回転数15,000 rpmで300 Gバイトを実現したエンタープライズ向け2.5型HDD MK3001GRRB

MK3001GRRB 2.5-inch Hard Disk Drive for Enterprise Use with 300 Gbyte Capacity and 15,000 rpm Rotational Speed

岩本　徹　■IWAMOTO Toru
蒔田　昭彦　■MAKITA Akihiko
笹本　達郎　■SASAMOTO Tatsuro
依光　圭一　■YORIMITSU Keiichi

エンタープライズ向けHDD（ハードディスクドライブ）は，ミッションクリティカルな情報処理システムの主要な記憶装置としてサーバやストレージシステムに搭載されるため，長時間の連続稼働に対する高い信頼性に加えて高速データ転送や高速アクセスといった高い性能が要求され，更に近年は，低消費電力化も求められている。

東芝は，これらの市場ニーズに応え，回転数15,000 rpmで記憶容量300 Gバイトの2.5型HDD MK3001GRRBを開発した。この装置は，最大200 Mビット/sの高速連続データ転送性能，及び平均シーク時間2.7 msの高速アクセス性能を実現するとともに，アイドル時4.0 Wの低消費電力を達成している。

Hard disk drives (HDDs) for enterprise use are primary storage devices installed in mission-critical information systems such as servers and storage systems. In this field, HDDs must be able to provide high reliability for long-term continuous workloads (24 hours a day, seven days a week), as well as high performance including a high data transfer rate and high-speed access. Low power consumption has also become essential in recent years.

In response to the needs of the market, Toshiba has developed the MK3001GRRB 2.5-inch HDD for enterprise use with a capacity of 300 Gbyte and a rotational speed of 15,000 rpm. The MK3001GRRB achieves a high data transfer rate of 200 Mbit/s, a fast average seek time of 2.7 ms, and low power consumption of 4.0 W in idle state.

1　まえがき

クラウドコンピューティングの普及に伴い，様々な情報を蓄積し管理するサーバやストレージシステムには，これまで以上に高い性能が求められる。エンタープライズ向けHDDは，ミッションクリティカルな情報処理システムにおける主要な記憶装置として，次に示すように，長時間の連続稼働に対する高い信頼性に加えて，高速データ転送や高速アクセスなど高い性能が要求される。

(1)　高信頼性　　5年間にも及ぶ昼夜連続稼働に対して高い信頼性が求められる。

(2)　高性能　　短時間に大量のデータを処理するため，高いデータ転送速度と高いアクセス速度が重視される。

また，近年の省エネやグリーン化製品の流れから運用管理コストや低消費電力化に対する要求も強まっている。

東芝は，これらのニーズに応えて，回転数15,000 rpmで記憶容量300 Gバイトのエンタープライズ向け2.5型HDD MK3001GRRBを開発した。

2　装置概要

今回開発した2.5型HDD MK3001GRRBの主な仕様を**表1**に示す。回転数は15,000 rpmで，記憶容量は300 Gバイトである。この装置は，最大200 Mバイト/sの高速連続データ転送が可能であり，平均シーク時間2.7 msの高速アクセス性能に加え，アイドル時4.0 Wの低消費電力を兼ね備えている。インタフェースは，エンタープライズ向けHDDの主流であるSAS（Serial Attached SCSI（Small Computer System Interface））2.0を採用した。

記憶容量300 GバイトのMK3001GRRBに加えて記憶容量147 GバイトのMK1401GRRB（主な仕様を表1に並記）を，

表1．エンタープライズ向け2.5型HDD MK3001GRRBの主な仕様
Main specifications of MK3001GRRB 2.5-inch HDD for enterprise use

項　目		仕　様	
		MK3001GRRB	MK1401GRRB
インタフェース		SAS 2.0	
インタフェース速度　（Gビット/s）		6	
記憶容量　（Gバイト）		300	147
ディスク　（枚）		2	1
ヘッド　（本）		4（HDIセンサ搭載）	2（HDIセンサ搭載）
消費電力　（W）	アイドル時	4.0	3.8
	低回転数時	3.0	2.8
回転数　（rpm）		15,000	
連続データ転送速度（Mバイト/s）		147～200	
平均シーク時間（読出し時）（ms）		2.7	
MTBF　（10^6 h）		1.6	

