

磁気記録技術及び光ディスク技術の現状と動向

Current Development Status and Future Prospects of Magnetic Recording and Optical Disc Technologies

田中 陽一郎

TANAKA Yoichiro

中村 直正

NAKAMURA Naomasa

渡部 一雄

WATABE Kazuo

年率 100 % で面記録密度が伸び続け、従来のパソコン (PC) の記憶装置から情報家電、モバイル AV 機器、車載機器へとその用途を急速に広げる磁気ディスク装置 (HDD : Hard Disk Drive)、当社が主導的役割を果たし規格化された DVD が多様な展開を見せ、次世代規格も期待される光ディスク装置 (ODD : Optical Disc Drive)、これらの記憶装置を支える最新の技術動向を紹介する。

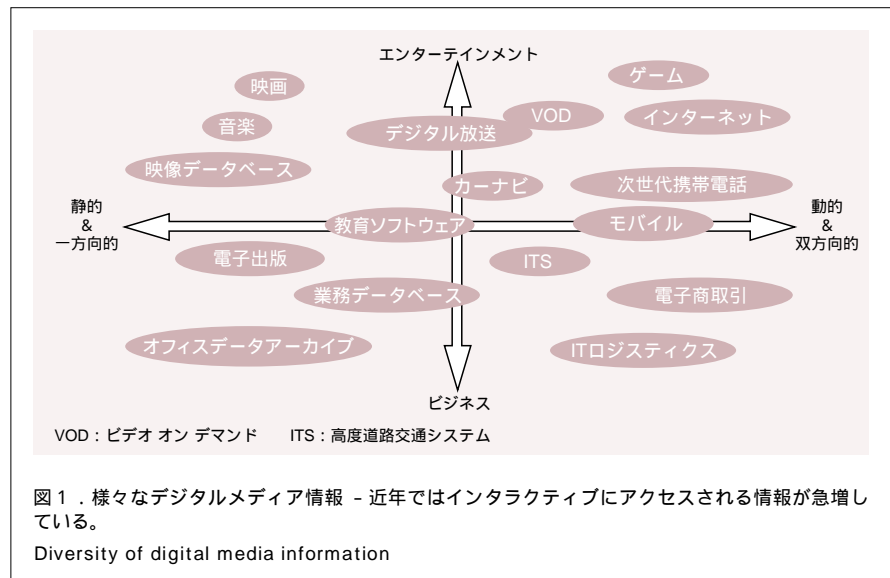
Hard disk drives (HDDs) have been showing a 100% annual growth rate in areal recording density, and their applications are rapidly expanding from the conventional personal computer field to new home information technology equipment, mobile audiovisual equipment, and automotive equipment. With regard to optical disc drives (ODDs), digital versatile disc (DVD), which was standardized at the initiative of Toshiba, has received wide recognition for both PC and consumer electronics use. At present, next-generation optical discs are beginning to attract attention.

This paper presents the state-of-the-art HDD and optical storage technologies and their future prospects.

発展と膨張を続ける デジタルメディアの世界

様々な情報がインターネットなどのサイバースペースに提供されるようになり、更にブロードバンド環境の到来とともに、膨大な量の映像、放送、エンターテインメント、ビジネスなどの情報が、わたくしたちの身の回りにはんらんし始めている。わたくしたちがかかわる様々なデジタルメディア情報を図 1 に示す。デジタルメディアがインタラクティブにダイナミックにアクセスされ使われるものを右側に、一方向に提供され静的に使われるものを左側に示した。特に近年では、インタラクティブに行き交うメディアの情報量が急激に増している。

このようなデジタルメディア情報社会の進展のなかで、大容量記憶メディアとして、データ転送高速性と低コスト性を兼ね備えた HDD と、DVD に代表される ODD が今後も中心的な役割を担うことが期待されている。HDD では大容量・高速性と従来以上の環境耐性が、DVD ではユーザーが記録可能で



かつ大容量という機能がますます重要になっている。

HDD の動向

広がる HDD の使途

ノート PC がオフィス、家庭のみならず、移動先で快適に使えるモバイル形態でも進化し、まさに、いつでもどこで

もコンピューティングというユビキタス (Ubiquitous)^{注 1)}環境が整ってきた。最近では、モバイル用途のノート PC であっても、デスクトップ PC に匹敵する性能やディスク容量が求められるよう

