

データストレージ用磁気テープの高密度化研究

— バリウムフェライトテープの市場導入までの道のり —

原澤 建*、野口 仁

磁気テープシステムは、安価、大容量という特徴からアーカイブ、バックアップ用途に広く使用されている。他のストレージ媒体同様に持続的な高容量化という市場ニーズに応える為、高記録密度化の研究が進められてきた。従来、メタル磁性体を用いたテープにより高密度化が進められてきたが2000年代後半に減速し始めた。しかし2011年、ポストメタル磁性体としてバリウムフェライト磁性体を採用したテープを市場導入し、高密度化の再加速に成功した。この論文は、近年の磁気テープシステムの大きな技術革新の一つであるバリウムフェライトテープの基礎研究から市場導入までの道のりについて報告する。

キーワード: バリウムフェライト、塗布型テープ媒体、面記録密度、リニアテープシステム、データストレージ

A study on high-density recording with particulate tape media for data storage systems

—On the process of introducing barium-ferrite tape media to the market—

Takeshi HARASAWA* and Hitoshi NOGUCHI

Magnetic tape storage systems are widely used for archive and data backup from their characteristic of low cost and large capacity. Research on magnetic tape targets higher recording densities to meet market needs for continuously increasing storage capacity like in other storage media. Progress on increasing the recording density of magnetic tapes using conventional magnetic metal particles has slowed in the years leading up to 2010. However, progress improved in 2011 with the introduction of tape media using barium-ferrite magnetic particles. In this paper, we describe the process of going from basic research on tape media using barium-ferrite to marketplace introduction.

Keywords: Barium-ferrite, particulate tape media, areal recording density, linear tape system, data storage

1 はじめに

近年、コンピューターの発達、通信基盤の充実によるコミュニケーション機会の増加、各種センサー等のデバイスの高性能化により、生成されるデータが爆発的に増えている。全世界で生成および複製されるデータは、2009年に0.9 ZB (10^{21} bytes)^[1]、2011年に1.8 ZB^[2]、2013年に4.4 ZB^[3]と年率40%のペースで増加し、2020年には44 ZBに達すると予想されている。このためデータストレージデバイスの持続的な記録密度の向上が期待されている。各種ストレージシステムの中で磁気テープは、システム費用やビットコストが安価、長寿命、省エネといった特徴からハードディスクドライブ（以下 HDD）のバックアップ用途、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続けている^[4]。図1に示す通り HDD、光ディスク、磁気テープの面記録密度は年々向上しているが、近年、記録密度の進歩

は減速傾向にあり、磁気テープにおいても2010年頃に記録密度の進歩が減速した。これは当時主流の記録材料で

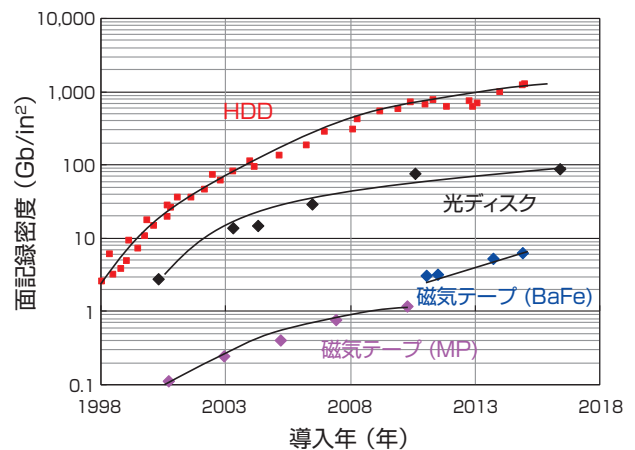


図1 HDD、光ディスク、磁気テープの面記録密度の変遷

富士フイルム株式会社 記録メディア研究所 〒250-0001 小田原市扇町 2-12-1
FUJIFILM Corporation recording media research laboratory 2-12-1 Ogicho, Odawara 250-0001, Japan * E-mail: takeshi.harasawa@fujifilm.com

Original manuscript received November 30, 2016, Revisions received January 24, 2017, Accepted February 10, 2017

あった金属（metal particle 以下 MP）磁性体において、高密度化に必須である微粒子化の限界に近づいたためである。このため当社はさらなる微粒子化が可能であるバリウムフェライト（barium-ferrite 以下 BaFe）磁性体を採用した磁気テープを 2011 年に市場導入し、記録密度向上の再加速に成功した。本報告では、磁気テープにおける大きな技術革新である BaFe テープ導入について基礎研究から商品化研究までのプロセスを記述する。

2 磁気テープの歴史

2.1 磁気テープの用途

磁気記録は音を録音するというデンマークの科学者ポールセン（Valdemar Poulsen）が 1898 年に発明した磁気録音機が始まりとされる。その後、磁気記録技術は、テレビ、コンピューター等の急速な発展に伴い、録音だけでなく映像分野、情報記録分野へ展開された。

オーディオ映像分野では 1990 年代まではオーディオカセットや、VHS、8 mm といったビデオテープが広く普及していたが、CD や DVD といった光ディスクの台頭によりその姿を消すことになった。また 2000 年代以降は、放送局用ビデオテープも光ディスク、HDD といった他の記録媒体に置き換わり、徐々にその役割を終えようとしている。

一方、情報記録分野では 1950 年頃からコンピューターの記憶装置用として使われ始めた。その後もコンピューターの発展で安価、大容量を特徴とする磁気テープはデータセンター、大手企業、官公庁、研究機関を中心に広く使われるようになり、近年では、その用途は映像分野ではなく情報記録分野がほとんどを占めるようになった。現在の代表的なテープシステムは、オープンフォーマットで最も普及している Linear Tape-Open (LTO) 並びにエンタープライズ向けのクローズドシステムである IBM 社の 3592 と Oracle 社の T10000 の 3 システムである。それぞれのシステムの記録密度は持続的に向上しており、現在、LTO が 6 TB/巻^[5]、3592 が 10 TB/巻^[6]、T10000 が 8 TB/巻^[7]に至っており、すべてのシステムで BaFe 磁性体が採用されている。

