

磁気記録媒体の現状と展望

Magnetic Recording Media: Current Status and Future Outlook

松尾 壮太 MATSUO Sota

上住 洋之 UWAZUMI Hiroyuki

原 直毅 HARA Naoki

① まえがき

富士電機が垂直磁気記録方式^{(*)1}のハードディスクドライブ(HDD)用の垂直磁気記録媒体の量産をスタートして、6年が経過した。

垂直磁気記録媒体とトンネル磁気抵抗効果ヘッド(TMRヘッド)を用いた現在のHDDの記録システムは、順調に記録密度を向上させ、3.5インチ換算で1TBを超える記録密度が近づいているが、その高密度化は頭打ちになりつつある⁽¹⁾。そこで、今後期待される高密度化技術として、主にHDD側の記録再生技術の革新による瓦書き記録方式(SWR: Shingled-Write Recording)⁽²⁾、ならびにヘッドと媒体双方に技術革新が必要な熱アシスト磁気記録方式(TAMR: Thermally-Assisted Magnetic Recording)⁽³⁾が提案されており、SWRが2012年、TAMRが2014年末にも製品化される予定である。これらの技術が製品化されれば、さらなる記録密度の向上が期待でき、TAMRは、2Tbits/in²(3.5インチ1枚当たり3TB)も達成可能と考えられている。

本稿では、今後も成長が期待されるHDDの市場動向、技術動向について述べるとともに、富士電機の磁気記録媒体の技術開発状況について述べる。

② HDDの現状と市場動向

HDD業界は、大きな再編が進んでいる。米・シーゲート社(SG)が韓国・サムスン社⁽⁴⁾を、米・ウェスタンデジタル社(WD)が米・日立グローバルテ

クロジー社(HGST)を統合し⁽⁵⁾、2012年にHDDメーカーは、SG、WD、および株式会社東芝の3社体制となる。SGとWDの2強で80%近いシェアを確保する構図となり、HDD業界も従来の過度な競合状態から脱し、安定成長市場になることが期待される。

HDD業界以外のストレージビジネスを見ると、HDDとの競合が想定されるデバイスとして、SSD(Solid State Drive)が挙げられる。しかしながら、ビット単価、およびシリコンウェーハの供給能力の観点などから、SSDは急速にHDDに取って代わるのではなく、その用途により共存していくものと推察する。

また、上述のように市場が過度な競争状態から脱し、安定成長し始めると、記録密度の向上もさることながら不良発生率の低減を目指した品質の向上が今まで以上に重要となると予想している。

図1に、調査会社の見解⁽⁶⁾を元に富士電機が予測した、2010年から2016年までの全世界の用途別HDD出荷台数予測を示す。HDD市場全体としては、今後も年率10%前後の伸長を見込んでおり、2020年までは少なくとも安定した成長分野であり続けると考えている。

デスクトップパソコンやサーバ向け需要は、大幅な成長こそないものの、今後も安定した水準を維持すると予想している。特徴的であるのは、従来大きく成長すると期待されていたHDDレコーダやビデオカメラなどの情報家電分野向けの需要が、小幅な成長にとどまることである。

また、フラッシュメモリを搭載し、大幅な成長が見込まれるスマートフォンやタブレット市場の影響で、ノートパソコンの市場は従来の予想より伸び悩む

(*1) 垂直磁気記録方式

記録の単位となる微小な磁石のN極-S極を膜面に垂直方向に立てて並べるように記録する方式である。隣り合った磁石が反発し合わないため、高い記録密度が実現できる。

(*2) トンネル磁気抵抗効果

外部から磁場を印加することで、電気抵抗が変化する現象を磁気抵抗効果と呼ぶ。そのうち、酸化物からなる薄膜絶縁層を挟んで数種の磁性薄膜を積層した素子において、トンネル効果により発現する大きな磁気抵抗効果をトンネル磁気抵抗効果(TMR: Tunnel Magneto-Resistance Effect)と呼ぶ。微小な外部磁場の変化により電気抵抗が大きく変化するため、高感度の磁場検出が可能であり、現在、ハードディスクドライブ(HDD)用の磁気ヘッドに広く用いられている。

