

■8 群 (情報入出力・記録装置と電源) - 2 編 (情報ストレージ)**2 章 ハードディスクドライブ**

(執筆者：片岡宏之) [2011 年 2 月 受領]

■概要■

ハードディスクドライブ (HDD) は、年間 6 億台ほど生産され、ビジネス用途から身近な用途に至るまで幅広いアプリケーションに使われ、IT 社会における情報記憶に大きく貢献しているデバイスである。

HDD は、筐体にディスクとヘッドを機構部品とともに密閉し、外側にコントローラ LSI を搭載した小型の基板が取り付けられた構成である。HDD は、身近な環境で数 100 Gb/in² の超高密度に情報を記録・保持・再生しているが、誤りなく動かすことを可能にしている最も大事な構成要素は、(1)磁気ヘッド、(2)磁気ディスク、(3)位置決め機構、(4)信号処理 LSI である。

本章では、HDD を理解するために、現在使われている垂直磁気記録方式の記録原理や、パソコンとのインタフェースの紹介、将来に導入されると考えられている記録再生方式についてまず述べ、上記の四大構成要素の HDD における位置づけを説明する。

次に、最近の数 10 年にフォーカスして磁気ヘッドと磁気ディスクの記録再生動作原理や技術開発の流れを追う。説明の中で、ヘッドの技術革新の歴史と、2005 年以降の製品で使われている垂直磁気記録用ヘッドと磁気ディスクの材料や構造を概説する。また、今後の高記録密度化にむけた課題を述べる。また、振動しながら高速回転する磁気ディスクに、ナノメートルの精度で磁気ヘッドを位置決めする機構部品と位置決め機構と、誤りを徹底的に排除する信号処理技術を解説し、HDD の理解の一助とする。

【本章の構成】

2-1 節「ハードディスクドライブの基本概念」では、用途やハードウェア構成や動作原理を説明する。2-2 節では、情報を読み書きする「磁気ヘッド技術」を述べる。2-3 節では情報を記憶する「磁気記録媒体技術」を解説する。2-4 節では、HDD の「機構系・サーボ・HDI 技術」を解説する。2-5 節では、チャンネル LSI に仕込まれている「信号処理技術」を解説する。

■8群-2編-2章

2-1 ハードディスクドライブの基本概念

(執筆著者：田中陽一郎) [2009年7月 受領]

2-1-1 基本構造

ハードディスクドライブは、回転する円盤状のディスク媒体と、それにデータ信号を記録・再生する磁気ヘッド、記録・再生信号の変復調と符号・復号及び誤り訂正を担う信号処理回路、磁気ヘッドを支えるサスペンションアームを駆動させる機構（アクチュエータ）とその制御回路群から構成されている。ドライブの大きさとしては、主に3.5インチ型、2.5インチ型、1.8インチ型の3種類の形状規格で製品化されている。3.5インチ型には、主に据え置き型のデスクトップPCで使われるドライブと、毎分10000回転または15000回転の高回転数で転送レートが高くアクセス時間の短い高性能サーバ向けに使われるドライブなどがある。最新のサーバ向けドライブでは、最高転送レートは2.2 Gbit/sにも達する。2.5インチ型は、小型軽量かつ大容量という特徴を活かして主にノートPCで採用されている。最新の2.5インチ型ドライブではディスク1枚当たり250 GBの容量を記録することができる。1.8インチ型は、超小型・軽量という特徴に加え、耐衝撃性能と低消費電力性能を活かし、携帯音楽プレーヤやデジタルビデオカメラ、薄型ノートPCなどに採用されている。

ディスク媒体上には、約100 nmピッチで同心円状にデータトラックが形成されている。データトラックには、ヘッドを位置決めするための基準となるサーボ信号が離散的に形成されており、磁気ヘッドがサーボ信号を読み取り、位置決め誤差をトラックピッチの数パーセント程度まで最小化するようアクチュエータの駆動源であるVCM（ボイスコイルモータ）を制御する仕組みとなっている。アクチュエータアームの先端に配置された磁気ヘッドがそのデータトラック上に位置決めされ、データ信号をトラックに記録し再生する。磁気ヘッドはセラミックス製スライダ端部に配置され、ディスク媒体回転による空気流を利用して、ディスク上を約10 nmの空隙を維持して浮上している。

アクチュエータアームは、VCMとサスペンションアームを、ピボット（支点）軸を挟んで質量バランスを保つように配置した構造で、磁気ヘッドがアクセスするデータの位置に応じて約30度の角度で回転する。サスペンションアームの先端に位置する磁気ヘッドは、ピボットを軸に円弧の軌跡を描いて移動し、所望のトラックに位置決めされる。

2-1-2 データ記録・再生の仕組み

円盤状のディスク媒体は、アルミ合金やガラスからなる基板材の上に、厚さ10 nm程度の金属磁性薄膜からなる記録磁性層をコーティングしたものである。記録磁性層は、直径数nmの円柱状の微小磁性粒子の集合体であり、データに応じて記録磁気ヘッドから生成された記録磁界の極性に従って、磁性粒子の磁化方向を切り替えて情報を記録する。2005年以降、これまでの面内磁気記録方式に代わり、順次、垂直磁気記録方式が採用されるようになった。

記録ヘッド磁界 H_h は、垂直磁気記録方式の場合、単磁極型記録ヘッドからディスク媒体に向かって生成させた磁界のことである。記録ヘッドとディスクが相対的に移動すると、まずディスク記録層の磁化が記録磁極直下のヘッド磁界により飽和レベルまで磁化される。記録信号に合わせてヘッドの記録磁界が反転すると、記録磁極後端付近において、記録磁界が大

きくなりディスク記録層の保磁力 H_c と一致する点に磁化転移が形成される。

ディスク記録層の磁化を M ，そこに印加されるヘッド磁界を $H_h(x)$ ，記録層磁化 M による減磁界を $H_d(x)$ とすると，記録層の磁化転移の状況は以下の式で表される。

$$\frac{dM(x)}{dx} = \frac{dM}{dH} \times \frac{d}{dx} [H_h(x) + H_d(x)]$$

つまり，ディスク記録層の磁化変化（磁化転移）の急峻さ $dM(x)/dx$ は，記録層の磁化曲線の傾度 dM/dH と，記録層内の実効記録磁界の急峻さ $d/dx[H_h(x)+H_d(x)]$ によって決められる。磁化曲線の傾度と記録層内の実効記録磁界が急峻であるほど，記録された磁化転移が急峻となり磁化転移幅が狭くなる。この状態を高い分解能で記録された状態といい，高密度記録の基本的な考え方となる。図 2・1 に，垂直磁気記録方式の構成図を示す。

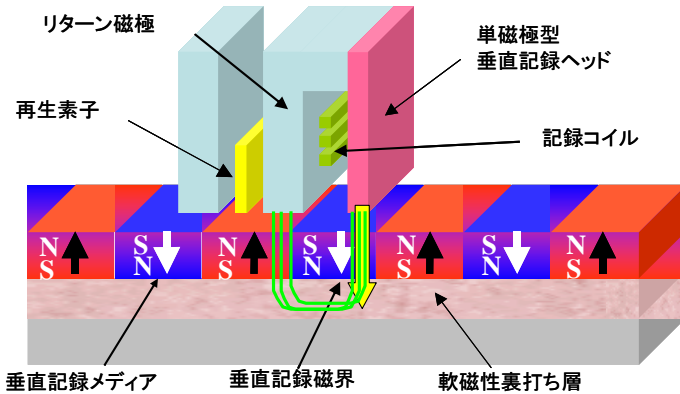


図 2・1 垂直磁気記録方式の構成図

記録されたデータの再生には，巨大磁気抵抗効果（GMR）ヘッドや，トンネル接合型磁気抵抗効果（TMR）ヘッドが用いられる。いずれも，ディスク記録層からの磁界に応じて，磁気抵抗が変化する効果を利用した再生ヘッドで，最近では高感度な TMR ヘッドが主に用いられている。

2-1-3 ホストインタフェース

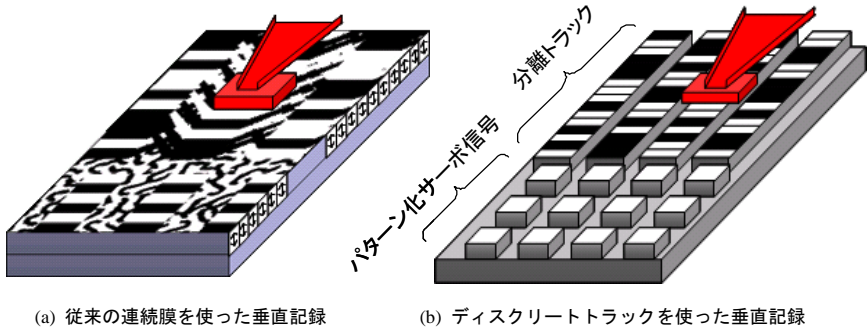
サーバ向けの毎分 10000 回転以上の高性能ハードディスクドライブには，高速転送レートをサポートする SAS（Serial Attached SCSI）インタフェースや FC（Fiber Channel）インタフェースが採用されている。一方，PC に搭載されるハードディスクドライブでは，SATA（Serial ATA）インタフェースが主流になっている。転送レートが高速である必要のない一部の PC や家電機器向けには，PATA（Parallel ATA）が継続して使われている。

2-1-4 将来技術

2005 年に垂直磁気記録方式が記録密度 133 Gbit/in^2 で実用化され，現在では垂直磁気記録方式の更なる高密度化研究により，実用化時期の 15 倍に相当する 2 Tbit/in^2 を超える記録密度まで高めることが期待されている。この高い目標を達成するために，今後の記録技術とし

ていくつかの新しい方式が開発されている。

ディスクリートトラック記録 (DTR) 技術は、ディスク媒体のデータトラックとデータトラックの間に溝を掘って信号が記録されない非磁性領域を形成し、トラック間を分離する技術である。通常、記録トラックの端部では記録磁界が弱くなるために、相対的に信号品質の劣る部分が形成される。トラックピッチを狭小化していくと、トラック端部の信号劣化部分が再生信号品質に影響を及ぼしたり、またトラック端部が隣接トラックと干渉を起こす原因になったりする。図 2・2 に示すように、トラック間に溝を形成して、トラック干渉を防ぎ記録密度を高めることができる。



(a) 従来の連続膜を使った垂直記録

(b) ディスクリートトラックを使った垂直記録

図 2・2 ディスクリートトラック記録 (DTR) の構成図

ディスク媒体の磁性粒子微細化にともなう熱揺らぎ現象を抑制するため、磁性粒子の磁気エネルギー (磁気異方性エネルギー) を高めると、記録ヘッド磁界が磁性粒子を反転させることが難しくなる。そこで、信号を記録する瞬間だけ外部から局所的にエネルギーを注入し、磁性粒子の磁化安定性を低め磁化反転を容易にする技術がエネルギーアシスト記録技術である。エネルギー注入方式としては、レーザー照射の熱エネルギーで大きな熱揺らぎを誘起させ磁化を反転させる熱アシスト記録方式や、強磁性共鳴周波数に近いマイクロ波周波数の磁界を印加して磁化反転磁界を低減させようとする、マイクロ波アシスト記録方式が研究されている。

■8群-2編-2章

2-2 磁気ヘッド技術

(執筆者：福田一正) [2008年10月受領]

