磁気記録技術

(1) 記録面密度の進展と今後の展望

村岡 裕 明*

1. はじめに

磁気記録は音声録音に始まったが、現在では VTR やハードディスクドライブ (HDD) など多様な応用が広がっている。なかでも、近年の IT 技術の進展を背景に HDD の進歩が際立っており、1990 年中盤以降年率 100% を越える急速な高密度化を遂げて、100 Gbits/inch² 程度の記録面密度が量産製品として実現できるようになった。これは磁気ディスク面上で 1 ビットの情報が占有する面積がわずか 200 nm × 30 nm 程度の超高密度である。今後も垂直磁気記録⁽¹⁾⁽²⁾によってさらに高密度化が続く見通しであり⁽³⁾、実際 230 Gbits/inch²⁽⁴⁾の報告が行われるなど一時ほどの急速な伸びではないにしてもその進歩が留まる様子は見えない。

高密度磁気記録のための要件は、磁気ヘッドと磁気ディスクから構成される信号伝送路で高速に大量の情報を授受する信号伝送の立場から考えると理解しやすい。急峻な磁化転移を作ってビットを微細化するのは当然であるが、同時にノイズや波形ひずみを小さくして正しく情報を読み取ることができないと意味がない。磁気記録は総合技術であり高記録密度の実現には、サブミクロン幅のトラック上への正確な磁気ヘッドの位置決めや磁気ヘッドをディスク上に数 nm の浮上量で支持する技術など、様々な先端技術を集積する必要がある。しかし、磁気記録の面記録密度を決める大きな要因は磁気ヘッドと記録媒体を中心とする磁気的なメカニズムであり、本稿ではこの視点から高密度記録再生過程に注目して述べる。

2. 記録再生の原理と高密度化要件

(1) 記録過程

磁気ディスクに記録された磁気情報は同心円状のトラックに沿ってタイルを敷き詰めるように密に形成される。ビットのアдресリングは磁気ヘッドの機械的な走査によっており、ビットアドレスが配線によって作り付けになっている半

導体メモリとは本質的に異なる性質である。この結果、目標ビットに磁気ヘッドが到達する時間が必要であるからランダムアクセスは速くないものの、高い面記録密度と大容量性を獲得することになった。これは半導体メモリ素子と補完的な性質であり、効果的にコンピュータの記憶階層を構成してきた。なお、ハードディスク装置は本質的にはシリアルな記録再生方式であるからいったん先頭ビットにアクセスが終わるとその後連続してビットを読み書きするのは高速である。データの連続転送速度が重要な、音声や映像などのマルチメディア用途でハードディスク装置が急速に普及しているのはこの性質を生かしたものと言える。

図 1 には垂直記録磁化が形成される過程について、孤立磁化反転を記録する際の記録磁界反転直後の記録媒体中の磁化をその断面で模式的に示している。ヘッド磁極直下の記録媒体中では比較的広い領域に磁界が印加されているが、ヘッド磁界の反転に応じて磁極下の磁化が反転する結果、磁界印加領域の大きさには依存せずヘッド磁界の流出端(トレーリング端)に磁化転移が形成される。このとき、ヘッド磁界の傾

図 1 磁化転移の形成と有限転移幅の起源。上部は棒磁石状の単磁極型ヘッドで垂直磁化を記録する様子を記録媒体の断面として示した概念図であり、下部中央と下部右は簡易化したヘッド磁界分布と記録媒体のヒステリシス特性である。

* 東北大学教授；電気通信研究所(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

Magnetic Recording Technology (1) Progress of Areal Density and Future Prospect; Hiroaki Muraoka(RIEC, Tohoku University, Sendai)

Keywords: magnetic recording, thin film magnetic materials, magnetic head, magnetic disk

