

瓦記録技術を適用したデータセンター向け 20 Tバイト 3.5型HDD

20 Tbyte 3.5-inch HDDs for Data Centers Applying SMR Technologies

下村 和人 SHIMOMURA Kazuhito

インターネット上でプラットフォームを提供するデータセンター事業は、急速に拡大しており、膨大なデータに対応できる大容量ハードディスクドライブ (HDD) の需要が高まっている。

東芝デバイス&ストレージ (株) は、HDDの大容量化をけん引する瓦記録 (SMR: Shingled Magnetic Recording) 方式のHDDへの適用を推進している。ヘッドの位置決め予測精度を向上させたサーボ技術及びSMR方式の特長を生かした記録済みデータの品質改善技術をMG09シリーズに適用することで、業界最大容量^(注1)の20 T (テラ: 10^{12}) バイトのデータセンター向け3.5型HDD MA09シリーズを開発した。

With the rapid expansion of data center businesses offering platforms to create various Internet services, demand has recently been growing for larger capacity hard disk drives (HDDs) so as to store huge volumes of electronic information.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been taking the initiative in developing shingled magnetic recording (SMR) technologies, which are a strong driver of the trend toward further increasing the storage capacity of HDDs. Taking advantage of the features of SMR, these technologies include a servo technology capable of improving the prediction accuracy of head positions and a redundant sector processing technology capable of improving the quality of recorded data. We have now developed the MA09 series of 3.5-inch HDDs for data centers with the industry's largest capacity of 20 Tbytes through the application of these technologies to the MG09 series HDDs.

1. まえがき

高速通信インフラの成長やAIの発達で、加速度的に増加する電子情報は、2次活用の視点においても、1次保管の重要性が高まっている。

また、大量の電子情報を、いかに安価かつ低消費電力で保存するかといったソリューションは、データ社会の基盤を担うストレージシステムを構築する上で必要不可欠とされている。

こうした背景の中、データセンター向け大容量HDDの需要は、年々、増え続けている。東芝デバイス&ストレージ (株) は、これまで培ってきたSMR技術をデータセンター向け大容量HDDに適用し、業界最大容量の3.5型HDDを開発した。ここでは、その概要、及び大容量・高品質化に向けて適用した技術について述べる。

2. 装置概要

今回開発したデータセンター向け3.5型HDD MA09シリーズは、CMR (Conventional Magnetic Recording) 方式を用いた3.5型HDD MG09シリーズに、SMR方式を

適用して実現した (表1)。

MG09シリーズは、18 Tバイトの記憶容量を達成するために、記録ヘッドに当社で初めてFC-MAMR (Flux Control Microwave-Assisted Magnetic Recording: 磁束制御型マイクロ波アシスト記録) 方式を採用した3.5型HDDである⁽¹⁾。MA09シリーズは、MG09シリーズの全ての部品を活用するとともにSMR技術を適用することで、MG09シリーズに対して面記録密度を約15%増やし (後述のフォーマットロスを除く)、業界最大の記憶容量20 Tバイトを実現した。

トラックの重ね記録でトラック密度を増やすSMR方式の特長を最大限に生かすため、線記録密度 (ディスク円周方向の記録密度) を約6%減らし、トラック密度 (ディスク半径方向の記録密度) を約23%増やす設計で、面記録密度を最大化した。

また、データセンター顧客の要求に応えるため、WP (Write Pointer) によるホストシステム (以下、ホストと略記) のアクセス方法を規定した標準規格 (ホストマネージド仕様のSMRファームウェア (FW) タイプ)^{(2), (3)}を採用すると同時に、20 Gバイト (総容量の0.1%) をCMR方式でアクセスできる領域として確保することで、付加価値を高めた。