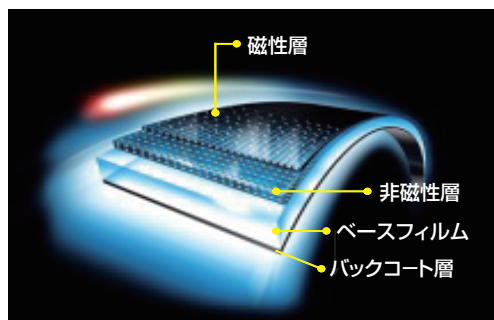


図2 磁気テープの層構成

2.2 磁気テープ技術の変遷

現在主流となっている磁気テープの製造は、低コスト、大量生産を実現するために塗布型方式が採用されており、図2に示したようにプラスチックのベースフィルム上に導電性や表面平滑性を付与する非磁性層、その上にデータを記録する磁性層が設けられ、ベースフィルムの裏面にはテープの走行を安定化させるバックコート層が設けられている。

磁気テープの高密度化は、磁気記録の原理により①磁性体の微粒子化、②磁性層の薄層化、③磁性層の表面性平滑化により進められてきた。図3に磁気テープの磁性体の粒子体積、図4に磁性層の厚み、図5に表面平滑性の指標である平均表面粗さ Ra のトレンドを示した。磁性体の微粒子化、磁性層の薄層化、表面平滑化が持続的に進められていることが分かる。特に図4の磁性層厚みのトレンドの中で、磁気テープの層構成が磁性層単層から前述の非磁性層上に磁性層を設ける多層構成に技術革新されたことにより、磁性層厚は数ミクロンからサブミクロンオーダーへ飛躍的に薄層化が進んだ^{[8][9]}。一方、順調に見えた MP 磁性体の微粒子化も 2000 年代後半にその限界に近づいてきた。これは図6に示したように MP 磁性体は微粒子化に伴い磁性体の基本特性である保磁力（記録された信号を維持する特性）を十分に確保することが困難になってきたためである。一方、新たに開発した BaFe 磁性体では、組成・合成プロセスを制御することで 1000 nm³ 程度の微粒子でも十分な保磁力とすることに成功している。次項では、BaFe 磁性体の特徴と課題について説明する。

3 BaFe磁性体の特徴と課題

3.1 BaFe磁性体の特徴

MP 磁性体と BaFe 磁性体の特徴を表1に比較した。MP 磁性体は、鉄・コバルトを主体とした針状の金属合金磁性体であり、酸化抑制のために粒子の周囲に最低でも数 nm の厚みを持つ酸化保護層（徐酸化膜）が必要とな

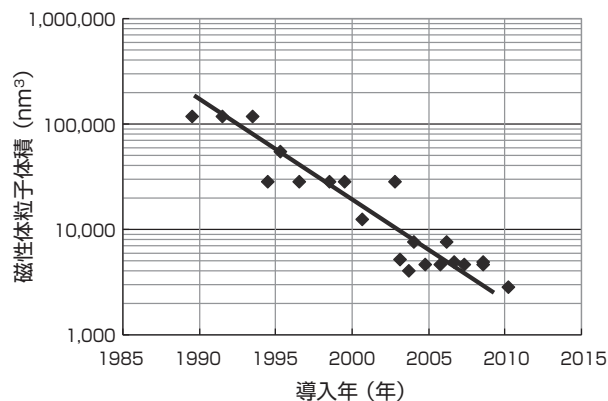
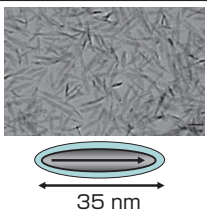
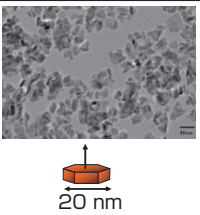


図3 磁性体体積のトレンド

表1 磁性体の特徴

磁性体	MP	BaFe
TEM像と模式図		
素材	FeCo、酸化保護膜が必要	BaO(Fe ₂ O ₃) ₆ 、酸化物で安定
磁化の起源	形状異方性	結晶異方性
磁化の方向	長手方向	垂直方向
飽和磁化量(MS)	600-900 emu/cc	250-300 emu/cc

る。また、「磁化の起源が粒子の針状形状に由来する」という形状磁気異方性を有し、異方性エネルギーを増大させるには、高軸比(長軸長/短軸長)化が必要である。一方、BaFe 磁性体は「異方性エネルギーが粒子の結晶構造で決定される」という結晶磁気異方性を有する酸化物である。また、BaFe 磁性体の磁化容易軸は盤面に垂直方向にあり、テープ化時には磁性層垂直方向に磁化成分をもつという特徴がある。

これらの特徴から、BaFe 磁性体が本質的に以下の優

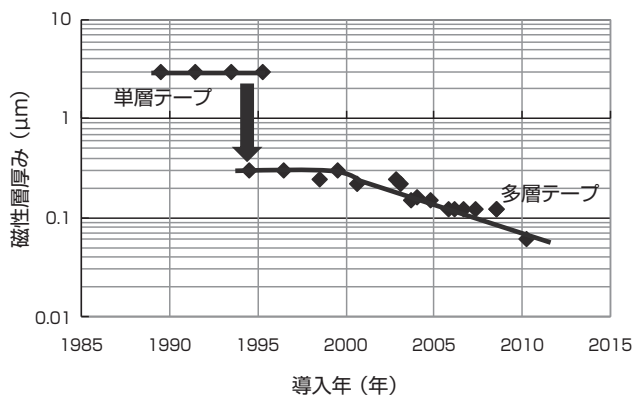
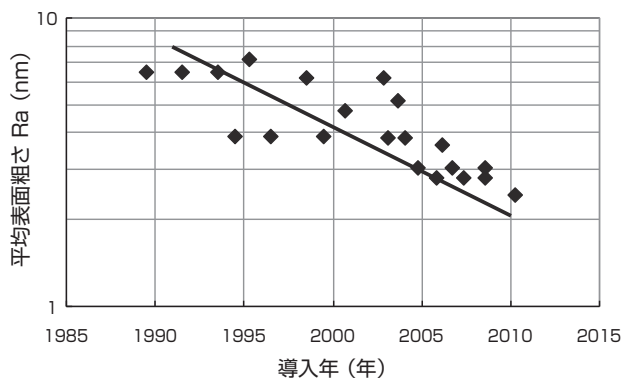
図4 磁性層厚みのトレンド^{[8][9]}

図5 テープの表面平滑性のトレンド

位性を有しており、我々はポスト MP 磁性体の最有力候補になると考えた。

①MP磁性体は微粒子の高軸比化が困難なこと、酸化保護膜が必要なことから、微粒子化に伴い十分な保磁力を維持できなくなるのに対し、BaFe磁性体は、その異方性エネルギーが結晶構造で決定されること、酸化物のため保護膜が必要ないことから、微粒子化しても高い保磁力を維持できる。

