超高密度垂直磁気記録技術

Ultra High-Density Perpendicular Magnetic Recording Technologies for Hard Disk Drives

あらまし

垂直磁気記録は30年前から研究されているが、その実用化には軟磁性裏打ち層に起因す るスパイクノイズ、広域イレーズ、厚膜によるコストアップ、高記録密度でのエラーレート 向上といった課題があった。著者らは、APS-SUL(Anti-Parallel Structure – Soft-Magnetic Underlayer)とグラニュラ膜を用いた2層記録層媒体とトレーリングシールド型 ヘッドを開発して、これらの課題を解決し、これらのヘッド/媒体を組み合わせることで 300 Gbit/in²を超える記録密度ポテンシャルがあることを確認している。また、信号処理に おいてはDCターゲットを用いることで垂直記録はSNR利得があることも分かっており、こ れらの技術に関しての詳細を本稿で報告する。

Abstract

Perpendicular magnetic recording has been investigated for ultra high-density magnetic recording since 1977. Important problems with perpendicular recording were wide-area data erasure, a deterioration of the bit error rate (BER) due to noise from the soft-magnetic underlayer (SUL), and the high cost of producing a thick SUL to secure an adequate BER at high recording densities. To overcome these problems, we developed the following technologies: a granular recording layer, an anti-parallel structure (APS)-SUL, and a trailing shielded head. By applying these technologies, we improved the density of perpendicular magnetic recording to over 300 Gbit/in². In this paper, we describe our head/media investigations and a signal processing study that compared partial response targets containing a DC response.



貝津功剛(かいつ いさたけ) ストレージ・インテリジェントシス テム研究所磁気ディスク先行研究部 所属 現在,垂直磁気記録媒体の磁性膜の



戸田順三(とだ じゅんぞう) ストレージ・インテリジェントシス テム研究所 所属 現在,垂直磁気記録ヘッドの研究開 発に従事。



森田俊彦(もりた としひこ) ストレージ・インテリジェントシス テム研究所自立システム研究部 所属 現在,磁気ディスク用信号処理,な らびにロポットの研究開発に従事。 特

研究開発に従事。

まえがき

主に計算機の記憶装置として使用されてきたハー ドディスクドライブ(以下,HDD)は,近年,TV 録画機,カーナビゲーションシステム,携帯型音楽 プレーヤ,携帯電話などの非計算機用途の需要が急 激に高まってきている。図-1に示すようにHDDの 記録密度は,ここ10年で100倍と急激なスピードで 増大しており,また装置の小型化も急速に進み0.85 インチ径のディスクを使用した装置も商品化され ている。

これまではデータの記録磁化方向がディスク媒体 と平行な向きである面内記録方式が用いられてきた が,記録密度向上による記録ビットの微細化により 記録磁化が熱によって消失してしまう問題(熱揺ら ぎ)が出てきた。これに対してディスク媒体に垂直 な記録磁化を持ち,原理的に熱揺らぎに強い垂直記 録方式が1977年に提案されていたが(!) 2005年に製 品化され本格的な垂直記録方式への移行が始まって いる。垂直記録方式の実用化には次の四つの大きな 課題があった。

- (1) 軟磁性裏打ち層に起因するスパイクノイズ
- (2) 広域イレーズ
- (3)厚い軟磁性膜によるディスク媒体の製造コ スト



図-1 HDDの面記録密度推移

Fig.1-Area density trend of magnetic recording for hard disk drive.

(4) 高密度記録での十分なエラーレート確保

上記(1)と(2)を解決するためにはディスク 媒体の軟磁性裏打ち層の磁化状態の制御を行う必要 があり,著者らはAPS-SUL(Anti-Parallel Structure – Soft-Magnetic Underlayer)とAFM-SUL(Anti ferro Magnetic-SUL)技術を用いた媒体を開発し た。さらにトレーリングシールド型のヘッドを開発 することで軟磁性裏打ち層の薄層化を実現し(3) の課題を解決した。(4)に対してはグラニュラ膜 を用いた2層記録層媒体と垂直記録用のパーシャル レスポンスターゲットの開発により,高記録密度に おいても十分なエラーレートを得ることを可能とし た。本稿では,これらについての詳細を説明する。

