

MR ヘッド対応高 S/N 単層垂直磁気記録媒体

High Signal-to-Noise-Ratio Single-Layer Perpendicular Medium for MR Heads

園部義明・池田圭宏・内田 博・豊岡孝資 日本 IBM 東京基礎研究所, 神奈川県大和市下鶴間 1623-14 (〒242)

Y. Sonobe, Y. Ikeda, H. Uchida, and T. Toyooka, IBM Research, Tokyo Research Laboratory, IBM Japan, 1623-14 Shimotsuruma, Yamato-shi, Kanagawa 242

Perpendicular recording media are expected to be used in future hard disk drives with 10–20 Gbits/in² areal density. With thicknesses of 50–100 nm, such media have an advantage as regards thermal stability over longitudinal recording media, whose thicknesses are 10–30 nm. The large medium thickness also reduces the demagnetization field and the number of magnetic defects, and increases the signal amplitude. However, the large medium noise is a significant drawback for the perpendicular recording media.

We optimized a perpendicular magnetic recording medium for use with a merged MR head designed for longitudinal media. The single-layer Co–Cr perpendicular medium has a similar MR bias current dependence of the signal amplitude and signal distortion to those of a longitudinal medium. The increase in the Cr content from the conventional 22 at% to 28 at% causes an increase in the signal-to-noise ratio of 6 dB. The Ti underlayer helps to increase the recording resolution but not to decrease the medium noise. Cr-rich Co–Cr perpendicular media with large thickness and low M_s value are expected to be used with the future high-sensitivity MR and GMR heads to achieve high-density recording of more than 10 Gbits/inch².

Key words: perpendicular recording, Co–Cr medium, medium noise, signal-to-noise ratio, delta-M measurement, magnetic force microscope, crystalline orientation, Cr-rich Co–Cr medium, magneto-resistive head

1. はじめに

MR ヘッドや面内記録媒体, 信号処理方式, ヘッド・メディアインターフェイス技術などの進歩により, ハードディスクの面密度は年率 50~60% の増加を続けている。現在では, 2 Gb/in² を超える製品が開発されるところまできている。スピナルブ・ヘッドなどの GMR センサー技術や, ヘッドの浮上高さを数十 nm に下げる低浮上技術, 高トラック密度用のサーボ技術などがこれからの面密度の向上に寄与していくものと考えられている。面内記録媒体とスピナルブ・ヘッドを用いて 5 Gb/in² を実験した報告がされている^{1)~3)}。

2002 年頃に実用化が予測されている, 10 Gb/in² を超える面密度になると, 現在の CoCr 系面内記録媒体では,

媒体膜厚を 10 nm 程度に薄くしないと反磁界のために磁氣的に安定な記録ができない。また, 媒体ノイズを下げるために, 媒体の粒子径を 10 nm 程度まで小さくする必要がある。この体積の磁性粒子では, 熱ゆらぎのために磁化が不安定になる問題が生じる可能性がある^{4)~6)}。

これに対して, 垂直磁気記録では反磁界の影響による膜厚の制限がない。したがって, ある程度膜厚を大きくして, 媒体の粒子の体積を大きくすることが可能であり⁷⁾, 熱ゆらぎの問題を回避できる。垂直媒体と MR ヘッドを組み合わせて, D₅₀ (出力信号が低域の半分になる線記録密度) が 230 kFCI の実験結果が報告されている⁸⁾。また, 垂直媒体と単磁極型インダクティブ・ヘッドを用いて, トラック幅 0.3 μ m の記録再生の実験が行われている⁹⁾。垂直記録でも GMR ヘッドを用いることにより信号振幅をさらに大きくし, トラック幅を小さくできるので, 記録密度を向上できる。

垂直記録の問題の一つは, 面内記録と比較してノイズが大きいことにある。我々は, 面内記録用に開発された MR ヘッドを用いて, CoCr 単層垂直記録媒体の評価を行ってきたが, 従来から用いられている, Cr 組成比 22 at% の媒体では, 現在の面内媒体よりも信号対雑音比 (S/N) が 7~8 dB 低い。Cr 組成比を 28 at% と大きくすることにより, S/N を改善できることを見いだした^{10)~13)}ので以下報告する。

2. MR ヘッドを用いた垂直磁気記録の展望

1980 年から 1996 年までの間に応用磁気学会や電子情報通信学会などで発表されたインダクティブ・ヘッドを用いた垂直磁気記録の実験結果について, トラック幅 1 μ m 当たりの低域出力と D₅₀ との関係を Fig. 1 に○印で示した。インダクティブヘッドの出力は, 周速 10 m/s, コイルターン数 30 ターンに換算した。また, IBM の MR ヘッドを用いた 1 Gb/in² の面内記録は □IBM-1¹⁴⁾, 3 Gb/in² は □IBM-2¹⁵⁾, スピナルブ・ヘッドを用いた記録再生特性は △IBM-3³⁾, スピナルブ・ヘッドを用いた 5 Gb/in² は富士通が △Fujitsu²⁾, 東芝は △Toshiba¹⁾, 日立の MR ヘッドを用いた垂直記録は ●Hitachi⁸⁾ として示した。さらに, 我々が得た MR ヘッドと垂直媒体の実験結果