②酸化物であるBaFe磁性体は高温高湿環境でも非常に安定であり、テープとしての長期保存性に優れている(図7)。

③テープ化後に磁性層垂直方向に磁化成分を有するため、HDD分野で実用化された垂直磁気記録への適性が期待される。

3.2 BaFe磁性体の課題

前項で述べたように、BaFe 磁性体は高密度化に有利となる多くの特徴を有しているが、その特徴を引き出すためには克服すべき以下の課題があった。

①BaFe磁性体が微粒子かつ板状のため磁性体同志が非常に凝集しやすく、従来の分散技術・塗布技術では均

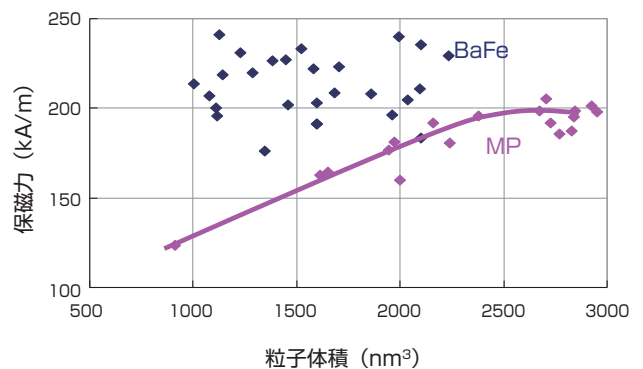


図6 磁性体の粒子体積と保磁力

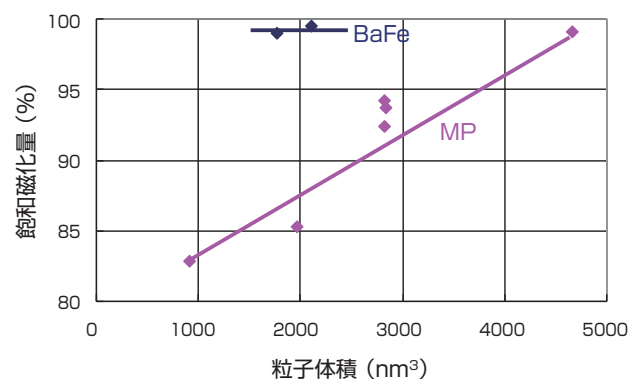


図7 60℃ 90%RH(湿度)1カ月保存での飽和磁化量(Ms)変化

一・平滑な薄層磁性層を構築できなかった。

- ②BaFe磁性体の飽和磁化量 (Ms) が小さいためMPテープと比較して再生出力が低く、それを補う高感度な磁気ヘッドが必要であった (図8)。
- ③BaFeテープが垂直磁化成分を有するため孤立反転波形の対称性が著しく悪く、その非対称性を補正する信号処理技術が必要であった。
- ④BaFeテープに興味を持ち、テープシステムを共同開発するシステムメーカー候補がいなかった。

4 市場導入のシナリオとその実践

4.1 市場導入のシナリオ

この研究は1992年から3名の技術者で開始されたが、そこから10年近く経ってもMPテープの性能を大きく超える結果を出せなかったため、中断を繰り返し、最終的には休止寸前まで追い詰められた。しかし2001年にBaFe磁性体のポテンシャルを引き出す新たな分散・塗布技術の開発、また、BaFeテープの性能を引き出す高感度ヘッドによる評価技術開発により、当時のMPテープの性能を大きく超える結果を示し、研究は継続・加速された(1st step)。

その後、本結果をもとに技術的に先行するシステムメーカーであるIBM社と共同研究を開始しBaFeテープの性能を引き出すドライブ技術の開発により、これまでに無い高い記録密度特性を実証することに成功した(2nd step)。本共同研究の成果を受けて、IBM社を含むドライブメーカー数社とシステム開発がスタートした。我々はBaFeテープの実用性・量産化技術の開発を行い、各種テープ製品を市場導入した(3rd step)。さらに、これらの製品化と並行して、IBM社と共同でBaFeテープのさらなる高容量化の検証研究を行い、前述のBaFeテープ製品の市場導入と同タイミングでその成果を発表した。本発表によりBaFe技術

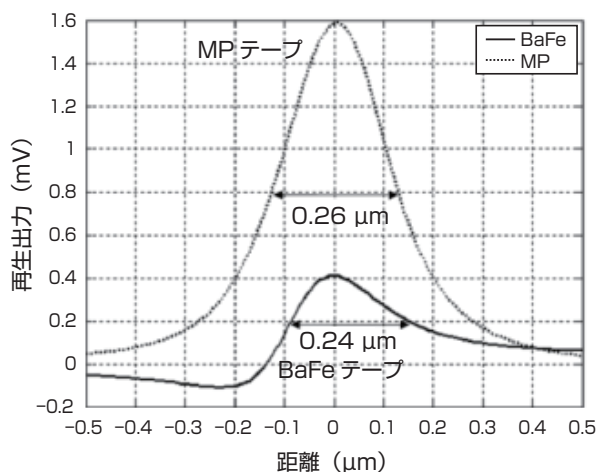


図8 BaFe/MPの孤立反転波形比較

が今後数世代のテープシステムをサポートする技術であることが認知され、市場導入した製品の普及を加速させた(4th step)。次項では、その詳細について説明する。

4.2 シナリオの実践

4.2.1 1st step基礎研究(～2003年)

<社内での記録再生特性の検証>

BaFeテープに期待される高い記録再生特性を引き出すために3.2項で示した課題の中で、まずはBaFeに適応した高分散化技術・超薄層塗布技術の開発と高感度ヘッドでの評価技術開発を行った。

①-1: 高分散化技術

BaFe磁性体は磁性を持った微粒子であり、その上形状が六角板状のため板面同志が凝集するスタッキングを起こしやすい。微粒子化の効果を発現するには磁性体を均一に分散することが重要だが、図9に示すように従来の分散方法では磁性体が数個～十数個の塊となっており不均一な状態にあった。MP磁性体からBaFe磁性体への移行にあたり、分散剤・ポリマー等の新規有機素材開発、新規分散プロセス開発を行い微粒子BaFe磁性体の一次分散化に成功した。

