

## ピットエッジ多値記録を用いた高密度光ディスクシステムの信号処理技術

Signal Processing Techniques for a High Density Optical Disc System Employing Multi-Level Pit Edge Recording

後藤 利夫, 林 英樹

Toshio Goto, Hideki Hayashi

**要 旨** 再生専用型光ディスクの高密度化のために, SCIPER(Single Carrier Independent Pit Edge Recording)と呼ばれるピットエッジ多値記録方式と RPR(Radial direction Partial Response)を組み合わせた SCIPER/RPR 方式が提案されている。この光ディスクシステムの記録技術としてピット交番配置, 畳み込み符号, 記録補償を開発し, 再生技術として適応イコライザ, キャリアキャンセラ, ビタビ復号を開発した。このシステムのデータ再生性能を計算機シミュレーションにより評価した結果,  $1 \times 10^{-3}$  のビットエラーレートでノイズマージンが 5.4dB 改善され, タンジェンシャルチルト, タイミングオフセット, ピット位置ずれに対するマージンが拡大することがわかった。

**Summary** For a high density ROM type optical disc, SCIPER/RPR method has been proposed. This is the combination of a single carrier independent pit edge recording (SCIPER) method and a radial direction partial response (RPR) reproduction method. For this system, we have developed signal processing techniques; pit alternating allocation, convolutional code, write pre-compensation, an adaptive equalizer, a carrier canceler, and Viterbi decoding. We evaluated the data reproduction performance of the system by computer simulation. As a result, we confirmed that a noise margin was improved by 5.4dB at a bit error rate of  $1 \times 10^{-3}$ , and margins against tangential tilt, timing offset, and pit position offset were increased.

**キーワード:** SCIPER, ピットエッジ多値記録方式, RPR, ピット交番配置, 畳み込み符号, 記録補償, ビタビ復号, DVD

### 1. まえがき

再生専用型光ディスクは, 大量複製が容易である, ランダムアクセスが容易であるといった特徴から, 映像, 音声, コンピュータデータなどの記録媒体に利用されている。その記録容量は光源の短波長化(780nm から 650nm)と対物レンズの高開口化(0.45 から 0.6), および様々な信号処理によって CD の 688M バイト (CD-ROM) から, DVD の 4.7G

バイトへと約 7 倍の増加となったが, 近年青色半導体レーザーの実用化を前に記録密度の大幅な向上が要求されている。

1998 年より, 5 年計画で  $100\text{Gb}/\text{in}^2$  (12cm ディスクでおよそ 160G バイト) の記録密度の光ディスクを目指す国家プロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステム」が発足している<sup>(1)</sup>。このプロジェクトでは, ピットエッジの位置を多段階に変

調してデジタルデータを多値記録する SCIPER (Single Carrier Independent Pit Edge Recording) と呼ばれる記録方式に、隣接したトラック同士相関を持たせて2トラック同時再生することでトラック密度を上げる RPR (Radial direction Partial Response) を組み合わせた SCIPER/RPR 方式が提案されている<sup>(2),(3)</sup>。

今回この SCIPER/RPR 方式による高密度記録再生に適した信号処理技術を開発した。記録技術としてはピット交番配置、畳み込み符号、記録補償、再生技術としては適応イコライザ、キャリアキャンセラ、ピタビ復号を開発した。この光ディスクシステムのデータ再生性能を、計算機シミュレーションにより評価した結果、ノイズ、タンジェンシャルチャルト、タイミングオフセット、ピット位置ずれに対するマージンを拡大することができた。

以下に本システムで適用した信号処理技術と、シミュレーションの方法と結果について述べる。

## 2. SCIPER/RPR 方式

SCIPER 方式は、DVD など で用いられているピットおよびピット間隔の長さの組み合わせによって情報を記録する方式と違って、光ディスクのトラック上に一定間隔でほぼ一定長のピットを配置し、各々のピットエッジの位置を記録するデータに応じて多段階にシフトすることによって、多値のデジタルデータを記録する。

図1には(0, 1, 2)なる3値データを多値記録した場合の SCIPER 方式のピット形状を示しているが、0ならピット長が短くなる方向にシフトし、1ならシフトせず、2ならピット長が長くなる方向にそれぞれピットエッジをシフトする。こうすることで1つのエッジが3通りの位置情報を取り、1つのピットで3×3=9通りの情報を表すことができるため、1ピット当たり3ピットの情報を表現できる。なお、図1ではピットエッジの3通りの位置を重ねて表示しているが、実際のピットでは1つの位置を取ることになる。

なお、この3値データを4, 5, 6...と増やすことで、理論的にはいくらでも記録密度を増やすこ

とができるため、この SCIPER 方式は高密度化に適した方式といえる。

さらに光ディスクの高密度化のために、予め隣接したトラックと相関を持ったデータを記録し、2トラック同時に再生することで、トラック密度を上げることができる RPR 方式を組み合わせている。SCIPER 方式は、図1に示したようにトラック上を再生ビームスポットがトレースして信号を再生するが、SCIPER/RPR 方式は図2に示したように、再生ビームスポットが2トラックの中心線上をトレースして、2トラックを同時に再生する。このように2トラック同時再生を行うことで、同一直径の再生ビームスポットでも図1の1トラック再生に比べて、図2に示したようにトラック密度を上げてもクロストークなどの影響を受けずに、信号の読み取りが可能となる。ただし、2トラック同時再生を可能にするためには、隣のトラックとピットエッジ位置が揃っていないなければならない。

ここで注意しておきたいのは、図2のトラック n の情報を再生するためにトラック n - 1 の情報も同時に読み取っているのであって(トラック方向に高密度化するために)、トラック n とトラック n - 1 の情報を同時に再生しているわけではない。

図3には SCIPER/RPR 方式の再生 RF 波形を示している。図中再生ビームスポット a と b の位置は、図1の再生ビームスポットの位置 a, b に対応しており、この時点で再生データの読み取りが行われる。

