400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録媒体技術

河田　泰之（かわだ　やすゆき）　　及川　忠昭（おいかわ　ただあき）

1　まえがき

ハードディスク装置（HDD）の記録密度は年率 30 ～ 60 %の割合で増加しており，**表1**に示すように 2005 年には 120 Gbits/in^2 に達する予定である。今後もこの増加傾向は継続していくと考えられ，この結果，現在製品化されている面内磁気記録方式は熱揺らぎ問題による限界（～ 200 Gbits/in^2）に近づいてきている。これに対し，垂直磁気記録方式は記録密度が増大しても記録ビットの安定性が確保されるため熱安定性が高く，今後の高密度記録技術として有利であり，各所で研究開発が進められている。

富士電機は 2002 年にグラニュラー薄膜を用いた垂直磁気記録媒体（248 ページの「解説」参照）で世界最高レベル（146 Gbits/in^2）の記録密度を達成した。[(1), (2)] グラニュラー薄膜は CoPtCr 合金に SiO_2 を添加したものであり，従来の CoCrPt 系材料では困難であった微細な（7 nm）磁性結晶粒子を分離性よく孤立させることが可能である。最近では垂直磁気記録媒体として代表的な記録層材料の一つになっており，世界中で広く研究開発が行われている。しかしながら，今後 400 Gbits/in^2 という高記録密度を目指すには，さらなるブレークスルーが必要である。

本稿では 400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録媒体技術として，①高磁気異方性エネルギー（K_u）を有する CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体技術，②異方性エネルギーの高次項である K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体技術，③ SiO_2 を添加した Co/Pt 人工格子多層膜[(4)]による垂直磁気記録媒体技術を紹介する。①と②は東北大学電気通信研究所 21 世紀情報通信研究開発センターが主導する，2002 年度科学技術試験研究（RR2002）「超小型大容量ハードディスクの開発」プロジェクト（IT21 プロジェクト）に参画し，共同研究を行っている。

表1　磁気記録媒体の技術ロードマップ

年	2004	2005	2006	2007	2008
記録密度（Gbits/in^2）	80	120	200	300	500
媒体材料	CoCrPt系面内媒体				
			CoPtCr–SiO_2垂直媒体		
				Co/X多層膜垂直媒体	

2　CoPtCr–SiO_2 グラニュラー垂直磁気記録媒体

2.1　高 K_u を有する CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体

垂直磁気記録媒体において，さらなる高記録密度化を図るには，熱安定性の確保と低ノイズ化の両立，および記録分解能の向上が必要不可欠である。媒体ノイズを下げるには，磁気クラスターサイズを小さくすることが重要であり，そのためには記録層の膜厚を薄くすることが有効である。[(5)] 一方，記録分解能を向上するには，保磁力（H_c）近傍での磁化曲線の傾き（**α**）を大きくすることが有効である。**α**の値は磁気クラスターサイズ（$D_{cluster}$）と記録層膜厚 δ の比 $D_{cluster}/\delta$ に比例することが報告されている。[(6)] 低ノイズを保ちながら，記録分解能を向上する，つまり**α**を大きくするには，$D_{cluster}/\delta$ の値を大きくし，記録層の膜厚を薄くすることが重要である。しかし，記録層を薄くすることは，磁化反転粒子の体積が小さくなることを意味し，その結果，熱安定性の低下が予想される。よって，記録層を薄くしつつ熱安定性を保つには，高い K_u の材料を記録層として用いる必要がある。そこで，すでに富士電機で開発している CoPtCr–SiO_2 グラニュラー垂直磁気記録媒体において，記録層組成の比率を変え，高 K_u の導出を図った。

図1は下地層として Ru を用いた CoPtCr 垂直膜において，Cr および Pt 組成に対する K_u の変化を示したものである。Cr を 10 at %含む CoPtCr 垂直膜において，K_u が 9×10^6 erg/cm^3 という非常に大きな値を示しており，熱安定性に対して非常に高いポテンシャルを有していることが明らかである。

図2は Cr を 10 at %含む CoPtCr 垂直膜に対して，SiO_2 を添加した際の K_u の変化を示したものである。SiO_2 を添加すると膜全体としての K_u は徐々に低下するが，SiO_2 の体積を除いて求めた結晶粒正味の垂直磁気異方性 K_u^g の低下は少ない。高 K_u を有する材料として FePt などの規則

