

磁気記録媒体の技術動向と今後の展望

Magnetic Recording Media: Technical Trends and Future Outlook

竹野入 俊司 Shunji Takenoiri

松尾 壮太 Souta Matsuo

藤平 龍彦 Tatsuhiko Fujihira

磁気記録媒体の記録密度は、年率約40%のスピードで順調な進展をみせているが、このまま記録密度を伸ばし続けるためには、ここ1~2年の間に技術的なブレイクスルーが必要である。例えば、SWR (Shingled-Write Recording)、エネルギーアシスト磁気記録、パターンメディアなどが有望な候補である。富士電機では、これらの技術の検討とともに、高密度化のために、基板、ECC (Exchange-Coupled Composite) 媒体の積層構造、HDI (Head Disk Interface)、新規高異方性磁性層材料の検討を行っている。

The areal density of magnetic recording media has increased by about 40% annually. For areal densities to continue to increase at this rate, a technical breakthrough is needed within the next one or two years. For example, SWR (shingled-write recording), energy assisted magnetic recording, patterned media and the like are promising candidates. Fuji Electric is evaluating these technologies. Fuji is also studying the substrate, a laminated ECC (exchange-coupled composite) media structure, the HDI (head-disk interface) and new highly anisotropic magnetic layer materials in order to realize higher densities.

1 まえがき

垂直磁気記録方式のハードディスクドライブ (HDD) の量産が開始されてから、既に5年が経過しようとしている。現在、生産される磁気記録媒体のほとんどは垂直媒体である。長手磁気記録方式の時代に100 Gbits/in²を超える程度で停滞していた記録密度も、年率約40%のスピードで順調な進展をみせている。2008年に『富士時報』の中で、「今後もHDDの記録密度がこのままのペースを維持して伸長すると仮定するならば、2009年には量産レベルで500 Gbits/in²、研究レベルでは1 Tbits/in²に達することになる⁽¹⁾。」と述べた。量産レベルの記録密度は予想通り500 Gbits/in²に到達している。研究レベルに関しては、まだ1 Tbits/in²を達成したという報告はなされていないものの、2009年10月に927 Gbits/in²の発表があったこと⁽²⁾、また2008年来盛り上がりを見せているShingled-Write Recording方式(詳細は後述)を用いることで、さらなる記録密度の向上が期待される。このことから、今後も技術進展のペースが大きくスローダウンすることはないものと考えている。

一方、近年のHDD市場における大きな変化といえば、台頭するフラッシュメモリと小径HDDとの競合であろう。一時期、携帯電話やMP3プレーヤに搭載されていた0.8インチ、1.0インチといった小径HDDは既に姿を消し、1.8インチの市場もフラッシュメモリと競合し苦しい戦いを強いられている。このような状況でHDDの優位性を維持するためには、記録容量当たりの価格(ビット単価)を下げるのが必須である。また、近年、データセンタの電力不足が懸念されており、サーバやストレージといったハードウェアの消費電力の低減が求められている。サーバやストレージに使用するHDDの大容量化は、記録容量当

たりの消費電力を下げることに繋がる。こうした意味でも、磁気記録媒体の高密度化は最重要課題である。

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簡単に述べる。

2 HDDの市場動向

2008年後半から2009年前半にかけて、HDD業界もリーマンショックの影響を受け、大幅に需要が低下した。しかし、PC市場、HDD市場とも2008年度末には底を打ち、それ以降はV字回復を遂げている。先進国の景気が依然として低調である中で、この需要増は中国をはじめとする新興国が牽引(けんいん)しているといわれており、この

