

解説



計算機システムを支える最新技術 (装置編)

 1. ハードディスクの大容量化, 高速化技術[†]
橋本 雅伸^{††}

1. はじめに

世界初のハードディスク装置 (HDD) が IBM によって開発されてから今年で 40 年になる。この間、記憶円板を回転させ、磁気ヘッドで記録再生を行う原理は何ら変わることなく、高密度大容量化、高速化が進展した結果、今やあらゆるコンピュータ環境で HDD は欠かせないものとなった。この HDD の小型・大容量化あるいは低価格化や高速化は、媒体単位面積あたりのビット数を表す面記録密度の向上と、高速データアクセス、転送技術の進歩によるものである。

1990 年以降、HDD の主要マーケットは大型計算機から PC/WS に移り、今後も年率 60% 以上の面記録密度の向上が予想されている。また、HDD の記憶容量も GB (ギガバイト) 時代を迎え、データ高速処理のための外部インタフェースの採用や、それに呼応した内部データ転送の高速化、アクセス、データサーチ時間の短縮などがはかられている。

磁気ヘッドと記憶円板の組合せという原理原則は不変のまま、飛躍的な性能向上が実現されている背景には、HDD を構成するデバイス、システム技術のたゆまぬ技術革新がある。本稿では、大容量高速化の牽引役となっている、HDD の主要構成技術について紹介し、今後の展望について述べる。

2. ハードディスク装置 (HDD)

HDD の容量を決定する代表指標である面記録密度は、記録トラック上の記録密度、線記録密度 (BPI: Bit per Inch) と、媒体半径方向単位のと

ラック数、トラック密度 (TPI: Track per Inch) の積で表される。一般に PC/WS 向けの 3.5 インチ HDD では 1 台あたり 2~10 枚程度の媒体が内蔵され、同一面記録密度技術で 5 倍程度の容量帯を構成している。その中で、主に 4 枚以上の媒体群からなる装置は大容量と高速性をともに追求したもので、WS/サーバあるいはビデオ・オン・デマンド (VOD) などに利用される。一方、PC 用 3.5 インチ HDD では媒体は 3 枚以下で、容量、速度は限られるが、最近では 3 GB 以上の大容量が実現されている。

図-1 に記録密度の観点から、最新の装置製品と研究開発動向を示す。大容量化の源泉である面記録密度の向上には、2 つの方向性がある。BPI を高めるにはヘッド、媒体間の周波数特性が鍵となる。一方、TPI 向上にはヘッド位置決めや回転機構などの機械的な周波数特性が支配的である。そのため、面記録密度向上には両密度指標のバランスが重視され、おおむね BPI/TPI 比で 20 程度が一般的である。しかしながら今後は、この比は次第に 10 程度まで漸近して行くものと考えられる。その理由はヘッド媒体の信号雑音比 (SNR) の面で有利なことや、BPI 向上に重要な、ヘッド媒体隙間の低減が難しいことなどによる。したがって、今後はこれまで以上に TPI を向上させる技術が必要と考えられている。

HDD の主要構成要素を図式的に図-2 に示す。HDD の大容量化、高速化を支える主要技術は、ヘッド、媒体や、記録再生/信号処理チャネル、信頼性に関わるヘッド媒体インタフェース (HDI: Head Disk Interface)、ヘッド位置決めサーボ機構、装置制御のコントローラなどからなる。ホスト側からの書き込み/読み出し命令がコントローラに入ると、まずデータを格納/取り出しされる記録トラックに対し、サーボによってポ

[†] Fundamental Technologies in Large Capacity, High Speed Hard Disk Drives by Masanobu HASHIMOTO (Functional Devices Research Labs., NEC Corporation).