(注 1) “いたるところにある、遍在する”などを意味するラテン語が語源で、どのようなメディアやデバイスも、いつでもどこでもネットワークにつながっていることを象徴することばとして用いられている。

になった。場所を選ばない高度なコンピューティングが既に現実のものになってきた。

2.5型HDDや1.8型HDDに代表されるモバイルHDDは、まさにこのような需要を満たすために、小型で大容量のHDD装置としてその性能を高め続けている。HDDの記録密度進展のトレンドを図2に示す。近年では、年率100%の速度で記録密度を伸ばしている。

小型HDDがその容量と信頼性を高めることに呼応し、従来のノートPC用途以外にも様々な分野で使われ始めている。既に、カーナビゲーションシステムへの搭載が始まり、ドライブルート検索性能や音楽サーバとしてのエンターテインメント性を高めるために使われている。将来は、より高度に展開する車載情報システムの中核ストレージ機器として使われることが期待されている。

また一方では、身に着けて手軽に持ち運ぶことができるオーディオプレーヤや、据置き型オーディオにもHDD用途が広がってきている。従来のオーディオ機器の容量をはるかに超える数Gバイト以上の大容量と、アクセス速度の速さが、HDDの大きな魅力となっ

ている。

近い将来、高精細映像情報を手軽に持ち運び楽しむことができるモバイルビデオ機器への用途も急速に広がるものと考えられる。ワイヤレスのブロードバンド通信が普及するようになると、更に容量の大きな映像情報に簡単にアクセスすることが可能となり、小型端末機器にも、数10Gバイトを収める小型大容量HDDが使われていくことになるであろう。

当社では、面記録密度を高める最先端開発を行っており、ディスクを2枚実装した2.5型HDDで60Gバイトの容量が達成された。記録密度向上の原動力になっているのが磁気記録技術である。最先端の開発の状況について以下に説明する。

■ 熱エネルギーを考慮した高密度磁気記録ディスクの開発

高い記録密度で正確にデータの記録/再生を行うためには、記録層を構成するナノメートルサイズの磁性粒子をより微細化し、信号の品質を良く保つことが必要である。しかし、微細化と同時に熱エネルギーに対する磁性粒子

の磁気エネルギー余裕が小さくなり、記録磁化を安定に保つことが難しくなる。この熱揺らぎ現象は現在の高密度化の課題となっており、高い記録密度で安定な記録磁化を維持できるように、磁性粒子の磁気エネルギーを大きくする記録磁性層が開発されている。近年では、積層化した複数の磁性層を互いに反平行に結合させることで磁氣的に安定な状態を作る、反強磁性結合ディスクも開発されている。

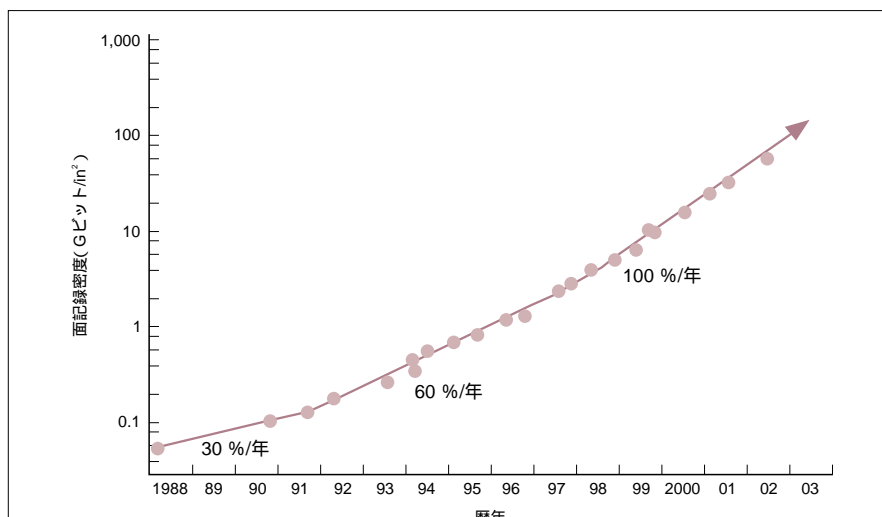
■ 磁気ヘッド技術の進展

磁気ヘッドの役割は、信号をディスクに記録し再生することである。近年の記録密度向上には、GMR(巨大磁気抵抗)ヘッドの性能進展が大きく貢献した。MRヘッドが登場したのは1994年ごろであるが、当社はGMRヘッドの開発を先駆けて行い、98年にいち早く2.5型HDDに採用した。

