

垂直磁気記録による高記録密度化

High-Density Perpendicular Recording Technology

あらまし

垂直磁気記録は、原理的に優れた記録方式にもかかわらず、これまでは記録再生特性や製造性の課題により実用に至っていなかった。富士通ではこれらの課題を解決する要素として、記録層の低ノイズ化による記録密度の向上のためのグラニューラー材料開発、磁気記録ヘッドと磁気的な相互作用により記録の一端を担う裏打ち層の磁区構造に起因するスパイクノイズを除去するための磁区制御技術、広域にわたり記録情報を消失するWATER現象を抑制するための裏打ち層の多層化技術を開発した。富士通ではこれらの技術を適用した垂直磁気記録媒体の性能として、スパイクノイズ、およびWATER現象に対して良好な結果を得るとともに、1,000 kBPIを超えた線記録密度で十分なエラーレートが得られることを確認している。

本稿では、垂直磁気記録の長所、課題と、課題を解決する要素技術および垂直磁気記録媒体の性能を紹介する。

Abstract

Although perpendicular magnetic recording is fundamentally an excellent recording method, it is not ready for practical use due to its poor read-write performance and manufacturability of equipment and media. Fujitsu has therefore developed the following elemental technologies that solve these problems: 1) granular materials that improve the recording density by reducing noise from the recording layer; 2) magnetic domain control technology that removes spike noise from the domain structure of the soft under layer (SUL), which helps writing through magnetic interactions with the write head; and 3) multi-layering of the SUL to reduce the wide-area track erasure (WATER) phenomenon, which causes data loss due to large-area erasure of recorded information. By using these technologies, we have obtained excellent performance from perpendicular magnetic recording media in terms of the spike noise and WATER phenomenon. We confirmed that sufficient error rates can be achieved at a linear density exceeding 1000 kBPI. This paper describes the advantages and problems of perpendicular magnetic recording and introduces our elemental technologies that solve these problems. It also describes the performance of our perpendicular magnetic recording media.



渦巻拓也（うずまき たくや）

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、磁気ディスク媒体・ヘッドの研究に従事。

まえがき

通信のブロードバンド化やデジタル家電の普及により、大容量ハードディスクドライブ（HDD）への期待がますます増している。高記録密度化を実現する垂直磁気記録は、約30年前に提唱された記録方式であり⁽¹⁾ 現在の磁気情報を円板面に水平に配置する、いわゆる水平磁気記録技術よりも、小さな面積に多くの情報を書き込むことができる技術として注目を集めてきた。しかし、原理的には優れていても、実用化のための多くの課題があり、それらの課題を解決することが困難であった。富士通は、垂直磁気記録技術（垂直ヘッド・媒体）に関する研究開発を行い、これらの課題を解決する垂直ヘッド・媒体の要素技術を開発した。

本稿では、まず垂直磁気記録の長所を述べ、それから垂直磁気記録の実用化に向けての課題を述べる。つぎに、これらの課題を解決するために開発された要素技術を述べる。最後に、この要素技術を適用した垂直磁気記録媒体の性能を紹介する。

垂直磁気記録の長所

本章では、高記録密度を実現する記録方式として、現在の水平磁気記録方式と垂直磁気記録方式を比較して原理的に垂直磁気記録方式が優れていることを述べる。

(1) 記録ヘッドからの発生磁界の増大

水平磁気記録方式では、今後の高記録密度を実現するためには、記録ヘッドから発生する磁界を増大させる必要がある。しかし、現状の記録ヘッドでは、材料的な限界から発生磁界は、 10 kOe { $\text{Oe} = (1000/4) \text{ A/m}$ } 程度が限界と予想されている。

これに対して、垂直磁気記録方式では、図-1に示すように、媒体側に軟磁性裏打ち層（SUL：Soft UnderLayer）と呼ばれる磁性層を設け、記録ヘッドはSULと磁気的な相互作用により、急峻で大きな磁界（ 15 kOe 程度）を発生することができる⁽²⁾

