

# 垂直磁気記録媒体の磁性関連技術

## Magnetic Technology for Perpendicular Magnetic Recording Media

渡辺 貞幸 WATANABE Sadayuki

大山 浩永 OYAMA Hirohisa

穂積 康彰 HOZUMI Yasuaki

富士電機では、垂直磁気記録媒体の高容量化のために、課題であるトリレンマを克服する手段の一つとして、磁気ヘッド-軟磁性裏打ち層間の磁気スペーシングを低減する研究を行っている。従来は、二つに機能分離して設計していた非磁性中間層を、新しく三つに機能分離することで薄膜化し、磁気スペーシングを低減した。粒径制御層として新材料を適用し、結晶性担保層には基礎実験結果を元にしてその組成を改良し、さらに、磁気異方性強化層という新しい機能層を導入した。その結果、記録容易性を確保しつつ、信号品質および熱安定性を高め、トリレンマからの脱却に成功した。

Fuji Electric is researching the reduction of the magnetic spacing between the magnetic head and the soft magnetic under-layer, as one of the methods to overcome the problem of trilemma, to increase the recording density of perpendicular magnetic recording media. Conventionally, non-magnetic interlayers have been designed with functions divided into two, but by employing a three-way functional separation design, we were able to make non-magnetic interlayers thinner to reduce the magnetic spacing. We applied a new material as a grain size control layer, improved the composition of the collateral crystalline layer based on results of basic research, and addition of a magnetic anisotropy-enhancing layer as a new functional layer. As a result, we were able to ensure ease of recording, increase both signal quality and thermal stability, and successfully break the bottleneck of trilemma in magnetic recording.

### 1 まえがき

これまで、ハードディスクドライブ（HDD）の記録密度は、年率 30～40% で増加し続けてきた。2012 年 3 月現在では、面記録密度 750 Gbits/in<sup>2</sup> が製品化されている。HDD に用いられる記録方式は、長手磁気記録方式から垂直磁気記録方式に移り変わり、現在に至る。近年、新しい記録技術として瓦書き記録方式（Shingled-Write Recording）<sup>(1)</sup> が有力と考えられ、実用化の段階にある。この方式で用いるディスク媒体は、従来の材料を用いた改良で対応できる。富士電機では、垂直磁気記録方式あるいは瓦書き記録方式での目標を 1 Tbits/in<sup>2</sup> として、その技術開発を継続している。

### 2 ディスク媒体の構造

富士電機が製造販売するディスク媒体の構造について、

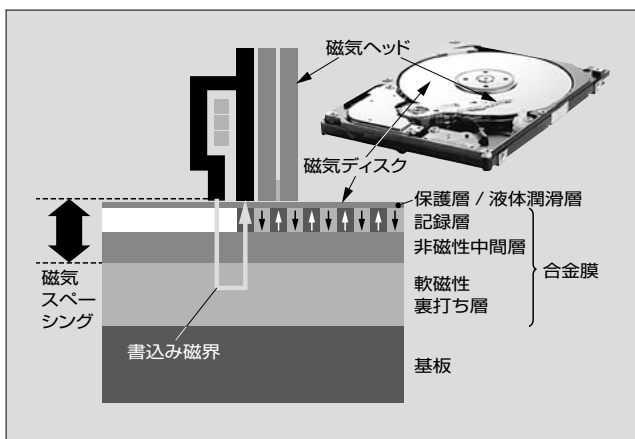


図1 ディスク媒体の断面模式図

図1に断面模式図を示す。

ディスク媒体は厚さ 1.0 mm 前後の基板の上に、合金膜、カーボンからなる保護層、液体潤滑層を順次成膜して作製される。さらに合金膜は、それぞれ nm オーダーの厚みを持つ多層構造に細分化され、その中に記録信号を保持するための磁性体を持つ記録層が含まれる。HDD でまず求められるのは記憶容量の大きさであり、そのために、ディスク媒体としては、特に記録層の微細構造を厳密に制御し、材料の性能を最大限に引き出す必要がある。

このような記録層を含む合金膜の材料設計を行う技術を総称して、磁性関連技術と呼ぶ。なお、垂直磁気記録の名は、磁性体の磁化方向が基板面に対して垂直であることに由来し、これに用いられるディスク媒体は、一般に垂直磁気記録媒体と呼ばれる。

本稿では、垂直磁気記録媒体の高容量化の課題と改善策を述べる。

### 3 高容量化の課題—トリレンマ—

垂直磁気記録媒体の高容量化の課題は、“トリレンマ”として知られている。“高記録密度化”“熱安定性”“記録容易性”の三つの並立が難しいことから、そう呼ばれている（図2）。