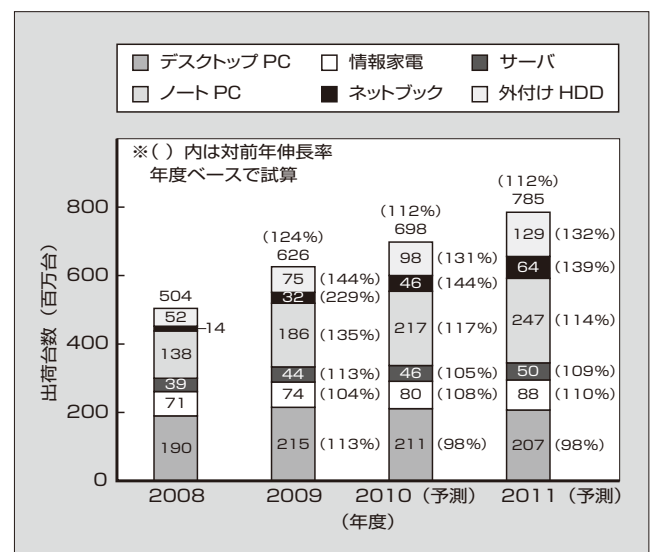


図1 HDDの用途別全世界出荷台数

傾向は今後も続くものと考えられている。

図1に、用途別のHDD全世界出荷台数予測を示す。なお、これは、調査会社の見解を元に富士電機が予測したものである。デスクトップPCやサーバの需要は大幅な成長はないものの、今後も安定した水準を維持するものと予想している。ここで特徴的なのは、従来は大きく成長すると期待されていた情報家電の分野が、小幅な成長にとどまると考えられていることである。特に、1.8インチを中心とする小径HDDは、携帯型音楽プレーヤ、ビデオカメラといった製品でフラッシュメモリと競合している。今後は、HDDは動画のような大容量が必要な場面で主に使用され、それ以外の用途（写真や音楽など）では、フラッシュメモリが主に使用されるというようなすみ分けになっていくものと考えられる。情報家電に代わって今後の成長を牽引するのは、2.5インチに代表されるモバイルPC（ノートPC、ネットブック）および外付けHDDになる。また、数年後には、クラウドコンピューティング環境の発展に伴い、データセンタに使用されるサーバやストレージの重要性がさらに増すものと思われる。HDD市場全体としては、今後も年率10%以上の伸長が見込まれており、安定した成長分野であるといえる。

③ 磁気記録媒体の技術動向

記録密度を増加させるためには、“垂直媒体のトリレンマ”と呼ばれる問題を解決する必要がある。これは、“高密度化”“書き込み容易性”“熱安定性”の三つを同時に成り立たせることが困難であることを指している。その意味について次に簡単に述べる。

記録密度は、“トラック密度（単位長さ当たりのトラック数）×線記録密度（単位長さ当たりのビット数）”である。“高密度化”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よいのだが、それによって書き込み磁界は減少し、“書けなく”になってしまう（図2①）。一方、ビット長を短くするためには、媒体の記録層における磁化反転単位を小さくする必要がある。しかし、磁化反転単位を小さくすると“熱安定性”が低下してしまう。す

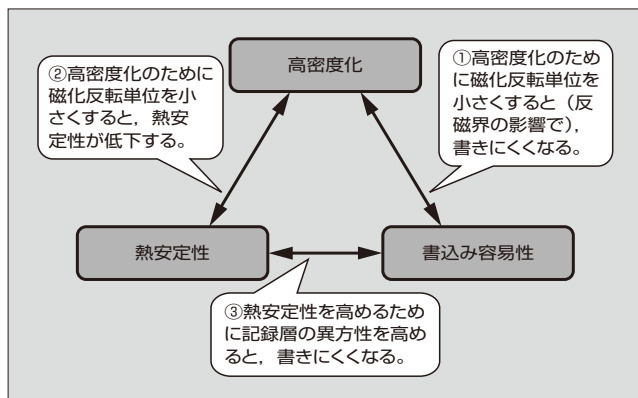


図2 垂直磁気記録媒体のトリレンマ

なわち、保存した記録が消えてしまうリスクが大きくなる（図2②）。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異方性を高くすればよい。しかし、異方性が高くなると媒体に書込みする際に必要な磁界が増加し、“書けなく”になってしまう（図2③）。