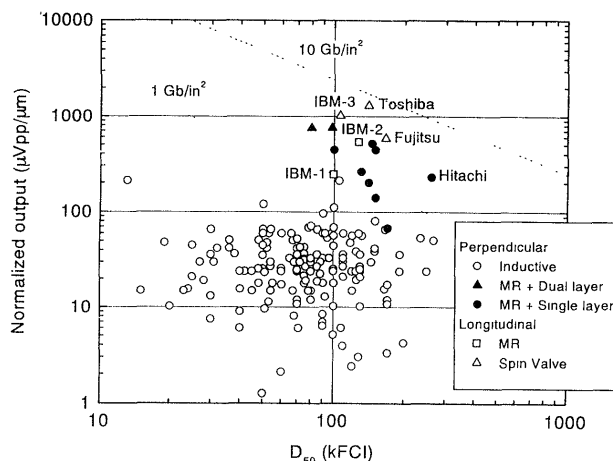


Fig. 1 Normalized output and D_{50} of perpendicular recording and recent longitudinal recording.

は^{10)~13)}, 単層媒体は●, 二層膜媒体は▲で示した。

□IBM の 1 Gb/in² の結果を基にして考えると, この記録密度のハードディスク装置を実用化するのに必要な低域出力と D_{50} との関係は, Fig. 1 の 1 Gb/in² の点線となる。すなわち, D_{50} が大きければ線記録密度が上げられるので, トラック密度は小さくてよい。この結果, トラック幅を大きくできるので, 1 μ m 当たりの信号出力は小さくてすむことになる。この 10 倍のところに 10 Gb/in² の点線を引いた。インダクティブ・ヘッドと垂直記録媒体との組み合わせでは, 1 Gb/in² は達成できそうであるが, この一桁上の 10 Gb/in² の実用化はかなりむずかしいことが推測される。 D_{50} として 300 kFCI が達成できたとしても, 1 μ m 当たり 0.8 mV の出力を得る必要がある。したがって, 10 Gb/in² のハードディスク装置を実用化するには, MR ヘッドを採用して信号振幅を大きくすることが必要不可欠である。スピバルブ・ヘッドは, これまでの MR ヘッドよりもさらに数倍の感度や出力の向上が見込めるので, 10 Gb/in² 実用化の有力な技術となる。スピバルブ・ヘッドを用いた, △Fujitsu, △Toshiba, △IBM-3 では, すでに 5 Gb/in² 程度の記録密度を達成している。

我々がこれまで行ってきた, MR ヘッドと垂直媒体とを用いた評価結果を見ると, ▲の二層媒体, ●の単層媒体ともに, 1~1.5 Gb/in² 用に開発された MR ヘッドを用いて, 2 Gb/in² を超えるレベルまで到達できている。

3. 実験方法

実験に用いた媒体は, 対向ターゲット式スパッタ装置により, 2.5 インチ・ガラスディスク基板上に直接または, 結晶配向制御のための膜厚 25 nm の Ti 下地層上に作製した。スパッタ時の基板温度は 200℃ である。合金ターゲットの組成比を変えて, Cr 組成比が 15~30 at% の媒体を作製した。カーボン保護膜 22 nm を形成し, 潤滑剤を 1 nm 塗布した後, 記録再生特性を測定した。比較のために

用いた面内媒体は保磁力 H_c : 1900 Oe, 残留磁化と膜厚の積 $M_r \cdot t$: 0.9 memu/cm² の CoPt 系媒体である。また, 二層膜垂直媒体としては, 垂直方向の保磁力 $H_{c\perp}$: 2070 Oe, 飽和磁化 M_s : 370 emu/cc, 膜厚: 90 nm の記録層を持つ CoCrTa/FeNi 媒体を用いた。

記録再生特性の測定に用いたヘッドは, Read トラック幅 2.5 μ m, シールドギャップ長 0.3 μ m, Write トラック幅 3 μ m, Write ギャップ長 0.6 μ m のマージ型 MR ヘッドである。測定は, 線速度 8.29 m/s, ヘッド浮上量約 40 nm で行った。記録電流は, 100 kFCI でそれぞれの媒体での出力が最大となる値とした。信号の大きさ (V_{pp}) を, 40 MHz のバンド幅で積分したノイズ (V_{rms}) からシステムノイズを差し引いた値で割って S/N を求めた。ここでのシステムノイズは MR バイアス電流を 0 とした時のノイズの値である。ノイズの評価では, その値を孤立再生波の振幅 (V_{0p}) で規格化した値を用いた。 M_s , $H_{c\perp}$, 異方性磁界 H_k , および垂直方向の磁気的相互作用 $\Delta M_{\perp}$ は VSM を用いて測定した。また, X 線回折装置を用いて, Co hcp (002) ピークのロッキング・カーブを測定し, その半値幅 $\Delta\theta_{50}$ を求めた。膜の平均粒径は透過型電子顕微鏡 TEM 像中の粒子 15 個の平均値から求めた。