## 3. 記録再生技術

### 3.1 ピット交番配置

図1に示したように、SCIPER/RPR 方式のピットは光ディスクの半径方向に整列しており、再生ビームスポット a の位置より左側では再生ビームスポットに占めるピット面積が多いため、ディスクからの反射光量は減少し、反対に右側ではピット面積が少ないため、ディスクからの反射光量は増加する。このため図3に示したように、再生 RF 波形は上下に変動し、データを読み取る時点においてアイパターンは傾斜している。再生クロックがタイミングオフセットやジッタを持っている

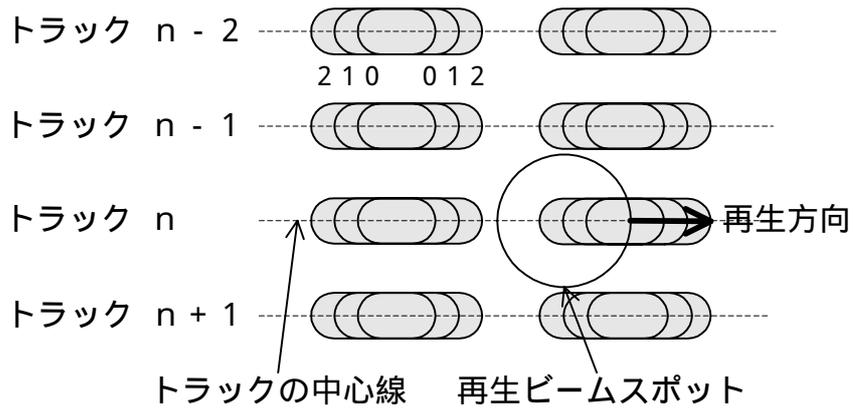


図1 SCIPER方式ビット形状

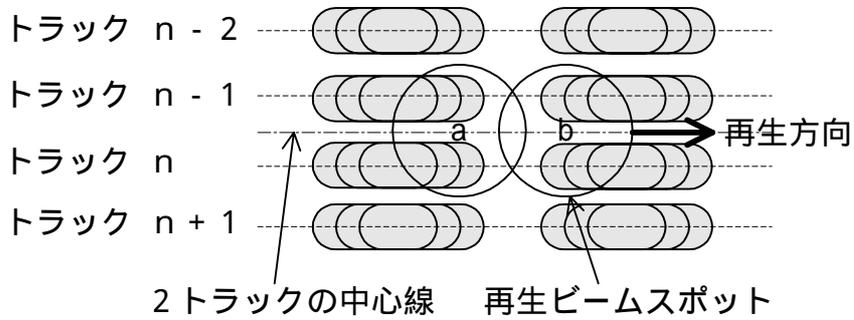


図2 SCIPER/RPR方式ビット形状

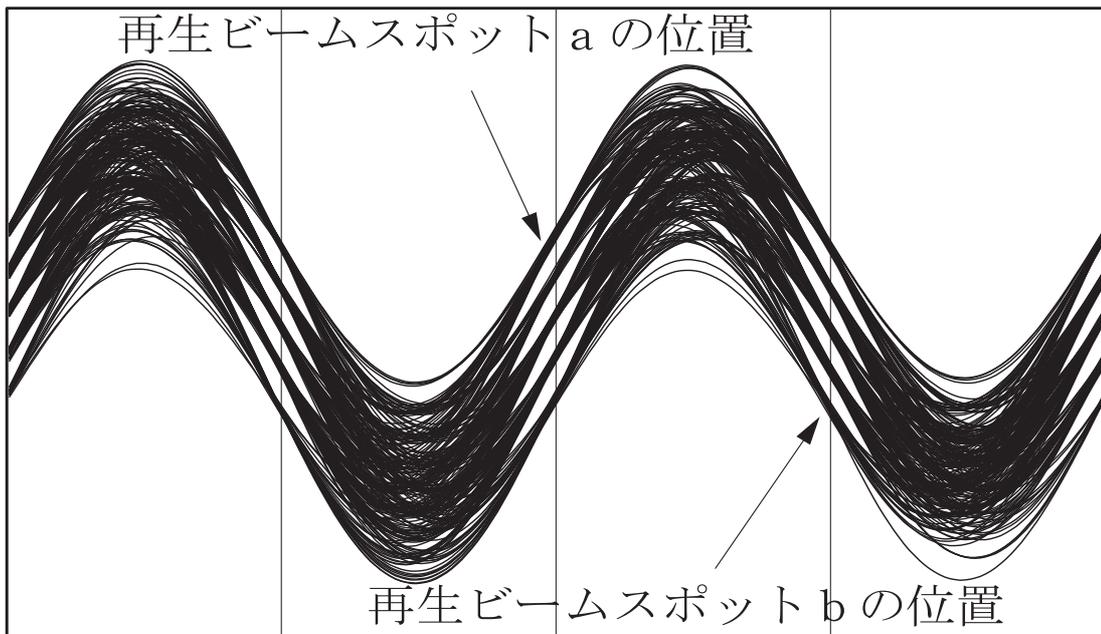


図3 SCIPER/RPR方式の再生波形

と、再生データの振幅値が上下に変動し、正確なデータの再生が困難となる。

図4に示したように、光ディスクの半径方向に整列していたピットを1トラック毎に位相を反転することで、ピットが交互に配置される交番配置となり、再生ビームスポットに占めるピット面積の割合をほぼ一定にすることができる。

このようにピットを交番配置にすることで、図5に示すように再生RF波形の上下の変動がなくなり、データを読み取る時点においてアイパターンの傾斜がなくなり、タイミングオフセットやジッタなどの変動に対して強くなる。