記録密度を高めるために、GMRヘッドのトラック幅は年々狭くなっている。ヘッド狭小化を補って記録密度を高めるために、GMR素子の高感度化開発が進められている。GMRヘッドのトラック幅1μm当たりの再生出力で表した性能トレンドと、スピバルブ(Spin Valve)型GMR素子の構造を図3に示す。GMRでは、フリー層(Free Layer)の磁化がディスクからの再生磁界に応答し、その結果、固着層(Pinned Layer)の磁化との角度(θ)が変化することで、抵抗が変化して再生電圧として出力を得る。効率よく抵抗変化を得るためにGMR素子構造や材料が世代ごとに改良され、GMR出力に比例するように記録密度を高めることが可能となっている。

■ 高度な信号処理技術

HDDはデータを記録し再生する一種の信号通路であり、磁気記録の特性に合わせた信号処理方式が開発されている。隣接ビット間干渉で信号が小さくなる高記録密度でも正しく復号



* グラフ内の数値は面記録密度の伸び率を示す。

図2. 磁気ディスク装置の面記録密度のトレンド - GMRヘッド、高性能ディスクやPRML信号処理方式の開発により、近年は年率100%で伸びている。

Trend of HDD areal density

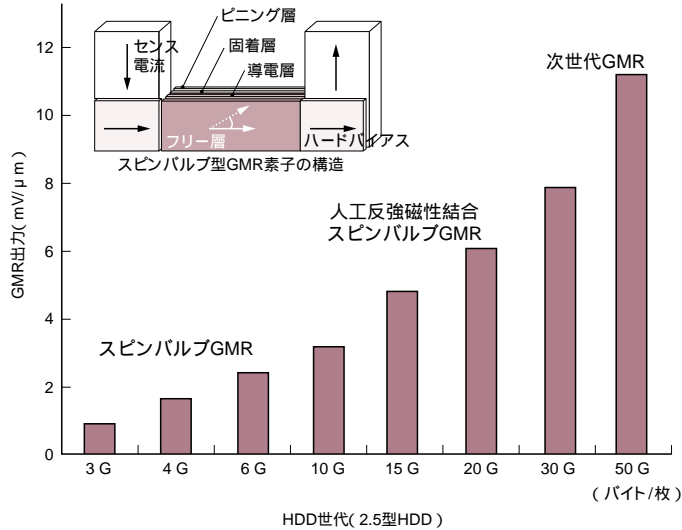


図3. GMRヘッドの構造と性能改善のトレンド - GMR素子開発により、世代ごとに再生出力が大きく増加している。
Giant magnetoresistive (GMR) head structure and performance trend

ック上に正確に位置決めするために、ヘッド位置決め機構を備えている。モバイル環境下で振動が加わった場合であっても、すばやくかつ正確にデータを記録し読み取る高い精度が要求される。開発のポイントは、内部振動発生の抑制と位置決め精度を高める制御方式の工夫である。振動の発生を抑えるために、2001年から2.5型HDDに流体軸受け方式のスピンドルモータが採用された。従来のボールベアリング方式より格段に振動が低減されている。ヘッド位置情報サンプリングレートを等価的に高くして位置決め精度を高めるマルチレート制御方式や、外乱振動の影響を予測して対応する制御方式などが開発されている。

モバイルHDD技術

ポータブル機器で使われるHDDでは、小型で軽く低消費電力であることに加え、強い衝撃や振動に耐え、厳しい温度環境でも性能を維持するようぶさが求められる。非動作時に磁気ヘッドをディスク外に退避させて保護するランプロード機構や、動作時に衝撃を受けてもヘッドとディスクが傷つけないようにする構造を開発すること

ができるように、信号波形の干渉を許容してデータを復調するPRML (Partial Response Maximum Likelihood)方式をベースにした信号処理方式が使われている。特に、非線形歪(ひずみ)が大きい磁気記録チャンネルの特性に合わせ、記録歪を小さくする記録補償や、再生信号品質が不十分でもエラーを抑制する再生処理機能などが織り込まれ