河田　泰之

ガスセンサ，磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

及川　忠昭

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

合金や，Co/Pt といった人工格子膜などが検討されているが，比較的容易に作製できる CoPtCr–SiO_2 グラニュラー膜においても高 K_u を導出でき，高記録密度化に優れた特性を得られる。

図3は CoPtCr 垂直膜に SiO_2 を 11.2 at %，14.4 at %添加した CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体の記録層膜厚に対する K_u の変化を示したものである。SiO_2 を 11.2 at %添加した媒体では，記録層膜厚が 4 nm において，膜平均の K_u は 5.7×10^6 erg/cm³ となっており，SiO_2 の体積を除いて求めた磁性粒の垂直磁気異方性 K_u^g も 7.7×10^6 erg/cm³ という大きな値を維持している。また，SiO_2 添加量にかかわらず，記録層膜厚に対する K_u の大きな変化が見られず，膜の構造変化が小さいこと示している。

図4は熱安定性の指標である K_uV/k_BT（V：活性化体積，k_B：ボルツマン定数，T：絶対温度）の記録層膜厚に対する変化を示したものである。記録層組成は $\{(Co_{90}Cr_{10})_{80}Pt_{20}\}_{88.8}$–$(SiO_2)_{11.2}$ に固定した。一般にこの K_uV/k_BT が 60 以上あれば熱的に安定であるとされ，CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体では，記録層膜厚が 8 nm にて 70 と高い値が得られる。従来の CoCrPt 系材料がその熱安定性を維持するためには，記録層膜厚が 20 ～ 30 nm 程度必要であることを考えると，CoPtCr–SiO_2 垂直膜が記録層の薄膜化に対して，格段に熱安定性に優れた材料であることは明らかである。このように CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体は記録層の組成と膜厚の最適化により，さらなる高記録密度化が狙えると考えられる。

2.2　高記録密度化における課題

面記録密度を高めていくと，1 ビットのデータを記録する範囲（記録ビット）の面積が小さくなり，それに伴って記録ビットの体積も減少する。すると，磁界の保磁力が弱まり，磁性体そのものの持つ熱エネルギーの影響で磁界が