### 3.2 畳み込み符号

今回用いた畳み込み符号は符号化率 $R=3/4$ 、拘束長 $K=4$ のパンクチャド符号である。

パンクチャド符号は通常の畳み込み符号に比べて符号化率が1に近く、効率の良い符号が得られるものである<sup>4)</sup>。

図6に符号化器のブロック図を示す。時刻  $t$  において、シフトレジスタの左側から入力コード $d_0$ を入力するとスイッチA、Bが交互に閉じて情報コード $c_0, c_1$ を出力する。時刻  $t+1$ において入力コード $d_1$ を入力すると、スイッチBが閉じて情報コード $c_2$ を出力する。時刻  $t+2$ において入力コー

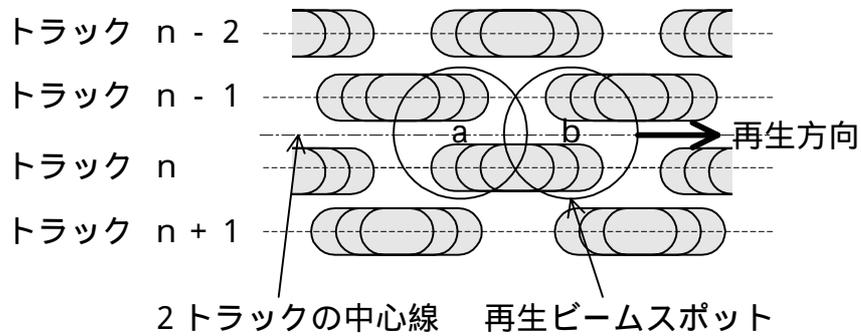


図4 ピット交番配置

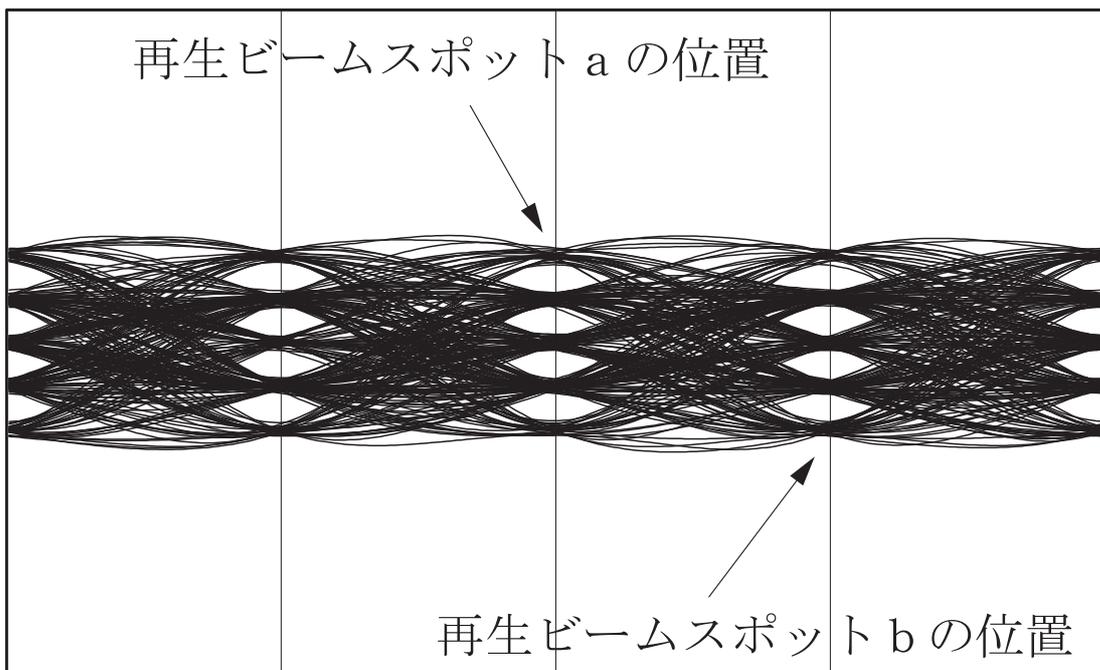


図5 ピット交番配置の再生RF波形

ド  $d_2$  を入力すると、スイッチ B が閉じて情報コード  $c_3$  を出力する。

3 ビットの入力コードを入力すると 4 ビットの情報コードを出力するため、符号化率  $R=3/4$  となり、符号化する入力コードに対して過去 4 つ前までの入力コードを参照して符号化するため、拘束長  $=4$  となる。

なお、畳み込み符号化を行うと 3 ビットの情報  
が 4 ビットに増加するため、図 4 に示した 3 値エッジ変調では 1 つのビット当たり 9 通りの情報が記録することができず、4 ビット = 16 通りの情報を記録することができない。このため図 7 に示したように 4 値エッジ変調を行い、1 つのビット当たり  $4 \times 4 = 16$  通りの情報を記録している。