磁気媒体

垂直磁気記録媒体の構造

垂直磁気記録媒体の磁性膜部分の断面模式を図-2 に示す。ガラスなどの非磁性基板上に軟磁性裏打ち 層,中間層,記録層,カーボン保護層が順次形成さ れた構造となっている。本章では,最初に上記 (1),(2)の課題を解決するために特性向上を図っ た軟磁性裏打ち層について説明する。つぎに,(3), (4)の課題に対してはグラニュラ膜を用いた2層記 録層を開発したので紹介する。

軟磁性裏打ち層

垂直磁気記録で実用的なエラーレートを得るため には,軟磁性裏打ち層のスパイクノイズ抑制が必要 である。軟磁性裏打ち層はライトヘッド機能の一部 を担っているが,信号再生時にはそこにできる磁壁 から発生する磁界が再生信号に重畳しエラーを引き 起こす。これをスパイクノイズ⁽²⁾と呼んでおり,こ の抑制には軟磁性裏打ち層の磁化状態制御が必要で ある。その方法の一つが軟磁性裏打ち層を極薄の非 磁性膜で分断し,相反する方向に磁化を制御した

カーボン保護膜				
記録層				
Ru中間層				
軟磁性裏打ち層				
ガラス基板				

図-2 垂直磁気記録媒体の断面模式図 Fig.2-Structure of perpendicular recording medium.

APS構造⁽³⁾であり、これにより磁壁から発生する磁 界は非磁性層を介した2層の軟磁性裏打ち層の間で 還流するため、再生信号への影響を抑制できる。も う一つは軟磁性裏打ち層の一部に反強磁性層を設け ることで、ある一方向(例えばディスクの半径方 向)に軟磁性裏打ち層の磁化を揃えることで磁壁の 発生を抑制するAFM構造⁽⁴⁾である。図-3はこれら 二つの軟磁性裏打ち層(APS-SUL,AFM-SUL) と磁化制御なしの軟磁性裏打ち層を有する3種類の 垂直記録媒体をDCイレーズした際の再生信号を示 しており、(a)APS-SUL、(b)AFM-SULではス パイクノイズが抑制されていることが分かる。

信号ライト時に,記録ヘッド主磁極からその幅の 数十倍(数~数十ミクロン)以上離れたトラック信 号が減衰または消失する広域イレーズ(WATER; Wide Area Track ERasure)も解決すべき課題であ る^{(5).(6)} これはヘッドシールドからの漏えい磁界に 起因するが,磁化状態を制御した軟磁性裏打ち層に より抑制することができる。磁化制御有無の軟磁性 裏打ち層媒体の広域イレーズ比較を図-4に示す。磁 化制御なしの軟磁性裏打ち層媒体はエラーレートが 劣化しているが,磁化制御ありの媒体ではエラー レートの劣化は見えていない。

200 nm以上の軟磁性裏打ち層形成は,製造設備, 材料の面から面内記録媒体と比較して生産コストを 大幅に引き上げるため,軟磁性裏打ち層を薄くする ことがもう一つの大きな課題である。軟磁性裏打ち



- 図-3 DC消去後の垂直磁気記録媒体の出力信号ノイズ (a) APS-SUL(b) AFM-SUL(c) 磁化制御なし SUL
- Fig.3-Output noise of Perpendicular media with (a) APS-SUL, (b) AFM-SUL and (c) conventional SUL after DC erase.

層はライトヘッドの一部機能を有することから,薄 くするとライト能力が低減し,エラーレートの劣化 につながってしまう。しかし後述するトレーリング シールド型ヘッドの開発が軟磁性裏打ち層の薄層化 を可能にした。トレーリングシールド型ヘッドを用 いた際のAPS-SUL媒体とAFM-SUL媒体の軟磁性 裏打ち層膜厚に対するSNR(Signal to Noise Ratio;エラーレートと等価)の依存性を図-5に示 す。50 nmまでの軟磁性裏打ち層の薄層化に対して, 両方の媒体でSNRの劣化はなく,APS-SUL媒体の



- 図-4 垂直磁気記録媒体の広域イレーズ比較 白丸,黒丸はそれぞれイレーズ前後のエラーレー
- トを示す。 Fig.4-WATER characteristic of perpendicular media. Initial and after erase Byte Error Rate are gray and solid circles, respectably. (a) and (b) media have with domain uncontrolled and

controlled SUL.