①-2: 超薄層塗布技術

磁気記録媒体の高密度化には磁性層の薄層化が必須となるが、従来の塗布方式では0.1 μm以下の薄層化は困難であった。これは図10にあるように従来の塗布方式では下地である非磁性下層との界面の乱れが大きく均一な薄層磁性層を得ることができなかったためであり、BaFe磁性体の塗布液ではこの傾向がより顕著であった。このため、新たな塗布方式を開発し、非磁性下層との界面の乱れがなく均一で厚み変動が少ない数十nm厚の薄層磁性層を実現した。

②高感度ヘッドによる評価系開発

当時のテープ用ヘッドではBaFeテープの性能を十分に引き出せる高感度な磁気ヘッドが存在しなかったため、我々は技術的に先行していたHDDヘッドを用いて媒体評価を行うことを考えた。このため当時所有していたテープ用の

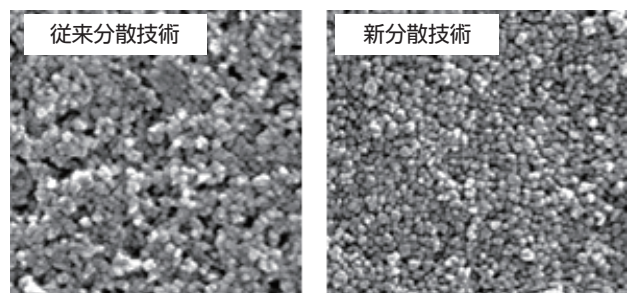


図9 テープ表面のSEM像

評価装置ではなく、HDD 用に使用されていた再生幅 1.9 μm のマージ型 AMR(anisotropic magneto resistive) ヘッドを搭載したディスク用の評価装置を立ち上げ、円盤状の BaFe 媒体を用いて評価を実施した。線記録密度 180 kfc i (flux change per inch) における当時の MP 媒体と分散塗布技術を見直した BaFe 媒体の変調スペクトラムを図 11 に示す。変調スペクトラムが示すように比較の MP 媒体に対し出力で +4 dB、媒体の記録再生性能を表す Signal to noise ratio (以下 SNR) は +10 dB と MP 媒体の 10 倍の記録密度を達成できる可能性を示した^[10]。

4.2.2 2nd step システムとしての可能性研究(～2006年) <ドライブメーカーにおける記録密度検証>

1st step の社内検討で初めて BaFe テープの高い記録再生特性を確認することに成功したが、磁気テープメーカー単独の SNR の結果だけでは、ドライブメーカーを十分に納得させ、BaFe テープに向けたシステム開発をスタートさせることはできなかった。このため次のステップとしてシステムメーカーを巻き込んだ共同研究により、3.2 項で示した BaFe の波形補正を実現する新規信号処理の開発およびシステムメーカーとの関係構築を目指した。

テープドライブ技術を牽引する IBM 社を共同研究相手として選び、我々の評価データと IBM 社に評価してもらうための試作品を持ち込み、BaFe テープの可能性の説明を繰り返すことで、共同研究がスタートした。共同研究における最大のターニングポイントは再生ヘッドの選択にあった。当社は、当時テープ用に使用されていた AMR ヘッドではなく、より再生感度が高く、HDD では標準であった GMR (giant magneto resistive) ヘッドによる評価を IBM 社に提案したが、IBM 社はテープ業界では馴染みがなく、新しいデバイスである GMR ヘッドの採用には慎重な姿勢であった。当社は、HDD 等の別システム用の GMR ヘッドによる評価を行い、BaFe テープの高い記録再生特性^[11]^[12]を示し、最終的には IBM 社も GMR ヘッドを採用、結

果として高い記録密度特性を検証することに成功し、共同研究の成果として 2006 年に当時の製品の面記録密度 0.4 Gb/in² の約 17 倍に相当する 6.7 Gb/in² (カートリッジ容量 8 TB/ 巻相当) の面記録密度の検証に成功した^[13]。技術的なハイライトは、①微粒子 BaFe 磁性体を用いた磁気テープと新規信号処理技術 DD-NPML (data dependent noise predictive maximum likelihood) との組み合わせによる線記録密度の向上と②高精度ヘッドフォローイング技術によるトラック密度の向上が挙げられる。本共同研究の中で IBM 社が設計した新規信号処理 DD-NPML^[14]により、BaFe テープの課題であった再生波形の歪みは補正され、目標のエラーレートを達成し、IBM 社も次世代テープ技術の本命として BaFe テープの検討を進めることになった。この時点で 3.2 項に記した課題③の波形非対称性の補正、課題④のシステム開発パートナーの選定が解決され、BaFe テープの実用化が大きく進展した。

一方富士フイルムが提案する BaFe テープ以外にも日立マクセル社からは窒化鉄 (NanoCAP) 磁性体を用いたテープ^[15]、ソニー社からは蒸着テープ^[16]が提案され、テープシステムの業界団体である INSIC (Information Storage Industry Consortium) の中では MP テープに続く次世代テープの議論が開始された。

4.2.3 3rd step 商品化研究 (～2011年) <BaFe テープの量産化技術確立>

1st step、2nd step を通して、当初の課題はすべて解消され、IBM 社との技術検証の成果を受けて多くのシステムメーカーに BaFe テープが認知された。IBM 社に加え、Oracle 社、HP 社、Quantum 社へ技術説明と BaFe テープ試作品を供給し、その性能評価を繰り返すことで実用化段階に進んだ。2011 年に IBM 社の 3592 第 4 世代ドライブ^[17]と Oracle 社の T10000 第 3 世代ドライブ^[18]に BaFe テープが採用され、それぞれ 4 TB、5 TB の製品化に成功した。また 2012 年に LTO 第 6 世代ドライブ^[19]