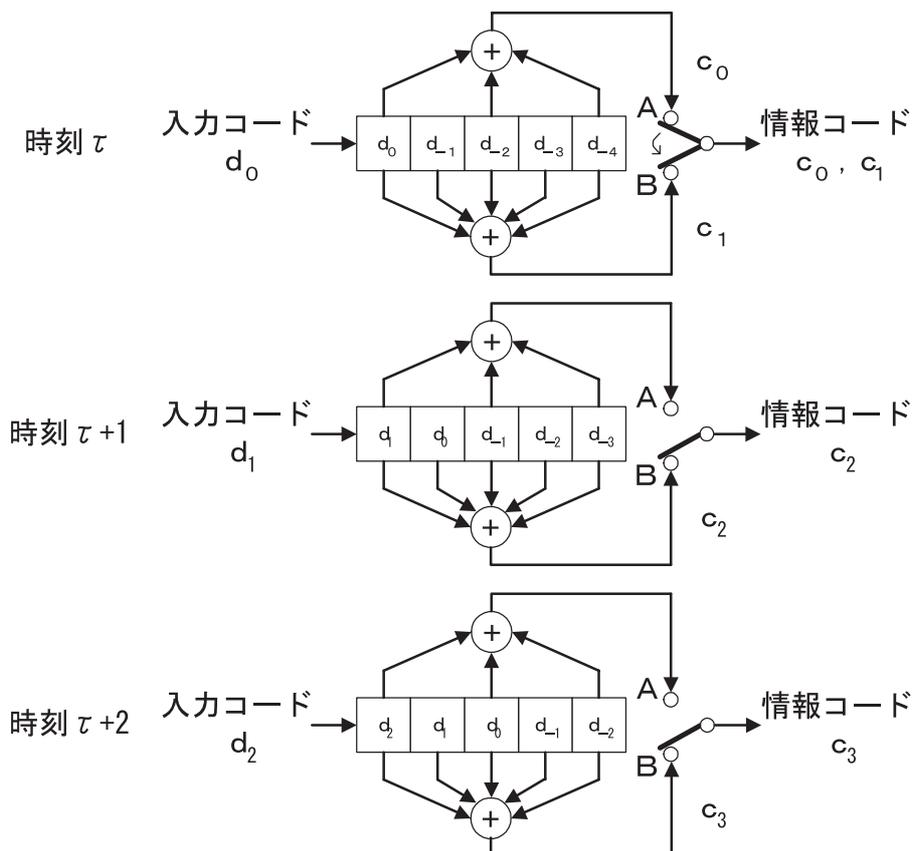


図 6 畳み込み符号化のブロック

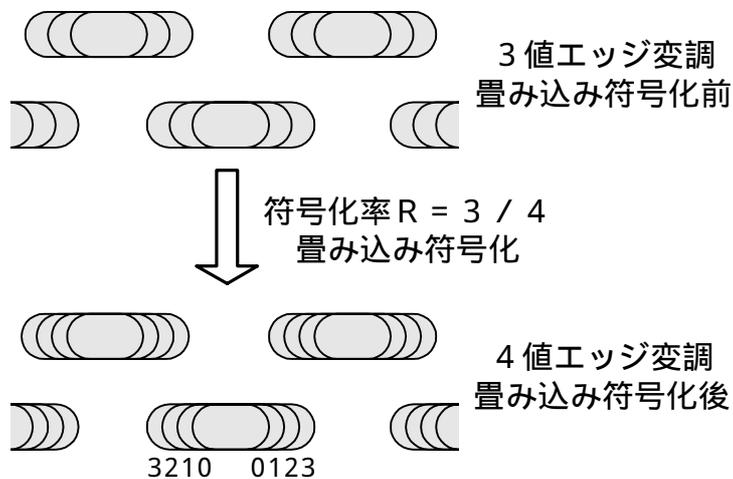


図 7 畳み込み符号化後のエッジ変調

### 3.3 記録補償

SCIPER/RPR方式では、記録データはピットエッジの位置情報としてディスクに記録され、再生データは振幅情報として再生される。このとき、トラック方向の記録密度が高くピットエッジ間の距離が短いと、符号間干渉が生じ、トラック上で前後に隣接するピットエッジの記録データによって再生信号の振幅値が上下に変動する。

この符号間干渉を低減するために、記録時に記録補償を行った。図8に記録補償のブロックを示す。

エッジ変調された記録データに、OTF(Optical Transfer Function)特性と波形等化特性を乗じることにより、再生信号のレプリカが生成される。

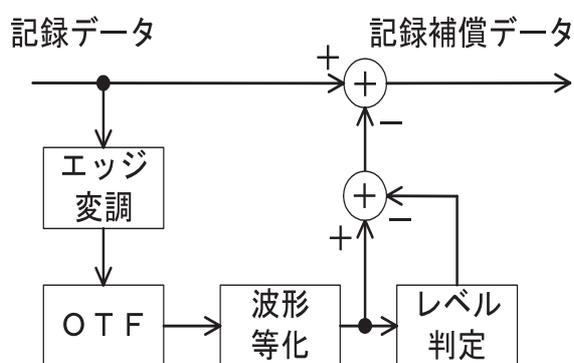


図8 記録補償のブロック

この信号から、レベル判定した結果の判定値(再生データ)を減算することにより、符号間干渉のレプリカが生成される。この符号間干渉のレプリカを記録データから減算する。

図9に、記録補償を適用した時の再生RF波形を示す。図5で示した記録補償を行っていない時の再生RF波形と比較すると、符号間干渉が低減されアイパターンが開いているのがわかる。

### 3.4 適応イコライザ

図10に適応イコライザのブロック図を示す。入力信号を $x(n)$ 、出力信号を $y(n)$ とする可変係数フィルタであり、出力信号 $y(n)$ が目標信号 $d(n)$ に近づくように、すなわち目標信号 $d(n)$ と出