図-5 垂直磁気記録媒体SNRのSUL膜厚依存 黒丸はAPS-SUL媒体,白丸はAFM-SUL媒体

Fig.5-Dependence of SNR of Perpendicular recording media with APS-SUL (Solid circles) and AFM-SUL (Open circles) on SUL thickness. 方が高SNRを示している。B. Acharyaらもトレー リングシールド型ヘッドを用いることで,軟磁性裏 打ち層薄層化による信号SNRの劣化が抑制できる ことを報告している⁽³⁾

グラニュラを用いた2層記録層

(1) グラニュラ記録層

HDDの高記録密度化のためにはエラーレートの 向上が必要であり、そのために媒体ノイズの低減が 必要である。一般に磁気記録媒体のノイズ低減には, その記録層を構成する磁性粒子の粒径均一化と磁性 粒子間の磁気的相互作用の低減が必要である。面内 記録媒体で広く使用されているCoCrPt合金を垂直 記録媒体に用いた場合、その磁性粒子間の磁気的相 互作用を十分下げることができないため,媒体ノイ ズが大きくなってしまうという問題があった。一方, CoCrPt-O⁽⁷⁾ CoCrPt-SiO₂⁽⁸⁾のように非磁性酸化物 で磁性粒子同士を分離するグラニュラ材料は磁性粒 子間の磁気的相互作用を小さくすることで媒体ノイ ズを低減できる。CoCrPt-SiO2 膜の微細組織 (TEM像)を図-6に示す。磁性粒子(CoCrPt)が 非磁性酸化物(SiO₂)により,明瞭に分離されて いることが分かる。

垂直記録媒体では記録層磁性粒子の結晶配向を制 御することも重要である。結晶面指数(0002)方 向に成長したRu膜はCoCrPt-SiO2の磁化容易軸を ディスク面に対して垂直方向に配向させるのに有効 である。図-7にRu膜上にCoCrPt-SiO2をエピタキ シャル成長させた媒体の磁化ループを示すが,面内 方向にはほとんど残留磁化がなく,高い垂直配向性 を有することが分かる。この膜の 50(結晶配向 分散を示す指標)は4度以下であり,結晶的にも高



図-6 CoCrPt-SiO2グラニュラ膜の平面TEM像 Fig.6-In-plane TEM image of CoCrPt-SiO2 layer.

い垂直配向であることを確認している。

図-8にCoCrPt-SiO2膜とCoCrPt膜媒体のSNRの 記録密度依存性を示しており,全記録密度領域で CoCrPt-SiO2媒体が高SNRを有することが分かる。 (2) 2層記録層

垂直記録媒体のノイズ低減には,磁性粒子間の磁気的相互作用を低減する必要があるが,そうすると反転磁界が大きくなり磁化ループの傾きが小さくなるため^{(9,(10)}信号記録が困難になってくる。しかし2層記録層を用いることで,ノイズ低減と信号記録性能確保の両立が可能となる。

2層記録層は低ノイズ層(CoCrPt-SiO₂)と書込 み補助層を順次積層した構造であり,書込み補助層



図-7 CoCrPt-SiO2グラニュラ膜の磁化曲線 Fig.7-Hysteresis loop of CoCrPt-SiO2 medium.



- 図-8 SNRと媒体ノイズの記録密度依存性比較 黒丸と灰色三角はそれぞれCoCrPt-SiO₂媒体の SNRと規格化ノイズ,白丸と白三角はそれぞれ CoCrPt媒体のS/Nと規格化ノイズ
- Fig.8-Liner recording density dependence of SNR (circles) and Normalized noise (triangles) of CoCrPt-SiO₂ media (solid circles and triangles) and CoCrPt media (open circles and triangles).

