

Blu-ray Disc の物理フォーマット

Physical Format of the Blu-ray Disc

前田 茂 己* ¹ Shigemi Maeda	高森 信 之* ² Nobuyuki Takamori	石井 光 夫* ² Mitsuo Ishii
秋山 淳* ² Jun Akiyama	村上 善 照* ² Yoshiteru Murakami	高橋 明* ² Akira Takahashi

要 旨

デジタルハイビジョン放送の本格化と、ブロードバンドネットワークの急速な普及に伴い、ストレージに対する大容量化と高速化要求が益々高まっている。BD (Blu-ray Disc) は、デジタルハイビジョン番組を高画質のまま録画可能な次世代光ディスクとして2003年に登場し、いよいよ普及期を迎えようとしている。BDは青紫色の半導体レーザ、高NA対物レンズ、0.1mm厚カバー層の採用と、高密度記録に適した1-7PP変調及びBIS-LDC符号により、DVDの5倍以上となる18Gbit/in²の面記録密度を達成している。

The demand for higher-capacity and higher-speed storage is increasing, in the context of full-scale launch of digital high-definition broadcast and rapid spread of broadband network. BD (Blu-ray Disc) emerged in 2003 as the next-generation optical disk system capable of recording digital high-definition TV programs with no compression, and now it is about to come into the next stage of market. BD achieves a surface recording density of 18Gbit/in², which is more than 5 times of DVD, using several new technologies such as a blue-violet laser diode, a high-NA objective lens, a 0.1mm-thickness cover layer, 1-7PP modulation code, and BIS-LDC code.

まえがき

映像のデジタル化を背景として、DVDレコーダの爆発的な普及が示すように、ディスクメモリは高速アクセス性と大容量性により、ビデオ録画機器の使い方を一変させた。光ディスクはこれらの特徴に加え、リムーバブル構造による媒体コストの安さとアーカイブ性を有することから、デジタル映像の保存・配布媒体として不動の地位を保っていくものと思われる。

このような中で、デジタルハイビジョン放送など、映像の高画質化に伴い、次世代の大容量光ディスクが注目されている。

BD (Blu-ray Disc) は、CDやDVDと同じ直径12cmのディスクを用い、記憶容量は単層で25GB (片面2層では50GB) の記録が可能で、DVDではできなかったハイビジョン番組の2時間録画を高画質のまま行える。

また、CDやDVDは再生専用のROMからスタート

したが、BDは書換型からスタートしており、最初から追記型と再生専用型を考慮した規格となっている。

本稿では、DVDの5倍以上の記憶容量を実現したBDの高密度化技術およびこれらBDファミリーの物理フォーマット概要¹⁾について解説する。

1. BD開発の経緯と基本パラメータ

2000年にBSデジタル放送、2003年には地上波デジタル放送が開始されたことに対応し、これらHDTVのデジタル放送(データ転送速度:24Mbps)を2時間以上記録することが、BDのターゲットの一つである。このためには22GB以上の記録容量が必要となるが、これは現行DVDを青紫色レーザに置き換えるだけでは到達できない容量である。

BDシステムの基本パラメータは、次の3つである。

(1) 光源波長 405nm

*¹ A1235 プロジェクトチーム

*² 技術本部 デバイス技術研究所 第3研究室

(2) 対物NA 0.85

(3) カバー厚 0.1mm

CD, DVDと発展してきた光ディスクの次世代システムとして最も重要視されたのが、前記の容量である。

光ディスクの容量は、基本的にはスポットサイズで決まる。スポットサイズは光源波長λに比例し、対物レンズの開口数NAに反比例する。容量はスポットサイズの二乗に反比例するので、次式のように表せる。

$$\text{容量} \propto (\text{NA} / \lambda)^2$$

つまり、波長を短く、NAを大きくすることで高容量化が図れる。そこで、BDでは現在開発されている半導体レーザーの中で最も短い波長帯の青紫色レーザーを採用し、光ディスク用プラスチックの耐性を考慮した波長として405nmに決められた。また、対物レンズのNAに関しては、現実的な作動距離 (Working Distance)、及び、製造マージンを考慮して、NA0.85に決められた。波長650nm, NA0.6のDVDに対して、波長を405nmにすることで2.5倍、NAを0.85にすることで2倍、合わせて5倍の高容量化が達成され、すなわち、DVDの4.7GBに対して、BDでは25GB前後の容量が得られる。

