

MR ヘッドと単層垂直媒体を用いた高密度磁気記録

High Density Magnetic Recording with Ring-Head Writing and MR-Head Reading Employing Single-Layer Perpendicular Recording Media

二本正昭・平山義幸・本多幸雄・伊藤研也 (株)日立製作所中央研究所

M. Futamoto, Y. Hirayama, Y. Honda, and K. Itoh, Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.

Potential merits of perpendicular magnetic recording are discussed on the basis of the magnetic properties of Co-based alloys. The possibility of high-density magnetic recording has been investigated for a combination of single-layer perpendicular disk media with ring-head writing and MR-head reading.

The noise characteristics of $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ media are improved by employing a $\text{CoCr}_{35}/\text{TiCr}_{10}$ dual underlayer, by adding Ta to the magnetic layer, and by reducing the magnetic crystal grain diameter. A linear recording density (D_{50}) of 260 kFCI and an S_0/N ratio of over 30 dB are observed for low noise $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ perpendicular media using a flying-type MR head at a magnetic spacing of 40 nm. Side-writing and side-erasing can be reduced to below $0.2\ \mu\text{m}$ by employing a narrow-gap write head with trimmed sharp track edges, which has the potential to realize a track density greater than 25 kTPI. The recording areal density can thus be increased beyond the $10\ \text{Gb}/\text{in}^2$ level with the present recording system.

Key words: single-layer perpendicular disk media, dual underlayer, ring head, MR head, linear recording density, track density, media noise

1. はじめに

近年の磁気記録装置では、高感度のMRヘッド、PRML信号処理技術などの新しい要素技術が次々と導入されることにより、面記録密度の急速な向上が可能となり、すでに製品として $1\ \text{Gb}/\text{in}^2$ を超える記録密度が実用化されつつある。面記録密度の向上は今後とも継続し、西暦2000年には磁気記録の面記録密度は $10\ \text{Gb}/\text{in}^2$ を超えるものと思われる。今後の記録密度の向上を支える要素技術として、MRヘッドの数倍以上の再生感度が得られるGMRヘッド、超狭スペーシングでの記録再生を行うニアコンタクトあるいはコンタクトインターフェース技術、EPRMLやDFEなどの高度信号処理技術などが検討され始めている。記録方式として面内磁気記録が実用化されているが、 $10\ \text{Gb}/\text{in}^2$ 以上の記録密度を展望すると、記録ビットの微細化に伴う熱的な揺らぎによる磁化の劣化、記録ヘッド能力を超えかねない媒体の高保磁力化、高線記録密度で記録した場合のパーシャルイレージャー、媒体ノイズや非線形

ビットシフト量の増大などの困難な問題が想定される。垂直磁気記録は、面内記録で今後問題となるこれらの課題を軽減あるいは回避してさらなる記録密度の向上を可能にする記録方式であり^{1),2)}、しかも今後ヘッドと媒体間のスペーシングがますます狭少化することを考慮すると、その特長を發揮できる環境が整ってきている。

垂直磁気記録においては、単磁極ヘッドと2層垂直媒体を組み合わせた記録再生系が理想的な系³⁾として積極的な検討が行われてきている。一方、リングヘッドと単層垂直媒体を組み合わせた系でもスペーシングを狭少化することにより、高い線記録密度が得られることが明らかになっている^{4),5)}。この系は記録系磁気回路が単純なこと、面内磁気記録用に開発されている薄膜リング型のヘッドを使えること、媒体の構造が単純なこと、などの特長があり、現在実用化されている面内記録方式から要素技術を大幅に変えることなく、垂直磁気記録の特長を活かして面記録密度の継続的な向上を図ることができる有望な方式と考える。本稿では、高密度磁気記録方式としての垂直磁気記録の特長、および我々が検討しているリングヘッドと単層垂直媒体を組み合わせた記録再生系について高密度磁気記録化の検討結果を紹介する。

2. 高密度磁気記録における垂直磁気記録の特長

磁気記録の高密度化に伴い、記録ビットは微細化して薄膜磁気記録媒体を構成する結晶粒の寸法に近づく。記録ビットの占有面積は、 $10\ \text{Gb}/\text{in}^2$ では $0.063\ \mu\text{m}^2$ 、 $20\ \text{Gb}/\text{in}^2$ では $0.032\ \mu\text{m}^2$ 、 $40\ \text{Gb}/\text{in}^2$ では $0.016\ \mu\text{m}^2$ となり、平均結晶粒径を現状の面内磁気記録体と同等の $15\ \text{nm}$ とすると、1ビットに含まれる結晶の数はいずれも278、140、70個程度となる。 $10\ \text{Gb}/\text{in}^2$ 以上の記録密度を実現するためには、信号処理などで画期的な新技術が開発されない限り、単磁区的に振舞う程度に磁性結晶粒間の磁気的分離を促進させることが不可欠と考えられる^{6),7)}。さらに1ビットに含まれる結晶粒の数が減少すると粒子性のノイズが増えるため、記録密度の向上に伴い結晶粒径も低減する必要がある。しかし、結晶粒が微細化し過ぎると超常磁性化してしまうことになり、限界が存在する。純Coの場合、臨界直径は $4\ \text{nm}$ 程度であり、磁性膜の膜厚が結晶粒の直径と

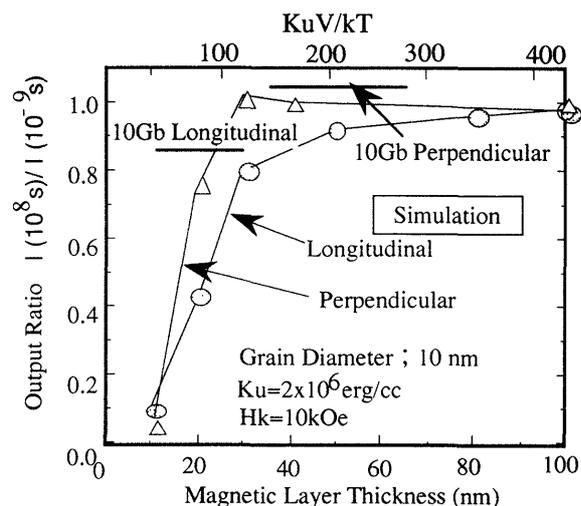


Fig. 1 Output decrease estimated by computer simulation for longitudinal and perpendicular recording media.⁸⁾