4. Co₇₈Cr₂₂ 垂直単層媒体¹¹⁾

インダクティブ・ヘッドと組み合わせたときに記録再生特性が良好な, Co₇₈Cr₂₂ 垂直単層媒体と MR ヘッドとを組み合わせ特性を評価した。媒体はガラス基板上に直接

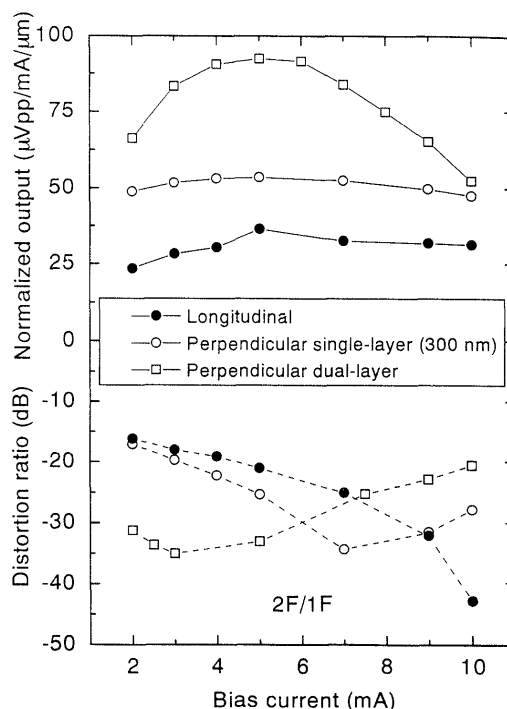


Fig. 2 Dependences of the MR-head output signal amplitude and distortion ratio on the bias current.

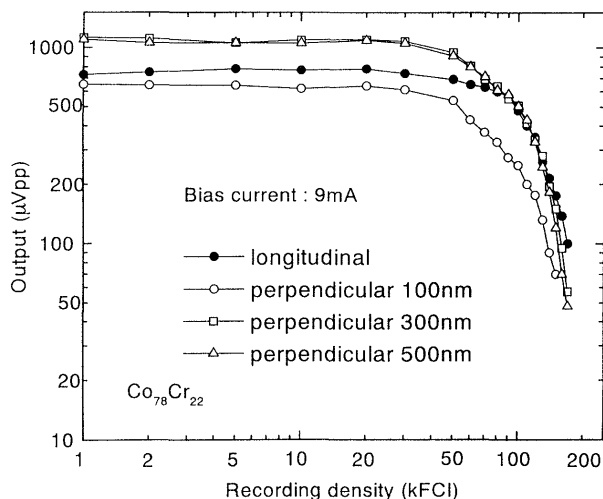


Fig. 3 Dependences of the MR-head output signal amplitude with a longitudinal medium and $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ perpendicular media on the linear recording density.

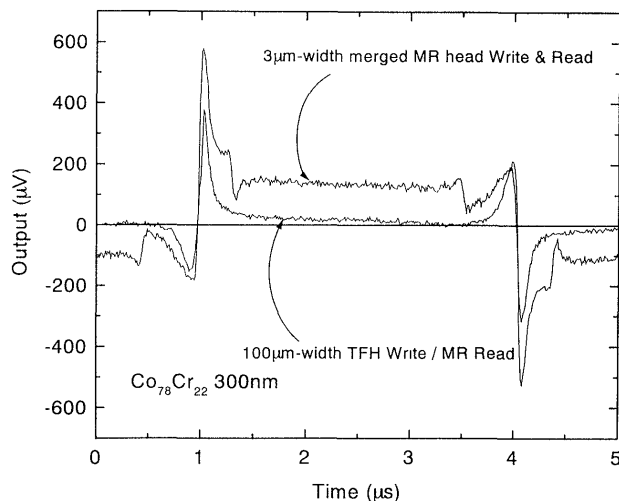


Fig. 4 Output signal waveforms of a $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ medium and an MR head at 1 kFCI for 3- and 100- μm track width.

