

FC-MAMR 技術の適用で実現した 記憶容量 18 T バイトのニアライン向け 3.5 型 HDD

18 Tbyte 3.5-inch Nearline HDDs Realized through Application of FC-MAMR Technology

竹尾 昭彦 TAKEO Akihiko 杉山 洋 SUGIYAMA Hiroshi

クラウドサービスの普及や AI によるデータ解析技術の進歩などによって、データ活用が社会全体で進む中、データセンターなどでニアライン市場向けの大容量 HDD（ハードディスクドライブ）の需要が高まっている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、HDDの大容量化に対応し、データの高記録密度化を可能にするエネルギーアシスト記録方式の実用化を推進している。その第1段階として、当社独自の磁束制御型マイクロ波アシスト記録(FC-MAMR: Flux Control Microwave-Assisted Magnetic Recording)ヘッドを搭載した記憶容量 18 T (テラ: 10^{12}) バイトのニアライン向け 3.5 型 HDD MG09 シリーズを製品化した。

The widespread utilization of data in society as a whole due to the dissemination of cloud services and the progress of data analysis technologies using artificial intelligence (AI) has given rise to the need for large-capacity hard disk drives (HDDs) for nearline storage applications including data centers.

Under these circumstances, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been promoting the practical implementation of energy-assisted magnetic recording technologies to realize HDDs with higher areal recording density. We have developed and released the MG09 series of 3.5-inch nearline HDDs with a storage capacity of 18 Tbytes as the first products incorporating our proprietary flux control microwave-assisted magnetic recording (FC-MAMR) head.

1. まえがき

クラウドサービスや、SNS (Social Networking Service)、ネットショッピングなどの普及、また、近年の AI によるデータ解析技術の進歩など、データ活用によるビジネスが、社会全体で展開されている。このような背景の中、データセンターなどで、ニアライン市場向けの大容量 HDD の需要が高まっている。

ニアライン市場向け HDD の大容量化が進むにつれて、ディスク 1 枚当たりの記録密度は高くなり、データが記録されるビットサイズはビット幅・長さともに小さくなる。これに伴って記録ヘッドのトラック方向のサイズが小さくなると、従来の磁気記録技術ではヘッドの記録能力(記録磁界強度)も小さくなってしまふ。一方、より小さなビットに記録された情報を長期間保持するためには、記録媒体として保磁力(磁化が回転する磁界強度)が強い磁性体を用いる必要があるが、保磁力の強い磁性体に情報を記録するためには、より大きな記録能力が必要となる。このため、HDD の大容量化に伴い、従来の磁気記録技術の記録能力を補強するため、エネルギーアシスト記録技術が必要になってきた。

一般に、HDD のエネルギーアシスト記録技術には、媒体への局所加熱により情報の記録を容易にする熱アシスト記録と、記録ヘッド内に設置したスピントルク発振子 (STO :

Spin Torque Oscillator) からのマイクロ波によって媒体への記録能力を補強するマイクロ波アシスト記録 (MAMR : Microwave Assisted Magnetic Recording) がある。東芝デバイス&ストレージ(株)は、この MAMR の動作原理を応用して記録ヘッドの記録能力を高める独自の FC-MAMR を考案し、この技術を用いて 18 T バイトの大記録容量を持つニアライン向け 3.5 型 HDD MG09 シリーズを実現した。

ここでは、MG09 シリーズの概要とともに、18 T バイトを実現するために開発した、FC-MAMR をはじめとする要素技術について述べる。

2. 装置概要

今回開発したニアライン向け 3.5 型 HDD MG09 シリーズの主な仕様を、表 1 に示す。インターフェースとして、SATA (Serial Advanced Technology Attachment) -3.3 と SAS (Serial Attached SCSI (Small Computer System Interface)) -3 のそれぞれを持つモデルを、ラインアップした。従来機種 MG08 シリーズと同じ磁気ヘッド 18 本及び磁気ディスク 9 枚の構成で、記憶容量を 12.5 % 増やすため、線記録密度及びトラック密度を増大させ、面記録密度(平均)を $1,877 \text{ Mビット/mm}^2$ に高めた。また、最大連続データ転送速度は、 $268 \text{ Mi (メビ: } 2^{20}) \text{ バイト/s}$ を実現した。