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、ここ1～2年の間に何らかのブレイクスルーが必要であると考えている。ここでは、高密度化を可能にする将来技術の候補である、Shingled-Write Recording方式、エネルギーアシスト磁気記録、ビットパターンメディアを取り上げ、そのコンセプトと特徴、課題について述べる。

3.1 Shingled-Write Recording方式（SWR）

基本的なコンセプトは、TMRC 2008（The Magnetic Recording Conference 2008, IEEE）にて Roger Woodらが、Two Dimensional Magnetic Recording（TDMR）として報告している。このコンセプトには二つの内容が含まれている。その一つは書き込み時の工夫である。通常、トラックは1本ずつ、あるピッチをもって設定されるのに対して、トラックの一部を重ねるようにして次々に書いていくというもの（図3）である。この特徴から Shingled-Write Recording（瓦書き記録）方式（SWR）と名付けられている。また、もう一つは読取り時の工夫である。通常は1トラックごとに記録された情報を読み取るのに対し、隣接する数トラックを一度に二次元的に処理するというものである。これが TDMR の中心技術となっている。

TDMR に関しては、信号処理技術など検討しなければならぬことが多く、今すぐ実用化というのは難しい。これに対し、SWRのみを利用するならば、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れることから、最近注目を集めている。SWRの特徴は、次に示す4点などが挙げられる。

- (a) トラックを重ね書きするため、トラック密度に影響するのは片側のみである。よって、書き込みヘッドの磁

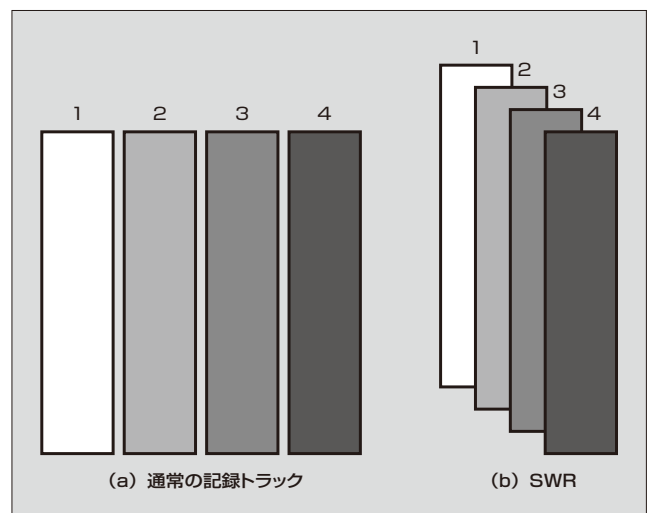


図3 Shingled-Write Recording方式（SWR）の概念図

極を大きくすることができ、書込み磁界強度を向上させる。

- (b) Squeeze (隣接トラック書込み時の漏れ磁場の影響) を受けるのが片側のみであるため、トラック密度を向上させることができる。
- (c) 基本的に書込みは1回のみであるため、隣接トラック消去の問題がなくなる。
- (d) Skew (トラックに対する書込みヘッドの傾き) 効果により、イレースバンド (トラック両端の磁化が乱れた部分) の狭い側のみを使用することができる。これも、トラック密度向上に貢献する。

これに対し最大の課題は、データ書換えのロジックや応答速度など、HDD システムに関連する部分にあると考えられる。また、媒体としては、狭イレースバンド化、線記録密度の向上が課題となる。

3.2 エネルギーアシスト磁気記録

エネルギーアシスト磁気記録としては、熱アシスト磁気記録 (TAMR: Thermally-Assisted Magnetic Recording)、マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR: Microwave-Assisted Magnetic Recording) の2種類が考えられている。いずれの方式も、通常の磁場に重畳して何らかのアシストをすることで、書込み能力を高めることが特徴である。