50年で8桁向上というハードディスクドライブ(HDD)の驚異的な高密度化は磁気ディスク、磁気ヘッド、信号処理系、機構系、制御系その他、様々な技術の集大成として達成された。その中で、キーパーツの一つである磁気ヘッドが果たした役割も大きい。特に1990年代には異方性磁気抵抗効果型(AMR: Anisotropic Magnetoresistive)ヘッドの導入によって、面記録密度の年増加率がそれまでのおよそ30%から一気に60%に上昇した。そして更に、1990年代の後半から2000年代初めにかけては年率100%もの高密度化が達成されたが、これは1997年に開発され、その後継続的に特性改善が図られたスピントラップGMR(Giant Magnetoresistive)ヘッドによるところが大きい。本項では磁気ヘッド技術について概観する。

2-2-1 インダクティブヘッド

インダクティブヘッドは、軟磁性材料からなるコアと巻線によって構成され、コアの先端部、記録媒体対向面には非磁性材料で隔てられた狭いギャップ(記録ギャップ、再生ギャップ)が存在する。巻線に記録電流を流すとコアに磁束が誘起され、ギャップから漏洩する磁界により記録媒体にデータが記録される。一方、再生時には、記録媒体からの磁束がコアに流入し巻線と鎖交する。巻線の両端にはファラデーの電磁誘導の法則に従って磁束の時間変化に比例した電圧が誘起され、これが再生信号となる。図2・3にインダクティブヘッドの基本構造を示す¹⁾。

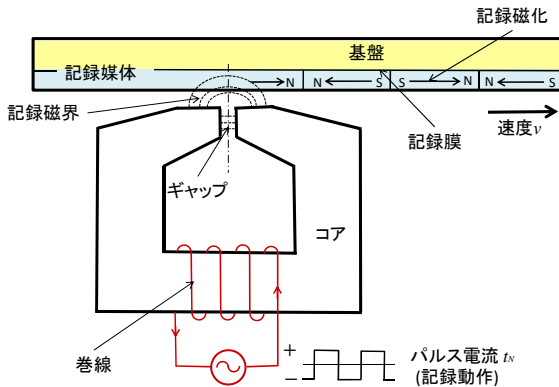


図2・3 インダクティブヘッドの基本構造

初期のハードディスクドライブでは静圧浮上ヘッドが用いられていたが、その後1961年に動圧浮上ヘッドへ移行し、フェライトコアヘッド、フェライトモノリシックヘッドを経て1979年には薄膜ヘッド²⁾の採用に至っている。

2-2-2 薄膜ヘッド

薄膜ヘッドでは、それまでバルクヘッドで行われていたコアや巻線の機械加工を半導体ブ

プロセスで置き換えた。図 2・4 に薄膜ヘッドの集積面からの金属顕微鏡像を示す。NiFe 系軟磁性合金薄膜のコア、渦巻状に形成された Cu 薄膜の巻線が観察される。



図 2・4 薄膜ヘッド

薄膜ヘッドは、(1)強く急峻な記録磁界の発生が可能、(2)コア体積・磁路長が小さくインダクタンスが小さい、(3)小型化、狭トラック化が容易、(4)ウェハ上に多数の素子を一括形成するため特性の均質化が図れるなど、バルクヘッドに対して多くの優位性を有する。

2-2-3 AMR ヘッド

異方性磁気抵抗効果³⁾を利用した AMR ヘッドは 1991 年に実用化された。それまでは同一のヘッドで記録・再生が行われていたが、AMR ヘッドでは記録はインダクティブヘッドで、再生は MR ヘッドでそれぞれ独立に行うため、MR-インダクティブ複合型ヘッドとも呼ばれる。図 2・5 に ABS (Air Bearing Surface) 面から見た場合の SEM 像を示す。

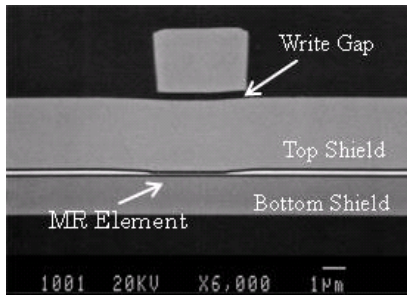


図 2・5 MR-インダクティブ複合型ヘッド

MR-インダクティブ複合型ヘッドは、(1)周速に依存しない高い再生出力が得られること、(2)再生ヘッドのインダクタンスが低いこと、(3)アンダーシュートのない再生波形が得られること、(4)記録ヘッドと再生ヘッドをそれぞれ独立に最適設計できることなどの特長をもつ。MR-インダクティブ複合型ヘッドの登場により、現在も続いている HDD の飛躍的な高記録密度化が始まったといえる。

2-2-4 GMR ヘッド

Fe と Cr の多層膜で 50 % 以上の巨大磁気抵抗 (GMR : Giant Magnetoresistance) 効果が見い出され⁴⁾、この物理現象を実用化したのが GMR ヘッドである。GMR 効果は非磁性層を介する上下の磁性層の磁化状態により伝導電子の散乱が異なるスピン散乱に由来しており、上下磁性層間の磁化の向きが平行のときは抵抗が低く、反平行のときは抵抗が高くなる現象である。GMR 効果の形態には、反強磁性的結合型、誘導フェリ結合型、スピンバルブ型⁵⁾などがあり、スピンバルブ型が実用化された。

図 2・6 に示すように、スピンバルブ GMR ヘッドは、自由層 (フリー層 : Free Layer) / Cu

非磁性層／固定層（ピンド層：Pinned Layer）／反強磁性層により構成される．固定層の磁化は PtMn, IrMn などの反強磁性層との交換相互作用により固定される．自由層の平均磁化は，外部磁界がない場合は固定層と 90 度の方向を向くように磁気異方性を付与する．これに正負の外部磁界が媒体表面から印加されると，磁化が平行な状態から反平行な状態まで変化することを利用して再生信号を誘起する．

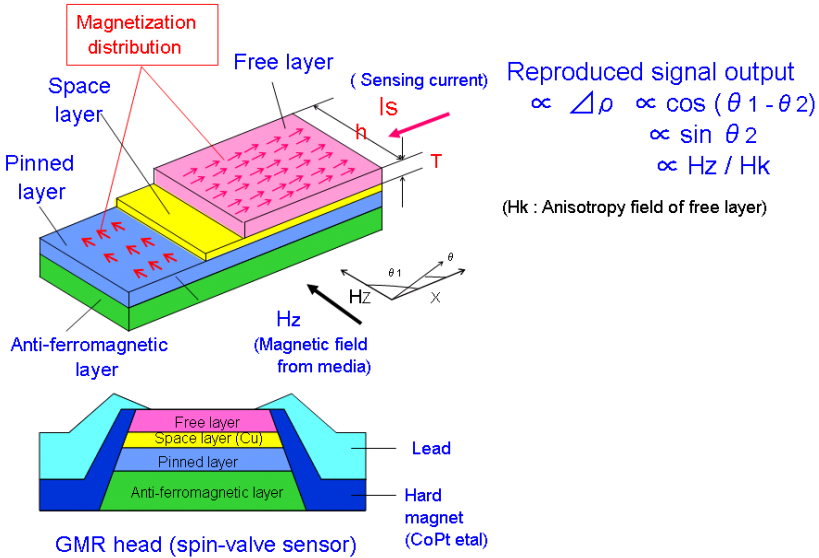


図 2・6 スピンバルブ GMR ヘッドの基本構造

スピンバルブ GMR ヘッドは AMR ヘッドに比べ、(1)数 Oe 程度の低印加磁界でも 4~20 % の高い MR 比が得られる、(2)非磁性層が比較的厚いため層間の磁氣的結合やヒステリシスが小さく、線形性の高い MR 曲線が得られるなどの特長をもち、数 G~130 Gb/in² クラスの記録密度の領域で採用された。

2-2-5 TMR ヘッド

TMR ヘッドは薄い絶縁層（トンネルバリア）を挟んで二層の磁性膜を配置し、それぞれの磁性膜の磁化のなす角度に依存して前記絶縁層を通過するトンネル電流値が変化することを利用している^{6),7)}。GMR ヘッドと同様に二つの磁性膜のうち一方は媒体からの漏洩磁界によってその磁化の方向が変化するフリー層であり、他方は磁化が反強磁性膜で固定されたピンド層である。図 2・7 は 200 Gb/in² 超級 TMR ヘッド素子を媒体対抗面側から見た TEM（透過型電子顕微鏡）像である。従来のスピンバルブ GMR ヘッドが素子の膜面内方向（トラック幅方向）にセンス電流を流す CIP（Current-In-Plane）構造であるのに対して、TMR ヘッドでは素子膜面に垂直にセンス電流を流す CPP（Current-Perpendicular-to-Plane）構造となっている。

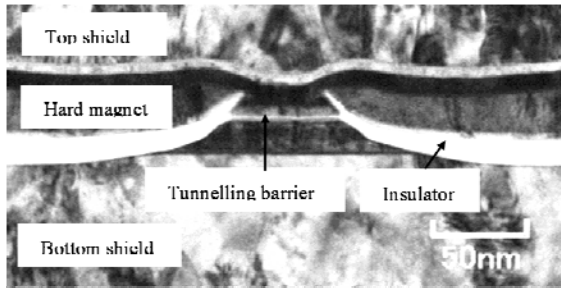


図 2・7 200 Gb/in² 超級 TMR ヘッド

TMR ヘッドはスピナルブ GMR ヘッドに対して、(1)再生出力が大きい、(2)再生分解能が高い (再生パルス半値幅が狭い)、(3)トラックプロファイルが急峻であるといった優位性をもつ。スピナルブ GMR ヘッドでは必要な再生出力を確保することが大きな課題となるが、TMR ヘッドではスピナルブ GMR ヘッドの 5 倍以上の出力を得ることも可能である。TMR ヘッドは抵抗が高く、またショットノイズも存在するが、大きな再生出力と高い再生分解能によってそれを補い、結果的に高い SN 比 (Signal-to-Noise Ratio) を確保することができる⁸⁾。

最近では、アモルファス AlOx, TiOx などに替えてバリアに結晶性 MgO を用いた第 2 世代の TMR ヘッドが次世代の高密度再生素子として盛んに研究が行われ⁹⁾、実用化にいたっている。また将来に向けて、RA (Resistance Area Product) = 0.4 Ωμm, MR 比 = 56 % とアモルファス系バリアを圧倒する低抵抗、高変化率も得られている^{10), 11)}。

2-2-6 CPP-GMR ヘッド

TMR ヘッドは将来の高密度化に対して高いポテンシャルを秘めているが、更に高密度化が進んで再生トラック幅が減少した場合には、その抵抗増加が問題となることが予想される。そこで、将来の高密度再生ヘッドの有力候補の一つとして、CPP 構造でトンネルジャンクションの代わりにスピナルブ GMR を用いた CPP-GMR ヘッドの開発が進められている。

CPP-GMR ヘッドの利点は、低抵抗素子を実現できるため高周波応答性に優れていること、及び低ノイズであることがあげられる。しかしながら、TMR ヘッドに比べて MR 比及び RA が低いという課題がある。そこで、この課題をブレイクスルーするために、CPP-GMR 膜中に極薄酸化物層 (NOL : Nano-Oxide-Layer) を挿入したタイプの研究が行われ、スピナルブ膜中に AlCu の NOL を挿入し、電流狭窄効果を用いた CPP-GMR 膜で MR 比 = 8.2 %, RA = 0.57 Ωμm² が¹²⁾、また、磁壁による磁気抵抗を利用した狭窄型磁壁 MR 膜の研究もなされており、FeCo ナノコンタクトを有する Al-NOL を挿入したスピナルブ膜で、MR 比 = 7~10 %, RA = 0.5~1.5 Ωμm² が得られている¹³⁾。一方、オールメタルタイプについて磁性層に比抵抗の大きな材料を用いる手法 とスピン分極率の大きいホイスラー合金を用いる研究がなされており、ホイスラー金属を固定層に用いた構造で MR 比 = 9 %, RA = 0.05 μm² の膜特性が得られている¹⁴⁾。ホイスラー合金をヘッドに実用化するためには更なる低磁歪化ならびに結晶化温度の低温化を図っていくことが必要であるが、今後の発展が期待される。