は低ノイズ層と比較して異方性磁界が小さく,磁性 粒子間の相互作用が高いことが特徴である。グラ ニュラ記録層媒体と2層記録層媒体のSNR特性, O/W特性(信号記録性能の指標;小さいほど記録 しやすい)の比較を図-9に示す。2層記録層媒体は グラニュラ記録媒体と比較してSNR,O/Wとも優 れた特性であることが分かる。

このようにグラニュラ膜を用いた2層記録層媒体は、従来のグラニュラ記録層媒体と比較して、高い SNR特性と信号記録性能(O/W特性)を両立で きる。

このグラニュラ膜を用いた2層記録層媒体により, スパイクノイズ,広域イレーズを抑制し,十分な信 号記録性能を有し,1200kBPIを超える高記録密度 領域においても十分なエラーレートを確保すること ができ,実験室レベルで300Gbit/in²を超える記録 密度ポテンシャルを確認している。

磁気ヘッド

再生ヘッドに関しては、従来の面内記録用の GMRヘッドやTMRヘッドが適用可能であるため、 ここでは記録ヘッドに焦点を絞って報告する。

垂直記録ヘッドが持つ主要課題として,以下の三



- 図-9 単層グラニュラ媒体と2層記録層媒体のSNR,オー バーライト(O/W)特性比較 棒グラフの黒と白は低周波数信号と高周波数信号の SNR,白丸はOW1,灰色丸はOW2を示す。OWは 値が小さい方が良特性。
- Fig.9-SNR and OW of single CoCrPt-SiO₂ and double recording layer media. Black and gray columns are SNR at low and high frequency, respectably. Open and semi-close circles are conventional Overwrite (OW1) and reverse Overwrite (OW2), respectably. Smaller OW are good performance.

つが挙げられる。

- (1) 記録密度向上に必要な記録磁界勾配の増大(11)
- (2) 広域イレーズ(WATER)の抑制
- (3) 記録後の磁極先端部の残留磁化に起因するイ レーズ(ポールイレーズ)の抑制 以下にこれらについて順次説明する。
- (1) 記録密度向上に必要な記録磁界勾配の増大

代表的な2タイプの垂直磁気記録ヘッドを図-10に 示す。タイプ1は標準的な単磁極型ヘッドであり, 主磁極,コイル,リターンヨークで構成されている。 主磁極から発生した磁力線は,媒体裏打ち層 (SUL)を通りリターンヨークに還流する閉磁気回 路を形成する。媒体への記録は主磁極のトレーリン グエッジから発生する磁界が担う。主磁極のリー ディングエッジの幅はトレーリングエッジの幅より も狭く,逆台形形状に形成されている。これは, HDDに搭載されたヘッドはロータリーアクチュ エータにより駆動されるが,インナとアウタではト ラックと主磁極の間にスキューが存在し,主磁極 リーディングエッジが隣接トラックにはみ出してし まうので,そのはみ出しによる隣接トラックイレー ズを抑制するためである。

タイプ2はより新しいトレーリングシールド型の 単磁極型ヘッドであり,主磁極のトレーリングエッ ジに近接して磁気シールド層が設けられている。主 磁極トレーリングエッジから発生する記録磁界の一



図-10 垂直磁気記録ヘッドの構造 Fig.10-Perpendicular recording head structures.

部がこのトレーリングシールドに吸収されることに より,磁界分布が急峻化し磁界勾配が増大する。そ の結果,鋭い媒体の磁化遷移が得られ高密度記録が 可能となる。また記録磁界が垂直方向から面内方向 に傾くことにより,媒体磁化を反転させるスイッチ ング磁界を実効的に増大させる効果もある(図-11, 図-12)。著者らはタイプ1,2の両ヘッドの記録再 生特性を測定し,タイプ2のトレーリングシールド 型がより優れた高密度記録特性を持つことを確認し た。タイプ2の課題は主磁極先端部における高精度 寸法制御だが,プロセス加工技術の進歩により対処 可能である。

(2) 広域イレーズ抑制

媒体側の対策も有効であり,APS-SUL媒体は従 来の単層SUL媒体よりも優れたイレーズ耐性を持 つことが分かっている。広域イレーズの原因である SULへの広範囲な磁束の漏えいを抑えたヘッドと APS-SUL媒体を組み合わせることにより,広域イ レーズ問題は解決可能である。

(3) ポールイレーズ

高TPI化(狭コア幅化)に伴いより顕在化すると 予想される。対策としては,主磁極先端部のアスペ クト比(主磁極深さ/コア幅の比)の最適化,大き な逆磁歪効果⁽¹²⁾を持つ材料選定,多層膜化⁽¹³⁾によ る主磁極の磁区制御があり,これらの組合せで解決 できる。

試作したトレーリングシールド型垂直ヘッドの断



図-11 ダウントラック方向の記録磁界分布 Fig.11-Recording field distribution in down track direction.

