グラニュラー型垂直磁気記録媒体

上住　洋之（うわずみ　ひろゆき）　川田　辰実（かわた　たつみ）　横澤　照久（よこさわ　てるひさ）

1　まえがき

1956年に実用化されたハードディスク装置（HDD）は，近年，その記録密度を年率60～100％の割合で急速に増加させてきており，今後も年率30～60％の割合で増加し続けると予測されている。このような著しい成長の結果，これまで用いられてきた長手磁気記録方式が，低ノイズ特性と「熱揺らぎ」特性とのトレードオフ問題のため，いよいよその記録密度の限界に近づこうとしている。「熱揺らぎ」とは，記録された磁化が常温の熱エネルギーにより反転してしまうことで信号を安定に保持できなくなる現象であり，長手磁気記録方式では記録密度が上昇するほど「熱揺らぎ」が大きくなってしまう。

垂直磁気記録方式は1975年にIwasakiら[(1)]により提案された記録方式であり，長手磁気記録方式と正反対の特徴，すなわち記録密度の増大に伴い「熱揺らぎ」に強くなるという特性を有している。原理的に高密度記録に適した記録方式であることから，その実用化に向け，磁気記録媒体や記録再生ヘッドに関する数多くの研究がなされてきた。

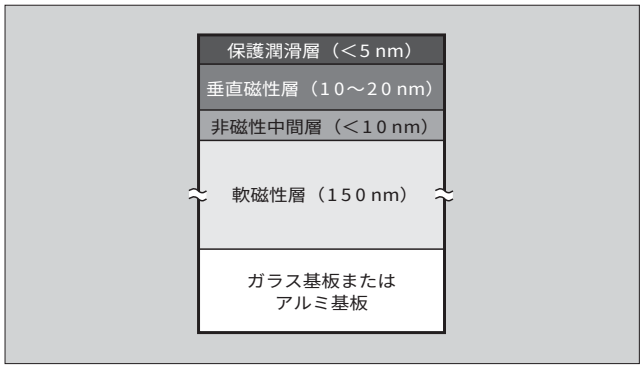
富士電機では，1999年に垂直磁気記録媒体の開発を開始し，大きな課題とされてきた，低ノイズ特性，高熱安定性，書込み特性を並立させた磁気記録層，ならびに厚膜のため生産性向上が必須であった軟磁性裏打ち層の実用化に注力して検討を行ってきた。現在までに，これらの実用課題にめどをつけることができ，引き続き2005年末あるいは2006年初めからと予想される量産化に向けた検討を行っている。

本稿では，グラニュラー構造を有する垂直磁気記録層と，生産性に優れた無電解めっき軟磁性裏打ち層をはじめとした，富士電機での垂直磁気記録媒体の開発状況について述べる。

2　垂直磁気記録媒体の基本構成と開発課題

垂直磁気記録媒体の基本層構成を**図1**に示す。垂直磁気記録媒体は，アルミ基板またはガラス基板上に軟磁性層を設け，その上に垂直磁性層，次いで保護潤滑層を形成して作製されている。図では単純化されているが，実際の各層はそれぞれ多層化されており，より高度な層構成をより複雑な製造工程で作り上げ，実際の垂直磁気記録媒体に仕上げている。その垂直磁気記録媒体の実用化における技術上の最大のポイントは，次の2点である。

図1　垂直磁気記録媒体の基本層構成



(1)　磁区制御を含めた軟磁性層技術

磁気ヘッドの性能を精度よく引き出し，電磁ノイズ環境の影響を受けず，かつ生産性の高い軟磁性層の開発

(2)　グラニュラー磁性層技術

低ノイズ，高熱安定，かつ書込み容易な磁性層の開発

3　軟磁性裏打ち層の開発

垂直磁気記録媒体の実用化に際しては，垂直磁気記録媒体特有の層構成である，軟磁性裏打ち層の開発が必須である。

軟磁性裏打ち層は，ビット情報を記録する際に垂直磁気ヘッドから発生する漏れ磁束を，媒体磁性層に効率よく引き込むためのものである[(2)]。そのため，高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材料を，数百nmという厚膜で形成する必要があり，従来のスパッタリング法で成膜することは生産性ならびに製造コストの観点から非常に困難であると考えられてきた。さらに，スパイクノイズと呼ばれる，軟磁性層に