MTBF：平均故障間隔　　HDI：Head Disk Interface

また，オプションとして，暗号化機能を搭載したMK3001GRRR及びMK1401GRRRをラインアップした。

次章以降に，高信頼性かつ高性能を実現するために開発したハードウェア及びファームウェア技術について述べる。

3　ハードウェア技術

この装置の内部構造を**図1**に示す。装置外形は，2.5型HDDの業界標準規格SFF-8201/8223に準拠しているが，モバイル用が厚さ9.5 mmの薄型であるのに対し装置の厚さを15 mmとすることで高いベース剛性とカバー剛性を確保し，高速回転を実現している。設計ではCAE（Computer Aided Engineering）技術を駆使し，有限要素法（FEM：Finite Element Method）解析などで最適化を行い，高性能，低騒音，及び低消費電力を実現した。

15,000 rpmの高速回転は，振動と騒音の少ない流体軸受（FDB：Fluid Dynamic Bearing）を用いたモータで駆動することで実現する。軸受は，HDDの寿命と信頼性を左右する最重要機構部品であるため，実績のある従来機種と同じ構造を用いた。FDBモータに搭載される2枚の磁気ディスクは，外径57 mm，板厚1.27 mmを採用した。2枚の磁気ディスクの間には，図1に破線で示す整流板を配置した。このディスク外周の3/4を覆う整流板は，高速で回転するディスクの振動を抑制する効果と，高速回転により発生する空気流を少なくする効果があり，ヘッドを目的のトラックに位置決めする際の外乱振動成分の影響を低減することができる。

搭載された磁気ディスクの各面に対してデータを読み書きするヘッドは，ヘッド4本が1基のキャリッジに搭載される。キャリッジは，一対の高精度小型玉軸受によって回動自由にベースに取り付けられ，フラットコイルと対向型マグネットで構成されたボイスコイルモータ（VCM）で駆動される。

図1．MK3001GRRBの内部構造 ― HDD機構部設計の最適化により，高信頼性，高性能，低騒音，及び低消費電力を実現した。
Internal structure of MK3001GRRB

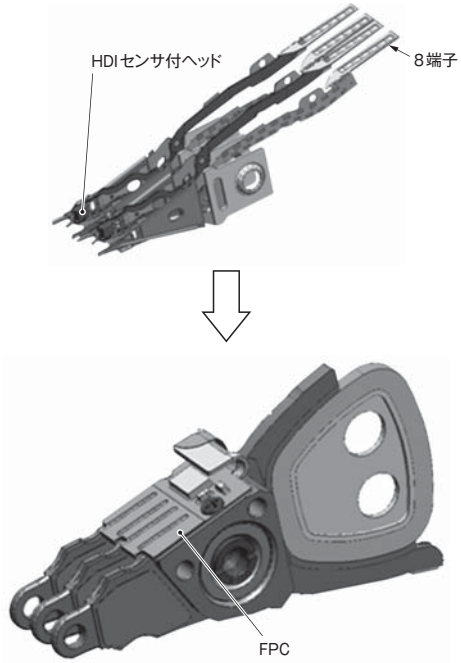

図2．HDIセンサのFPCへの接続 ― HDDを大容量化するための技術である機能素子HDIセンサの搭載には，高密度メカ実装技術を用いる。
Connection of head-disk interface (HDI) sensor to flexible printed circuit (FPC)

300 Gバイトの記憶容量を実現するため，ヘッドには，新たに微小な熱に反応するHDI（Head Disk Interface）センサを内蔵した。近年のHDDは，ヘッドの記録再生素子部にヒータが配置されており，ヒータパワーを制御することで記録再生素子と磁気ディスクとのクリアランスを微細に制御し，高い面記録密度を実現している。HDIセンサは，このクリアランス制御を更に高精度に行うための機能素子である。HDIセンサを搭載するため，従来の読出し，書込み，及びヒータ用の各2端子に2端子を追加した合計8端子の接続をそれぞれのヘッドに対して行う必要がある。ヘッドの各端子は，高い精度で位置決めされ，フレキシブルプリント基板（FPC）に接続される。HDIセンサを内蔵したヘッドをキャリッジに搭載されたFPCに取り付ける際の模式図を**図2**に示す。

平均2.7 msの高速シーク動作を実現するには，強力なVCMと軽くて振動に強いキャリッジ構造を併せ持つ高性能アクチュエータの設計が重要である。VCMの設計では，磁場解析により形状と材料を最適化することで高い効率を確保した。ヘッドを保持するキャリッジは，加速時と減速時にVCMから印加される大きな力に対して，不要な振動を起こさず，また，発生した振動がすぐに減衰するよう，ハードウェア全体での大規模FEM解析を行い（**図3**），機構部品の形状及び構成を最適化した。

