垂直磁気記録媒体の開発状況

酒井　泰志（さかい　やすし）　竹野入 俊司（たけのいり　しゅんじ）　上住　洋之（うわずみ　ひろゆき）

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％程度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って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。

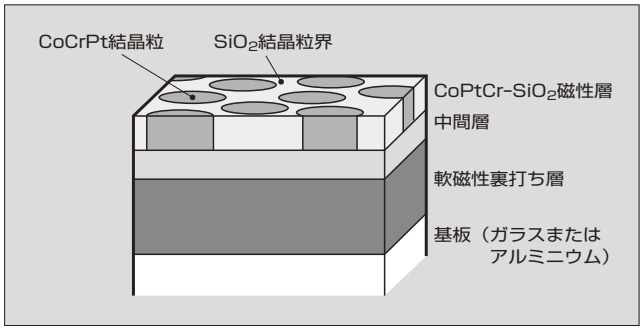
垂直磁気記録方式は1975年にIwasaki[(1)]らにより提案された記録方式であり，長手磁気記録方式と正反対の特徴，すなわち記録密度の増大に伴い「熱揺らぎ」に強くなるという特性を有している。原理的に高密度記録に適した記録方式であることから，その実用化に向け，磁気記録媒体や磁気記録再生ヘッドに関する数多くの研究がなされてきており，2005年春にはついに垂直磁気記録方式を採用したHDDが発売された。

富士電機では，1999年から垂直磁気記録媒体の開発を開始し，実用化のための大きな課題とされてきた，低ノイズ特性と高熱安定性，および書込み特性を両立させた磁気記録層，および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きた。富士電機で開発した垂直磁気記録媒体の模式図を**図1**に示す。軟磁性層（SUL：Soft Under Layer）としてCo基合金アモルファス膜を，グラニュラー磁気記録層として$CoPtCr-SiO_2$を用いており，垂直磁気記録媒体としての特性が良好なことに加え，各層の膜厚が垂直磁気記録媒体としては比較的薄いことに特徴がある。

現在までに，富士電機としては初の垂直磁気記録媒体の量産化に向けためどづけを完了させ，本格的な量産に向けて準備中である。

本稿では，テクスチャ加工による軟磁性裏打ち層への影響を含めた，軟磁性裏打ち層の最適化，グラニュラー構造を有する垂直磁気記録層の構造制御など，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。

図1　垂直磁気記録媒体の模式図

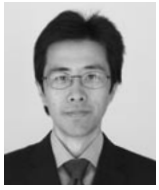


2　軟磁性裏打ち層の開発

垂直磁気記録媒体の特徴の一つにSULがある。SULが存在することにより，ヘッドの記録磁界を長手磁気記録方式の1.5倍程度にできるなど，大きなメリットがある[(2)(3)]。しかし，スパイクノイズと呼ばれるSULに発生する磁壁に起因するノイズが大きな問題とされ，その抑制も必須である。生産性を考えるとSULは可能な限り薄い方がよく，また最近はシールドポールヘッドの登場により，従来ほどのSUL膜厚が必要ないとも言われており，SUL膜厚低減が生産性に対して非常に重要な課題であった。

2.1　テクスチャによる影響

現在量産されているアルミ基板を用いた長手磁気記録媒体においては，磁気特性ならびにHDI（Head Disk Interface）特性の観点からテクスチャ加工が施されている。垂直磁気記録媒体においても，磁気記録ヘッドの構造が従来のものから大きく変更にならない限り，HDIの観点からは何らかの表面処理が必要になると思われる。そこで，テクスチャ加工条件を各種変更して作製したアルミ基板を用いて，同一成膜条件にて垂直磁気記録媒体を作製し，



酒井　泰志

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー株式会社情報デバイス事業本部ディスク媒体事業部開発部。

竹野入　俊司

燃料電池，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式会社ストレージメディア研究所。日本応用磁気学会会員。