図1　CoPtCr 垂直膜における Cr および Pt 組成と K_u

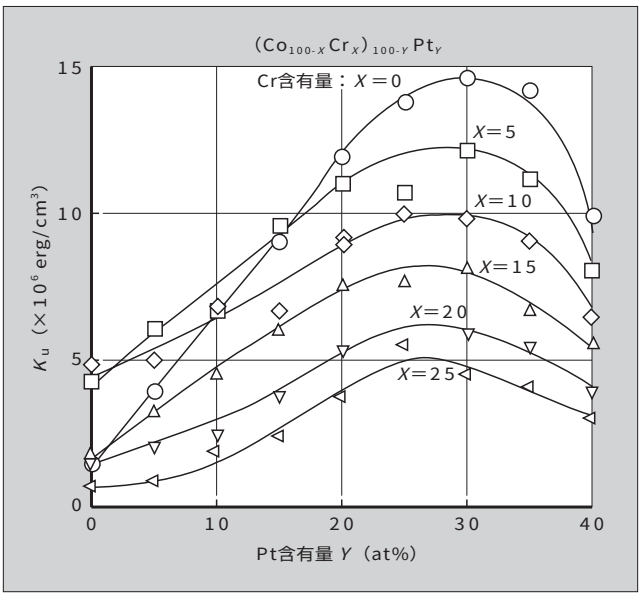


図2　CoPtCr 垂直膜での SiO_2 添加量と K_u

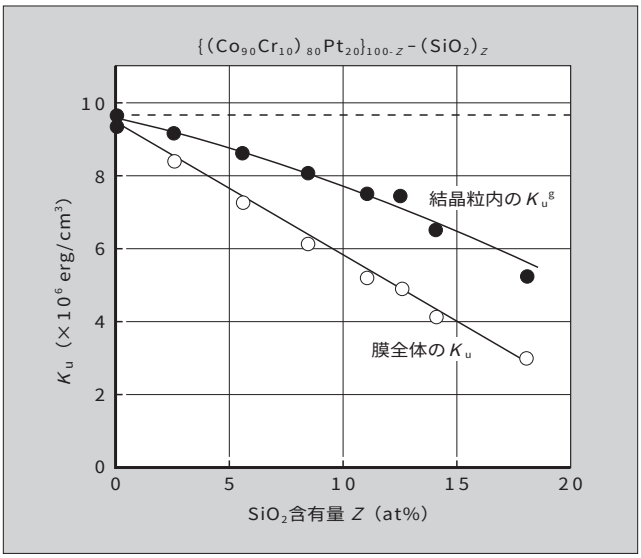


図3　SiO_2 を 11.2 at %，14.4 at %添加した CoPtCr–SiO_2 垂直磁気記録媒体の記録層膜厚と K_u

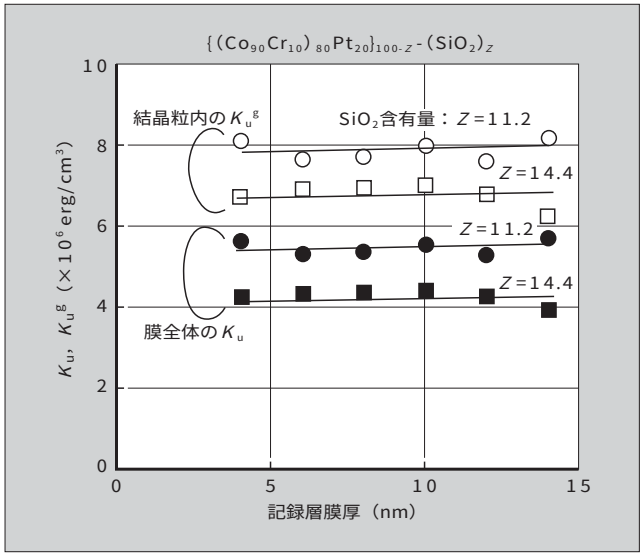
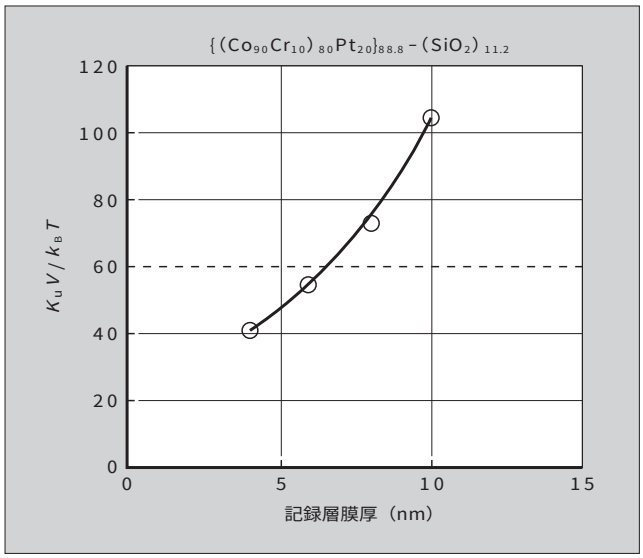


図4　K_uV/k_BT と記録層膜厚



消滅してしまう。これを熱揺らぎという。この熱揺らぎを回避するためには，高い磁気異方性を有する媒体（高保磁力媒体）が必要であるが，従来の磁気ヘッドの発生磁界では，これらの高磁気異方性媒体へのデータ書込みが困難になるという問題がある。したがって，今後の垂直磁気記録媒体開発においては，熱安定性を維持しながら，いかにして書き込みやすい媒体を開発するかが非常に重要な課題である。そこで，IT21 プロジェクトと富士電機では，これらの課題を解決し，実際に 400 Gbits/in^2 を目指した垂直磁気記録媒体として，従来考慮されていなかった磁気異方性エネルギーの高次の項と呼ばれる K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体の共同研究を行っている。

