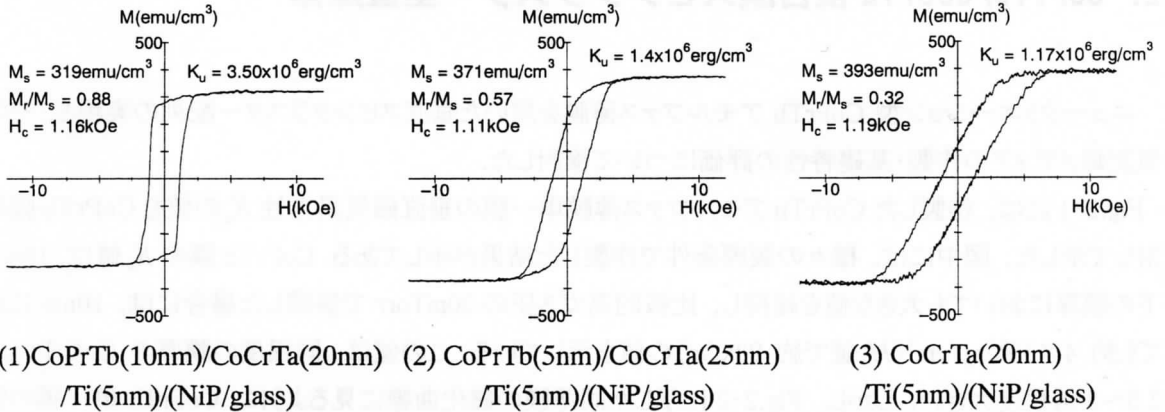


Fig.2-3 Magnetization loops of CoPrTb/CoCrTa coupled media.

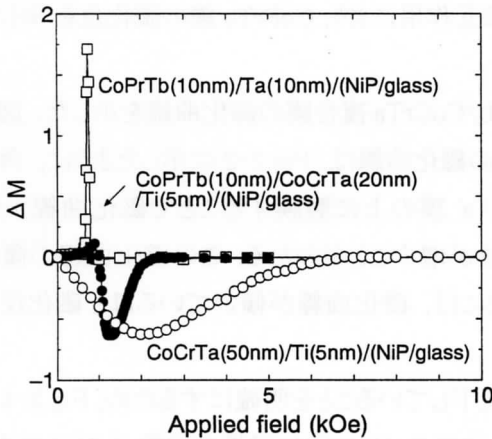


Fig.2-4 ΔM plots for the CoPrTb/CoCrTa coupled medium, together with those of CoCrTa and CoPrTb single layer media.

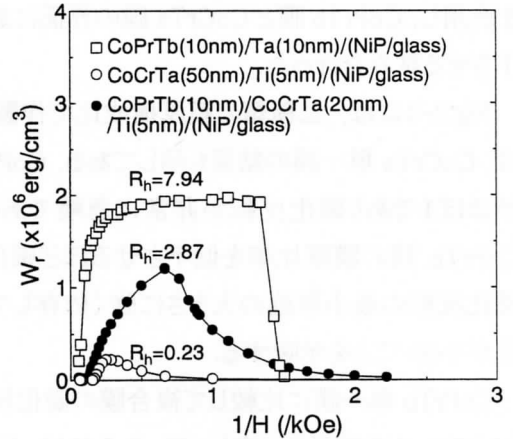


Fig.2-5 $W_r \sim 1/H$ plots for the CoPrTb/CoCrTa coupled medium, together with those of CoCrTa and CoPrTb single layer media.