上住　洋之

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー株式会社情報デバイス事業本部ディスク媒体事業部ガラス生産部課長補佐。博士（情報科学）。日本応用磁気学会会員。

各種評価を行った結果を紹介する。

スパイクノイズならびに電磁変換特性は，スピンスタンドテスタを使用し，シールドポールヘッドを用いて評価を行った。スパイクノイズの評価は，DC イレーズ後の出力信号に対し，ホワイトノイズの 1.2 倍の値をしきい値とし，そのしきい値を超える出力を有するものの個数を算出して求めた。**図 2** に，用いたアルミ基板の表面粗さ R_a とそれぞれに対するスパイクノイズの個数を示す。R_a が 0.2 nm 程度以下の場合には，スパイクノイズは 100 個以下の少ない値を示しているが，R_a が 0.2 nm から増加するのに伴い，個数が急激に増加していることが分かる。

次に，テクスチャ加工による電磁変換特性への影響を確認するために，記録密度 150 kfci（fci：flux change per inch）の信号を書込み後，OTP（Off-Track Profile：信号書込み位置から磁気ヘッドを 10 nm ピッチにて左右にそれぞれずらしながら信号出力を測定したときの出力波形）の測定を行い，信号の中心位置から 230 nm 離れた位置での出力値を，OTP のすそ引き量と定義して算出した。すそ引き量と R_a の関係を**図 3** に示す。図中には，一例としてすそ引き量の大きな媒体と小さな媒体の OTP を示した。スパイクノイズの場合と同様に，R_a が 0.2 nm 程度よりも小さい場合には，すそ引き量は 0.01 mV 程度の小さな値を示す。しかしながら R_a が 0.2 nm よりも大きくなると急激にその値が大きくなり，OTP の形状が左右に段を持ったものとなり，信号が横に大きく広がってしまっている。

これらの原因を調べるため，それぞれの媒体の SUL の磁気異方性を調査した。その結果，R_a が大きくなるに従い，SUL の磁気異方性の方向が，垂直磁気記録媒体として求められる半径方向から，テクスチャ溝に沿った円周方向に向きを変えていることが分かった。したがって，SUL の異方性制御の観点からは，基板の R_a は小さい方が好ましい。ただし，R_a が小さい条件においても，これらの特性の悪いものがあり，逆に R_a が大きくても，特性が良好なものもあることから，単純に R_a のみに依存するわけではなく，テクスチャの凹凸の密度や形状，向きなどにも影響されることが推察される。

一方，ガラス基板を用いた垂直磁気記録媒体においては，ポリッシュ技術の向上により，テクスチャ加工を用いることなく R_a を制御しつつ，表面欠陥を低減することができており，量産開始となる第一世代の垂直磁気記録媒体においては，テクスチャ加工なしで展開している。

次に，テクスチャの形状による磁気特性ならびに電磁変換特性への影響に関して，一例としてアルミ基板を用いて検討した結果を紹介する。これまでに，R_a の増加に伴い CoPtCr 結晶粒の c 軸分散が増加することにより保磁力 H_c が低下することを報告してきた[4]。しかしながら，今回の検討結果によると，R_a に対して H_c はほぼ一定の値を示している。さらに，電磁変換特性の評価項目の一つである信号対ノイズ比（SNR）も R_a に対してほぼ一定の値を示している。これらの傾向は，今回検討した R_a がこれまで報告してきたものに対して小さいことや，SUL へのテクスチャの影響が出難い加工条件を選んだことに起因していると推察される。

HDD の性能として重要なパラメータであるバイトエラーレート（ByER）の R_a 依存性を**図 4** に示す。ByER は，R_a が 0.15 nm 程度までは，－2.5 乗程度のほぼ一定の値を示している。しかしながら，R_a が 0.15 nm よりも小さくなると，ByER は単調に増加していることが分かる。H_c と SNR は R_a に対してほぼ一定の値を示していることから，R_a を変更した場合の磁性層への構造などに変化はな

