

# HD DVDの再生信号処理技術

Signal Processing Technology for HD DVD

柏原 裕

■ KASHIHARA Yutaka

高精細動画の記録のため、大容量光ディスクHD DVDが開発された。HD DVDで採用した大容量化技術は、青紫色半導体レーザーとPRML (Partial Response Maximum Likelihood) 信号処理である。HD DVDでは、高密度化により、相対的に雑音が増加する。しかし、PRMLを用いれば、雑音に埋もれた信号からでも正しくデータ再生ができる。また、ディスクや光ヘッドのバラツキを吸収する適応等化を導入したことで、PRMLの性能が十分発揮できるようになっている。

HD DVD was developed as the next-generation DVD to record high-definition movies. Two key technologies achieve the capacity demanded for HD DVD: the blue-violet laser diode, and partial response maximum likelihood (PRML) signal processing. Although there is a relative increase in the noise level in high-density recording, data can be reproduced correctly using PRML. Furthermore, adaptive equalizing enables PRML to display its capability to the full by reducing effects caused by unevenness of discs, the pickup head, and so on.

## 1 まえがき

HD DVDの片面1層当たりの容量は、再生専用型及び追記型で15 Gバイト、書換え型で20 Gバイトである。DVDのそれは4.7 Gバイトであり、実に3倍以上の大容量となる。

光ディスクでは、光源の短波長化や対物レンズの開口数(NA)の向上による集光ビームスポットの縮小により、高密度化が達成できる。HD DVDでは、波長405 nmの青紫色半導体レーザーと、開口数0.65の対物レンズを用いることで、約3倍の高密度化を達成する。

短波長化や高NA化は、集光ビームスポットの縮小を達成する反面、ディスク基板と光ヘッドの間で生じるチルトによるコマ収差を増大する。コマ収差は、光が入射するディスク基板を薄くすることで低減できる。しかし、ディスク基板の厚さ変更は、ディスクの製造法の変更をもたらす。HD DVDでは、DVDとの互換性を重視し、ディスクの基板厚はDVDと同じ0.6 mmとし、チルトはチルトサーボで対応する。

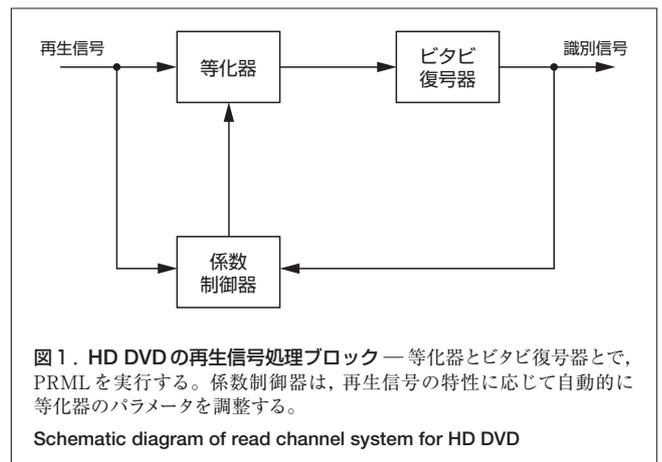
集光ビームスポットの縮小に加え、更なる高密度化達成のため、HD DVDでは、再生信号処理にPRML (Partial Response Maximum Likelihood)を採用した。