範囲に結合していることを示している。これに対して、CoPrTb/CoCrTa 複合膜の ΔM は、CoCrTa 単一膜と同様に負の値を示しており、磁化反転単位が低下し静磁気的な磁化結合が支配的になっていることを示している。一方、 $W_r \sim 1/H$ 曲線から求めた回転ヒステリシス積分 R_h の値は、CoPrTb 単層膜の場合には 7.9 と CoCrTa 単一膜の 0.23 よりも 1 桁以上大きい。CoPrTb/CoCrTa 複合膜の R_h 値は 2.87 にまで低下している。また、磁界依存性も CoCrTa 単一膜と同様に W_r が極大を示す依存性へと変化している。このような $W_r \sim 1/H$ 曲線の変化も、複合化により CoPrTb 膜の磁化反転単位が急激に低下していることを示している。

Fig.2-6 には、CoPrTb/CoCrTa 複合膜の二層膜媒体(下地軟磁性層:CoZrNb(300nm))の記録電流と再生電圧の関係を示した。記録には、トラック幅 $2 \mu\text{m}$ 、磁極厚 $0.4 \mu\text{m}$ の単磁極ヘッドを、再生には、トラック幅 $0.9 \mu\text{m}$ 、シールドギャップ $0.15 \mu\text{m}$ の GMR ヘッドをそれぞれ用いた。CoPrTb(20nm)/CoCrTa(10nm)媒体では、低い電流値で、再生電圧が飽和値まで急峻に立ちあがっていることがわかる。

また、CoPrTb の膜厚比を低下させると徐々に立ちあがりが緩やかになり、CoCrTa 単層に近づいている。

Fig.2-7 には、これらの薄膜媒体の再生出力の線記録密度依存性を示した。複合化により角型比が増加することで低記録密度における出力が増加しているが、注目したいのは、出力が低記録密度の半分に低下する記録密度 D_{50} の値が、CoCrTa よりも 30~50 kFRPI も増加していることである。これは主に磁化曲線の傾きが CoCrTa よりも急峻になったことに起因していると思われる。しかし、 D_{50} と磁化曲線の傾きの大小は単純には対応しておらず、また、 D_{50} と膜厚構成比の間に単純な関係も見られていない。今後、より詳細な検討が必要である。

Fig.2-8 には、これらの媒体の媒体ノイズを、また、Fig.2-9 には、再生信号と媒体ノイズの比 SN をそれぞれ線記録密度に対して同様に示した。複合化による再生出力の増加に伴って、複合媒体の媒体ノイズは CoCrTa よりも増加している。特に、媒体ノイズが大きな媒体では、高記録密度においてノイズが不

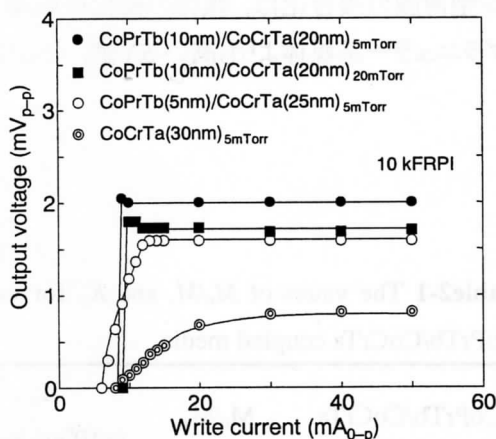


Fig.2-6 Saturation curves in the CoPrTb/CoCrTa coupled media.

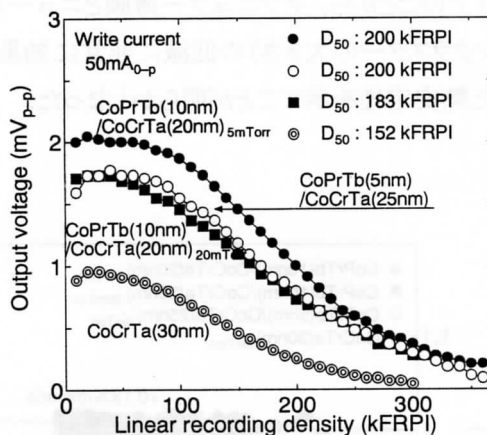


Fig.2-7 Linear recording-density dependence of the output voltage in the CoPrTb/CoCrTa coupled media.

