

# 2 Tバイトの大容量を実現した ニアライン向け3.5型HDD

3.5-inch Hard Disk Drive with High Capacity of 2 TB for Nearline Storage Applications

阿部 幸雄

石崎 浩一

高石 和彦

川崎 和男

■ ABE Yukio

■ ISHIZAKI Hirokazu

■ TAKAISHI Kazuhiko

■ KAWASAKI Kazuo

エンタープライズストレージ向けHDD（磁気ディスク装置）は一般に“ニアライン向けHDD”と呼ばれ、大容量かつ高い信頼性が求められている。

東芝ストレージデバイス（株）は、今後の市場拡大が予想される大容量ストレージサーバ用HDDの市場に参入するため、ニアライン向け3.5型大容量HDDを開発した。機構部は、3.5型ディスクを4枚搭載し、7,200 rpmの回転数で2 T（テラ： $10^{12}$ ）バイトの大容量にするとともに、高信頼性設計を採用した。サーボ制御部は、3.5型機構の外乱を抑圧するサーボ制御と回転加速度フィードフォワード制御を適用した。制御ファームウェア部は、インタフェースコマンドのリオーダーリング及びコマンドキューイングを最適化して高性能化を図るとともに、磁束漏れに伴うデータ消失にも対応している。

Toshiba Storage Device Corporation has developed a high-capacity 3.5-inch hard disk drive (HDD) suitable for nearline storage applications, which require high capacity, high reliability, and high performance, in order to expand its position in the enterprise storage server market following the consolidation of its HDD business unit.

This model features a storage capacity of 2 TB with four 3.5-inch disks, a rotation speed of 7,200 rpm, and a mechanical design offering high reliability. The servo controller incorporates a method for reducing disk flutter as well as rotational vibration feedforward control. The firmware for hard disk control achieves high performance by optimizing the reordering and queuing interface commands, and supports a data recovery function in the event of adjacent track interference.

## 1 まえがき

情報量の増大とクラウドコンピューティングの普及に伴い、大容量ストレージサーバ用HDDの市場が拡大している。

エンタープライズ向けHDDは、性能、容量、コスト、及び信頼性のバランスによって、ストレージ階層化の分類におけるTier 0～Tier 2に利用される。Tier 0及びTier 1向けには、性能と信頼性がもっとも重視され、2.5型で15,000 rpmや10,000 rpmなどの回転数を持つ既存のエンタープライズ向けHDDが利用される<sup>(1)</sup>。一方、ストレージサーバに相当するTier 2向けには、ビットコストと容量が重視され、デスクトップパソコン（PC）用3.5型HDDよりも高い性能と信頼性を持つエンタープライズ向け3.5型HDDが利用される。このTier 2は、一般に“ニアライン”と呼ばれる。

ニアライン向けHDDには、次の点が求められる。

- (1) 大容量化 多くの枚数の3.5型ディスクを搭載するため、面密度をより低減して高信頼性を確保する。
- (2) 高性能化 データ転送速度と、一定時間当たりの処理速度（IOPS）が重視されるため、高速シークとファームウェア制御が重要になる。
- (3) 高信頼性化 24時間稼働、かつMTBF（平均故障間隔） $1.2 \times 10^6$  hが求められる。

今回、東芝ストレージデバイス（株）は、3.5型ニアライン向けHDDの第一世代として、2 Tバイトの3.5型HDDであるSAS（Serial Attached SCSI（Small Computer System Interface））インタフェース対応のMK2001TRKB、及びSATA（Serial ATA（Advanced Technology Attachment））インタフェース対応のMK2002TSKBを開発した。SASはエンタープライズ向けHDDに用いられているインタフェースであり、エンタープライズ向けストレージサーバに普及している。一方、SATAは、デスクトップPC用HDDのインタフェースとして広く普及しており、コスト重視のニアライン向けHDDのインタフェースとして使用されている。

## 2 MK2001TRKB、MK2002TSKBの概要

今回開発したモデルの主な仕様を表1に示す。

ニアライン向けHDDに対する大容量・高性能・高信頼性の要求を満足するため、様々な工夫を施している。以下の章では、MK2001TRKBとMK2002TSKBの機構部の開発、及びSASインタフェース対応機（以下、SAS機と略記）であるMK2001TRKBのサーボ制御部と制御ファームウェアの開発について述べる。