ここでは、HD DVDの再生信号処理について述べる。

## 2 PRML

### 2.1 概要

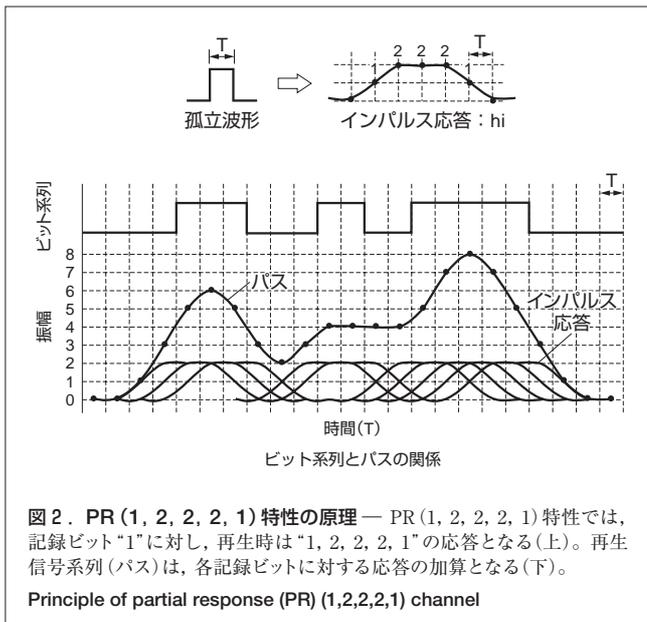
従来、光ディスクでは、再生信号レベルがあるしきい値



よりも高いか低いかにより、二値化してきた(レベルスライス)。しかし、HD DVDでは、高密度化により再生信号の振幅が低下するため、レベルスライスによる二値化では多くの識別誤りが発生する。そこで、HD DVDでは、再生信号の二値化にPRMLを採用した。HD DVDの再生信号処理ブロックを図1に示す。このうち等化器とビタビ復号器とで、PRMLを実行する。

### 2.2 等化

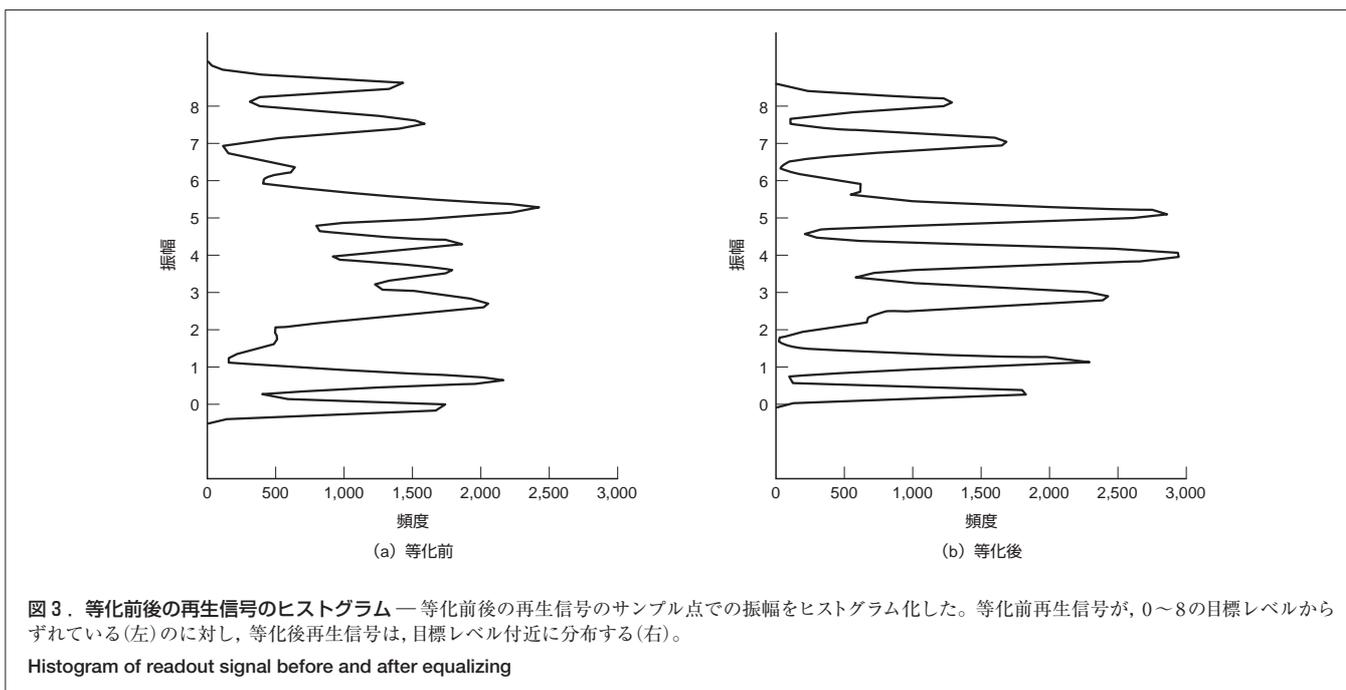
HD DVDでは、記録再生系を、PR(1, 2, 2, 2, 1)特性と仮定する。一般にPR特性は、かっこ内にインパルス応答列を並べて、PR( $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$ )のように表現される。つまり、記録ビット“1”に対し、再生信号は $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4$ の振幅を持つ系列として現れる(図2上)。再生信号系列は、各