(2) 記録ビットの熱的な安定性の向上

現在の水平磁気記録方式では、超常磁性限界と呼ばれる物理限界に近づいてきている。つまり、超常磁性限界により、媒体上に書かれた情報（ビット）が熱により磁化方向が乱され、記録した情報が数年で消えてしまう現象が起きる。この現象は、いわゆる

熱揺らぎ現象と呼ばれ、水平磁気記録方式では大きな問題となっている⁽³⁾ 原理的には、水平磁気記録方式の場合には、隣り合うビット間には反発力が生じており、熱揺らぎ現象が生じやすい。一方、垂直磁気記録方式では、隣り合うビット間には吸引力が働くため、記録密度が増すにつれて、記録されたビットは安定化する。

そのほかにも、垂直磁気記録方式の方が発生磁界の広がりを抑制できるため、トラックピッチを小さくできる。磁気スペーシング（ヘッド浮上面と媒体表面との距離）の変化に対するS/N感度が低いため、装置としての設計マージンが広がることで、装置歩留まりが向上する可能性がある。

垂直磁気記録の課題

前章で述べたように、垂直磁気記録が原理的に優れた記録方式であるにもかかわらず、いまだ製品化に至っていない理由は、その記録再生特性だけでなく、製造面にも実用化のための多くの課題があったことによる。本章では、垂直磁気記録の実用化に向け、記録再生特性および製造面の課題を述べる。

記録再生特性の向上

1、2年ほど前までは、垂直磁気記録によって実証された記録密度は、従来の水平磁気記録の記録密度を大きく超えることはできなかった。垂直磁気記録の記録密度を上げるためには、以下の記録再生特性を向上させる必要があった。

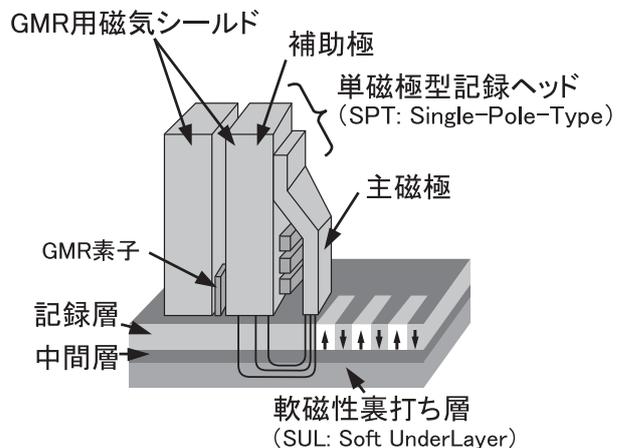


図-1 垂直磁気記録媒体と単磁極型（SPT）記録ヘッド
Fig.1-Schematic illustration of perpendicular magnetic recording medium and single-pole type (SPT) write head.

(1) 記録密度の向上

垂直磁気記録において、面記録密度が大きく向上できない理由は、垂直磁気記録媒体の記録層の低ノイズ化が困難であったことによる。これまで、垂直磁気記録媒体の記録層材料は、水平磁気記録媒体の記録層として実績のある低ノイズCoCrPt材料の研究・開発を主に進めてきた。しかし、この材料を用いて垂直配向(c軸配向)させると、水平に配向させるのと比較して、結晶成長のメカニズムが大きく異なるため、低ノイズを実現するために不可欠な偏析が十分に起きないことが判明した。このように、記録密度の向上には垂直磁気記録媒体の記録層を低ノイズ化させる記録材料を必要としていた。

(2) スパイクノイズ除去

スパイクノイズとは、垂直磁気記録媒体から発生するスパイク状のノイズのことである。再生ヘッドはSULの磁壁から発生する垂直方向の磁束を検出する⁽⁴⁾したがって、スパイクノイズを除去するためには、SULの磁区制御、または新たなSUL構造を導入する必要がある。

(3) 広域イレース(WATER)除去

広域イレース(WATER: Wide Area Track ERasure)とは、同一トラックに非常に多くの(10万回程度)記録をした場合に、書き込んだトラックを中心として、数ミクロンにわたって、記録情報が消失する現象のことである^{(5),(6)}。この現象は垂直磁気記録特有のものであり、垂直ヘッド・垂直媒体の両方に問題がある。これまでと同様のHDDの信頼性を満足させるためには、この問題を解決し、垂直磁気記録ドライブの長期安定性を確保する必要がある。

