3章 エンタープライズ向けテープドライブ

3-2 エンタープライズシステム用高性能テープ技術開発

辻本 真志[†], 大野 幹夫[†]

キーワード：バリウムフェライト，リニアテープシステム，エンタープライズ，磁気記録，塗布型媒体

1. まえがき

近年のインターネットやクラウドコンピューティングの普及，データセンターの大型化，4K/8K動画といった各種コンテンツの高性能化により，全世界で生成および複製されるデータは，2009年に0.9 ZB (10²¹ bytes)，2010年に1.2 ZB¹⁾，2013年に4.4 ZBと，年率40%のペースで増加し，2020年には全世界のデジタルデータの総量は44 ZB²⁾に達すると見積もられている．これら背景からデータストレージデバイスの持続的な記録密度の向上は今後も期待されているが，その主役たるハードディスクドライブ (HDD) は記録密度の成長がここ数年減速してきている (図1)．

一方，磁気テープは，HDDに対して容量あたりのシステムコストが安価，長寿命，省エネといった特徴からHDDのバックアップ用途やデータを長期間保存するアーカイブ用途として使用されてきた³⁾．近年，バリウムフェライト磁性体を中心とした新規技術により，これまで記録材料として長年使用されてきた金属磁性体では限界にきていた記録密度の向上に成功しており⁴⁾，磁気テープストレージに対する関心が，これまで以上に高まっている．

テープストレージの分野において，リニアテープシステムは近年も継続的に開発が進められ，着実にその性能を向上させている．8～32個の多チャネル素子を持つ磁気ヘッドに対して，毎秒数mの速さでテープをサーペンタイン走行させることで，1/2インチ幅のテープの幅方向に数千本のデータを記録し，大容量化と高速なデータ転送を両立させている．リニアテープシステムの市場セグメントは，LTOと呼ばれるミッドレンジのオープンシステムと，各社が独自の規格で開発しているハイエンド向けのエンタープライズシステムに分類される．

エンタープライズ向けのテープストレージでは，特に高性能なストレージを必要とするユーザに対して，大容量，高転送速度，高信頼性を訴求することで彼らのニーズに応

図1 HDDと磁気テープの記録密度トレンド

えてきた．本稿ではそれら性能を達成するために導入してきた磁気テープ技術について解説する．

2. 磁気テープの大容量・高速データ転送技術

一般的に，磁気テープの大容量化を達成するには，①磁性材料の微細化，②磁性層の薄層・均一化，③磁性層表面の平滑化，による面記録密度の向上と，④テープ薄手・長尺化による記録面積の向上が重要といわれる．

データ転送速度は単位時間あたりに記録・再生できるデータ量であり，その高速化には，記録密度の向上に加えて，テープ搬送速度の高速化と磁気ヘッドの多チャネル化が挙げられる．この実現には，テープ搬送が高速化してもヘッドが狭い記録再生トラック上を高精度に追従できるように，⑤ヘッドとの摩擦を下げる低摩擦表面設計や，⑥サーボ・テープ幅寸度精度の向上が重要となる．

ここでは，それぞれの技術の詳細について説明していく．

2.1 磁性体の微細化

従来の磁気テープ媒体で使用されてきた磁性材料は，金属 (MP) 磁性体と呼ばれるFeを主体とした針状の材料である．その磁性の起源は形状異方性であり，主要な磁気特性である保磁力は軸比 (長軸長/短軸長) で制御されている．

[†] 富士フイルム株式会社 記録メディア研究所

"Development of High Performance Tape Media for Enterprise Tape System" by Shinji Tsujimoto and Mikio Ono (Recording Media Research Laboratories, FUJIFILM Corporation, Odawara)

図2 MPとBaFe磁性体のTEM像および特性

図3 MPとBaFeテープの表面SEM像

MPの長軸長は以前には困難と思われた領域まで短くしてきたが、反面、軸比分布の制御が難しくなり磁気特性の分布を生じるようになってきた。さらに、金属であるMPでは酸化を防止するためにコアの金属の周りに最低でも数nmの厚みの被膜を設ける必要があるため、これが微細化と磁気特性の両立を妨げる要因となっていた。

この課題を解決する素材として、バリウムフェライト (BaFe) 磁性体を磁気テープに使用することが提案・実証され⁵⁾、2011年に市場導入されたエンタープライズテープにてはじめて実用化された。BaFe磁性体の磁性の起源は結晶磁気異方性であり、結晶構造でその磁気特性が決まるため、微細化しても高い保磁力を示す特徴がある。また、BaFe磁性体自身が酸化物であるために、極めて安定な性質を有し微細化を実現する上で有利となっている。図2に容量1.5 TBのUltrium LTO5⁶⁾ (以降LTO5) で採用されたMP磁性体と、8.5 TBエンタープライズ用テープで採用されたBaFe磁性体の透過型電子顕微鏡像と特性比較を示す。MP磁性体の形状が針状であるのに対し、BaFe磁性体は板状の形状を有し、MP磁性体に比べて高い保磁力を維持したまま粒子体積で約30%微細化できていることがわかる。