記録ビットに対するインパルス応答の加算で表現され(図2下), その加算結果をパスと呼ぶ。ビット系列とパスは1対1に対応する。

PRMLにおける等化器の役割は、光ディスクの再生信号を使用するPR特性に合わせ込むことである。ここで、光ディスクの再生信号特性と似通ったPR特性を選択することにより、等化による雑音成分の増幅が抑制される。HD DVDでは、再生信号特性に近いPR (1, 2, 2, 2, 1)を採用した。

再生専用型HD DVDの等化前と等化後の再生信号のヒストグラム



トグラムを図3に示す。等化後の再生信号が、PR(1, 2, 2, 2, 1)特性で出現する9レベルに補正されているのがわかる。

### 2.3 Maximum Likelihood (ML) 復号

実際の再生信号系列は、雑音などを含んでいるため、いかなるパスとも完全には一致しない(図4)。図4において、太線は実再生信号系列を表し、細線は想定されるすべてのパスを表す。ML復号は、各サンプル点において、実再生信号と想定されるすべてのパスとの誤差を算出し、誤差の累積値がもっとも小さいパスを選択する。そして、選択したパスと1対1に対応するビット系列を出力する。

ML復号では、実再生信号のある一つのサンプルだけから信号識別をするのではなく、PR特性を持つ再生信号の既知の相関を積極的に利用して識別を実行するので、雑音に強いという特長がある。しかし、実再生信号系列とすべてのパスとをまともに比較すると、膨大な計算能力が必要となる。ML復号を効率的に実行するには、ビタビ復号器を用いる。

PRMLとレベルスライスの、計算機シミュレーションによる解析結果を図5に示す。PRMLで識別する場合、DVDの変調符号である8/16符号よりも、ETM (Eight Twelve Modulation) 符号のほうが良好との報告がある<sup>(2)</sup>。そのため、ETM符号とPRMLの組合せと、8/16符号とレベルスライスの組合せを比較した。図5から、レベルスライスではデータビット長が0.154  $\mu\text{m}/\text{ビット}$ で、ビットエラー率が $10^{-5}$ である。一方、PRMLではデータビット長が0.118  $\mu\text{m}/\text{ビット}$ で、ビットエラー率が $10^{-5}$ となる。このことから、PRMLの採用により、線記録密度は20~30%向上するといえる。

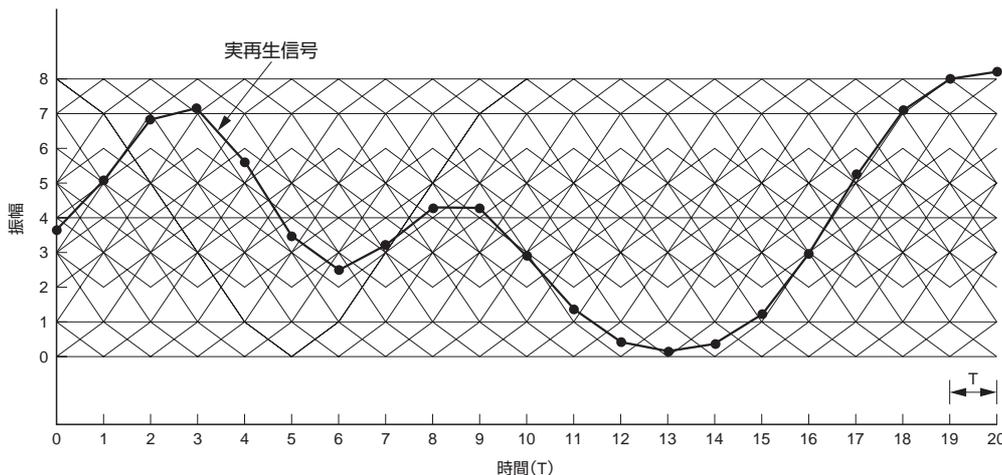


図4. ML復号の概念 — 実再生信号(太線)は、想定されるすべてのパス(細線)のどれとも一致はしない。ML復号では、実再生信号との差がもっとも小さいパスを選択する。