2005年10月20日受理

斜と記録媒体のヒステリシス曲線の勾配がともに有限であるとき、同図中に示す H_s より印加磁界が小さい領域では記録媒体は反転した後に飽和に達することができず、一方、 H_n より磁界が大きい領域では反転前に記録された磁化が減磁されることになる。この結果、ある転移幅内では正の飽和磁化でもなく負の飽和磁化でもない中途半端な磁化の大きさとなる。これが記録過程で生まれる磁化転移幅の形成過程である⁽⁵⁾。従って、記録ヘッドは記録媒体を飽和磁化するだけの強磁界を発生するだけでなく流出端に急峻な磁界傾斜を実現することが必要である。また記録媒体のヒステリシス曲線が保磁力付近で急峻な勾配を持つことも同様に重要である。

(2) 減磁界と記録分解能

もう一つの記録分解能を支配する大きな要因が減磁界である。長手磁化では転移点で磁化が突き合せているから転移中心ほど大きな減磁界が作用する結果、磁化が減衰して磁化転移は緩やかにならざるを得ない⁽⁶⁾。これは、記録層厚を薄膜化するとともに高保磁力することで再生パルス幅が狭くなって高分解能化されるという経験則⁽⁶⁾⁽⁷⁾によく符合する。これは、減磁界を記録層の薄膜化によって低減し、減磁界による磁化減衰を高保磁力化によって防ぐことであると定性的に理解できる。実際には記録過程における磁化転移は動的に決定されるものであり、定量的な解析にはヘッド磁界と減磁界、さらに記録磁化を同時に決定する非線形解析が必要である。この考え方がセルフコンシステント理論であり⁽⁸⁾、今日の電子計算機による記録シミュレーションのさきがけとなる詳細な数値解析に発展した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。一方で、記録分解能を巧妙にモデル化して表現した Williams-Comstock の解析式⁽¹⁰⁾が有名である。この近似式は比較的定量性がよくヘッドディスク系の静的なパラメータから転移幅が容易に導出できるので多用される。この近似式の本質的な要請も記録媒体の高保磁力と薄膜化である。

減磁界制約から逃れるには、記録層の薄膜化による再生磁束の低下を補う再生ヘッドの高感度化と、高保磁力媒体を記録できる強い磁界強度を兼ね備える磁気ヘッドが必要になる。再生ヘッドの高感度化は磁気抵抗効果型ヘッド(MRヘッド⁽¹¹⁾、後に GMR ヘッド)によって成し遂げられた。MRヘッドは再生専用であるために記録ヘッドを別途具備する必要があったが、これがかえって記録ヘッドと再生ヘッドを別々に最適化できる利点を生み高密度化に幸いした。一方、ヘッド記録磁界強度は磁極形状と磁極コアの飽和磁束密度によって決まるが、前者はトラック幅やプロセスの制約のため最適化に限界があり、後者についてはすでに Slater-Pauling 曲線上で最大の 2.4 T 程度の飽和磁束密度を持つ低保磁力 FeCo 系薄膜⁽¹²⁾が実用化されて限界に達している。低保磁力で Slater-Pauling 曲線の限界を打破できる高飽和磁束密度薄膜が実現できれば記録ヘッド用磁極としてまことに望ましいことである。

なお、明らかに垂直磁気記録ではこの減磁界の性質は異なる。これについては後述する。

(3) 再生分解能

いかに急峻な磁化転移を形成しても記録磁化を読み出す際

に信号としてのパルス幅が広がっては意味がない。記録磁化の読み出しは通常 GMR 型再生ヘッドにより行われるが、この再生信号波形は相反定理を用いて記録磁化分布と再生ヘッドの空間的な感度関数の畳込み積分で定量的に求めることができる⁽¹³⁾。ここでヘッドの感度関数は磁気抵抗素子を仮想的な磁束源と見立てたときのヘッド磁界分布に相当する⁽¹⁴⁾。再生パルスを狭小化するにはこの感度関数の空間分解能を高めることが必須であり、ヘッドとディスクが近接するよう浮上量を低下させるとともに GMR ヘッドのシールド間隔を狭めることで磁気抵抗素子の直下だけに感度を持つように限定されて分解能が改善される。しかし、冒頭に述べたように、最近の最短記録ビット長はわずかに 30 nm 程度であり将来はさらに小さくなる。ヘッド浮上量およびシールド間隔ともに文字通りナノテクを駆使した極限的な設計にならざるを得なくなっている。