表 1. 開発したニアライン向けHDDの主な仕様

Main specifications of newly developed HDD for nearline storage

項目	型名	
	MK2001TRKB	MK2002TSKB
インタフェース	SASデュアルポート	SATA
インタフェース速度	6 Gビット/s	3 Gビット/s
記憶容量	2 Tバイト	
ディスク	4枚	
ヘッド	8本	
回転数	7,200 rpm	
連続転送速度	63~140 Mバイト/s	
平均シーク時間(読出し)	8.5 ms	
MTBF	1.2 × 10 <sup>6</sup> h	

### 3 機構部

今回開発したニアライン向けHDDの機構部は、3.5型ディスクを実装する装置外形寸法が101.6(高さ)×147.0(幅)×26.1(厚さ)mmのLFF(Large Form Factor)サイズになる。大容量と要求性能を達成させるために磁気ディスクを4枚実装し、回転数は7,200 rpmの仕様になり、従来のモバイルやエンタープライズ向けの機構設計と比べてディスク径が拡大し、実装枚数が増加する。これらの違いによって発生する可能性がある問題点への対応を検討しながら機構部の開発を進めた。

大容量つまり高トラック密度を達成するためには、データを記録、再生するヘッドの位置決めに高い精度が要求される。HDD内部では、磁気ディスクが回転することで空気流が発生し、これによって風外乱が発生して位置決めに影響を与えるため、この風外乱の影響を抑える必要がある。特に位置決めに影響する磁気ディスク振動と、ヘッドを支えるアクチュエータと呼ばれる部品の振動を抑えるため、それぞれ以下の設計をした(図1)。

媒体振動については、磁気ディスク間の隙間にスクイーズプレートと呼ぶプレートを配置することで磁気ディスクの振動を低減した。磁気ディスクとスクイーズプレートの隙間の設計によって効果が変わるが、今回、振動成分を30%以上低減させている。アクチュエータについては、制振ダンパを付けることで、風外乱や磁気ディスクによって励起されるアームの上下振動や面内ねじれ振動を約10%低減させることができた。

また、スタートとストップに対する長期信頼性と、通常より回転数を下げた低消費電力モードへ対応するため、ヘッドを磁気ディスク上から一時的に退避させるロード・アンロード機構を採用した。

更に、今回開発した機構では次の設計を採用した。

- (1) 流体軸受け(FDB: Fluid Dynamic Bearing) モータ設計 エンタープライズ向けHDDでは、2002年からFDBモータが使用されており、今回採用したFDB構造

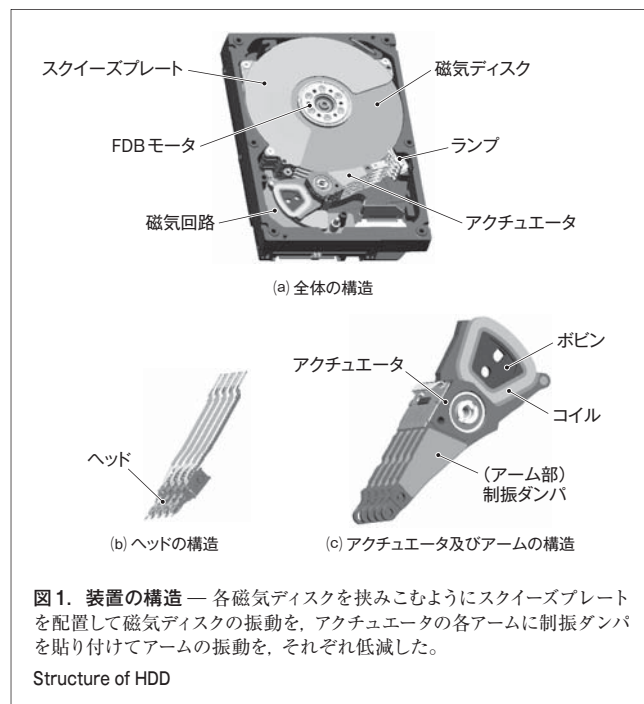


図1. 装置の構造 — 各磁気ディスクを挟みこむようにスクイーズプレートを配置して磁気ディスクの振動を、アクチュエータの各アームに制振ダンパを貼り付けてアームの振動を、それぞれ低減した。