この高次の項 K_{u2} を用いた垂直磁気記録の考え方は以下のようなものである。磁気異方性定数（K_u）は，$K_u = K_{u1} + K_{u2}$ で表される。記録媒体に外部磁界を印加したときに磁化反転を起こす磁界 H_k（スイッチング磁界）は，K_{u2} には依存せず K_{u1} のみに比例する（$H_k=2K_{u1}/M_s$）（M_s：飽和磁化）。K_{u1} を高めるためには，記録ヘッドの書込み能力も高める必要があるが，現状，記録ヘッドの書込み能力は，物理的な限界に達しており，これ以上 K_{u1} を高めることは難しい。一方，熱安定性を示す指標である K_uV/k_BT の磁気的なエネルギーには，K_{u1} と K_{u2} の両方が寄与する。つまり，K_{u2} の大きさを適切に制御することで，H_k を上げずに，熱安定性を増すことが可能となる。[7]

2.3　400 Gbits/in^2 に向けた垂直磁気記録媒体の開発

IT21 プロジェクトでは，2005 年度末の 400 Gbits/in^2 実現を目指し，垂直磁気記録媒体の構造や物性の設計値を示している。その設計値を**表 2** に示す。低ノイズ化と熱安定性の両立とともに，磁気ヘッドでの書き込みやすさも確保するために，K_{u1} と K_{u2} の項を組み込んでいる。K_{u2} を制御することで 400 Gbits/in^2 の達成が可能である。現在，IT21 プロジェクトでは，CoPtCr（−SiO_2）グラニュラー膜の構造制御技術や，組成に対する物性値，磁気特性の変化など，これまで蓄積してきた知見を生かして，K_{u2} の出現メカニズムと，その制御技術の確立を目標に開発を行っている。現在検討を行っている CoPtCr 垂直膜において，下地層条件が異なる 2 種類の垂直磁気記録媒体（媒体 A，媒体 B）の K_{u1} および K_{u2} の値を**表 3** に示す。これらから，下地層条件，つまり記録層の膜構造を適切に制御することで，K_{u2} が導出できることが明らかとなり，その K_{u2} の絶対値は，400 Gbits/in^2 を達成するのに十分な値である。しかし，現状では，K_{u2} の出現機構のメカニズムが明確になっておらず，このような出現機構と制御技術の解明が急務である。また，これらの材料を用いて，媒体ノイズの低減を考慮し，実際に垂直磁気記録媒体として利用するには，成膜プロセスの最適化が必要不可欠である。

以上のように，400 Gbits/in^2 垂直磁気記録媒体の開発には，幾つかの課題が残っているが，K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体の開発により，400 Gbits/in^2 の記録密度の達成が十分に現実味を帯びてきている。

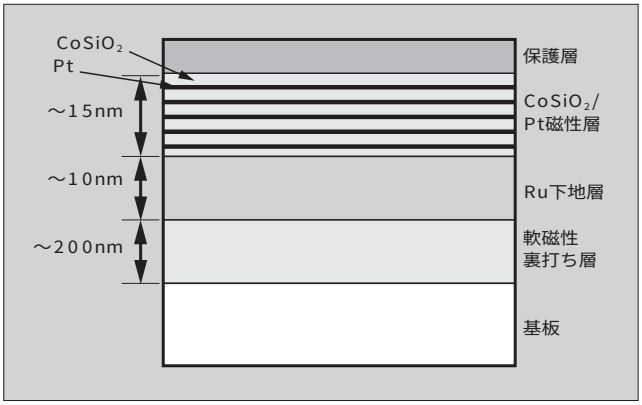
表 2　400 Gbits/in^2 の設計値

記録密度	400 Gbits/in^2
線記録密度	1,429 kBPI
トラック密度	280 kTPI
ビット・アスペクト比	5.1：1
最小磁化反転単位の直径	8.4 nm
記録層膜厚	18.6 nm
活性化体積	800〜1,000 nm^3
飽和磁束密度	0.63 T
磁気異方性定数 K_{u1}	4.3×10^6 erg/cm^3
磁気異方性定数 K_{u2}	0.9×10^6〜1.5×10^6 erg/cm^3
媒体飽和磁界（記録時）	1,270 kA/m（16 kOe）

表 3　K_{u2}（実験値）と 400 Gbits/in^2 達成に必要な理論値

記録層組成	$(Co_{90}Cr_{10})_{75}Pt_{25}$		要求値（理論値）
下地層条件	媒体A	媒体B	
K_{u1}（$\times10^6$ erg/cm^3）	6.69	11.8	4.3
K_{u2}（$\times10^6$ erg/cm^3）	1.51	0.06	0.9〜1.5
$K_u=K_{u1}+K_{u2}$（$\times10^6$ erg/cm^3）	8.20	11.9	5.2〜5.8
K_{u2}/K_{u1}	0.23	〜0	0.2〜0.35

