1-3 高密度磁気記録技術の展望

正会員 中村 慶久†

1. ま え が き

最近の磁気テープ記録技術の進展は著しく、デジタル信号処理や伝送技術の進展とも相まって、アナログ信号をデジタル化、高品位化して扱えるまでに高められた。一方、磁気ディスク装置はますます小型、大容量になり、それによって計算機も小型化し、発揮できる能力も著しく増大した。ますます高次化し、多様化するこれからの情報化社会で、情報を時間的に伝達する記録技術への要望と期待は極めて大きい。

しかし、テレビ画像1枚をデータ圧縮せずにデジタル記録するには原理的には1MB近い記録容量が、またハイビジョン画像にはこのほぼ5倍が必要である。また計算機システムの機能が充実するほどプログラムソフト量やデータ量も膨大になり、フロッピーやハード磁気ディスク装置など外部記憶装置の扱える記録容量も格段に大きなものが求められる。21世紀には、半導体技術の向上によりパーソナルコンピュータの性能は現在より2桁近く向上し、2桁近く大きな10GB以上の容量をもつ外部記録装置が必要ともいわれている¹⁾²⁾。情報記録技術には宿命的に高密度化、軽小短薄化が限りなく求められている。

最近筆者らは、磁気記録のベクトル磁化過程をコンピュータで追跡し、記録再生特性を定量的に解析し予測できる磁気記録シミュレータを開発した³⁾。以下では、これを用いて、主に記録メカニズムの点から磁気記録技術の高密度化の現状を分析し、可能性を予測して、実験結果をまじえながら将来を展望する。

2. 高密度化の現状と期待

磁気記録技術は過去30年に1000倍も高密度化を達成した(図1)。VTR用磁気テープは数 μm^2 の微小領域に1ビットが記録できるまでになり、今日の小型化・高画質化を可能にした。切手大の極めて小さなカ

図1 磁気記録の面記録密度向上のトレンドと将来予測

セットに、デジタル信号で2時間もステレオ録音できる、超小型テープレコーダまで出現している⁴⁾。

ハード磁気ディスク装置では1ビットの占有面積が $10\mu\text{m}^2$ を切り、約7cm(2.5インチ)径ディスクや、さらに面積がその半分の約5cm(1.8インチ)径ディスクに数10から100MB以上の情報が記録できるまでになって、ノート型パソコンなどに搭載されている。

さらに最近、1ビットの占有面積が $1\mu\text{m}^2$ を切る磁気ディスク装置の可能性も発表された⁵⁾⁶⁾。これは現用磁気ディスクの10倍以上の記録密度で、約9cm(3.5インチ)径ディスク1枚に1GB以上の情報が記録でき、数年後には商品化されるといわれている。日進月歩の磁気記録技術が今後も10年10倍のテンポで向上すれば、現在の1000倍、 $1\mu\text{m}^2$ 当たり1Gbの超高記録密度に達するのは30年後の西暦2025年頃になる。これは可能であろうか?

3. 長手磁化方式の高密度化

現在の磁気記録は、ヘッド走行方向に磁化容易な磁気メディアをリングヘッドで記録する長手磁化方式で

† 東北大学 電気通信研究所

"Prospect of High Density Magnetic Recording Technology" by Yoshihisa Nakamura (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai)

図2 薄膜長手磁化メディアの記録状態
(a)低密度 (孤立磁化転移)
(b)高密度 (4000 Flux Change/mm)

図3 長手磁化メディアの高密度記録磁化状態の記録レベルによる変化

ある。原理的には、決められた間隔毎に長手磁化の極性反転が「ある」、「なし」でデジタル情報が記録される。しかしメディア内の磁化状態を磁気記録シミュレータで調べると、薄膜長手磁化メディアでも長手磁化転移領域の磁化は表面に垂直な方向を向いている(図2)。これはリングヘッドのギャップ近傍の磁力線(ベクトル磁界分布)が円弧状であることによって、垂直磁化成分は磁性層表面に面磁極を分布させる