面を図-13に示す。

信号処理

面内記録から垂直記録への移行は, ヘッド/媒体 技術だけでなく,信号処理技術も変化が必要である。 現在のHDDでは,面内記録の再生信号に適したPR (Partial Response)ターゲットが選択されている が,垂直記録は面内記録と異なりDC成分を有して いる。そのため,垂直記録と面内記録とでは,最適 なPRターゲットが異なる。次数nについて変化さ せたDCフル,DC抑制,DCフリーの3タイプの定 型ターゲットを表-1に示す。本章では,これら定型 ターゲットについて,BERシミュレーションによ る比較を行い,垂直記録に最適なターゲットを調査 した。これまでにも垂直記録でのPRターゲット評



図-12 単磁極ヘッドとトレーリングシールド型ヘッドの 記録磁界勾配比較 Fig.12-Recording field gradient.



図-13 トレーリングシールド型垂直ヘッドの断面TEM 写真 Fig.13-Trial production head.

タイプ	1	2	3	4	
DC-full	PR1	PR2	EPR2	E ² PR2	
$(1 + D)^n$	[1, 1]	[1, 2, 1]	[1, 3, 3, 1]	[1, 4, 6, 4, 1]	
DC- attenuated $(2 - D)(1 + D)^{n-1}$		PR3 [2, 1, - 1]	EPR3 [2, 3, 0, - 1]	E ² PR3 [2, 5, 3, - 1, - 1]	
DC-free $(1 - D)(1 + D)^{n-1}$		PR4 [1, 0, - 1]	EPR4 [1, 1, - 1, - 1]	E ² PR4 [1, 2, 0, - 2, - 1]	

表-1 定型PRターゲット

n : Polynomial order





価に関する報告例⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾はあるが,それらは比較的 単純なノイズモデルを用いたシミュレーションで あった。今回,著者らが行ったシミュレーションで は,*T*₅₀変動ノイズを考慮し,実際のノイズ比率を 想定したフルノイズモデルを用いている。

チャネルは孤立波パルス

 $h(t) = A \cdot \tanh(\log(3) \cdot t / T_{50})$

でモデル化されている。ここでA は振幅, T₅₀はh(t) の - A/2からA/2の遷移時間である。図-14のチャネ ルモデルに示すように,ジッタノイズ,T₅₀変動ノ イズ,DCイレーズノイズ,ホワイトガウシアンノ イズ(WGN)を付加している。全ノイズに対する 媒体ノイズパワーの比率は90%であり,その媒体 ノイズの成分であるジッタ,T₅₀変動,DCイレーズ ノイズはそれぞれ65%,10%,25%である。チャ ネルは7次の等リップルフィルタと10タップのFIR (Finite Impulse Response)フィルタによって等化 される。また,符号化率60/61のシングルパリティ 符号を用いており,ポストプロセッサで活用される。 SNRは次式で定義される。

SNR =
$$20\log\left(A/\sqrt{\int_0^{f_n} N(f)df}\right)$$
 ... (1)



図-15 PRターゲットの性能比較 Fig.15-Performance comparison of PR targets.

ここで,N(f)はノイズパワースペクトル密度, f_n はNyquist周波数を示している。また, $Kp = T_{50}/Tb$ を正規化線密度と定義する。ここでTbは記録ビット間隔である。

図には示さないが,Kp=1.5条件でシミュレー ション評価したところ,DCフルターゲットでは PR1が,DC抑制ターゲットではEPR3が,DCフ リーターゲットではEEPR4が最もよい性能を示し た。ここで注目すべきは,最適次数について,DC フルターゲットがDC抑制ターゲットよりも小さい ことである。これはDCフルターゲットではDC成 分がほかよりも大きいため,低域周波数成分のノイ ズの影響を抑えるには,ターゲットの次数を小さく することが必要なためである。

図-15に示す各定型ターゲットの最適条件である PR1,EPR3,EEPR4の性能比較から,Kp < 1.65 ではPR1が最良となった。Kp = 1.5では,DCフ リーターゲットのEEPR4はPR1よりも1.1 dBも劣 化してしまう。この値を線記録密度に換算すると, 約10%の差に相当する。実際のHDDでは,PRター ゲットはGPR(Generalized PR)ターゲット⁽¹⁷⁾の ように精密に最適化され,ノイズ予測法もBER改 善のために検討されている。しかし,少なくとも, 以上の結果は,DC成分を有するPRターゲットの採 用が垂直記録における300 Gbit/in²を超える記録密 度の達成に貢献できることを示している。

