磁気記録の技術動向

Technology Trends in Magnetic Recording

吉　良　　徹*
Tohru Kira

要　旨

近年の磁気記録システム，特にハードディスクの記録密度の向上は，年率60%にも達しており，高速，低ビットコストな記録媒体を提供することで情報化社会の発展に寄与している。その一方，現行磁気記録の要素技術は，急速な発展の中で持てるポテンシャルを使い果たしつつあり，技術的な限界に近づいているようにも見える。本稿では，将来の高密度磁気記録の技術開発が抱える技術課題と対応策について解説する。

Rapid improvement in magnetic recording technology these days much contributes to the progress of this information-oriented society by offering high-speed and low bit-cost recording media. This is typically exemplified by hard disk drive systems, as their increasing ratio of recording densities reaches up to 60% annually. Having exploited the potential of conventional basic technologies in these efforts, we seem to face some limits for further advancement. This paper introduces challenges and measures to open up another high-density magnetic recording era.

まえがき

磁気記録は，他の記録方式に比べて圧倒的に低コストなビット単価と高データ転送速度を武器に常にコンピュータの２次記録装置の主役の座を確保し続けてきた。その大容量化と低ビットコスト化の要求を支えてきたのが，驚異的ともいえる記録密度の増大である。

図１に磁気記録の代表的システムであるハードディスクドライブ（HDD）の面記録密度の推移を示すが，図中に示すように薄膜磁気媒体，磁気抵抗ヘッド（MR），PRML等の新技術を取り入れながら，90年までは30%/年，90年以降については60%/年の割合で記録密度を増大してきた。現在商品レベルでは４Gbit/in^2，研究レベルでは約11Gbit/in^{2}の記録密度まで到達している。しかしながら，記録密度は図に示すように現行媒体，磁気ヘッドの物理的限界に近づきつつある。

１．技術開発の現状

磁気記録の中でテープ媒体を用いたシステムについては，ディジタルVTRの商品化により技術的には成熟し，今後の技術開発の焦点はHDDに絞られる。HDDは，約40年前に開発されて以来，面密度にして６桁以上の驚異的な進化をとげてきた。しかもMRヘッドのような例外的な革新技術の導入は別にして，その過程の中で基本的には浮上型ヘッド，媒体面に記録したサーボ信号とVCMによるトラッキング等の開発当初からあった要素技術を洗練し高度化することにより記録密度を向上してきた。これは，当初の構想が如何に先見性があり技術的ポテンシャルの高いものであったかを示していると共に，シンプルな構成を維持，継承できたことが光記録，フラッシュ等の他の記録方式に対して優位に立てた最大の理由でもあった。

しかしながら，近年HDDを支える要素技術がそれぞれ技術的物理的限界に近づきつつありこの構図が変化しつつあるようにも見受けられる。すなわち，磁性媒体は結晶粒の細粒化が進行し熱揺らぎによる情報の消失が現実の問題になりつつあり，磁気ヘッドの浮上量は媒体表面，磁気ヘッド表面の粗さのオーダにまで減少し，ヘッドスライダの完全浮上を維持することが困難なところまできている。また，トラック幅のサブミクロン化により単体のボイスコイルモータにシークとトラック追従の２つの機能を担わせることが限界に近づいてきている。

これらの課題については，それぞれ対応策が提案されているが，技術的な完成度が未だ不十分なものが少なくない。また，いずれも現行方式よりは格段に複雑な内容になってきており，比較的単純な構成で高性能が得られるという磁気記録の最大の特徴を損ないかねず，ひいては他の記録システムに対する優位性を低下させる可能性も生じてきた。

*　生産技術開発推進本部　精密技術開発センター

また一方,競合する光記録の方も浮上ヘッド技術を取り入れトラッキングの高速化を図ろうという動きもあり,光記録の開発動向も磁気記録の方向に影響を与えていくことも予想される。