^{††} 日本電気(株)機能エレクトロニクス研究所

イスコイルモータ (VCM) を駆動し、ヘッドが位置決めされる。位置決め完了が確認されると、R/W (Read/Write) チャンネルを介してヘッドは符号化されたデータを媒体に記録再生する。データは一般的に 512 バイト単位のセクタごとに管理され、1トラックは数十セクタで構成されている。目的のセクタにアクセスするためには時間的なオーバーヘッドとしてコマンド処理に要する時間、ヘッド移動動作時間、そして回転してくるデータ待ちの時間があり、これらが HDD のレスポンス速度に大きく影響する。HDD では複数のヘッド媒体を利用し、所望のヘッドを切り換えることで機械的動作を最少にして複数トラックの連続処理が可能であり、1回のヘッド位置決めに対応

する全媒体面のトラックを総じてシリンダと呼ぶ。パッケージ以外の主要部品は超清浄な環境でベース/カバーにより密封される。これは HDD の基本性能がヘッド媒体間の最大 30 m/s にも及ぶ相対運動下で、わずか 0.05 ミクロンの空気層によって支えられているという現実を長期保証するためである。装置を手にとってみると「WARRANTY VOID IF SEAL BROKEN」と書かれたシールが目に入る所以である。

3. 大容量、高速化のための主要技術

3.1 ヘッド技術

近年、そして今後の HDD 高密度大容量化の推進役は MR (Magneto-Resistive) ヘッドである。これまでの高密度ヘッドの代表である誘導型薄膜ヘッドは、薄膜プロセスを用いてリング型磁極間に Cu コイルを形成したもので、媒体磁化遷移部 (NS/SN 磁化境界) の漏れ磁束の時間微分とコイル巻数に比例した再生出力が得られる。したがって記録ビットセルが小さくなるほど、高出力化には高速なヘッド媒体相対運動と多数の巻線が必要である。しかし、媒体径小型化による速度低下と、巻線のコイルインダクタンス増加は、書き込み周波数特性を悪化させる。一方、MR ヘッドには速度依存性がなく、3.5 インチ以下の小型 HDD に好適である。