図 5　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の模式図



3　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体

3.1　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の磁気特性

400 Gbits/in^2 を目指す垂直磁気記録技術として，富士電機は人工的に超薄膜を積層した人工格子（多層膜）を用いた垂直磁気記録膜の開発も行っている。**図 5** に富士電機の多層膜垂直磁気記録媒体の模式図を示す。記録層は SiO_2 添加 Co/Pt 多層膜を用い，下地層に Ru を用いている。この Co/Pt 多層膜は原子レベルでの設計・薄膜制御が行われており，優れた磁気特性と高い熱安定性を兼ね備えた垂直磁気記録薄膜である。

Co/Pt や Co/Pd などの多層膜を用いた垂直磁気記録媒体は一般に，高い保磁力（H_c），高い角形比（S），高い結晶磁気異方性定数（K_u）が得られ，熱安定性がきわめて

高い媒体となるが，粒子間の磁気的な交換相互作用が強いことから，媒体ノイズも大きいものとなりやすい。そこで富士電機では，先行開発した CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体技術を用い，Co に SiO_2 を添加した $CoSiO_2$/Pt 多層膜を検討している。SiO_2 を添加することで磁性粒子の粒界に非磁性の SiO_2 を偏析させ，磁性結晶粒子間の磁気的な交換相互作用と媒体ノイズの低減を狙っている。$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 1Å オーダーでの薄膜制御を行っており，Pt 層が 1 原子に満たないような膜厚の場合に，高 H_c・高 K_u が得られる。[8]

図 6 に軟磁性裏打ち層がない場合の $CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体（$CoSiO_2$/Pt ＝ 0.29 nm/0.12 nm）の磁化曲線を示す。H_c は 6.2 kOe，S は 1.0，飽和磁化（M_s）は 540 emu/cm³，反転磁区生成磁界（H_n）は 2.5 kOe，磁化曲線の H_c 近傍での傾き（**α**）は 1.6，K_u は 6.2×10^6 erg/cm³ の磁気特性が得られ，高 H_c，高 H_n，高 K_u，低 **α** を有する垂直磁気記録媒体が実現されている。**α** は粒子間の磁気的な交換相互作用と相関があり，この **α** の値が小さいほど，粒子間の磁気的な交換相互作用が小さく，その結果，媒体ノイズが低減する。よって，低 **α** であることが媒体設計において必要となる。**α** ＝ 1.6 は十分小さな値であり，この媒体が高 H_c と低 **α** を有していることから，磁性結晶粒子の分離性に優れることが示唆される。また，H_n ＝ 2.5 kOe 得られており，外的要因によるビットの磁化反転が起こりにくく，熱的にも安定性が高いと推定できる。このように $CoSiO_2$/Pt 多層膜媒体は多層膜としての特徴（高 H_c，高 S，高 H_n，高 K_u）と SiO_2 添加により低 **α** を同時に実現でき，高記録密度を狙う媒体として優れた磁気特性を有している。

3.2　$CoSiO_2$/Pt（SiO_2）多層膜垂直磁気記録媒体の微細構造と磁気クラスターサイズ

記録密度の向上には磁性層の微細構造制御が重要で，結晶粒の微細化・均一化と偏析の促進がポイントとなる。

図 7 に Ru 下地層 10 nm 上に形成した多層膜垂直磁気記録媒体の平面透過電子顕微鏡（TEM）像を示す。Co に SiO_2 を添加することにより粒界に SiO_2 が偏析し，磁性粒子の分離性に優れていることが分かる。Co/Pt 多層膜の平均粒子径は 7.8 nm であるが，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 6.7 nm であり，さらに Pt 層にも SiO_2 添加した $CoSiO_2$/Pt SiO_2 多層膜は 5.6 nm と非常に微細化されている。平均粒界幅も Co/Pt 多層膜の場合の 1.2 nm に比べ，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では 1.6 nm，$CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜は 1.8 nm と SiO_2 添加により増大している。このように Co/Pt 多層膜への SiO_2 添加により酸化物が粒界偏析し，粒子の分離性に優れた構造の記録層が得られ，高記録密度を目指す磁気記録媒体として望ましい膜構造となる。