Structure of HDD

は、基本的には3.5型HDD市場も含めて従来から量産実績がある設計である。磁気ディスクの搭載枚数や前述のスクイーズプレートの配置によって影響を受ける消費電力については、軸受けの隙間を調整することで対応した。

- (2) 空気潤滑面(ABS: Air Bearing Surface) 設計

磁気ディスクの搭載枚数がエンタープライズ向けやモバイル向けよりも多いため、これらの積上げ公差によって浮上隙間のばらつきが大きくなる。熱アクチュエータ(DFH: Dynamic Flying Height)によって浮上隙間を制御できるが、その制御範囲には限りがあるため、磁気ヘッドスライダのABS設計として、機械的な公差に対してよりロバストなものとした。またHDDが使用される高度の範囲や環境温度の変化に対しても、ABSで発生する圧力の分布を最適化し、浮上隙間の変化を最小限にとどめている。信頼性を左右する装置内の耐汚損性としては、エンタープライズ向けHDDで培った技術を踏襲している。

これらの機構設計によって、顧客要求を満たす、大容量2 TバイトのHDD製品を実現することができた。

### 4 SAS機のサーボ制御部

ニアライン向けHDDのヘッド位置決め制御を行うサーボ制御部には、高記録密度を実現するために、位置決め精度の確保、高速なシーク性能、及び搭載システム上の外部振動の影響低減が要求される。

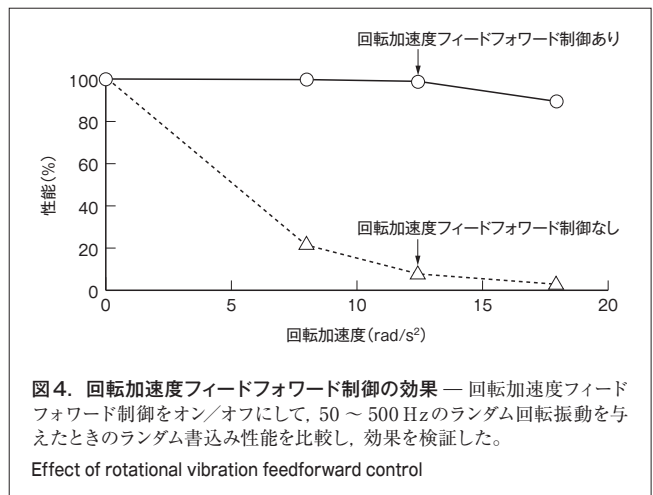
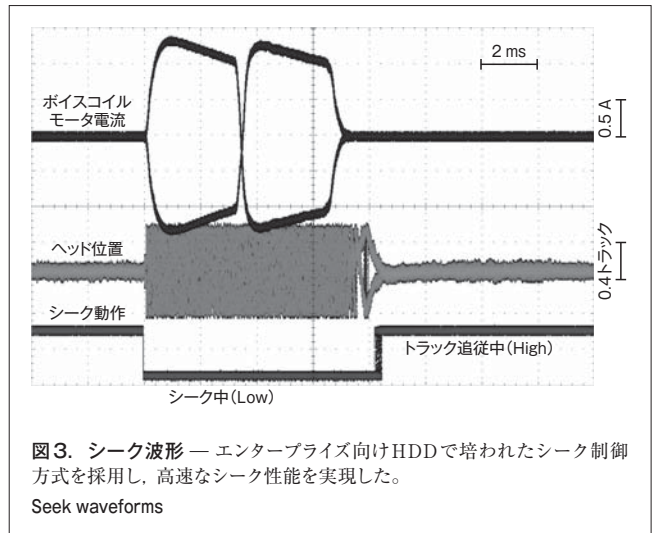
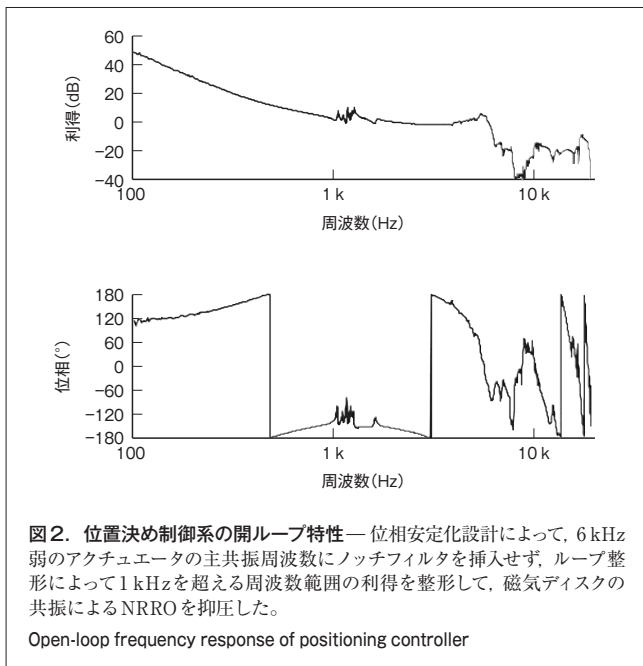
位置決め精度を確保するためには、磁気ディスクの共振に対応する必要があった。ニアライン向けHDDは大容量化のた