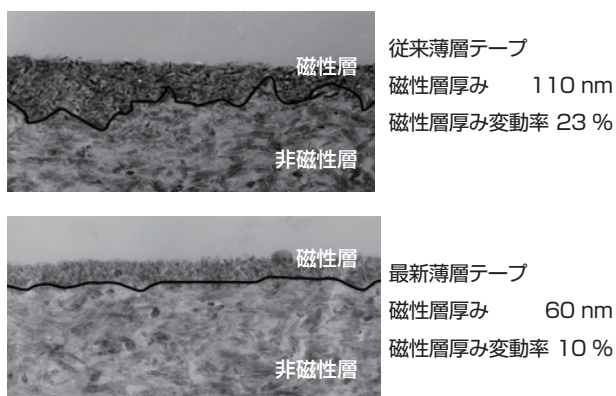


図 10 テープの断面 TEM 像

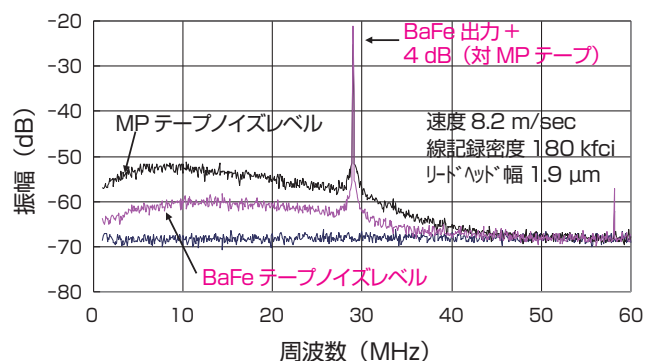


図 11 MP 媒体と BaFe 媒体の変調スペクトラム^[10]

に BaFe テープが採用され、目標であった主要テープシステムすべてに BaFe テープの導入を果たした。

社内的にはテープの量産化技術と実用化技術の開発に注力した。量産化技術開発においては、前項で述べた新規分散・塗布技術のスケールアップを中心に高密度テープを安定生産するためのプロセス開発を進めた。また、実用化技術開発においては、主にテープの走行耐久性の向上を目指した。テープシステムでは広い温湿度範囲（10～32℃、10～80%RH）において数万パスに及ぶ全長走行等の過酷な耐久試験をクリアしなければならず、テープの表面設計や潤滑性能、摩耗性能の設計を行った。これらの量産化および実用化技術の開発を経て最終目標であった BaFe テープの市場導入が実現された^[20]。

4.2.4 4th stepさらなる可能性研究（～2015年）

<さらなる高記録密度の検証>

2011年に長年の念願であった BaFe テープの市場導入を果たしたが、システム変更に伴って高額な投資が必要なユーザーにとっては、BaFe 技術が将来どこまで発展するかが大きな関心であった。このため我々は商品化研究と並行して BaFe テープの記録密度向上の可能性検証を継続的に行い、その将来性を市場に訴求し続けてきた。

BaFe 製品の市場導入1年前の2010年には記録密度 29.5 Gb/in²^[21]（カートリッジ容量 35 TB/巻相当）の技術検証に成功、この技術検証で採用した BaFe テープでは、

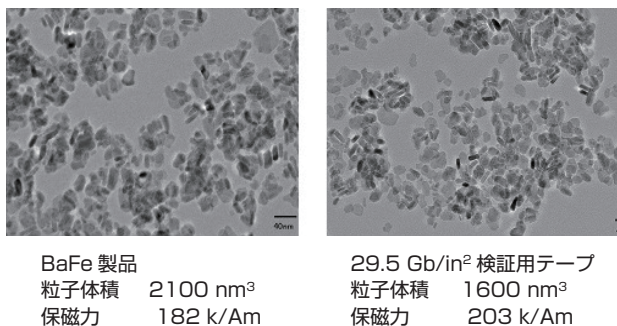


図 12 BaFe 磁性体の TEM 像^[21]

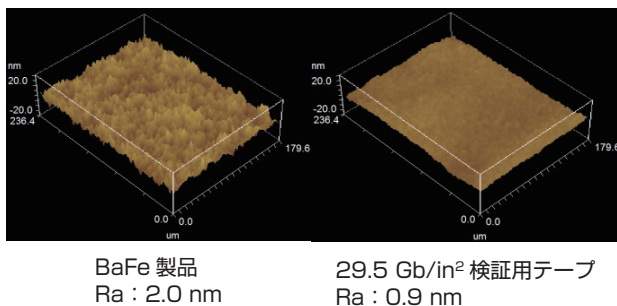


図 13 光干渉表面粗さ計による表面プロファイル^[21]

① BaFe 磁性体の粒子体積を 2100 nm³ から 1600 nm³ まで微粒子化（図 12）、②表面性の指標である平均表面粗さ Ra を 2.0 nm から 0.9 nm まで平滑化（図 13）、③磁性体の垂直磁場配向技術の採用により垂直方向の配向度を 0.61 から 0.86 に向上（図 14）を実現した。

その後も上記①～③の技術をさらに進化させ、2014 年に 85.9 Gb/in²^[22]（154 TB/巻相当）、2015 年には 123 Gb/in²^[23]（220 TB/巻相当）の技術検証に成功した。

研究スタートから 20 年以上の歳月をかけて BaFe テープ製品を市場導入し、同時に進めてきた技術検証により今後、10 年以上の高密度化の見通しを示したことで、MP テープに代わり BaFe テープのデファクト化を成し遂げた。

5 まとめ

性能の限界が見えた MP 磁性体に代わり BaFe 磁性体を採用することでテープシステムの高密度化を加速し、増え続けるデータを保存するという市場ニーズに応えることができた。

本報告で示した BaFe テープのデファクト化というイノベーションが生まれた最大の要因は、BaFe テープの本質的な可能性を信じ、周囲を巻き込みながら必要な技術開発を進めてきたことにある。もちろん、BaFe 磁性体そのものの技術革新は重要であったが、それ以上に BaFe 磁性体、BaFe テープのポテンシャルを引き出すための周辺技術開発が重要だった。社内的には新規の分散技術・塗布技術開発、社外的には高感度磁気ヘッド・波形補正技術の開発なくしては、BaFe テープの高密度化は達成し得なかった。

研究スタートから製品化まで約 20 年の年月がかかったが、この期間、諦めずに研究を進めることができたのは、（短所も含め）BaFe 磁性体の本質的な特徴を理解していたこと、その特徴が原理的に磁気記録の高密度化に有効だと理解できていたことにある。本事例は昨今求められている効率の良い研究開発とは言い難いが、モノの本質、原理に