ている。万が一読取りエラーが発生した場合でも、エラー訂正符号(ECC)により誤りを正しく修正する強力な訂正処理機能が使われている。年々ECCの処理も高度化し、ユーザーデータを保護するように工夫されている。

ヘッド位置決めの高精度化

HDDには、磁気ヘッドを所定のトラ

今後のHDD高密度化の展望

今後のHDD高密度化をけん引する技術として、原理的に熱揺らぎの影響を受けにくく高密度化に適した垂直記録方式の開発を当社で進めている。この方式では、ディスクの記録層が垂直方向に磁化するように配列され、記録密度が高いほど記

録ビットの磁化が互いに強め合い安定化する性質を持つ。2002年1月には、業界に先駆けて記録面密度52 Gビット/in²の2.5型垂直HDD(ディスク1枚当たり30 Gバイト)を試作し、デモンストレーションを行った。100 Gビット/in²以上の高記録密度HDDを実用化するために、安定で高い記録密度性能の垂直磁気ディスク、新しい構造の垂直記録ヘッド、垂直記録の性能を最大限引き出す信号処理方式の開発が行われている。

この先、高い磁気異方性エネルギーを持つCoP(コバルト白金)やFeP(鉄白金)などの磁気ディスク記録材料の開発、再

生感度が高い新しい電流垂直通電型(CPP)GMRヘッドやトンネル接合型MRヘッドの実用化開発、復号性能の高い信号処理技術の開発、2段アクチュエータや高精度位置決め制御技術、高剛性機構などの開発により、2.5型HDDで200 Gバイト以上の容量を収めることが可能になるであろう。

将来の高度なデジタルメディア情報社会のストレージ機器として、小型大容量HDDの活躍の場がますます広がるものと考えられる。



垂直記録HDD試作機(52 Gビット/in²)

により、信頼性を大きく高めることが可能になった。ノートPCより厳しい温度環境で用いられる車載向けHDDでは、高温・低温の温度変化に対する環境耐性を高めるように設計されている。

光ディスクの動向

光ディスクの規格の変遷

音楽用CDが登場してからの主な光ディスク規格の変遷を図4に示す。

82年に登場したCD規格は音楽データ用の光ディスク規格であったが、85年のCD-ROM規格により広くデジタルデータを扱う光ディスク規格となり、急激な普及を見せた。続いて、同ディスクの書き込み可能版ディスクとして、90年にCD-R Recordableが規格化された。CD-ROM、CD-Rは現在に至るまで一般に広く利用されている。

96年には、VHS(Video Home System)以上の画質で映画が1本収録できる規格としてDVDが登場した。DVDはCDの7倍以上である4.7Gバイトの記録容量がある。同容量の書換え可能形光ディスクのDVD-RAMは99年に規格化され、PC用の記録メディアとしてだけでなく、VTRに替わる民生

用の映像記録メディアとしても普及してきている。

次世代光ディスクの需要

このように、20世紀の最後の20年間で急激に普及した光ディスクであるが、21世紀に入って最初の規格となるべき次世代光ディスクに要求される仕様について述べる。既にDVD-RAMによって、民生用のテレビ(TV)放送記録メディアとして光ディスクがVTRの代替を果たし始めているが、TV放送が大きな転換期にあることと次世代光ディスクの規格化のタイミングがうまく一致しつつある。TV放送の転換とは、デジタル化を伴う映像の高精細化である。既に日本では、BSデジタル放送が2000年にスタートし、2003年にも地上波デジタル放送が開始される予定である。これらはHD(High Definition)TVと呼ばれる従来よりも高解像の映像情報を送信しており、これらの映像の記録にはより大容量を要する。したがって、これらの映像情報を蓄積するメディアにも大容量が必要であり、次世代光ディスクではこれをターゲットに規格化を行うこととなる。具体的には、HDTV映像情報が約3時間記録できる