め、磁気ディスク枚数やヘッド本数が多い。磁気ディスクの共振特性はヘッド及び装置個体ごとに異なり、更に温度変化によっても変化する。こうした磁気ディスクの共振特性に起因した回転非同期位置誤差 (NRRO: Non Repeatable Runout) への対応が求められる。一方、アクチュエータの主共振周波数は従来の2.5型HDDに比べて低く、サーボ帯域は低くせざるをえない。そこで、位相安定化設計によってサーボ帯域を1.6 kHzに高めるとともに、ループ整形技術を適用してディスク共振に起因したNRROを抑圧することで、各種のばらつきに対応しつつ、位置決め精度を確保した(図2)。

高速なシーク性能の実現のためには、エンタープライズ向けHDDで培われたシーク制御方式を採用し、ランダム性能及びシークエンシャル性能ともに十分な性能を達成した(図3)。また、メディアSTW (Servo Track Writing) によるサーボ信号の高精度記録を実現するとともに、メディアSTWに伴う各種の補正を行い<sup>(2)</sup>、ヘッド切替えを含むシークにおいても性能維持を図った。

この製品が搭載されるシステムでは、空冷ファンや隣接HDDの振動など外部振動が常時加わる。これら外部振動の影響を低減するために、回転加速度フィードフォワード制御を採用した。回転加速度の検出特性とサーボ制御系の特性を基にフィードフォワードコントローラを最適化し、外乱抑圧性能を高めた(図4)。

ここで述べた、位相安定化設計とループ整形による位置決め精度の確保、エンタープライズ向けHDDで培われたシーク制御方式、メディアSTW対応補正技術の利用、及び回転加速度フィードフォワード制御を採用することで、ニアライン向けHDDのサーボ制御に対する各種要求に応えることができた。



## 5 SAS機の制御ファームウェア

### 5.1 2.5型SAS機ファームウェアの流用設計

この製品の制御回路は、先に開発を進めていたエンタープライズ向け2.5型SAS機の回路をベースとしているため、制御ファームウェアも2.5型SAS機のファームウェアを流用して開発した。MPU (Micro Processor Unit) をはじめ、磁気ディスクのデータを読み書きするリードチャネル回路や、SASインタフェース制御のほかにデータバッファやリードチャネル回路とのデータ転送を制御するハードディスクコントローラは、2.5型SAS機と同じチップを使用したため、ファームウェアの95%以上をそのまま流用できた。

### 5.2 磁束漏れによるデータ消失対策

データを磁気ディスクに書き込むとき、書き込みヘッドからの磁束漏れによって、隣接するトラックのデータが少しずつ消えてしまう。1, 2回の書き込みですぐ消えるわけではないが、近年、トラックとトラックの間が極限にまで狭まってきたため、数