が、これがメディアから外部に生じる磁界、すなわち再生時にヘッドコア内を流れる磁束の源になる。

高密度になると、この垂直磁化領域が逆極性で近づく。比較的記録レベルの低い時には、メディアの表面近くが円弧状に磁化されるが(図3(a))、さらに記録レベルを増したり、高密度にしたりすると、磁化分布は次第に閉磁路(回転磁化モード)を形成する(図3(c))。こうなるとメディア外部に生じる磁界強度が激減し再生電圧が低下する。これが記録減磁の主因である。これは逆極性で隣接するメディア表面磁極分布間に生じる内部磁界の長手成分と、これに感じ易い長手磁化メディアの長手磁化容易性が原因である⁷⁾。

これを避けるため、いままでは高密度化のために、VTRのように低い記録レベルで表面だけを円弧状磁化モードで浅く磁化するか、磁気ディスク装置のように磁性層をできるだけ薄くする方法がとられている。

4. 長手磁化方式の可能性

磁気メディアが粒子間相互作用のない微細磁性粒からなる理想的な薄膜構造の微粒子集合体であるとする、磁気記録シミュレータで磁気メディアのパラメータや記録条件、記録密度までを任意に設定すると、記録後のメディア内の磁化状態が求められる⁸⁾。これから、メディア表面の磁束密度のピーク値を記録密度に対してプロットすると、再生損失のない理想的な条件での磁気メディアの記録密度特性が求められる。ここで低密度時のメディア表面磁束密度 $B_{n,max}$ とその半分になる記録密度 $D_{sf,50}$ は、メディアの記録能力を推定する性能指数になり、それぞれ理想再生条件でのメディアの再生出力と記録分解能に相当する。

長手磁化メディアをリングヘッドで記録する場合の $B_{n,max}$ および $D_{sf,50}$ をメディアの各種パラメータで整理すると(図4)、高密度化と高出力化を同時に実現するには、保磁力 H_c を大きくすることが最も効果的である⁹⁾。この傾向はすでに実験でも確かめられている¹⁰⁾¹¹⁾。平均保磁力が 200 kA/m (2500 Oe) の針状微細粒子を、粒径や寸法をできるだけ揃えて密に、しかも磁氣的相互作用がないように、数 10 nm 程度に薄く長手配向して並べることができると、長手磁化メディアでも、理論的には 1mm 当りに 10000 ビット以上、ビット間隔で 100nm 以下の超高記録密度で情報が書込める(図5)。

薄膜化しても内部磁界の影響から逃れられない長手磁化方式では、 H_c を高くする以外に本質的に高密度化を図る方法はない。これは磁気ヘッドの書込み能力で制限される。一方、メディア自体がかなりの高密度

図 4 長手磁化メディアの記録能力
(a) 最大表面磁束密度
(b) 50% 表面磁束記録密度

図 5 高保磁力な薄膜長手磁化メディアを超高密度 (10000 Flux Change/mm) で記録したときの磁化状態

で記録できても、薄膜化と低 M_r 化によって記録後にメディアから生じる磁界が低減し、読出し時の諸損失のために高密度ほど再生電圧は急激に減衰する。結局、実用できる再生電圧や記録密度は、メディア固有の記録能力から予測される値よりかなり下回る。

5. 高密度化のための磁化モード

高密度で高出力を得るには、回転磁化モードの形成による記録減磁がなく、高密度でも表面に垂直な磁化が残り易い磁気メディアを実現することである。メディア磁性層の磁気異方性を等方化すると円弧状磁化モ

図 6 表層を垂直、裏層を長手配向した重層塗布形メディアに低周波と高周波の二重信号を記録したときの磁化状態

図 7 斜め配向メディアの高密度記録 (3750 Flux Change/mm) での磁化状態
(a) 長手配向, (b) 30° 配向, (c) 60° 配向

ードが保持され易くなり高密度記録できることは、すでに Lemke らにより報告されている¹²⁾。最近の金属薄膜磁気ディスクでは、磁性層を構成する微結晶粒を微細化、弧立化、無配向化して、1ビット当たりサブ平方ミクロンの高密度記録を実現している¹³⁾。