(注1) 2021年7月現在、高さ26.1 mmの3.5型HDDとして、当社調べ。

表1. MG09シリーズとMA09シリーズの仕様比較

Comparison of main specifications of MG09 series and MA09 series HDDs

項目	MG09シリーズ MG09ACA18TA/ E/AY/EY	MA09シリーズ MA09ACA20TAM/ EM
記録方式	CMR	SMR
装置容量	総容量 (Tバイト)	18
	CMR容量 (Tバイト)	18
SMRファームウェアタイプ	—	ホストマネージド (データセンター 顧客向け仕様)
インターフェースと速度 (Gビット/s)	SATA-3.3, 6	
磁気ディスク枚数 (枚)	9	
磁気ヘッド本数 (本)	18	
エネルギーアシスト記録	FC-MAMR	
線記録密度 (平均) (kビット/mm)	98.7	92.4
トラック密度 (平均) (kトラック/mm)	18.1	22.3
面記録密度 (平均) (Mビット/mm ²)	1,784	2,060
バッファサイズ (Miバイト)	512	
最大連続データ転送速度 (Miバイト/s)	268	249
MTTF (万時間)	250	
外形寸法 (mm)	101.85 (幅) × 147.0 (奥行き) × 26.1 (高さ)	
質量 (g)	720 (最大)	

SATA: Serial Advanced Technology Attachment MTTF: 平均故障時間

3. 記録領域の構成

HDDの記録領域には、HDDの内部動作に必要なHDDシステムデータ記録領域とホストがアクセスできるユーザーデータ記録領域があり、各磁気ディスクの記録領域の最外周半径位置から順番に配置している。ユーザーデータ記録領域は、外周側にCMR方式で動作させる記録領域を配置し、内周に向かう残りの領域をSMR方式で動作させる記録領域とした(図1)。

CMR領域の容量(20 Gバイト)は小さいが、ホストがファイルシステムの管理情報を保存するなどの目的でこの領域を使用するため、重要な役割を担っている。

SMR領域は、SMRバンド(互記録方式で記録する領域)とガードバンド(隣接バンドの先頭トラックのデータを破壊しないようにする非記録領域)で構成されており、トラックを重ね記録するSMRバンドは256 Mi(メビ:2²⁰)バイト(顧客要求)の容量にした。SMR領域には、7万個以上のSMRバンドがあり、各SMRバンドは、ホストマネージド仕様で規定されているWP(データ記録済みの最終位置)を示す指標を持っている。ホストは、SMR方式のHDD(以下、SMR HDDと略記)との間でWPを介してデータ記録位置の効率的な管理を行う^{(2), (3)}。

ユーザーデータを記録できない、HDDシステムデータ記録領域やガードバンド領域は、フォーマットロス領域と呼ぶ。

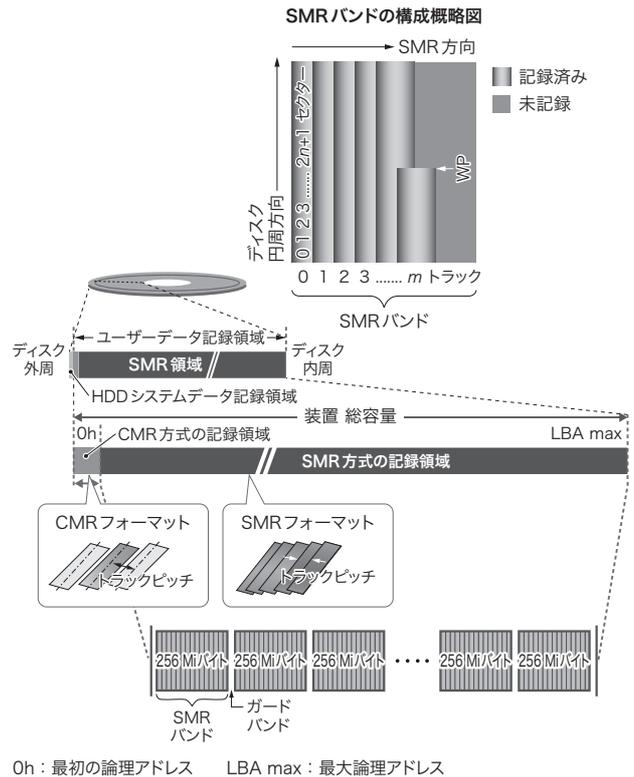


図1. 記録領域の構成

各ディスクの外周側から、HDDシステムデータ記録領域、ユーザーデータ記録領域が配置され、ユーザーデータ記録領域は、CMR領域と256 MiバイトのSMRバンドとガードバンドから成るSMR領域で構成されている。