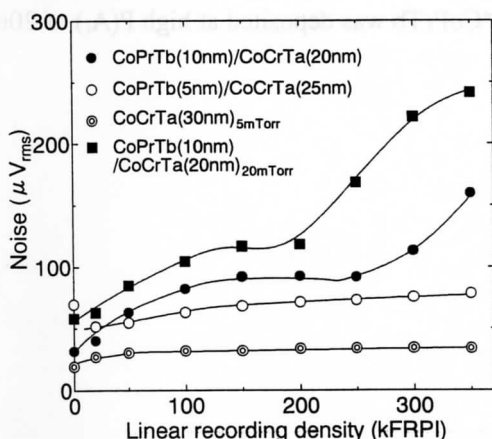


Fig.2-8 Linear recording-density dependence of the medium noise in the CoPrTb/CoCrTa coupled media.

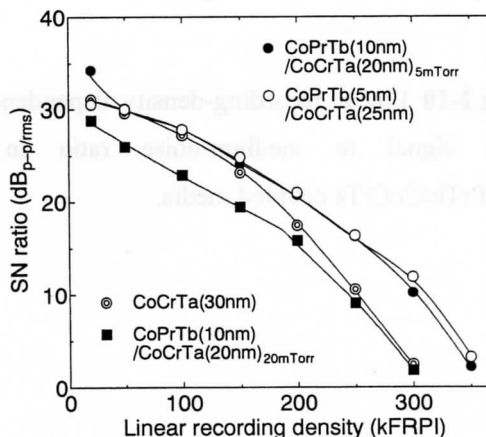


Fig.2-9 Linear recording-density dependence of the signal to medium-noise ratio in the CoPrTb/CoCrTa coupled media.

連続的に増加しているが、再生波形の観察の結果、この媒体ノイズの不連続的な増加は記録密度の増加により隣り合う記録ビットが結合する個所が現れるためであることを確認している。一方、CoPrTb 層を低ガス圧で製膜した複合膜の SN は、低記録密度では CoCrTa 単一膜と同程度であるが、200 kFRPI 以上の記録密度では大きな値を示し、300 kFRPC では CoCrTa 単一膜よりも 10 dB 程度も大きい。SN 比が大きな複合膜媒体を比較すると、CoPrTb 膜の膜厚構成比が大きな媒体媒体の SN は、高記録密度における媒体ノイズの急激な増加により、CoPrTb 膜の膜厚構成比が小さな媒体よりも小さくなる傾向が見える。

Fig.2-10 には、低記録密度(10 kFRPI)における再生出力の経時変化を示した。また、Table2-1 には、これらの媒体の角型比 M_r/M_s と K_u の値を示した。CoCrTa 単一膜媒体の結果に見られるように、グラニューラー系の垂直媒体の再生出力は、ビット内部の反磁界が大きな低記録密度では大きく減衰しており、この再生出力の減衰を小さく抑えるためには角型比を1にすることが必要である。これに対して、CoPrTb の膜厚が 10 nm の複合膜媒体では、 M_r/M_s が 0.74~0.89 と1よりも小さな値であるが、再生出力の大きな減衰は観察されていない。これは、非常に注目すべき点である。

以上のことから、グラニューラー薄膜とニュークリエーション型薄膜の複合化は、媒体の磁化反転単位(スピクラスタの大きさ)の低減に非常に効果的であり、グラニューラー系媒体よりも高い SN 値、ならびに優れた熱安定性を示すことが明らかとなった。

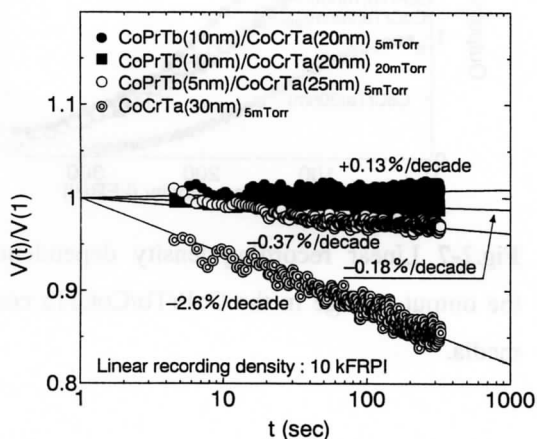


Table2-1 The values of M_r/M_s and K_u for various CoPrTb/CoCrTa coupled media

CoPrTb/CoCrTa	M_r/M_s	K_u ($\times 10^6 \text{ erg/cm}^3$)
10 nm / 20 nm	0.89	1.59
10 nm / 20 nm*	0.74	1.43
5 nm / 25 nm	0.54	1.44
0 nm / 30 nm	0.27	1.08

*CoPrTb was deposited at high $P(A_r)$ of 20mTorr.