30Gバイトの容量を片面(1層)で持つ光ディスクを考えており、DVDフォーラムでの標準化審議を開始している。

光ディスクの高密度化

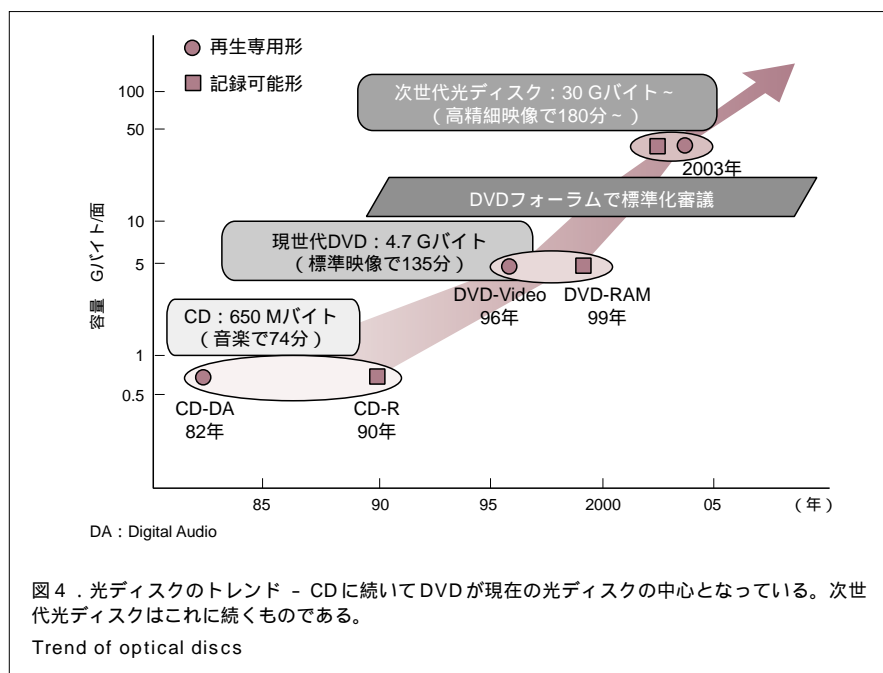
光ディスクの高密度化の基本について簡単に述べる。光ディスクは、データの読取り及び書込みに、レーザービームを対物レンズにより絞り込んで使用する。このビームスポットが小さいほど、より高密度なデータを記録することができる。ビームスポット径は、原理的に光源レーザーの波長に比例し、対物レンズの開口数(NA: Numerical Aperture)に反比例する。したがって、短波長レーザーに高NAレンズを用いることで高密度化を図るのが基本となる。光ディスクの光源レーザーとしては、CDでは赤外線(波長780nm)、DVDでは赤色(波長650nm)が用いられてきたが、次世代光ディスクでは、青紫色半導体レーザー(波長405nm)を用いて高密度化を可能としている。青紫色半導体レーザーは、日亜化学工業(株)により開発され、ここへきて供給体制が整ってきた。一方、対物レンズのNAは、CDの0.45、DVDの0.60から、次世代光ディスクでは0.85まで高める方式も提案されている。

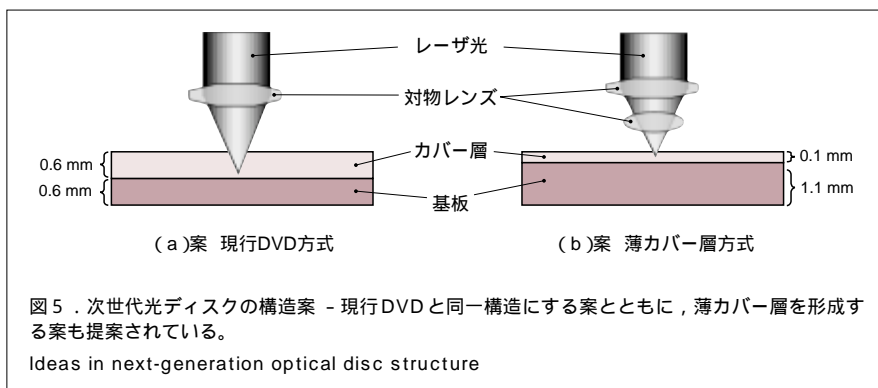
次世代光ディスクのシステム技術

光ヘッド技術

上述のように対物レンズのNAを0.85まで高めた場合、これによりビームスポットを縮小することができるが、主に二つの面でマージンを狭めることになる。一つは、ディスクが傾くことにより生ずる収差(コマ収差)の増加である。もう一つは、ビームが光ディスクを透過するカバー層の厚み誤差に伴う収差(球面収差)の増加である。前者は近似としてNAの3乗、後者はNAの4乗に比例して増加するため、現行DVDに比べて急激に収差が増える。