2-2-7 垂直磁気記録ヘッド

2005年6月、当時世界最高の面記録密度 133 Gb/in^2 をもち、世界で初めて垂直磁気記録方式を採用した HDD を組み込んだ携帯型音楽プレーヤが発売された¹⁵⁾。以後、垂直磁気記録方式による大容量 HDD の製品化が各社で行われ、現在では、 300 Gb/in^2 を超える面記録密度をもつ垂直磁気記録方式の HDD の量産が始まっている。

面内磁気記録において記録密度を高めるために、記録層の保磁力 (H_c) を高く、膜厚 (t) と残留磁化 (M_r) の積 $M_r \cdot t$ を小さくするとともに結晶粒径の微細化を進めてきた。しかし、熱揺らぎ耐性の維持と記録可能な H_c の両立が面記録密度 120 Gb/in^2 を越えてきて、いよいよ困難になってきた。

これをブレイクスルーする技術である垂直磁気記録方式は、1977年に当時の東北大学電気通信研究所の岩崎俊一教授によって提案され¹⁶⁾、高密度記録に対する原理上の優位性、革新性から、長年にわたって各分野で粘り強い研究開発が進められてきた日本で生み出された技術である。1979年までに、単磁極垂直記録ヘッド¹⁶⁾、Co-Cr系垂直異方性媒体¹⁷⁾、軟磁性裏打ち層 (SUL : Soft Under Layer) をもつ2層膜垂直記録媒体構造¹⁸⁾が発明された。また、その後、自己減磁や低記録密度での熱減磁、浮遊磁界によるデータ消失、ヘッド磁区的不安定性によるデータ消去、磁化遷移やSUL磁壁による媒体ノイズ、記録再生スペーシング損失など、垂直磁気記録を実用化するうえでの課題も明らかになり、その解決へ向けた研究が進められた。

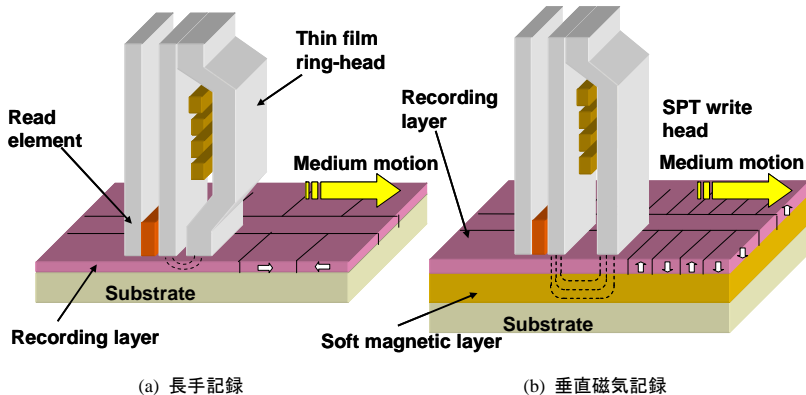


図2・8 記録方式の比較

図2・8は、垂直磁気記録 (PMR : Perpendicular Magnetic Recording) の動作原理を従来の面内磁気記録 (LMR : Longitudinal Magnetic Recording) と比較して示したものである。垂直磁気記録では単磁極と媒体SULとの相互作用により、強く急峻な垂直磁界を発生させ、媒体記録層を垂直方向に磁化する。記録磁化を記録媒体面に垂直な方向に配列させて記録することから、隣り合うビット間には吸引力が働き、熱揺らぎ耐性、高出力、高記録分解能の点で優れる。原理的に、記録層の磁化転移近傍では、従来の面内磁気記録とは反対に、記録分解能を劣化させる減磁界が最小となるため、高記録分解能の達成が可能となる。面内磁気記録ヘッドでは記録ギャップの媒体流出端付近で最終的な磁化状態が決定されるのに対し、垂直

記録ヘッドでは主磁極の媒体流出端で最終的な磁化状態が決定される。また、垂直記録データの再生においては、再生素子の光学幅を面内磁気記録のときほど狭くしなくても同じ再生実効幅が得られる。

垂直磁気記録は、(1)微細な単磁極の形成、(2)ドライブでのスキュー動作におけるサイドライティングの回避、(3)外部の浮遊磁界に対する安定動作、(4)同一トラック上での繰返し書込み動作において、そのトラックを中心とした数ミクロン幅にわたるデータ消失 (WATE : Wide Area Track Erasure) の抑制、(5)記録磁極先端残留磁化と媒体の SUL に起因する、ライト直後の記録データ消去動作 (ポールイレージャー) の抑圧¹⁹⁾⁻²⁴⁾などの特有の課題を解決することによって実用化に至っている。

HDD は、垂直磁気記録方式、垂直磁気記録ヘッドの導入により、再び新たな飛躍へ向けての第一歩を踏み出した。キーマツである磁気ヘッドは、磁気スペーシング制御技術、新しい構成の媒体技術、エネルギーアシスト記録技術などとともに、今後も高密度化、高性能化を強力に推し進めることが期待される。

■参考文献

- 1) I. Sato, *Material Integration*, vol.16, no.10, p.7, 2003.
- 2) R. E. Jones, Jr., *IBM Disk Storage Tech.*, GA26-1665-0, p.6, 1980.
- 3) T. McGuire and R. Potter, *IEEE Trans. Magn.*, vol.11, 1018, 1975.
- 4) M. Baibich, J. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff, *Phys. Rev. Lett.*, vol.61, 2472, 1988.
- 5) B. Dieny, V. Spelious, S. Metin, S. Parkin, P. Baumgart, and D. Wilhoit, *J. Appl. Phys.*, vol.69, 4774, 1991.
- 6) M. Julliere, *Phys. Lett.*, vol.54A, 225, 1975.
- 7) T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mat.*, vol.139, L231, 1995.
- 8) T. Kuwashima, K. Fukuda, H. Kiyono, K. Sato, T. Kagami, S. Saruki, T. Uesugi, N. Kasahara, N. Ohta, K. Nagai, N. Hachisuka, N. Takahashi, M. Naoe, S. Miura, K. Barada, T. Kanaya, K. Inage, and A. Kobayashi, *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, 176, 2004.
- 9) T. Kagami, T. Kuwashima, S. Miura, T. Uesugi, K. Barada, N. Ohta, N. Kasahara, K. Sato, T. Kanaya, H. Kiyono, N. Hachisuka, S. Saruki, K. Inage, N. Takahashi, and K. Terunuma, *IEEE Trans. Magn.*, vol.42, 93, 2006.
- 10) W. H. Butler, X. G. Zhang, and T. C. Schulthess, *Phys. Rev. B*, vol.63, 054416, 2001.
- 11) Y. Nagamine, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Jayaprawira, and N. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, vol.89, 162507, 2006.
- 12) H. Fukazawa, H. Yuasa, S. Hashimoto, J. Ito, K. Koi, M. Takagishi, and H. Iwasaki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol.29, 869, 2005.
- 13) H. Fuke, S. Hashimoto, M. Takagishi, H. Iwasaki, S. Kawasaki, K. Miyake, and M. Sashiki, *IEEE Trans. Magn.*, vol.43, 2848, 2007.
- 14) K. Nikolaev, P. Anderson, P. Kolbo, D. Dimitrov, S. Xue, X. Peng, T. Pkhill, H. Cho, and Y. Chen, *J. Appl. Phys.*, vol.103, 07F533, 2008.
- 15) Y. Tanaka, *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, 2834, 2005.
- 16) S. Iwasaki and Y. Nakamura, *IEEE Trans. Magn.*, vol.13, 1272, 1977.
- 17) S. Iwasaki and K. Ouchi, *IEEE Trans. Magn.*, vol.14, 849, 1978.
- 18) S. Iwasaki, Y. Nakamura, and K. Ouchi, *IEEE Trans. Magn.*, vol.15, 1456, 1979.
- 19) W. Cain, A. Payne, M. Baldwinson, and R. Hempstead, *IEEE Trans. Magn.*, vol.32, 97, 1996
- 20) K. Nakamoto, T. Okada, K. Watanabe, H. Hoshiya, N. Yoshida, and Y. Kawato, M. Hatatani, K. Meguro, Y. Okada, H. Kimura, M. Mochizuki, K. Kusukawa, C. Ishikawa, and M. Fuyama, *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, 290, 2004.
- 21) K. Nakamoto, Y. Kawato, N. Yoshida, Y. Okada, M. Hatatani, M. Mochizuki, K. Watanabe, and M. Fuyama, J.

Magn. Soc. Jpn., 27, 124, 2003.

- 22) Y. Okada, H. Hoshiya, T. Okada, and M. Fuyama, IEEE Trans. Magn., 40, 2368, 2004.
- 23) K. Hirata, T. Roppongi, and K. Noguchi, J. Magn. Magn. Mat., 287, 352, 2005.
- 24) K. Hirata, A. Yamaguchi, M. Ohtsuki, T. Roppongi, and K. Noguchi, IEEE Trans. Magn., 41, 2902, 2005.

■8 群-2 編-2 章

2-3 磁気記録媒体技術

(執筆著：棚橋 究) [2009年12月 受領]

2-3-1 面内記録媒体から垂直記録媒体へ

HDD に用いられる磁気記録媒体は、記録磁化の配置の仕方により“面内記録媒体”と“垂直記録媒体”に大別される。面内記録媒体では、記録層の磁化容易軸を膜面内に向け、記録磁化を膜面内に配置させる。面内記録媒体の記録層には六方最密 (hcp) 構造の CoCrPt 合金薄膜が用いられる。CoCrPt 合金薄膜は c 軸を磁化容易軸とする一軸磁気異方性を有するため、c 軸を膜面内に配向させることで高い面内保磁力が得られる。面内記録媒体の作製には、図 2・9(a) に示すように体心立方 (bcc) 構造の Cr もしくは Cr 合金薄膜を下地層として形成し、その上に hcp 構造の Co 合金薄膜をエビタキシャル成長させる手法が用いられる。面内記録媒体では、記録磁化を膜面内に配置するため、隣接する磁極が互いに反発する性質を有する。この反発の抑制には、記録層の薄膜化と残留磁化の低減による反磁界低減が有効であり、更に保磁力を高め磁化遷移幅の広がりを抑えることにより、記録密度の向上を実現してきた。しかし、同時に媒体ノイズの低減を図るべく、粒子微細化と粒間交換相互作用の低減を進めた結果、記録磁化が周囲の熱により不安定になるという、いわゆる熱減磁の問題が顕在化し始めた^{1), 2)}。元来、記録磁化が安定に存在できるのは、記録磁化を構成する磁性粒子の磁気エネルギーが周囲の熱エネルギーに対して十分大きいからであるが、記録層の薄膜化と粒子微細化により磁性粒子の体積が小さくなると、磁性粒子の磁気エネルギーが熱エネルギーに比べ十分な大きさを確保できず、室温においても磁化は不安定になる。こうした熱減磁問題に対する対策として、基板周方向に磁気異方性を付与した媒体や反強磁性結合媒体など^{3), 4)}、革新的な技術を導入することで、面内記録媒体の延命を図り、製品レベルにおいて 100 Gb/in² の面記録密度を達成した。