一般論文

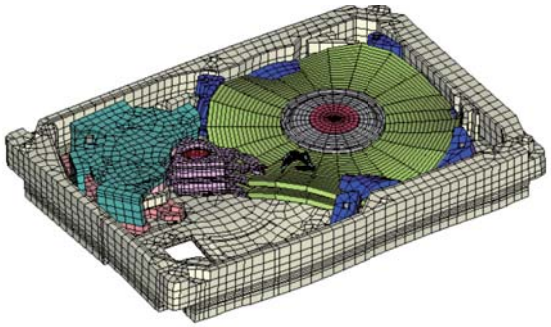

図3．FEM解析の一例 ― HDD機構部全体の大規模FEM解析を行って，機構部品の形状及び構成を最適化し，高性能アクチュエータを実現した。

Example of finite element method (FEM) analysis

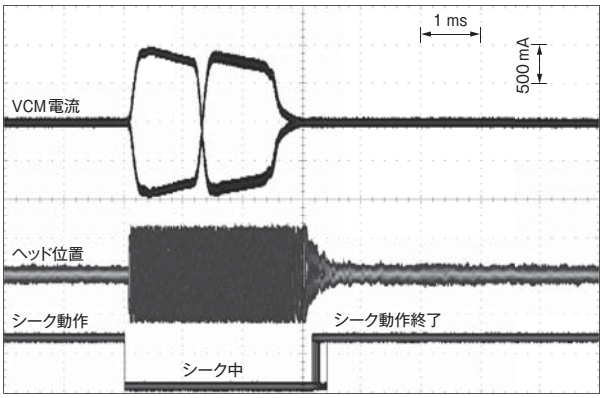

図4．シーク動作時の波形 ― 往復時波形はフルストロークの1/3の距離であり，最大電流の場所では200 G以上の加速度が出ている。

Seek waveform

4　ファームウェア技術

この装置のファームウェアは，次の二つの制御部から構成されている。

(1)　サーボ制御部　　FDBモータや，ヘッド位置決め及びシーク用のVCMなどの制御を行う。

(2)　コントローラファームウェア制御部　　ホストからのコマンドに対するインタフェースや，サーボ制御部及びキャッシュ制御部とのインタフェースを制御する。

4.1　サーボ制御部

この装置では，平均シーク時間2.7 ms（読出し時）を実現している。キャリッジに対して200 G以上の加速度で加速と減速を行い，最高速度は3 m/sに達する。この急峻（きゅうしゅん）な加速及び減速動作の後，速やかにデータを読み書きする目標のトラックに対して安定に追従する必要がある。トラック幅は約90 nmであるが，ヘッドはその中央に位置決めしなければならない。このため，フィードバック制御ループを大幅にゲインアップした。シーク時の電流波形も，アクチュエータの共振周波数を考慮した設計とし，キャリッジの残留振動や騒音の低減を行った（**図4**）。

これらを実現するために，サーボサンプル数の増加や，処理を行うプロセッサの高速化，ループ形状の工夫などを行った。

エンタープライズ向けHDDでは，HDD内部の振動だけでなく，外部からの振動についても考慮する必要がある。サーバやストレージシステムでは，冷却ファンからの振動に加えて，搭載された複数のHDDが振動源になる。これらの振動による性能低下を抑制するため，RV-FF（Rotational Vibration Feed Forward）技術を採用し，前述のアクチュエータフィードバック制御の改善に加え，RV-FFの周波数帯域を広げることで，大きな効果を上げている（**図5**）。

この装置では，シーク動作終了後やデータの書込みや読出しがないときなどは，各種回路を個別にパワーダウンしたり，

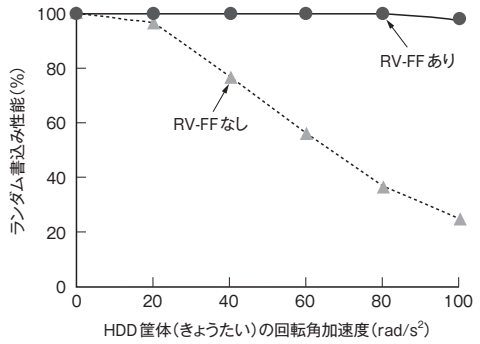

図5．RV-FFの効果 ― RV-FFなしでは20 rad/s^{2}から性能低下が見られるが，RV-FFありでは100 rad/s^{2}まで向上している。これにより，耐振動性が大幅に改善された。