現在実用化されている MR ヘッドの概略構造を図-3 に示す。MR ヘッドは再生専用のヘッドで、記録専用ヘッドと組み合わせられる。記録ヘッ

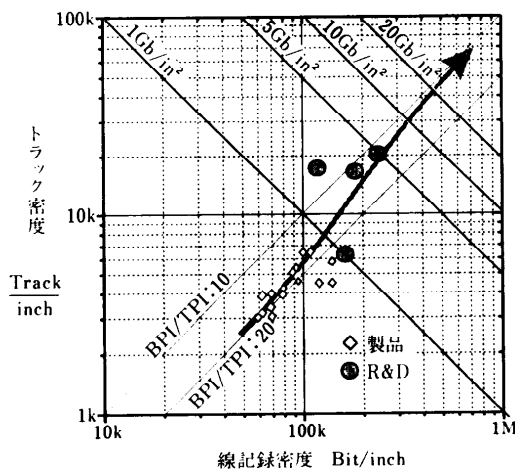


図-1 ハードディスク記録密度の推移

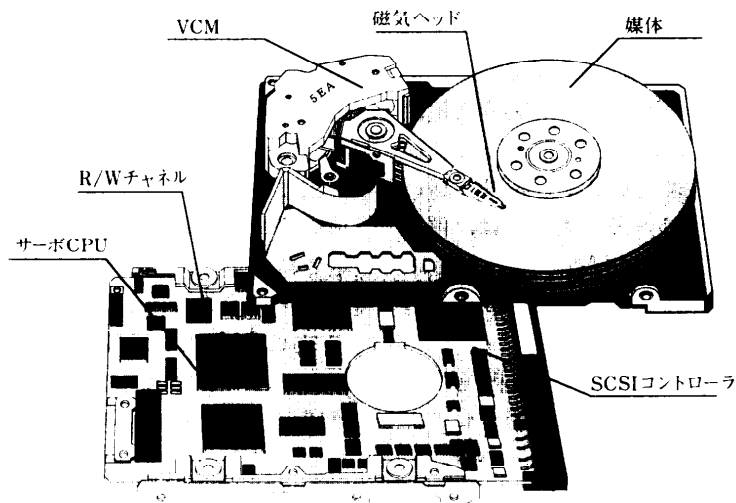


図-2 ハードディスク装置の構成

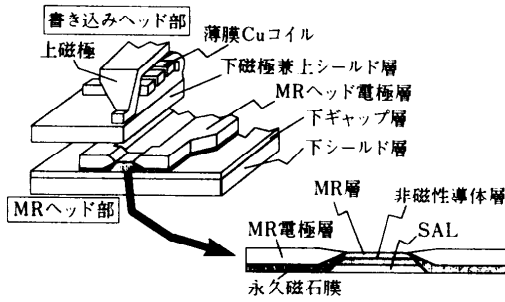


図-3 MRヘッドの構造

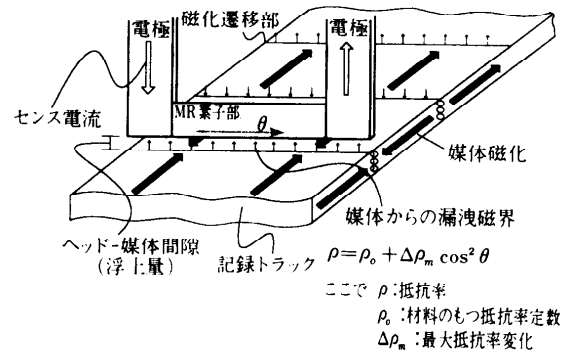


図-4 MRヘッドの動作原理

ドは誘導型ヘッドであるが、コイル巻き数を少なくして書き込み性能を向上させている。また、高線密度化に対応し、再生分解能向上のために、膜厚2~3ミクロンのNi-Feシールド層にMR素子を挟み込んだ構造が採用される。MR素子部はSAL (Soft Adjacent Layer) と呼ばれる軟磁性体層とMR層 (Ni-Fe) が非磁性導体層を介して積層された感磁部と、金電極、そしてMRヘッド特有の不安定ノイズを抑制するための永久磁石膜層から構成される。感磁部の膜厚はそれぞれ数十ナノメートル程度の薄膜であり、端部に傾斜面を作って正確に永久磁石膜を接合させるなど、異種材料間の高度な接続形成プロセスが用いられている。

図-4はMRヘッド再生の基本原理であり、Ni-Feなどの強磁性膜の抵抗値が外部磁界によって変化する性質を利用している。MRヘッドは、直接に媒体からの漏れ磁界強度変化にตอบสนองするため、ヘッド媒体間の相対速度に出力は依存しない。媒体からの漏れ磁界によって感磁部の磁化方向が変化すると、素子抵抗値が変化し、定電流制御によって素子抵抗変化を電圧検出する。この抵抗変化は線形ではなく、感磁部の磁化方向と電流の方向の間の角度を θ として図中の式のような関係にある。 $\Delta\rho_m/\rho_0$ を抵抗変化率と呼び、高いほど大きな再生出力が得られる。実際には、再生信号波形歪みの低減のため、SALによってMR層の磁化方向に45°のバイアスを与え、ほぼ線形な応答を確保している。

以上のようにMRヘッドは、高感度再生ヘッドとして、高性能書き込みヘッドとの組合せによって、大容量化の鍵を握っている。同一条件の比較で誘導型ヘッドの数倍の高出力が可能であるが、さらにMRヘッドの発展形としては、ナノ

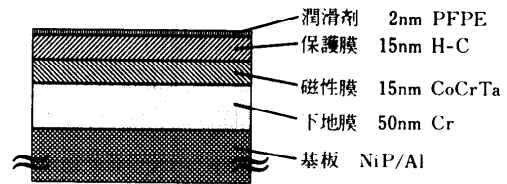


図-5 媒体の構造

メータ積層薄膜の磁気抵抗効果を利用し、現状のMR素子よりも1桁近くも高感度なスピンバルブ素子や¹⁾、GMR (Giant Magneto-Resistance: 巨大MR効果) 材料などの研究開発が盛んに行われており、次世代の超大容量HDDのキーデバイスとして実用化が期待されている。