Configuration of recording area of disk

MA09シリーズにはSMRに特有の約4%のフォーマットロスがあり、今後の大容量化に向けて、フォーマットロスの更なる削減を進めていく。

4. データ品質確保と性能低下抑制の両立

HDDは、顧客の様々なラックに搭載され、固定方法も千差万別である。ラックには、HDD以外に種々の回路基板や電源などの発熱部品も搭載されている。HDDを含めて、こうした発熱部品を冷却するために、ラックにはファンが搭載されており、所定の速度で回転している。ファンのような振動部品は、nmオーダーレベルで制御が必要なヘッドの位置決め精度に間接的に悪影響を与える。データ記録時に、この悪影響が大きくなると、隣接トラックのデータ品質を劣化させる可能性があるため、ヘッドの位置決め誤差がWIL(Write Inhibit Level: ライト禁止しきい値)を超過すると、データ記録を一時中断する仕組みを適用している^{(3), (4)}。

サーボデジタルコントローラーは、ヘッドの検出位置に基づいて、所定のトラックにヘッドを位置決め制御する。一方、データ記録の一時中断は、現在時刻のヘッドの検出位

置と予測位置（次のサンプリングタイミングの未来時刻で、ヘッドが位置決めされるであろう位置）に対して、WILを超過することで判定される。予測位置には、誤差が含まれる。検出位置と予測位置との誤差が大きくなると、過剰判定によるデータ記録の一時中断回数が増加し、データ記録時の性能低下を招く。

ヘッドの予測位置は、現在時刻と過去時刻の2サンプル分の検出位置情報を元に算出する従来法に対し、サーボデジタルコントローラーの内部パラメーターを追加することで、予測精度を向上させた。検出位置と予測位置の誤差が小さくなったことで、適切なWIL設計値の元に、隣接トラックデータの品質確保とデータ記録時の性能低下抑制を両立できた。

5. データの誤り率の改善

隣接トラックデータの品質確保と性能低下抑制を両立させるヘッドの予測位置の精度向上に加え、データの誤り率を改善することで、記録データの更なる品質向上を行った。

ホストから送信された記録データは、HDDの筐体（きょうたい）外部の電気回路に配置されたDRAMバッファを経由し、SoC (System on a Chip) で所定の信号処理を実施

後、筐体内部のヘッドアンプ回路を通して、磁気ヘッドに送られる。磁気ヘッドは電磁変換を行い、記録データを磁気ディスクに磁気情報として記録する。磁気情報を再生する場合は、データ記録の逆のプロセスを経て、ホストに再生データとして返送する。

当社は、記録済みセクター（HDDが扱う最小単位データの塊で、例えば、4,096バイト）の誤り率の改善を目的に、SMRバンドの各トラックのセクター最後尾に冗長セクターを付加する、誤り率改善技術を開発してきた。

5.1 誤り率改善の冗長セクター処理

データを記録する場合、ホストから送信された1トラック分のセクターに対して、排他的論理和 (XOR) 演算を実行し、DRAMバッファ内で冗長セクターを生成する。冗長セクターは、他のセクターと同様に、SoCでRLL (Run Length Limited) 変調処理やLDPC (Low Density Parity Check) 符号化処理の一般的なHDDの信号処理を経て、各トラックのセクター最後尾に記録される（図2(a)）。

データを再生する場合、ヘッドアンプ回路を経由したセクターは、SoCで、フィルター処理、尤度（ゆうど）復号、LDPC復号処理を行う。このとき、誤り率の高いセクターは、更に冗長セクター処理によって、誤り率の改善を行う。