なお、NAが大きいことは光の記録には有利に働く。光スポットが絞られることによるエネルギーの集中のためであり、波長650nmでNA0.6のDVDのシステムに比べ、波長405nmでNA0.85のBDシステムでは、記録に要するパワーは約1/4で済むことになる。このことは今後、更に多層記録や高速記録に向かったときに記録パワーの点から余裕が生まれることになる。

このように、BDフォーマットは、できる限りの短波長化と高NA化により、次世代の光ディスクとして、十分な高容量化を得て、長寿なフォーマットとなることが期待される。

一方、短波長と高NAによる高容量化と引き換えに、光学収差の発生量が増大することから、光学トランスの減少が懸念される。

光ディスクで発生する主な収差としては、フォーカサーボの残差やオフセットにより生じるデフォーカス、光ヘッドの光軸とディスク間の傾き(チルト)により生じるコマ収差、カバー厚誤差により生じる球面収差がある。各種光学収差と、波長λ, NA, カバー厚tとの関係は次式のように表せる。

(1) デフォーカス $\propto \text{NA}^2 / \lambda$

(2) コマ収差 $\propto (t \times \text{NA}^3) / \lambda$

(3) 球面収差 $\propto \text{NA}^4 / \lambda$

上式の関係は近似式であり、実際の収差は、高次収差も考慮するとNAに対し、より大きな収差を発生する傾向がある。これは、短波長化しても、カバー厚を

DVDで用いられている0.6mmのままにすると、チルト許容量が半分になってしまうことを意味する。

BDでは、短波長化と高NA化によるコマ収差の増加を、カバー厚を0.1mmと薄くすることでキャンセルし、ほぼDVD並みのチルト許容量を確保する。カバー厚誤差については、BDはDVDの1/10の許容量となっているが、カバー厚自体も1/6になっており、100μmのカバー層は、シート、もしくは、レジンのスピンコートにより精度よく作ることができる。BDのフォーマットでは、ディスク1枚中の厚み誤差の規格値を±2μmとしており、回転周期や、高速アクセス時に対応した高速な球面収差補正サーボは不要である。一方、ディスクごとの厚み誤差規格は、±5μmとより大きくしており、これは、ディスクの製造マージンを拡大する上で有効である。

BDドライブでの光ヘッドとしては、ディスクの挿入時に球面収差補正を行えばよい。この補正は、2層ディスクで各層の厚みが異なることに対応する場合にも利用される。

2. BDの基本パラメータ

表1にBDの基本パラメータを示す。BDファミリーを成す書換型(BD-RE)、追記型(BD-R)、再生専用型(BD-ROM)は、共通の基本フォーマット・パラメータを有し、BDドライブでのサポートを容易にしている。

BDシステムでは民生機器だけでなくコンピュータの周辺機器としても使えるようにするため、データの単位の並び方はDVD-RAMと同じような記録ブロック間にギャップを持つ構造をとっており、ブロック単位の記録が、後述のウォブリアドレス方式と相俟って

表1 BD基本パラメータ

Table 1 BD general parameters.

	Rewritable (BD-RE)	Recordable (BD-R)	Read-Only (BD-ROM)
Capacity	single layer: 23.3 / 25 / (27) GB, dual layer: 46.6 / 50 / (54) GB		
Laser wavelength	405nm		
NA (Numerical Aperture)	0.85		
Disc outline	diameter: 12cm, thickness: 1.2mm		
Cover Layer thickness	single layer: 100 μm, dual layer: L0 100 μm / L1 75 μm		
Track pitch	0.32 μm		
Minimum mark length	0.160 / 0.149 / (0.138) μm		
Track format	Groove		Pit
Channel modulation	1-7PP		
Error correction code	BIS-LDC		

高精度で行える。

BD-RE 及び BD-R のトラックフォーマットは、グループトラックのみに記録を行うグループ記録方式が採用されている。グループ記録方式ではグループとグループの間にランドを挟むことで隣接グループトラックへの熱の伝導を遮断し、狭トラックピッチにおいても隣接トラック記録による信号品質の劣化を抑えることができる。BD ではグループ間のトラックピッチは $0.32 \mu\text{m}$ である。

ディスク表面から記録層までのカバー層厚みは、単層ディスクで $100 \mu\text{m}$ 、2層ディスクの場合、フロント層 (Layer1) まで $75 \mu\text{m}$ 、リア層 (Layer0) まで $100 \mu\text{m}$ である。BD は、ユーザの用途に応じて複数種類の記録容量が予め規定されている。単層ディスクでは、23.3GB、25GB、27GB の3種類の記録容量があり、2層ディスクではその2倍の46.6GB、50GB、54GBの容量が Book で規定されている (27GB と 54GB は Reserved)。3種類の記録密度は、トラックピッチは同じで、線密度を異ならせることで実現されている。各容量では、ディスク上に記録される最短のマーク長 (2T) は、低容量側から $0.160 \mu\text{m}$ 、 $0.149 \mu\text{m}$ 、 $0.138 \mu\text{m}$ となっている。