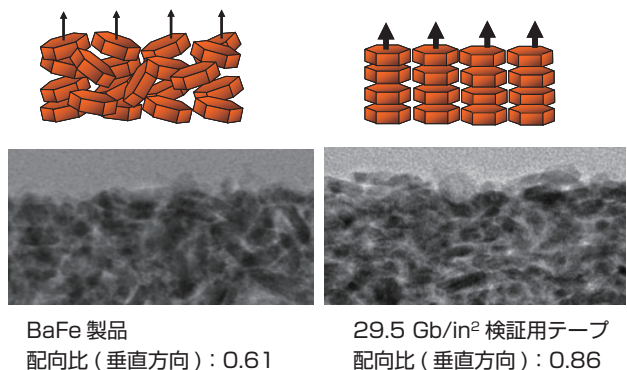


図 14 磁性層の断面の TEM イメージ^[21]

基づき、諦めない姿勢、周囲を巻き込む姿勢によりイノベーションを生んだ研究プロセスとして参考にしていただけたい幸いです。

最後に今後も増大するデータを保存していくという市場ニーズに応じていくために、新たなテープの高密度化技術の開発と HDD の先進的なドライブ技術革新を取り込むことでさらなるテープシステムの高密度化が進められていくと信じている。最後にこの研究の主だったイベントの年表を図 15 に整理した。

1 st step	1992	・ 3 名の研究者で BaFe テープの研究をスタートした。
	2001	・ 研究継続の危機にあったが社内で初めて BaFe テープの高い記録特性を示すことに成功した。
2 nd step	2004	・ IBM と記録密度検証の共同研究をスタートした。
	2006	・ 富士フイルムは、BaFe テープで高い記録密度の可能性を GMR ヘッドとの組み合わせで実証した ^{[11][12]} 。 ・ IBM と共同で BaFe テープで記録密度 6.7 Gb/in ² (容量 8 TB 相当)の技術検証に成功した ^[13] 。 ・ M 社より窒化鉄テープ、S 社より蒸着テープが提案され、業界でポストメタルテープの議論が開始された。
	2007	・ システム各社に BaFe テープの技術プレゼンとサンプル提供を開始した。
3 rd step & 4 th step	2010	・ IBM と共同で BaFe テープの記録密度 29.5 Gb/in ² (容量 35 TB 相当)の技術検証に成功した ^[20] 。
	2011	・ Oracle (当時の SUN) 製 T10000 第 3 世代システム (容量 5 TB) 用テープに採用され BaFe テープで初めて商品化に成功した。 ・ IBM 製 3592 第 4 世代システム (容量 4 TB) 用テープの商品化に成功した。
	2012	・ LTO6 (容量 2.5 TB) 用テープの商品化に成功した。この結果、主要 3 テープストレージシステム全てに BaFe テープが採用された。 ・ Oracle 製 T10000 第 4 世代システムが発売された。第 3 世代システム用テープ使用 (U1-U3) で容量 8.5 TB に向上した。
	2013	・ IBM と共同で BaFe テープの記録密度 85.9 Gb/in ² (容量 154 TB 相当)の技術検証に成功した ^[21] 。
	2014	・ IBM 製 3592 第 5 世代システム (容量 10 TB) 用テープの商品化に成功した。 ・ IBM と共同で BaFe テープの記録密度 123 Gb/in ² (容量 220 TB 相当)の技術検証に成功した ^[22] 。
	2015	・ LTO7 (容量 6 TB) 用テープの商品化に成功した。

図 15 バリウムフェライトテープ開発の年表

参考文献

- [1] J. Gantz and D. Reinsel: The Digital Universe Decade—Are You Ready?, IDC, <http://japan.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-digital-universe-are-you-ready.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [2] J. Gantz and D. Reinsel: 混沌から価値を引き出す, IDC, <http://japan.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-extracting-value-from-chaos-ar.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [3] IDC: The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things, [http://japan.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-](http://japan.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm)

- summary.htm, 閲覧日2016-11-30.
- [4] Jeita専門委員会: テープストレージの製品動向—2010年版, http://home.jeita.or.jp/upload_file/20110908181855_mnBLMw2T4A.pdf, 閲覧日2016-11-30.
- [5] LTO Ultrium: What is LTO Technology?, <http://www.lto.org/technology/what-is-lto-technology>, 閲覧日2012-12-15.
- [6] IBM: IBM Knowledge Center, http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ja/STQRQ9/com.ibm.storage.ts4500.doc/ts4500_ipg_drives_3592.html, 閲覧日2016-11-30.
- [7] 日本Oracle : Storage Tek T10000Dテープ・ドライブ, <http://www.oracle.com/jp/products/servers-storage/storage/tape-storage/t10000d-tape-drive/overview/index.html>, 閲覧日2016-11-30.
- [8] H.Inaba, K. Ejiri, N. Abe, K. Masaki and H. Araki: The advantage of the thin film magnetic layer on a metal particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 29 (6), 3607–3612 (1993).
- [9] H.Inaba, K. Ejiri, K. Masaki and T. Kitahara: Development of an advanced metal particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 34 (4), 1666–1668 (1998).
- [10] 斉藤真二, 野口仁, 遠藤靖, 江尻清美, 萬代俊博, 杉崎力: 記録密度Gb/in²クラスの塗布型磁気記録媒体, 富士フイルム研究報告, 71–75 (2003).
- [11] T. Nagata, T. Harasawa, M. Oyanagi, N. Abe and S. Saito: A recording density study of advanced barium-ferrite particulate tape, *IEEE Trans. Magn.*, 42 (10), 2312–2314 (2006).
- [12] R. M. Palmer, M. D. Thornley, H. Noguchi and K. Usuki: Demonstration of high-density removable disk system using barium-ferrite particulate and CoPtCr-SiO₂ thin film flexible media, *IEEE Trans. Magn.*, 42 (10), 2318–2320 (2006).
- [13] D. Berman, R. Biskeborn, N. Bui, E. Childers, R. D. Cideciyan, W. Dyer, E. Eleftheriou, D. Hellman, R. Hutchins, W. Imaino, G. Jaquette, J. Jelitto, P. –O. Jubert, C. Lo, G. McClelland, S. Narayan, S. Oelcer, T. Topuria, T. Harasawa, A. Hashimoto, T. Nagata, H. Ohtsu and S. Saito: 6.7 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 43 (8), 3502–3508 (2007).
- [14] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith and W. Hirt: Noise-predictive maximum likelihood (NPMML) detection, *IEEE Trans. Magn.*, 34 (1) pt. 1, 110–117 (1998).
- [15] Y. Sasaki, N. Usuki, K. Matsuo and M. Kishimoto: Development of NanoCAP technology for high-density recording, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (10), 3241–2314 (2005).
- [16] T. Ozue, M. Kondo, Y. Soda, S. Fukuda, S. Onodera and T. Kawana: 11.5 Gb/in² recording using spin-valve heads in tape systems, *IEEE Trans. Magn.*, 38 (1) pt. 1, 136–140 (2002).
- [17] IBM: Barium Ferrite: The storage media of the future is here today, http://www.sinus-europe.com/files/IBM_Barium_Ferrite_White_Paper.pdf, 閲覧日2017-01-24.
- [18] Oracle: Oracle's Storage Tek SL3000 modular library system : Clearly superior to Quantum—at a lower cost, <http://www.oracle.com/us/products/servers-storage/storage/tape-storage/wp-sl3000vsquantum8-12-12-1906152.pdf>, 閲覧日2016-11-30.
- [19] 富士フイルム: 世界初! 大容量磁気テープメディアLTOに独自のBaFe(バリウムフェライト)磁性体を採用, ニュースリリース, http://www.fujifilm.co.jp/corporate/news/articleffnr_0706.html, 閲覧日2012-12-15.
- [20] 高野博昭, 浅井雅彦, 小柳真仁, 大石忠宏, 臼井正幸: バリウムフェライト磁性体によるエンタープライズデータストレージシステム用の高性能テープメディアの開発, 富士フイルム研究報告, 28–32 (2013).