同等な場合、Co合金系薄膜媒体の結晶粒径は少なくとも5 nm以上であることが必要である。

Fig. 1は、上坂らがマイクロマグネティックモデルに基づいて、記録磁化の熱的安定性を計算機シミュレーションで検討した結果であり⁸⁾、記録直後に対して 10^8 秒後の磁化の割合を示す。結晶粒は直方体($10 \times 10 \times t$ nm³)、磁気異方性エネルギー $K_u = 2 \times 10^6$ erg/cc、線記録密度として垂直磁気記録では40 kFCI、面内磁気記録では320 kFCI、温度は350 Kを仮定している。面内記録、垂直記録のいずれの記録方式でも $K_u V / kT < 100$ では、記録磁化の減少が起こる。記録磁化の熱揺らぎによる劣化に対しては、媒体膜厚を大きくとれる垂直磁気記録の方が有利であることが分かる。Table 1は面内記録と垂直記録媒体を構成する結晶粒の大きさと熱的な安定指標 $K_u V / kT$ の関係を代表的なCo合金系磁性膜について10~40 Gb/in²の面記録密度を想定した媒体の結晶粒子と比較したものである^{8), 9)}。 K_u の値は、単結晶磁性薄膜を用いて実験で決定した値である¹⁰⁾。結晶粒は直方体とし、面内媒体の場合は磁性膜厚は結晶の辺の長さと同じとし、垂直媒体では10

~20 Gb/in²クラスの媒体の膜厚を50 nm、30~40 Gb/in²クラスの媒体の膜厚を25 nmとした。面内記録の場合、結晶粒径が10 nm以下になると、Co合金膜では、記録磁化が熱揺らぎのために劣化し始めるとされる $K_u V / kT < 100$ となる⁸⁾。これに対し、垂直記録媒体の場合は膜厚を厚くとれるため、 K_u の小さいCoCrTa磁性膜でも10~20 Gb/in²クラスの面記録密度では $K_u V / kT > 100$ となる。高密度磁気記録媒体では、結晶粒の微細化とともに磁気的な分離を図る必要性を考慮すると、CoにCrなどの合金元素を添加しても高い $K_u V / kT$ 値を確保できる垂直磁気記録媒体の方が媒体材料選択の自由度が大きい。磁性膜として今まで扱ってきたCo合金と結晶配向や粒径制御に有用なエピタキシャル下地技術を活用できる点も有利な要因と考える。

面内磁気記録の場合、線記録密度を向上するためには記録磁性膜の残留磁化と膜厚の積の値 ($B_r \cdot t$) を低減するとともに、媒体の保磁力 (H_c) を増大する必要がある。媒体の記録保磁力が数 kOe 以上になると、記録磁気ヘッドの磁界強度が不十分となる可能性がある。これに対し、垂直磁気記録では媒体保磁力と線記録密度の間には、面内記録ほど強い相関性が無い。このため、記録ヘッドの能力に応じて垂直媒体の保磁力を低めに設定することも可能である。同じ保磁力を持つ面内、垂直媒体に磁気記録を行う場合、垂直磁気記録媒体の方が低いヘッド磁界で記録できることも知られており、今後、記録ヘッドのトラック幅が1 μ m以下に狭小化していくことを考慮すると、ヘッド/媒体系の設計において垂直記録の優位性が出てくると思われる⁹⁾。

線記録密度の増大とともに、面内記録の場合、ジグザグ状の磁化遷移領域に起因する媒体ノイズの増大、隣接する磁化遷移領域が重なることによって生ずる部分的な磁化の消去(パーシャルイレージャー)、あるいは磁化遷移境界の移動(NLTS)などの問題が顕著になる。垂直磁気記録では、媒体ノイズは直流消磁状態のノイズによって決まり、線記録密度依存性は小さいこと¹¹⁾、磁化遷移の直線性が面内記録に比べて良いためパーシャルイレージャーが起こりにくいこと、NLTSも小さいこと^{12), 13)}などが報告されている

Table 1 $K_u V / kT$ values for typical magnetic materials

Material	K_u 10 ⁶ erg/cc	Longitudinal		Perpendicular	
		10-20 Gb/in ² (10 nm) ³	30-40 Gb/in ² (8 nm) ³	10-20 Gb/in ² 50 nm (10 nm) ²	30-40 Gb/in ² 25 nm (8 nm) ²
CoCr ₁₆ Ta ₄	1.7	41	21	205	66
CoCr ₁₅ Pt ₈ Si ₃	2.0	48	26	240	77
CoCr ₁₅ Pt ₁₂	3.3	80	41	400	128
Co	4.5	109	56	545	176

る。

垂直磁気記録の採用により、面内磁気記録の高密度化で今後遭遇すると懸念される幾つかの困難な問題を回避あるいは軽減することが期待できる。しかし、例えば直流消磁状態の媒体ノイズが、垂直磁気記録媒体では面内媒体に比べて大きいこと、低記録密度で磁気記録した場合の反磁界による逆磁区の生成による記録磁化の減少が起こること、などの問題もある。高密度磁気記録方式としての垂直磁気記録の位置づけを明確化するためには、これらの技術課題に対し系統的な実験を行い、高密度磁気記録系としての可能性を検証することが必要である。

3. リングヘッド/単層垂直磁気記録媒体の組み合わせによる高密度磁気記録

3.1 高配向単層垂直磁気記録媒体

リングヘッドを垂直磁気記録用のヘッドに用いる場合、垂直媒体には強い垂直磁気異方性を持たせることが必要となる。このためには、Co合金磁性膜を構成する結晶粒の磁化容易軸(c軸)を基板に対して垂直になるように下地の構造や製膜のプロセス条件を選ばねばならない。hcp構造を持つCo合金磁性膜のc軸配向性を改善するためには、下地としてGe, Ti, Ti-Cr膜を導入することが有効であるが^{4), 14)}、これらの下地とCo合金磁性膜の界面には数nm幅の結晶性の乱れた領域が存在することが明らかになってきた。このような領域は、垂直磁気異方性や保磁力を低下させたり、逆磁区形成の核生成点になりうるなどの望ましくない効果を生ずる可能性がある。このような結晶性の劣った領域の形成を防ぐため、TiCr₁₀下地上に第2の下地である非磁性CoCr₃₅膜を設けたCoCr/TiCr2層下地の導入を図った^{2), 16)}。Fig. 2は、CrTi₁₀単層下地とCoCr₃₅/