3.2 媒体技術

MRヘッドの実用化によって、ヘッドノイズが大幅に低下した結果、ヘッド媒体のSNRのうち、ノイズは媒体ノイズが支配的となった。媒体ノイズの低減のためには、磁性膜の残留磁束密度と膜厚の積を小さくする設計が行われる。膜厚の減少は出力も同時に小さくなるが、出力の大きなMRヘッドとの組合せではかえって良好なSNRを得ることができる。

図-5にMRヘッド用として用いられている媒体の構成例を示す。アルミ合金上にNiPがめっきされた基板や、平滑性の高いガラス基板上にクロム下地を形成し、スパッタによってCoCrTaやCoCrPtなどの薄膜磁性膜を形成する。さらに表面には信頼性向上のため水素添加カーボンの保護膜とパーフロロポリエーテル潤滑剤が塗布される。

低ノイズ化の指針は結晶粒の微細化と粒間相互作用の分断であるが、このうち結晶粒の微細化に

は成膜方法, 条件, 組成に加えて前述した磁性膜の薄膜化が効果的である²⁾。しかしながら磁性膜の低減には限界があり, 10 ナノメートル以下の超薄膜となると, 磁性粒の熱擾乱エネルギーが相対的に大きくなるいわゆる“熱揺らぎ”と呼ばれる磁化不安定性が増大し, 保磁力の低下やノイズの急激な上昇を招くため, 21 世紀初頭に実用化が期待される 10 Gb/平方インチ (3.5 インチ媒体 1 枚で 10 GB) クラスの媒体実現の重要なポイントである。

これを打ち破るには, 磁性膜の面内方向に磁化を行う現状の面内記録に比べ, 膜厚方向に垂直磁化する垂直磁気記録が有望と考えられているが³⁾, 再生信号波形が面内記録とまったく異なるなど, 現状の HDD 記録再生技術からの方向転換が必要となるなど, 実用化までには多くの課題がある。

3.3 ヘッド媒体インタフェース (HDI) 技術

HDD の高密度化には記録再生信号の高 SNR 化, 高分解能化が必須であるが, そのためにはヘッド媒体分離長の低減が最も効果的である。HDD には高速性の要求も高く, そのため浮動型ヘッドと呼ばれる極薄の空気層を介して媒体面を浮上するヘッドが用いられている。装置停止時にはヘッドを搭載した概略 2 mm 長のスライダが媒体面上に接触停止し, 媒体が回転すると空気軸受の原理で厚さ数十ナノメートルの空気層を形成する。この方式をコンタクトスタートストップと呼ぶ。ヘッドと媒体が空気層で分離されるため, 摩擦や磨耗の問題が少なく, 高速なトラック間移動 (シーク) や媒体回転数の向上には好都合である。

この浮動型ヘッドにおけるヘッド媒体間の分離長は図-6 に示すように, 媒体の磨耗, 腐食を防ぐ媒体保護膜と, ヘッドの信頼性向上のためのヘッド保護膜と, 浮上量の和で表される。誘導型ヘッドの場合, 浮上量低減努力の結果, 約 0.025 ミクロンといった極限的な浮上量が実用化されるに至った。媒体表面の粗さや, 媒体振動, 空気乱流による外乱などを勘案すると, 媒体回転速度 30 m/s の下でこの浮上量を長期保証することは容易ではない。この領域ではヘッドと媒体粗さの頂点とは間欠的に接触しており, 磨耗ダストのスライダへの付着による浮上不安定を原因としたヘ

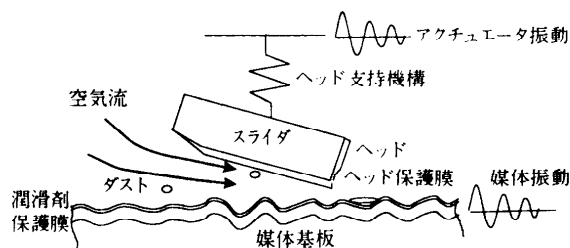


図-6 ヘッド媒体インタフェースの構成

ッドクラッシュを避けることが重要である。そのために, 衝突エネルギーを低減させる軽量スライダの採用や, ダスト発生を防止する潤滑剤, 保護膜の改質などが行われている。