表1. ニアライン向け3.5型HDD MG09シリーズの主な仕様

Main specifications of MG09 series 3.5-inch HDDs

項目	仕様	
Model	MG09ACA18TA MG09ACA18TE	MG09SCA19TA MG09SCA19TE
インターフェース	SATA-3.3 6 Gビット/s	SAS-3 12 Gビット/s
記録容量	18 Tバイト	
磁気ディスク枚数	9枚	
磁気ヘッド数	18本	
線記録密度(平均)	106.3 kビット/mm	
トラック密度(平均)	17.7 kトラック/mm	
面記録密度(平均)	1,878 Mビット/mm ²	
バッファサイズ	512 Miバイト	
回転数	7,200 rpm	
最大連続データ転送速度	268 Miバイト/s (typ.)	
MTTF (平均故障時間)	2,500,000 h	
消費電力(アイドル時)	4.16 W	4.49 W
外形寸法	101.85(幅) × 147.0(奥行き) × 26.1(高さ) mm	
質量	720 g(最大)	

3. FC-MAMR技術

3.1 STOの動作原理

まず、MAMR技術に欠かせないSTOと、その動作原理について説明する。

STOは、外部から印加する磁界と電流のバランスによって、素子内の磁化を発振動作させるデバイスである。二つ以上の磁性膜とその間に介在する金属薄膜から成り、HDDの再生ヘッド素子や固体メモリーとして用いられるMRAM(磁気抵抗メモリー)素子と類似の構成である。

図1に、STOの動作原理を示す。外部から印加された磁界により磁化の方向が一様にそろった2枚の磁性薄膜があり、この磁性薄膜間に所定の電流密度を超える電流を流す。通常、電流内には磁場と平行なスピン(電子の自転モーメント)と反平行なスピンのランダムに存在する。電流は、磁性薄膜Aを通過する際に、磁性薄膜Aの磁化の向きによってスピン極性が選別される。磁性薄膜Aを透過するスピンは、薄膜Aの磁化と同方向のスピンの密度が高くなり、磁性薄膜A表面で反射されるスピンは、薄膜Aの磁化と逆方向のスピンの密度が高くなる。これは、スピントルク効果と呼ばれる。

次に、スピントルク効果により一方向の極性が偏在したスピン流が、別の磁性薄膜Bに衝突する場合を考える。偏在したスピンが磁性体に衝突すると、磁性体内の磁化に対してスピンと同じ方向を向かせようとする力が働く。これがスピントルクである。図1(a)では、磁性薄膜Bに対する外部磁界の向きと、薄膜Aからの透過スピンの向きは同方向であるため、磁性薄膜Bの磁化も同じ方向で安定してい

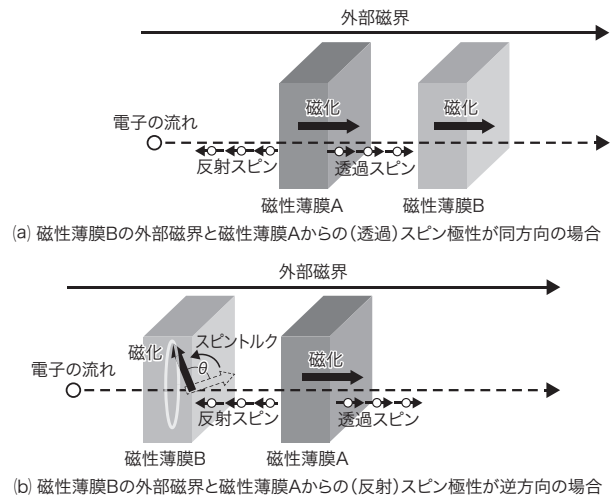


図1. STOの動作原理

偏在したスピンが磁性体に衝突すると、磁性体内の磁化に対してスピンと同じ方向を向かせようとするスピントルクが発生する。

Operating mechanism of spin-torque oscillator (STO)