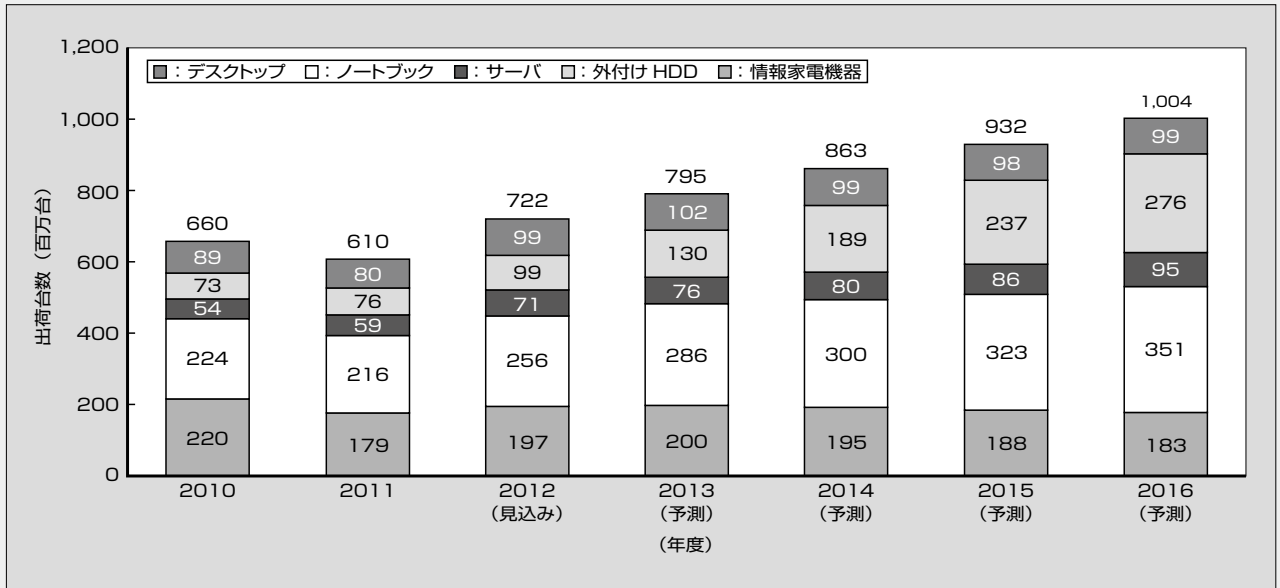


図1 全世界の用途別 HDD 出荷台数

と思われる。一方、薄型（厚さ7mm）で HDD とフラッシュメモリを組み合わせたハイブリッド型 HDD と、SSD で不足する容量を補う外付け HDD の伸長が期待される。

さらに、クラウドコンピューティング環境の発展に伴い、データセンターで使われるサーバやストレージの重要性が増加するため、2015 年からは 3.5 インチの需要が再度拡大すると考えている。

3 磁気記録媒体の技術動向

3.1 従来型垂直記録の課題

図2に、媒体の高容量化における課題を示す。高密度化に必要とされる高記録密度化、熱安定性および記録容易性は、お互いにトレードオフの性質を持っており、これらのバランスを取るための限界が近づいている。

現在の基盤技術である垂直磁気記録媒体と TMR ヘッドを用いたシステムは、記録密度の向上において従来の成長率を描けなくなっている。“高記録密度化”のためには、トラック幅を狭く、ビット長を短くすればよい。トラック幅を狭くするためには書き込みヘッドの磁極幅を狭くすれば良いが、それによって書き込み磁界強度が低下し、書けなくなってしまう。書き込みをし

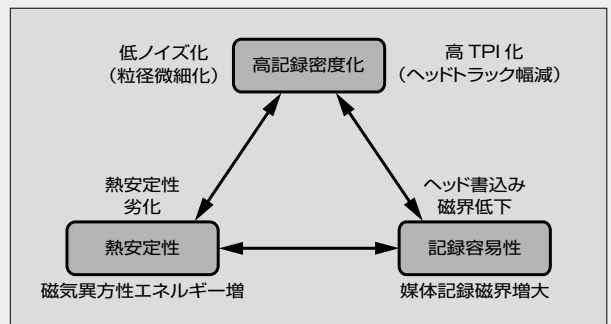


図2 媒体の高容量化における課題

やすくするために磁界を強くすると、本来記録するトラックの外側の領域に磁場が漏れ、隣接したトラックに記録されたデータを消してしまう隣接トラック消去と呼ばれる問題も発生する。