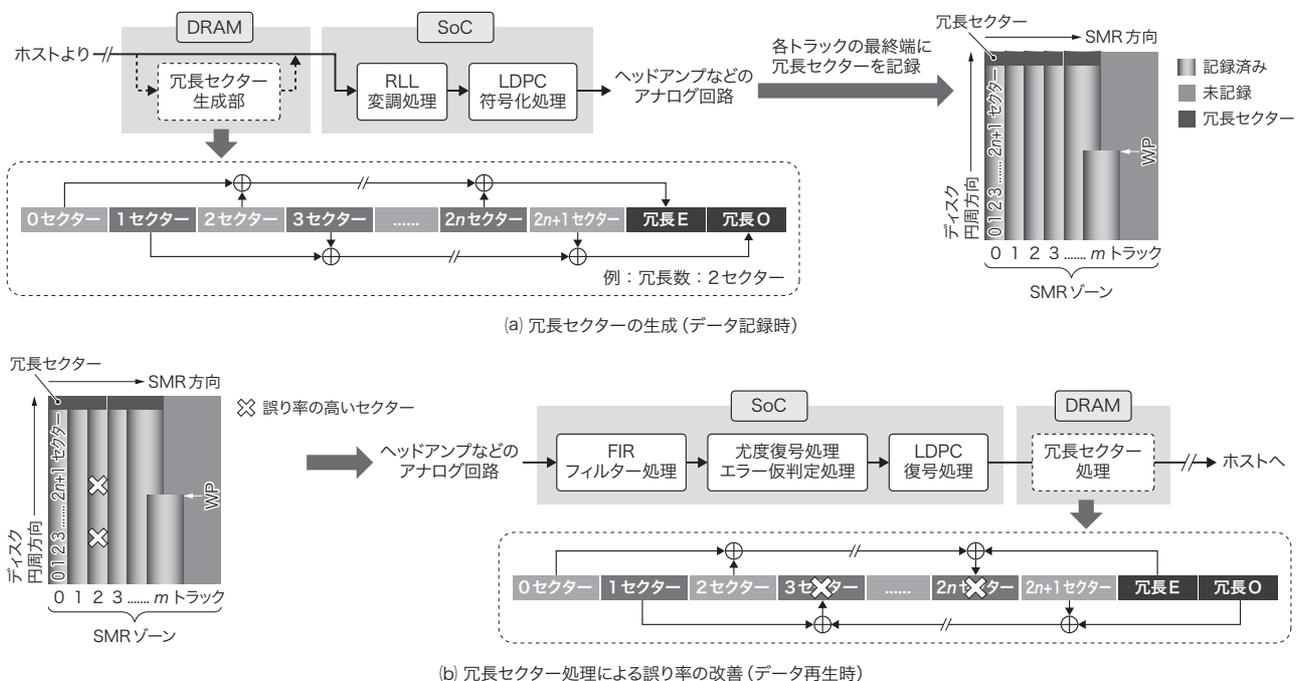


図2. 冗長セクター処理の概要

データを記録する際には、冗長セクターを生成し、SMRバンド内の各トラックのセクター最後尾に記録する。データを再生する際には、誤り率の高いセクターが見付かると、冗長セクターを活用して訂正を行うことで、誤り率を改善する。

Overview of redundant sector processing

このような動作を経て、高信頼のデータをホストに返送する(図2(b))。

トラック内の任意のセクターを書き換えてできるCMR方式では、冗長セクター処理が煩雑化し、オーバーヘッドが増加するため、同様に適用するのは難しい。

一方、SMR方式では、SMRバンド内のセクターを連続的に記録する特長を生かすことで、冗長セクター処理の簡素化を実現でき、実装コストの節約にもつなげることができた。

5.2 SoCの機能に取り込んだ冗長セクター強化処理

MA09シリーズでは、冗長セクター処理をSoCに取り込み、信号処理部と連携させることで、効率的に誤り率の改善を行う冗長セクター強化処理技術を開発し、更なるデータ信頼性改善を実現した。

データを記録する場合、SoC内部でRLL変調処理とLDPC符号化処理を実施後、冗長セクター生成部で冗長セクターを生成する。冗長セクターは、5.1節で述べたように、各トラックのセクター最後尾に記録する(図3)。

データを再生する場合、誤り率の高いセクターがLDPC復号処理で見付かると、フィルター処理部のメモリーに該当セクターの情報を一時保管する。後段の冗長セクター処理は、尤度復号処理、及びLDPC復号処理と連携し、誤り率が高いと推定されるセクターにおいて、個々のビット(例えば、1セクターは、約38,000ビットで構成されている)に対して、尤度復号器から出力されるビットの1/0判定の確率値を評価しながら訂正を行う。こうした一連の処理で、効率的な誤り率の改善を行った(図4)。