まず、ディスクの傾きによる収差を低減するためには、カバー層の厚さをDVDの1/6である0.1mmまで薄くさ





せる必要が生じる(図5)。コマ収差はカバー層の厚さに比例するからである。この薄いカバー層の形成技術については後述する。

次に、カバー層の厚み誤差に伴う収差を低減するためには、光ヘッドに球面収差補正機構を導入する必要が生じる。このような補正機構にはいくつかの方式が考えられているが、一對のレンズ系(リレーレンズ)を対物レンズ前の光学系に挿入する方法がある。この場合、カバー層の厚み誤差に応じてリレーレンズ系を調整し、対物レンズに入射するビームを拡大系や収束系にすることで収差を打ち消す。

・信号処理技術

波長とNAによりビームスポットを縮小することで高密度化を図ると同時に、次世代光ディスクでは、DVDに比べより高密度信号記録に対応した信号処理技術を採用することで更なる高密度化を図る。記録信号の線方向の密度を高めることができる技術として、PRML信号処理がある。これは、ディスクの記録信号の線密度に応じた信号応答を、あらかじめ想定したうえで信号等化を行う技術(PR)と、ビットごとの判定方式ではなく、一定長の信号系列ごとにもっとも確からしい系列を判定する判定方式(ML)を組み合わせた技術である。PRMLは通信分野で開発され、ストレージ分野においてはHDDにおいて先に用いられた経緯があるが、光ディスクにおいても有効な技術である。

■次世代光ディスクのメディア技術

記録密度を向上させるために、新たなメディア技術の開発も進められている。現在開発の進められているメディア技術について紹介する。

・薄カバー層技術

前述のように、NAを高めた場合、DVDの1/6となる0.1 mm厚程度のカバー層が必要となる。この薄カバー層に要求される厚みむらは $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度であり、ディスク全面で均一に薄カバー層を形成する技術が開発されている。

・基板技術

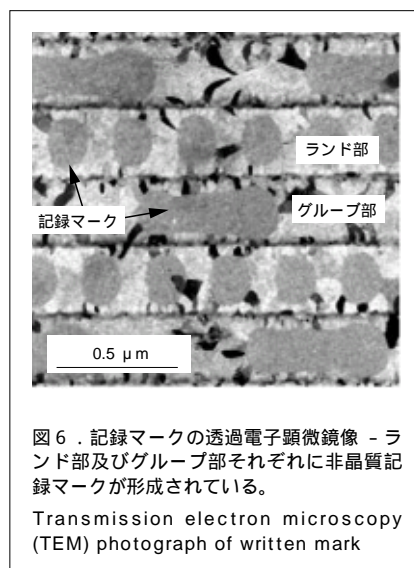
基板上に小さな信号ピット(ROM信号)を形成するためには、マスタリング装置のレーザー光源を短波長化することが必要となる。従来のDVDの場合、マスタリング装置のレーザー光源波長は351 nmが用いられてきたが、更に小さな信号ピットを形成するためには、遠紫外光(266 nm)を用いて光源の短波長化を行い、解像度の向上を図ることが考えられている。266 nmレーザーを使うと、DVDの約1/2程度の大きさのROMピットを形成することが可能となり、20 Gバイト/面クラスのROMディスクが作成可能となる。

20 Gバイト/面以上の高密度化に対しては、電子ビームによる露光装置も検討されている。電子ビームを用いれば、再生する手段の検討は必要だが、100 Gバイト/面クラスのROMディスクが作製できる。

・相変化記録とランド&グループ記録

相変化記録は、レーザー光の光吸収による熱履歴で記録膜に結晶状態と非晶質状態を形成し、記録消去を行う方法である。結晶状態と非晶質状態では記録膜の反射率が異なることから、この反射率差を信号として検出する。これらの相変化記録材料は、光学定数の波長依存性が少ないため、従来の赤色レーザーから青紫色レーザーなどの短波長でも使用できる。

ランド&グループ記録方式は、基板上のトラッキング用グループの中とグループ間のランドにも記録する方式であり、DVD-RAMにおいて採用されている記録技術である。グループのみに記録する方式に比べて、トラック幅を狭めることなく、約1.5倍程度の高密度化が可能となる。このためランド&グループ方式は、DVD-RAMに限らず、次世代光ディスクにおいても高密度化に対し有効な技術と考えられる。図6は、GeSbTe(ゲルマニウムアンチモニテルル)相変化記録膜を用いて、実際に青紫色レーザー/高NAレンズ/ランド&グループ記録などの技術を組み合わせることで記録を行った部分の透過電子顕微鏡像である。