3. 変調方式

トラックに沿って記録される主チャンネルの変調方式は 1-7 変調方式が用いられる。いわゆる $d=1$ の符号であり、CD、DVD に用いられた $d=2$ と比べて検出窓幅が広く、また、高速記録時にチャンネルクロック周波数が低くてすむなどの特長がある。

BD システムで用いられる 1-7 変調方式は、1-7PP (Parity preserve/Prohibit RMTR) と呼ばれ、従来の 1-7 変調方式に対し、以下の改善が施されている。

一つ目は、DC 成分の抑圧である。光ディスクで用いる変調方式は、DC 成分を抑制することが重要になるが、Parity preserve 方式は従来の 1-7 変調方式に対し、少ない冗長ビットの付加で DC 成分抑圧を実現している。二つ目は、Prohibit RMTR (Repeated Minimum Transition Runlength) であり、最短マークと最短スペースの繰り返し回数を制限することで、再生クロック生成の信頼性を向上させている。

4. 記録方式 (ライトストラテジ)

前記で変調された複数のマーク長から成るデータを微細記録するための記録波形をライトストラテジと呼ぶ。図 1 に BD-RE のライトストラテジの模式図を示す。

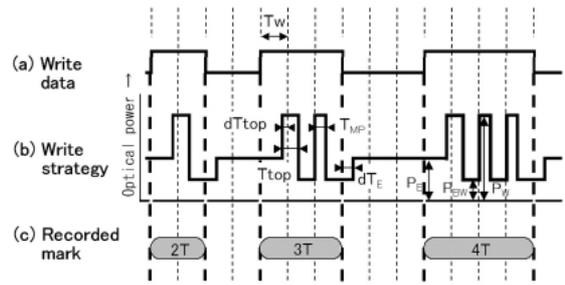


図 1 ライトストラテジ
Fig. 1 Write strategy.

3 値のパワーレベル P_w 、 P_e 、 P_{bw} を持ち、パルス状に変調された記録パルス波形である。先頭パルスの幅を T_{top} 、先頭パルスの始端位置のシフト量を dT_{top} 、中間パルスを T_{mp} 、冷却パルスの終端位置のシフト量を dT_e としている。高密度光記録では、記録条件に応じてマークエッジが移動する記録干渉が発生する。これによる記録信号の劣化を防ぐため、BD では適応型マーク補償を行うことも可能である。これは、記録マークの符号長に応じて、マーク始端位置は dT_{top} と T_{top} を変化させることで、記録マーク終端位置は dT_e を変化させることで、マークの始端と終端のエッジシフトを抑え、良好な信号品質を得ることができる。各記録メディアの特性や記録容量に応じて、上記の記録パルスパラメータ (P_w 、 P_e 、 P_{bw} 、 T_{top} 、 dT_{top} 、 T_{mp} 、 dT_e) をメディアメーカーが指定し、記録情報としてあらかじめディスクに記録されている。

5. ECC (Error Correction Code) 構造

BD では、極小のスポット径を実現するために薄いカバー層や、大きな NA が使われていることから、バーストエラーは DVD 系に比べてより大きな影響を与える。従って BD のエラー訂正システムは、長いバーストエラーに対して配慮され、バーストエラー検知能力が優れた方法として Picket code と呼ぶ方式が採用されている。この code の配置を図 2 に示す。

Picket とはメインデータブロックの中に周期的に組み込まれている列状のデータを指す。メインデータそのものはリードソロモンコードで必要かつ十分に保護されている。そして Picket は、メインデータとは別の第 2 の大変強固なリードソロモンコードによって保護されている。デコード時には、まず Picket 列が訂正され、その訂正過程でメインデータ中のバーストエラーの有無が予測される。バーストエラーの場所を示すシンボルはメインデータのコードワードの訂正時に "era-

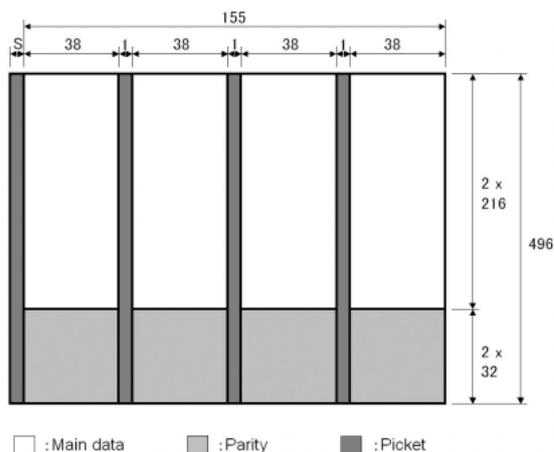


図2 Picket code の配置
Fig. 2 Layout of the picket code.