る。一方、図1(b)では、磁性薄膜Bに対する外部磁界の向きと、薄膜Aからの反射スピンの向きは逆方向であるため、磁性薄膜Bの磁化に対し、外部磁界から加わる力とスピンから加わる力は互いに逆方向になる。どちらかの力が十分強ければ薄膜Bの磁化はそちらに沿うが、両方の力が一定のバランスを保っている場合には、薄膜Bの磁化はその力のバランスに応じた回転角 θ を維持したまま、力の方向に向かうときの磁化歳差運動を維持する。これが、磁性薄膜Bの磁化が発振した状態である。

STOでは、この外部磁界と通電電流により発生するスピントルクのバランスを設計することで、STO内の磁化の発振回転角を自由に制御することが可能となる。

3.2 磁束制御効果

HDDに用いられる記録ヘッドの先端には、記録主磁極と補助磁極があり、記録主磁極内で発生する磁束の大半は対向する記録媒体方向に向かう記録磁界となり、一部の磁束は補助磁極との記録ギャップに漏洩(ろうえい)してギャップ磁界となる。

一般に提唱されてきたMAMRは、3.1節のSTOを記録ヘッド近傍に設置して、STOの発振磁化から発生するマイクロ波磁界と、情報が記録される磁気記録媒体磁化とに生じる強磁性共鳴によるMAS(Microwave Assisted Switching)効果で、媒体への記録を容易にするものである。これを、MAS-MAMRと呼ぶ(図2(a))。STOを記録ギャップ内に形成することで、元々あったギャップ磁界をSTOへの外部磁界として流用でき、熱アシスト記録に比べて記録素子を

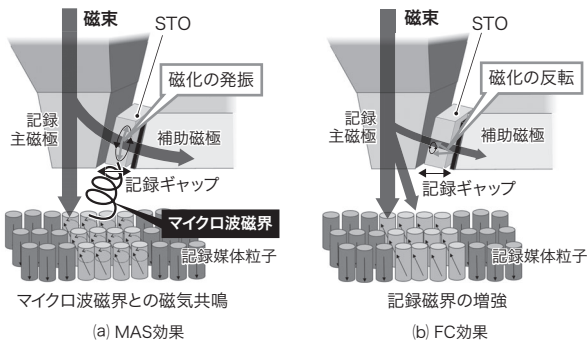


図2. MAMRのMAS効果とFC効果の比較

FC-MAMRは、記録磁界を増強する効果がある。

Comparison of recording operation of microwave-assisted switching MAMR (MAS-MAMR) and FC-MAMR

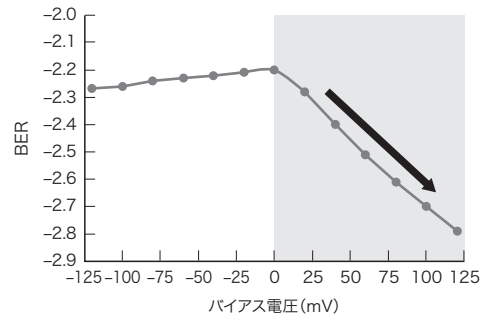
簡単に構成できる。一方で、STOの発振周波数と媒体の強磁性共鳴特性制御や、媒体に作用するマイクロ波分布調整などの課題もある。

これに対して、当社は、より簡便かつ早期にMAMR応用技術を実用化する方法として、STOによる磁束の制御を活用したFC-MAMRを考案した(図2(b))。FC-MAMRでは、STOの磁化がギャップ磁界に正対する方向に向くように、STOの発振回転角を制御する。このSTO磁化は、ギャップ磁界をせき止める働きを持ち、これにより、従来よりも多くの磁束を媒体に振り向け、記録ヘッドから発生する記録磁界強度を増すことが可能となる。これを、磁束制御(FC: Flux Control)効果と名付けた。