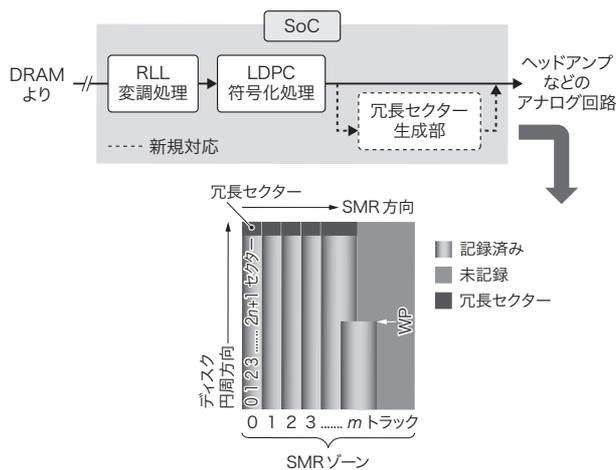


図3. SoC内部での冗長セクター生成

冗長セクター生成を効率化するため、冗長セクター処理を機能の一部としてSoCの内部に取り込んだ。

Redundant sector generation inside system on chip (SoC)

冗長セクター処理、及び冗長セクター強化処理による誤り率改善効果(訂正可能セクター数)と、これまで開発してきたSMR HDDモデルへの適用状況を、表2に示す。

従来の冗長セクター処理は、2セクター分の冗長セクターを各トラックのセクター最後尾に付加し、最大2セクターまで誤り率の高いセクターを訂正できたのに対し、MA09シリーズに適用した冗長セクター強化処理は、1セクター分の付加冗長セクターで最大13セクターに対応でき、6.5倍まで訂正能力を拡大し、データ品質の改善を実現した。

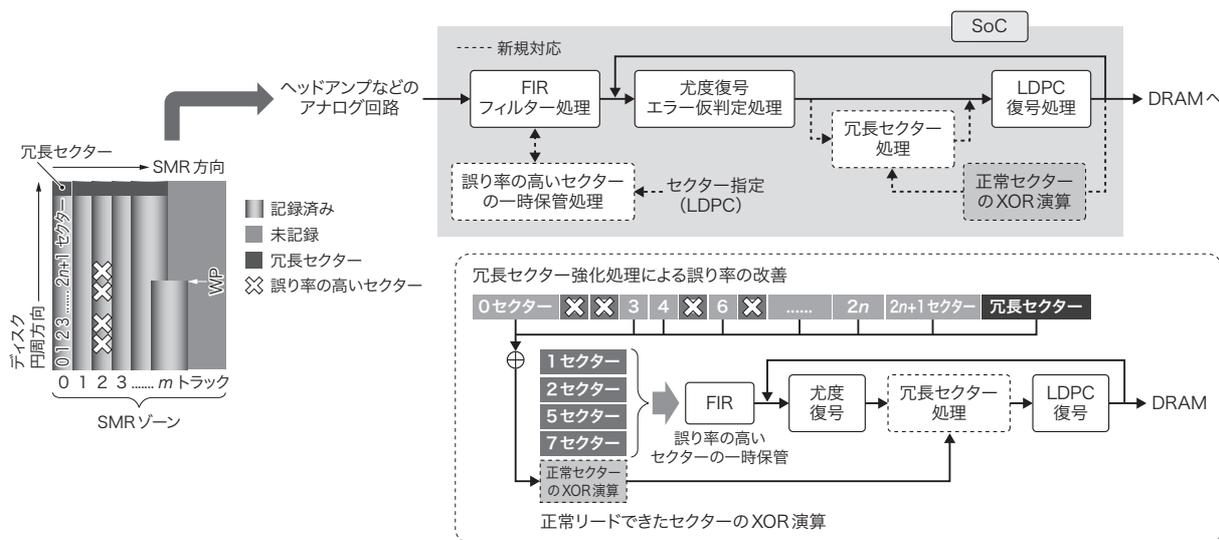


図4. SoC内部での冗長セクター処理

フィルター処理部のメモリーに誤り率の高いセクターの情報を一時保管し、冗長セクター処理部をSoCの信号処理部と連携させることで、訂正能力を強化している。

Redundant sector processing inside SoC

表2. 冗長セクター処理によるデータ品質改善効果

Improvement of data quality of HDDs using redundant sector processing

	付加する冗長セクター数	誤り率改善セクター数	適用モデル
冗長セクター強化処理	1セクター	13セクター(最大)	3.5型 データセンター向け 20 Tバイト/9枚 (MA09シリーズ)
冗長セクター処理	2セクター	偶数/奇数の各1セクター	3.5型 データセンター向け 17 Tバイト/9枚 3.5型 デスクトップ向け 2 Tバイト/枚 2.5型 モバイル向け 1 Tバイト/枚