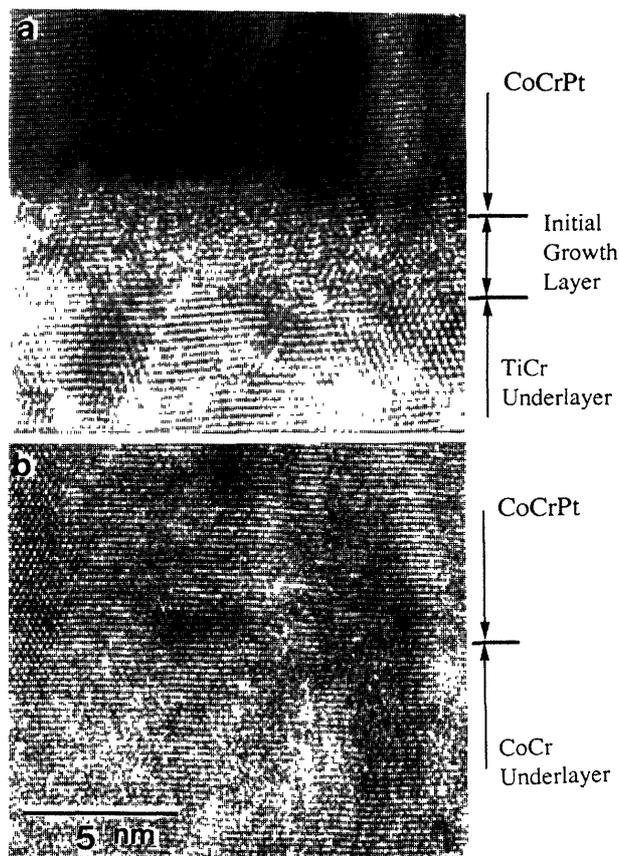


Fig. 3 High resolution TEM images of interface between underlayer and CoCrPt magnetic layer. (a) TiCr single underlayer. (b) CoCr/TiCr dual-underlayer.

CrTi₁₀ 2層下地上に形成したCoCr₁₉Pt₁₀垂直磁化膜の表面構造と磁気特性を比較して示したものである¹⁶⁾。2層下地を採用した場合、結晶粒径はほとんど変化しないが保磁力と M_r/M_s 比が向上していることが分かる。Fig. 3に下

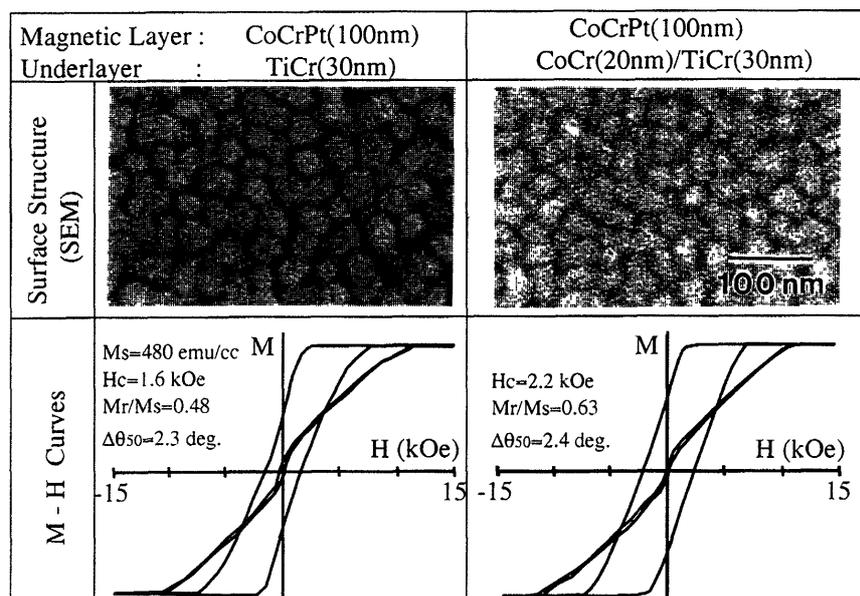


Fig. 2 Structures and M-H curves of single and dual underlayer CoCr₁₉Pt₁₀ perpendicular media.

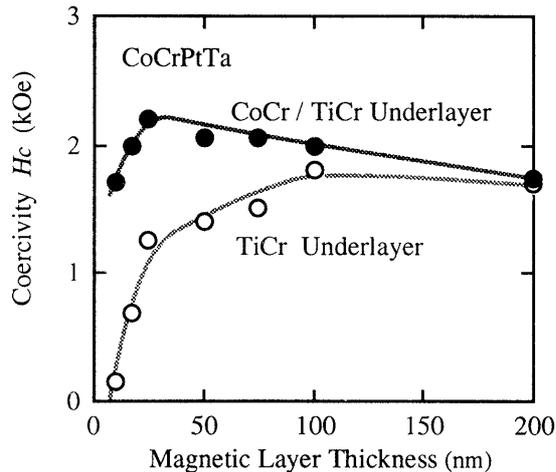


Fig. 4 Relationship between coercivity and magnetic layer thickness for single and dual underlayer structures.

地と磁性膜の界面の断面構造を高分解能の電子顕微鏡で観察した結果を示す。下地に用いた非磁性 CoCr_{35} はその上に形成した $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 磁性膜と同じ hcp 構造を持っているため、両者はエピタキシャル成長により結晶格子が連続し、しかも磁気的には急峻な界面が形成される。この膜構成の場合、結晶性が劣る初期成長層はほぼ完全に除去されている。Fig. 4 は、 $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 磁性膜の厚さを変化させた時の膜面に対して垂直方向で測定した保磁力の変化を単層下地と2層下地で比較したものである。単層下地の場合、磁性膜の膜厚が減少するにつれ保磁力が減少するのに対し、2層下地の場合は膜厚が 15 nm と小さい場合でも 2 kOe 以上の高い保磁力が得られている。2層下地の採用により約 2 kOe のほぼ一定の保磁力が得られる磁性膜厚の範囲は 15~200 nm に拡大している。

2層下地技術は、後述するように媒体ノイズの低減や反磁界に起因する減磁の低減にも極めて有効であり、単層型の垂直磁気記録媒体の開発における重要な技術である。

3.2 線記録密度特性

単層垂直磁気記録媒体とリングヘッド記録の組み合わせでは、記録ヘッドに流す電流を増すと再生出力が増大した後減少する、いわゆる記録減磁が問題となる。Fig. 5 に示すように、磁気異方性が小さくしかも単層の CrTi 下地上に形成した $\text{CoCr}_{16}\text{Ta}_4$ 媒体の場合には記録減磁が大きいのにに対し、2層下地上に形成した $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 垂直媒体の場合、この割合が大幅に低減した¹⁶⁾。記録減磁は線記録密度が増大するほど起こりやすいが、垂直磁気記録媒体の材料と構造を制御することで軽減できる。この問題に対しては媒体だけではなく記録ヘッドの改善も併せて行うことにより、より着実な対応が可能になる。