理論的には、FC効果で得られる記録能力向上度はMAS効果で得られるものよりも小さいとされる。しかし、MAS-MAMR設計に比べて、STOの発振安定性が得られやすい、媒体の強磁性共鳴特性との合わせ込みをあまり必要としないなど、簡便に扱いやすい。この特長を生かして、MAMR技術導入の第1段階として、18 Tバイトのニアライン向け3.5型HDD MG09シリーズへの適用に成功した。

FC-MAMRによる改善効果を検証するため、データ記録時にSTOに印加するバイアス電圧を変化させ、読み取り時の誤り率(BER: Bit Error Rate)を比較した(図3)。バイアス電圧が負のときはSTO磁化が発振しないため、BERはほとんど変化しない。これに対し、正のバイアス電圧を印加すると、その大きさに伴ってSTOの発振回転角 θ が大きくなるため、BERが改善する。FC-MAMR効果でデータ記録時の記録磁界が強くなり、よりBERの小さい記録状態を実現できた。

従来HDDの垂直磁気記録(PMR: Perpendicular Magnetic Recording)方式とFC-MAMR方式のヘッドを用い



*BERは常用対数表示

図3. FC-MAMRによるBER改善効果

正のバイアス電圧を大きくすると、BERの改善効果が大きくなる。

Improvement of bit error rate (BER) by means of FC-MAMR with increase in positive bias voltage

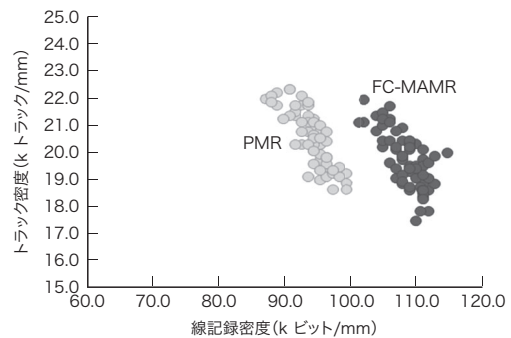


図4. PMRヘッドとFC-MAMRヘッドで同じBERを得られるトラック密度と線記録密度の組み合わせ

従来のPMRヘッドに比べ、FC-MAMRヘッドの方が高い線記録密度で同じBERを実現できる。

Combination of track density and linear recording density of perpendicular magnetic recording (PMR) and FC-MAMR heads achieving same BERs

て、同じBERを達成できるトラック密度と線記録密度の組み合わせを、図4にプロットした。FC-MAMR方式はPMR方式に比べて、同じトラック密度でも線記録密度を高くできることが確認できた。

4. FC-MAMR適用及び18 Tバイト実現のための機構設計

FC-MAMRヘッドにバイアス電圧を印加するため、MG09シリーズのFPC(フレキシブルプリント基板)にMAMR用ヘッドプリアンプを搭載した。FPCとヘッドの接続は、FC-MAMRヘッド用端子の追加によりMG08シリーズより2端子増えて13端子となったため、FPCの配線を微細化し、アクチュエーターに搭載した(図5)。