さらに、磁気メディア表面に強い垂直磁気異方性をもたせる、すなわち垂直磁化層にすると、高密度記録に対して一層効果的である。垂直磁化層の裏面に保磁力の比較的低い長手磁化層を設けた 2 層構造メディアは、再生波形が信号処理し易い単峰性になり、さらに再生出力も大きくなる¹⁴⁾。2 層 (重層) メディアを塗布形で実現し、これに低周波と高周波を重ねた 2 周波アナログ信号を記録すると、表面に高密度成分が垂直磁化、裏面に低密度成分が長手磁化され (図 6)、高密度記録性と高出力性が同時に実現できる¹⁵⁾。

一方、最近、ハイバンド 8 mm ビデオテープとして斜め蒸着法で作製したコバルト系金属薄膜テープが実用化された。この磁化容易方向はメディアの走行方向

に対し膜面からほぼ 30° 傾いている¹⁶⁾。このリングヘッドによる記録過程をシミュレータで調べると、高密度まで磁性層全体が斜め磁化され(図7)、表面層に垂直磁化、すなわち再生磁束の源となる面磁極分布を生じて、高密度での情報検出を可能にしている¹⁷⁾。

リングヘッドで高密度記録が可能なこれらの磁化モードを整理すると、円弧状、馬蹄状両磁化、および斜め磁化がある(図8(a), (b), (c))。前二者は、長手磁化転移領域、すなわち垂直磁化領域に情報を担わせている。これはメディア表面で長手磁化成分がゼロで、垂直磁化成分、いかえれば面磁極密度が最大になる位置である。これに対して後者は、斜め磁化領域に情報を担わせており、これは斜め磁化の強さが最大で、長手と垂直の両磁化成分がともにメディア表面で最大、いわば面磁極密度が最大になる位置に相当する。このようにリングヘッドを用いる現在の磁気記録技術でも、高記録密度化のためには高密度で垂直磁化が残り易いメディアを用いることが、自然の流れになっている。

これに対し、膜面に垂直な磁化反転の有無でディジ

図8 高密度記録のための磁化モード
(a)円弧状磁化, (b)馬蹄状磁化, (c)斜め磁化, (d)垂直磁化

タル信号を記録することも可能である(図8(d))。垂直磁化の反平行極性反転位置、すなわちメディア表面で垂直磁化の極性が反転し、面磁極密度がゼロになる位置に情報を担わせる。反平行な磁石間には吸引力が働き、磁化転移を広げる内部磁界の影響が激減して磁化転移が急峻になり、長手磁化方式よりも格段に高密度でビットを連ねられるものと期待できる。これを垂直磁化方式と呼ぶ。

6. 垂直磁化方式の可能性

筆者らは垂直磁化方式を理想的に実現するために、コバルトクロム垂直磁気異方性層とニッケル鉄軟磁性層とからなる2層垂直磁化メディアに単磁極構造の磁気ヘッドを組合せる方式を提案した¹⁸⁾。これにより1 mm 当たり 20000ビット以上(ビット間隔 50 nm 以下)でデジタル信号を超高密度記録再生できることを(図9)、実験でも確かめている¹⁹⁾²⁰⁾。

図9 垂直磁化メディアを単磁極ヘッドで超高密度(20000 Flux Change/mm)で記録したときの磁化状態

図10 垂直磁化方式における記録密度に対する再生出力特性

(a)

(b)

図 11 垂直磁化メディアの記録能力

(a) 最大表面磁束密度

(b) 50%表面磁束記録密度

一方、この記録プロセスを磁気記録シミュレータで調べると、コバルトクロム垂直磁化層を構成する結晶粒数個分に相当するビット間隔である 40 nm 以下の超高分解能、つまり 1mm 当たり 25000 ビット以上の超高密度でも、厚さ 100nm 程度のメディア垂直磁化層全厚をほぼ一様に垂直磁化モードで記録できることが確かめられる (図10)²¹⁾。磁性粒をさらに細かくできれば、さらに高密度でも垂直磁化できる。

これについても、高密度で大きな表面磁束が得られる条件を磁気記録シミュレータで調べると、垂直磁化層を構成する微細磁性粒子の保磁力 H_c の分散 (ばらつき) を表す標準偏差 σ_{hc} をできるだけ狭くすることが必要であることがわかる⁹⁾。また垂直磁化層の飽和磁化 M_s を大きく、厚さ δ を薄くしても、高密度記録が可能になる (図 11)。