む す び

著者らは垂直磁気記録実用化の最大の課題であっ たスパイクノイズ,広域イレーズ,媒体の製造コス トをAPS-SUL媒体とトレーリングシールド型ヘッ ドの開発により解決することができた。また,2層 記録層媒体の開発により高密度記録領域において十 分なエラーレートと信号記録性能を両立し,DC ターゲットが垂直記録には適していることを示した。 垂直記録方式は130 Gbit/in²を超える記録密度の HDDに適用されており,200 Gbit/in²クラスの装置 への適用めどもついている。

さらに,ライトヘッド主磁極の磁気異方性制御に よるポールイレーズ抑制,信号処理系へのDCター ゲットの適用,ECC,ESMなどの新規構造媒体⁽¹⁸⁾ によるエラーレート向上により300 Gbit/in²を超え る記録密度の実現が可能になるものと考えている。

参考文献

- (1) S. Iwasaki et al.: An analysis for the Circular Mode of Magnetization in Short Wavelength Recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.11, p.1173-1175 (1975).
- (2) Y. Honda et al. : Effect of Soft Magnetic Underlayer on Magnetization Microstructure of Perpendicular Thin Film Media . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.36, p.2399-2401 (2000).
- (3) B. Acharya et al. : Anti-Parallel Coupled Soft Under Layers for High-Density Perpendicular Recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, p.2383-2385 (2004).
- (4) S. Takenoiri et al. : Exchange-Coupled IrMn/CoZrNb Soft Underlayers for Perpendicular Recording Media . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38, p.1991-1993 (2002).
- (5) W. Jiang et al. : Cross-track noise profile measurement for adjacent-track interference study and write-current optimization in perpendicular recording. J.Aply.Phys., Vol.93, p.6754-6756 (2003).
- (6) J. Feng : Long-Range Erasere of Nearby Recorded Tracks . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, p.2588-2593 (2004).
- (7) S. Oikawa et al. : High Performance CoPrCrO Single Layered Perpendicular Media with No

Recording Demagnetization . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.36, p.2393-2395 (2000).

- (8) T. Oikawa et al. : Microstructure and Magnetic Properties of CoPtCr-SiO₂ Perpendicular Recording Media . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38, p.1976-1978 (2002).
- (9) N. Honda et al.: Overview of Recent Work on Perpendicular Magnetic Recording media (in Japanese) . J. MAgn. Soc. Jpn. , Vol.24 , 1027 (2000).
- (10) H. Ohmori et al. : Magnetic properties and noise characteristics of Co/Pd multilayer perpendicular magnetic recording media . J. Magn. Magn. Mat. , Vol.235 , p.45-52 (2001).
- (11) K. Miura et al. : Effect of Head Field Gradient on Transition Jitter in Perpendicular Magnetic Recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.37, p.1926-1928 (2001).
- (12) K. Hirata et al. : A study of pole material properties for pole erasure suppression in perpendicular recording heads . J. Magn. Magn. Mat., Vol.287, p.352-356 (2005).
- (13) K. Nakamoto et al. : Single-Pole/TMR Heads for 140-Gbit/in² Perpendicular Recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, p.290-294 (2004).
- (14) Y. Okamoto et al. : Performance of PRML systems in perpendicular magnetic recording channel with jitter-like noise . J. Magn. Magn. Mat., Vol.235, p. 259-264 (2001).
- (15) R. Cideciyan et al. : Perpendicular and longitudinal recording : a signal-processing and coding perspective . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38, No.4, p.1698-1704 (2002).
- (16) M. Madden et al. : Read channel for perpendicular magnetic recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, No.1, p. 241-246 (2004).
- (17) H. Sawaguchi et al. : Performance analysis of modified PRML channels for perpendicular recording systems . J. Magn. Magn. Mat., Vol.235, p.265-272 (2001).
- (18) Victora, R. H.; Xiao Shen : Composite media for perpendicular magnetic recording . *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, p.537-542 (2005).