一方、ビット長を短くするためには、媒体の記録層の磁化反転単位を小さくし、ノイズの発生を抑える必要がある。磁化反転単位を小さくするためには、ビット内の微小な磁石の結晶粒径を小さくし、かつ大きさを均一化する必要がある。しかしながら、個々の磁石を小さくすると、“熱安定性”が低下し、熱エネルギーによって保存した記録が消えてしまうリスクが大きくなる。そこで、磁化反転単位が小さくなくても熱安定性を十分に保つために、記録層に用いる磁性材料の磁

(*3) 磁気異方性エネルギー

磁性体はその形状や結晶構造に対して特定の方向に磁化が向きやすい性質を持つときに、これを磁気異方性と呼び、磁化が向きにくい方向に磁化を向けるために必要なエネルギーを磁気異方性エネルギーと呼ぶ。磁性体の持つ磁気エネルギー（磁気の強さ）を示している。

気異方性エネルギー^{(*)3}を高くすることが必要となる。しかし、磁気異方性エネルギーを高くすると、媒体に書込みをする際に必要な磁界が増加し、“記録容易性”が損なわれてしまう。

したがって、媒体の高容量化は上述のトリレンマの関係があるため、これまでのペースで記録密度を今後も向上させるためには、2012年度以降において技術の大きなブレイクスルーが必要である。ここでは、高密度化を可能にする、瓦書き記録方式(SWR)および熱アシスト磁気記録方式(TAMR)のコンセプトと特徴、ならびに課題について述べる。

3.2 次世代記録技術

(1) 瓦書き記録方式(SWR)

SWRの基本的なコンセプトは、2008年にRoger Woodらにより、二次元磁気記録(TDMR: Two Dimensional Magnetic Recording)として報告されている。この報告には二つの新しいコンセプトが含まれている。その一つは書込み時の工夫である。従来の方式では、トラックは1本ずつ、相互の干渉がないようにある間隔を隔てて記録されるのに対し、本方式では、**図3**に示すようにトラックの一部を瓦のように重ねながら次々と記録していく。もう一つのコンセプトは読取り時の工夫である。従来方式では1トラックごとに記録された情報を読み取るのに対し、本方式では、隣接する数トラックを一度に二次元的に読み取って処理する。

TDMRに関しては、複数トラック読込み時の信号処理技術をはじめ技術的な課題が多く、今すぐ実用化

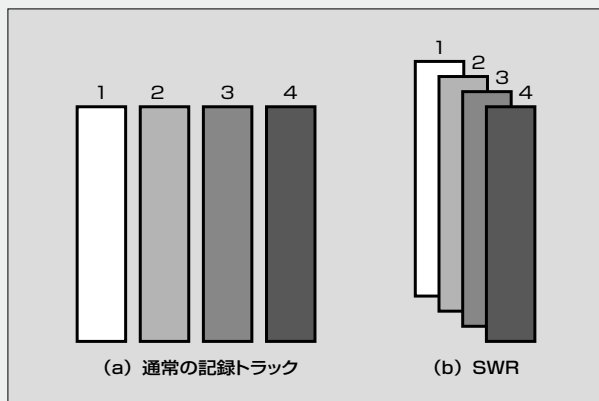


図3 SWRの概念図

するのは難しい。これに対し、SWRは、現在の信号処理方法を大きく変えることなく記録密度の向上を図ることができる。SWRの主な特徴として、次に示す3点が挙げられる。

- (a) トラックを一方方向に重ね書きして記録するため、磁極幅の大きな書込みヘッドを使用することができ、書込み磁界強度を高めることができる。
- (b) 従来、トラック間に設けられていたガードバンドが不要で、トラック密度を向上できる。
- (c) 従来方式では、多数回の書込み時に隣接トラック消去してしまう問題があり、トラック密度の向上が制限されていた。SWRでは、基本的に書込みが1回のみであるため、この問題を考慮する必要がなくなり、ヘッド・媒体設計の幅が広がる。