形成し、膜厚は、100, 300, 500 nm である。Fig. 2 に $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ 単層媒体 (300 nm) を用いた場合の、MR ヘッドの規格化出力（出力をバイアス電流で割った値）と歪み率（出力の第二次高調波成分の基本波成分に対する比）のバイアス電流依存性を示す。比較のため二層媒体¹⁰⁾、および面内記録媒体の値も同時に示した。二層媒体では、規格化出力の値は面内媒体の約 2.5 倍と大きい、バイアス電流依存性が大きく、バイアス電流を大きくしていくと歪み率が大きくなる問題がある。MR ヘッドに加わる媒体の漏れ磁界が強すぎるためではないかと考えられる。膜厚 300 nm の単層膜では、出力が面内媒体の約 1.5 倍程度であるが、規格化出力のバイアス電流に対する依存性は小さく、面内媒体の特性とよく似ている。歪み率も電流の増加とともに減少し、9 mA で面内媒体とほぼ同一の値が得られた。以上の結果から、面内記録用に設計された MR ヘッド

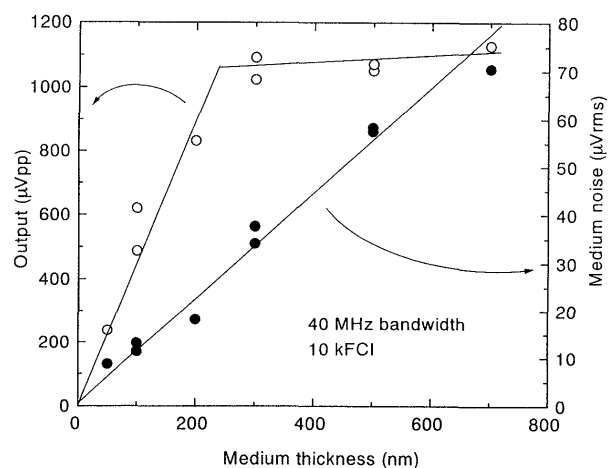


Fig. 5 Dependences of the output signal amplitude and noise on the medium thickness for $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ and $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{28}$ media.

をそのまま単層媒体に用いても良好な特性が期待できる。以下の評価では、バイアス電流を 9 mA とした。

面内媒体と膜厚 100, 300, 500 nm の単層垂直媒体の線記録密度特性を測定した結果を Fig. 3 に示す。D₅₀ はそれぞれ 115, 80, 100, 90 kFCI である。単層垂直媒体では、膜厚を面内媒体の 10 倍以上の 500 nm にしても、大きな D₅₀ が得られた。この実験に用いた媒体は、ガラス基板上に直接形成したため、約 30 nm 程度の初期成長層があると推定される。膜厚 100 nm の媒体では、VSM およびトルク解析より得た、面内異方性の値は大きく、 H_k が約 2.5 kOe と小さくなっている。このため、低域出力および D₅₀ が小さい。結晶配向用の下地層を用いれば改善できると考えられる。

以上の結果、同じ MR ヘッドを用いる条件で、垂直媒体は、面内媒体に対して、D₅₀ は 15% 程度下がるが、約 70% の信号振幅改善ができ、狭トラック記録が可能になる。

ところが、Fig. 4 に示すように、再生波形にはベースライン・シフトの問題が生じた。100 μm のトラック幅を持つ薄膜磁気ヘッドで記録を行い、トラック幅 2.5 μm MR ヘッドで再生を行った場合にはこの問題はない。ベースライン・シフトは、トラック端部から回り込む磁束によって生じていると考えられる。トラック幅を小さくすると、トラック内の磁束に対してこの回り込む磁束の比率が大きくなるので、狭トラック記録ではこの問題がさらに厳しくなる。垂直磁気記録の実用化には、ベースライン・シフトを考慮した信号処理方式の検討を行う必要がある。

高密度記録の実用化において重要な特性の一つが S/N である。Fig. 5 に 10 kFCI 記録時の出力およびノイズの膜厚依存性を示す。ノイズは膜厚の増加とともに単調に増加しているが、出力は 300 nm 付近で飽和する。出力の飽和は、膜厚をこれ以上大きくしても媒体底面の磁極による影響がなくなるのと、ここで用いたヘッドでの書き込み深さ

の限界によって生じているものと推測される。媒体が厚くなるに伴って生じる、結晶粒径の増加などがノイズの増加の原因と考えられる。この結果、S/N比は、26 dBと現状の面内記録媒体と比較して7~8 dB低い値しか得られていない。S/Nの大幅な改善を必要とする。

5. 高いCr組成比を持つ垂直記録媒体^{11)~13)}

CoCr 垂直磁気記録媒体とリング型インダクティブ・ヘッドを用いた系では、信号振幅を大きくし、S/Nを向上するために、媒体の M_s と H_k および $H_{c\perp}$ をできるだけ大きくする必要がある¹⁶⁾。このためにCrの組成比を22 at%程度とした媒体が用いられている。MRヘッドを用いる場合には、再生感度がインダクティブ・ヘッドよりはるかに大きいので、必ずしも M_s をできるだけ大きくする必要はない。媒体の設計自由度が増える。

面内記録媒体においては、結晶粒子サイズを小さくし、粒子間の磁気的な結合をできるだけ弱くすることが、ノイズを低減するための一つの指針である。垂直記録でもこれと同じ手法を適用できる。我々は、CoCr単層膜媒体のCr組成比 R_{Cr} を増加することにより、結晶粒界のCr濃度を