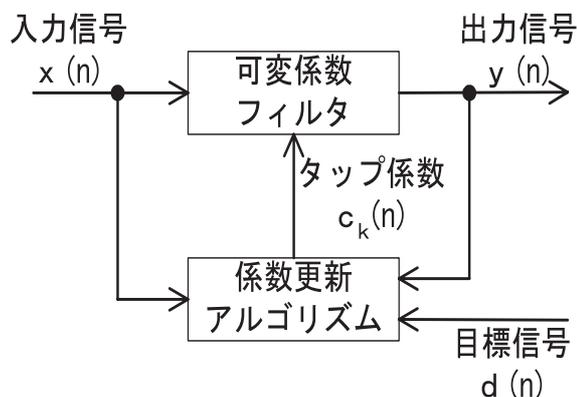


図10 適応イコライザ

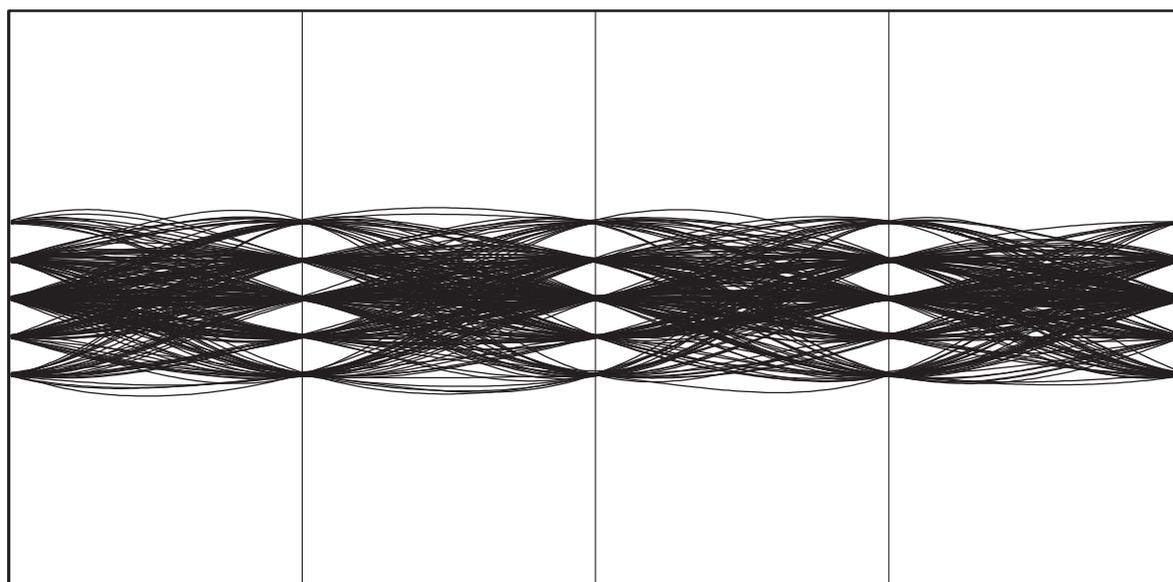


図9 記録補償を適用した時の再生RF波形

力信号 $y(n)$ との誤差信号が小さくなるようにフィルタのタップ係数  $ck(n)$  が自動的に更新されるものである。

可変係数フィルタは9次のFIRフィルタで構成され、係数更新アルゴリズムには、LMS (Least Mean Square) 適応アルゴリズムを用いた。

LMS 適応アルゴリズムは、構成の仕方によっては誤差信号がなかなか小さくならず、タップ係数が誤った方向に更新され続けた結果、発散してしまう場合が生じることがある。そこで早く確実にフィルタのタップ係数を収束させるため、ディスク上に適当な間隔で何の情報も記録されているか

予めわかっているリファレンスピットを記録する。そして最初にはリファレンスピットからの情報で係数を更新し、やがてある程度収束が進んだ時点で収束速度を速めるために、再生データを利用して係数更新を行っている。

図11にタンジェンシャルチルト $=0.8^\circ$ を加えたときのアイパターンを示す。図12には適応イコライザを動作させたときのアイパターンを示す。タンジェンシャルチルトを加えると再生RF波形は大きく歪むため、アイパターンは潰れて見えないが、適応イコライザを動作させることにより、アイパターンが開くことがわかる。