一方, 信頼性高く低浮上を実現するには, 媒体の表面粗さを低減することも重要である。技術的には現状の粗さ (最大値で 25 ナノメートル程度) を低減することは研磨の改良や, 媒体基板のガラス, セラミック化などで可能であるが, 装置停止時に吸着障害が顕在化することがある。吸着とは超平滑な 2 面間が強力にくっついてしまう自然現象で, 起こるとスライダが媒体に固着し, スピンドルモータが起動できなくなる。この相反する問題を解決する方法として, 装置停止時のスライダのパーキングエリアのみ媒体粗さを大きくした, ゴンテクスチャ媒体が実用化され始めている。

大容量化のための重要な技術として, 媒体全面で一定の浮上量を実現することがある。一定浮上量は媒体全面で等密度記録を可能とし, 等周波数記録に対し数十%の容量増加が可能となる。この方式を, 半径ゾーンごとに可変周波数記録を行うマルチゾーンレコーディングと呼ぶ。小型 HDD では回転型ヘッド位置決め機構が採用されており, スライダには最大約 20° の空気流偏向と, 内外周で約 2 倍の速度差が存在する。スライダの浮上量はそれらに強く依存するため, スライダの空気流れ面に数ミクロンの深さの凹みを設け, 発生する負圧力と浮上力を制御可能な负压スライダが開発実用化され, 一定浮上量が実現されている。

今後の HDI における極限的形態として, 浮上量を限りなく零とする“コンタクト記録”の研究も盛んに行われており, 特に接触エネルギーの小さな小型装置での実用化が期待されている⁴⁾。

3.4 記録再生信号処理技術

従来、再生信号検出の主流であったピーク検出方式は、再生信号を等化後に微分し、波形ピークをゼロクロス位置に変換し、データ列の“1”に対応させる方式である。しかし高密度化にともなう再生信号干渉による振幅低下とピーク位置のシフトが発生し、ノイズやジッタによる判定誤りが増大するようになった。これに対処するため、近年再生チャンネルとして再生信号をPR (Partial Response) 等化し、それを最尤 (Maximum Likelihood) 検出する PRML 信号処理が用いられるようになった。図-7 は PRML 信号処理の流れを示している。PR 等化とは再生信号を観測時点でのみ振幅をもつ単位パルス波形 (ナイキスト波形) の重畳波形に等化する方法である。これにより PR 等化器出力は各サンプル時刻 t/T_b (T_b はビット間隔) で3値以上に多値化され、装置の伝送特性に合致するスペクトルをもつ信号を構成できる。PR 等化にはいくつかのクラスがあり、HDD では PR クラス 4 が用いられている。

図-8 は再生信号をサンプル時刻で $\dots, 0, 1, 1, 0, \dots$ となる波形に等化する例である。この等化方法を遅延オペレータ D を用いて $1+D$ と書くと、再生過程は微分、すなわち $1-D$ に相当するため、PR クラス 4 の等化器出力は $(1+D)(1-D)$ 変換となり、 $-1, 0, 1$ いずれかの値をとる。

PR 等化された信号は最尤検出のためビタビ検出器に入力される。ビタビ検出器動作を図-9 のトレリス線図に示す。インタリーブされた奇数時刻データについて説明すると、トレリス (状態変化の過程を示すもの) は一時刻あたり4本の枝で表され、各枝には等化器出力、 $-1, 0, 1$ のいずれかが割りあてられる。ビタビ検出器はノイズ重畳と、入力列の発生制約の仮定のもと、前記3値から、入力信号 y に最も近い値を選択する。選択される枝は図 9(a) に示すいずれかとなる。枝選択の判断は2本の枝に付された値をもとに算出される確からしさ (パスメトリック差 d) であり、各不等式のいずれかを満たす枝接続が決定される。選択された枝を図-9(b) のように時間ごと接続し、最尤データ列が決定する。これにより、検出器出力データは入力に対して SNR にして 2 dB 程度改善される。