3. 記録媒体ノイズとナノ微細構造

(1) ノイズと微細磁気構造

高密度化とともに顕在化したのが磁気ディスクのノイズであった。特に記録媒体の薄膜化の要請から試みられた初期の薄膜媒体は微細磁気構造制御が不十分なために明確なジグザグ磁壁が現れてしまい⁽¹⁵⁾、当時の塗布媒体に SN 比で及ばなかった。これは面内磁化が磁化転移で突き合せ磁区を形成して大きな減磁界が働くためであるが、この結果、等価的な磁化転移幅はジグザグ磁壁の振幅となって大きく劣化し、同時に高密度で磁壁同士が互いに干渉してランダムな磁気構造を形成して大きな媒体ノイズを生じた⁽¹⁶⁾。

これを避けるために導入されたのが磁壁の生じない微粒子型の薄膜構造を持つ記録媒体である。たとえば、CoCr 系の薄膜では、Co リッチな磁性粒子を Cr リッチな非磁性粒界が取り囲んで磁気的な分離構造を形成している⁽¹⁷⁾。結局、薄膜媒体においても磁気的には塗布媒体と同じ微粒子構造が要求された訳である。この磁気分離は粒子間のクラスタリングによって等価的に粗大な粒子が生じる交換結合も効果的に切断して低ノイズ化を果たした。

このような微粒子構造を持つ記録媒体で観測される代表的なノイズが転移ジッタノイズである。図 2 にはジッタノイズの発生要因を媒体の微細構造をモデルによって示している。磁化転移はランダムな微粒子境界に沿って形成されるので、理想的な直線ではなく粒子サイズに応じた不規則な折れ線になる。これを再生ヘッドで読み出すと、この揺らぎのある磁化転移をトラック幅で平均化した位置に再生パルスが生じるから、そのパルス位置は転移ごとにわずかに前後に揺らぐことになる。このようにして再生パルスが本来あるべき位置からずれてジッタを生じている場合、このずれ分がノイズとして観測される。ジッタ量は通常は数 nm 以下という微小なものであるが、高密度記録での数十 nm 以下のビット長に対しては無視できないものである。

(2) 熱磁気緩和

微粒子構造の記録媒体では、1 ビットの記録磁化を多くの磁性微粒子が集团的に担うことになる。従って粒子体積はビ

図2 微粒子型磁気記録媒体をポロノイ図形によってモデル化した際のメディアノイズの発生メカニズム。

ット体積よりかなり小さく、記録ビットの高密度化が進めば数 nm サイズにしないと上述のジッタノイズを抑えることができない。このようにして微細化を進めた結果に現れた限界が熱磁気擾乱による記録磁化の消失である⁽¹⁸⁾。極度に微細化された磁性粒子では、熱擾乱エネルギーが磁性微粒子の磁化反転をとどめるバリアエネルギーに近付いて熱的な安定性の確保が課題になる。図3はこの熱磁気緩和の影響を端的に示すために、粒子のサイズ分散がないという大変粗い仮定のもとに近似的に計算した結果である。10 nm の粒子サイズから 1 nm ずつ微細化するにつれて指数関数的に安定性が損なわれ、あるサイズより小さくすることで急速に影響が深刻になることが分かる。この減磁を防ぐには、磁気異方性エネルギー K_u と粒子体積 V の積であるバリアエネルギーを、ボルツマン定数と温度の積 $k_B T$ である熱エネルギーに対して十分に大きい値に高めて、熱安定性を確保しなければならない。粒子体積は記録密度と記録層厚で決まり薄膜化が必要な長手記録では大きくできないので、高磁気異方性化が必須となる。しかし、磁気異方性エネルギーが大きい微粒子では異方性磁界が増加して飽和記録するためのヘッド記録磁界が極めて大きくなってしまう。