6. 今後の展望

当社は、5年以上にわたってSMR技術の実用化を進め、その間、パソコン・ゲーム用途の2.5型HDDや、デスクトップパソコン用途の3.5型HDD、データセンター向けの3.5型大容量HDDなどに、SMR技術を展開してきた。特に、データセンター向けSMR HDDは、ニアライン向け3.5型HDDをベースモデルに、全ての構成部品を共通化してSMR技術を適用することで、大容量化を実現してきた。

顧客の要望に応えるため、大容量化を加速する中で、磁気ヘッドや、磁気媒体、信号処理回路などのキー部品開発が必要不可欠であるのと同じように、SMR方式の適用も常態化しつつある。こうした中、今回、開発した冗長セクター強化処理のようにSMR方式と親和性の高い技術の開発は、ますます重要になってくる。

一方、SMR HDDは、HDDの特長であるランダムライト性能が劣っている。この問題を解決するために、ホストマネージド仕様が米国の情報技術規格国際委員会 (INCITS: International Committee for Information Technology Standards) で制定され、ホストは、SMR HDDとの間でWPを介してデータの記録位置の効率的な管理を行うことで、性能改善を行うようになってきた^{(2), (3)}。データセンター顧客を中心として、ホストマネージド仕様のSMR HDDの採用が進んでいるが、今後、監視カメラやNAS (Network Attached Storage) といったアプリケーション分野でも、様々な顧客がホストマネージド仕様に対応するシステムを開発することで、大容量SMR HDDの用途が、更に拡大していくことが期待される。

また、既存のアプリケーションとの整合性を考えて、1台のSMR HDDに、必要に応じてCMR方式でデータを保存したいという要望もあり、SMR方式で記録する領域とCMR方式で記録する領域を変換する新たなコマンド規格が、INCITSで提唱されている。こうした、更なる発展が進んでいるSMR方式を適用したHDDの活用は、TCO (Total Cost of Ownership) の低減と付加価値の向上につながると考えられる。

7. あとがき

ヘッドの位置決め制御における、ヘッド位置の予測精度を向上させたサーボ制御技術を適用することで、データ記録時の性能低下抑制と記録済みデータの品質確保を両立させた。また、SMR方式と親和性の高い冗長セクター強化処理技術を開発し、データ信頼性の更なる改善を行った。

FC-MAMRを採用したMG09シリーズに、これまで培ってきたSMR技術を適用することで、業界最大容量のデータセンター向け20 Tバイト3.5型HDDを実現した。

当社は、HDDのキー部品開発に加え、SMR方式に親和性の高い技術も開発し、次世代SMR HDDに適用していくことで大容量化をけん引し、データ社会の発展に貢献していく。

文 献

- (1) 東芝デバイス&ストレージ, “CMR方式で容量18TBを実現したニアラインHDDのサンプル出荷開始について”, ニュース, <<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/company/news/news-topics/2021/02/storage-20210218-1.html>>, (参照 2021-07-20).
- (2) 下村和人, HDDの大容量化をけん引する瓦記録技術, 東芝レビュー, 2015, **70**, 8, p.29-32.
- (3) 下村和人, 瓦記録技術を適用したデータセンター向け大容量HDD, 東芝レビュー, 2019, **74**, 6, p.12-16, <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/techreview/2019/06/74_06pdf/a04.pdf>, (参照 2021-07-20).
- (4) 東芝, 河辺享之, ディスク記録装置, ディスク制御装置及び方法, 特許第5100861号, 2012-12-19.



下村 和人 SHIMOMURA Kazuhito
東芝デバイス&ストレージ (株)
ストレージプロダクツ事業部 HDD 製品技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.