現在この PRML 方式は (1, 7) RLL 符号、ある

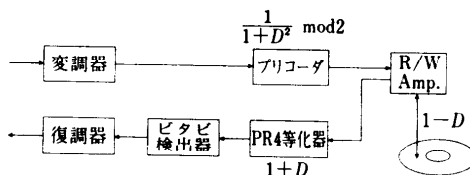


図-7 記録再生チャンネル (PRML)

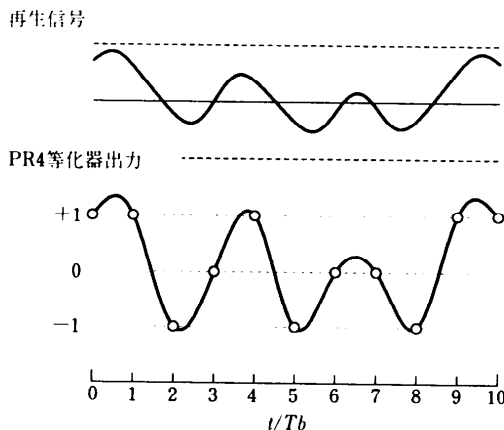


図-8 パーシャルレスポンス等化 (PR 4)

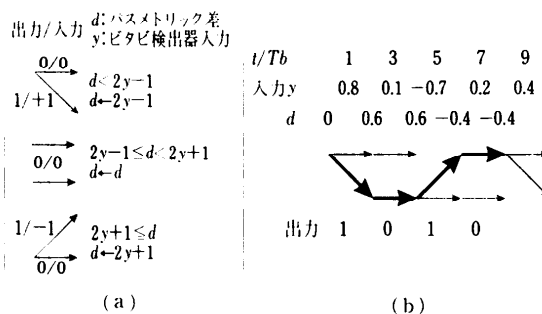


図-9 ML (ビタビ) 検出の構造

いは 8/9 変調符号との組合せが符号化効率や LSI の動作周波数緩和などの理由で用いられる。さらにビット誤りを低減するには拡張 PRML が有効であるが、等化方法が複雑になるために回路規模が急激に拡大する。しかしかつては PRML 方式自体も回路規模の点で実用化は困難と考えられていた。LSI 技術の進展によって拡張 PRML の実用化も目前に迫っており、一段の高密度大容量化へ大きく貢献するものと考えられる。

3.5 サーボ機構技術

高密度大容量化において、トラック密度の向上は重要な技術課題である。一方、機械的なヘッド位置決めを行う HDD では、ヘッド移動 (シーク) の高速化はサーバや大容量データを扱う場合

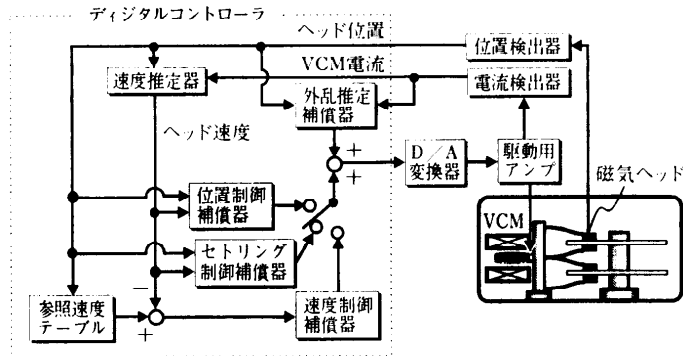


図-10 サーボ機構ブロック図

の重要な性能指標である。

図-10は、HDDのシーク/位置決め系の構成を示している。近年のHDDではDSPなどを用いたデジタルコントローラによって、シーク/位置決め動作が制御される。ヘッドのトラック位置決めは、再生ヘッドからの出力をもとにVCMにより閉ループ制御される。トラック上の一部にはあらかじめサーボ信号が記録されている。そのフィールドをサーボセクタと呼び、全トラック上に一定間隔で存在する。このサーボセクタの数や長さ(バイト長)が冗長であると、ユーザデータが減少するため、1周数十個のセクタが一般的である。