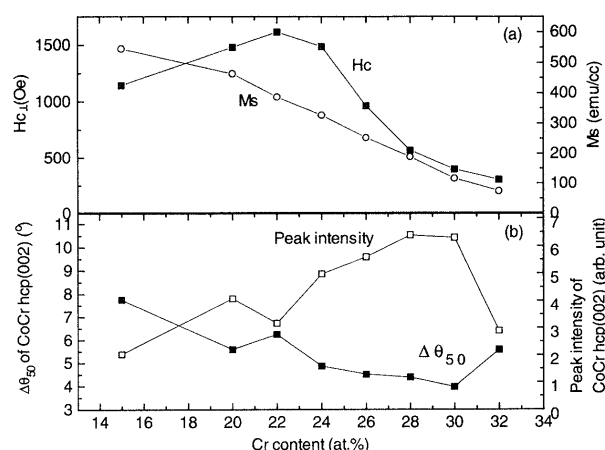


Fig. 6 Cr content dependences on magnetic properties and crystalline orientation parameters.

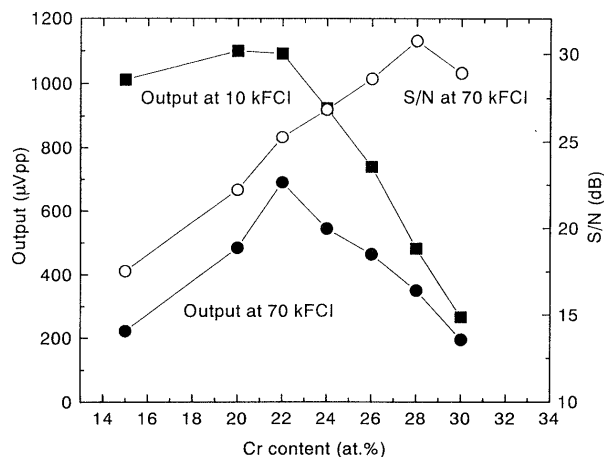


Fig. 7 Dependences of the output and S/N on the Cr content.

上げて磁気的結合を下げ、ノイズを低減できるのではないかと考えた。

R_{Cr} を15~30 at%の範囲で変えて M_s と $H_{c\perp}$, Co hcp (002) ピークの強度および $\Delta\theta_{50}$ を評価した結果をFig. 6に示す。媒体の膜厚は300 nmである。 R_{Cr} を22 at%から28 at%まで増加させると、 $H_{c\perp}$ と M_s は低下するが、Co hcp (002) ピークの強度は増加し、 $\Delta\theta_{50}$ は小さくなり、結晶性が改善される。

10 kFCIと70 kFCIにおける記録再生特性の R_{Cr} 依存性を測定した結果をFig. 7に示す。10 kFCI, 70 kFCIどちらでも再生出力は22 at%で最大値をとり、 R_{Cr} をさらに増加すると出力は低下する。一方、70 kFCIにおけるS/Nは R_{Cr} が22 at%を超えても増加し続け、28 at%で最大値31 dBが得られた。 R_{Cr} が28 at%の媒体では、 M_s の値が22 at%の媒体の約半分と少なくなるので、インダクティブ・ヘッドでは出力の点で問題がある。MRヘッドやGMRヘッドなど感度が高いヘッドでは、十分な出力が得られるので、28 at%の媒体を用いる方が有利である。S/Nは約6 dB程度改善できる。

ノイズの媒体膜厚依存性が R_{Cr} によりどう変わるかを調べた。70 kFCI記録時のノイズの膜厚依存性を、 R_{Cr} が22 at%および28 at%の媒体について測定した結果をFig. 8に示す。ノイズは、孤立再生波の振幅により規格化した。300 nmより膜厚を大きくすると、規格化ノイズ N_s は22 at%より28 at%の方が少ない。膜厚が300 nm以上の22 at%の媒体では膜厚に比例して N_s が増加している。これに対して28 at%では、膜厚依存性はほとんどない。

この原因を調べるために、結晶粒径の R_{Cr} 依存性を調べた。 R_{Cr} が22 at%および28 at%の媒体について、TEMを用いて平均粒径の膜厚依存性を評価した。膜厚100 nmでは平均粒径が約15 nmである。膜厚300 nmまで増加させると粒径は約40 nmと大きくなる。 R_{Cr} 依存性はほと

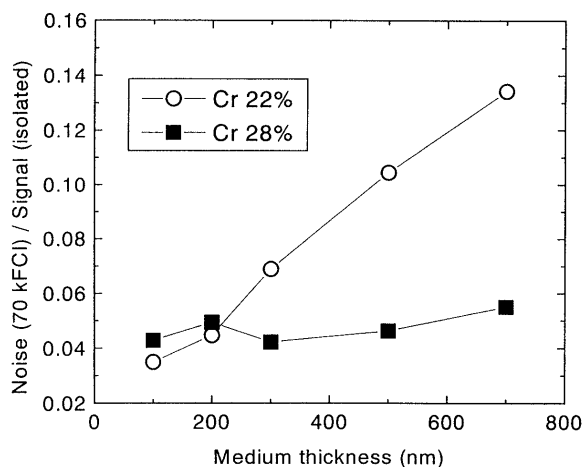


Fig. 8 Medium noise dependences on the medium thickness for $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ and $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{28}$ Media.