2.2 磁性粒子の微細化分散

磁気テープでは記録信号のノイズ成分を低減するため、磁性体の凝集を抑え均一に塗布することが重要である。一般に粒子の微細化が進むと比表面積が増大するため、均一な分散は困難になる。さらに、BaFe磁性体は磁化容易軸が板面に対して垂直であることからMP磁性体に比べスタッキングし易く、分散後の再凝集が発生する問題がある。これら課題の解決手段として、磁性体間に分散剤やバインダーなどの有機素材を吸着させ、磁性体表面に形成した有機物層の立体反発によって磁性体の凝集を抑制する技術が導入されている。BaFe磁性体の表面組成に適した分散剤とポリマ極性基を採用することで高い吸着率を実現し、必要最小限の有機素材の量で均一分散・再凝集の抑制を行っている。図3に容量1.5 TBのLTO5と10 TBのエンター

プライズ用BaFeテープの走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面形態像を示す。この図から、BaFe粒子が均一に高分散・高充填されていることがわかる。

2.3 磁性層の薄層均一化

記録密度の向上にはシャープな磁化反転により記録信号の解像度を上げることが重要であるが、そのためには磁性層の薄層化が必要となる。従来のリニアテープでは、非磁性の下層の上に0.5~0.1 μm 厚みの磁性層を設けていたが、近年の高密度システムでは磁性層厚みを一桁薄い数10 nmにまで薄くする必要が生じた。さらには上層磁性層と下層非磁性層の界面が乱れることで発生するノイズが課題となってきた。この界面の乱れは、非磁性層と磁性層の塗布液界面での混合や非磁性下層液の分散性の劣化によって発現する。塗布方式の改良に加えて、上/下層塗布液のチキソトロピー性の制御や非磁性下層の微細化分散により乱れを抑えて均一な薄層磁性層を実現することで低ノイズ化を図った。図4は、非磁性層と磁性層の界面の様子を観察した断面TEM画像である。新たに導入した薄層塗布技術によって形成された界面は、従来塗布方式に比べて大幅にその変動が抑制されていることがわかる。

2.4 磁気テープの薄手長尺化

テープ長尺化は、大容量化の重要な手段の一つである。カートリッジサイズを変更せずにテープ長尺化を実現することが単位体積当たりの記録容量を向上するために重要であるため、テープ薄手化技術の確立が重要となる。図5にテープ総厚みのトレンドを示す。強靱な支持体フィルムの採用や塗布層の高強度化、および、ドライブでのテープ搬送テンションの低減やテンション制御技術のサポートにより薄手化を達成してきた。IBM3592エンタープライズテープでは、2003年の初代テープ以降、現在に至るまで1.7倍以上の長尺化を同じカートリッジサイズで実現している⁷⁾。

2.5 低摩擦化表面設計

磁気ヘッドとテープ表面の距離 (スペーシング) は磁氣的

図4 テープ断面TEM画像

図5 テープ総厚みのトレンド

ロスとして記録再生性能を低下させる原因になる。一般的に、記録再生効率を高めるために磁気テープ表面を平滑にするとヘッドとの接触面積が大きくなるため、摩擦が高くなる。その結果、走行が不安定になったりテープダメージが生じるため、表面平滑化と摩擦増加のトレードオフから抜け出す技術が重要となる。図6に光干渉型表面粗さ計により測定した表面粗さのプロファイルと、磁気ヘッドを想定した表面粗さを持つ材料に対して評価した摩擦係数の値をLTO5用MPテープとエンタープライズ用BaFeテープで比較した。BaFeテープでは非磁性下層の微細化分散、磁性層に添加するフィラーの粒度分布の均一制御、潤滑剤を調整することで摩擦係数を増大させずにテープ表面の平滑化を実現している。

2.6 サーボ技術・寸度精度向上

高速なテープ搬送でも安定的な記録再生を実現するには

図6 テープ粗さと摩擦係数

サーボ信号の精度向上が重要になる。サーボ信号とは、数 μm 幅のデータトラックを正確に記録・再生するために、テープ上にあらかじめ記録された磁気信号であり、磁気ヘッドはこのサーボ信号を読み取って位置制御を行っている。データトラック幅の狭小化・テープ搬送が高速化しても安定したヘッドトラッキングを達成するため、テープ製造工程でのスリット技術の改良やサーボ信号の書き込み技術の改良により、サーボ信号の直線性精度の向上を行っている。

また、長期保管後でも安定的なヘッドトラッキングによる記録再生を実現するためには、テープ幅方向の寸法変化を抑制することが重要となる。これは2.4節に記した支持体フィルムの高強度化やドライブのテンション制御技術の向上により実現している。

3. 磁気テープの高信頼性（保存性向上技術）

テープシステムにおける信頼性は、繰返し使用での耐久性と保存安定性の二つに分類される。耐久性に関しては2.5節に記した低摩擦化設計や高強度なバインダーを開発することで高容量化との両立を実現してきた。ここでは磁気テープの保存性向上の技術について説明する。