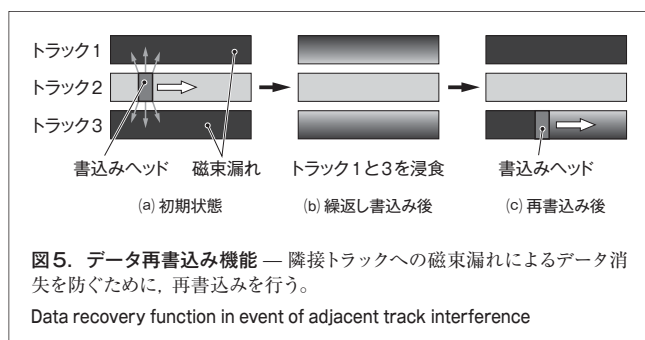
万回の書込みで隣接トラックのデータが読めなくなってしまう場合がある。このデータ消失を防ぐために、近傍トラックの書込み回数をカウントし、一定回数を超えたら、そのトラックのデータを再書込みする機能を取り入れた。基本動作は単純だが、実際に製品に組み込むためには、以下のような様々な工夫が必要になった。

- (1) 書込み回数のカウント 一つの磁気ディスク面に20万以上のトラックがあり、それが8面ある。1トラックごとにカウントしていたのでは、カウンタのテーブルだけで大量のメモリ容量を費やしてしまう。そこで、約10トラックの領域ごとにカウンタを設け、管理することで解決した。
- (2) 磁気ディスクへの確実な書込み 再書込み中に万一電源が切断されても、データを失わないようにする必要がある。そこで、元のトラックに再書込みする前にデータをバックアップ領域に保存し、その後、元のトラックへ再書込みするようにした。再書込み後はベリファイを行い、確実に書き込まれたことを確認するシーケンスを入れた。
- (3) データ アクセス性能を低下させない再書込み データが消失する前に、データ アクセス性能を低下させないで対象トラックのデータを再書込みする必要がある。基本的には、ホストコンピュータからコマンドが来ていないときに再書込みを行うが、書込みコマンドがホストコンピュータから絶え間なく来ている場合には、一定数の書込みコマンドが来たら、その間に割り込んで1トラックずつ再書込みを実施し、ホストコンピュータから見たときの性能低下を最小限にとどめるようにした(図5)。

これらの再書込み機能によって、要求される高トラック密度化が実現できた。

### 5.3 データ アクセス性能

ニアライン向けHDDは、エンタープライズ向けなのでデータアクセス性能も高いレベルが要求される。シーケンシャルアクセス性能は線記録密度(BPI)と1トラックシーク速度、ランダムアクセス性能はシーク速度によってほぼ決まるが、制御ファームウェアとしては、性能重視モデルと同様に、SASインタフェースの両ポート合わせて128個のコマンドキューイング数を持ち、またリオーダーリング(コマンド並べ替え)機能をサ



ポートする。これらの機能とともに読み込みキャッシュ及び書込みキャッシュ機能を有効にすることで、最高の性能を得ることができる。

## 6 あとがき

ニアライン向けに、7,200 rpmの回転数で2 Tバイトの大容量3.5型HDDを新規に開発した。開発にあたっては、機構部、サーボ制御部、及び制御ファームウェア部のそれぞれで、大容量・高性能・高信頼性化に伴う各種の課題を解決した。

当社は今後も、ニアラインを含む高性能かつ高品質なエンタープライズ向けHDDの開発を推進していく。

## 文献

- (1) 有賀敬治. エンタープライズHDDの新たな潮流. FUJITSU. 58, 1, 2007, p.2-9.
- (2) 山田朋良, 他. サーボトラック書込み技術. FUJITSU. 58, 1, 2007, p.29-34.



阿部 幸雄 ABE Yukio

東芝ストレージデバイス(株) ストレージデバイス設計第二部第六担当グループ長。磁気ディスク装置の開発に従事。  
Toshiba Storage Device Corp.



石崎 浩一 ISHIZAKI Hirokazu

東芝ストレージデバイス(株) ストレージデバイス設計第二部第五担当参事。磁気ディスク装置の機構開発に従事。  
Toshiba Storage Device Corp.



高石 和彦 TAKAISHI Kazuhiko

東芝ストレージデバイス(株) ストレージデバイス設計第二部第二担当参事。磁気ディスク装置のサーボ制御開発に従事。  
Toshiba Storage Device Corp.



川崎 和男 KAWASAKI Kazuo

東芝ストレージデバイス(株) ストレージデバイス設計第二部第三担当グループ長。磁気ディスク装置の制御ファームウェア開発に従事。  
Toshiba Storage Device Corp.