Fig. 6 は、単層垂直磁気記録媒体にリングヘッドで磁気記録を行った場合のスペーシングと出力半減記録密度 (D_{50}) の関係を調べた結果である^{2), 17)}。スペーシングが 70

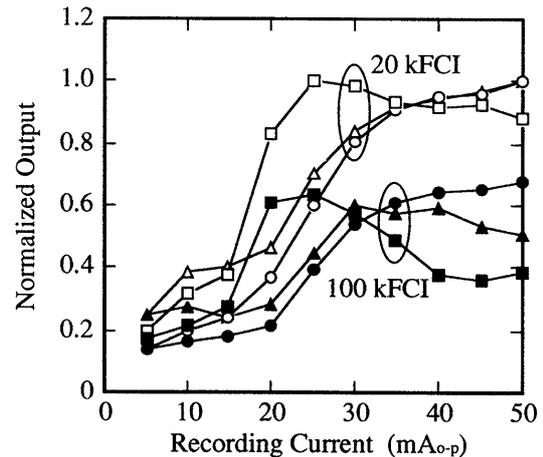


Fig. 5 Relationship between recording current and reproduced output. —□—■—, CoCrTa/Ti ; —△—▲—, CoCrPt/TiCr ; —○—●—, CoCrPt/CoCr/TiCr .

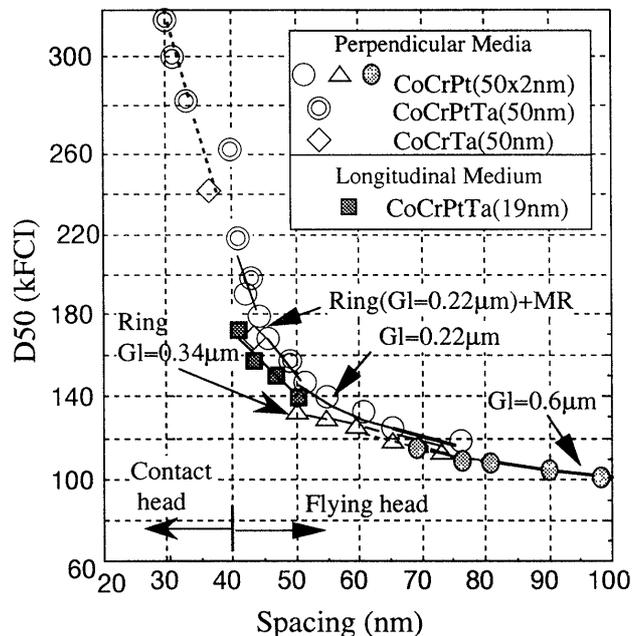


Fig. 6 Relationship between D_{50} and magnetic spacing measured for perpendicular and longitudinal recording media using different gap-length (G_l) write heads under flying and contact recording conditions.

nm 以上の領域では面内記録媒体との差はほとんど認められない。スペーシングが狭小化するに従い、垂直記録媒体の D_{50} が大きくなる傾向が顕著になる。浮上型のリングヘッドで高配向の $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 垂直媒体に記録し、MRヘッドで再生したとき 40 nm のスペーシングで $D_{50}=260$ kFCI の値が得られた。自己録再型のコンタクトヘッドを用いた場合、記録密度特性の包絡線から求めた D_{50} として 320 kFCI の値を確認した。Fig. 7 に高配向垂直磁気記録媒体の記録磁化状態を磁気力顕微鏡で観察した例を示す²⁾。400 kFCI の高線記録密度でもビット遷移が認められ

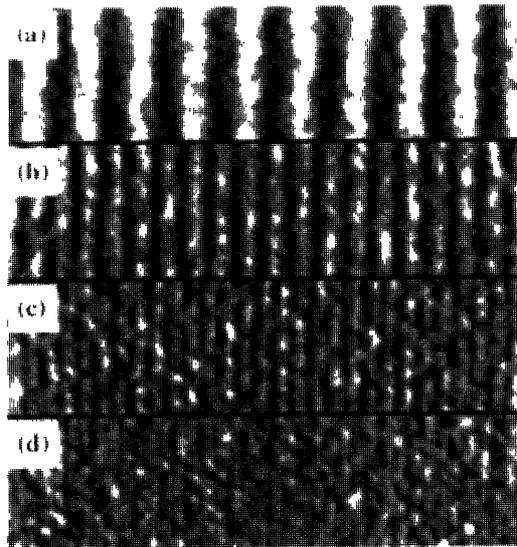


Fig. 7 Recorded magnetization structures observed by MFM: (a) 100 kFCI, (b) 200 kFCI, (c) 300 kFCI, and (d) 400 kFCI.

ている。これらの結果から、 $0.2\mu\text{m}$ 以下の狭ギャップを持つ記録ヘッドで記録し、シールド間隔の小さいMRヘッドで再生することにより、スペーシングが40nm以上の浮上スライダを用いた磁気記録でも、300 kFCI以上の D_{50} 値を実現することは可能と考えられる。

3.3 高トラック密度化の可能性

リングヘッドで記録を行う場合、記録トラック端部の記録状態、記録にじみ、および消しにじみが問題となる。記録ビット形状は長方形で端部は急峻であること、記録にじみ(ΔW)と消しにじみ(ΔE)が小さいことが、トラック密度を向上するためには必要である。 ΔW , ΔE の説明図と測定結果の例をFig. 8に示す。 ΔW , ΔE の測定は、1f (7 kFCI)信号上に2f (15 kFCI)信号をオフトラック記録して、それぞれの信号のオフトラック特性を測定することによって行ったものである^{2), 18)}。この実験に用いたリングヘッドは磁極の両端部を集束イオンビームで矩形形状に加工してある。端部を加工したヘッドを用いることにより、Fig. 8(b)に示すように、 ΔW , ΔE ともに実験に用いた記録ヘッドのギャップ長($0.2\mu\text{m}$)以下にできることを確認した。Fig. 9は、このヘッドを用いて1f (45 kFCI)信号の上に2f (200 kFCI)信号をオフトラック記録した状態の磁気力顕微鏡像と、トラック幅方向の1fおよび2f信号の分布を磁気力顕微鏡像信号にフーリエ解析法を用いることによって計測した結果である。重ね書きされた境界で1f, 2f信号とも $0.2\mu\text{m}$ 以内で急峻に変化しており、前述の ΔW , ΔE の測定結果を裏づけている。このような実験結果から、リングヘッドを用いても、磁極形状を揃えた記録ギャップ長の狭い記録ヘッドを用いることにより、記録にじみおよび消しにじみの幅をいずれも $0.2\mu\text{m}$ 程度以下にすることは十分可能と判断される。この場合、記録トラック幅を仮