データを記録するエリアを増やすために、直径の大きい磁気ディスクを採用した。MG09シリーズの外寸法は、

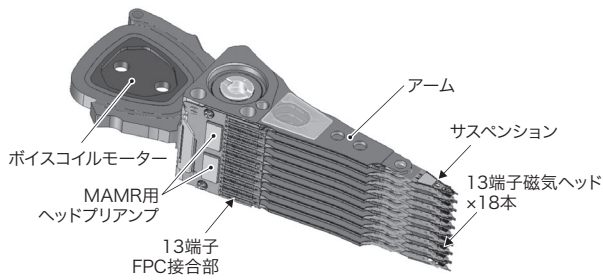


図5. 開発したFC-MAMRヘッド用アクチュエーター

シーク速度を高めるため軽量化し、FC-MAMR用FPCと、高い位置決め精度を実現したサスペンションを実装した。

Newly developed actuator for FC-MAMR head

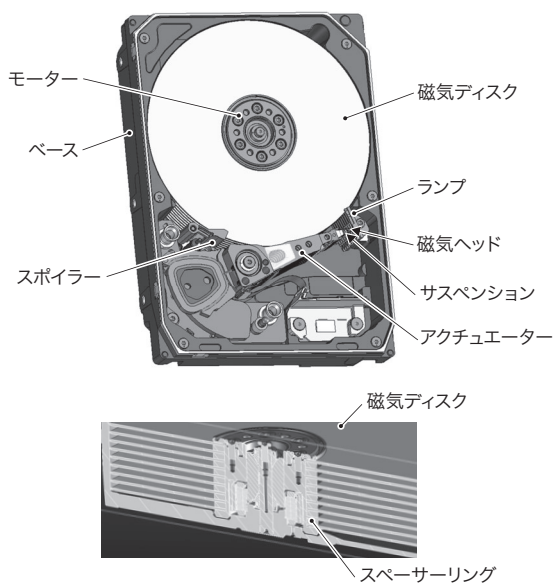


図6. MG09シリーズHDDの内部構造

磁気ディスクのサイズ変更に伴い、筐体の内部寸法を大きくし、ランプ、スポイラー、アクチュエーター、及びスペーサーリングを新規に開発した。

Internal structure of MG09 series HDD

MG08シリーズと同じであるが、磁気ディスク直径を変えたので、筐体(きょうたい)の内部寸法を大きくし、ランプやスポイラーを新規に開発した(図6)。更にデータを記録するエリアを拡大するために、磁気ディスク間に挟むスペーサーリングの直径を小さくした。データエリアを拡大したことで磁気ヘッドが動く距離が長くなるため、アクチュエーターの軽量化によるイナーシャの低減、及びボイスコイルモーターのコイル抵抗の低減で、MG08シリーズよりも速いシーク速度を達成し、性能向上を実現した(図5)。

また、再生信号品質を改善した磁気ディスク、及びヘッド位置決め精度の向上のために共振ゲインを低減したサスペンションを開発した。

その結果、MG08シリーズと比較して記録容量を12.5%増加し、18 Tバイトの大容量HDDを実現した。

5. STO素子の劣化防止技術

3.2節のとおり、STOにバイアス電圧を印加することで、磁化が発振する。しかし、大きいバイアス電圧を連続通電すると、STO素子が劣化するおそれがある。

これを解決するために、STO素子の材料を最適化することで、発振するために必要なバイアス電圧を低減した。また、STO素子の寸法ばらつきによりSTOの抵抗値が変わり、ヘッドごとに最適なバイアス電圧が異なるため、個体ごとにバイアス電圧値を制御できるファームウェアを搭載した。更に、不要なバイアス電圧の印加を避けるため、記録動作時だけバイアス電圧を印加するようにした。

これらにより、STO素子の劣化を防止し、ニアラインに求められる品質要求を満足して、MG08シリーズ同様の高い信頼性を維持しながら、FC-MAMR技術を適用したHDDを実現した。

6. あとがき

FC-MAMR技術によるアシスト記録を適用し、ヘッド位置決め精度の向上、主要部品の設計最適化などにより、CMR(Conventional Magnetic Recording)方式で、記憶容量18 Tバイトのニアライン向け3.5型HDDを開発し、製品化した。

FC-MAMR方式は、STOの磁化体積が大きいほど媒体に向かう磁束を増やせるので、STO磁化体積を増やすことで、2, 3世代にわたり、継続した記録密度の向上効果が期待される。MAS-MAMRを実現するための研究開発も進んでおり、更なる記録密度の向上が期待できる。

HDDの大容量化の要求は、今後ますます高まると考えられる。当社は、高性能かつ高信頼性の大容量ニアライン向けHDDを製品化し、DX(デジタルトランスフォーメーション)に代表されるデータを活用した社会基盤の変革に貢献していく。



竹尾 昭彦 TAKEO Akihiko
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 先行技術開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



杉山 洋 SUGIYAMA Hiroshi
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.