図 2　スパイクノイズ数の表面粗さ R_a 依存性

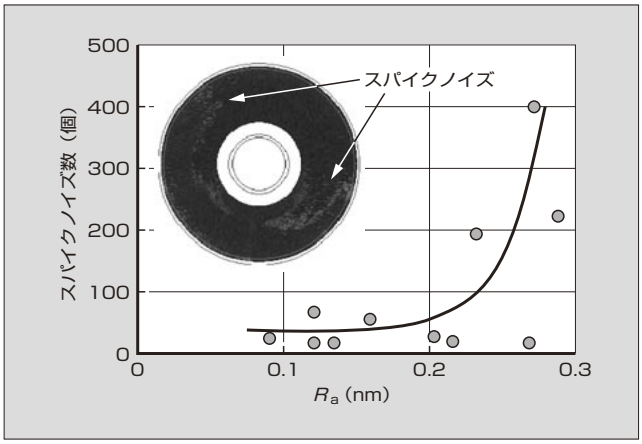


図 3　すそ引き量の表面粗さ R_a 依存性

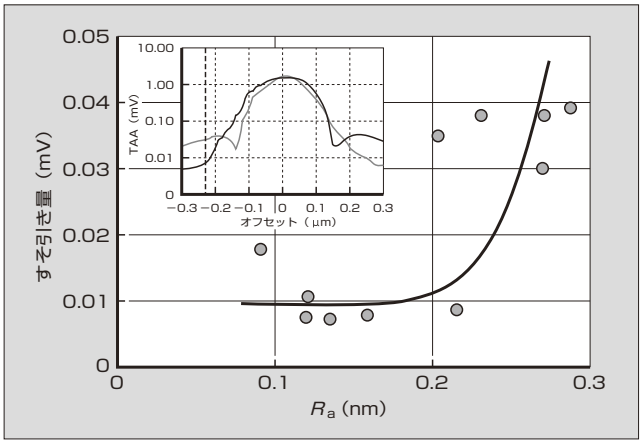
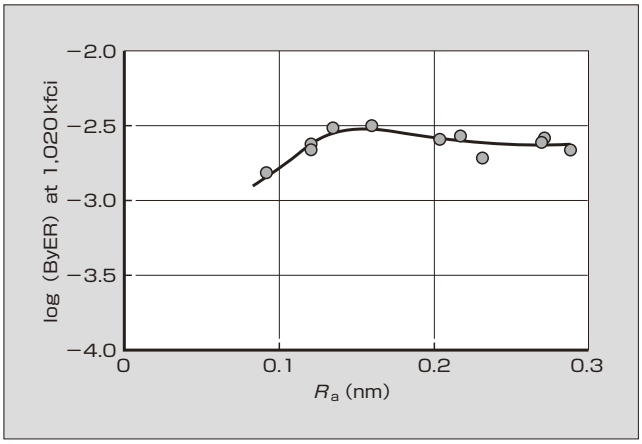


図 4　ByER の表面粗さ R_a 依存性



いものと思われる。したがって，R_a が 0.15 nm より小さい場合に ByER が増加した原因は，前述のとおり，R_a の低下に伴いスパイクノイズが減少していることに起因していると推察される。

このように，垂直磁気記録媒体においては，基板表面の形状が媒体の特性に大きな影響を及ぼすことから，HDI 特性も含め，総合的な観点から，垂直磁気記録媒体として求められる表面形状の開発を推進中である。

2.2　SUL の薄膜化

従来のシングルポール（またはモノポール）ヘッドと組み合わせる場合，媒体の SUL は 100 nm を超える膜厚が必要であった。ところが，現在，垂直磁気記録方式の主流となっているシールドポールヘッドの登場により，以前ほど厚い SUL が必要なくなってきている。これは，シールドポールヘッドを用いた場合，有効な書込み磁界が磁性膜の磁化容易軸に対して斜めに作用することが原因と考えられる。例えば，シミュレーションによる検討では，磁気記録層の膜厚を 15 nm，浮上高さを 10 nm とした場合，シード層を 10 nm とすることで最も効率のよい 45 deg の記録磁界角度が得られるとの報告もある[5]。しかし，効率のよい書込みが可能ということは，同時に消去しやすいということも意味する。そこで，SUL 膜厚を変化させたときの各種電磁変換特性の変化や隣接トラック消去（ATE：Adjacent Track Erase）の変化を調べることで，SUL 薄膜化の可能性について検討した。