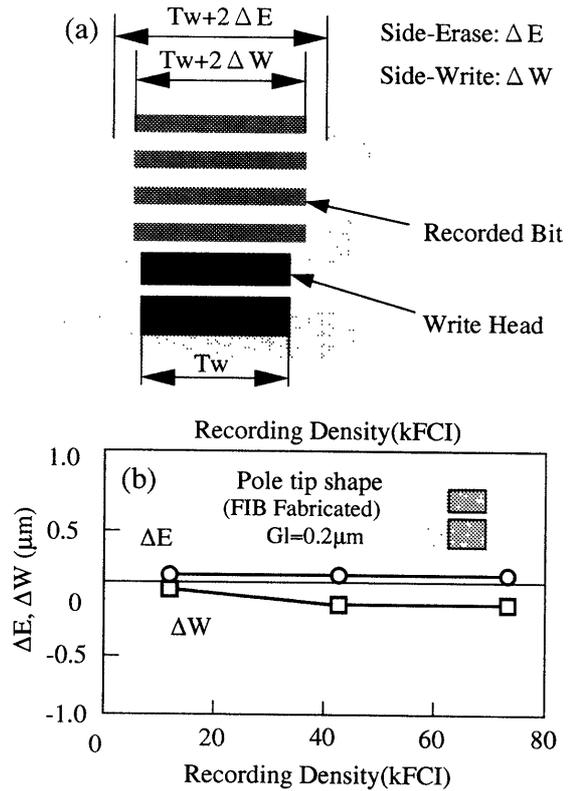


Fig. 8 Side-erase (ΔE) and side-write (ΔW) dependences on the linear recording density.¹⁸⁾ (a) Explanation of ΔW and E . (b) ΔE and ΔW measured for a combination of single-layer perpendicular medium and a ring-head.

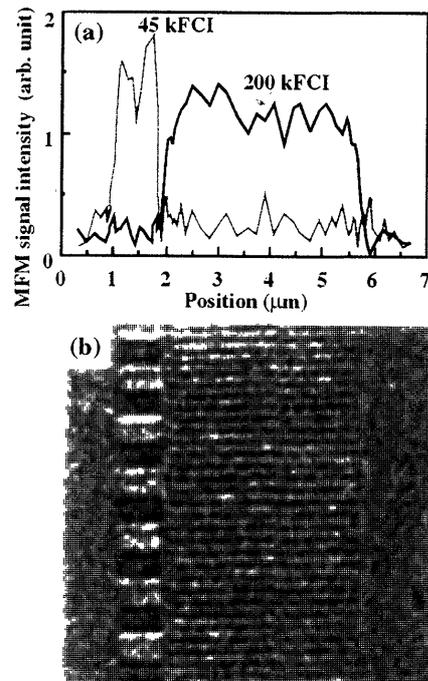


Fig. 9 Off-track overwrite characteristics. (a) Off-track profiles of recorded signals. (b) MFM image recorded at 200 kFCI on 45 kFCI.

に $0.8\ \mu\text{m}$ とすると、記録トラックピッチは $1\ \mu\text{m}$ 以下となり、 $25\ \text{kTPI}$ 以上の高トラック密度記録が可能になる。

3.4 媒体ノイズの低減

磁気記録の高密度化を図るためには、線記録密度とトラック密度の向上に加えて高密度での信号/ノイズ比 (S/N) を高く保つことが必要となる。垂直磁気記録媒体の記録信号 S/N を高く保つには、高い再生出力と同時に低いノイズ特性を実現しなければならない。Fig. 10 は、 $\text{CoCr}_{17}\text{Ta}_4$ 、 $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 、および $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 磁性膜を用いた単層垂直磁気記録媒体に $3\ \text{kFCI}$ の信号を記録したときの媒体の $M_r \cdot t$ 値と再生出力の関係を示すものである¹⁶⁾。ここで媒体の膜厚は $25\sim 200\ \text{nm}$ の範囲で変化させている。この図から明らかなように、再生出力は $M_r \cdot t$ 値にほぼ比例して増大しており、媒体膜厚が一定の場合、高い再生出力を得るためには媒体の M_r を大きくするのが有効で

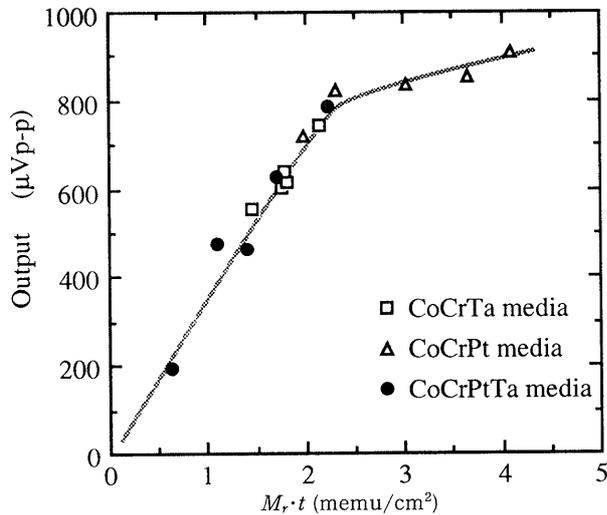


Fig. 10 Relationship between low-density output and remanence magnetization $M_r \cdot t$ measured for CoCrTa, CoCrPt, and CoCrPtTa perpendicular recording media.

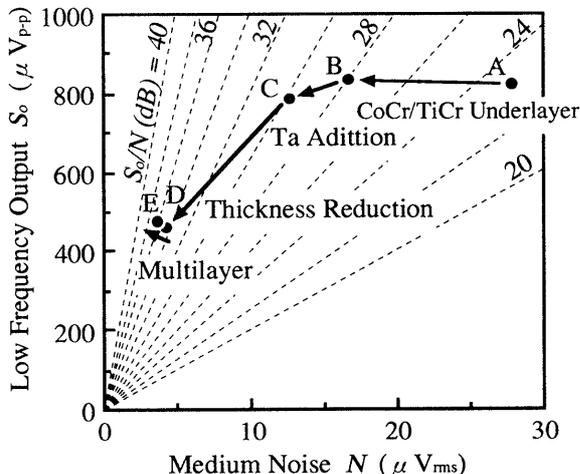


Fig. 11 Reduction of the medium noise of CoCrPt perpendicular media.