- [21] G. Cherubini, R. Cideciyan, L. Dellmann, E. Eleftheriou, W. Haeblerle, J. Jelitto, V. Kartik, M. A. Lantz, S. Olcer, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, D. Berman, W. Imano, P. – O. Jubert, G. McClelland, P. V. Koeppe, K. Tsuruta, T. Harasawa, Y. Murata, A. Musha, H. Noguchi, H. Ohtsu, O. Shimizu and R. Suzuki: 29.5 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 47 (1) pt. 1, 137–147 (2011).
- [22] S. Furrer, M. A. Lantz, J. B. C. Engelen, A. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Chrubini, W. Haeblerle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, Y. Kurihashi, T. Ishioroshi, T. Kaneko, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu and H. Noguchi: 85.9 Gb/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 51 (4) pt. 1, Art. ID 3100207 (2015).
- [23] M. A. Lantz, S. Furrer, J. B. C. Engelen, S. Pantazi, H. E. Rothuizen, R. D. Cideciyan, G. Cherubini, W. Haeblerle, J. Jelitto, E. Eleftheriou, M. Oyanagi, A. Morooka, M. Mori, Y. Kurihashi, T. Kaneko, T. Tada, H. Suzuki, T. Harasawa, O. Shimizu, H. Ohtsu and H. Noguchi: 123 Gbit/in² recording areal density on barium ferrite tape, *IEEE Trans. Magn.*, 51 (11), Art. ID 3101304 (2015).

執筆者略歴

原澤 建（はらさわ たけし）

1991年新潟大学大学院理学研究科修士課程修了、同年富士写真フイルムに入社、記録メディア研究所（当時、磁気材料研究所）に配属。主に民生用磁気テープ開発を経て、2001年よりバリウムフェライトテープ開発に加わる。主に記録密度の技術検証に従事。



野口 仁（のぐち ひとし）

1987年京都大学大学院工学研究科修士課程修了、同年富士写真フイルムに入社、記録メディア研究所（当時、磁気材料研究所）に配属。1992年にバリウムフェライト媒体の基礎研究をスタートし、主に大容量フロッピーディスクの高密度化研究、バリウムフェライトテープの商品開発に従事。2012年より記録メディア研究所所長。2014年に第46回市村産業賞「本賞」、2015年に第61回大河内記念賞を受賞。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（尾崎 公洋：産業技術総合研究所）

この論文は実用化・製品化に至る材料開発からシステム開発に繋がるニーズとシーズの関係、対外連携の重要性が明確に示されている内容になっており、シンセシオロジーの研究論文として申し分ありません。要素技術や製品化へのシナリオが明確に記載されており、20年に渡って研究・開発を続けて製品化に結び付けたことは、テーマ選定から研究展開手法等、他の分野の研究・開発者にとっても重要な示唆を得られるものと思われます。また、内容についても、分野外でもわかりやすく書かれており、優れた論文であると思われます。

コメント（小島 功：産業技術総合研究所）

主に情報分野における製品化デファクト化にかかる観点から査読

しましたが、一連の質疑応答の過程で上記実現のための活動とその結果が明確になり、より良い論文に仕上げていただいと評価します。

議論2 対称性の課題について

質問・コメント（尾崎 公洋）

「3.2 BaFe 磁性体の課題」には、解決課題を①～④まで整理されて記載されております、そのうち③の、「孤立反転波形の対称性を補正する信号処理技術」の課題は、「4.2 シナリオの実践」の「4.2.2 2nd step システムとしての可能性研究」に記載されている、「IBM 社が設計した新規信号処理 DD-NPML により」解決された、と理解いたしました、それでよろしいでしょうか？

この対称性の課題を、材料的に解決することは困難なものでしょうか。この論文には、「垂直磁化成分を有するため」とありますが、微細粒子間の磁気相互作用による物理的に避けられない現象に起因するのでしょうか。BeFe の磁気物性に起因するのでしょうか。

回答（原澤 建）

DD-NPML により解決されました。

また波形の対称性の課題は、本質的に垂直磁化成分に起因するものです。これは、BaFe 磁性体の形状が板状で磁化容易軸を板面に対して垂直方向に有しているためです。磁性液を塗布、乾燥時に板状の BaFe は、板面がテープ表面と平行に並びやすいためテープ表面に対して垂直方向に磁化成分を持つためです。特に BaFe の磁気物性、磁気相互作用による現象ではありません。

また HDD も垂直記録に移行したように垂直方向の磁化成分をメリットと捉え、2010 年の 35 TB の技術検証では垂直配向（垂直磁化成分アップ）を採用し記録密度向上に成功しています。

質問（小島 功）

課題③（非対称性を補正する信号処理技術の必要性）の解消にあたり DD-NPML の開発はポイントであったと思いますが、これは共同研究の成果になるのでしょうか。技術を組み合わせることがポイントとも読めるので、確認させてください。

また、上記が IBM 社の技術と考えた場合、他社における③の課題解消は十分できないという推測も可能です。一方でデファクト化に成功しているわけですから、IBM 社でない製品や規格においてはどのような解決になったのでしょうか。