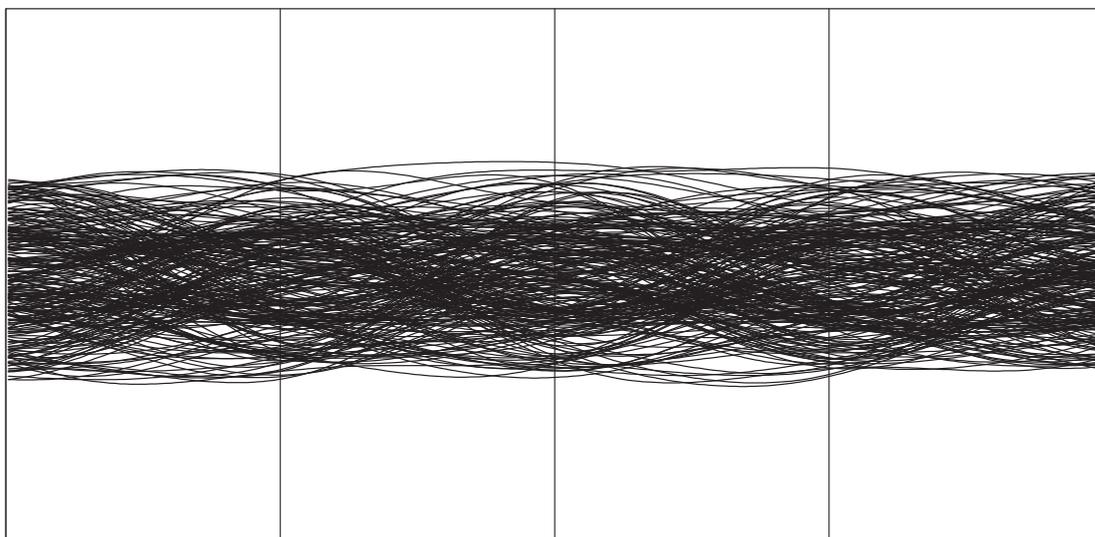


図 11 適応イコライザオフの再生波形

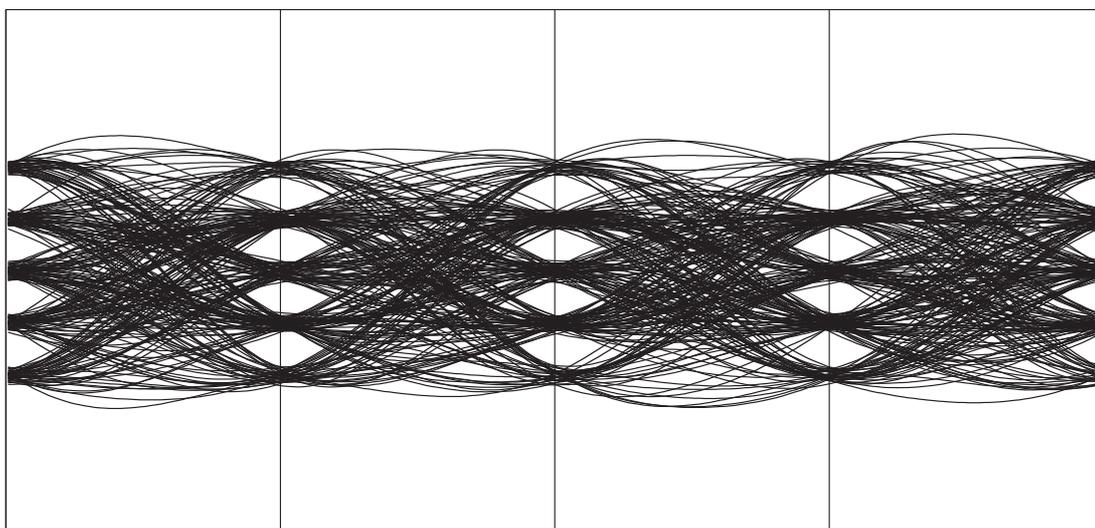


図 12 適応イコライザオンの再生波形

### 3.5 キャリアキャンセラ

SCIPER/RPR方式では、2トラックを同時に再生するため、隣接するトラック間のピットエッジ位置は一致していなければならない。しかし、光ディスクを作成する記録装置の回転ジッタなどによってピットの位置ずれが生じると、図13に示したように再生信号にレベル変動が現れる。図においてピットの位置ずれ量は、中心ピット長の7.4%である。このレベル変動の周波数はキャリア周波数であり、その周期はピット周期である。このように再生信号にレベル変動が生じると、データの再生性能が著しく低下する。

図14に、キャリアキャンセラのブロック図を示す。再生データの差分値からキャリア成分を抽出し、

再生データからキャリア成分を減算することで、キャリア成分の無くなった出力データを得ている。

### 4. シミュレーションの方法

図15にシミュレーション系の構成を示す。

記録系では、ランダムデータ発生からの3ビットデータに、畳み込み符号化( $R=3/4$ のパンクチャド符号)を行って4ビットコードを得る。この4ビットコードを、ピットの前後エッジにそれぞれ2ビットずつ割り振り、プリコードを施して記録データを得る。さらに記録補償を行い、各ビットエッジが4値となるSCIPERエッジ変調を行い、記録信号を得る。

再生系では、再生光学系の周波数特性である

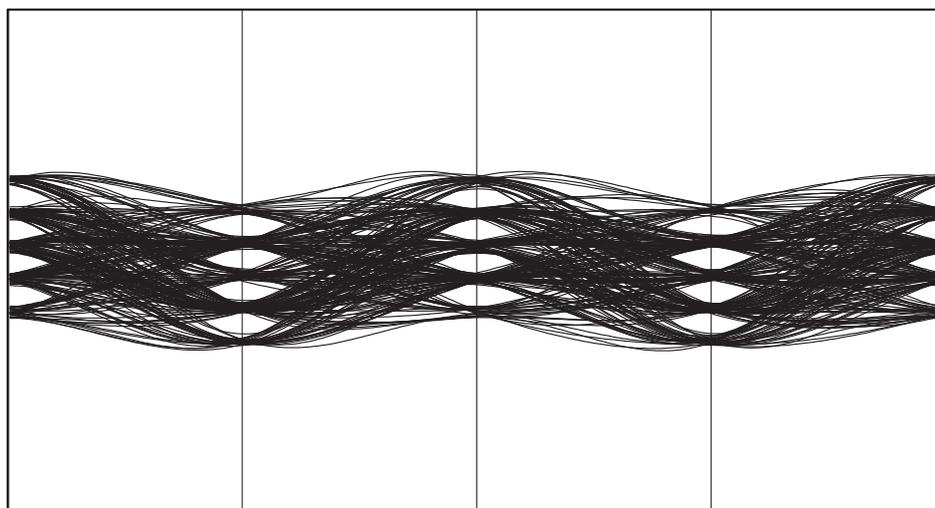


図13 ビット位置ずれ時の再生RF波形

+

+

図14 キャリアキャンセラのブロック

OTFの前段で、記録信号に白色ガウス雑音を加算するモデルでノイズを表現した。これは再生専用型の光ディスクにおいて、再生信号に重畳されるノイズは、高域減衰特性を示すメディアノイズが支配的なためである。2トラック同時再生を行うため、再生信号は2トラック信号の単純加算モデルで表現した。波形等化特性はDVD規格と同様のものを用いた。適応イコライザ後の信号にビタビ復号を施すことにより再生データを得る。この再生データと記録時のランダムデータを比較してビットエラーレートを算出する。

表1にシミュレーションに用いた各種パラメータを示す。ここでエッジ変調度はビットエッジをシフトする距離と中心ピット長との比であり、畳み込み符号化によって各ビットエッジが4値となった場合の変調度である。

表1 シミュレーションパラメータ

データレート	13.5 [Mbps]
エッジ変調度	14.8 [%]
再生線速度	2.55 [m/s]
レーザ波長	405 [nm]
対物レンズNA	0.6
波形等化特性	DVD規格

## 5. シミュレーションの結果

図16にビット交番配置の効果を示す。ビットエラーレートが $1 \times 10^{-3}$ 以下となるタイミングオフセットの範囲をタイミングオフセットマージンとして定義する。ディスクS/N=46dBにおいて、ビット整列配置では $\pm 1.6\%$ であったタイミングオフセットマージンが、ビット交番配置では $\pm 9\%$ にまで拡大している。