粒子サイズ、磁気異方性エネルギー、ヘッド磁界強度の3因子のトレードオフで記録密度限界が決定されている。

4. 垂直磁気記録

(1) 記録方式

磁気記録の発明者の V. Poulsen は記録媒体であるピアノ線に垂直に記録磁界を印加しようとするヘッドを残しており⁽¹⁹⁾、最初期の磁気記録の実験でも同様に垂直に磁界を印加するヘッドが用いられていた⁽²⁰⁾。また、初期の磁気ディスクにおいても記録媒体面に垂直に磁界を印加する磁気ヘッドの報告がある⁽²¹⁾。しかし、そのいずれも記録媒体中に垂直磁化を形成するために必須の垂直磁気異方性を考えた形跡がなく垂直磁気記録のための最も重要な要件が欠落していた。優勢な垂直記録磁界を発生する単磁極型ヘッド⁽²²⁾と CoCr 垂直磁化膜による垂直異方性媒体を組み合わせた垂直磁気記録の発明は1977年に岩崎らによることになる⁽²⁾⁽²³⁾。この CoCr 垂直異方性媒体はすぐに軟磁性裏打ち層を持つ構

図3 対数時間でプロットした直径 $\langle D \rangle$ の円筒状粒子の磁気緩和の計算。磁気異方性エネルギー K_u は $2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 、粒子高は 10 nm、温度は 300 K とした。粒子サイズ分散と減磁界はないと仮定。

造となって飛躍的な記録再生感度の向上を達成している⁽²⁴⁾。

垂直磁気記録の利点は減磁界の性質に根ざしている⁽¹⁾。長手磁化とは異なり反平行磁化によって磁化転移が形成されるために、磁化転移中心で減磁界がゼロになる⁽²⁾。従って、垂直磁化では減磁界が記録分解能を劣化させない。このために垂直磁気記録では記録媒体の極度の高保磁力化と薄膜化が不要で比較的厚い記録層を用いることができるので、同じ面密度でも粒子体積を大きくできる。また、記録媒体に裏打ち層があるので単磁極型垂直ヘッドとの組み合わせで大きな記録磁界が発生できて記録媒体に大きな磁気異方性を持つ媒体を使えるから、熱磁気緩和には有利である。

(2) 垂直記録媒体

垂直磁気記録媒体は CoCr 垂直膜に始まっている⁽²⁾⁽²³⁾。この CoCr 膜は当時熱磁気記録に研究されていたガーネットなどの垂直磁化膜と比べて大きな飽和磁化を有し、磁気記録媒体として適当であった。さらには、その微細構造がカラム状であって磁壁移動ではなく磁化回転型の磁化過程を示すことが早くから見出されていた⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

垂直磁気記録媒体は平均的な減磁界が大きくなる低密度ほど記録磁化減衰が大きく起こることが指摘され、その対策にはより高い磁気異方性を持つ Co/Pt 系の積層膜が提案されたこともあった⁽²⁷⁾。その後高い磁気異方性が得られる CoCrPt 膜⁽²⁸⁾によって 52.5 Gbits/inch² の記録密度が達成され⁽²⁹⁾、これに SiO₂ を添加することによって積極的に磁性粒子間の磁気分離を促進した CoPtCr-SiO₂ 媒体が用いられる⁽³⁰⁾、大きな記録特性の改善が達成されている。

(3) 垂直磁気ヘッド

垂直磁気記録のための記録用磁気ヘッドには従来の長手記録用リングヘッドに替えて単磁極ヘッド⁽²²⁾が用いられるが、近年、さらにヘッド磁界勾配の改善と隣接トラック干渉を改善するために、記録主磁極の周囲に軟磁性磁極を配置したシールド型が提案されている⁽³¹⁾。