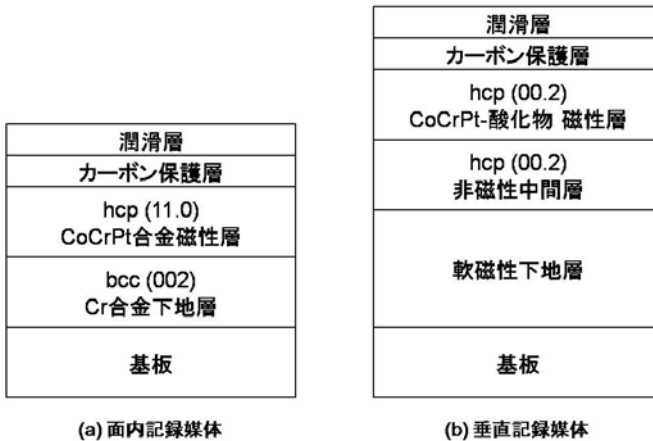


図 2・9 磁気記録媒体の基本層構成

一方、垂直記録媒体では、記録層の磁化容易軸を膜面垂直に向け、記録磁化を膜垂直に配置させる。垂直記録媒体の記録層には、面内記録媒体と同様の hcp 構造の CoCrPt 合金を主成分として、粒界偏析物に SiO₂ などの酸化物を付与したグラニューラ薄膜が用いられる。垂直記録媒体では、記録ヘッドを補助する軟磁性下地層 (SUL) が記録層の下に配置され、更に記録層と SUL の間には、両層間に働く交換結合を遮断し、かつ記録層の微細構造を制御する目的で非磁性の中間層が挿入される (図 2・9 (b))。垂直記録媒体では、記録磁化を膜面垂直に配置するため隣接する磁極は吸引し合い、本質的に記録磁化を高密度に配置することが可能である。また、面内記録媒体に比べ記録層の膜厚を厚くでき、更に SUL の存在により記録磁界が向上し、より高い保磁力を有する記録層が使えることも記録磁化の安定性に寄与する。

以上のように、垂直記録媒体は従来の面内記録媒体に比べ本質的に高密度化に適しており、事実、2005～2006 年の出荷された面記録密度が 130 Gb/in² の HDD 製品を境に面内記録媒体から垂直記録媒体への切り替えが行われた。本節では、現行の大多数の HDD 製品に用いられている垂直記録媒体に焦点を絞り、その基本構成と役割を概説するとともに、面記録密度向上における技術課題と、課題解決に向けた取組みを述べる。

2-3-2 垂直記録層

現行の垂直記録媒体の記録層には、CoCrPt-酸化物グラニューラ層と CoCrPt(B)キャップ層を積層した二層膜 (キャップ媒体) が広く使われている。CoCrPt-酸化物グラニューラ層は酸化物が粒界に析出し、磁性粒子が磁氣的に孤立化した構造を有し、CoCrPt(B)キャップ層は粒間交換相互作用を適度に残した連続膜構造を有する。こうしたキャップ媒体では、グラニューラ層の粒子孤立性が低ノイズ化に寄与しており、キャップ層を介してグラニューラ層に付与される適度な粒間交互作用により媒体の書き込み容易性を確保している⁵⁾。

CoCrPt-酸化物グラニューラ層は、その偏析構造が非加熱/反応性スパッタ製膜により実現される点において、面内記録媒体に用いられた Cr 偏析型 CoCrPt(B)合金薄膜と異なる。酸化物材料には Co と比較して酸化物生成能が高い Cr, Si, Ti, Ta などの酸化物が単独もしくは混合して用いられる。こうした系では、CoCrPt 合金の Cr 濃度を比較的低くしても粒子の磁氣的孤立性が保たれるため、磁気異方性エネルギー (K_u) を $4\sim 5\times 10^6$ erg/cc 程度に高めることが可能であり、面内記録媒体に比べ低ノイズ性と熱安定の両立を高いレベルで実現できる。また、粒径分布にも特徴があり、面内記録媒体では粒径が大きな方に裾を引いた対数正規分布を示すのが一般的であったが、垂直記録媒体の粒径は概略正規分布を示す場合が多く、適切な中間層を選ぶことにより、粒径分散を 20%以下とすることは比較的容易である。これは垂直記録媒体では非加熱製膜プロセスゆえスパッタ粒子の表面移動度が低く、更に粒界に偏析する酸化物の表面エネルギーが粒子コア部の CoCrPt 合金に比べ低いいため、隣接粒子の合体による肥大化が抑制された結果と考えられる。大きな粒子の存在は、媒体の低ノイズ化/高分解能化のボトルネックとなり得ることから、こうした CoCrPt-酸化物グラニューラ層の粒径分布の特徴は本質的に望ましい。

媒体の性能向上には、粒径を微細・均一化するだけでは十分とはいえず、粒子間の交換相互作用を低減することで、磁化反転サイズ (磁気クラスタ) を小さくし、そのうえで反転磁界分散を小さくする必要がある。そのためには、CoCrPt-酸化物グラニューラ層の粒径分散、結晶配向性分散、及び個々の粒子の異方性磁界 (H_k) 分散を下げるのが肝要である。現行の

面記録密度が 400 Gb/in² クラスの媒体では、平均粒径は 9~10 nm、粒径分散は 17~20 %、c 軸配向性分散 ($\Delta\theta_{50}$) は 3.0~3.5° が実現されている。H_k 分散に関しては、実験的に評価する手段が十分に確立されていないため不明であるが、熱揺らぎの影響を極力抑えたパルス磁界による評価⁶⁾では、レマネンス保磁力 (H_r) の分散は約 14 % と見積もられている。

CoCrPt-酸化物グラニューラ層上に形成される CoCrPt(B)キャップ層は、反転磁界分散を小さくし、媒体の書込み容易性を確保するとともに、遷移性ノイズを抑えつつ逆磁区起因の DC ノイズを低減する役割がある。キャップ層の粒間交換相互作用はグラニューラ層のそれに比べて強く、キャップ層とグラニューラ層との界面には層間の交換相互作用が働いているため、グラニューラ層にはキャップ層を介して適度な粒間交換相互作用が付与される。この粒間交換相互作用の大小は、キャップ層の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t_{cap}) の積 (M_s * t_{cap}) で制御できる。キャップ層を用いない媒体においても、粒界偏析の程度で粒間交換相互作用の平均的な大きさを制御することは可能であるが、偏析状態の不均一さに起因する粒間交換相互作用のバラつきは避けられない。キャップ媒体では、磁氣的及び構造的に異なるグラニューラ層とキャップ層の役割を明確に分け、グラニューラ層自体の粒間交換相互作用は可能な限り低減し、キャップ層を介して、より均一な交換相互作用を付与しており⁷⁾、粒間交換相互作用のバラつきを抑制できる点で優れているといえる。

2-3-3 非磁性中間層

非磁性中間層に求められる特性には、(1)SUL と記録層間の交換結合遮断、(2)記録層の微細構造制御、(3)薄膜化による高記録分解能化、の3点があげられる。この中で、記録層の微細構造制御とは、具体的には記録層の c 軸配向分散の低減、酸化物粒界の形成促進、及び粒径微細・均一化を意味し、非磁性中間層を開発するうえで最も重要な部分である。現行の垂直記録媒体で用いられる中間層は、主として fcc 構造の Ni 合金層と hcp 構造の Ru 層の積層膜が用いられ、結晶配向としては Ni 合金層の (111) 面の上に Ru 層の (0002) 面がヘテロエピタキシャル成長している。

Ni 合金層は、Ru 層の結晶配向性を制御するだけでなく、Ru 層の粒子サイズも決定する、いわゆるシード層としての役割を有する。Ru 層は、記録層の c 軸配向性を高めるとともに、その表面に適度なラフネスを形成することで、記録層の酸化物粒界の形成を促進する役割を有する。これら二つの役割を同時に満たすため、Ru 層はまず低ガス圧で形成して c 軸配向性を高め、その上に高ガス圧で形成して粒径を微細化し、かつ膜表面に適度なラフネスを付与する二段階プロセスが用いられる⁸⁾。量産プロセスにおいては、スループットを高めるために、低ガス圧 Ru 層と高ガス圧 Ru 層のスパッタチャンバを分けて形成することが一般的である。記録層の CoCrPt 合金との格子整合性のみに着目すると、Ru よりミスフィットが小さな系は存在するが、現行の垂直記録媒体の中間層の記録層と接する層には必ず Ru (もしくは Ru 合金) が用いられている。これは、記録層の Ar/O₂ 雰囲気反応性のスパッタプロセスにおいては、十分な酸化耐性をもつことや、CoCrPt の二次元成長を促す高い表面エネルギーを有することが、中間層に求められる特性としてより重要であること示唆している。

中間層の薄膜化は、記録ヘッドの狭トラック化にともなうヘッド磁界低減を補償するうえで重要な課題である。概して中間層の薄膜化により記録層の c 軸配向性は低下し、酸化物粒界は不完全になり、その結果、記録再生特性は劣化する。酸化物粒界の不完全さは、Ru 表面

のラフネス低下に起因しており、これに対しては中間層の最上層に Ru-SiO₂などを形成することで、酸化物粒界の形成を促す方法が提案されている⁹⁾。

2-3-4 軟磁性下地層 (SUL)

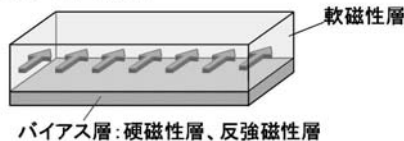
垂直記録方式における SUL は、磁気回路のうえでは記録ヘッドの一部である。したがって、SUL の機能は、主として記録ヘッドからの磁界強度（及び磁界勾配）を高めることである。この機能を高めるため、SUL には飽和磁束密度 (B_s) が高く保磁力 (H_c) が低い、いわゆる透磁率の高い材料が用いられる。記録磁界強度が高まると、より高い H_c 及び H_k を有する記録層への記録が可能となり、結果として磁化反転サイズが小さく高密度記録に適した垂直記録媒体が実現できる。

垂直記録媒体は、SUL よりもたらされる利点を活用している反面、SUL を有するがゆえの課題がある。垂直記録方式 HDD の開発当初、外部磁界に対する弱さは深刻な問題であった¹⁰⁾⁻¹²⁾。これは、外部からの磁界が SUL を通して単磁極型記録ヘッドに集中し、データが消失する現象であり、基本的には SUL が高い μ を有することに起因する。ただし、外部磁界耐性はヘッド構造にも大きく依存する問題であり、実際、ヘッド構造の変更（シールド形状など）により大きな改善が得られている¹³⁾。

SUL の磁壁から発生する漏洩磁束は、スパイク状のノイズとして観測され、再生信号品質を著しく劣化させる¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。SUL 起因のノイズは、スパイクノイズのように局在化したものだけとは限らない。例えば、SUL の磁化状態に揺らぎがある場合には、ディスク全面にわたりノイズが発生し、記録層からのノイズに重畳する形で、記録トラック全体で平均化される積算ノイズとして観測される¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。記録動作の繰り返しにより、隣接トラック方向に数 μm にわたって広い範囲でデータが消失する問題 (Wide-area ATE: Adjacent Track Erasure)^{18), 19)} は、一般的にはヘッド構造が主要因と考えられているが、SUL 起因 (磁壁からの漏洩磁束) で発生する Wide-area ATE も指摘されている。