図17に拘束長を2から7まで変えたときのディスクS/Nとビットエラーレートの関係を示す。符号化を行うことにより、いずれの拘束長でもビットエラーレートが低減され、ビットエラー

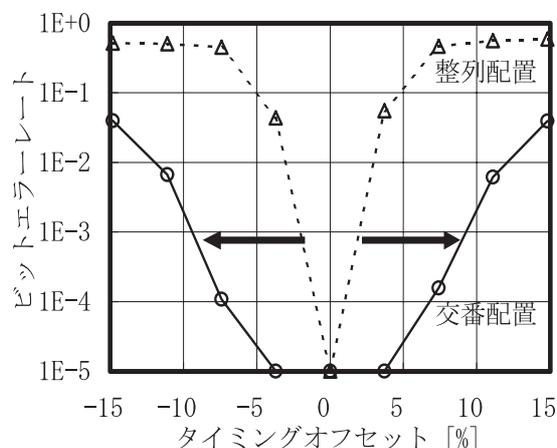


図16 ビット交番配置の効果

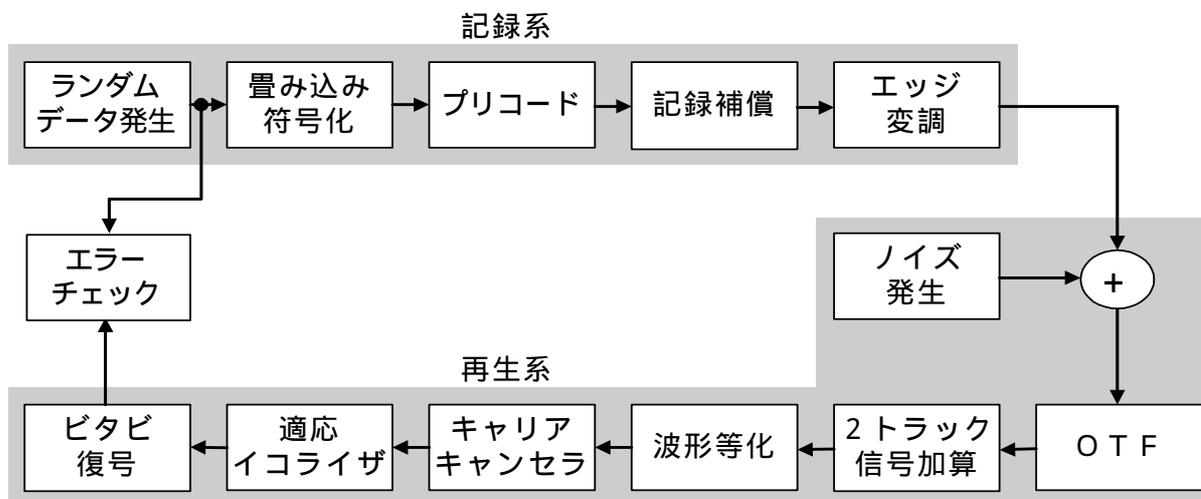


図15 シミュレーション系の構成

レート $1 \times 10^{-3}$ 以下とするために必要なディスクS/Nも低減できることがわかる。すなわち符号化によって等価的にノイズマージンを改善する効果が得られており、この改善量は符号化利得と呼ばれる。一般に拘束長が大きくなると、畳み込み符号の訂正能力とともに符号化利得が増すが、再生装置におけるビタビ復号の回路規模は指数的に増大する。図17においては、拘束長を4以上にしても符号化利得はそれほど増えないので、回路規模を考慮して、拘束長が4の畳み込み符号を採用した。

図18に適応イコライザの効果を示す。タンジェンシャルチルト $=0.8^\circ$ を加えたときのディスクS/N対ビットエラーレートを示しており、適応イコライザが無い場合はディスクS/Nが良く

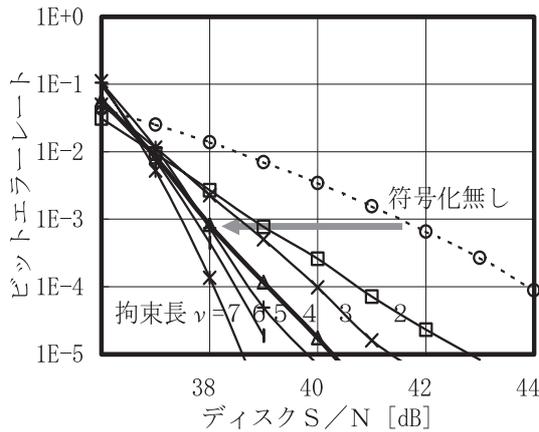


図17 畳み込みの効果

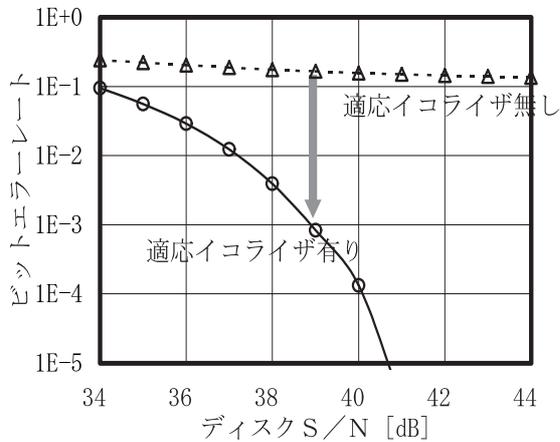


図18 適応イコライザの効果

なってもビットエラーレートはほとんど改善しないが、適応イコライザがある場合は、ディスクS/Nが増えるにつれてビットエラーレートは改善している。

図19にキャリアキャンセラの効果を示す。ビットエラーレートが $1 \times 10^{-3}$ 以下となるビット位置ずれの範囲をビット位置ずれマージンとして定義する。ディスクS/N=46dBにおいて、キャリアキャンセラをオフすると $\pm 3\%$ であったものが、キャリアキャンセラをオンすると $\pm 14\%$ に拡大しているのがわかる。