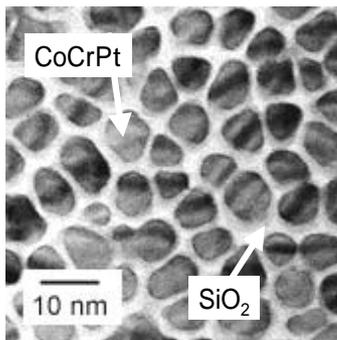


図-2 CoCrPt-SiO₂グラニューラー記録層の平面TEM像
Fig.2-In-plane TEM image of CoCrPt-SiO₂ layer.

垂直磁気記録媒体の製造性の向上

垂直磁気記録媒体のSULの膜厚は数百nmと厚く、媒体を量産するためには現実的ではなかった。垂直磁気記録媒体の量産には、SULの製造性を向上させる必要がある。

垂直磁気記録媒体の要素技術

本章では、前章で述べた垂直磁気記録媒体に対する課題を解決するため、開発した垂直磁気記録媒体の要素技術について述べる。

記録密度向上のためのグラニューラー材料開発

低ノイズ垂直磁気記録媒体の記録層材料は、前述したCoCrPt材料の問題点を解決した材料として、CoCrPt-O系⁽⁷⁾またはCoCrPt-SiO_x系材料⁽⁸⁾が主流となっている。これらの材料は、これまでの加熱成膜でのCr偏析に代わり、室温成膜でO、またはSiO_xにより磁性粒間の磁氣的相互作用を低減させることで、低ノイズ化を実現できる。このグラニューラー材料の開発により、垂直磁気記録媒体の特性は大幅に向上し、現在では水平磁気記録媒体よりも、高い記録密度を実現している。CoCrPt-SiO₂グラニューラー記録層の平面TEM像を図-2に示す。磁性粒の平均粒子サイズは7 nm程度であり、磁性粒間にSiO₂が主成分である粒界を形成しており、低ノイズ垂直磁気記録媒体としての理想的な材料であることが分かる。垂直磁気記録媒体としては、Coを主成分とした結晶が垂直にエピタキシャル成長することが不可欠であるが、中間層としてRuを設けることで、Ru(001)配向の上にCo(001)がエピタキシャル成長し、良好な配向性を実現できる。水平

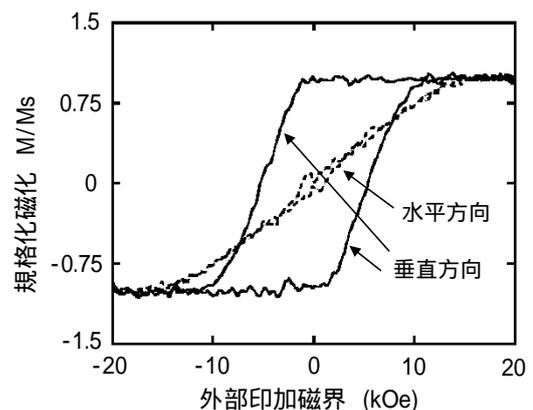


図-3 CoCrPt-SiO₂垂直記録媒体の磁化曲線
Fig.3-Hysteresis loops of CoCrPt-SiO₂ medium.