このように SUL は記録ヘッドからの磁束を記録層に効率的に通すために要求される“磁化が動きやすい”という特性と、ノイズを抑制するために要求される“磁化の揺らぎが小さく、外乱に対して安定である”という一見相反する二つの特性を併せもつ必要がある。

■ 交換バイアス方式



■ 積層化方式

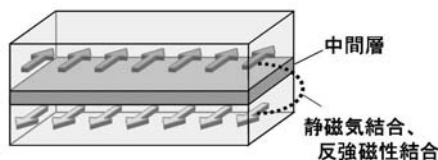


図 2・10 スパイクノイズ抑制手法

上記課題に対処すべく開発された SUL は、**図 2・10** に示すように“交換バイアス方式”と“反平行結合方式”に大別される。交換バイアス方式では、SUL の磁化を硬磁性層あるいは反強磁性層と交換結合させて一定方向に揃える（ピン止め）²⁰⁾⁻²⁴⁾。一方、反平行結合方式では、膜厚が 1nm 以下の薄い Ru 層を介して二つ軟磁性層を積層し、Ru 層を介した交換結合を利用して積極的に磁化を反平行に結合させる（APC-SUL : Antiparallel-coupled SUL）²⁵⁾⁻²⁷⁾。

図 2・11 に反強磁性 MnIr 合金層を用いた SUL の磁化をピン止めた媒体の構成例を示す。MnIr 層の下に形成した fcc 構造の NiFe 層は MnIr 層の結晶構造を制御する役割をもち、MnIr 層の上に形成した CoFe 層は CoTaZr SUL に付与される交換バイアス磁界を高める役割をもつ。この構成でディスク径方向に磁界を印加した状態で冷却することにより、磁界方向に一方方向異方性が付与され、**図 2・12** に示すようにディスク径方向の磁化曲線がシフトする。すなわち、残留磁化状態では SUL の磁化はディスク径方向に揃う。この結果、ディスク全面にわたりスパイクノイズの発生を抑制することが可能である。



図 2・11 SUL の磁化をピン止めた媒体の構成例

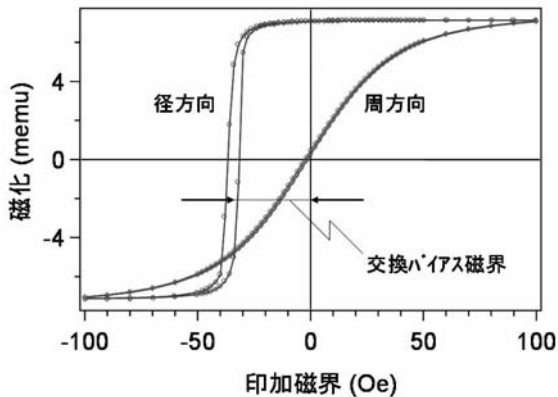


図 2・12 ピン止めた SUL の磁化曲線

図 2・13 に CoTaZr/Ru/CoTaZr 積層膜の磁化曲線を、図 2・14 に Kerr 効果を用いた上層の磁区観察像をそれぞれ示す。残留磁化状態では、上下の CoTaZr 層の磁化が反平行に結合しているため、ディスク径方向及び周方向の磁化の値はゼロになる。上層の磁区観察像には、島状の磁区など、特異な多磁区構造が認められるが、各磁区内において上下層の磁化が反平行に結合しているため、明瞭なスパイクノイズは観察されない。また、APC-SUL は透磁率が適正化できるため隣接消去問題においても効果的である。

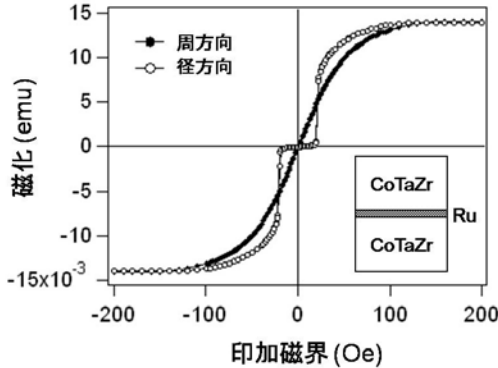


図 2・13 APC-SUL の磁化曲線



図 2・14 APC-SUL の磁区観察像

以上述べたように、垂直 HDD の開発当初に顕在化した SUL 起因の主要課題（スパイクノイズ、外部磁界耐性、隣接消去など）は、“交換バイアス方式”と“反平行結合方式”の導入により概ね解決されたといえる。このうち APC-SUL は、膜構成が単純で磁界中冷却が不要など、量産プロセスに適しており、現行の垂直記録媒体に幅広く採用されている。

2-3-5 媒体の今後の展望

垂直記録媒体の特性改善手段としては、(1)粒径微細・均一化と粒界偏析構造の改善、(2)

ヘッド-SUL スペーシングの狭小化, (3)新構造記録層の導入があげられる。

高密度化にともない、ビットサイズが微小化する中で十分な媒体 SNR を確保するためには、磁性粒子を微細化し、1 ビットに含まれる粒子数を減らさないことが望ましい。この考えは、それぞれの粒子が磁氣的に孤立、すなわち独立に振る舞うことを前提としているため、 K_u 一定の条件で粒径微細化を進めると、必然的に熱揺らぎの影響が顕在化し始める。高 K_u の材料に変えることで熱安定性は高まるが、一方、書込み特性が劣化するので、粒径をできる限り均一にし、熱揺らぎの影響を受けやすい過度に微細な粒子の頻度を低くすることが肝要である。また、粒径微細化には粒界偏析構造の劣化をともなう場合が多く、粒間相互作用の増大を招き、期待された媒体 SNR の改善は得られない。このように粒径微細化は、粒径均一化及び粒界偏析構造の改善がともなって初めて、その効果が期待できる。

ヘッド-SUL スペーシングの狭小化は、記録ヘッドの狭トラック化にともなうヘッド磁界低減を媒体側から補ううえで重要である。ヘッド-SUL スペーシングは、中間層、記録層、及び保護層の各膜厚と浮上量の総和であり、各々の値をバランス良く低減することが望ましい。中間層には前述したように多くの役割があるため大幅な膜厚低減は難しいが、例えば中間層の一部を軟磁性材料に置き換えることで、実効的に中間層の膜厚を低減する方法が提案されている²⁸⁾。記録層に関しては、膜厚低減により書込特性及び分解能の向上が得られるが、熱安定性は低下する方向であり、トレードオフの関係にある。保護層は、耐食性、スクラッチ耐性など、媒体信頼性に関係する重要な要素である。保護層の材料・プロセスの改善に加え、磁性層表面の粗さを小さくすることが、保護層の膜厚低減、ひいては浮上量の低減につながる。

現行のキャップ媒体におけるトリレンマ（媒体 SNR、熱安定性、書込み容易性）を克服するために、Exchange Coupled Composite (ECC) 媒体、Exchange Spring 媒体など、新しい記録層構造を有する垂直媒体が提案されている^{29), 30)}。いずれも、基本コンセプトは、記録密度の向上は粒子微細化により実現するという従来のスケーリングを前提とし、熱安定性は記録層の一部に非常に高い K_u 材料（ハード層）を用いることで維持する。懸案の書込み容易性に関しては、磁氣的なソフト層を付与することで非一斉磁化反転を導入し、反転磁界の増加を抑制することで解決する。モデル計算では、ハード層とソフト層の H_k の比 (H_{k_hard}/H_{k_soft}) は可能な限り大きくし、ハード層とソフト層の飽和磁化 (M_s) の比 (M_{s_hard}/M_{s_soft}) は可能な限り小さくすることが理想とされた。しかし、従来の材料系の延長では、ハード層及びソフト層の粒間相互作用を十分低減した状態で上記要求を満足することが困難なこともあり、当初期待されたような大幅な特性改善は得られていない。

粒径微細化に大きな進展が見られない現状では、ハード層とソフト層の K_u 比は比較的小さな条件で、両層間に薄い磁気結合制御層を挿入する方法が精力的に検討され、一定の特性改善は確認されている³¹⁾。今後、こうした新構造媒体で 1 Tb/in² レベルの面記録密度を実現するためには、粒径微細化にともなう粒間相互作用の増大を抑制する材料・プロセス技術の確立が急務である。

■参考文献

- 1) S. H. Charap, P. L. Lu, and Y. He, "Thermal stability of recorded information at high densities," IEEE Trans. Magn., vol.33, pp.978, 1997.

- 2) Y. Hosoe, I. Tamai, K. Tanahashi, Y. Takahashi, T. Yamamoto, T. Kanbe, and Y. Yajima, "Experimental study of thermal decay in high density magnetic recording media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.33, pp.3028, 1997.
- 3) E. N. Abarra, A. Inomata, H. Sato, I. Okamoto, and Y. Mizoshita, "Longitudinal magnetic recording media with thermal stabilizing layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, pp.2581, 2000.
- 4) E. E. Fullerton, D. T. Margulies, M. E. Schabes, M. Carey, B. Gurney, A. Moser, M. Best, G. Zeltzer, K. Rubin, H. Rosen, and M. A. Doerner, "Antiferro-magnetically coupled magnetic media layers for thermally stable high density recording," *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, pp.3806, 2000.
- 5) G. Choe, M. Zheng, B. R. Acharya, E. N. Abarra, and J. N. Zhou, "Perpendicular recording CoPtCrO composite media with performance enhancement capping layer," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, pp.3172-3174, 2005.
- 6) T. Shimatsu, T. Kondo, K. Mitsuzuka, S. Watanabe, H. Aoi, H. Muraoka, and Y. Nakamura, "Switching field distribution of CoCrPt-SiO₂ perpendicular media obtained by subtracting thermal agitation of magnetization," *IEEE Trans. Magn.*, vol.42, pp.2384-2386, 2006.
- 7) H. Nemoto, I. Takekuma, H. Nakagawa, T. Ichihara, R. Araki, and Y. Hosoe, "Designing magnetic of capped perpendicular media with minor loop analysis," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol.320, pp.3144-3150, 2002.
- 8) R. Mukai, T. Uzumaki, and A. Tanaka, "Microstructure improvement of thin Ru underlayer for CoCrPt-SiO₂ granular perpendicular media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, pp.3169-3171, 2005.
- 9) I. Takekuma, R. Araki, M. Igarashi, H. Nemoto, I. Tamai, Y. Hirayama, and Y. Hosoe, "Reduction in intermediate layer thickness of CoCrPt-SiO₂ perpendicular recording media by using Ru-SiO₂," *J. Appl. Phys.*, vol.99, pp.08E713, 2006.
- 10) V. W. Hesterman and H. S. Gill, "Stray field sensitivity of a pole head on a dual layer perpendicular disk," *IEEE Trans. Magn.*, vol.25, pp.3680-3682, 1989.
- 11) W. Cain, A. Payne, G. Qiu, D. Latev, D. Imai, R. Hempstead, M. McNeil, and C. Phenicie, "Challenges in the practical implementation of perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.32, pp.97-102, 1996.
- 12) M. Oshiki, *J. Magn. Soc. Jpn.* 21, S1, pp.91, 1997.
- 13) T. Hamaguchi, M. Mochizuki, T. Matsui, and R. Wood, "Perpendicular magnetic recording integration and robust design," *IEEE Trans. Magn.*, vol.43, pp.704-708, 2007.
- 14) Y. Uesaka, M. Koizumi, N. Tsumita, O. Kitakami, and H. Fujiwara, "Noise from underlayer of perpendicular magnetic recording medium," *J. Appl. Phys.*, vol.57, pp.3925-3975, 1985.
- 15) A. Kikukawa, Y. Honda, Y. Hirayama, and M. Futamoto, "Noise characteristics of double-layered perpendicular media using novel soft magnetic underlayer materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol.36, pp.2402-2404, 2000.
- 16) A. Kikukawa, K. Tanahashi, Y. Honda, Y. Hirayama, and M. Futamoto, "Distribution and characterization of spike noise," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol.235, pp.68-72, 2001.
- 17) K. Tanahashi, A. Kikukawa, Y. Takahashi, Y. Hosoe, and M. Futamoto, "Low-noise FeTaC underlayer for double-layered perpendicular recording media," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol.242-245, pp.325-327, 2002.
- 18) Y. Nishida, et al., *Digest of Intermag 2005*, FP-09, 21, 2005.
- 19) D. Guarisco, et al., *IEEE Trans. Magn.* 42, 171, 2006.
- 20) T. Ando, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.* 18, S1, 87, 1994.
- 21) H. S. Jung, et al., *IEEE Trans. Magn.* 37, 2294, 2001.
- 22) K. Tanahashi, A. Kikukawa, N. Shimizu, and Y. Hosoe, "Reduction of spike noise in perpendicular recording media by using MnIr antiferromagnetic films," *J. Appl. Phys.*, vol.91, pp.8049-8051, 2002.
- 23) S. Takenoiri, K. Enomoto, Y. Sakai, and S. Watanabe, "Exchange-coupled IrMn/CoZrNb soft underlayers for perpendicular recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.38, pp.1991-1993, 2002.
- 24) K. Tanahashi, A. Kikukawa, and Y. Hosoe, "Exchange-biased CoTaZr soft underlayer for perpendicular recording," *J. Appl. Phys.*, vol.93, pp.8161-8163, 2003.
- 25) B. Acharya, J. Zhou, G. Choe, M. Zheng, and K. Johnson, "Anti-parallel coupled soft underlayers for high-density perpendicular recording," *Proc. 9th Joint MMM-Intermag Conf.*, GD-10, 2004.
- 26) S. C. Byeon and W. D. Doyle, "Synthetic antiferromagnetically coupled FeCo/Ru/FeCo soft underlayers for perpendicular recording," *Proc. 9th Joint MMM-Intermag Conf.*, GD-11, 2004.
- 27) K. Tanahashi, R. Arai, and Y. Hosoe, "Exchange-biased soft underlayers for perpendicular recording," *IEEE*