保磁力分散 σ_{hc} が狭いことは、垂直磁化層固有のヒステリシスループの角形性を増すことである。 M_s を大きく、 δ を薄くすることは、ヘッド主磁極とメディア間の磁氣的相互作用を強めてヘッド磁界分布を急峻にすることである。これらは、垂直磁化方式では高密度ほど内部磁界の影響がなくなり、記録性能がメディ

図 12 垂直磁化メディアへの超高密度記録状態の予測モデル図

アのヒステリシスループの角形性とヘッド磁界の急峻さだけで決まることを示している。

単磁極ヘッドによる垂直磁化方式ではトラックにじみもなく、トラック方向にも走行方向と同じ記録分解能を持っているので、垂直磁化方式には 1 ビットを一边の長さが結晶粒数個分に相当する面積、すなわち、ほぼ数十個の微結晶粒子の集まりに記録できる分解能があることになる。いいかえれば、1 ビットの情報を少なくとも数 1000nm² (数 10nm × 数 10nm) 以下に、すなわち、1mm² 内に 1Gb 近い超高面記録密度で記録できる能力がある (図12)。これは現在実用になっているものの約 1000 倍で、現在使われている小型ハード磁気ディスクの約 1000 枚分の情報量である 100 GB を 1 枚に記録できることである。ハイビジョン画像を 8 ミリビデオ用カセットテープにデジタル信号で記録することも可能になる。

7. 超高密度磁気記録実現への課題

磁気記録技術には、まだかなりのポテンシャルがある。これを活かすには、多くのブレークスルーとそれを実用化するための時間が必要である。当面、以下のことが緊急の課題である。

まず、高密度磁気メディアの作製技術である。高密度記録メディアは、長手磁化から等方性、さらに斜め磁化から垂直磁化へと、内部磁界の影響を軽減する方向へと確実に進んでいる。高密度化には、磁性粒の微粒子化と保磁力分布を狭めることが有効であるが、コバルトクロムのような金属薄膜メディアでは、構成する各微細磁性粒の形状や粒径の均一性だけでなく、結晶性の良さにも関係する²²⁾。スパッタや蒸着などの真空製膜法では、いかに結晶性の良い微細結晶粒を基板上に成長させ、所望の異方性の方向を揃え、かつ緻密

に、しかも孤立的に並べるかが、超高密度化を実現する磁気メディアの条件になる。基板材から吟味し、その上に、結晶性や粒度分布、配向性などを十分にコントロールしながら、高分解能記録を実現する磁性層を積み上げる成膜技術を確立する必要がある。その上、平滑かつ無欠陥で、ヘッドを接触させても情報欠落やヘッド損傷を引き起こさず、半永久的に安定に走行させられるだけの表面性と、情報の長期保存に対しても充分な信頼性のあることも望まれる。

次に、磁気ヘッドの再生能力の向上である。高密度化によって検出すべきビット面積がますます狭まるが、信号処理に必要な充分な S/N でビット検出できるヘッドが求められる。磁気抵抗 (MR) 効果を用いたヘッドの開発が盛んに進められているが、高密度高周波数ほど原理的に再生電圧が高くなるインダクティブヘッドの特長も捨て難い。単磁極ヘッドは狭トラックすると再生感度が向上し、リングヘッドに勝るとも劣らないほどの高い規格化再生電圧が得られる²³⁾。薄膜集積化による高効率高感度の効果は大きいと期待される。しかし、磁区や磁壁などのミクロな挙動が電磁変換特性に顕著に影響し、性能や歩留りの向上を制限するので、不安定で不規則な動作をしない軟磁性膜の作製法や、不安定動作を人為的に抑制する技術の開発などが切望される。

一方、高密度になるほどヘッドをメディアに近づけることが必要になり、双方を損傷させないトライボロジー技術の開発が望まれる。磁気ディスクでは従来の浮上型を脱却したスライディングコンタクト型のヘッド・メディア・インタフェースが追求されている。先端の曲率半径が小さく接触面積が狭くなるように加工した単磁極ヘッドを、できるだけ表面性の良好なメディア上に軽く接触させて相対走行させると、かなりの高速走行でも、メディアとヘッドの双方を傷めずに、低スペーシングを実現できる²⁴⁾。これは垂直磁化方式によるハード磁気ディスクドライブのヘッド支持機構に応用され、実現性の高いものが試作されている²⁵⁾。VTR などのテープ駆動系でも、塗布型テープに対するローディング機構から、高密度化が期待される金属膜テープを意識したものへの転換も必要になろう。