#### 3.1 トリレンマの構造

一般に、ディスク媒体の記録層は、粒径数 nm の円柱状の磁性粒子の集合体であり、その粒子一つあるいは複数で磁化反転単位を形成する。ディスク媒体の記録容量を高めるには、より細かいビットが書き込めるように磁化反転単位を小さくすればよい（“高記録密度化”）。しかし、単純に磁化反転単位のみを微細化した場合、長期にわたり記録

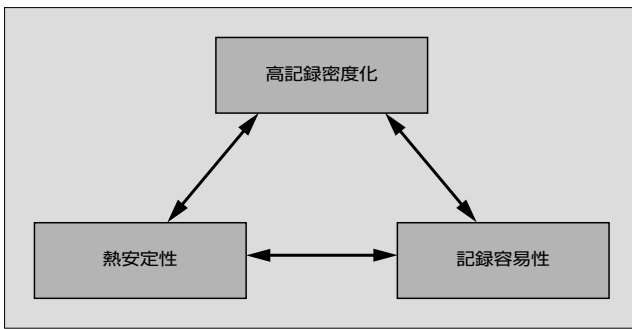


図2 垂直磁気記録媒体の高容量化の課題“トリレンマ”

信号を保持することが難しくなる（“熱安定性”の劣化）。熱安定性を高めるには、磁性材料が持つ物性値である磁気異方性エネルギー  $K_u$  を高めればよいが、このとき、記録層の示す磁気特性である保磁力  $H_c$  は増加する。一方、磁気ヘッドからの高容量化へのアプローチとしては、より細かいビットを書き込むことで記録密度を高めればよい。記録トラック幅は、記録磁界を発生する磁極の物理的な幅にほぼ対応するため、それを狭める必要がある。しかしこれは、磁極の断面積が小さくなることを意味し、ディスク媒体に信号を書き込むために発生する磁界は低下する。前述のように、ディスク媒体側で高記録密度化を進めると  $H_c$  は増大するため、磁気ヘッドの発生磁界も増大させる必要がある。言い換えると、磁気ヘッドの発生磁界が不足するとディスク媒体への信号記録は困難となる（“記録容易性”の劣化）。

### 3.2 磁気スペーシングによる対策

このようなトリレンマを乗り越えて初めて高容量化が達成できる。つまり、ディスク媒体の設計指針としては記録密度・熱安定性を持った記録層を目指しつつ、いかにして記録容易性を確保するかである。特に記録容易性の確保の課題に対して、富士電機では、ECC（Exchange-Coupled Composite）構造と呼ばれる、多層からなる記録層構造を研究してこの解決に当たっており、それを継続・発展させている。

一方、別のアプローチとしては、磁気スペーシングすなわち磁気ヘッド-軟磁性層裏打ち層間の距離を縮める手法がある。図1に示したように、ディスク媒体の基本構造は、機能別に軟磁性裏打ち層、非磁性中間層、記録層、保護層、液体潤滑層に分けられる。信号書き込み時、磁気ヘッド磁極からの発生磁界は軟磁性裏打ち層を介してリターンポール（磁力線ループを回収するためのもの）に戻される経路を考えると、軟磁性裏打ち層は、磁気回路の上では磁気ヘッドの一部となる。したがって、軟磁性裏打ち層の材料特性（飽和磁束密度や透磁率）および磁気スペーシングは、記録層での磁界強度や磁界勾配を制御する意味で非常に重要である。したがって、記録容易性の確保という課題に対しては、磁気スペーシングを縮めることが一つの対策となる。記録層の膜厚は現在 15 nm 前後が主流となっているが、信号出力や熱安定性を確保する上で極端に薄くす