図 5 に 510 kfci で測定した SNR および 510 kfci の信号上に 68 kfci の信号を上書きしたオーバーライト（O/W）の SUL 膜厚依存性を示す。SUL 膜厚を 70 nm から 40 nm まで薄膜化することで，オーバーライトは − 41 dB から − 38.5 dB まで劣化している。しかし，劣化量はたかだか 2.5 dB 程度であり，SUL 膜厚 40 nm でも − 30 dB を大きく超えるオーバーライトが得られていることから，この SUL 膜厚範囲では十分な上書き特性が得られていると考えている。次に SNR に注目すると，ばらつきはあるものの，SUL の薄膜化に伴い向上していることが分かる。記録層の磁気特性は SUL 膜厚によらずほぼ一定であることから，この SNR の違いは SUL に起因するものと推測される。

図 6 に 1,020 kfci における ByER と MWW（Magnetic Write Width）の SUL 膜厚依存性を示す。図から，SUL が薄くなるほど ByER が向上し MWW が小さくなっていることが分かる。この結果は，SUL を薄膜化することで bpi（ビット/インチ）と tpi（トラック/インチ）が同時に向上することを意味しており，高密度化のためには SUL 起因のノイズ低減も重要な要素の一つであると考えられる。

次に，垂直磁気記録媒体においては SUL が存在していることにより重要な評価項目となる ATE に関して検討を行った。ATE の評価は，ある中心位置に対し，左右それぞれ複数のトラックに低周波の信号を書き込んだ後，磁気ヘッドにて信号出力を測定する。その後，中心位置に高周波の信号を複数回（1,000 ～ 10,000 回程度）書込みを行い，再度磁気ヘッドにて信号出力を測定する。中心位置への高周波信号の書込み前後での信号出力の減衰量を算出し，ATE とした。**図 7** に，SUL 膜厚を変化させた媒体の ATE 測定結果を示す。一例として，同じ図中に，実際に得られた出力波形も示す。SUL の異方性の制御ができていないため，ATE として 17 % 程度の大きな出力の落込みが観測される。今回用いた垂直磁気記録媒体では，表面形状を含め，SUL の異方性を制御しているため，膜厚