あることが分かる。

Fig. 11 は、 $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ と $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 垂直磁気記録媒体の下地、膜厚、積層構造などを変えて、再生出力と媒体ノイズを測定した結果を纏めたものである¹⁶⁾。媒体ノイズは $240\ \text{kFCI}$ 信号を記録した状態で帯域 $50\ \text{MHz}$ のノイズ信号を積算することにより、また再生出力は低密度信号 ($3\ \text{kFCI}$) の出力を MR ヘッドを用いて測定した。横軸は媒体ノイズ N (μV_{rms})、縦軸は低記録密度の再生出力 S_0 ($\mu\text{V}_{\text{p-p}}$) であり、図中の斜点線は同じ S_0/N のラインに対応している。垂直磁気記録媒体のノイズ低減、もしくは S/N 向上には以下の対策が有効であることが分かった。

(1) CoCr/TiCr 2 層下地の採用

磁性膜の垂直配向性を増すための TiCr_{10} 下地上に第 2 の下地である非磁性 CoCr_{35} 層を形成し、その上に $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 垂直磁化膜を設けると、第 2 下地を設けない場合に比べ約 40% ノイズが低減した。この原因は、第 2 下地の CoCr_{35} 層を設けることにより $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 垂直磁化膜が CoCr_{35} 層上にエピタキシャル成長することにより、この層を設けない場合に見られる結晶性の劣る初期成長層を除去できたためと考えられる。また、2 層下地構造を用いた媒体は M_r/M_s 比も増大したため、再生出力も向上し媒体 S/N として $5\ \text{dB}$ の改善が認められた。

(2) CoCrPt 磁性膜への Ta の添加

$\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 磁性膜に $2\ \text{at}\% \text{Ta}$ を添加することにより、媒体ノイズが約 25% 低減した。Ta の添加により非磁性元素の Cr の結晶粒界への偏析が促進され、磁性結晶粒子間の磁氣的結合力が減少したためと解釈できる。Ta 添加により、 M_s も減少したため、 S/N としては $2\ \text{dB}$ の向上となった。

(3) 磁性結晶粒子径の低減

非磁性元素の Cr が結晶粒界へ偏析した磁気記録媒体では、磁性結晶粒間の磁氣的交換結合が低減されている。この場合、結晶粒子径が小さいほど、媒体ノイズも減少することが期待される。磁性膜の結晶粒子径の減少は、垂直磁化膜を $3\ \text{nm}$ 厚の TiCr_{10} 層で切断する、あるいは垂直磁化膜の厚さを低減する、などで可能となる。 $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 垂直磁化膜の成長過程で $25\ \text{nm}$ ごとに TiCr_{10} 層を挿入し、全磁性膜厚 $100\ \text{nm}$ ($25\ \text{nm} \times 4$) とした媒体の平均結晶粒子径は $20\ \text{nm}$ であり、 TiCr_{10} を挿入しない $100\ \text{nm}$ 厚の $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}$ 垂直磁化膜の平均結晶粒子径 $30\ \text{nm}$ より減少した。結晶粒を分割した媒体は、分割しない媒体に比べて再生出力はほぼ同等であるがノイズが 40% 減少した。一方、磁性膜厚を半分の $50\ \text{nm}$ にすると結晶粒子径は約 $20\ \text{nm}$ となった。 $100\ \text{nm}$ 厚の $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 媒体に比べ $50\ \text{nm}$ 厚の $\text{CoCr}_{19}\text{Pt}_{10}\text{Ta}_2$ 媒体のノイズは 65% 低減した。膜厚が減少したため再生出力も 40% 減少したが、出力よりノイズの減少割合が大きかったため、 S/N として $4\ \text{dB}$ の改善が得られた。

垂直媒体のノイズを低減するためには、このような検討から明らかなように、磁性結晶粒の微細化、結晶粒界への非磁性元素の偏析促進による磁気的交換相互作用の軽減、あるいは初期成長層などの結晶性の劣る部分の除去による結晶性の改善が有効であることが明らかになった。この内容は面内磁気記録媒体のノイズ低減でも有効なものである。CoCr₁₉Pt₁₀Ta₂の媒体S/Nとして、磁性膜厚を50 nmとした場合、30 dB以上の値が得られることが分かった。この磁性膜の結晶粒径は1~2 Gb/in²クラスの記録密度を実現するために試作検討されている面内磁気記録媒体の結晶粒径に比べ30~50%大きい値になっている。今後、垂直磁化膜の膜厚を50 nm以下にするなどにより、結晶粒径のさらなる微細化ひいては媒体ノイズのもう一段の低減を図る余地が存在する。

3.5 記録磁化の安定性

垂直磁気記録では媒体の膜厚を面内媒体に比べて大きく設定できるので、前述したように熱揺らぎに対しては安定である^{6), 9)}。一方、2層垂直媒体における軟磁性下地膜に関連した磁化の不安定性^{20), 21)}、あるいは直流消磁もしくは低記録密度で記録したときのビット内部に作用する強い反磁界の影響で部分的に磁化反転が起こることによって生ずる減磁の問題がある。後者の減磁は、2層垂直媒体、単層垂直媒体の両者で観察されている。単層垂直媒体の場合、軟磁性下地膜を持たないため前者の問題は回避できるが後者の減磁に対しては対応が必要である。