一方、SWRの最大の課題は、データ書換え時のロジックや書込み・読出しの応答速度など、HDDの記録再生システムに関連する部分にある。

上述のとおり、SWRの最大の効果はトラック密度の向上であり、30%程度の向上が確認されている。一方、この方式による線記録密度の向上効果は期待できず、結晶粒径の微細化によるノイズの低減と熱安定性の確保は、SWRにおいても引き続き必要不可欠な課題である。

(2) 熱アシスト磁気記録方式(TAMR)

先に述べたとおり、現在のTMRヘッドと垂直磁気記録媒体の組合せでは、高記録密度化・熱安定性化・記録容易性がトレードオフの関係にあり、さらなる大幅な高容量化は困難である。ここで、磁性材料の温度を上昇させると低い磁場でも磁化反転が生じるという特徴を利用し、磁気ヘッドに熱源となるレーザー光を導入し、磁場と熱を同時に加えながら記録を行う方式がTAMRである^{(*)3}。この方式を用いることで、熱安定性の高い、すなわち磁気異方性エネルギーの高い磁性材料を用いても書込みを行うことができ、さらなる高密度化が可能になると期待されている。

TAMRの実用化に向けた磁気ヘッドの基本設計は終了しており、その実用化は近いといわれている。しかし、媒体側はこれまでとは異なる磁性材料を適用すること、耐熱性を考慮した設計が必要なことなど、開発すべき課題が多く残っている。磁性材料^{(*)4}としては、高い磁気異方性エネルギーを持つ、規則化合金と呼ばれる材料が主に検討されている。しかしながら、現

(*)4 規則化合金

2種類以上の金属からなる合金のうち、各金属原子が結晶格子内で占める位置が規則的に定まった状態の合金を規則化合金と呼ぶ。同じ組成であっても原子の格子内での位置がランダムな状態の合金とは異なる性質を持つ。FePt合金では、規則化することにより非常に高い磁気異方性エネルギーを持つ。

在広く研究されている FePt 系の規則化合物は、必要な結晶構造を実現するために、一般的に 600℃ 程度の比較的高温下での成膜が必要であり、膜の表面粗さの増大および基板の耐熱性に課題がある。現行のアルミニウム基板の耐熱性は 250℃ 程度、ガラス基板でも 500℃ 程度であり、現在、成膜温度の低減のための研究が数多くなされている。

また、レーザーによる加熱パワーの低減と、記録後の速やかな温度低下を促進するためのヒートシンクの設計、ならびに熱耐久性の高い保護膜や潤滑材の開発も必要である。

直近では、3.5 インチ媒体で最大 60 TB の記録容量が実現可能であるとのシミュレーション結果が報告されており⁽⁷⁾、HDD の記録密度はこのような技術的ブレイクスルーを経て、まだ当分拡大し続けるものと思われる。

4 磁気記録媒体の開発状況

4.1 基板技術

ノートパソコンなどモバイル用途の HDD には、主に耐衝撃性に優れ、かつ薄板化が可能なガラス基板を用いた媒体が使われ、デスクトップパソコンやサーバ用途などの非モバイル HDD には、主にアルミニウム基板を用いた媒体が使われている。

富士電機では、この 2 種類の基板のうち、アルミニウム基板を用いた媒体の開発、製造、販売を行っている。その製造工程では、所定の寸法に加工したグラインド基板を基板メーカーから入手し、その表面にニッケル・りん合金を無電解めっき法で成膜する。次にポリッシュにより表面を平滑化し、最後に洗浄によりスラリー残渣（ざんさ）などを取り除くという手順を経る。

記録密度の向上に伴って磁気ヘッドの浮上量は 2nm まで低下しており、浮上に関与する基板表面の粗さとうねりを極限まで平滑にし、磁気ヘッドにダメージを与える nm オーダーの微小残渣を残さないことが重要である。また、記録容量を確保するために、基板の縁部ぎりぎりまで使用するため、端部の平坦（へいたん）性も重視される。現在、うねりや表面粗さの低減に対しては、ポリッシュ工程の部材選定と加工条件の最適化を、また表面の清浄に対しては、新しい洗浄剤の開発を進めるなど、常に業界でリードする品質を目指して開発を推進している。