上住　洋之

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)技術開発部課長補佐。博士(情報科学)。日本応用磁気学会会員，IEEE会員。

川田　辰実

機械技術，磁気記録媒体用基板の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所。精密工学会会員，日本ロボット学会会員。

横澤　照久

磁気記録媒体の研究開発，設計に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)技術開発部課長。日本物理学会会員。

発生する磁壁に起因する大きなノイズが大きな問題とされ，その抑制も必須であるとされていた。

富士電機では，スパッタリング法で形成する軟磁性裏打ち層について，基板と軟磁性層の間に積極的に磁区制御を行うピン止め層を挿入し，かつスパイクノイズの抑制のために必要な磁場中冷却処理を，スパッタ装置内で生産性に影響させずに行うプロセス技術をすでに開発済みである。[(3), (4)]

しかしながら，この方式を用いた場合でも，100 nm 以上の膜厚の軟磁性層と磁区制御を行う多層薄膜をスパッタリング法により成膜する必要があり，長手磁気記録媒体と同等の生産性を実現するためには，さらなる技術的なブレークスルーが必要であった。

富士電機は，磁気記録媒体だけではなく，媒体用の非磁性ニッケルリン（NiP）めっき付きアルミ基板も生産しており，高度な無電解めっき層の形成技術やめっき層表面の超平滑化研磨技術を有している。そこで，厚膜が必要とされる軟磁性裏打ち層についても，生産性の高い無電解めっき法による形成技術，ならびにその表面の超平滑化技術の開発を行い，実用化のめどをつけることに成功した。

軟磁性めっき層は，リン（P）の添加量を，従来，アルミ基板に施してきた非磁性 NiP めっき層より少なくすることで軟磁性化させている。このめっき層は従来の非磁性 NiP 層より硬度が高く，薄層化が可能である。さらに，開発した無電解めっきプロセスならびに研磨プロセスは，従来のアルミ基板を作製する場合とほぼ同じ生産プロセスであることから，安価で高性能な軟磁性裏打ち層付き基板が作製できた。

図 2 に，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層の表面を原子間力顕微鏡（AFM）により観察した像を示す。表面粗さ（R_a）は約 0.1 nm と，現在の製品に用いられている非磁性 NiP めっき層表面の R_a である約 0.3 nm より小さく，今後の高密度化に伴う磁気ヘッドの浮上量の低下にも十分対応できるレベルが確保できている。

図 3(a)は，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層から発生するノイズを磁気ヘッドにより読み取り，マッピング化したものである。比較のため，従来のスパッタリング法により作製した膜厚 200 nm の Co 系アモルファス軟磁性裏打ち膜から発生するノイズを**図 3**(b)に示す。図中の色の濃さがノイズの大きさに対応している。いずれの場合も特別な磁区制御は行っていない。

スパッタリング法により作製した軟磁性裏打ち層からは，大きなノイズが発生している箇所が多数存在する。これらは，軟磁性層に発生した磁壁を原因とするスパイクノイズである。一方，開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層では，特別な磁区制御を行っていないにもかかわらず，スパイクノイズが発生しないことが分かる。

図 4 には，軟磁性 NiP めっき裏打ち層を付与したアルミ基板を用いて作製した垂直磁気記録媒体の，線記録密度 370 kFCI（FCI：Flux Change/Inch）における対信号雑音比（SNR）のめっき層膜厚依存性を示す。図中の点線は，スパッタリング法により形成した膜厚 200 nm の Co 合金アモルファス軟磁性裏打ち層上に同様にして作製した垂直磁気記録媒体の SNR 値である。