sure"としてフラグ化される。BDでは、1つのECCブロックには64KBのユーザデータが格納されている。このデータはLDC (Long Distance Code) と呼ばれるコードで保護されている。LDCは304個のコードワードで構成され、各々は、216個の情報シンボルと32個のパリティシンボルからなる (コードワード長は248)。これらのコードワードはECCブロックの縦方向に2×2ごとにインタリーブされ、152byte×496byteのブロックとして形成されている。図からも分かるように、BDでは1つのECCブロックの中に4本のPicket列が等間隔で位置している。1番左の"S"と記されたPicketは各々の行の開始を示す同期パターンである。もしもこの同期パターンが検出されなかった場合、バーストエラーが発生している可能性があると同時にPicket列内のシンボルそのものも訂正する必要がある。"S" picketの右の3列のPicketはBIS (Burst Indicator Subcode) によって保護されている。このBISコードは30個の情報シンボルと32個のパリティシンボルからなるコードワード長62を持つ。BISコードワードは各々496byteからなる3列のpicket列をインタリーブしている。ここでLDCとBISの両コードは1コードワードあたり等しい数のパリティシンボル(32個)を持っており、すなわち、1つの共通のリードソロモンコードで、両コードのデコードを担当している事を意味している。

BISコードの情報シンボルはメインデータチャンネルの次にくる付加的なデータチャンネルを形成している。このBIS列の中のサイドチャンネルには記録データのアドレス情報が格納されている。記録データアドレス情報のエラー訂正に関してはメインデータとは別個のリードソロモンコードが用意されており、このコードは5つの情報シンボルと4つのパリティシンボルから

構成されている。この、特別な記録データアドレス専用のコードによってメインデータのECCとは全く独立した、高速かつ信頼性の高い記録データアドレスの読み込みが可能となっている。

6. グループフォーマット

BD-REとBD-Rには、レーザビームのトラッキング制御を行うために、スパイラル状の連続した溝(グループ)が形成されている。この溝の役目は、単にトラッキングだけでなく、ドライブ装置で書き込みのタイミングを生成すると共に、ディスク全周にわたるトラック位置を識別する番地(アドレス)やディスク固有の副情報を、未記録のトラック自身に埋め込むという重要な役割がある。これらの情報を持たせるためにBDでは溝に"ウォブル"とよばれる変調が施してある²⁾。ウォブル変調の振幅はディスク半径方向に約±10nmである。連続溝ウォブル方式は、データの記録密度を落とさずにアドレス情報やディスク固有情報を示すことができ、また、ディスクを多層化しても層間の影響を受けないことから、面密度向上と体積密度向上の両面で優れた方式である。

微細な高密度マークを精度良く書き込むためには、より安定で正確な記録クロックが必要である。そのため、ウォブルの主たる周波数成分が単一で、かつ、溝がスムーズに連続するように構成されており、BDドライブは、ウォブル成分から容易に安定な記録クロックを生成することができる。また、ユーザデータは常にこのウォブルに同期して書き込まれるので、ウォブル1周期の長さで書き込まれるデータのマーク長が常に比例関係である。これは、ディスクに形成されているウォブルサイズがディスクの容量を自動的に決定する仕組みになっていることを意味する。(例えば、単層ディスクの容量は、ウォブル長が5.52 μmの時23.3GB、5.14 μmの時25GBとなる)。

単一周波数ベースのウォブルには、MSK (Minimum Shift Keying) 変調によるタイミング及びアドレス情報が組み込まれ、書き込まれる64KBごとのメインデータ単位であるRUB (Recording Unit Block) に対し、3個のアドレス単位が割り当てられる。

ウォブルの基本周波数は空間的に5 μmほどであり、正弦波がMSKのルールにより変調される位置によりアドレス情報の"0"と"1"を表現している。MSKによる変調エネルギーは大きい情報が局在するため欠陥の影響は受けやすい。このため、さらにMSKに多重する形でSTW (Saw Tooth Wobble) と呼ばれる信号が用いられている。これはウォブルのすべての正弦波に2次高調波を付加するもので、アドレスデータの