単層垂直媒体では反磁界の影響による減磁の大きさは、磁性膜の種類、膜厚、下地などの影響を受ける¹⁶⁾。例えば、磁性膜厚25 nmのCoCr₁₉Pt₁₀Ta₂垂直媒体の下地として単層のTiCr₁₀(30 nm)を用いたときに比べ2層のCoCr₃₅(20 nm)/TiCr₁₀(30 nm)を用いた場合の方が減磁の速度は50%以上も減少した。Fig. 12はCoCr₁₉Pt₁₀Ta₂垂直媒体に線記録密度を変えて記録した後の再生出力の経時変化である。5 kFCIの再生出力の経時変化はVSMを用いて測定した残留磁化の経時変化とほぼ等しくなっている。垂直磁気記録では、この図からも明らかなように、線記録密度が大きくなるにつれて再生出力の変化率は減少し、150 kFCI以上では出力減少が認められなくなった。垂直磁気記録媒体の場合、膜面垂直方向に全面を直流消磁した状態で最も減磁が起こりやすい。この問題に対処するためには、残留磁化状態で磁化の経時変化が起こりにくい媒体を開発する必要がある。このような減磁を抑制するためには、磁性膜の M_r/M_s 比を1に近づける必要がある。このためには、媒体の磁気異方性を大きくする、飽和磁化を小さくする、反磁界を低減するような媒体構造を実現するなどの対策が考えられる。Fig. 13はこのような対策の検討結果の例である¹⁶⁾。CoCr₃₅/TiCr₁₀2層下地、磁気異方性エネルギーの大きいCoCr₁₉Pt₁₀膜の採用などにより、膜厚25 nmの垂直磁化膜の M_r/M_s 比として0.95を超える値

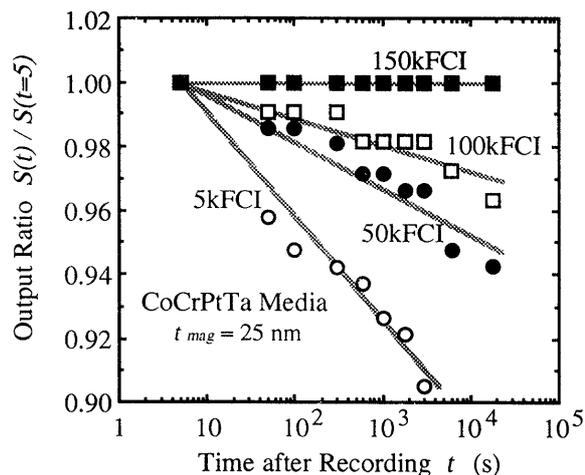


Fig. 12 Dependence of output decrease on linear recording density of 25 nm-thick CoCrPtTa perpendicular media.

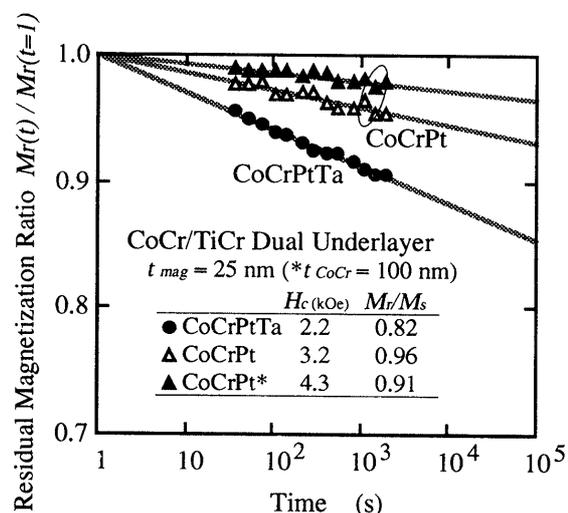


Fig. 13 Reduction of magnetization decay by increasing M_r/M_s and H_k of recording layer.

が実現されている。この垂直媒体の残留磁化の減少は10⁴ s経過後で数%以下であり、線記録密度が増大するほど減少比率が小さくなる垂直磁気記録の特長を考慮すると、高密度磁気記録に対して記録磁化の安定性の点で十分な可能性を持つものと思われる。ただし、ここで述べた垂直磁気記録媒体の高 M_r/M_s 化は、先の媒体低ノイズ化とある程度相反する面もあるため、各種の要因を考慮したさらなる検討が必要である。

3.6 信号処理方式

単層垂直媒体にリングヘッドで記録した場合、再生波形はダイパルス状になる。この波形に対しては、Hilbert Filterにより単峰波形化して面内記録で用いられている信号処理方式を採用することも可能と考えられるが、ダイパルス状の再生波形を直接処理する方法を検討した^{18), 22), 23)}。Fig. 14は単層垂直媒体の再生波形の等化方式を示す。ダイパルス状の波形は単峰波形を反転させて、ずらして重ね合わせることで表示でき、ユニットパルス応答の一般形は

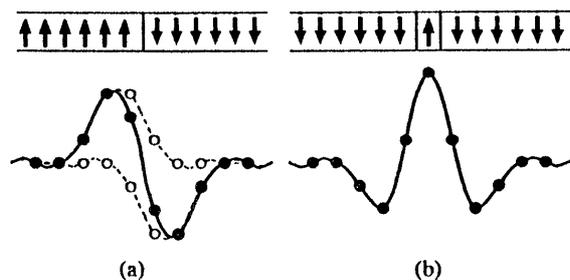


Fig. 14 Partial response for perpendicular magnetic recording with single layer medium and ring head writing ($p=3, q=2$). (a) Isolated transition.²²⁾ (b) Dibit pattern.

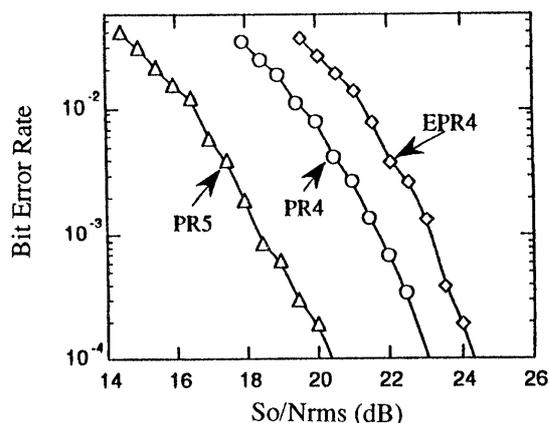


Fig. 15 Simulation results of PRML for perpendicular and longitudinal magnetic recording.^{18), 22)}

$$y = (1+D)^p (D^q - 1)(1-D)$$

で表すことができる。磁化反転単位が 50 nm 以下と小さいとき、 $p=1, q=2$ の PR5 方式が適当となる。Fig. 15 は PR5 について、再生信号の S_0/N_{rms} と誤り率の関係を再生孤立波形を用いて計算機シミュレーションで検討した結果である。垂直記録と PR5 の組み合わせは、面内磁気記録と PR4, EPR4 の組み合わせに比べ、それぞれ 3 dB, 4.5 dB 低い S_0/N_{rms} で同等の誤り率が得られることが分かる。PR5 は PR4 方式と同様にインターリーブ処理ができるため、回路規模が簡略化できると同時に高速処理が可能な回路構成を選択できる。本研究で検討しているヘッド/媒体系で測定した S_0/N_{rms} はオントラック条件で 28~32 dB であり、実用に耐える信号弁別誤り率を確保できるものと期待できる。