TAMR では、磁気ヘッドに熱源を搭載し、磁場と熱を同時に加えながら記録を行う。媒体の記録層に用いる磁性材料は、温度が上昇するに従い反転磁界が低下し、温度が低下すると反対に反転磁界が増加するという性質を持つ。この性質を利用して、熱を加えることで一時的に記録層の反転磁界を低下させて書込みを行う。TAMR を用いることで、記録層の異方性を高く設定でき、媒体の熱安定性が高められる。TAMR の実用化に向けた最も大きな課題は、磁気ヘッドの設計にあると考えられる。磁気ヘッドに熱源を搭載し、さらに磁場の位置と加熱位置を正確に合わせる必要がある。これを nm オーダの精度で行わなければならない。媒体に関しては、異方性が高くキュリー点の低い記録層用磁性材料の設計、200 ~ 300℃の加熱に耐える保護膜および潤滑剤の開発などが課題となる。

MAMR は、TMRC2007 で CMU (Carnegie Mellon University) の Zhu 教授らにより提案され、注目を集めた⁽⁵⁾。MAMR では、通常の磁場 (DC 磁界) に重畳して高周波磁界を印加することで、記録層の強磁性共鳴を利用して反転磁界を下げ、書込みを行う。TAMR では、隣接トラックに対する影響から加熱スポットを絞る必要がある。しかし、MAMR では隣接トラックに高周波磁界が漏れた場合でも、DC 磁界が絞られていれば隣接トラックの磁化は反転し難いといわれており、TAMR よりもトラック密度の向上に有利であると考えられる。MAMR に関しても、最大の課題は磁気ヘッドの設計であろう。数 GHz 以上の高周波磁界が必要といわれており、どのようにしてこのような磁界を発生させるかが課題となる。媒体に関しては、効

率良く反転磁界を低下させるため、記録層の磁化反転のダンピング定数を小さくするなどの工夫が必要になる。最近になり、ECC (Exchange-Coupled Composite) 媒体を用いることで、異方性磁界 50 kOe のハード膜を MAMR により反転させることができるとのシミュレーション結果も報告されていることから、現在量産されている ECC 媒体を改良することで対応できる可能性もある。

3.3 ビットパターンドメディア (BPM)

BPM とは、ビットを微細加工などにより物理的に分離した媒体を指す。1ビット = 1磁化反転単位とできることから、熱安定性の向上や反転磁界の低減 (書込みが容易になる) が期待されている。媒体の作製方法としては、研究レベルでは電子線描画法による直接描画が主に用いられている。しかし、実際の生産を考慮すると、ナノインプリントなど大量生産に向けた手法を用いる必要がある。また、ディスクリートトラックメディア (DTM) のようにトラックを溝加工し、そこに自己組織化膜を埋め込む手法 (GSA: Guided Self-Assembly⁽⁷⁾) も考えられている。

BPM は原理的に高密度化が可能であるが、低コストでの製造手法など、媒体作製上の観点から解決しなければならない課題は多い。また、最近ではシステム上の課題も指摘されている。そのうちの幾つかを挙げると、次のようになる。

- (a) BPM では、磁気的に分離されたビットに正確に記録していかなければならない (synchronous write)。例えば 2 Tbits/in² を仮定した場合、狙ったビットに正確に記録するためには、2 nm 以下の位置精度が必要になる。これは現状と比較して 2 けた高い精度が要求されることになる。
- (b) Skew 角変動の影響で、狙ったビットに正確に記録できなくなる可能性がある。またサーボ信号に関しても、孤立波出現タイミングが異なる再生波形になり、トラッキングを難しくする可能性がある。
- (c) 磁気ヘッドの書込み素子と読出し素子の間に距離がある (あるいは、書込みと読出しを同時にできない) ため、non-write area と呼ばれる “記録できない領域” が、サーボ信号を読むたびに現れる。これを合計すると、ディスクの半分程度を占めるとの試算もあり、記録領域が大幅に減る可能性がある。

以上に述べたように、BPM は、潜在能力は高いものの、多くの課題を抱えており、実用化までにはまだまだ時間が必要である。恐らく、数 Tbits/in² またはさらに高い記録密度で使用されることになると考えている。