Fig.2-10 Linear recording-density dependence of the signal to medium-noise ratio in the CoPrTb/CoCrTa coupled media.

3. 垂直スピクラスター二層膜媒体の裏打ち軟磁性層

垂直二層膜媒体では、媒体の表面粗さの低下あるいは量産性向上等のために、裏打ち層の膜厚を低減することが非常に重要であるが、記録分解能を維持するためには高飽和磁束材料を用いることが必要となる。しかし、Fe などの高飽和磁束材料は一般に優れた軟磁気特性を示さないため、記録時の入出力特性等の劣化に結びつき、小さなスピクラスターの形成を阻害する可能性がある。また、軟磁気特性を示さないことは、即ち、局所異方性分散が大きく複雑な磁区構造を有することを意味するため、裏打ち層の磁壁あるいはリップル磁壁から生じる漏洩磁界が媒体ノイズを増加させることが懸念される。そこで、高飽和磁束密度を有する典型的な材料である Fe、Co 等を裏打ち層に用いた CoCrTa 二層膜媒体を作製し、裏打ち層と記録層の構造および磁気特性と、入出力特性・媒体ノイズを始めとする記録再生特性との相関について検討を行なった。

基板は 2.5inchφ の glass 基板を用いた。裏打ち層は、一般的な真空性能を有する dc マグネトロンスパッタ装置により、室温基板上に作製した。裏打ち層の材料としては、 $\text{Co}_{90.6}\text{Zr}_{3.4}\text{Nb}_{6.0}$ アモルファス膜(600 nm)、Fe 膜(300 nm)、Co 膜(400 nm)、9.6wt%Si, 5.4wt%Al, bal. Fe 膜(600 nm)をそれぞれ用い、飽和磁化が大きな材料ほど膜厚を薄く設定した。Ti 中間層と $\text{Co}_{77}\text{Cr}_{19}\text{Ta}_4$ 記録層は UHV の dc マグネトロンスパッタ法により、基板温度 200 °C で製膜した。CoCrTa 記録層は膜厚 50 nm 一定とした。保護膜の厚みは 10 nm である。

まず、CoZrNb、Fe、Co 膜をそれぞれ裏打ち層に用いた媒体の、保磁力 H_c ならびに角型比 M_r/M_s の Ti 膜厚依存性を検討した。その結果、CoZrNb ならびに Fe 膜を裏打ち層に用いた場合には、3~5 nm の Ti 膜を用いることで 3.5 kOe 程度まで H_c 値が増加し、その後、徐々に低下した。これらの媒体では、5 nm 程度の Ti 膜を用いることで M_r/M_s の値も増加し、0.65 以上の値を示している。X 線回折ならびに断面 TEM の観察の結果、5 nm の Ti 膜を用いることで優れた c 軸の垂直配向性が実現されており、このことが、大きな H_c ならびに M_r/M_s の導出に結びついていると考えられる。一方、Co 膜を用いた場合には、Ti 膜による H_c ならびに M_r/M_s の明確な増加は観察されていないが、Ti 膜厚 5 nm では、3.5 kOe 近い H_c 値ならびに 0.6 程度の M_r/M_s の値が得られている。一方、TEM の平面像から、CoCrTa 層の膜面内方向の粒径は、Ti(5 nm)/CoZrNb 膜上で約 13 nm(正方形近似)、Ti(5 nm)/Fe 膜上で約 16 nm と、裏打ち層により大きく異なっていた。