- Trans. Magn., vol.41, pp.577-580, 2005.
- 28) S. N. Piramanayagam, "Perpendicular recording media for hard disk drives," J. Appl. Phys., vol.102, pp.011301, 2007.
 - 29) R. H. Victora and X. Shen, "Exchange coupled composite media for perpendicular magnetic recording," IEEE Trans. Magn., vol.41, pp.2828-2833, 2005.
 - 30) D. Suess, T. Schrefl, M. Kirschner, G. Hrkac, F. Dorfbauer, O. Ertl, and J. Fidler, "Optimization of exchange spring perpendicular recording media," IEEE Trans. Magn., vol.41, pp.3166-3168, 2005.
 - 31) K. Tang, K. Takano, G. Choe, G. Wang, J. Zhang, X. Bian, and M. Mirzamaani, "A study of perpendicular magnetic recording media with an exchange control layer," IEEE Trans. Magn., vol.44, pp.3507-3510, 2008.

■8 群-2 編-2 章

2-4 機構系・サーボ・HDI 技術

(執筆者：中村滋男) [2009年9月 受領]

2-4-1 外形寸法と機構系・サーボ性能

磁気ディスク装置 (Hard Disk Drive : HDD) の機構系の一例として 2.5 インチ型 HDD の模式図を **図 2・15** に示す。HDD の外形寸法は、用途によりデファクトスタンダードが決まっており、2.5 インチ型 (幅 70 mm, 長さ 100 mm, 高さ 9.5), 3.5 インチ型 (幅 102 mm, 長さ 147 mm, 高さ 26 mm) が標準的である。情報の記憶媒体である円板の直径は、呼び径で 2.5 インチ (直径 65 mm) から 3.5 インチ (直径 95 mm), 回転数は毎分 5400 回転から 15000 回転のものが多い。情報の記録・再生用ヘッドの円板半径方向の移動時間 (平均シーク時間) は、3.4 ms~12 ms 程度である。また、用途によって必要とする供給電源の電圧が異なる。**表 2・1** に HDD の仕様例を示す。

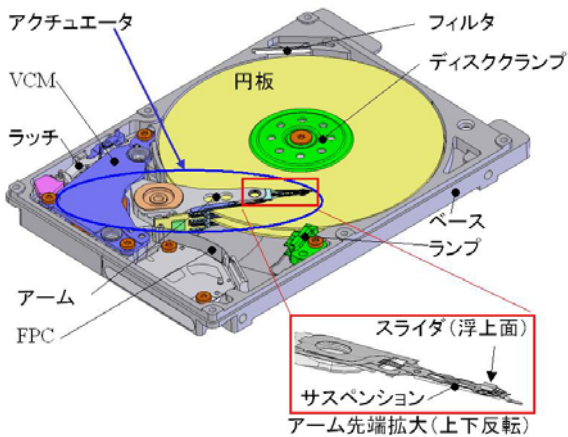


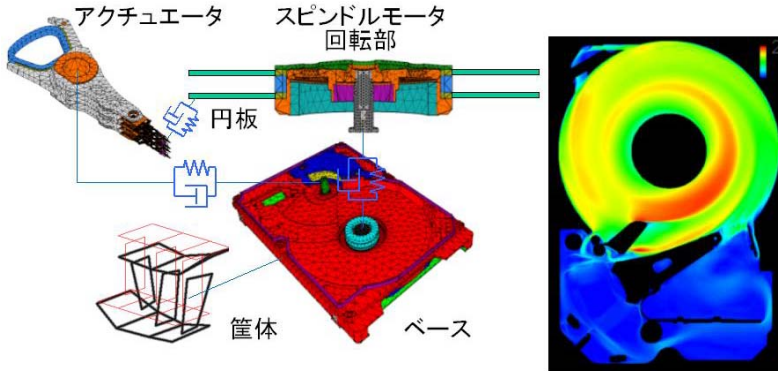
図 2・15 機構系基本構造

表 2・1 HDD の仕様例 ((株)日立グローバルストレージテクノロジーズ製) (参考文献 1) より作成)

仕様	ノートPC用 2.5 インチ型	情報家電用 3.5 インチ型	サーバ用 2.5 インチ型	サーバ用 3.5 インチ型
型名	Travelstar™ 5K750	Deskstar™ 7K3000	Ultrastar™ C10K600	Ultrastar™ 15K600
記憶容量 [GB]	750	3000	600	600
幅×長さ×高さ [mm]	70×100×9.5	101.6×147.0×26.1	70.1×100.6×14.8	101.6×146.2×25.8
円板枚数	2	5	2	4
円板回転数 [回/分]	5400	7200	1000	15000
平均シーク時間 [ms]	12	8.2	3.9	3.4
供給電圧 [V]	+5	+5, +12	+5, +12	+5, +12

2-4-2 機構系技術²⁾⁻⁴⁾

HDDの機構系は、情報記憶媒体である円板を回転させるスピンドル系、情報の記録、再生を行うヘッドを円板上の所望の半径位置に位置決めするアクチュエータ系、スピンドル系とアクチュエータ系を清浄空気内に把持するベース・カバー系から構成される(図2・16)。



部分構造合成法による
筐体を含めた全体解析モデル例

HDD丸ごと流体解析例
(流速: 赤:速⇔青:遅)

図2・16 HDD全体解析例^{8),9)}

スピンドル系は、円板、円板を回転させるスピンドルモータ、円板をスピンドルモータに固定するディスクスペーサとディスククランプにより構成される。スピンドルモータは、流体軸受を用いたDCモータで、円板を搭載するハブが軸と一体に回転するものと、固定された軸の周りをハブが回転するものがあり、ベースと一体となっているものも多い。

アクチュエータ系は、ヘッドと一体で形成され、回転する円板上を安定浮上するヘッドスライダ、ヘッドスライダを支持するサスペンション、ボイスコイルモータ(Voice Coil Motor: VCM)でアームをスイングさせるアクチュエータ、アクチュエータに取り付けられてヘッドからの信号を制御回路に伝達するフレキシブル回路基板(Flexible Print Circuit: FPC)などから構成されている。サスペンションは、スライダを円板へ押し付け、スライダを円板上下方向に軟支持、円板水平方向に剛支持し、かつ、ヘッドから記録/再生信号を記録/再生回路に伝送する役目を果たしている。VCMの磁石はベースに、アクチュエータのスイング中心軸はベースとカバーに固定されているものが多い。VCMのコイルは、台形型のフラットコイルが多かったが、アクチュエータの励振力を抑えるため丸いコイルを用いているものもある⁵⁾。また、アームには粘弾性体と拘束板から構成されるダンパを貼り付け制振しているものもある⁶⁾。

ベース・カバー系は、スピンドル系とアクチュエータ系を清浄空気内に把持するベース、カバー以外に、HDD非動作時にヘッドが待機するランプ⁷⁾(非動作時に、ヘッドが円板内周上に待機するものにはない)、HDDの非動作時にアクチュエータ(ヘッド)を一定の場所にとどめておくラッチ機構、HDD内の湿度を調整する機構、HDD内の塵埃を捕集するフィルタなどから構成されている。

HDD のデータは円板上にトラックと呼ばれる同心円上に記録される。HDD を高記録密度にするためには、トラック上に書かれるデータの周方向の密度（ビット密度）を上げると同時に、トラックの円板直径方向の密度（トラック密度）を上げる必要がある。トラック密度を上げるためには、機構系の振動を低減することと、アクチュエータの応答性を高くする必要がある。機構系の振動は、円板の回転により発生する流体力が、円板、アーム、サスペンションを加振する流体起因振動と、HDD 外部からの振動が大きな要因である。有限要素法や部分構造合成法を用いた CAE による構造の最適化により、構造振動の低減とアクチュエータ応答特性の改善が図られている⁸⁾。流体起因振動の低減には、HDD 丸ごとの流体解析⁹⁾などが適用されている。アクチュエータ応答性の画期的な向上を目指した、2 段アクチュエータシステムの開発も行われている。

トラック密度の向上以外にも、HDD 機構系における技術課題は多い。ノート PC 用 2.5 インチ型 HDD には、衝撃が加わっても壊れない堅牢さが要求され、2009 年現在では、情報の記録・再生動作時に 3920 m/s^2 (400 G)、非動作時に 9800 m/s^2 (1000 G) に耐えられる構造となっている。また、情報家電用 HDD には、静音化の要求が大きい。また、ビット密度を飛躍的に上げる技術としてエネルギーアシスト記録の研究が行われているが、エネルギー源の実装・冷却技術も大きな課題である¹⁰⁾。

2-4-3 サーボ技術^{2)-4), 11)}

HDD の制御系の基本構造を図 2・17 に示す。ヘッドの位置情報は、円板のトラック上に間欠的に書き込まれた特殊な磁気パターンをヘッドで再生することにより得られる。ヘッドは、得られた位置信号を基に VCM に印加する電流を制御することにより、所望のトラック上に位置決めされる。ヘッド位置決め制御は、離散的な位置情報をもとに行われるので、サンプル値制御になる。