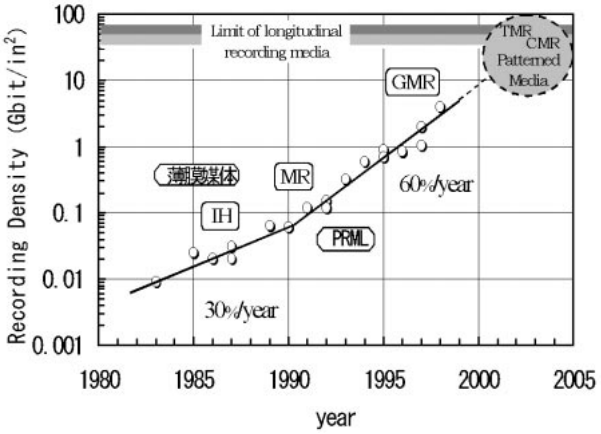

図１　記録密度の推移

Fig. 1　Trend of recording density.

２．高密度化の技術動向

高密度化のために磁気記録の要素技術が抱える課題と対応技術について解説する。

２・１　磁気媒体

現行磁気媒体の高記録密度化のための特性向上は,情報を安定に保持するための媒体保磁力の増大に加え,ノイズ低減のための媒体を構成する結晶粒の微細化及び結晶粒間の磁気的相互作用の低減という３つの方向に沿って進められてきた。

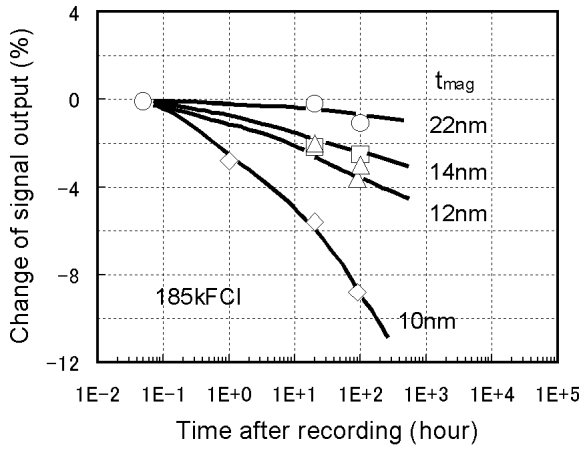

図２　信号の熱揺らぎ減衰

Fig. 2　Time dependence of signal output.

一方結晶粒内の各原子の磁化が揃って同じ方向を向くためには,ある一定量以上の磁性体の体積が必要である。この閾値を下回ると,強磁性体の磁化は熱エネルギーにより撹乱され,記録磁化を保持できなくなる。**図２**は,熱エネルギーにより記録磁化が時間と共に減衰していく様子をあらわしている[1)]。記録密度の増大に対応した磁気媒体の改良に伴い,記録磁化が保持できなくなる限界が見えるところまできている。

この課題に対する方策として,媒体の磁気異方性エネルギーの増大や,垂直磁化膜を媒体に用い媒体反磁場の低減により,熱擾乱の影響の低減が期待されている。

更に熱的安定性の限界を伸ばす試みとして,パターンドメディアが提唱されており,60Gbit/in^{2}に相当する安定な記録磁化まで確認されている[2)]。これはビット単位に媒体を非磁性体で分離しかつ結晶粒間の磁気的相互作用を増すことにより,実効的な磁化反転体積を増大し熱揺らぎの問題を回避しようとする試みである。

２・２　磁気ヘッド

２・２・１　再生ヘッド

高密度化にともないビット当りの面積は小さくなり,かつ増大する媒体の減磁作用を低減するため媒体の膜厚は薄くならざるを得ない。このビット当りの媒体磁化量の低下は,必然的に再生ヘッドが感知する信号磁束量の低下をもたらす。再生ヘッドがバルクの誘導型ヘッド→薄膜の誘導型ヘッド→MRヘッドと進化してきたのも,この再生磁束の減少による再生出力の低下に対し,磁気ヘッドの出力特性を改善することが主目的であった。高感度なMRヘッドの実用化以来記録密度は飛躍的に向上してきたが,10Gbit/in^{2}を超える将来の磁気記録においては現行のヘッドでは十分なS/Nが確保できなくなると予想されている。