一方、再生ヘッドには長手磁化のために開発された GMR ヘッドをそのまま用いることができる。長手磁化と垂直磁化では記録磁化の向きが違うので、その再生波形はインパルス

状からステップ状にと大きく異なるが、近年の信号処理技術はそれぞれの再生波形に最適化できるようになっている。従って、垂直磁気記録に特有の再生ヘッドの必要はなく、優れた SN 比の信号が得られていれば従来の再生ヘッドをそのまま利用できる。ただし、垂直磁化は記録媒体から発生する再生磁界強度が通常は大きくなるので、高感度化に努めた GMR 再生素子が磁気飽和を起こさないように注意が必要である。

5. 今後の展望

垂直磁気記録によって、減磁界による記録分解能制約がなくなったので、その記録密度制約は構造的な結晶粒子構造で規定されることになった。今後の高密度化にはバリアエネルギー $K_u V$ 値を保ったままビットサイズを小さくすることが必須である。磁気異方性エネルギーを大きくした際の制約はヘッド磁界強度であるから、磁気異方性エネルギーに対して反転磁界が等価的に小さくなれば良い。このためにいくつかの提案がある。磁化容易軸に対して斜め方向に磁界を印加することで反転磁界を低下させたり⁽³²⁾、異なる磁気異方性を持つ複数の材料で粒子を構成してインコヒーレントな磁化反転とする試みがなされている⁽³³⁾。また、熱アシスト記録⁽³⁴⁾は、記録層を昇温することで書き込み時だけ磁気異方性エネルギーを小さくして磁化反転に必要なヘッド磁界を減少させることを意図していると理解される。さらには、パターン媒体記録⁽³⁵⁾は物理的なビット形成によって粒子体積とビット体積を等しくしてバリアエネルギーの低下を避けるものである。パターン媒体記録は記録媒体の微粒子構造を捨てて大きな粒子間交換結合を導入するもので、理論的には 1 Tbits/inch² を上回る高面記録密度でも熱的な安定性が確保できるが、磁気記録理論に大きな転換を要するもので、その具体的な議論のために設計論の確立が急がれる。

6. まとめ

磁気記録の高密度化は主として記録過程に起因する記録機構によって決定されてきており、このことを磁気ディスクの進展に注目する視点から述べた。長手記録では磁化転移における減磁界の影響を軽減して高密度化するために、記録媒体の薄膜化・高保磁力化を進め、媒体ノイズの低減のために記録層の粒子の磁気的な孤立化を図り、熱磁気緩和を防ぐために高磁気異方性エネルギー化を進めてきた。一方、近年実用化された垂直磁気記録に用いる磁気ヘッドと磁気ディスク媒体については、減磁界による記録分解能制約はなく、媒体ノイズを低減させるために微細ナノ磁気構造についての研究が進んでいる。磁気ヘッドはこれらの媒体の進歩を支えるために、GMR センサによる再生素子の超高感度化を進めてきており、記録ヘッドについても材料限界にある 2.4 T の飽和磁束密度を持つ FeCo 膜を使いこなしてヘッド記録磁界を大きくしてきた。