軟磁性 NiP めっき裏打ち層上の垂直磁気記録媒体の SNR 値は，スパッタ軟磁性裏打ち層上の媒体の SNR 値とほぼ同等である。さらに媒体の書込み特性などを比較しても，今回開発した軟磁性 NiP めっき裏打ち層を使用した媒体は，従来のスパッタ軟磁性裏打ち層を使用した媒体と同等の電磁変換特性が実現できることが確認できた。

富士電機では，従来は困難といわれていたガラス基板上への軟磁性めっき裏打ち層の成膜技術の開発も行っており，新しいガラス基板前処理技術を開発することで，十分な密着性と生産性を両立できることが明らかになりつつある。

この軟磁性めっき裏打ち層付きアルミ基板およびガラス

図２　軟磁性 NiP 裏打ち層表面の AFM 像

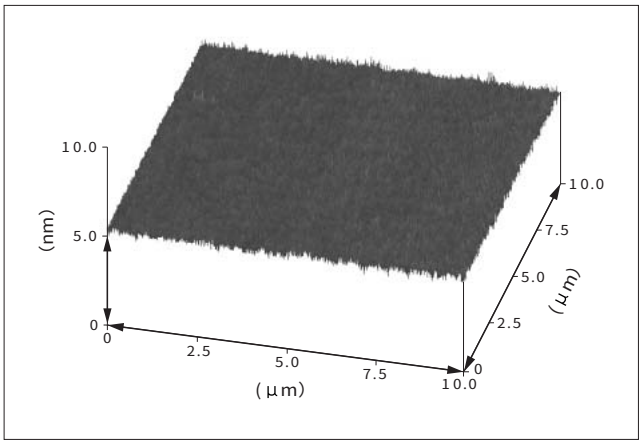


図３　軟磁性 NiP 裏打ち層のスパイクノイズ観察

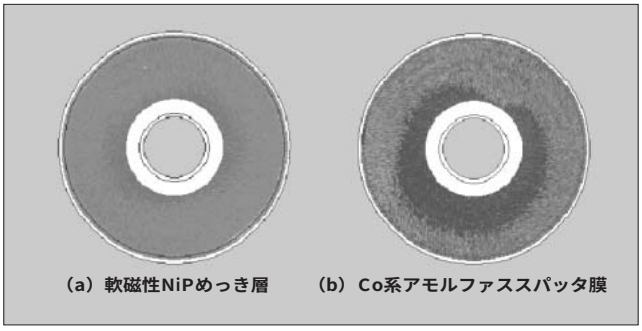
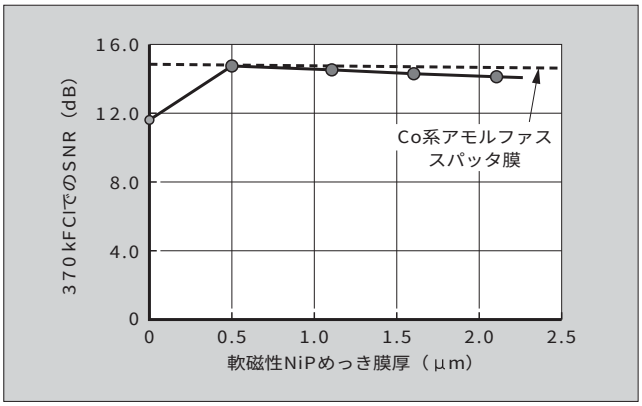


図４　SNR の軟磁性 NiP めっき膜厚依存性



基板を使うと，厚膜の軟磁性裏打ち層をスパッタリング法により形成する必要がなくなるため，従来の長手磁気記録媒体用のスパッタ装置で垂直磁気記録媒体を生産できるという非常に大きなメリットがあり，これによって垂直磁気記録媒体の実用化に大きく近づいたと考えている。