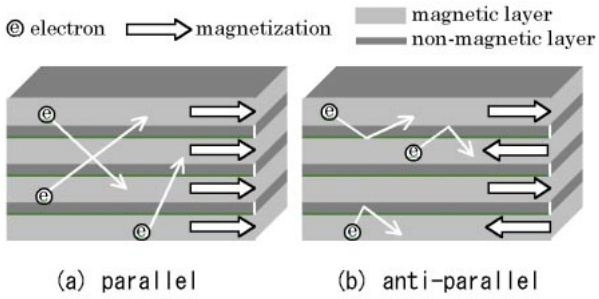

図３　巨大磁気抵抗効果

Fig. 3　Giant magnetoresistance phenomenon.

この課題を克服する再生ヘッドとして期待されているのが,巨大磁気抵抗効果を用いた磁気抵抗ヘッド（GMRヘッド）であり,高い再生感度を有している。巨大磁気抵抗効果膜の構造を**図３**に示すが,数層から数十層の極薄強磁性膜と極薄非磁性膜を交互に積層した人工格子構造になっている。ここで各磁性膜の磁化

の向きが隣同士で反平行になるときに,巨大磁気抵抗膜の抵抗値は最大になり,平行になるときに最小になる。従って隣同士の磁性膜の磁気特性に差異を設け,外部磁場の印加で隣同士の磁化の平行反平行を制御する。抵抗変化量は，100%を越えるものも報告されている。ただし，磁気ヘッド用として検討されている巨大磁気抵抗膜は,強磁性層を２層または３層から構成されるスピンバルブと称する構造で,磁気抵抗変化量は５～20%になる。GMRヘッドを用いることにより３～５倍程度の出力向上が期待できるうえに,ヘッド構造的には従来の磁気抵抗膜を巨大磁気抵抗膜に置きかえることで再生ヘッドが構成可能であり,プロセス的にも対応が容易である。

GMR実用化のためには製造プロセスにおいて暴露される温度において原子の熱的拡散が十分に抑制され各層界面が安定に保たれることが必要である。また成膜時においては各層の極薄膜の物性及び膜厚を精緻に制御する必要がある。このような技術課題を克服しながら，既に一部ハイエンドのHDDにGMRヘッドが搭載され始めている。

更に高密度記録に対応可能な磁気抵抗材料としては，トンネル電流が流れ得る程度に薄い絶縁薄膜を磁性薄膜により挟み込み，磁性薄膜の磁化の方向によりトンネル電流を制御するトンネル磁気抵抗材料がある[3)]。巨大磁気抵抗材料よりも大きな抵抗変化が得られるために，将来の再生ヘッドへの応用が期待されている。

2・2・2　記録ヘッド

将来の20Gbit/in^{2}程度の記録密度を想定すると媒体保磁力は５kOe，トラック幅は0.6μm，記録周波数は200MHz程度になると予想される。高密度化に対し記録ヘッドの抱える課題としては,①媒体の高保磁力化に対応した記録磁場の増加，②記録周波数の向上，③サブミクロンの磁気コアの加工技術,④サイドフリンジ記録磁場の低減がある。①，②については，高飽和磁化で高周波まで帯域の伸びた磁気コア材料の開発が急務である。③は，高アスペクトレシオの精度の良い加工が要求される。幅広トラックのヘッドを形成した後媒体摺動面より収束イオンビームを用いて所定のトラック幅にトリミングする方法が提案されている。ヘッド単位の加工となるため生産性の向上に課題があったが，基板単位の加工法も提案されている[4)]。

サイドフリンジは,磁気コア巾からの記録磁場の広がりをいい，現行ヘッドでは約0.2μmあり，サブミクロンのトラック幅の記録においては狭トラック化の大きな制約となる。これに対しては狭ギャップでも飽和しない高飽和磁化材料の導入,磁気コア形状の最適化により低減が図られる。