これらの磁気特性および構造の知見を基に、5nm の Ti 中間層を用いて作製した媒体に焦点を絞り、その記録再生特性について検討を行った。

Fig.3-1 は、各二層膜媒体の、10 kFRPI における記録電流と再生出力の関係を示している。記録は浮上型単磁極ヘッド(トラック幅 5.0 μm 、主磁極膜厚 0.4 μm 、浮上量 50 nm)、再生は MR ヘッド(トラック幅 1.6 μm 、シールドギャップ 0.26 μm 、浮上量 40 nm)を用いた。図中には、裏打ち層だけを製膜し、記録層製膜時と同じ基板加熱を施した場合の各裏打ち層の H_c 値と最大透磁率 μ_m の値も合わせて示した。CoZrNb 膜ならびに Fe 膜上に作製した媒体の出力は、いずれも約 50 mA で飽和に達していることがわかる。このことから、飽和磁化の大きな材料を用いることで、裏打ち層の膜厚を半分程度まで低減させた場合でも、十分な記録感度を得られることがわかる。また、Fe 膜の H_c は 20 Oe 程度、 μ_m は 900 程度と、CoZrNb 膜よりも軟磁気特性が著しく悪いにも関わらず、その入出力特性に大きな差が見られない。このことは、信号を書き込む上では、裏打ち層に必ずしも優れた軟磁気特性が必要ないことを示している。一方、Co 膜を用いた場合には、記録電流を 100 mA まで増加させても出力が十分には飽和していない。

X線回折の結果、今回作製したCo裏打ち層は、hcp構造を有しており、その結晶方位はほぼランダムであった。したがって、Co膜を裏打ち層に用いた場合に入出力特性が大きく劣化する原因は、hcp-Co膜の結晶磁気異方性が大きいため、磁気ヘッドによる局所的な磁化回転を大きく阻害しているためであると思われる。

再生出力の線記録密度依存性を測定した結果、裏打ち層がCoZrNbとFe膜の場合には高密度特性に大きな差が見られず、 D_{50} はいずれも約140 kFRPIであった。一方、Co膜の場合の D_{50} は約110 kFRPIと小さく、この原因としては、飽和記録が出来ていないことなどが挙げられる。

Fig.3-2には、これらの媒体の、媒体ノイズの特徴を示す一例として、dc消去状態のノイズ出力の周波数スペクトラムを示した。図中には、システムノイズの大きさについても示してある。CoZrNb膜を裏打ち層に用いた場合には、全帯域で比較的ノイズが少ないが、Fe膜の場合には周波数が低いほどノイズが急激に増加している。一方、Co膜の場合にはノイズレベルが非常に大きく、20 MHz近傍、波長にして250 nmの領域に、緩慢な極大を示す特有のスペクトラムとなっている。このような特徴は、信号を記録した際のノイズスペクトラム上でも全く同様であった。

この特有なノイズスペクトラムの原因を探るため、CoCrTaを製膜する場合と同じ基板温度において、各裏打ち層の上に非磁性のTi膜(60 nm)だけを製膜したディスクのノイズスペクトラムを測定した。その結果、いずれのディスクでも、先ほどの媒体と全く同様なスペクトラムが観察されており、ノイズの原因が裏打ち層から生じていることが確認された。ここで、実験に用いたCo膜は角型比の非常に悪い磁化曲線を示しており、磁区幅の狭い迷路状磁区の形成が推察された。また、異常磁化曲線を示すFeSiAl膜だけを製膜したディスクにおいても、Co膜と同様に緩慢な極大を持つスペクトラムが観察されていた。このことから、特定の周波数に極大を持つようなこれらの特徴的なノイズスペクトラムは、垂直磁化成分を持つ磁区構造の磁区幅に起因するものと思われる。

一方、ビッター法により交流消磁後のFeディスクの磁区構造を示した結果、180度磁壁と思われる明瞭な磁壁の他に、磁区内に複雑なリップル磁壁が観察されていた。一方、CoZrNbディスクにおいて同様にビッター法により磁区観察を行った場合には磁壁がほとんど観察されなかった。磁気ヘッドによる記録過程は、裏打ち層を局所的に交流消磁していることに対応することから、Feディスクに見られる複雑なリップル磁壁の形成が、先述したノイズスペクトラムの要因になっているものと推察される。