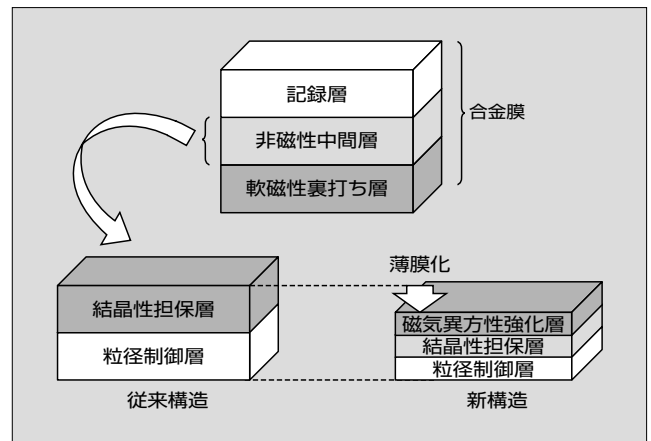


図3 合金膜の非磁性中間層の構造

ることはできない。また、保護層および液体潤滑層は、合わせて既に 3 nm 程度と薄くなっており、こちらも劇的な改善は期待できない。一方、非磁性中間層は 20 nm 前後が主流であり、薄膜化する余地が残されている。しかしこの層は、直上の記録層の微細構造を制御するという非常に重要な役割を担っている。具体的には、記録層の粒子サイズ、粒子の結晶配向であり、記録密度の向上に必須である磁化反転単位および  $K_u$  すなわち熱安定性の性能に直結する。通常、非磁性中間層の膜厚は、これらを考慮した最適な値に設定されており、磁気スペーシング低減だけのために、単純に膜厚を下げることはできない。

## 4 磁性関連技術の開発状況

本章では、トリレンマの課題に対して実施した非磁性中間層の改善例を紹介する。これまで二つの層に機能分離されていた層をさらに細分化し、三つの層に機能分離するものである（図3）。三つの層の機能とは、具体的に、粒径の制御、結晶性の確保、記録層とのミスマッチの低減である。なお、従来の非磁性中間層は、粒径の制御と結晶性の確保の一部を下層が、結晶性の確保の一部と記録層とのミスマッチの低減を上層が担っていた形であったと考えている。

### 4.1 粒径制御層

軟磁性裏打ち層の直上であり、かつ非磁性中間層のうち最も下層である粒径制御層は、従来、粒径制御とともに結晶性の確保の役割も担ってきた。しかし今回、“粒径制御”という役割に特化し、材料を大幅に変更した。具体的には、ぬれ性に着目し、従来よりも表面エネルギーの高い材料を採用し、軟磁性裏打ち層上に、粒状に形成されやすいものを選択した。粒径制御層の効果を確認するために行った実験の結果を次に述べる。

図4に、粒径制御層を付与した場合としない場合について、粒径の評価を行ったSEM観察結果を示す。付与しない場合は、平均粒径 8.5 nm、標準偏差 2.63 nm であったものが、付与した場合は、平均粒径 7.7 nm、標準偏差 1.91 nm

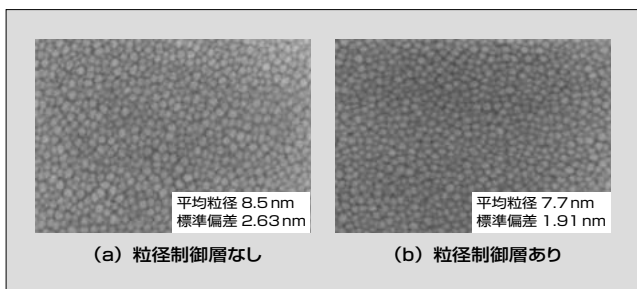


図4 粒径制御層の有無による粒径変化

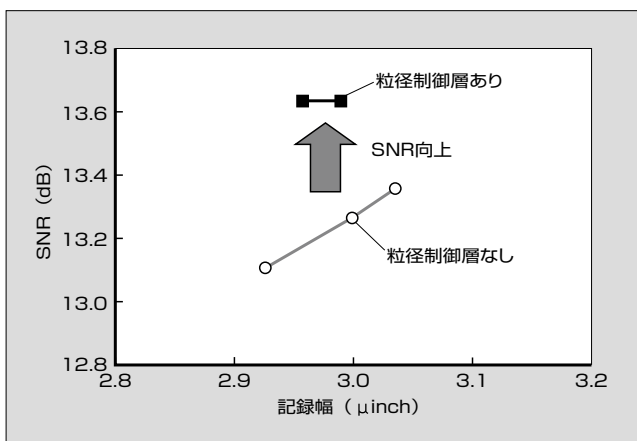


図5 記録幅とSNRの関係

となり、粒径およびそのばらつきが大幅に低減していた。  
次に、これらのサンプルについて、記録再生特性を評価した。記録幅と信号品質 SNR の関係を図 5 に示す。同じ記録幅で比較するとき SNR が約 0.4 dB 増加していることが分かる。粒径の低減により、ビットの境界で発生する遷移ノイズが低減し、SNR が向上することが推察される。なお、SNR の向上はビット方向の線記録密度の向上を意味し、本例の増加幅 0.4 dB では記録密度 2～4% の向上を見積ることができる。

## 4.2 結晶性担保層

4.1 節で述べた粒径制御層の上に形成される結晶性担保層は、中間層全体の中で最も膜厚のある層である。3章で述べた記録容易性の課題から、結晶性担保層ではできるだけ薄い膜厚で結晶性を確保することを目指し、添加元素を新しい元素に変更することで、それを達成した。この過程では、次のように段階的に実験を行った。