方向、および垂直方向に外部磁場を印加して測定した磁化曲線を図-3に示す。水平方向にはループが閉じ、垂直方向に大きく開いた理想的な曲線が得られ、磁氣的に垂直方向に磁化した垂直膜であることが分かる。さらに、X線回折測定によるロッキングカーブを図-4に示す。結晶の垂直方向からのずれ(50)は、4度以下と優れた配向分散であることが分かる。

以上から、Ru上のCoCrPt-SiO_x記録層は結晶的にも磁氣的にも優れた垂直磁気記録用の材料であることが分かる。

スパイクノイズを除去する磁区制御技術

SULから発生するスパイクノイズは、水平方向に磁化したSULが磁区を形成し、その磁壁から発生する垂直方向の漏れ磁束を再生ヘッドで検出することが原因である。これを解決するためのSULの構造には2種類ある。第一に、反強磁性体と強磁性体との交換結合を利用すること⁹⁾ 第二は、極薄膜Ruを介して、上下の強磁性体に交換結合を導入した積層フェリ構造である¹⁰⁾ どちらも交換結合を利用して、HDDの円板の半径方向に交換結合磁界(Hex)を導入していることは共通である。積層フェリ構造の場合には、上下の強磁性膜に反強磁性結合を起こさせ、トータルの磁化をゼロとし、スパイクノイズの原因となる垂直方向の漏れ磁束を閉じ込めることで、スパイクノイズを除去するものである。また、これらの二つの技術を組合せたSUL構造も提案されている¹¹⁾

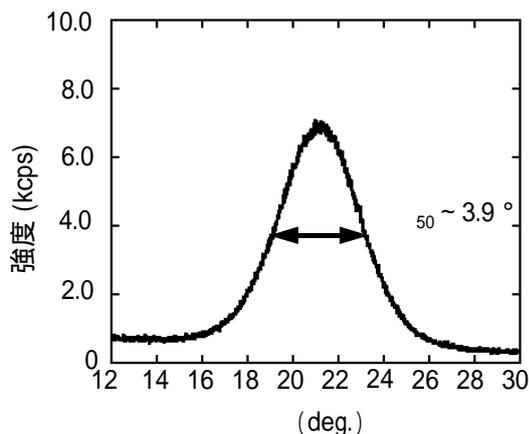


図-4 X線回折測定によるロッキングカーブ
Fig.4-Rocking curve using X-ray diffraction (XRD) method.

WATERを除去する裏打ち層の磁区制御

WATERを除去するためには、垂直磁気記録媒体と垂直磁気記録ヘッドの両面から改善することが重要である。垂直磁気記録媒体から発生するスパイクノイズの対策で導入したHexは、WATER抑制に効果がある。Hexを増大させるためには、反強磁性体と強磁性体との多層膜構造にしたり、積層フェリ構造の場合には、軟磁性体の膜厚を薄くしたりして、多層構造を用いることなどが提案されている^{10),11)} WATER現象の抑制は、SUL構造(膜厚, Hex)だけでなく、記録層の磁気特性、中間層の構造などにも影響しており、ヘッドと組み合わせで最適化を施すことにより、解決可能と考えている。

垂直磁気記録媒体の製造性を向上させる垂直磁気ヘッド技術

SULに数百nmの厚さが必要であると仮定すると、媒体を製造、量産するためには、スパッターターゲット数を格段に増加させる大幅な設備投資が必要となる。したがって、SULを薄くすることが重要となるが、SULは記録ヘッドの一部として機能しているので、薄膜化した場合、記録ヘッドからの発生磁界が大幅に減少する。

このように、SUL構造(膜厚)を変化させるためには、記録ヘッドも新たな構造を考える必要がある。最近では、従来の単磁極型の記録ヘッドに、トレーリングシールドを新たに設けることで、垂直方向の磁界だけでなく、水平方向の磁界を導入して、斜め磁界により、記録層の磁化のスイッチングを容易にすることで、記録性能を向上させている¹²⁾ このトレーリングシールド付きの記録ヘッドは、水平

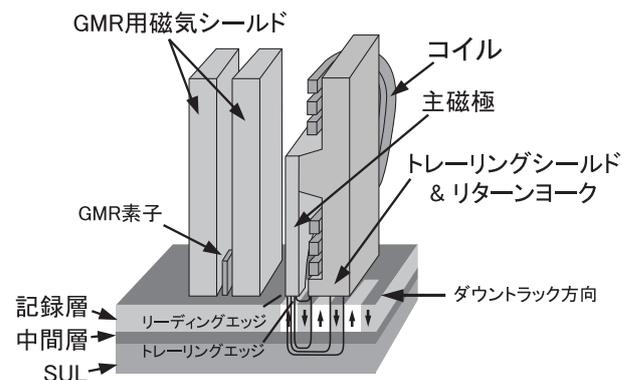


図-5 トレーリングシールド付き垂直磁気記録ヘッド
模式図
Fig.5-Schematic illustration of SPT write head with trailing shield yokes.