4. まとめ

高密度磁気記録方式としての垂直磁気記録の特長と可能性を述べるとともに、単層垂直磁気記録媒体とリングヘッド記録、MR ヘッド再生を組み合わせた記録系に関する検討結果を紹介した。

本項で紹介した単層垂直媒体と薄膜リングヘッド記録の組み合わせは、媒体およびヘッド技術において現在実用化されている技術を大幅に変えることなく垂直磁気記録の特

長を生かせる方式である。高配向の垂直磁気記録媒体を用いることにより、浮上型のスライダを用いた場合でも 260 kFCI の高い線記録密度 (D_{50}) と 25 kTPI 以上の高トラック密度が得られることが明らかとなった。従来問題となっていた媒体ノイズの問題や反磁界に起因して起こる減磁の問題も CoCr/TiCr 2 層下地の採用などにより大幅に低減あるいは実質的に回避できる見通しが得られた。またこの磁気記録系の再生波形を直接に波形等化して信号処理を行う PR5 方式によれば、従来の面内磁気記録方式の PR4, EPR4 方式に比べ低い S_0/N で同等以上の信号弁別誤り率が得られることが、シミュレーション検討の結果明らかになった。

本項で紹介した垂直磁気記録方式を実用化するためには、狭少スペーシングを実現するためのヘッド/ディスクインターフェース技術の開発を初め、信号処理用の LSI、位置決め誤差を考慮した記録再生のマージン特性などの問題に着実に対応していく必要がある。今後、これらの問題に対して各種の検討が加えられ、10 Gb/in² 以上の記録密度を実現する新しい磁気記録技術として成長していくことを期待したい。

謝辞 本研究に関し、(株)日立製作所中央研究所の杉田 信博士には激励と有益な助言を頂き、吉田和悦博士、上坂保太郎博士、原 美紀氏には磁気記録シミュレーションの観点から、また梅本益雄博士、井手 浩氏には信号処理技術の観点から有益なご討論頂きました。府山盛明博士、川辺 隆氏、浜川佳弘氏には磁気ヘッド技術に関するご協力を、丸山洋治博士にはコンタクト磁気記録技術に関するご協力を頂きました。感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構が超先端電子技術開発機構に委託した「超高感度媒体技術の研究開発」の一貫として行ったものである。

参考文献

- 1) S. Iwasaki, K. Ouchi, and N. Honda: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3795 (1996).
- 2) M. Futamoto, Y. Honda, Y. Hirayama, K. Itoh, H. Ide, and Y. Maruyama: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3789 (1996).
- 3) S. Iwasaki and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **13**, 1272 (1977).
- 4) M. Futamoto, Y. Honda, H. Kakibayashi, and K. Yoshida: *IEEE Trans. Magn.*, **21**, 1426 (1985).
- 5) N. Watanabe, Y. Ishizaki, K. Kimura, and E. Imagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **21**, 1368 (1985).
- 6) 二本正昭: 日本応用磁気学会第 3 回研究会資料, #93-7, p. 45 (1996. 2).
- 7) 田上勝通, 坪井真三: 日本応用磁気学会第 3 回研究会資料, #93-3, p. 17 (1996. 2).
- 8) 上坂保太郎, 高橋由夫, 仲谷栄伸, 林 伸夫, 福島 宏: 信学技報, **MR96-37**, 7 (1996. 11).
- 9) 二本正昭: 「MR/GMR ヘッド技術」林 和彦監修 (トリケプス, 1996. 8), 第 6 章, p. 146.

- 10) 二本正昭, 稲葉信幸, 中村 敦: 信学技報, **MR96-37**, 47 (1996. 11).
- 11) M. Futamoto and Y. Honda: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **18**(Suppl. No. S1), 485 (1994).
- 12) H. Muraoka, S. Ohki, and Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **18**(Suppl. No. S1), 475 (1994).
- 13) 村岡裕明, 中村慶久: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演予稿集, C-387, p. 45 (1996. 9).
- 14) Y. Matsuda, M. Suzuki, Y. Hirayama, Y. Honda, and M. Futamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **18** (Suppl. No. S 1), 99 (1994).
- 15) Y. Hirayama, M. Futamoto, K. Itoh, Y. Honda, and Y. Maruyama: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 996 (1997).
- 16) 平山義幸, 伊藤研也, 本多幸雄, 二本正昭: 第5回垂直磁気記録シンポジウム会議資料集, p. 95 (1996. 10).
- 17) 伊藤研也, 二本正昭, 平山義幸, 本多幸雄, 丸山洋治: 第5回垂直磁気記録シンポジウム会議資料集, p. 178 (1996. 10).
- 18) 二本正昭, 井手 浩, 本多幸雄, 平山義幸, 伊藤研也, 梅本益雄, 原 美紀, 吉田和悦: 日本応用磁気学会誌, **19** (Suppl. No. S2), 28 (1995).
- 19) Y. Honda, Y. Hirayama, K. Itoh, and M. Futamoto: Abstract of Itermag '97, GB-01.
- 20) W. Cain, A. Payne, M. Baldwinson, and R. Hempsted: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 97 (1996).
- 21) 押木満雅: 第5回垂直磁気記録シンポジウム会議資料集, p. 88 (1996. 10).
- 22) H. Ide: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 3965 (1996).
- 23) 梅本益雄: 第5回垂直磁気記録シンポジウム会議資料集, p. 120 (1996. 10).

(1997年3月4日受理)



二本正昭 ふたもと まさあき
 昭48 大阪大学大学院工学研究科修士課程終了, 同年 日立製作所中央研究所入社, 現在に至る.
 専門 薄膜成長・磁性薄膜・磁気記録
 (工博)



平山義幸 ひらやま よしゆき
 昭61 京都大学工学部冶金学科卒業, 昭63 同大学院修士課程修了, 同年 日立製作所中央研究所入社, 現在に至る.
 専門 磁性材料



本多幸雄 ほんだ ゆきお
 昭40 長崎県立長崎工業高等学校卒業, 同年 日立製作所中央研究所入社, 現在に至る.
 専門 電子放射材料・磁性薄膜・計測
 (工博)



伊藤研也 いたう けんや
 平2 東北大学工学部通信工学科卒業, 平4 同大学院修士課程終了, 同年 日立製作所中央研究所入社, 現在に至る.
 専門 磁気記録