4　グラニュラー磁性層技術

4.1　従来媒体の問題点と課題

図5(a)に長手磁気記録方式，同図(b)に垂直磁気記録方式のそれぞれの模式図を示す。媒体面内方向に平行にビット情報を記録磁化する長手磁気記録媒体の場合，記録密度が高まると，ビット情報を担う記録磁化内に磁化を打ち消す方向の反磁界が増大して，ビット情報が不安定になってくる。高密度化が進み，ビット情報の大きさが小さくなると，それを担う磁性合金結晶粒の磁気エネルギーも低下するので，室温程度の熱エネルギーによっても次第にビット情報が消える，いわゆる「熱揺らぎ」問題を引き起こすようになる。現在 60 ～ 100 Gbits/in^2 に達しつつある長手磁気記録方式は，160 ～ 200 Gbits/in^2 で実用限界に達すると考えられている。

一方，垂直磁気記録は，媒体の面内に対して垂直方向にビット情報を記録するので，長手磁気記録方式のような反磁界による「熱揺らぎ」は起こりにくい。記録磁化内の反磁界は，記録密度を増加させると磁化を安定化させる傾向になるため，原理的に高記録密度に向く方式であるといえる。

長手・垂直を問わず，一般に磁気記録媒体の低ノイズ化のためには，媒体を構成する結晶粒をできるだけ微細化，かつ均一化し，それぞれの結晶粒を磁気的に分離することが必要である。低ノイズ化のために結晶粒径をさらに微細化した場合，結晶粒の体積の低下に伴って結晶粒の磁気エネルギーが低下し，熱安定性の劣化をもたらす。そのため，高い結晶磁気異方性エネルギー（K_u）を持つ材料を適用することが重要となる。

長手磁気記録媒体では，加熱した下地層上に CoCrPt 系合金をスパッタリング法により形成することで，Co と固溶しづらい Cr を粒界に偏析させ，結晶粒の微細化と粒の磁気的な分離を達成するとともに，結晶粒内は K_u の高い CoPt 合金が主体となり，熱安定性を維持している。

一方，垂直磁気記録媒体で同様に CoCrPt 系合金を用いて加熱成膜を行うと，長手磁気記録媒体と比べて相対的に Cr が粒界に偏析しづらく，かつ結晶粒径が増大する傾向にあった。さらに Cr が粒界に偏析しづらいため，Cr が残存する結晶粒内の K_u は予想以上に低下し，低ノイズ特性と高熱安定性を両立させることが困難であった。これは，垂直磁気記録媒体では磁化容易軸である六方最密充てん（hcp）構造の c 軸を膜面垂直方向に配向させるため，エネルギー的に最も安定で薄膜形成時に結晶粒が粗大化しやすいと考えられる hcp（002）面を優先配向させているためと推察された[5]。このため，低ノイズで熱安定性が高い垂直磁気記録媒体用の磁性層の新規開発が必要であった。

4.2　グラニュラー磁性層の高密度化

富士電機では，垂直磁気記録媒体の開発に先だって検討していた低温成膜可能なグラニュラー型長手磁気記録媒体の開発[6]における経験を生かし，微細な結晶粒径と粒間の磁気的な相互作用の低下，ならびに高い垂直配向性を両立させたグラニュラー型垂直磁気記録媒体用磁性層を開発した[7],[8]。

開発したグラニュラー磁性層は，結晶粒を分離する材料として SiO_2 などの酸化物を添加した CoCrPt–SiO_2 である。その磁性層の模式図を**図6**に示す。非金属である SiO_2 を添加しているため，成膜時に基板加熱を行わなくても結晶粒界には SiO_2 が析出しやすく，室温で結晶粒同士の分離が進み，かつ結晶粒の K_u を高く維持できるという利点がある。