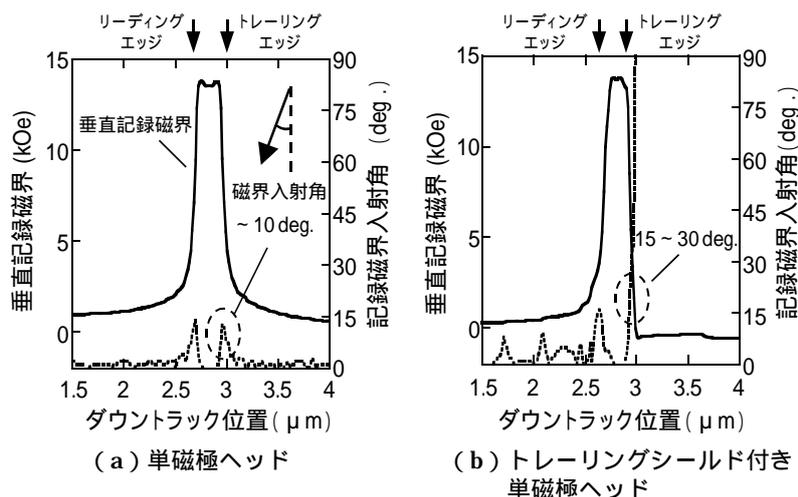


図-6 トレーリングシールドの効果
 Fig.6-Distribution and gradient of magnetic write field (a) without and (b) with trailing shields on SPT head.

磁気記録に用いているリング型のヘッドと単磁極型の垂直磁気記録ヘッドとを融合したヘッドである。このヘッドにより、垂直方向に磁界成分を少なくすることが可能となった。つまり、SULの薄膜化が可能となる。富士通では、100 nm以下のSULの膜厚での十分な記録性能を達成することができることを確認している。これにより、垂直磁気記録媒体の製造性の課題を解決できた。

最近では、さらに、書込みしやすい記録層の開発を進めるなど、実用化に向けた技術開発に取り組んでいる。

トレーリングシールド付き垂直磁気記録ヘッド技術

本章では、SULの薄膜化の課題を解決したトレーリングシールド付き垂直磁気記録ヘッドについて述べる。トレーリングシールド付きの垂直磁気記録ヘッドの模式図を図-5に示す⁽¹¹⁾。前章で説明したように、垂直方向の発生磁界に加えて、水平方向の磁界が発生し、斜め成分の磁界を用いて、記録する方式である。このヘッド構造から発生する磁界、および磁界勾配をシミュレーションした結果を図-6に示す。図ではトレーリングシールドを設けることで、実際に記録する10~12 kOeの記録磁界を発生しているときの磁界入射角度が15~30°となっている。斜めに磁場を印加することにより、記録層のスイッチング磁界は低減する。逆に考えれば、記録ヘッドから発生する実効的な磁界が増大することになる。

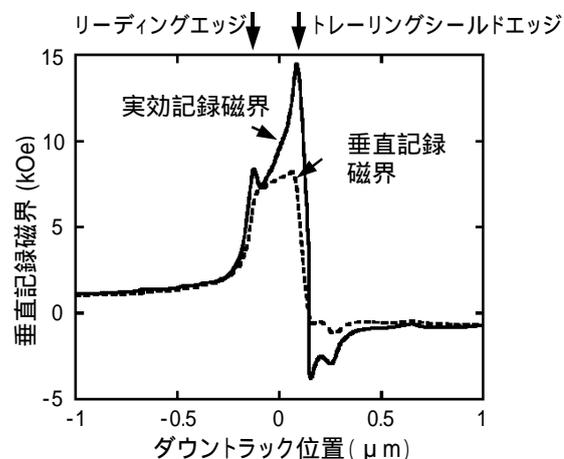


図-7 垂直記録磁界分布
 Fig.7-Distribution of writing field on SPT head with trailing shields.