2・3　トライボロジー

記録密度の向上に対して,磁気ヘッドの狭ギャップ化により分解能を向上すると共にヘッド媒体間のスペーシング即ちヘッドスライダの浮上量も低減する必要がある。浮上量は，年々低下し最先端のHDDでは約50nmを切っている。この値は，ヘッドスライダー，媒体表面の粗度約10nmを考慮すると浮上量としては既に限界に近い値になっている。

このため,将来的には**図４**に示すように浮上方式からコンタクト方式またはスライダの一部が浮上しヘッド部でコンタクトするニヤコンタクト方式に進まざるをえないと考えられる。コンタクト方式の場合，コンタクト部の摩耗とスライダーの跳躍の防止が課題となるが,媒体表面の潤滑膜の改良等により回避できるとの報告がなされている[5)]。一方コンタクト方式の最大の課題は,磁気抵抗ヘッドのサーマルアスペリティである。この現象は，ヘッドと媒体が摺動することにより界面において摩擦熱の発生,或いは不規則な熱の流れが起き磁気抵抗素子の温度が変調されて抵抗変化として現れるノイズである。この問題の解決に関しては，磁気抵抗素子をヘッド摺動面から後置[6)]，複数の磁気抵抗素子を差動動作させキャンセルする[7)]等の提案があるがいずれも十分なものとはいえず,未だ実用性のある解決法が見出されていない困難な課題といえる。

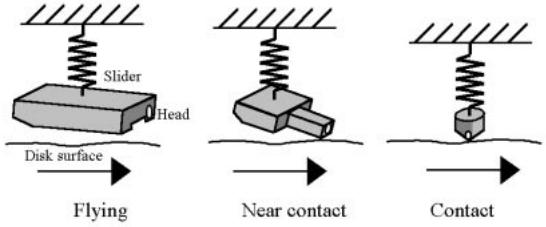

図４　スライダの浮上方式
Fig. 4　Model of Slider-Disk interface.

2・4　トラッキングサーボ

過去の高密度化のトレンドにおいては,線密度よりもトラック密度の増加の方が急である。この傾向は,今後も続きますますトラッキング精度に対する要求は厳しくなっていくと考えられる。磁気ヘッドのトラック位置決め精度を向上するためには,位置検出の高精度化及び位置情報への追従性向上が重要である。前者についてはサーボトラックライタによりHDDの記録ヘッドを用いてサーボ信号の記録が行われているが,記録ヘッドを支えるジンバル,スピンドルの非定常的な歪みなどの誤差が位置信号に重畳することになる。このため，10Gbit/in^{2}の記録密度を超えた辺りに現行方式の限界があり，それ以上の記録密度においては

サーボパターンを予めディスク媒体表面に埋め込んでおく方式に移行していくものと考えられる[8]。

位置情報への追従性能向上については，現行HDDがボイスコイルモータ一つで磁気ヘッドのトラック直交方向の移動を行っているのに対し，光ディスクのように粗動を担うボイスコイルモータと微調を受け持つマイクロアクチュエータから構成される**図5**に示すようなピギーバック方式に変わっていくものと予想されている[9]。既に，マイクロマシンを含めた複数の方式が提案されポテンシャルの高さが実証されているが，最大の課題はアクチュエータの増加によるコストアップを最小限に押えることである。

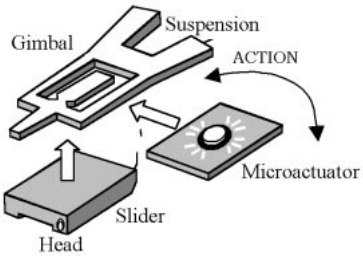

図5　ピギーバックアクチュエータ模式図
Fig. 5　Structure of piggy-back actuator.