4.2 磁性関連技術

垂直磁気記録媒体において、その中核を成す技術が、記録再生を直接担う磁性やその他の薄膜の材料および成膜技術である。

垂直磁気記録媒体は一般に、基板に対する密着層、ヘッドの書込みを助ける軟磁性層、磁性層を微細化しかつ結晶配向を垂直方向に成長させることを促す中間層、ならびに微細な磁石を均一に孤立化させることを目的とし、結晶粒界を形成するための特殊な酸化物を持った磁性層から構成される。垂直磁気記録媒体は、製品化当初 3.5 インチ換算で 160 GB であったが、現在の生産の主流は 500 GB であり、2012 年度中には 1 TB の生産を開始する見込みである。機能分離のため、当初 3 層構成だった磁性層は現在 5 層化し、中間層も 2 層から 4 層へと多層化している。

最新の 1 TB 品には 3 種類の酸化物が添加され、それぞれの酸化物が磁性結晶粒の孤立化を進めるための役割を担っている。その結果、当初 10 nm 程度であった微細な磁性結晶粒の直径は 6 nm 程度まで小さくなった。またその膜厚も、主に書込みのしやすさを確保する観点から、当初の 20 nm 程度が 15 nm 程度まで薄膜化している。その結果として、磁性結晶粒の体積が減少し、磁化の熱安定性を確保することが難しくなっている。

材料の結晶磁気異方性エネルギーを高めつつ、書込みのしやすさを確保して高密度化を実現するために、磁性層の組成改良や層構成改良を続けている。この垂直磁気記録媒体の技術を応用することで SWR への適用が可能である。SWR 媒体は、現行の設備でも生産が可能のため、少なくとも TAMR 媒体の本格立ち上げまでは大きな投資を行わずに対応できると考えている。

4.3 HDI 技術

HDI (Head Disk Interface) 技術は、具体的には、媒体表面を保護する役割を担うカーボン保護膜、磁気ヘッドとの摩擦を低減し耐久性を確保する役割を担う潤滑層、およびその周辺技術を指す。パソコンメーカーの高信頼性に対する要求は年々ハードルが上がり、現在では、極端な温湿度環境下でも 3,000 台に 1 台以下の不良発生率であることが要求されている。すなわち、HDI 技術は信頼性を確保するため最も重要な項目である。

4.1 節で述べたように磁気ヘッドの浮上高さは、2 nm レベルまで下がっている。この領域になると潤滑層の分子高さも無視できない。

潤滑剤は分子量数千の高分子からなる液体で、媒体表面の保護膜との分子結合の度合いをコントロールすることで、相反する摩擦力と吸着力を両立させている。現在、2 種類の潤滑材を混合して使っている。磁気ヘッドが滑走する際に潤滑材が変化しないこと、磁気ヘッド側に潤滑材が癒着しないこと、ならびに高速回転による遠心力で外側に潤滑材が移動しないことな

どが要求され、nm オーダーレベルでのデザインが必要である。

保護膜は、磁性層中のコバルトが水分の影響でイオン化し、媒体表面に移動してコバルト酸化物を生成する、いわゆるコロージョンを抑制し、潤滑材との結合力を強化し、かつヘッドが接触した際に傷がついたり、へこんだりしないことなど複数の機能が要求される。さらに高密度化のためには、磁気ヘッドと磁性層をなるべく近づけることが有効であり、保護膜の薄膜化も重要である。

保護膜の膜質と潤滑材の組合せ、そしてその後の後処理方法の改良により上述の特性を実現するHDI技術を開発している。

4.4 次世代記録技術

富士電機では、3章で紹介した次世代技術の中で、TAMRに使う規則合金として、高い磁気異方性エネルギーを持つ規則合金磁性材料の開発を、東北大学と共同で進めている。これまでに、高温での成膜が不可欠であったFePt規則合金薄膜を、実用的なプロセスとして適用可能な400℃程度の基板温度で形成する技術を開発してきた。現在は、課題である粗さの増加を抑えながら、ガラス基板のみならずアルミニウム基板に適用できる低温化技術を開発中である。さらに、従来の垂直磁気記録媒体にはないヒートシンク層の設計や、温度変化に伴う磁性層の特性変化を予測するシミュレーション技術の開発も進めており、早期の実用化に向けて取り組んでいる。