ダウトトラック方向に対する垂直記録磁界と実効磁界の違いを図-7に示す。媒体に実際に書き込むトレーリングシールドエッジで実効磁界が増大していることが分かる。

さらに、この実効磁界のSUL膜厚依存性を計算すると、SUL膜厚が薄膜化するにつれ、実効磁界はやや低減する程度であり、SUL膜厚が100 nm以下でも十分記録磁界が発生している結果が得られた。このように、SUL薄膜化は、トレーリングシールド付き垂直磁気記録ヘッドにより実現した。

垂直磁気記録媒体の性能

以上のような技術を駆使して、富士通が開発した垂直磁気記録媒体の性能を確認した。⁽¹³⁾ SUL膜厚が100 nm以下の垂直磁気記録媒体において、スパイクノイズ、およびWATERは良好な結果を示すとともに、1,000 kBPIを超えた線記録密度で十分なエラー率を確保している。記録密度に換算すると、200 Gbit/in²を超えるポテンシャルを有している。

む す び

本稿では、これまで解決が困難であった垂直磁気記録（ヘッド・媒体）の課題を明確にするとともに、それらを解決する垂直磁気記録媒体の要素技術、トレーリングシールド付き垂直磁気記録ヘッドを紹介した。これらの技術により、垂直磁気記録媒体の量産にかかわる問題点も含めて解決できつつある。開発した垂直磁気記録媒体は、200 Gbit/in²を超えるポテンシャルを有している。これは現在の製品化レベル（100 Gbit/in²程度）を大きく超える性能である。次世代の高密度HDDの製品化のためには、垂直磁気記録は不可欠な記録方式であり、今後も更なる進展を図りたい。

参考文献

- (1) S. Iwasaki et al. : An analysis for the Circular Mode of Magnetization in Short Wavelength Recording . *IEEE Trans. Magn.* , Mag-11 , p.1173 (1975).
- (2) 松原亮ほか : 高トラック密度SPTヘッドの磁界解析 (3). 信学技報 , 102 , MR2002-65 (2002).
- (3) S. H. Charap et al. : Thermal Stability of Recorded Information at High Densities . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.33 , p.978 (1997).
- (4) Y. Honda et al. : Effect of Soft Underlayer on Magnetization Microstructure of Perpendicular Thin Film Media . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.36 , p.2399 (2000).
- (5) W. Jiang et al. : Cross-track noise profile measurement for adjacent-track interference study and write-current optimization in perpendicular recording . *J. Appl. Phys.* , Vol.93 , p.6754 (2003).
- (6) J. Feng : Long-Range Erasure of Nearby Recorded Tracks . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.40 , p.2588 (2004).
- (7) S. Okikawa et al. : High Performance CoPrCrO Single Layered Perpendicular Media with No Recording Demagnetization . *IEEE Trans Magn.* , Vol.36 , p.2393 (2000).
- (8) T. Okikawa et al. : Microstructure and Magnetic Properties of CoPtCr-SiO₂ Perpendicular Recording Media . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , p.1976 (2002).
- (9) S. Takenoiri et al. : Exchange-Coupled IrMn/CoZrNb Soft Underlayers for Perpendicular Recording Media . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , p.1991 (2002).
- (10) B. Acyarya et al. : Anti-Parallel Coupled Soft Under Layers for High-Density Perpendicular Recording . *IEEE Trans Magn.* , Vol.40 , p.2383 (2004).
- (11) K. Tanahashi et al. : Exchange-Biased Soft Underlayers for Perpendicular Recording . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.41 , p.577 (2005).
- (12) M. L. Mallery , US Patent , #4 656 546 (1987).
M. L. Mallery and S. C. Das , Reissued #33 949 (1997).
- (13) K. Shimoda et al. : Recording characteristics of CoPtCr-SiO₂ perpendicular media . *J. Magn. Magn. Mat.* , Vol.287 , p.176 (2005).