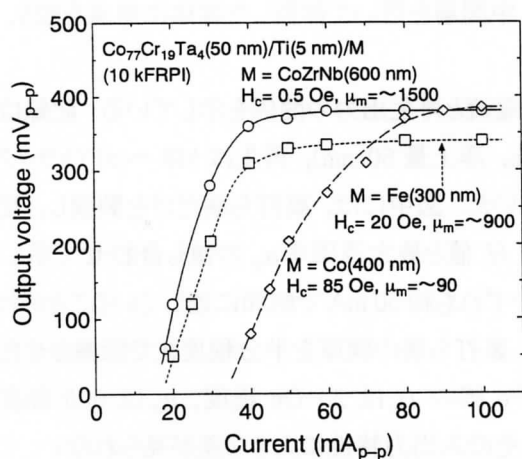


Fig.3-1 Saturation curves in the CoCrTa/Ti/M media.

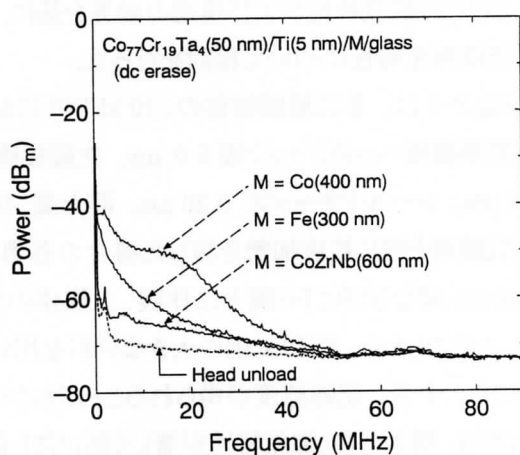


Fig.3-2 DC-erased noise power spectra of the CoCrTa/Ti/M media.

したがって、高飽和磁束材料の裏打ち層への導入にあたっては、まず、裏打ち層を軟磁性化させ、リップル磁壁等の形成を抑えることが重要であると考えられる。また、先程示したように、書き込み特性の上では裏打ち層にはそれほど優れた軟磁気特性は必要ないことから、半硬質磁性膜の利用、あるいは反強磁性膜などと積層することで、ディスクの半径方向に適度な磁気異方性を付与し、記録時に形成されるリップル磁壁を消失させることが有用であると考えられる。

研究発表 (学会誌等)

1. 超高密度垂直スピクラスタメディアの基礎物性に関する研究

- (1) T. Shimatsu, H. Uwazumi, H. Muraoka and Y. Nakamura
"Thermal Stability in Perpendicular Recording Media",
J. Magn. Magn. Mater., 2001, in press, (proceedings of the 5th perpendicular magnetic recording conference, Japan)
- (2) T. Shimatsu, H. Uwazumi, Y. Sakai, A. Otsuki, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Nakamura
"Thermal agitation of magnetization in CoCrPt perpendicular recording media",
IEEE Trans. Magn., vol. 37, 2001, in press, (proceedings of MMM-intermag conference 2001, San Antonio)
- (3) H. Uwazumi, Y. Sakai, A. Otsuki, T. Shimatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura
"Recording performance of CoCrPt-(Ta,B)/TiCr perpendicular recording media",
IEEE Trans. Magn., vol. 37, 2001, in press, (proceedings of MMM-intermag conference 2001, San Antonio)
- (4) 島津武仁, 上住洋之, 渡辺 功, 村岡裕明, 中村慶久
"CoCr 系垂直磁気記録媒体の磁化の熱擾乱と磁気特性",
日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, 2001, in press.
- (5) 島津武仁, 村岡裕明, 中村慶久
"垂直磁気記録媒体の磁氣的微細構造と熱緩和",
日本応用磁気学会第 118 回研究会・マイクロ磁区専門研究会, 4-3, pp.57-62, 2001
- (6) T. Shimatsu, S. J. Greaves, K. Muramatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura
"Experimental and Theoretical Analysis of Rotational Hysteresis Loss in CoCrTa Perpendicular Recording Media",
IEEE Trans. Magn., vol. 36, 2000, in press, (proceedings of intermag conference 2000, Toronto)
- (7) 島津武仁, 駒込博泰, 村松孝一, 渡辺 功, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久
"CoCrTa 垂直磁気記録媒体の磁化の熱擾乱と磁気特性",
日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.239-242, 2000.
- (8) 駒込博泰, 島津武仁, 吉田亮一, 渡辺 功, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久
"CoCrTa/Ti/M (M:CoZrNb, Fe, Co)垂直二層膜媒体の磁気特性と記録再生特性",
日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.243-246, 2000.