8. む す び

磁気記録技術は、最近の30年間に、面記録密度を10年10倍の割合で向上させてきた。1ビットを数 μm^2 の面積に記録できる磁気ディスク装置や VTR が製品化され、1ビットをサブ平方ミクロンの面積に記録できるものの実用化も目前になっている。最近では、長手磁化

用と呼ばれる金属薄膜メディアでも微粒子化が進められ、無配向化あるいは斜め配向化して、次第に垂直磁化成分を活用する膜構造になってきている。高密度まで垂直磁化成分が維持され、再生電圧が検出できるようになって、高密度記録特性が改善された。長手磁化方式から垂直磁化方式への移り変わりはすでに始まっている。

磁気メディアには少なくとも現在の 1000 倍の記録密度、1ビットの占有記録面積を $1/1000 \mu\text{m}^2$ オーダにまで微細化できる潜在能力がまだある。磁気ヘッドの信号検出能力が飛躍的に高められ、周辺技術も記録密度向上のトレンドと同じテンポで今後も進歩すれば、30年後の西暦 2025 年前後に、現在より約 1000 倍も超高密度な記録装置が実現する (図 1)。

磁気メディア上の数 1000nm^2 (数 $10\text{nm} \times$ 数 10nm) 以下の微細な領域に1ビットを書込むことは、強磁性の担い手であるスピンのクラスター (群れ) 1個に書込むことでもある。これに正確に情報を書込み、かつ読出すためには、スピンの挙動を基本にしたナノスケールのマグネティクス (スピニクス) 技術が確立されなければならない。また、これによって実現される超小型で超大容量なデータストレージ磁気デバイスを、いかにその他の高速大容量なメモリーデバイスや超小型高速マイクロプロセッサ、コンピュータなどと組合せ、どのような機能をもたせた情報ストレージサブシステムや情報処理システムを構築するか、も大きな課題である²⁶⁾。エラーフリーで高速データ転送を可能にする大容量小型ディスクアレイシステム²⁷⁾や半導体メモリーや LSI デバイスと組合せて、記録システム自体にデータ処理機能の一部をもたせたもの⁴⁾など、これらの新しい動きはすでに始まっている。

(1993年2月1日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) R. H. Katz, G. A. Gibson, D. A. Patterson: "Disk System Architectures for High Performance Computing", Proc. IEEE, **77**, p. 1842 (1989)
- 2) M. H. Kryder: "Data Storage in 2000 — Trends in Data Storage Technologies—", IEEE Trans. Magn., **25**, p. 4358 (1989)
- 3) Y. Nakamura, I. Tagawa: "An Analysis of Perpendicular Magnetic Recording Using a Newly Developed 2D-FEM Combined with a Medium Magnetization Model", IEEE Trans. Magn., **25**, p. 4159 (1989)
- 4) 姫野卓治, 田中正人, 家徳隆史, 松本吉生, 田村正文, 韓 敏哉, 佐々木利一, 伊藤条大: "Non-Traking 方式による高密度磁気テープ記録", 信学論, **J75-C-II**, p. 591 (1992)
- 5) C. Tsang, M-M Chen, T. Yogi, K. Ju: "Gigabit Density Recording Using Dual-Element MR/Inductive Heads on Thin-Film Disks", IEEE Trans. Magn., **26**, p. 1689 (1990)
- 6) 二本正昭, 釘屋文雄: "2Gb/in² 高密度磁気ディスク技術", 信

学論, **J75-C-II**, p. 567 (1992)