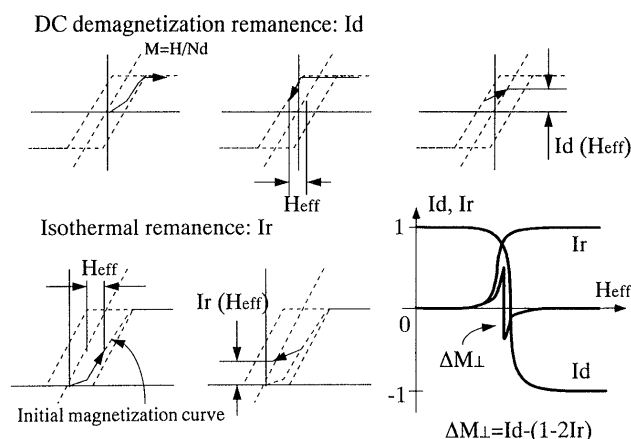


Fig. 9 Measurement method of perpendicular magnetic interaction, $\Delta M_{\perp}$ for perpendicular media taking account of the demagnetization field.

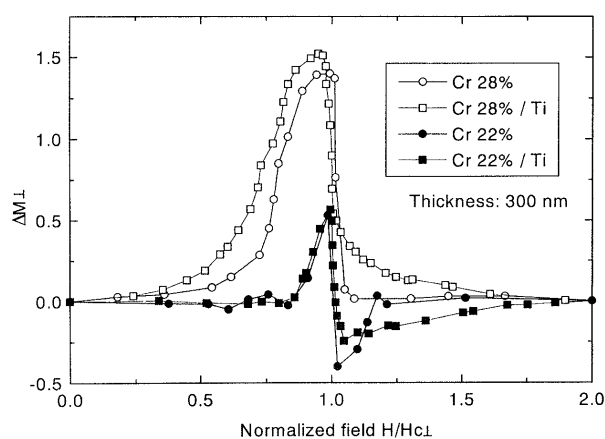


Fig. 10 Effective field, H_{eff} dependences of perpendicular magnetic interaction $\Delta M_{\perp}$ for $\text{Co}_{78}\text{Cr}_{22}$ and $\text{Co}_{72}\text{Cr}_{28}$ media with and without Ti underlayers.

んど見られなかった。すなわち、 R_{Cr} 増加による媒体の低ノイズ化は、結晶粒径の大きさによるものではない。

面内媒体で用いられるノイズの分析手法の一つとして、粒子間の磁氣的相互作用 ΔM の評価がある。 ΔM の有効印加磁界 H_{eff} に対する傾き $(d(\Delta M)/dH)$ の最大値と媒体ノイズには相関がある。傾きの最大値が大きい場合には、粒子間の磁氣的相互作用が大きく、ノイズも大きくなる¹⁷⁾。

今回用いた垂直方向の $\Delta M(\Delta M_{\perp})$ の測定では、Fig. 9 に示すように反磁界の影響が残留磁化の測定時にもあることを考慮した。すなわち、 $H_{c\perp}$ 付近のメジャーループの傾きを持ち、原点を通過する直線 $M=H/N_d$ 上において、 H_{eff} が 0 になるとした¹⁸⁾。この直線上における、DC 消磁状態から H_{eff} を変化させ、0 に戻した時の規格化残留磁化を I_d とする。AC 消磁状態から H_{eff} を変化させ、0 に戻したときの規格化残留磁化を I_r とする。Wohlfarth の関係式¹⁹⁾、 $I_d = 1 - 2I_r$ からのずれ $\Delta M_{\perp} = I_d - (1 - 2I_r)$ を計算した²⁰⁾。

R_{Cr} が 22 at% および 28 at% の媒体 (膜厚 300 nm) に

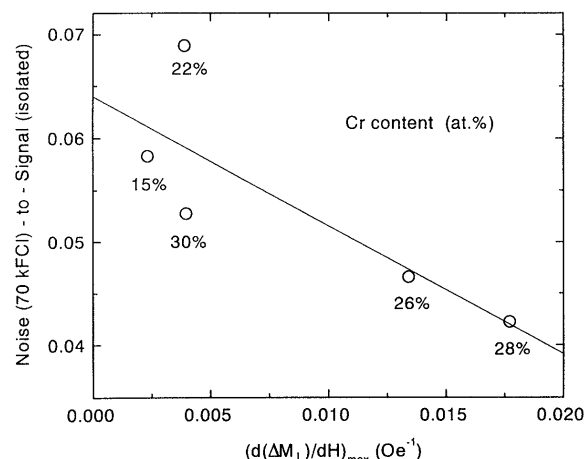


Fig. 11 Dependence of the normalized medium noise on the $(d(\Delta M_{\perp})/dH)_{\text{max}}$ value.