5 今後の課題と展望

本稿では、現在直面している技術課題を述べた。HDD業界は5年先までの技術ロードマップを描き、各社はそれを達成するためのアイデアを練り、具体化することにより記録容量を引き上げ、ビット単価における圧倒的な競争力を維持してきた。

新しい高密度化の具体的な技術を幾つか延べたが、それらが実際にHDD製品として採用されるのは、SWRが2012年、TAMRが2014年末になることが予想される。SWRは有望な技術ではあるが、特殊な記録パターンやHDD技術の新しいアーキテクチャーが必要であり、データ転送速度やシーク時間の短縮化に

課題があることから、使用分野が当初限定される可能性がある。また、TAMRも原理的には実用化が可能な領域に入ってきたが、実用上の技術的な課題はまだ残っている。さらには、スパッタ設備や試験方法の抜本的な変更など、媒体コストが増大する可能性もある。

一方で、現在の状況は、過去に長手磁気記録方式から垂直磁気記録方式に移行した技術の遷移過程によく似ており、これから主流となる3.5インチ1TB、2.5インチ500GBに用いられるTMRヘッドと垂直磁気記録媒体の組合せは、比較的長い製品寿命が期待されている。したがって、新規技術の開発もさることながら、現行技術の改良も2012～2013年度において重要である。

6 あとがき

富士電機は、磁気記録媒体の事業の全てをマレーシアに集約し、高いコスト競争力と生産直結型の技術開発体制を持ち、かつお客さまであるハードディスクドライブ(HDD)メーカーとの共同開発を行いつつ、開発方法のイノベーションを進めようとしている。今後も、熱アシスト磁気記録方式(TAMR)の材料開発を鋭意進め、HDDの発展に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 城石芳博. “ナノテクを駆使したHDDの市場、技術の最先端と展望”. Diskon Japan 2010講演. 2010年7月.
- (2) Roger Wood, et al. “The Feasibility of Magnetic Recording at 10 Terabits Per Square Inch on Conventional Media.”, IEEE. Trans. Magn., 2009, vol.45, no.2, p.917-923.
- (3) Michael A. Seigler, et al. “Integrated Heat Assisted Magnetic Recording Head : Design and Recording Demonstration”, IEEE Trans. Magn., 2008, vol.44, no.1, p.119-124.
- (4) “Seagate and Samsung Announce Broad Strategic Alignment”, シーゲート社プレスリリース. April 19, 2011, http://www.seagate.com/www/en-us/about/news_room/press_releases/financial_press_releases. (参照 2012-03-12).
- (5) “WESTERN DIGITAL TO ACQUIRE HITACHI GLOBAL STORAGE TECHNOLOGIES”, ウェスタンデ

(*5)長手磁気記録方式

記録の単位となる微小な磁石のN極-S極を膜面に平行方向に寝かせて並べるように記録する方式である。ハードディスクドライブ(HDD)は初期にはこの記録方式を採用していたが、隣り合った磁石が反発し合うために、高記録密度化が限界に達し、現在では垂直磁気記録方式に移行している。

デジタル社プレスリリース. Mar.7, 2011, <http://www.wdc.com/en/company/pressroom/index.asp?Year=2011>. (参照 2012-03-12).

- (6) Miura,K. “Estimation of Maximum Track Density in Shingled Writing”, IEEE Trans., Magn, 2009, vol.45, no.10, p.3722-3725.
- (7) “Seagate Reaches 1 Terabit Per Square Inch Milestone In Hard Drive Storage With New Technology Demonstration”, シーゲート社プレスリリース. March 19, 2012, http://www.seagate.com/www/en-us/about/news_room/press_releases (参照 2012-03-12).



松尾 壮太

磁気記録媒体の技術開発および製品設計に従事。現在、マレーシア富士電機社媒体工場技術部長。



上住 洋之

磁気記録媒体の研究開発、製品設計およびプロセス技術開発に従事。現在、マレーシア富士電機社媒体工場技術部次長。博士（情報科学）。日本磁気学会会員。IEEE 会員。



原 直毅

磁気記録媒体の製品設計に従事。現在、富士電機アメリカ社ディスクメディア部マネージャー。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。