- (9) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura
"High-Frequency Effects in Perpendicular Recording Media",
日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.255-258, 2000.
- (10) T. Shimatsu, H. Komagome, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Effect of a Ti seed layer on the magnetic properties of CoCrTa double-layered perpendicular media",
Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp.6367-6369, 2000.
- (11) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura
"High frequency effects in perpendicular recording media",
Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp.4990-4992, 2000.
- (12) 島津武仁, 渡辺 功, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久
"グラニューラー系垂直磁気記録媒体の磁化の熱擾乱と磁気特性",
電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-02, pp.7-12, 2000.
- (13) 島津武仁, 上住洋之, 村岡裕明, 中村慶久
"CoCr系垂直磁気記録媒体の残留保磁力の角度依存性と磁化の熱擾乱",
電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-27, pp.37-42, 2000.
- (14) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"High frequency recording processes in perpendicular media",
電子情報通信学会技術研究報告, MR99-74, pp.21-26, 2000.
- (15) H. Muraoka, T. Shoji, I. Watanabe, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Recording characteristics of perpendicular media deposited on a ferrite disk substrate",
J. Magn. Magn. Mat., 193, pp.55-58, 1999.
- (16) T. Shimatsu, J. C. Lodder, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Thermal Fluctuation of Magnetization in Nanocrystalline FePt Thin Films with High Coercivity",
IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp.2697-2699, 1999.
- (17) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Simulations of time dependence in perpendicular media",
J. Magn. Magn. Mat., 193, pp.409-411, 1999.
- (18) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Intergranular exchange pinning effects in perpendicular recording media",
IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp.3772-3774, 1999.
- (19) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Thermal bit writing simulations in magneto-optic recording media",
IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp.3859-3861, 1999.

- (20) S. J. Greaves, H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
 "Effect of Exchange Interaction on Written Bit Stability in Perpendicular Media",
 J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 23, No. 4-2, pp.993-996, 1999.

2. 超高密度垂直スピクラスタメディア用の磁気ヘッドの研究

- (1) H. Katada, T. Shimatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Nakamura, and Y. Sugita
 "Induced uniaxial magnetic anisotropy and film magnetostriction in very thin permalloy films",
 IEEE Trans. Magn., vol. 37, 2001, in press, (proceedings of MMM-intermag conference 2001, San Antonio)
- (2) H. Katada, T. Shimatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, Y. Sugita and Y. Nakamura
 "Induced uniaxial magnetic anisotropy field in very thin NiFe and CoZrNb films",
 IEEE Trans. Magn., vol. 36, 2000, in press, (proceedings of intermag conference 2000, Toronto)
- (3) 片田裕之, 島津武仁, 渡辺 功, 村岡裕明, 中村慶久, 杉田 愷
 "極薄軟磁性薄膜の誘導一軸磁気異方性",
 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, 2001, in press.
- (4) 片田裕之, 島津武仁, 渡辺 功, 村岡裕明, 中村慶久, 杉田 愷
 "数 nm 膜厚のパーマロイ薄膜の誘導磁気異方性",
 日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.539-542, 2000.
- (5) 片田裕之, 島津武仁, 渡辺 功, 中村慶久, 杉田 愷
 "数 nm 膜厚の NiFe および CoZrNb 薄膜の誘導磁気異方性",
 電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-04, pp.19-24, 2000.
- (6) 片田裕之, 島津武仁, 渡辺 功, 中村慶久, 杉田 愷
 "極薄軟磁性薄膜の誘導磁気異方性と薄膜磁歪",
 電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-100, pp.1-6, 2000.
- (7) H. Muraoka, K. Sato, Y. Sugita, Y. Nakamura
 "Low Inductance and High Efficiency Single-Pole Writing Head for Perpendicular Double Layer Recording Media",
 IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, pp.643-648, 1999.