ついて $\Delta M_{\perp}$ を測定した結果を Fig. 10 に示す。この図には、後述する、Ti 下地層を用いた場合の結果も併せて示した。 R_{Cr} を 28 at% と大きくすると、22 at% の場合と比較して、 $H_{c\perp}$ 近傍での $\Delta M_{\perp}$ のピークが大きくなり、 $(d(\Delta M_{\perp})/dH)$ の最大値も大きくなる。

R_{Cr} が 15 at% から 30 at% の媒体について、 $(d(\Delta M_{\perp})/dH)$ の最大値と 70 kFCI 記録時の規格化ノイズとの関係を調べた結果を Fig. 11 に示す。この両者には強い相関が見られ、 $(d(\Delta M_{\perp})/dH)$ の最大値を大きくすることにより、低ノイズ化が実現できることがわかった。面内記録媒体の場合とは逆の傾向になっている²⁰⁾。

また、DC 消磁した後の媒体の表面を MFM で観察したところ、 R_{Cr} が 28 at% の場合には、 R_{Cr} が 22 at% の場合と比較して、反磁界により反転した磁区の大きさがはるかに小さいことがわかった。

以上の結果から、 R_{Cr} を 28 at% とすることにより、DC 消磁状態の磁化をより安定化させ、ノイズの原因となる反転磁化領域の大きさを小さくでき、低ノイズ化が実現できていることが推測される。ただし、磁氣的相互作用がどのようなメカニズムでノイズと関係するのかは、まだよくわかっていない。今後検討していく必要がある。

6. Ti 下地層の効果^{11), 13)}

垂直媒体の結晶配向性を向上させることにより、高い線記録密度を得られることが報告されている²¹⁾。配向制御層として 25 nm の Ti 下地層を用いると、出力の媒体膜厚依存性は Fig. 12 に示すようになった。(a) は 10 kFCI, (b) は 100 kFCI における測定結果である。 R_{Cr} が 22 at% では Ti 下地層により 10 kFCI と 100 kFCI の両方で出力が低下する。28 at% では 10 kFCI の減少は小さく、100 kFCI の出力は向上した。22 at% での出力低下は、 H_c の小さい初期層が低減することにより、媒体裏面の磁極の影響が現れるからである。28 at% では、媒体裏面の磁極の

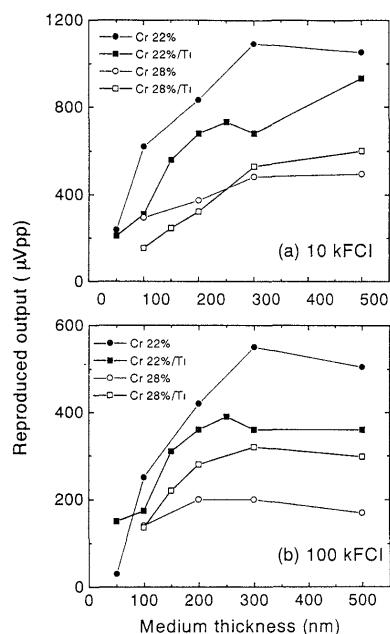


Fig. 12 Dependences of the normalized medium noise on the width of the half maximum intensity, $\Delta\theta_{50}$.

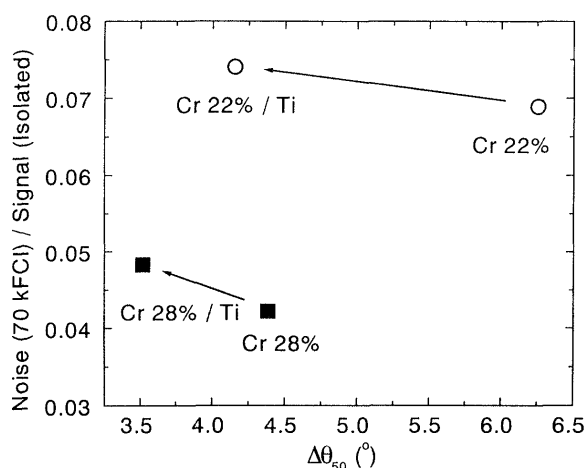


Fig. 13 Dependences of the output signal amplitude on the medium thickness (a) in 10 kFCI recording and (b) in 100 kFCI recording.