図7に、BaFe磁性体を使用した磁気テープカートリッジの保存経時でのエラーレート変化を示す。65℃の高温環境に1年以上保管した場合でも、エラーレートは充分低く、劣化していないことがわかる。

また、磁気テープの保存性能を示す指標として、腐食性ガスをを用いた加速環境による保存試験 (Battelle Class II)⁸⁾ が業界で広く利用されている^{9) 10)}。磁気テープをBattelle Class II環境下にて14日間、カートリッジ状態で保存した場合とテープ表面を環境下に露出した状態で試験を行った¹¹⁾。加速比率はおおむね400～1,000倍であることから¹²⁾室温保管の15～38年に相当する。カートリッジ状態であれば、いずれのテープとも性能の変化は起きなかったが、表面を露出した状態では、金属磁性体を用いたテープは残留磁化量の低下を示し、その劣化は粒子サイズが小さいほど顕著であった。通常、磁気テープはカートリッジ内で巻かれており、ほとんど外部の大気に接触することがないので、

図7 BaFe磁性体を使用したテープのエラーレートの経時変化

図8 磁気テープ表面をBattelle Class II条件下で14日間暴露した後の残留磁化Msの変化

表面を露出した状態での試験は相当過酷な条件である。そのような条件下であってもBaFe磁性体を用いたテープは残留磁化量の変化が起きず、非常に安定していた(図8)。これは、2.1節で記したようにBaFe磁性体自身が酸化物であるため微細粒子化しても、極めて安定である特徴を示した結果である。今後さらに磁性体の微細粒子化が必須となるなかで、BaFe磁性体はデータの長期保存安定性の観点で優れた素材であることが確認された。

4. むすび

今後も全世界のデータ量は爆発的に増加することが予想され、HDD、テープストレージ、その他のストレージが共にお互いの役割を担い発展していくことを期待している。テープストレージにおいては、2013年9月に8.5 TB/巻、2014年10月に10 TB/巻のエンタープライズシステムが上市され容量増加のトレンドを確実に加速させている。また、

15～20 TB/巻は、現行技術の延長線上で視野に入っているとのことである¹³⁾。さらに、2015年5月には1巻当たり220 TBに相当する123 Gb/in²の記録密度の実証にも成功しており⁴⁾、更なる大容量カートリッジの商品化も期待される。これからも、本稿で解説した磁気テープ技術の発展に加え、ドライブ側の技術革新と合わせて大容量・高速データ転送・高信頼性を実現し、磁気テープストレージが社会のニーズに応えながら発展していくものと信じている。

(2016年1月29日受付)

〔文 献〕

- 1) J. Gantz and D. Reinsel, <http://japan.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-digital-universe-are-you-ready.pdf>
- 2) <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>
- 3) Jeita テープストレージ専門員会, http://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181855_mnBLMw2T4A.pdf
- 4) M.A. Lantz et al., IEEE Trans. on Magn., 51, 11 (Nov. 2015)
- 5) D. Berman et al., IEEE Trans. Magn., 43, 8, pp.3502 (2007)
- 6) <http://www.lto.org/>
- 7) <http://www-03.ibm.com/systems/storage/media/3592/specifications.html>
- 8) W.H. Abbott: "The Development and Performance Characteristics of Mixed Flowing Gas Test Environments", IEEE Trans. Components, Hybrids, Manuf. Technol., 11, pp.22-35 (1988)
- 9) P.J. Sides, G. Spratt and J.P. Kampf: "An Investigation of the Archivability of Metal Particle Tape", IEEE Trans. Magn., 30, 6, pp.4059-4064 (Nov. 1994)
- 10) T. Iwano and K. Kobayashi: "Improving the Corrosion Resistance of Metal-Evaporated Tape Using Dicarboxy Acid as a Lubricant", IEEE Trans. Magn., 41, 10, pp.3010-3012 (Oct. 2005)
- 11) O. Shimizu et al.: J. Magn. Soc. Jpn.: "Ba-ferrite Particulate Media for Linear Tape System", 35, pp.27-33 (2011)
- 12) D.C. Abbott, R.A. Frechette, G. Haynes and D.W. Romm: "Shelf Life Evaluation of Nickel/Palladium Lead Finish for Integrated Circuits", Texas Instruments Application Note (1998) available at <http://www.ti.com/lit/an/szza002/szza002.pdf> (As of Dec. 26, 2012)
- 13) R. Fontana et al.: "Tape Technology for ≥ 10 TB Cartridge Capacity", 13th Joint MMM-Intermag Conference p.574 (2016)

辻本 真志 2003年、九州大学大学院理学府修士課程修了。同年、富士フイルム(株)入社。リニアテープシステムのテープ技術研究・開発に従事。現在、同社記録メディア研究所所属。

大野 幹夫 1986年、北海道大学大学院工学部合成化学工学科修士課程修了。同年、富士フイルム(株)入社。ビデオシステムおよびリニアテープシステムのテープ技術研究・開発に従事。現在、同社記録メディア研究所所属。