図 5　SNR ならびに O/W の SUL 膜厚依存性

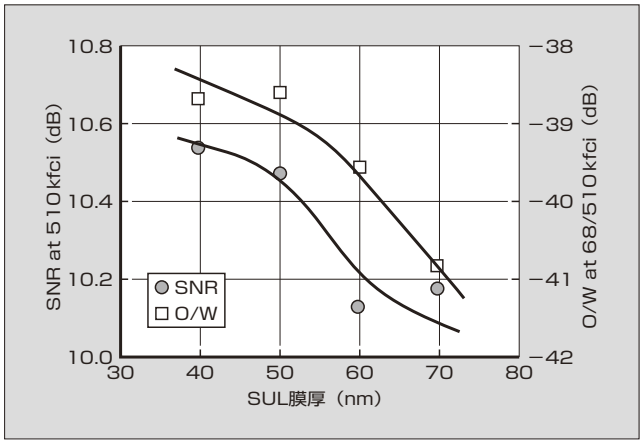


図 6　ByER ならびに MWW の SUL 膜厚依存性

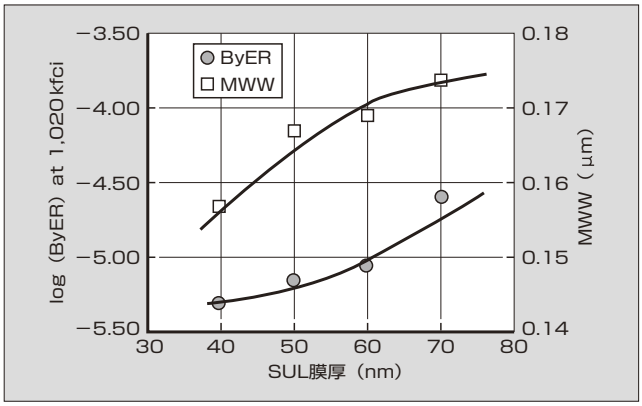
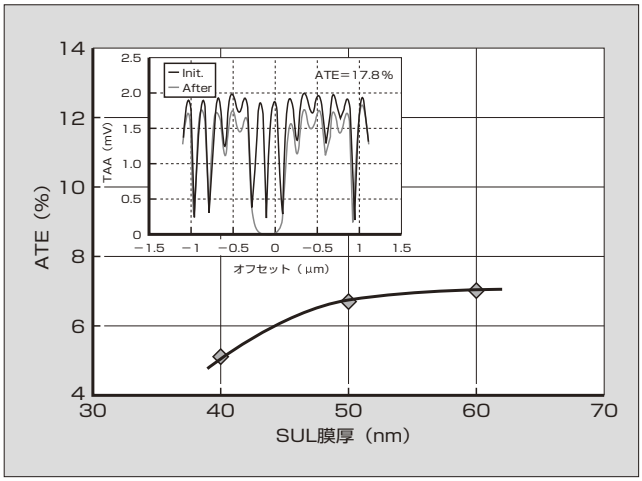


図 7　ATE の SUL 膜厚依存性



60 nm においても ATE の値は 7 % 程度と小さく抑えられている。SUL の膜厚の低下に伴い ATE は単調に減少し，40 nm においては 5 % 程度の小さな値を示す。したがって，ATE の観点からもオーバーライトの値が許容できる範囲において，SUL 膜厚は薄い方が好ましい。

今回のヘッド－媒体の組合せであれば，オーバーライトにもまだ多少の余裕があるので，40 nm 以下の SUL も実現可能と考えられる。また，シールドポールヘッドを用いたときに斜め磁界により記録されるならば，効率のよい記録ができる磁性層と中間層の膜厚が存在する可能性もある。これらの点を考慮して，さらなる高密度化を目指すべく，開発に取り組んでいる。

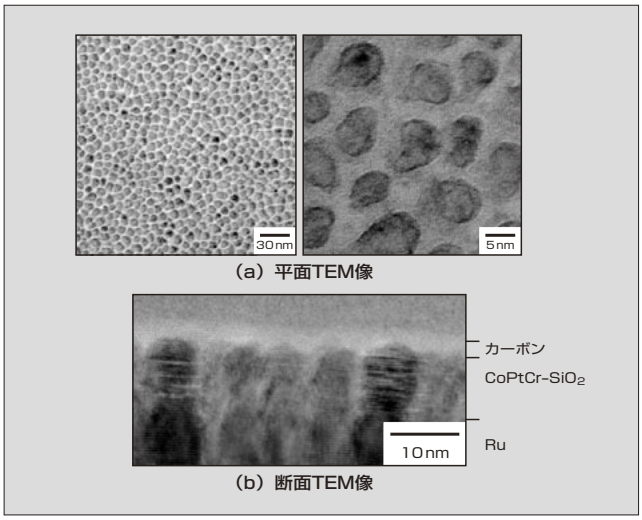
このように，富士電機の垂直磁気記録媒体の SUL 膜厚は，薄い膜厚で最適化されており，50 nm 前後という膜厚においても HDD として良好な特性が得られている。これは非磁性中間層の薄膜化や磁気記録層の最適化などにより，SUL 膜厚が薄くても，媒体全体として磁気ヘッドによる書込みの行いやすい媒体としていることに起因している。これらの取組みの成果により，生産性ならびに製造コストの観点からも量産化のめどがついている。