Comparison of performance with and without rotational vibration feed forward (RVFF) servo

ディスク回転数を低下させたりして，復帰時間と省電力効果に応じてきめ細かくパワーセーブをサポートすることで消費電力の低減を行っている。また，FDBモータの起動からヘッドのロード，アンロードの動作では，制御の最適化を図り低騒音化を実現した。

こうした技術を採用することで，高いパフォーマンスと低消費電力及び低騒音を実現している。

4.2　コントローラファームウェア制御部

この装置は，業界標準のSAS 2.0に対応し6 Gビット/sのインタフェース速度を実現している。

保守性及び高信頼性と，高機能，高性能，及び低消費電力化について次に述べる。

4.2.1　保守性及び高信頼性　　HDDで致命的な障害を事前に警告するためのSMART（Self-Monitoring Analysis Reporting Technology：故障予測自己診断）機能を備え，詳細な故障解析のためのログ機能を充実させた。また，システ

ムからの指示により自己診断を行うDrive Self Test機能を実装し，オンデマンドでHDDの状態診断を可能にした。

また，エンドツーエンドのデータ保証（部品故障時の異常検出機構）を備え，磁気ディスク上の欠陥回避機能により，常時，データの信頼性を確保している。更に，バックグラウンドで次の処理を行い，長期間連続動作での信頼性を高めている。

(1) BMS（Background Media Scan）機能　一定時間ごとにデータ部を全面スキャンし，回復可能なエラーを早期に検出し自動修復する。

(2) SA（System Area）セーブ機能　ユーザーの使用可能領域からは切り離されたSA領域にHDDのシステム情報を定期的にセーブすることでログ機能を充実させる。

4.2.2 高機能，高性能，及び低消費電力化　HDDの基本機能である次の3機能に対して，処理性能を最適化し改善を図った。

(1) リオーダリング機能　受け付けたコマンド（128個まで）の実行順序を最適化することで最短時間でコマンドの処理を行う。

(2) データキューイング機能　書込みデータをキャッシュ領域に格納後，複数コマンドの書込み処理をまとめて実行することで処理時間を短縮する。

(3) キャッシュ機能　磁気ディスクへ書込みや読出しをするデータを一時的に保持し，コマンド応答を高速化する。また，様々なホストアクセス形態に応じて処理を最適化する。

また，データバッファ容量を従来の16 Mバイトから32 Mバイトに拡張することで，キャッシュヒット率を向上させて高性能化を実現した。

更に，パワーセーブ機能として，段階的な自動パワーセーブとコマンドによる強制パワーセーブを導入し，高性能と低消費電力を両立させている。

オプションとして，HDD単体で暗号化を行うSED（Self Encryption Drive）機能，及びシステム全体としてのデータ保証を制御するためのDIF（Data Integrity Field）機能をサポートしており，データ秘匿機能も充実させた。

5 あとがき

エンタープライズ向けHDDとして，回転数15,000 rpmと平均シーク時間（読出し時）2.7 msを実現した高性能な2.5型HDDを開発した。開発にあたっては，機構部，サーボ制御部，及びコントローラファームウェア制御部で新技術を採用し，高信頼性かつ高性能を実現した。今後も，エンタープライズ市場に向けて，更なる高性能かつ高品質なHDDの開発を推進していく。

岩本　徹　IWAMOTO Toru
セミコンダクター＆ストレージ社 ストレージプロダクツ事業部
HDD製品技術第二部グループ長。HDDの開発に従事。
Storage Products Div.

蒔田　昭彦　MAKITA Akihiko
セミコンダクター＆ストレージ社 ストレージプロダクツ事業部
ストレージプロダクツ設計開発センター参事。HDDの機構開発に従事。日本磁気学会，電子情報通信学会会員。
Storage Products Div.

笹本　達郎　SASAMOTO Tatsuro
セミコンダクター＆ストレージ社 ストレージプロダクツ事業部
ストレージプロダクツ設計開発センター参事。HDDのサーボ開発に従事。
Storage Products Div.

依光　圭一　YORIMITSU Keiichi
セミコンダクター＆ストレージ社 ストレージプロダクツ事業部
ストレージプロダクツ設計開発センターグループ長。HDDのファームウェア開発に従事。
Storage Products Div.

一般論文