一方，基板加熱を行わないため，グラニュラー磁性層の結晶成長のコントロールが困難であった。そのため，磁性層の下に設ける中間層の状態制御が重要であった。具体的には，ルテニウム（Ru）中間層の非加熱成膜条件を制御することで，Ru 自身の結晶性や結晶粒径のばらつきを改善し，グラニュラー磁性層の結晶性と結晶粒径の均一性を向上させるという方法を採っている。さまざまな検討の結果[9],[10]，Ru 中間層の結晶粒 1 個の上に磁性結晶粒 1 個が成長するように，Ru 中間層の結晶粒径を制御すること，ある

図5　長手磁気記録方式および垂直磁気記録方式の模式図

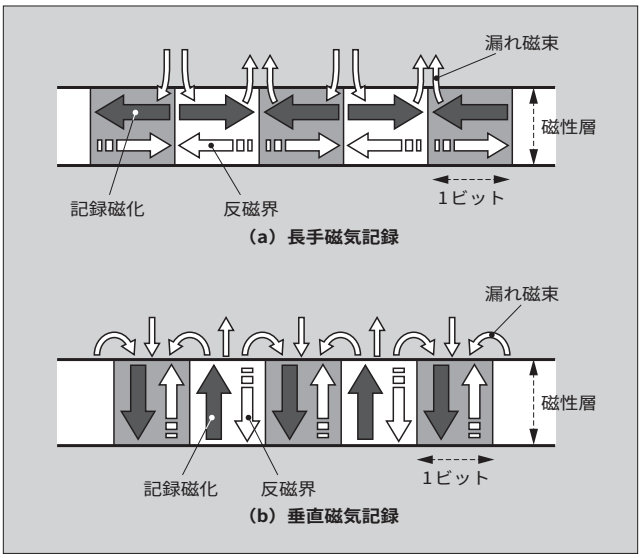
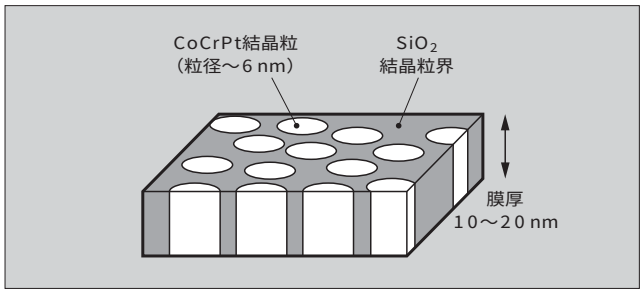


図6　グラニュラー磁性層の模式図



いはRu中間層の表面状態を制御することによって磁性層の初期成長層を制御することなどが重要であることが明らかとなった。このような知見を基に，非常に高度で精密な成膜条件の制御を行うことで，所望の微細構造の制御を達成している。

富士電機は，東北大学電気通信研究所が中心となって推進している，「超小型大容量ハードディスクの開発」プロジェクト（文部科学省科学技術試験研究RR2002，IT21プロジェクト）の共同研究会社として，グラニュラー磁性層のさらなる高密度化についての研究を行っている。

この共同研究において，Ru中間層上に成膜したCoCrPt合金磁性層が，9×10^6 erg/cm^{3}以上という非常に高いK_uを有していること，このCo合金磁性層にSiO_2を添加してグラニュラー構造とした場合にも，磁性結晶粒内のK_uは高く維持されることがすでに確認されている[11]。このことは，現状のグラニュラー磁性層の結晶粒径をさらに低減した場合でも，高い熱安定性を維持する垂直磁気記録媒体が実現可能であることを示唆している。このような検討結果から，現行のグラニュラー磁性層の組成を最適化して高K_u化させつつ，Ru中間層の微細構造を適切に制御して磁性層結晶粒の均一化，微細化および磁気的な分離を進めることで，200 Gbits/in^{2}以上の高い面記録密度の垂直磁気記録媒体を実現することは十分可能であると考えている。