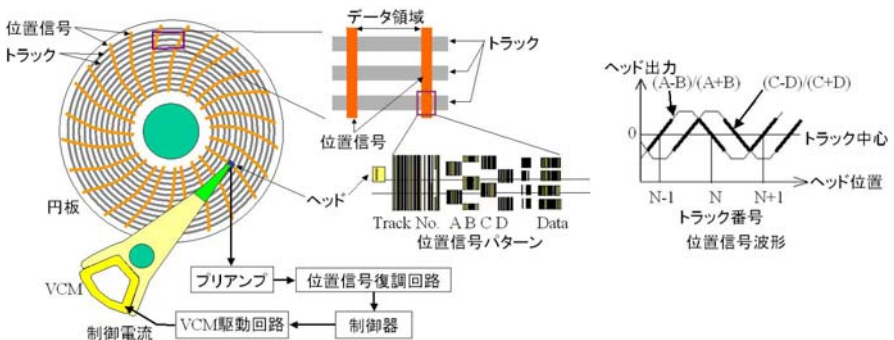


図 2・17 制御系基本構造

ヘッドを目標のトラックに高速かつ高精度に位置決めする制御は、①目標のトラックまでの距離が大きく、高速移動、または大きな加減速度を発生させながら移動するシークモード、②目標トラック付近で目標トラックへの整定するセトリングモード、③目標トラックに高精度で追従するフォローイングモード、の三つのモードに大別される。それぞれのモードに対

して最適な制御器を準備して、条件によって切り換えるモード切換え制御を用いていることが多い。

シークモードでは、ヘッドを高速かつ、HDD 機構系の振動モードを励起しないように動かす必要がある。このため、最大加速・最大減速するのではなく、目標軌道を設計し、それに追従するよう制御する。

フォローイングモードは、ヘッド位置のトラック中心からの位置誤差(図 2・17 に示す位置信号波形のヘッド出力)を 0 にするフィードバック制御が基本であるが、ヘッドの位置誤差を推定して定めた制御量や、繰返し発生する位置誤差については、学習制御などにより予め定めた制御量をフィードフォワードで加味することも多い。また、外部からの振動に対しては、HDD の回路基板に加速度や角速度を検出するセンサを設け、センサ出力も用いてヘッド位置決めを行うことも多い¹²⁾。検出された加速度からヘッド位置決め制御系への外乱までの伝達関数を適応同定するフィードフォワード制御器も開発されている。

2-4-4 HDI 技術²⁾

図 2・18 に HDD の Head Disk Interface (HDI) の基本構造を示す。スライダは回転する円板上を安定浮上しているが、ヘッド浮上量は、円板の回転により発生する空気流がスライダの円板対向面に形成された空気軸受面に入って発生する浮上力と、サスペンションからの押しつけ荷重とのバランスにより定まる。実際の磁気記録に影響するのはヘッドと円板の磁性層との間の物理的隙間(磁気隙間)であり、HDD のビット密度を上げるためには、磁気隙間を小さくすることが重要である。

データの書込みは、Write ヘッドで発生される磁束により円板の磁性層を磁化して行うため、磁気隙間を小さくすれば小さくするほど漏れ磁束がシャープになり、ビットの寸法を小さくすることができる。磁気隙間は、円板とヘッドそれぞれ磁性層表面を保護する保護膜の厚さ、円板保護膜上の潤滑剤の膜厚、ヘッド浮上量、円板表面形状に起因する隙間の合計であり、ビット密度を上げるためには、磁気隙間の各成分を小さくすることが必要である。2004 年時点では浮上隙間 10 nm で磁気隙間が 20 nm の領域であったが²⁾、2009 年時点では浮上隙間 6 nm で磁気隙間が 12 nm まで縮まっている¹³⁾が、更なる低減が要求されている。

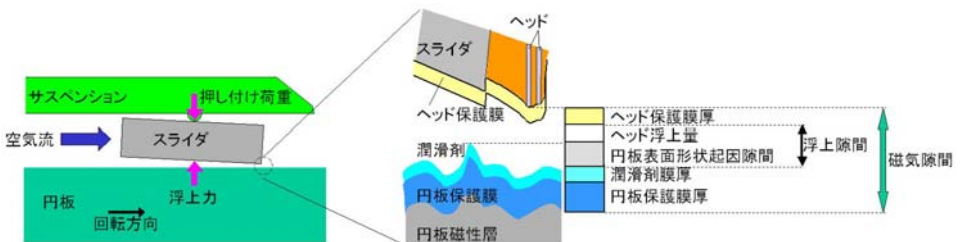


図 2・18 HDI 基本構造

ヘッド浮上量を下げるために、スライダ内部のヘッド付近にマイクロ熱アクチュエータを組み込み、ヘッド浮上量を微調整できる TFC (Thermal Flying-height Control) スライダが実用化されている。スライダやサスペンションの加工ばらつき、気圧・温度などの環境変化、記

録／再生時のスライダ表面形状差などにより、ヘッド浮上量のばらつきが発生する。TFC スライダによりヘッド浮上量のばらつきを小さくすることにより、ヘッド浮上量を小さくすることができている¹⁴⁾。

また、円板表面形状起因によるヘッド浮上量の変動を小さくする技術¹⁵⁾や、空気軸受面に円板の潤滑剤が付きにくくする技術¹⁶⁾が開発されている。円板保護膜は、Plasma Chemical Vapor Deposition 法により形成する Diamond Like Carbon (DLC) 膜を Filtered Cathodic Arc 法による Tetrahedral amorphous carbon 膜 (DLC 膜の一種) にすることにより、厚さを 4 nm から 2 nm に低減できると報告されている¹³⁾。なお、スライダと円板が接触した際は、円板表面だけでなく磁性層が損傷を受けないことが重要である¹⁷⁾。

■参考文献

- 1) (株)日立グローバルストレージテクノロジーズ, ホームページ
<http://www.hitachigst.com/internal-drives/> (2011.05.17 引用)
- 2) 日本機械学会(編), “機械工学便覧 応用システム編 γ8 情報・メディア機器,” 3.4.1 磁気ディスク装置, pp.γ8-52~γ8-56, 丸善, Oct. 2005.
- 3) 三枝省三, 中村滋男, “磁気ディスク装置のヘッド位置決め系におけるセンシング・アクチュエータ技術,” 日本機械学会講習会資料, no.01-34, pp.25-28, May 2001.
- 4) 有賀敬治, “ハードディスクドライブ「メカ・サーボ」専門講座,” IDEMA JAPAN, Dec. 2008.
- 5) K. Suzuki and M. Ohta, “VCM Design with Round Coil and Rectangular Magnet for Hard Disk Drive Actuator,” 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, DVM-01, Jun. 2009.
- 6) 江口 一, 増田広光, “制振材の分割による制振性能の向上,” 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2009, 456, Aug. 2009.
- 7) P. Kim and M. Suk, “Ramp Load/Unload Technology in Hard Disk Drives,” White papers. Hitachi Global Storage Technologies, Dec. 2007.
http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/productfamilies/White_Papers
- 8) T. Eguchi, “Simulation of PES Degradation Due to Operational Vibration for Hard Disk Drives in Storage Server Box,” Asia-Pacific Magnetic Recording Conference 2009, EA-2, Jan. 2009.
- 9) M. Ikegawa, H. Mukai, and M. Watanabe, “Whole HDD Structure Airflow Simulation by Voxel Mesh Method,” Asia-Pacific Magnetic Recording Conference 2009, EA-2, Jan. 2009.
- 10) S. Nakamura, S. Sasaki, and S. Ohashi, “Increase of Temperature of a Light Source (Laser Diode) in a Hard Disk Drive,” 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, P-OPT-02, Jun. 2009.
- 11) 山口高司, 平田光男, 藤本博志(編著), “ナノスケールサーボ制御 ー高速・高精度に位置を決める技術,” 東京電機大学出版局, Oct. 2007.
- 12) “Rotational Vibration Safeguard (RVS),” White papers. Hitachi Global Storage Technologies, Mar. 2004.
http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/productfamilies/White_Papers
- 13) (株)フェロテック, “ハードディスク用超薄膜 FCA カーボン保護膜成膜装置開発のお知らせ,” ニュースリリース, Jun. 2009.
<http://www.ferrotec.co.jp/press/pdf/2009/20090604.pdf>
- 14) 栗田昌幸, “マイクロ熱アクチュエータによる磁気ヘッドスライダ浮上量の制御技術,” 日本機械学会情報・知能・精密部門ニュースレター, no.31, Aug. 2006.
- 15) Y. Shimizu, J. Xu, J. Li, and Kyosuke Ono, “Damping Slider,” Air-bearing Design Concepts and Slider Development,” 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, HDI-01, Jun. 2009.
- 16) J. Li, J. Xu, and Y. Aoki, “Air Bearing Design Suppressing Reverse Flow from the Trailing Edge of the Slider,” 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision

Equipment, HDI-01, Jun. 2009.

- 17) M. Furukawa, J. Xu, Y. Shimizu, and Y. Kato, "Mechanism Study of Scratch Demagnetization for Perpendicular Magnetic Disks," ASME Information Storage and Processing System Conference 2008, Jun. 2008.

■8 群-2 編-2 章

2-5 信号処理技術

(執筆著：三田誠一) [2009年3月 受領]

2-5-1 信号処理系の全体構成

磁気ディスク装置で使用されている信号処理系の構成の概要を図 2・19 に示す。

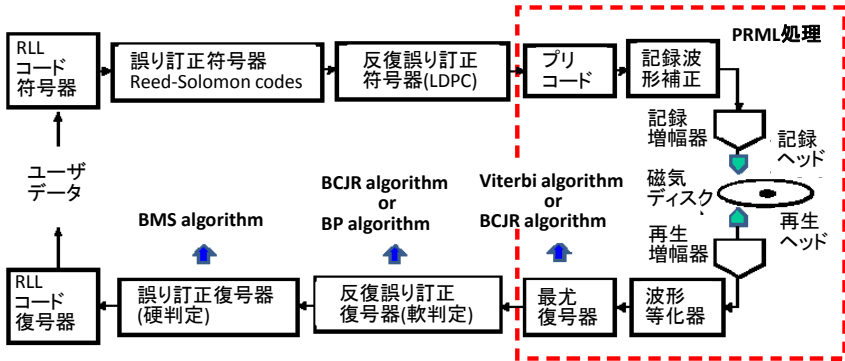


図 2・19 信号処理系の全体構成

- (1) RLL (Run length limited) 符号器の役割の一つは、符号中の“1”あるいは“0”が長く連続する期間が発生することを禁止し、元の符号を復号する際に必要なタイミング信号（クロック信号）の再生を容易にするためのものである。また、トレリス演算を適切に収束させるためにもランレングスを制限する必要がある。従来は、誤り訂正処理の後で、RLL 処理を実行していた。最近では、これを図に示すように逆転して使用する。これは、RLL 処理で発生する誤りの拡大の影響を避けるためである。
- (2) 符号の誤り訂正方式も基本的には、アナログ情報を活かす軟判定と、2 値化後のデジタル情報の段階で実行される硬判定の 2 種が用いられる。軟判定方式は、比較的簡単なパリティコードを使用するものが実用化されてきた。今後、高性能であるが複雑な処理をとともなう反復復号方式が使用される予定である。硬判定には、リードソロモンコードが使用され、1 セクタ (512 バイト) 当たり 20 訂正以上の訂正能力が確保されている。なお、アルゴリズムに関しては後ほど簡単に説明する。
- (3) これ以降の主題の一つである PRML (Partial Response Maximum Likelihood) 処理は、図 2・19 に示すように、プリコード回路から記録再生過程を経て波形等化器までの一連の信号の流れの中で実行される。