2・5　信号処理

HDDの信号処理技術の革新は，記録信号帯域の最適化という変復調技術と，低いS/Nにおける確実な信号検出技術の二つに大別することができる。

短波長の符号間干渉によるS/N低下を補償する技術としてRLLコーディングがあるが，最短波長を長くできるため，記録密度を高めることが可能となる。このほか，検出時のDCオフセット変動やPLL性能を改善するGCR符号や，記録再生系の応答を変調の中に組み込むパーシャルレスポンスも変調技術に含まれる。

一方，悪いS/Nの下でも確実に信号を検出する方法としては，最尤復号と誤り訂正がある。最尤復号は誤りによって確定できないデータ列について，その候補の中から確率的に最も可能性の高いデータ列を判定する技術である。また誤り訂正としては複数の誤りを訂正できるRS符号が多く採用されている。これらの技術は，それぞれ単独ではなく，例えばPRML（パーシャルレスポンス＋最尤復号）のように組み合わせて採用されている[10]。

処理技術の最近の動向としては，非線型処理により検出点の雑音増加が少ないDFE（判定帰還等化器）や，GCR符号そのものを最尤復号しやすいデータ系列とするトレリス符号の研究が盛んである[11]。

むすび

飛躍的な高密度化を達成してきた磁気記録も，現行技術の延長上では記録密度向上のトレンドの維持が困難な段階にきている。磁気記録が21世紀においても過去と同様に記録方式の主役の座を占め続けられるかは，ひとえに現行技術に取って代わるべき新技術によるブレークスルーにかかっている。

参考文献

1）Y. Hosoe, I. Tamai, K. Tanahashi, T. Yamamoto, T. Kanbe and Y. Yajima,“ Experimental Study of Thermal Decay in High-density Magnetic Recording Media, ”IEEE Trans. Magn., vol. 33, No. 5, pp. 3028-3030 (Sept. 1997).

2）S. Y. Chou,“ Ouantized Magnetic Disks, ”J. Magn. Soc. Japan, vol. 21, No. 7 (1997).

3）T. Miyazaki and N. Tezuka,“ Spin Polarizzed Tunneling in Ferromagnet/Insulator/Ferromagnet Junctions, ” J. Magn. Magn. Mater., vol. 151, pp. 403-410 (1996).

4）T. Koshikawa, A. Nagai, Y. Yokoyama and T. Hoshino,“ A New Write Head Trimmed at Wafer Level by Focus Ion Beam, ”IEEE Trans. Magn., vol. 34, No. 4, pp. 1471-1473 (July 1998).

5）A. Sato, K. Ajiki, M. Yanagisawa and Y. Tsukamoto,“ Head-Disk Interface Design for In-Contact Recording using Wet Systems, ”IEEE Trans. Magn., vol. 33, No. 5, pp. 3163-3165 (Sept. 1997).

6）福山，福元，柴田，斎藤，早田‘ 縦型MRヘッド ”日本応用磁気学会　第93回研究会資料　pp. 55-60 (1996).

7）X. Shi, K. Ju, J. Hagen, C. L. Lin, C. C. Han, M. M. Chen, J. W. Chang, P. W. Wang and E. Teng,“ 2 Gbits/in^2 Dual Stripe MR Heads, ”IEEE Trans. Magn., vol. 33, No. 5, pp. 2896-2898 (Sept. 1997).

8）Y. Ohtsuka, T. Koshikawa, K. Aikawa, H. Maeda and Y. Mizoshita,“ A New Magnetic Disk with Servo Pattern Embedded under Recording Layer, ”IEEE Trans. Magn., vol. 33, No. 5, pp. 2620-2622 (Sept. 1997).

9）T. Hirano, L. Fan and J. Q. Gao,“ Inver MEMS Milliactuator for Hard Disk Drive Application, ”Proc. IEEE 10th Annu. Workshop on MEMS pp. 378-382 (1997).

10）H. Kobayashi,“ Application of Probabilitic Decoding to Digital Magnetic Recording Systems, ”IBM J. Res. Develop., vol. 15, pp. 64-74 (Jan. 1971).

11）K. D. Fisher, J. M. Cioffi, W. L. Abbott, P. S. Bednarz and C. M. Melas,“ An Adaptive RAM-DFE for Storage Channels, ”IEEE Trans. Commun., vol. 39, No. 11, pp. 1559-1568 (Nov. 1991).

（1998年10月13日受理）