4.3　書込み特性の向上

上述のように，低ノイズ化のための磁性層結晶粒径の微細化と結晶粒の磁気的な分離を進め，かつ熱安定性を維持するために結晶粒の高K_u化を進めた場合，磁性層の保磁力（H_c）が増大して書込み特性が劣化することが懸念される。一方，高密度化に伴い，トラック密度を増加させるためには磁気ヘッドの書込み素子のトラック幅を狭くする必要があり，このような狭トラック化は，磁気ヘッドが発生する磁界を減少させる。これらのことから，媒体の書込み特性を向上させることが今後ますます重要になると考えられる。

開発したグラニュラー磁性層においても，熱安定性を確保しつつ低ノイズ化を進める微細構造および磁性層組成の制御を進めた結果，高H_c化により狭トラックヘッドでの書込みが不十分になり，そのために記録再生特性が劣化するという問題が生じた。

図7に，種々の条件で作製したグラニュラー磁性層媒体の，線記録密度370 kFCIにおけるSNRを，媒体の書込み能力を示す，オーバーライト特性が飽和する書込み電流値でまとめた図を示す。SNRが高い媒体ほど，書込み能力が劣化する傾向が見て取れる。

このような媒体の書込み能力とSNR特性のトレードオフを両立させるために，グラニュラー磁性層の組成ならびに成膜プロセスの改善を試みた。すなわち，磁性層の結晶粒径や粒界構造などを変化させず，低ノイズ特性を維持したまま書込み特性を向上させるためには，Ru中間層の制御された微細構造や表面状態を変化させるのではなく，グラニュラー磁性層の組成や成膜プロセスを改善することが重要であった。

表1に，書込み能力を改善した媒体（A）と従来媒体（B）のオーバーライト特性ならびにSNRを，トラック幅の異なるヘッドでそれぞれ評価した結果を示す。ここで，媒体AのH_cは5.3 kOe，媒体BのH_cは6.6 kOeである。トラック幅が0.3 μmと広く，発生磁界が大きな磁気ヘッドで測定した場合，オーバーライト特性はいずれの媒体でも40 dB程度と十分な値が得られ，SNRもほぼ同等であった。一方，トラック幅が0.2 μmと狭い高密度対応の磁気ヘッドで測定した場合には，媒体Bではオーバーライト特性が30 dB以下と非常に悪く，SNRも低いのに対して，媒体Aはオーバーライト特性が36 dBと比較的良好であり，かつSNRも媒体Bに比べて1.5 dB程度も高く大幅に改善している。このように，磁性層の微細構造を変化させずに書込み能力を向上させることによって，トラック幅の狭いヘッドでも十分なオーバーライト特性が得られ，高いSNRを示す媒体を実現することができた。

開発した垂直磁気記録媒体の高密度化のポテンシャルを，スピンスタンドテスタで測定した結果を**表2**に示す。スピンスタンドテスタに，HDDのような高精度な位置決めサーボは期待できないので，オントラックモード（同一トラック上）で測定している。具体的には，線記録密度を変えながらバイトエラーレート（BER）を測定し，BER＝

図7　SNRと書込み特性の関係

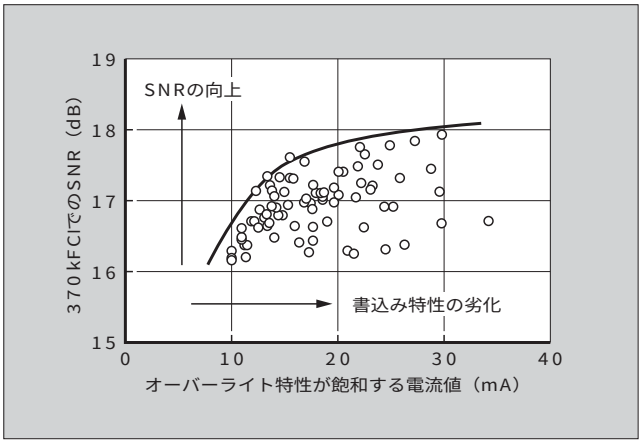


表1　書込み特性改善媒体の電磁変換特性

	オーバーライト特性（dB）370 kFCIに50 kFCIを上書き	SNR（dB）370 kFCI
改善媒体A＋広トラック幅ヘッド	39.2	15.05
従来媒体B＋広トラック幅ヘッド	40.0	14.75
改善媒体A＋狭トラック幅ヘッド	36.4	21.25
従来媒体B＋狭トラック幅ヘッド	29.9	19.68