Concept of maximum likelihood decoding

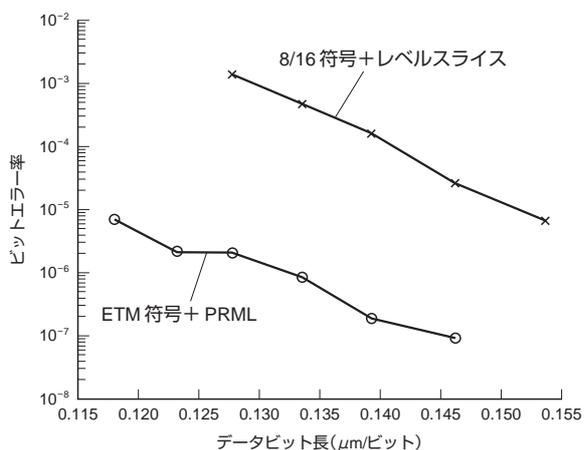


図5. PRMLによる高密度化(シミュレーション結果) — PRMLの採用により、線記録密度が20~30%向上できる。

Simulated effect of high-density recording with PRML

### 3 適応等化

PR (1, 2, 2, 2, 1) 特性では、再生信号は9レベルにも分布する。そのため、光ディスクの特性や光ヘッドのバラツキなどにより再生信号の特性が変化した場合、等化が正しくできず識別誤りを引き起こす。そこで、等化器の係数を調整することでバラツキを吸収し、正しくPR特性へと補正するのが適応等化である。等化器の係数調整は、図1の係数制御器で実行する。係数制御器では、識別信号に対応するパスと等化再生信号との自乗誤差が最小になるように等化係数を求め、等化器の係数を更新する。

書換え型HD DVDのランドトラック及びグルーブトラック

に記録されたデータを、2種類のドライブで再生した際の等化器のゲイン特性を図6に示す。再生トラックや光ヘッドに起因した再生信号の周波数特性の揺れを吸収するため、等化器のゲイン特性が自動的に調整される。

HD DVDでは、ディスクの基板厚をDVDと同じ0.6 mmとしたので、チルトによるコマ収差が増大する。適応等化の採用により、ディスクや光ヘッドのバラツキ抑制に加え、チルトの影響を緩和することができる。光の入射方向がディスクの垂線から傾くと、集光ビームスポットはひずむ(図7上)。ただし、光の傾きは、光の入射角と反射角の間の角度で表される。傾き方向がディスクの接線(タンジェンシャル)方向の場合、記録再生系のインパルス応答は非対称となる。適応