2-5-2 PRML 処理

(1) 磁気ディスク装置における開発経緯

PRML の名前の由来であるが、1990 年前後に、IBM 社が発表した新しい信号処理方式¹⁾を PRML (Partial Response Maximum Likelihood) と呼んだことに始まる。パーシャルレスポンス (Partial Response, 以下 PR と略す) と最尤復号 (Maximum likelihood sequence estimation) と

いう概念を結合したものである。1960年代の E. R. Kretzmer²⁾ と A. J. Viterbi³⁾ による提案を受け、1970年代の初めに、H. Kobayashi⁴⁾ により、磁気ディスクチャンネルが PR class 4 (PR 4) として表現でき、この信号をビタビアルゴリズムにより効率的に復号できることが明らかにされた。1990年前後の IBM 社の発表を契機に、1990年代半ばから PRML チップは磁気ディスク装置に搭載され始めた。この後、インパルスレスポンスを非対称化した Modified EEPR 4, トレリス演算の簡略化アルゴリズム, 垂直磁気記録用 PR としての正係数の導入, パターン依存性雑音に適する最尤復号方式など重要な提案が次々となされた。

(2) PR の効果

図 2・20 (a), (b) はともに図 2・21 に示すナイキスト周波数 ($1/2T$) においてゼロ点をもつ $(1+D)$ なる低域通過型フィルタ特性となる通信路に、理想フィルタのインパルス応答を印加するモデルである。通信路を通過後の信号に加法的白色雑音 (AWGN) が加わるものとする。入力信号系列は “1”, “0” の 2 値であるが、この “1” が $(1+D)$ チャンネルを通過すると 1, 1 と 2 個のタイムスロット (T) にまたがり、通過後の信号波形は $\{0, 1, 2\}$ の 3 値の波形となる。2 値伝送においては、これらは、互いに符号間干渉となる。これを元に戻すには $1/(1+D)$ なる応答をもつ逆フィルタを必要とする。図 2・20 (b) では、この 3 値波形をそのまま弁別す

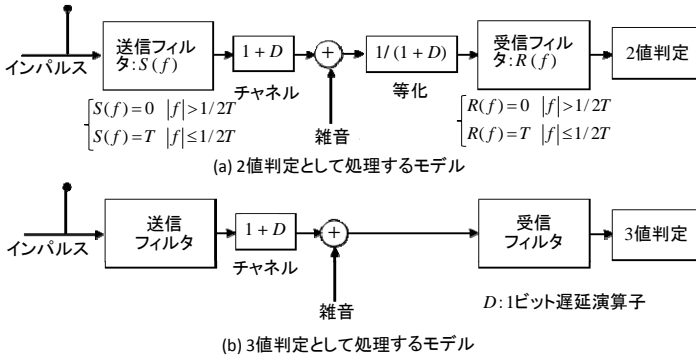


図 2・20 PR チャンネルの簡単なモデル

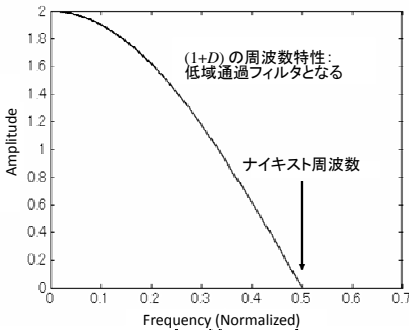


図 2・21 $(1+D)$ チャンネルの周波数特性

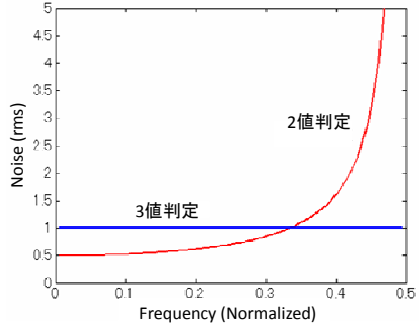


図 2・22 判定方式による雑音特性の違い

る。この場合、雑音の増加はない。一方、2 値判定では、高域部分で雑音が極端に増加する。両判定方式の雑音分布を **図 2・22** に示す。結果として、2 値判定する場合の雑音電力の総和は、3 値判定のもの約 10 倍になる。

(3) PR の分類

このように、PR は通信路のもつ応答をそのまま利用してデジタル伝送を行う手法といえる。E. R. Kretzmer が提案したパーシャルレスポンスは、低域通過フィルタ型、高域通過フィルタ型、及び帯域通過フィルタ型の特性を有する 5 class に分類され、インパルス応答を整数比として表せるもの限定している。前述の例は PR class1 に相当する。

従来の面内磁気記録方式では、帯域通過特性をもつ PR 4: $(1-D^2)$ 及びその高次化したもの {EPR 4: $(1-D)(1+D)^2$, Modified EPR 4: $(1-D^2)(5+4D+2D^2)$ } が実用化されてきた。これは、面内磁気記録の周波数特性が磁気ヘッドの特性により低周波域が遮断され、また磁気ディスク媒体そのものや磁気ヘッドと磁気媒体の空隙に起因する損失により高域も遮断される帯域通過特性となるからである。垂直磁気記録方式の再生信号は、低域通過フィルタ型の特性をもつため、当初面内磁気記録の PR 4 系列が使用されているが、今後 SN 比の点で有利な PR 1: $(1+D)$, PR 2: $(1+D)^2$ 系列、及びその高次化した $\{3+7D+2D^2-2D^3, (1+D)^3\}$ が用いられるものと思われる。

(4) PR の復号方法

チャンネル通過後の信号を整合フィルタ (Matched filter) に通し、続いて AD 変換器により時刻 T ごとの離散信号系列に変換する。雑音が AWGN という条件下で、整合フィルタは SN 比を最大にするフィルタである。この後、トランスバーサルフィルタにより、所望の PR 波形に等化した後、最尤復号 (ビタビ復号) する。ビタビ復号は、ビットごとの復号と異なり、複数のタイムスロットにわたる信号の観測値を用いる。これにより、信号のインパルスレスポンスが有するエネルギーを最大限復号に活用できる。ビタビ復号では、SN 比により、複数の誤り事象の発生確率が決まる。更に、誤り事象中に含まれるビット誤りを及びその発生確率の積をとることでビット誤り率が決まる。ただし、離散化された雑音系列は互いにフィルタの特性に依存する相関をもつため 1 dB 程度の SN 比の低下となる。

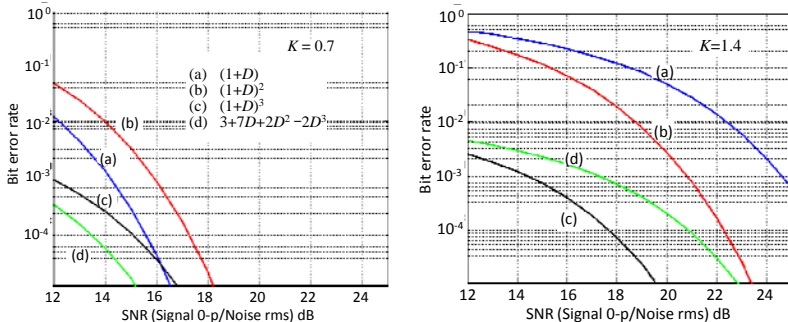


図 2・23 垂直磁気記録における異なる規格化線密度に対するビット誤り率

(5) 垂直磁気記録における PRML の特性

前述した PR を垂直磁気記録に適用した場合の信号の SN 比に対するビット誤り率を図 2・23 に示す。ここで規格化線密度 (K) は、ステップ波形を記録再生したときの立ち上がり波形の振幅が 25 から 75 % に到達する時間を記録パルスのビット周期で規格化したものである。 K が大きい場合には、高次の PR が有利になる。

2-5-3 磁気ディスク装置における反復復号の適用

今後、磁気ディスク装置の信号処理の主流になると考えられている軟判定情報を多用する反復復号方式、特に LDPC⁵⁾ 符号を用いた PR チャンネルとの接続信号処理方式の構成を述べる。PR チャンネルに LDPC 符号を適用するための代表的な回路構成例を図 2・24 に示す。PR チャンネルには、プリコードが用いられ、チャンネル復号でのエラー伝播特性を最適化し、LDPC 復号との反復性能の改善を行う。復号プロセスは、LDPC 復号器内部の BP アルゴリズムによる内ループと BCJR アルゴリズムを用いる MAP 復号器を介する外ループからなる。このような構成はターボ等化と呼ばれ、磁気ディスク特有の構成である。反復復号の終了は、LDPC 復号器内の反復ごとに、軟判定情報をしきい値判定した硬判定結果が、パリティ検査式を満たすか否かで判断する。Modified EEPR 4 に対する復号性能の例を図 2・25 に示す。

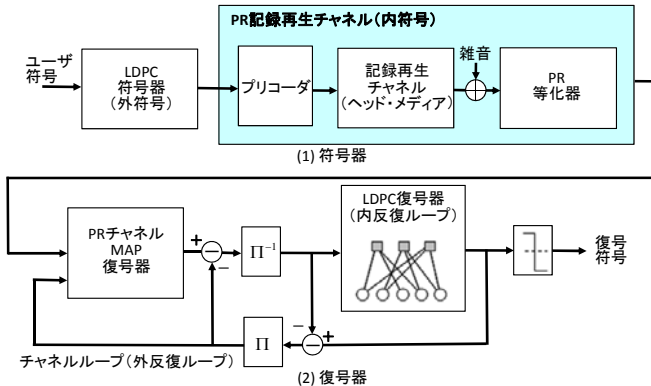


図 2・24 LDPC 符号を用いる反復復号器

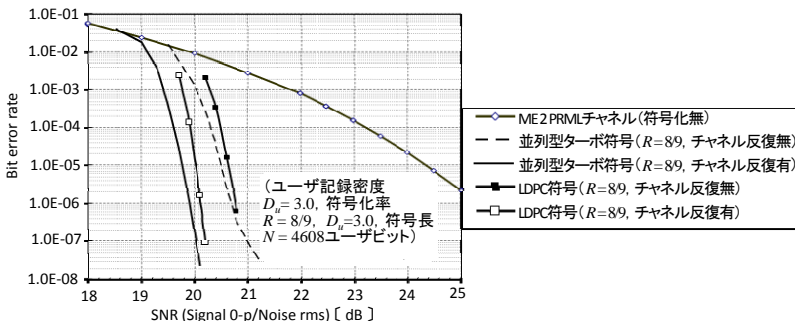


図 2・25 反復復号の効果

■参考文献

- 1) F. Dolivo, "Signal processing for high-density digital magnetic recording," IEEE Proc. VLSI and computer peripherals, pp.1.91-1.96, 1989.
- 2) E. R. Kretzmer, "Generalization of a technique for binary data communication," IEEE Trans. Commun., 14, pp.67-78, Feb., 1966.
- 3) A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," IEEE Trans. Inform. Theory, 13, pp.260-269, Apr. 1967.
- 4) H. Kobayashi and D. T. Tang, "Application of partial response channel coding to magnetic recording systems," IBM J. Res. & Dev., vol.14, no.4, pp.368-375, Jul. 1970.
- 5) D. J. C. MacKay, "Good codes based on very sparse matrices," IEEE Trans. Inform. theory, vol.45, no.2, pp.399-431, 1999.