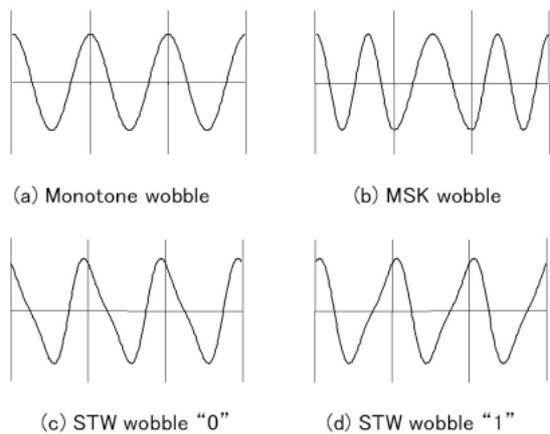


図3 ウォブル形態
Fig. 3 Wobble form.

"0"と"1"を、付加する2次高調波の極性に対応させるものである。図3に、ウォブルの形態を示す。

STWの信号エネルギーは、MSKのそれとは異なり空間的に分布しており、積分により検出する方法をとるために部分的な欠陥に対して耐性がある。BDのアドレスはMSKとSTWの双方を用いることで、よりロバストな検出をすることができる。

7. 再生信号処理

BDでは1-7PP変調方式の採用により、最短符号長の記録マーク(2T)が光スポットのサイズに比べて短い。このため、最短マーク(2T)のSN比が劣化し、2Tに関わるエッジでのビット誤りが頻発するが、PRML(Partial Response Maximum Likelihood)を用いることで、これらのビット誤りを効果的に低減できる。2Tに隣接したエッジに関する誤りの内訳は、そのほとんどが光学的な符号間干渉によりさらに短い符号長1Tに誤る。PRMLは、1-7PPの符号化方式の変調規則に基づきビタビ復号を行うが、この際1T符号は禁止符号であるため、容易に正規の2T符号に誤りを訂正することが可能である。

このようにPRML信号処理技術を用いることで、27GBまでの高線密度の記録マークでも、高い再生信号品質を実現することが可能になっている。

8. 今後の展開

BD規格のロードマップを図4に示す³⁾。最初の規格である書換型(BD-RE)は2002年6月に発行された。転送速度は基準速度の36Mbps(1X)である。BD規格はこの書換型を基準にし、再生専用型はビット対

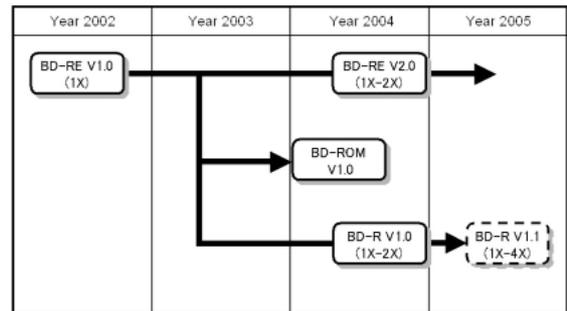


図4 BD物理規格のロードマップ
Fig. 4 Roadmap of the BD physical format.

応のトラッキング方式であるDPD(Differential Phase Detection)方式を追加する等の形で、また、追記型は最適パワー設定やライトストラテジを修正する等の形で、それぞれ拡張が図られている。

一方、高速化への拡張では、まず転送速度を2倍速(2X:72Mbps)にした高速バージョンへと展開されている。BDは、高精細映像用レコーダ等のAV用途をターゲットとしてスタートしたが、データ用途としてのしつこみを既に備えている。従って、PC対応を主ターゲットとした拡張を容易に図ることができる。BDのNAが大きく記録パワーがDVDに比べて低くてすむこと、密度が高いことなどから高速化も有利に進行しており、転送速度は2倍速から、更に4倍速(4X:144Mbps)へと展開が図られていく。

むすび

BDの物理規格について、高密度化技術とフォーマット概要を中心に解説した。

BDはCDやDVDの技術と経験をベースに、現在考えられる最高技術の投入により高速大容量を達成したものであり、デジタルハイビジョン時代の最適パッケージメディアとして、新規需要にタイムリーに応じていけるスタンダードであることを確信する。

参考文献

- 1) Blu-ray Disc Technical White Paper, (online) <<http://blu-raydisc-official.org/tecinfo/index.html>>, (2004).
- 2) S.Furumiya et al., "Wobble-address format of the Blu-ray Disc", ISOM/ODS2002 Technical Digest, pp.266-268 (2002).
- 3) Blu-ray Disc Technology, Blu-ray Disc Information Seminar, (online) <<http://blu-raydisc-official.org/event/seminar01.html>>, (2004).

(2004年9月17日受理)