回答（原澤 建）

DD-NPML 自身の開発は IBM 社の成果であり、共同研究の成果は BaFe テープと DD-NPML を組み合わせて高い記録密度を達成したことになります。

DD-NPML は、テープシステムとして最先端の信号処理なので波形の補正だけでなくエラーレートを低減し、記録密度向上に貢献しています。このため波形補正だけでなく DD-NPML は必須ではなく、その他の信号処理でも可能と推定しています。

実際には HP 社、Quantum 社は BaFe テープ検討スタート時に波形状の件に対し懸念を持っていました。我々は引用論文 [12][13] の結果をもって、波形等価は技術的に可能なはずなので各ドライブメーカーで検討して欲しい旨を要請してきました。この結果、実用化の過程で HP 社、Quantum 社は波形等価可能な信号処理を独自に採用したと理解しています。

議論3 競合技術について

コメント（小島 功）

他社も含めた技術競合の状況について記載することはできないでしょうか。世界初の開発とそれに従った形での現行シェアトップであることは推測ができますが、一方で日立マクセル社やソニー社等の技術開発も現状では進んでいますので、富士フイルムのこの開発が競合に対してどういうインパクトがあったのか理解できると良いと思います。

回答（原澤 建）

他社の競合技術の発表論文を整理すると以下の通りになります。
またこの論文 4.2.2 項に 2006 年当時の競合技術の記述を追加しました。

日立マクセル社

2005、6 年頃までポストメタルテープとして窒化鉄を用いた塗布型テープの発表を行っていた。最近では、2012 年に窒化鉄の論文はなく記録容量 50 TB と見積もられるスパッタ法を用いた磁気テープの発表を行った。

主な論文

窒化鉄 (NanoCAP : nano Composite Advanced Particles)

・Y. Sasaki, N. Usuki, K. Matsuo and M. Kishimoto: Development of NanoCAP technology for high-density recording, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (10), 3241-3243 (2005).

スパッタ法を用いた磁気テープ

・S.Matsunuma, T. Inoue, T. Watanabe, T. Doi, Y. Mashiko, S. Gomi, K. Hirata and S. Nakagawa: Playback performance of perpendicular magnetic recording tape media for over-50-TB cartridge by facing targets sputtering method, *J.Magnetism and Magn Matls.*, 324 (3), 260-263 (2012).

ソニー社

8 mm ビデオテープや DVC (Digital Video Cassette) 等で実用化した金属蒸着テープをポストメタルテープとして研究開発を行っていた。2009 年頃までは記録密度向上やリニアテープシステムでの実用耐久性に関する発表を行っていた。最近では 2014 年に金属蒸着テープの発表はなく記録密度 148 Gb/in² (容量 180 TB 以上に相当) のスパッタ法を用いた磁気テープの発表を行った。

主な論文

金属蒸着テープ

・K. Motohashi, T. Sato, T. Samoto, N. Ikeda, T. Sato, H. Ono and S. Onodera: Investigation of higher recording density using an improved Co-Co metal evaporated tape with a GMR reproducing head, *IEEE Trans. Magn.*, 43 (6), 2325-2327 (2007).

・P. -O. Jubert, D. Berman, W. Imaino, T. Sato, N. Ikeda, D. Shiga, K. Motohashi, H. Ono and S. Onodera: Study of perpendicular AME media in Linear Tape Drive, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (10), 3601-3603 (2009).

スパッタ法を用いた磁気テープ

・J. Tachibana, T. Endo, R. Hiratsuka, S. Inoue, D. Berman, P. -O. Jubert, T. Topuria, C. Poon and W. Imaino: Exploratory experiments in recording on sputtered magnetic tape at an areal density of 148Gb/in², *IEEE Trans. Magn.*, 50 (11), Art. ID 3202806, (2014).

議論4 数値の技術的背景について

質問（小島 功）

IBM 社との協業にあたってヘッドの選択は一つのハイライトですが、論文 [11][12] を含んだ引用雑誌 (IEEE Trans on Mag.) が専門論文誌でもあるので、説得の背景となる数値 (対 AMR 等) 等の技術的な背景を簡単に教えて (記載して) いただけないでしょうか。論文 [11] によると 7 Gb/in² が達成できたとありますが、(相対比較でなく) 絶対的な達成水準として価値があったのでしょうか。

回答（原澤 建）

論文 [11] の 7 Gb/in² (テープ)、[12] の 17.5 Gb/in² (ディスク) の絶対的な達成密度の高さが説得理由と考えています。

BaFe テープと GMR ヘッドとの組み合わせで当時の最新システム (記録密度 0.4 Gb/in²) の 10 数倍の記録密度 7 Gb/in² の検証結果をもって IBM 社に理解していただきました。

質問（小島 功）

LTO への採用にあたってどういう活動がなされたのでしょうか。HP 社、Quantum 社への技術説明等の働きかけが記載されていますが、IBM 社を含め、LTO の各プレーヤに対する働きかけを行うことで LTO での採用を狙った、という意味で良いのでしょうか。それとも富士フイルムとして何か直接的な活動を行ったのでしょうか。

回答（原澤 建）

LTO プレーヤである HP 社、Quantum 社に対し、LTO への BaFe テープ採用に向け働きかけを行ってきました。2006 ~ 2007 年当時に当社が単独で行った活動は以下の通りです。

- ① 再生幅の異なる数種のリニアテープ用 GMR ヘッドをヘッドメーカーと共に開発し、そのヘッドで評価した当社 BaFe テープの高い性能を業界団体である INSIC (Information Storage Industry Consortium) で発表、各ドライブメーカーとの技術ミーティングで報告した。
- ② 2007 年に発表した 6.7 Gb/in² の技術検証テープを各社に提出し、各ドライブメーカーの評価を実施した。

議論5 シェアから見た成功シナリオについて

質問（小島 功）

成功シナリオと考えた場合、テープの出荷量やシェアと言った数値に最終的に反映するのではないかと思います。MP テープの出荷量の減少傾向、BaFe のテープ量の増大、また並行して富士フイルムのシェアの優位性等が数値として見えているのではないかと推測しますが、そういう数値は公表可能でしょうか。

回答（原澤 建）

下記は、リニアテープの総出荷容量 (巻数×容量 / 巻、縦軸単位は EB: exabyte) のトレンドになります。MP テープから BaFe テープに切り替わりが進み 2016 年には BaFe テープは 7 割を占めるようになりました。(富士フイルム調べ)