3. 超高密度垂直スピクラスタメディアの記録再生に関する研究

- (1) H. Muraoka and Y. Nakamura
 "Overview of Perpendicular Magnetic Recording Scheme",
 J. Magn. Mater., 2001, in press, (proceedings of the 5th perpendicular magnetic recording conference, Japan).

- (2) K. Miura, H. Muraoka, and Y. Nakamura
"Effect of head field gradient on transition jitter in perpendicular magnetic recording",
IEEE Trans. Magn., vol. 37, 2001, in press, (proceedings of MMM-intermag conference 2001, San Antonio)
- (3) 三浦健司, 村岡裕明, 中村慶久
"垂直二層膜媒体ノイズの記録磁界依存性",
日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, 2001, in press.
- (4) 山田 洋, 村岡裕明, 中村慶久
"単磁極ヘッド/垂直二層膜媒体におけるトラックエッジノイズ",
日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, 2001, in press.
- (5) 村岡裕明, 中村慶久
"垂直磁気記録における記録再生スキーム",
日本応用磁気学会第 118 回研究会・マイクロ磁区専門研究会, 4-1, pp.45-50, 2001.
- (6) Y. Nakamura
"Analytical model for estimation of isolated transition width in perpendicular magnetic recording",
Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp.4993-4995, 2000.
- (7) 中川 健, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久
"PR 等化における垂直磁気記録のノイズ特性",
日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.227-230, 2000.
- (8) 三浦健司, 村岡裕明, 杉田 愷, 中村慶久
"垂直二層膜媒体の時間軸ノイズ解析",
日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp.231-234, 2000.
- (9) 佐々木紀夫, 村岡裕明, 中村慶久
"マルチヘッド化による磁気ストレージの高速アクセス",
電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-97, pp.19-24, 2000.
- (10) 三浦健司, 村岡裕明, 中村慶久
"記録ヘッド勾配と垂直二層膜媒体ノイズの関係",
電子情報通信学会技術研究報告, MR2000-99, pp.31-36, 2000.
- (11) 山田 洋・村岡裕明・杉田愷・中村慶久
"単磁極ヘッドにおけるイレースバンド幅の記録密度依存性",
電子情報通信学会技術研究報告, MR99-73, pp.15-20, 2000.

- (12) 中村慶久
「小特集」"20世紀の映像記録技術の進展",
映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 10, pp.1364-1370, 2000.
- (13) Y. Nakamura
"Perpendicular magnetic recording - progress and prospects",
J. Magn. Magn. Mat., 200, pp.634-648, 1999.
- (14) H. Muraoka, Y. Sugita, Y. Nakamura
"Simplified Expression of Shielded MR Head Response for Double-Layer
Perpendicular Medium",
IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp.2235-2237, 1999.
- (15) 中村慶久
"動画ディスクカメラ用ストレージメディアの動向と展望",
映像情報メディア学会誌 Vol. 53, No. 10, pp.1344-1346, 1999.
- (16) 三浦健司・村岡裕明・杉田愷・中村慶久
"時間軸測定手法を用いた垂直磁気記録媒体ノイズの測定",
電子情報通信学会技術研究報告, MR99-2, pp.7-14, 1999.
- (17) 中川 健・村岡裕明・杉田愷・中村慶久
"最尤復号における垂直磁気記録のノイズ相関",
電子情報通信学会技術研究報告, MR99-62, pp.23-28, 1999.

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。