ヘッドがサーボセクタを検出すると、引き続きトラック中心から互いに半トラックピッチだけずれた2つのサーボ信号を連続に読み出す。ヘッドがトラックの中心からずれている場合(オフトラック)、両信号の出力差分が零になるようヘッド位置を制御し、記録再生動作に移る。

一方、トラック間移動では、高速性と精密位置決めとの両立のため、速度、セトリング、位置の各制御補償器をシーク中に順次切り換えてシーク動作が実現される。まず最大加速度100G以上、秒速2m以上の高速性を発揮するため、速度オプザバを用いて参照速度軌道に追従させる。ヘッドが目標トラックに接近すると、ヘッドを引き込むセトリング動作が行われる。セトリング動作は安定化のために、時間がかかりがちであり、PID制御や学習制御などによって高速化がはかられている。セトリング完了後はトラックの揺れに追従した位置制御が実現される。

これら制御はヘッドの目標位置と実際位置の位

置誤差信号をもとにしたフィードバック制御であるが、位置誤差信号はサーボセクタ通過時点で離散的にのみ得られるために、高速移動の制約条件となる。近年の大容量装置では、フィードバック制御に加えて、より高速化のためにフィードフォワードを併用した制御系が用いられることも多い⁵⁾。

位置誤差信号を零にすることは理想ではあるが、トラックはスピンドルや媒体の振動などによって常に非線形性の揺れを生じ、アクチュエータの周波数特性も機械共振によって帯域を制限されるため、トラック追従性には限界があり、高TPI化の妨げになる。現在の転がり軸受によるスピンドルモータの流体軸受化による低振動化や媒体基板の高剛性化、さらにヘッドアクチュエータの機械共振周波数の向上などに加え、制御系の高帯域化などの改善が重要である。それには装置の小型化も有効であり、トラック密度の牽引役はより小型の装置ヘシフトしつつある。

4. おわりに

HDD 1台あたりの容量が巨大化して行く中で、高度な信頼性をもって、大容量化や高速化は実現されなければならない。そのため、HDDはオンクストロームからメートルオーダまでの広範囲な物理量を扱いながら、LSI、機構、化学などの分野のきわめて高度な技術によって支えられている。HDDはほかの記憶装置に比べて、容量、速度、価格のバランスに優れており、今後もさまざまな固有技術のテクノロジーシフトによって高性能化や小型軽量化が推進され、マルチメディアシステムの重要なデバイスとして一段の飛躍が期待

できよう。

参考文献

- 1) 石原ほか：シールド型SVヘッドの波形対称性制御に関する考察，日本応用磁気学会誌，Vol. 20, No. 2(1996).
- 2) Tsuboi, et al.: Offtrack Characteristics on Media Noise for Co-Cr-Ta Films, IEEE Trans. on Magn. Vol. 31, No. 6(1995).
- 3) 大木ほか：ID/MR複合ヘッドを用いた垂直記録媒体のR/W特性，日本応用磁気学会誌，Vol. 19, Supplement, No. S2(1995).
- 4) 佐藤ほか：球面コンタクトスライダにおけるスライダ質量・押し付け荷重の磨耗・跳躍特性への影響，日本応用磁気学会誌，Vol. 20, No. 2(1996).

- 5) Ishikawa, et al.: Head Positioning Control for Low Sampling Rate Systems Based on Two Degree-of-freedom Control, IEEE Trans. on Magn., Vol. 32, No. 3(1996).

(平成8年7月8日受付)



橋本 雅伸

1957年生。1980年東京大学工学部機械工学科卒業。1982年同大学院工学系研究科機械工学専門課程修了。同年日本電気(株)入社。以来、プリンタ、磁気ディスク装置に関する研究開発に従事。現在、同機能エレクトロニクス研究所研究課長、日本機械学会会員。