### (1) 添加元素の効果を確認するための基礎実験

まず、添加元素を選択するために、ベースとなるある金属 M (Ref.) に添加元素を加えた単純な組成系において、それぞれの添加元素における結晶粒径、配向分散を調べる基礎実験を行った。3種類の添加元素 A, B, C における結晶粒径と配向分散の値を表 1 に示す。結晶粒径は、添加元素 A, B, C いずれにおいても微細化し、特に B でその効果が大きくみられた。配向分散は、添加元素 C で添加前と同等で C<B<A の順でわずかながら悪化していく傾向にあった。この結果から、添加元素 B, C で粒径が小さ

表 1 各添加元素の粒径および配向分散

材 料	M (Ref.)	M-A	M-B	M-C
粒径 (nm)	7.9	7.4	6.9	7.4
配向分散 (deg.)	2.7	2.9	2.8	2.7

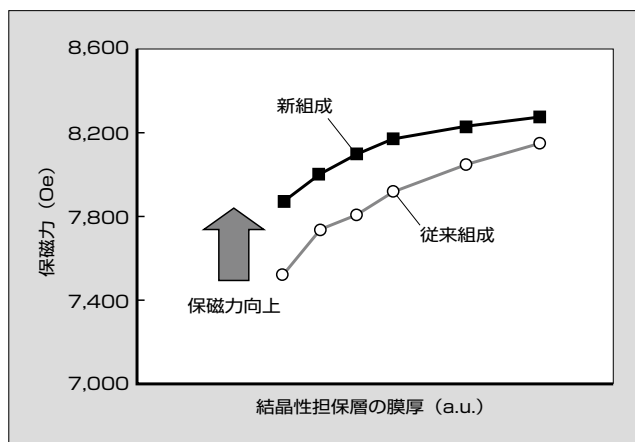


図6 結晶性担保層の膜厚と保磁力の関係

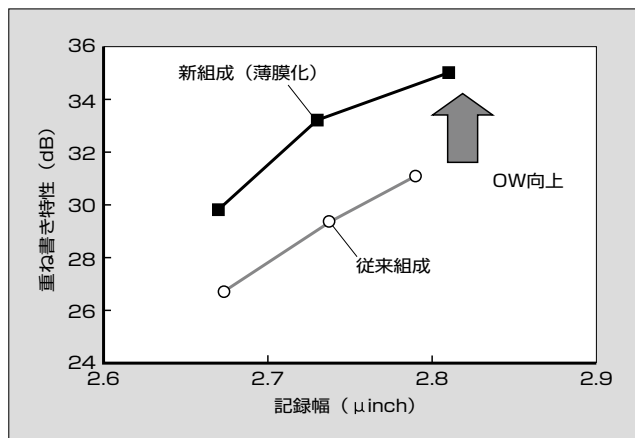


図7 記録幅と重ね書き特性の関係

くとも結晶性を維持できる可能性が示唆された。

### (2) 新しい結晶性担保層の効果

次に、この基礎実験の結果を元に、詳細な検討を行ったところ、添加元素として先に述べた元素 B を適用することで、膜厚が薄くても良好な磁気特性や電磁変換特性を得ることに成功した。図 6 に、結晶性担保層の膜厚と  $H_c$  の関係を示す。なお、ここで示す  $H_c$  は、多層構造からなる記録層のうちの一層（一組成）のものである。この図から、従来組成に対して、新組成では、薄い膜厚領域から高い  $H_c$  を示す傾向にある。この結果から、従来と同程度の  $H_c$  を得ようとするとき、新組成では非磁性中間層の膜厚を低減できることになる。

図 7 に、記録幅と重ね書き (OW: Over Write) 特性の関係を示す。このグラフから、新組成を用いた場合は、従来組成に対して OW が約 3 dB 向上していることが分かる。このほか、SNR など他のパラメータも同等以上であった。なお、新組成を適用したサンプルは、従来組成に対して非磁性中間層の総膜厚を 25% 低減させたものである。この