4 磁気記録媒体の開発状況

ここでは、富士電機における磁気記録媒体の開発状況に関し、要素技術ごとに取り上げて簡単に紹介する。詳細は、本稿に続く各論文を参照いただきたい。

4.1 新しい高密度記録技術

富士電機では、**3**章で紹介した将来技術の中で、熱アシスト磁気記録について主に検討を進めている。これまでに、計算機シミュレーションを用いた媒体層構成および材料設計を行っている⁽⁸⁾。その結果を受けて、具体的な材料開発に展開している。現在は、熱安定性が高く、反転磁界の温度勾配（こうばい）が大きな（比較的低い温度で書込みが可能な）材料を開発中であり、今後、媒体への適用を進めていく予定である。また、要素技術として、高い異方性を持つ材料である $L1_1$ 型 Co-Pt の開発を、東北大学と共同で進めている。これまでの検討から、 $L1_1$ 型 Co-Pt 規則合金膜は、300～400℃の基板温度で形成することが可能であることが分かり、媒体の実用的なプロセスが適用可能な温度レベルまで下がってきている。本材料は、ECC 媒体におけるハード層や熱アシスト磁気記録媒体の記録層材料としての応用を考えている。

4.2 磁性関連技術

HDD において、データは媒体の記録層である磁性層に記録されるが、媒体には磁性層のみでなく、磁気ヘッドによる書込みを助ける目的の軟磁性裏打ち層、磁性層を適切な方向に配向させるためのシード層や下地層といった膜が含まれている。また、磁性層も多層からなる積層構造としている。トリレンマを解決して高密度化を実現するためのアイデアには、前述した熱アシスト磁気記録、ビットパターンメディアなど幾つかの候補が挙げられているが、現在、富士電機で主に検討しているのは ECC 媒体である^{(11),(9),(10)}。熱アシスト磁気記録では磁気ヘッドに熱源を搭載する必要がある。パターンメディアでは、各ビットを微細加工技術などにより物理的に分離する必要がある。これに対し、ECC 媒体は媒体や磁気ヘッドに大きな変更を必要としないだけでなく、製造技術の面でも大きな変更を加えることなく実現できるというメリットがある。

富士電機では、既に、この技術を量産媒体に適用しており、高密度化を目指し、磁性層のさらなる多層化などの改善を行っている。また将来技術として、SWR への適用も視野に入れながら、開発を進めている。

4.3 HDI 技術

HDI (Head Disk Interface) 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、潤滑層およびその周辺技術を指す。カーボン保護膜および潤滑層の膜厚に、ヘッド素子と媒体表面との距離を足し合わせたもの、つまり、ヘッド素子と媒体の記録層表面との距離は、磁気スペーシングと呼ばれる。高密度化が進むにつれ、この磁気スペーシングを低減することが求められる。一方で、耐久性や耐食性などのいわゆる信頼性を低下させるわけにはいかない。つまり、HDI 技術においては、磁気スペーシングの低減と信頼性の維持あるいは向上を両立しなければならない。

富士電機では、磁気スペーシングを低減するために、カーボン保護膜および潤滑層の薄膜化を行っているが、信頼性を確保するため、カーボン保護膜構造の緻密（ちみつ）化を促進するような成膜条件の工夫を同時に実施している。また、潤滑層に関しては、薄膜化しても耐久性を低下させないような添加剤の検討を進めている。

4.4 基板技術

ノート PC などモバイル系用途の HDD には主にガラス基板を用いた媒体が、デスクトップ PC や外付け用途の HDD には主にアルミ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、アルミ基板の開発、製造、販売を行っている。アルミ基板の製造工程は、所定の寸法に加工したグランド基板を外部から入手し、その表面に NiP をめっき法で成膜、次にポリッシュにより表面を平滑化して、最後に洗浄により残存するスラリー含有物残渣（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い磁気ヘッドの浮上量は低くなり、それと同時に基板に要求される品質も厳しくなっている。平坦（へいたん）性、平滑性はもちろんのこと、洗浄では磁気ヘッド浮上高さ以上の大きさ、すなわち数 nm 高さの残渣ですら許容されない。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、端部の平坦性も重視される。現在、うねりや表面粗さ低減に対しては、ポリッシュ工程の部材選定と加工条件の最適化を、また表面の清浄化に対しては、洗浄剤の開発を進めている。