表２　達成記録密度

測定年月	線記録密度kBPI（BER＝10^{-5}）	Gbits/in^2（BAR＝1：5）
2002年5月	727	106
2002年9月	793	126
2003年7月	867	150
2004年2月	900	162

10^{-5} のときの線記録密度を求め，線記録密度とトラック記録密度のアスペクト比を 1：5 と置いて比率掛けをして面記録密度を算出している。ここでの垂直磁気記録媒体のカーボン保護層の膜厚は，3.5 ～ 4.5 nm と設計仕様の 2.5 nm に比べて厚く，その分空げき損失が大きい状態での測定結果であるが，最新の評価結果では，達成可能な面記録密度は 162 Gbits/in^2 に達している。

5　あとがき

21 世紀のユビキタス社会を快適に実現するためには，中程度に大容量な情報クラスタを，タイムリーに処理できる安価なキャッシュメモリの存在が不可欠である。その「大容量・高速・低価格」のバランスが一番優れているのは HDD である。手の平に乗るような大きさの大容量垂直記録方式 HDD が実用化されれば，HDD メモリの適用市場は無限に広がると考える。

富士電機における垂直磁気記録媒体の開発は，東北大学の電気通信研究所の中村教授や村岡教授，同研究所 21 世紀情報通信研究開発センターの青井教授や島津助教授をはじめとした，国内外の研究機関の諸メンバーによる一方ならぬご指導やご支援の賜物である。ここに深く謝意を表する次第である。

参考文献

(1)　Iwasaki, S. et al. An Analysis for the Circular Mode of Magnetization in Short Wavelength Recording. IEEE Trans. Magn. vol.11, no.6, 1975, p.1137-1139.

(2)　Iwasaki, S. et al. Perpendicular Magnetic Recording with Composite Anisotropy Film. IEEE Trans. Magn. vol.15, no.6, 1979, p.1456-1459.

(3)　渡辺貞幸ほか．二層膜垂直磁気記録媒体における反強磁性膜による軟磁性裏打ち層のスパイクノイズ低減．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-90, 2002, p.9-15.

(4)　上住洋之ほか．垂直磁気記録用磁性層技術．富士時報．vol.75, no.3, 2002, p.169-172.

(5)　上住洋之ほか．CoCrPt-（Ta, B）垂直記録媒体の初期成長層の低減と磁気特性．日本応用磁気学会誌．vol.26, 2002, p.205-209.

(6)　鄭用一ほか．AV 用磁気ディスク媒体．富士時報．vol.72, no.11, 1999, p.594-599.

(7)　Oikawa, T. et al. Microstructure and Magnetic Properties of CoPtCr-SiO_2 Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, no.6, 2002, p.1976-1978.

(8)　Uwazumi, H. et al. CoPtCr-SiO_2 Granular Media for High Density Perpendicular Recording. IEEE Trans. Magn. vol.39, no.4, 2003, p.1914-1918.

(9)　竹野入俊司ほか．CoPtCr-SiO_2 グラニュラー垂直媒体の微細構造と電磁変換特性．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-6, 2002, p.31.

(10)　渡辺貞幸ほか．CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体の微細構造と諸特性．電子情報通信学会技術研究報告．MR2002-76, 2003, p.13.

(11)　及川忠昭ほか．CoPtCr-SiO_2 を用いた垂直磁気記録媒体の磁気特性と記録再生特性．日本応用磁気学会誌．vol.27, 2003, p.196.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。