結果は、記録層の性能としては同等以上のものを確保しつつ、磁気スペーシングを低減し、書込み容易性を向上させたことを示している。

### 4.3 磁気異方性強化層

これまで、3.2節で述べたような、中間層そのものの結晶性を高めることに注力していた。しかし今回、記録層との結晶格子の整合性（マッチング）をも考慮し、新たに磁気異方性強化層を導入した。これにより、比較的ミスマッチが大きい場合に存在すると推定される、記録層成長初期の積層欠陥が低減され、その結果  $K_u$  が増加し、熱安定性の向上が期待される。図8に、磁気異方性強化層の膜厚に対する信号出力の減衰度合いを示す。なお、信号出力の減衰度合いは、ある記録密度で書き込んだ信号出力の経時変化を測定して得た結果である。磁気異方性強化層のない、すなわち厚さ0nmに対して、磁気異方性強化層を付与したものは、信号出力の劣化度合いが低減している。膜厚を0.5、0.75、1.0nmと増加させるにつれて改善度合いが高まる傾向にあった。

図9に、磁気異方性強化層の各膜厚における記録幅と

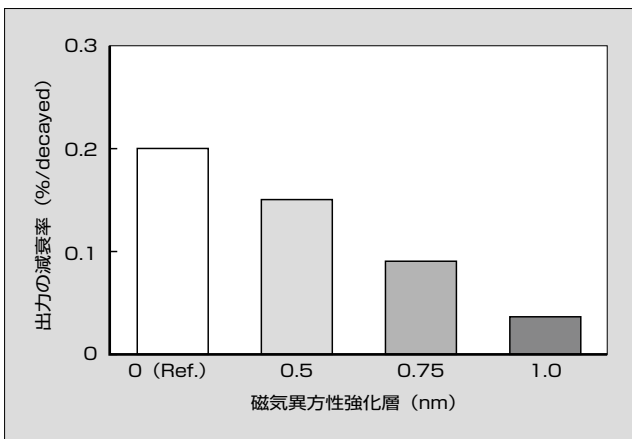


図8 磁気異方性強化層の膜厚と出力減衰度合いの関係

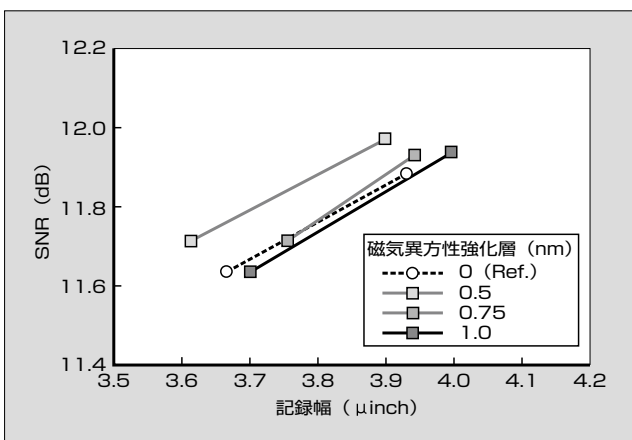


図9 記録幅とSNRの関係

SNRの関係を示す。磁気異方性強化層を付与しないRef.に対して、0.5nmの場合はSNRが0.1dB程度改善している。0.75、1.0nmの場合は、Ref.とほぼ同等であった。

以上の結果から、磁気異方性強化層の導入で、SNRを維持しつつ、熱安定性を向上できることが分かった。なお、通常ならば  $K_u$  の増加 ( $H_c$  の増加) によるOWの低下というトレードオフに陥るが、今回の検討範囲ではOWの劣化は見られなかった。この理由については、磁気異方性強化層の導入は、記録層粒子それぞれの  $K_u$  を底上げする効果よりも  $K_u$  の分散を低減する効果の影響が大きいと推測している。粒子個々の  $K_u$  が均一化される一方、膜平均の  $K_u$  の増分は小さく書込み能力を損なわないのではないかと考える。

### 5 あとがき

垂直磁気記録媒体の磁性関連技術として、非磁性中間層での改善例を紹介した。750 Gbits/in<sup>2</sup>では、軟磁性裏打ち層、記録層においても従来の500 Gbits/in<sup>2</sup>から改善を加えている。次の目標である1 Tbits/in<sup>2</sup>に対しては、さらに厳しい特性が要求されるであろう。ここでも総合的な改善を行い、それぞれの機能層で材料の限界に挑んでいく所存である。

### 参考文献

- (1) Roger Wood, et al. "The Feasibility of Magnetic Recording at 10 Terabits Per Square Inch on Conventional Media.", IEEE. Trans. Magn. 2009, vol.45, no.2, p.917-923.
- (2) 竹野入俊司ほか. 新しい高密度技術-ECC媒体-. 富士時報. 2008, vol.81, no.4, p.275-279.



渡辺 貞幸

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、マレーシア富士電機社開発統括部開発部課長補佐。



大山 浩永

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、マレーシア富士電機社開発統括部開発部課長補佐。



穂積 康彰

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、マレーシア富士電機社開発統括部開発部。



\*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。