5 今後の課題と展望

本稿では、新しい高密度化の技術を幾つか紹介した。それらが実際に HDD 製品として世に出るのは、早くても1～2年先のことになるだろう。それまでは少なくとも現在の延長線上で特性の改善を図らなければならない。いかにしてトリレンマを克服する媒体を作れるかが最大の課題になると考えている。また HDI に関しても、単純に磁気スペーシングを詰めるだけの手法には限界があるため、何らかの新しい発想が必要になるだろう。

次世代技術の中で最も実用化が近いと考えられているのは SWR である。次いで TAMR、MAMR が有望であると考えられる。BPM は高いポテンシャルがあるものの、製造プロセスやシステム上の問題点を幾つか抱えていることから、実用化には何らかのブレイクスルーが必要であろう。

磁気記録の分野は、これまでも記録密度の向上に対してしばしば限界論がささやかれてきたが、そのたびにそれを打破する技術が登場し、絶え間ない進歩を続けてきた。もちろん、この進歩は媒体のみによるものではなく、メカ技術、信号処理技術、ヘッド技術などによるところも大きいことは言うまでもない。記録密度を向上させる技術の候補は幾つか挙がっているが、それらを実現するためには媒体以外の HDD 構成部品も大きな変化を迫られることになる。例えば、SWR や BPM では記録手法が、TAMR や

MAMRでは磁気ヘッドが大幅に変わる。今後は、媒体単体の特性を追及するだけではなく、ほかのHDD構成部品の技術動向を見極め、それに適合した技術を開発することがますます重要となるだろう。

6 あとがき

富士電機では、2006年春に垂直媒体の量産を開始したが、わずか4年で媒体1枚当たりの記憶容量は4倍に達している。HDDが生き残るためには、フラッシュメモリやSSD (Solid State Drive) など競合するほかのストレージをしのぐスピードで記録密度を向上させなければならないことから、今後も開発の手を緩めることはできない。これからも、HDDの進歩と市場の発展に貢献できるように、高密度化を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 竹野入俊司ほか. 新しい高密度技術—ECC媒体—. 富士時報. 2008, vol.81, no.4, p.275-279.
- (2) TDK, TMR素子とディスクリット媒体で927Gビット/(インチ)2を実証. <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20091006/176048/>, (参照 2009-10-06)
- (3) IDCおよびTrendFOCUS, 09CQ3.
- (4) Wood, Roger. et al. The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media, Proc. TMRC 2008.
- (5) Zhu, J. et al. Microwave Assisted Magnetic Recording, IEEE Trans. Magn. 44, 125, 2008.
- (6) 成田直幸ほか. 交換結合ナノピラーのマイクロ波アシスト磁化反転シミュレーション. 第33回日本磁気学会学述講演会.

14aB-6.

- (7) Cheng, J. Y. et al. Pattern registration between spherical block-copolymer domains and topographical templates, Adv. Mater. 2006, vol.18, no.5, p.597.
- (8) 渡辺貞幸ほか. 新しい高密度記録技術—熱アシスト媒体—. 富士時報. 2008, vol.81, no.4, p.283-286.
- (9) Victora, R. H. and Shen, X. Composite media for perpendicular magnetic recording. IEEE. Trans. Magn. 2005, vol.41, no.2, p.537-542.
- (10) 稲葉祐樹ほか. Hard/Softスタック垂直磁気記録媒体の基礎特性. 日本応用磁気学会誌. 2005, vol.29, p.239-242.



竹野入 俊司

固体電解質型燃料電池、磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社営業・開発統括部開発部長。日本磁気学会会員。



松尾 壮太

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社営業・開発統括部副統括部長。



藤平 龍彦

半導体、磁気記録媒体の研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社取締役、CTO。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、日本金属学会会員、IEEE 会員。





*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。