次に磁気力顕微鏡（MFM）を用いて，Co/Pt 多層膜，$CoSiO_2$/Pt 多層膜と $CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜の $D_{cluster}$ を見積もった。磁気クラスターは磁化反転単位であり，粒子間の磁気的な交換相互作用が強い場合や静磁気的な相互作用がある場合，幾つかの粒子が一つの反転単位として振る舞うことが知られている。したがって，高記録密度媒体を目指す場合，磁化反転単位の小さいことが重要で，$D_{cluster}$ を小さくすることが望ましい。[9] SiO_2 添加のない Co/Pt 膜の場合，$D_{cluster}$ は約 49 nm であるが，$CoSiO_2$/Pt 多層膜では約 37 nm，$CoSiO_2$/PtSiO_2 多層膜では約 28 nm まで減少されることが確認できた。このように Co/Pt 多層膜への SiO_2 の添加は $D_{cluster}$ の低減にも効果がある。

3.3　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の記録再生特性

Co/Pt 多層膜への SiO_2 添加により，粒子径の減少，粒界幅の増大，$D_{cluster}$ の減少が確認できた。これらの結果から記録再生特性の向上が期待される。

図 8 に記録再生特性として SiO_2 添加のない Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体と Co 層および Pt 層に SiO_2 添加した

図 6　$CoSiO_2$/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の磁化曲線

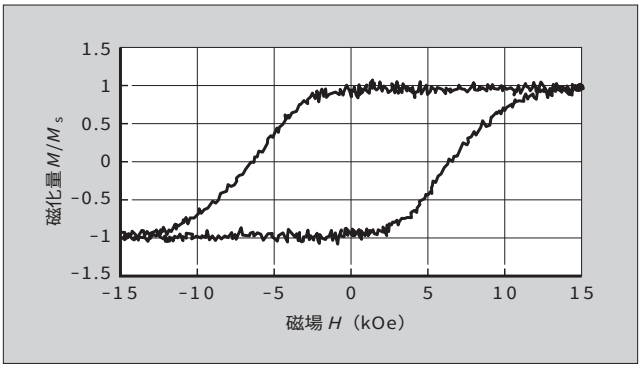


図 7　多層膜垂直磁気記録媒体の平面 TEM 像

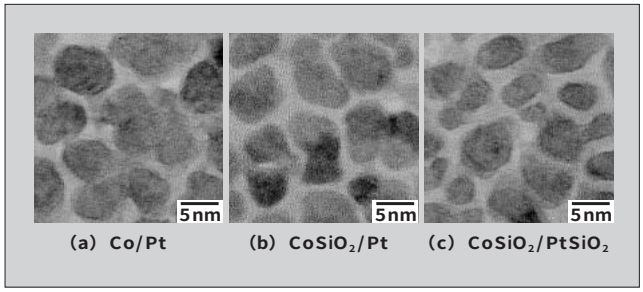


図 8　多層膜垂直磁気記録媒体の電磁変換特性

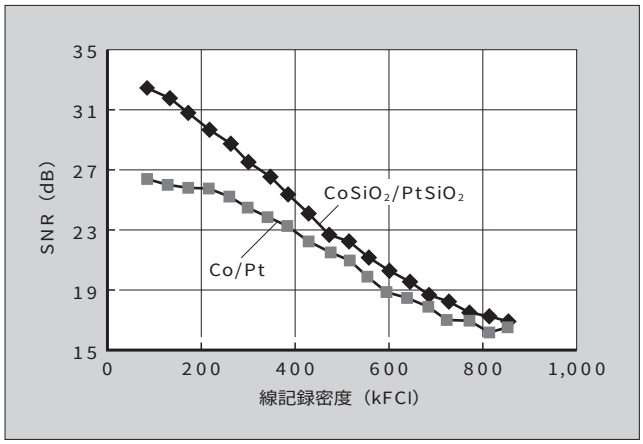
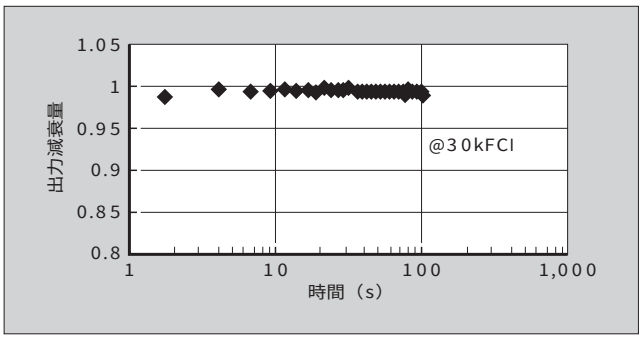