・二層化技術

これまでに述べた技術は、記録マークをできるだけ高密度に記録するという技術であるが、二層化は記録膜を積層し、この二層を片側から記録再生することにより、ディスク容量を一挙に2倍とする方法である。既に、DVD-ROMでは片面8.5Gバイトが実用化されているが、書換え可能形ディスクに適用するためには、レーザの高パワー化が必要、薄カバー層方式と組み合わせる場合に光入射側のグルーブ溝形成

が難しい、などの問題がある。しかしながら、これらの問題が解決すれば、将来的には有望な技術と考えられる。

■次世代光ディスクの仕様

これまで述べた様々な技術を用いて、当社は2002年1月の米国CES (Consumer Electronics Show)で次世代光ディスク装置のデモンストレーションを行った。その主な仕様を表1に示す。ディスク容量は両面ディスクや二層ディスクによる更なる大容量化も可能

表1. CES2002における当社のデモンストレーション仕様
Toshiba demonstration specifications at Consumer Electronics Show 2002 (CES2002)

項目	仕様
ユーザー容量	30 Gバイト
レーザ波長	405 nm
対物レンズNA	0.85
カバー層厚さ	0.1 mm
トラック構造	ランド & グループ
再生信号処理	PRML

DVD フォーラムとは

DVD フォーラムは、DVD規格を開発し、更にはでき上がった規格の普及促進を行うことを目的に設立された、オープンな世界的な組織である。DVD フォーラムには、世界中のエレクトロニクスメーカー、ソフトウェアメーカー、メディアメーカーなどおよそ220社が会員として登録されている。

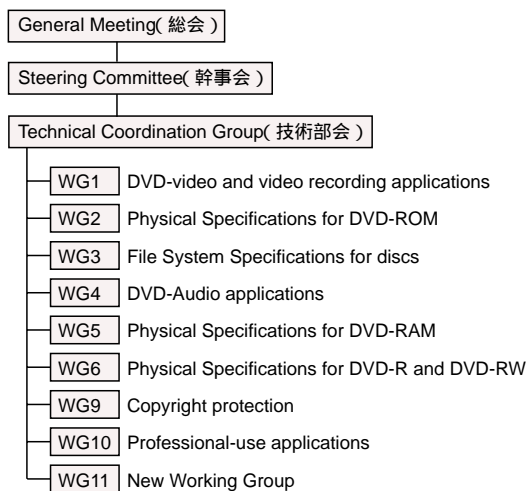
DVD フォーラムは、規格の検討と承認を行う機関である Steering Committee(幹事会)の下に、技術的審議を行う Technical Coordination Group(技術部会)が設けられている。

Technical Coordination Group は、WG1

~ WG11までの各WG(ワーキンググループ)に分けられ、DVDの物理、ファイルフォーマット、アプリケーション、コピープロテクションなどの規格が審議されている。

DVD規格は、当初96年にDVD-videoが規格化され、その後97年にDVD-RAM Ver. 1.0, DVD-R Ver. 1.0, 99年にDVD-RW Ver. 1.0と次々にファミリーを増やし、今後の広い展開が期待される。

当社は、Steering Committee及び Technical Coordination Groupの議長として、DVDフォーラム設立当初からDVDの普及促進に主導的役割を果たしている。



DVD フォーラムの組織(抜粋) - 次世代光ディスクの技術検討には新たにWG11が新設された。

であり、高精細映像の長時間録画にも対応していく。

また、先ごろ、次世代光ディスクの仕様としてBlu-ray Discが国内外メーカーから発表されたが、当社としては、DVDフォーラム(囲み記事参照)で次世代光ディスクの統一規格を議論していく方針である。



田中 陽一郎
TANAKA Yoichiro

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター 磁気ディスク開発部グループ長。高密度磁気記録技術及び大容量HDD技術の開発に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本応用磁気学会会員。

Core Technology Center



中村 直正
NAKAMURA Naomasa

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター 光ディスク開発部主査。相変化記録技術及び光ディスクメディアの開発に従事。応用物理学会会員。

Core Technology Center



渡部 一雄
WATABE Kazuo

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター 光ディスク開発部主務。高密度光記録技術及び大容量光ディスクシステムの開発に従事。

Core Technology Center