高密度磁気記録は、長手記録から垂直磁気記録に移行することで減磁界制約と熱磁気緩和制約を回避できたが、今後超高面密度領域での限界を乗り越えるために垂直磁気記録への

新たな着想の付与が期待されている。

文 献

- (1) S. Iwasaki: IEEE Trans. Magn., MAG-20(1984), 657-662.
- (2) S. Iwasaki and Y. Nakamura: IEEE Trans. Magn., MAG-13(1977), 1272-1277.
- (3) Y. Tanaka: IEEE Trans. Magn., 41(2005), 2834-2838.
- (4) C. Tsang: Digests of TMRC 2005, (2005).
- (5) J. J. Miyata and R. R. Hartel: IRE Electronic Computer, EC-8(1959), 159-169.
- (6) D. E. Speliotis and J. R. Morrioso: IBM J., 10(1966), 233-243.
- (7) 岩崎俊一: 電子通学会誌, 52(1969), 1241-1248.
- (8) S. Iwasaki and T. Suzuki: IEEE Trans. Magn., MAG-4(1968), 269-276.
- (9) R. I. Potter and R. J. Schmulian: IEEE Trans. Magn., MAG-7(1971), 873-880.
- (10) M. L. Williams and R. L. Comstock: 17th Annu. AIP Conf. Proc., 5(1971), 738-742.
- (11) R. P. Hunt: IEEE Trans. Magn., MAG-6(1970), 602-603.
- (12) N. X. Sun and S. X. Wang: IEEE Trans. Magn., 36(2000), 2506-2508.
- (13) C. D. Mee: The Physics of Magnetic Recording, North-Holland Pub, (1964), 88-90.
- (14) R. P. Potter: IEEE Trans. Magn., MAG-10(1974), 502-508.
- (15) H. C. Tong, et al.: IEEE Trans. Magn., MAG-20(1984), 1831-1833.
- (16) N. R. Belk, P. K. George and G. S. Mowry: IEEE Trans. Magn., MAG-21(1985), 1350-1355.
- (17) Y. Maeda and M. Asahi: IEEE Trans. Magn., MAG-23(1987), 2061-2063.
- (18) S. H. Charap, P. L. Lu and Y. He: IEEE Trans. Magn., 33(1997), 978-983.
- (19) C. D. Mee: Magnetic Recording, the First 100 Years, IEEE Press, (1999), 16.
- (20) 岩崎俊一: 日経エレクトロニクス, (1978. 8. 7), 100.
- (21) A. S. Hoagland: IBM J. Res. Develop., 2(1958), 91-104.
- (22) S. Iwasaki and Y. Nakamura: IEEE Trans. Magn., MAG-14(1978), 436-438.
- (23) S. Iwasaki and K. Ouchi: IEEE Trans. Magn., MAG-14(1978), 849-851.
- (24) S. Iwasaki, Y. Nakamura and K. Ouchi: IEEE Trans. Magn., MAG-15(1979), 1456-1458.
- (25) S. Iwasaki, K. Ouchi and N. Honda: IEEE Trans. Magn., MAG-16(1980), 1111-1113.
- (26) K. Ouchi and S. Iwasaki: IEEE Trans. Magn., MAG-23(1987), 180-182.
- (27) B. M. Lairson, W. Liu and A. P. Payne: J. Appl. Phys., 79(1996), 7920-7925.
- (28) Y. Hosoe, et al.: IEEE Trans. Magn., 34(1998), 1528-1533.
- (29) H. Takano, et al.: J. Magn. Magn. Mater., 235(2001), 241-244.
- (30) 竹野入俊司, 他: 日本応用磁気学会誌, 27(2003), 940-945.
- (31) M. Mallary, A. Torabi and M. Benakli: IEEE Trans. Magn., 38(2002), 1719-1724.
- (32) K.-Z. Gao and H. N. Bertram: IEEE Trans. Magn., 38(2002), 3675-3683.
- (33) R. H. Victora and X. Shen: IEEE Trans. Magn., 41(2005), 537-542.
- (34) J. J. M. Ruigrok: J. Magn. Soc. Japan, 25(2001), 313-321.
- (35) R. L. White, R. M. H. New and R. F. W. Pease: IEEE Trans. Magn., 33(1997), 990-995.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 村岡裕明
 1981年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
 1981年 松下通信工業株式会社
 1991年 東北大学電気通信研究所助手
 2000年11月 現職
 専門分野: 磁気記録工学, 情報ストレージシステム
 一貫して、磁気記録の高密度化、特に、垂直磁気記録方式の研究に従事。現在、高密度磁気記録再生理論と大容量情報ストレージシステムについて取り組んでいる。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★