- 7) 大股 健, 田河育也, 中村慶久, 岩崎俊一: “長手磁気記録における回転磁化モードの形成過程—計算機シミュレーションによる解析—”, 応磁誌, **12**, p. 141 (1988)
- 8) I. Tagawa, Y. Nakamura: “Computer Simulation of Magnetic Recording”, Jour. Mag. Soc. of Jpn., **13**, S1, p. 97 (1989)
- 9) Y. Nakamura: “Theoretical and Experimental Prospects of Perpendicular Magnetic Recording”, Jour. Mag. Soc. Jpn., **15**, S2, p. 497 (1991)
- 10) D. E. Spiliotis, J. R. Morrison, J. S. Judge: “A Correlation between Magnetic Properties and Recording Behaviour in Metallic Chemically Deposited Surfaces”, IEEE Trans. Magn., **MAG-1**, p. 348 (1965)
- 11) 横山克哉: “磁気記録技術入門”, p. 345, 総合電子出版社 (1988)
- 12) J. U. Lemke: “Ultra-High Density Recording with New Heads and Tapes”, IEEE Trans. Magn., **MAG-15**, p. 1561 (1979)
- 13) T. Yogi, C. Tsang, T. A. Nguyen, K. Ju, G. L. Gorman, G. Castillo: “Longitudinal Media for 1 Gb/in² Areal Density”, IEEE Trans. Magn., **26**, p. 2271 (1990)
- 14) S. Iwasaki, K. Ouchi: “Co-Cr Composite Media Intended for Perpendicular Magnetic Recording by Using a Ring-Type Head”, Jour. Mag. Soc. Jpn., **13**, S1, p. 21 (1989)
- 15) 安藤康夫, 田河育也, 中村慶久: “重層媒体におけるビデオ信号の磁気記録シミュレーション解析”, テレビ誌, **46**, p. 1286 (1992)
- 16) 法橋滋郎, 千葉一信, 佐藤研一: “Co-Ni-O 斜方蒸着テープの性能”, 応磁学誌, **16**, S1, p. 39 (1992)
- 17) I. Tagawa, Y. Shimizu, Y. Nakamura: “Ring Head Recording Mechanisms and Characteristics of Obliquely Oriented Media”, Jour. Mag. Soc. Jpn., **15**, S2, p. 827 (1991)
- 18) S. Iwasaki, Y. Nakamura, K. Ouchi: “Perpendicular

Magnetic Recording with a Composite Anisotropy Film”, IEEE Trans. Magn., **MAG-15**, p. 1456 (1979)

- 19) S. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Iwasaki: “Extremely High Bit Density Recording with Single-Pole Perpendicular Head”, IEEE Trans. Magn., **MAG-23**, p. 2070 (1987)
- 20) Y. Nakamura: “Conditions for Ultra-High Density Magnetic Recording”, Jour. Mag. Soc. Jpn., **13**, S1, p. 33 (1989)
- 21) Y. Nakamura, I. Tagawa: “Possibilities of Perpendicular Magnetic Recording”, IEEE Trans. Magn., **24**, p. 2329 (1988)
- 22) 田河育也, 中村慶久: “磁気記録媒体における H_k 分布と高密度特性の関連”, 応磁誌, **15**, p. 155 (1991)
- 23) H. Wakamatsu, K. Kiuchi, M. Shinohara, Y. Miura: “Effects of Spacing on Recording Characteristics of a Perpendicular Double-Layer Disk”, Jour. Mag. Soc. Jpn., **15**, S2, p. 875 (1991)
- 24) 村岡裕明, 中村慶久: “接触スライド形垂直磁気記録ハードディスクの記録再生特性”, 信学論, **J75-C-II**, p. 576 (1992)
- 25) H. Hamilton, R. Anderson, K. Goodson: “Contact Perpendicular Recording in Rigid Media”, IEEE Trans. Magn., **27**, p. 4921 (1991)
- 26) 杉江 衛: “これからの電子計算機システムとファイルシステム”, 応磁学誌, **16**, S1, p. 1 (1992)
- 27) 金子 悟: “磁気ディスクサブシステムの現状と展望”, 応磁学誌, **16**, S1, p. 5 (1992)

なかむら よしひき

中村 慶久 昭和43年, 東北大学大学院博士課程修了。同年, 同大学電気通信研究所助手, 昭和46年, 助教授, 昭和62年, 教授。現在に至る。高密度磁気記録とくに垂直磁化による超高密度記録, 記録理論, メディアとヘッド, 記録用磁性膜, マイクロ磁化機構などの研究に従事。工学博士。正会員。