3　CoPtCr-SiO_2 媒体の微細構造と結晶配向性

富士電機では，他社に先駆けて，SiO_2 を添加した CoPtCr を磁性層材料として用いることで，大きな一軸異方性と良好な偏析構造を有する垂直磁気記録媒体が実現できること，また良好な記録・再生特性と高い熱安定性を示すことなどを積極的に社内外に報告してきている[(6)～(10)]。**図 8** に垂直磁気記録媒体の平面ならびに断面透過電子顕微鏡（TEM）による格子像を示す。CoPtCr の平均粒径は 4.5 nm，平均の粒界幅は 2.4 nm である。また，中間層の結晶粒径は 7.4 nm であることが分かっており，CoPtCr 結晶粒径 + 粒界幅は中間層の結晶粒径とほぼ一致している。断面 TEM 像からは，これまでと同様に，中間層と CoPtCr が 1 対 1 で成長し，中間層から CoPtCr まで c 面の格子像が連続していること，磁性結晶粒は磁性層成長初期からアモルファス状の結晶粒界により分離されていることが分かる。さらに，X 線回折の結果から，c 軸の配向分散量 $\Delta\theta_{50}$ は中間層および CoPtCr ともに 2.5 deg であり，従来よりもさらに c 軸配向分散は低減している。

図 8 に示した垂直磁気記録媒体の結晶粒径は，従来の媒体と比較して 65 % 程度まで低減している。しかし，粒界幅も含めると従来の約 80 % までしか微細化されていない。結晶粒径の低減により実際に媒体ノイズは低減されているものの，高 bpi 化を考えた場合，粒界幅を広げて粒径を低減する手法には限界がある。今後，ビットあたり bpi 方向に入る結晶粒の個数をある程度確保するためにも，充てん率を上げながら結晶粒径を低減することが望ましい。そのためには，中間層の結晶粒径を低減しながら，CoPtCr への SiO_2 添加量を最適化していく必要があると考えている。

図 8　CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体の TEM 像



4　あとがき

近年，HDD の用途も広範囲に拡大しており，垂直磁気記録方式の採用による高密度化により，さらにその応用範囲は拡大し，使用量は増大していくものと予想される。

富士電機においても，1999 年から開始した垂直磁気記録媒体の開発も，2006 年春から量産を開始している。量産技術の高度化とともにさらなる高密度化を実現できる技術の開発も並行して検討していく所存である。

参考文献

(1)　Iwasaki, S. ; Takemura, K. An analysis for the circular mode of magnetization in short wavelength recording. IEEE Trans. Magn., vol.11, 1975, p.1173-1175.

(2)　中本一広ほか．100 Gb/in^2 垂直記録向け単磁極 /TMR ヘッド．日本応用磁気学会誌．vol.27, no.3, 2003, p.124.

(3)　中本一広．日本応用磁気学会．第 135 回研究会資料．2004, p.29.

(4)　竹野入俊司ほか．CoPtCr-SiO_2 グラニュラー垂直媒体の開発．信学技報．MR2003-14, 2003, p.25.

(5)　Tang, Y. and Zhu, J. G. Optimization of Perpendicular Recording with Shielded Pole Head. Digests of the INTERMAG 2005. CB04, 2005, p.248.

(6)　Oikawa, T. et al. Microstructure and magnetic Properties of CoPtCr-SiO_2 Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.1976-1978.

(7)　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.

(8)　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．信学技報．MR2002-76, 2003, p.13.

(9)　Uwazumi, H. et al. CoPtCr-SiO_2 Granular Media for High-density Perpendicular Recording. IEEE Trans. Magn. vol.39, 2003, p.1914-1918.

(10)　竹野入俊司ほか．CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体の開発と課題．日本応用磁気学会．第 135 回研究会資料．2004, p.9-16.

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。