影響よりも、前章で述べた、Cr 組成比を大きくした効果が大きく 100 kFCI における出力が改善されているものと考えられる。すなわち、磁界の面内成分が大きいリング型ヘッドによる書き込みでも、膜面に垂直方向の磁氣的相互作用が強く、理想的な垂直磁化が形成されるからである。

結晶配向度とノイズとの関係調べるため、 R_{Cr} が 22 at% および 28 at% で、Ti 下地層のある媒体とない媒体を作成した。Fig. 13 にそれぞれの媒体の $\Delta\theta_{50}$ と 70 kFCI 記録時のノイズとの関係を示す。 R_{Cr} が 22 at% および 28 at% の媒体ともに、Ti 下地層を用いることにより結晶配向度は向上しているが、ノイズは若干増加している。すな

わち、結晶配向度を向上することが必ずしも S/N 向上につながらない。Ti 下地層の有無による、 $\Delta M_{\perp}$ 曲線の変化を調べた結果はすでに Fig. 10 に示した。Ti 下地層の有無による差はほとんどなく、Cr 28 at% の媒体では、 $\Delta M_{\perp}$ の値は大きく、Cr 22 at% では小さい。以上の結果から、 $\Delta M_{\perp}$ はノイズと強い相関を持つ値であり、垂直媒体のノイズ低減のアプローチを見いだすための有力な手法であるといえる。

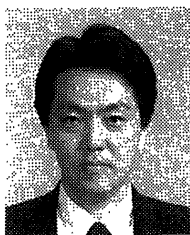
7. ま と め

面内記録用 MR ヘッドと CoCr 垂直記録媒体とを組み合わせ系の記録再生特性を評価した。Co₂₂Cr₇₈ 垂直単層媒体では、300 nm の膜厚でも面内記録媒体に近い高線密度記録が可能であり、出力振幅を 70% 程度大きくすることができた。Cr 組成比を従来の 22 at% から 28 at% 程度まで増加することにより、膜厚が 300 nm と大きな媒体でもノイズを下げ、S/N を 6 dB 向上することができた。Ti 下地層は線記録密度向上には有効であるが、低ノイズ化には効果が小さい。 ΔM の測定法を垂直媒体に適用する方法を考案し、ノイズ特性の解析を行った。この結果、 $\Delta M_{\perp}$ と S/N に相関が見られることがわかった。今後第三元素の添加などによりさらに特性を改良することにより、Cr 組成比増加による高 S/N 化は、垂直磁気記録を実用化する上での重要な技術の一つになりうると考えている。

参 考 文 献

- 1) H. Yoda *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3363 (1996).
- 2) H. Kanai *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3368 (1996).
- 3) C. Tsang *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 3801 (1994).
- 4) S. Iwasaki *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3793 (1996).
- 5) 二本正昭: 日本応用磁気学会第 93 回研究会資料, p. 45 (1996).
- 6) 田上克通, 坪井眞三: 日本応用磁気学会第 93 回研究会資料, p. 17 (1996).
- 7) 上坂保太郎, 他: 信学技報, **MR96-37**, 7 (1996).
- 8) M. Futamoto *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3789 (1996).
- 9) Y. Nakamura *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **18**(Suppl. No. S1), 583 (1994).
- 10) Y. Sonobe *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 2681 (1995).
- 11) Y. Sonobe *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3801 (1996).
- 12) Y. Ikeda *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3828 (1996).
- 13) Y. Sonobe *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **81**(8), 15 (1997).
- 14) T. Howell *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2298 (1991).
- 15) C. Tsang *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 7 (1996).
- 16) 鈴木俊行, 信学技報, **MR81-8** (1981).
- 17) K. O'Grady *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 286 (1993).
- 18) I. Tagawa *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3981 (1993).
- 19) E. P. Wohlfarth: *J. Appl. Phys.*, **29**, 595 (1958).
- 20) P. E. Kelly *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 3881 (1989).
- 21) M. Futamoto *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **21**, 1426 (1995).

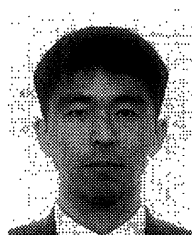
(1997 年 3 月 5 日受理)



園部 義明 そのべ よしあき

昭 55 早稲田大学理工学研究科物理および応用物理学専攻修士課程修了，同年 (株)東芝総合研究所入社，平 1 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所入社，現在に至る。

専門 磁気記録



内田 博 うちだ ひろし

平 1 筑波大学第三学群基礎工学類卒，平 3 同大学院研究科退，同年 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所入社，現在に至る。

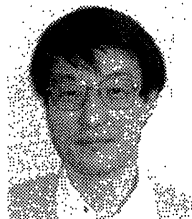
専門 磁気記録



池田 圭宏 いけだ よしひろ

昭 63 早稲田大学理工学部電気工学科卒，平 2 早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修士課程修了，同年 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所入社，現在に至る。

専門 磁気記録媒体，トライボロジー



豊岡 孝資 とよおか たかし

昭 47 東京大学工学部電子工学科卒，昭 49 同大学大学院工学系研究科修士課程修了，昭 49 (株)日立製作所入社，中央研究所にて磁気バブルメモリの研究開発に従事，平 1 日本 IBM(株)入社，東京基礎研究所にてソリッドステートファイル，磁気記録等の研究に従事，現在に至る。

専門 磁気デバイス，磁気記録 (工博)