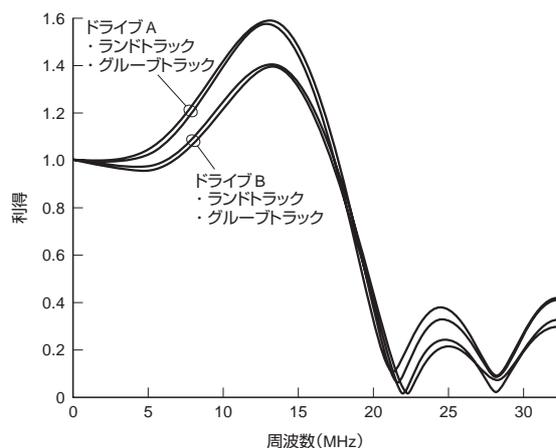


図6. 等化器のゲイン特性の調整 — 適応等化の採用により、再生信号特性のバラツキを吸収するように、等化器のゲイン特性は自動的に調整される。

Adjustment of gain characteristics in equalizer

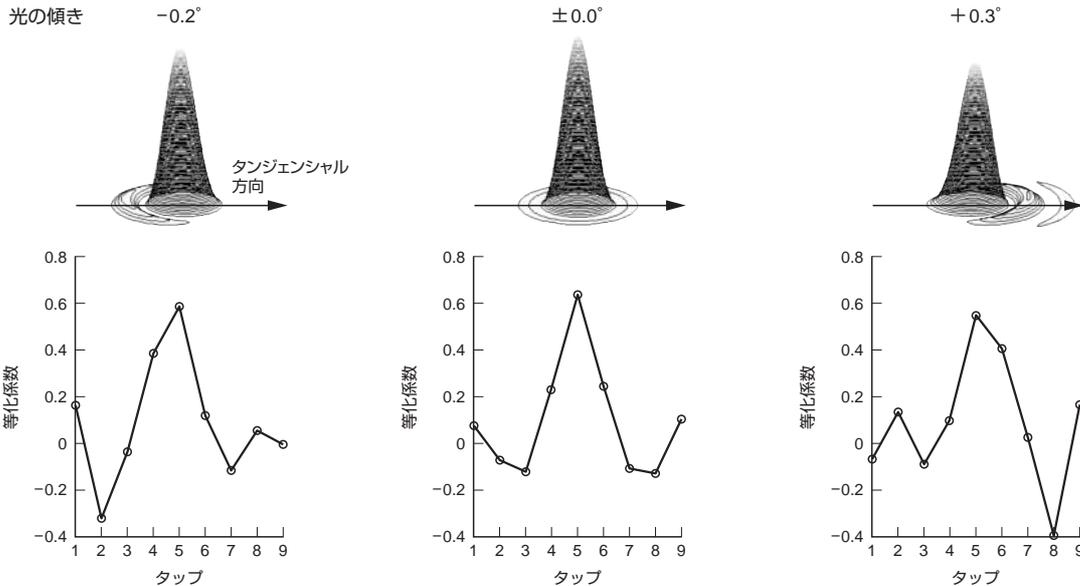


図7. タンジェンシャルチルトによる非対称性の補償 — タンジェンシャルチルトに起因するインパルス応答の非対称性は、等化係数を非対称にすることで補償される。

Compensation for asymmetrical response caused by tangential tilt

等化の採用により、インパルス応答の非対称性を補償するよう、等化係数が非対称に変化する(図7下)。

適応等化のタンジェンシャルチルトに対する効果を図8に示す。図8の縦軸は、ビットエラー率の推定値<sup>(3)</sup>であり、HD DVDの信号品質の評価指標として採用されている。HD DVDのシステムに求められる識別後のビットエラー率は、 $1.5 \times 10^{-4}$ である。適応等化により、タンジェンシャルチルトに対するマージンが $0.2^\circ$ 拡大する。

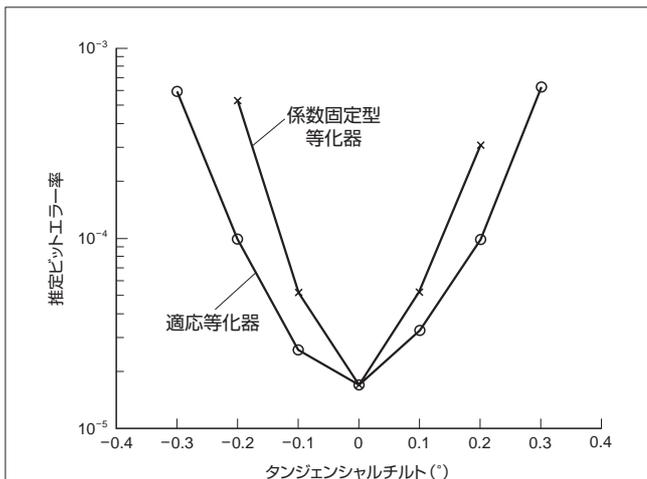


図8. 適応等化によるマージン拡大 — 適応等化により、タンジェンシャルチルトに対するマージンが $0.2^\circ$ 向上する。

Improvement of tilt margin by adaptive equalizing

#### 4 あとがき

HD DVDでは、青紫色半導体レーザの採用による集光ビームスポットの縮小に加え、更なる高密度化技術としてPRMLを採用した。また、PRMLの性能を十分に発揮するため、適応等化を用いた。HD DVDでは、PRMLと適応等化の採用により、高精細映像の記録・再生に十分な容量を達成している。

#### 文献

- (1) Kayanuma, K., et al. "Eight to Twelve Modulation Code for High Density Optical Disk". ISOM2004 Technical Digest. We-F-45.
- (2) Kashiwara, Y., et al. "Simulation study for high density optical disk system". Proceedings of SPIE. 4342, 2004, p.524 - 533.
- (3) Nagai, Y., et al. "A new method of evaluating signal quality for systems to which partial response and maximum likelihood is applied". Jpn. J. Appl. Phys. 42 Part 1, 2B, 2003, p.971 - 975.



柏原 裕 KASHIHARA Yutaka

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。光ディスクの信号処理技術の開発及び規格化に従事。電子情報通信学会会員。  
Core Technology Center