図9　SiO_2 を添加した Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の信号の劣化割合



$CoSiO_2/PtSiO_2$ 多層膜垂直磁気記録媒体の信号対雑音比（SNR）を示す。$CoSiO_2/PtSiO_2$ 多層膜垂直磁気記録媒体は Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体に比べ，85 kFCI（FCI：Flux Change/Inch）の低線記録密度で約＋6dB，470 kFCI の高線記録密度で約＋1.5 dB の SNR の向上が達成された。これは媒体ノイズの低減によるところが大きく，SiO_2 の添加は，記録再生特性の向上に有効であることが分かる。

図9 に SiO_2 を添加した Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体の信号の劣化割合を示す。信号の時間劣化はほとんどなく（0.007 %以下），この媒体は熱揺らぎにきわめて強いことが確認できる。これは多層膜の特徴である H_n が大きいことに起因するものである。

3.4　400 Gbits/in² に向けての多層膜垂直磁気記録媒体

Ru 下地を用いた SiO_2 添加 Co/Pt 多層膜垂直磁気記録媒体は高記録密度を狙う媒体として優れた磁気特性・微細構造・記録再生特性を示す。SiO_2 の添加により媒体ノイズは大幅に低減できた。膜の微細構造も膜厚 11 nm で粒径 6 nm 以下を達成した。実際に 400 Gbits/in² を達成するにはまだ高いハードルがあり，さらなる媒体ノイズの低減による SNR の向上が必要不可欠である。今後は前半に述べた K_{u2} の積極的利用により，さらなる書込み能力と熱安定性の向上を進めていく検討を進め，400 Gbits/in² の達成に向けての開発を行っていく。

4　あとがき

富士電機では 400 Gbits/in² の記録密度達成を実現させるため，東北大学電気通信研究所と共同の IT21 プロジェクトにおいて高磁気異方性エネルギーを有する $CoPtCr-SiO_2$ 垂直磁気記録媒体技術，異方性エネルギーの高次の項 K_{u2} を利用した垂直磁気記録媒体技術，SiO_2 を添加した Co/Pt 人工格子多層膜を用いた垂直磁気記録媒体技術の研究開発を行っている。現在，世界最高レベルにある富士電機の $CoPtCr-SiO_2$ 垂直磁気記録媒体を他社に先駆けて市場に供給し，あわせて将来技術となる 400 Gbits/in² 垂直磁気記録媒体技術を確立し，来るべきユビキタス社会に貢献したいと考えている。

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) Oikawa, T. et al. Microstructure and Magnetic Properties of $CoPtCr-SiO_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.1976.

(2) 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．信学技報．MR2002-6, 2002, p.31.

(3) 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.

(4) Kawada, Y. et al. Magnetic Properties, Microstructure and Read-Write Performance of $CoSiO_2$-Pt Granular Multilayer Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn.（in Press）.

(5) Shimatsu, T. et al. Magnetic cluster size and activation volume in perpendicular recording media. J. Appl. Phys. vol.93, 2003, p.7732-7734.

(6) Kitakami, O. et al. On magnetization reversal of Co-Cr films with perpendicular anisotropy. Jpn. J. Appl. Phys. vol.40, 2001, p.4019-4022.

(7) Kitakami, O. et al. Energy barrier enhanced by higher order magnetic anisotropy terms. Jpn. J. Appl. Phys. vol.42, L455, 2003.

(8) Kawada, Y. et al. Co/Pt Multilayers Perpendicular Magnetic Recording Media with Thin Pt Layer and High Perpendicular Anisotropy. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.2045.

(9) Takenoiri, S. et al. Magnetic Properties, Magnetic Cluster Size and Read-write Performance of $CoPtCr-SiO_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.39, 2003, p.2279.

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。