図20に、いままで述べてきた各種の信号処理技術を使用した時の、ディスクS/Nとビットエラーレートを示す。前述した畳み込み符号と同様に、ノイズマージンを改善する効果が得られてい

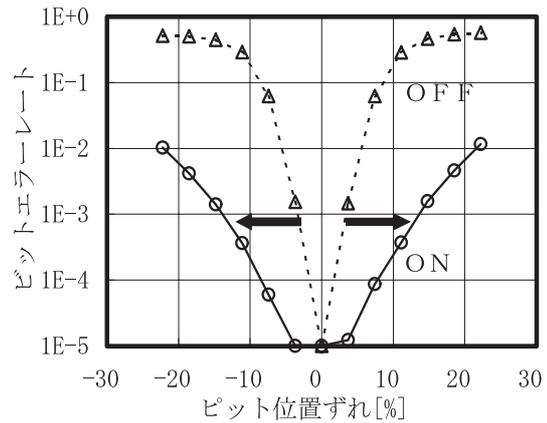


図19 キャリアキャンセラの効果

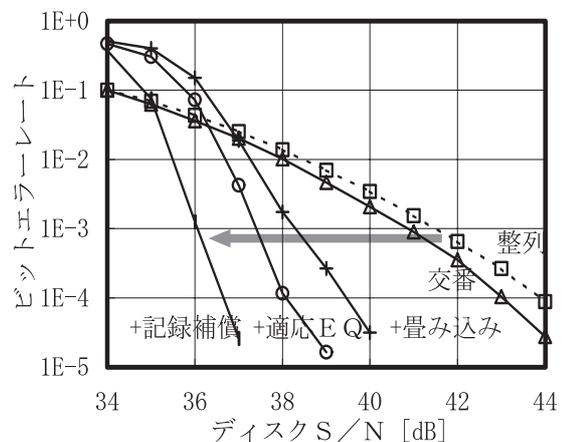


図20 ビットエラーレートの効果

る。1 × 10<sup>-3</sup>のビットエラーレートで評価すると、ピット整列配置を基準にして、次のようなノイズマージンの改善効果がある。

1. 交番方式で0.6dB
2. さらに畳み込みを行うと2.6dB
3. さらに適応イコライザを行うと0.9dB
4. さらに記録補償を行うと1.3dB

そして信号処理技術を全て適用すると、合計で5.4dBの改善効果があることがわかる。

図21から図23に、信号処理技術を全て適用した時のタンジェンシャルチルトマージン、タイミングオフセットマージン、ピット位置ずれマージンを示すが、いずれの場合もマージンの大幅な拡大があった。

このような信号処理技術によって、SCIPER/RPR

方式を用いた高密度光ディスクシステムの実現性を高めることができた。表2にシステムの仕様を示す。

## 6. まとめ

SCIPER/RPR方式で再生専用型光ディスクの高密度化の可能性を検討するため、記録技術として、

1. ピット交番配置
2. 畳み込み符号
3. 記録補償

を、再生技術として

1. 適応イコライザ
2. キャリアキャンセラ
3. ビタビ復号

を開発し、システムのデータ再生性能をコン

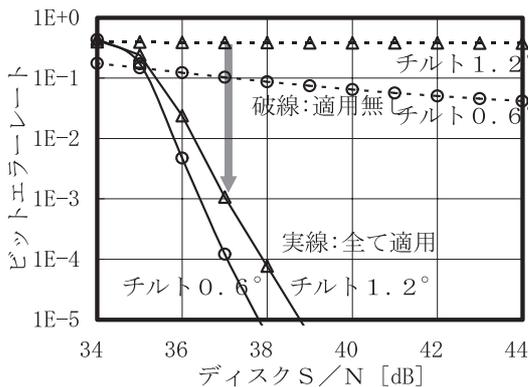


図21 タンジェンシャルチルトマージンの効果

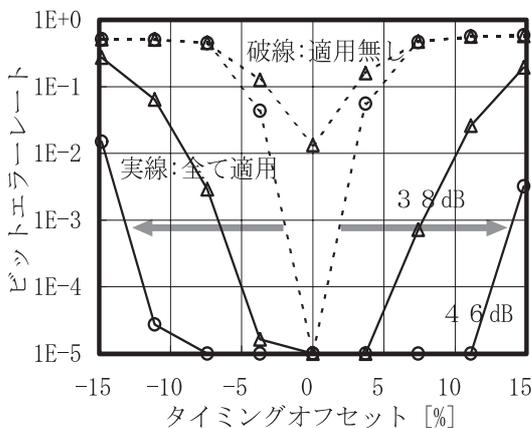


図22 タイミングオフセットマージン

表2 システム使用

レーザー波長	405 [nm]
対物レンズNA	0.6
中心ピット長	0.283 [um]
最短ピット長	0.158 [um]
トラックピッチ	0.29 [um]
記録密度	11.8 [Gb/in <sup>2</sup> ]
記憶容量	15.9 [Gbyte]

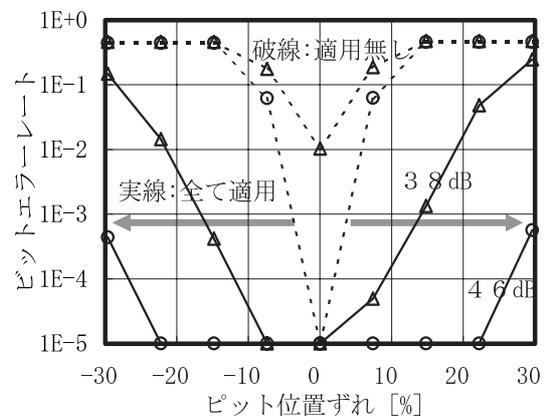


図23 ビット位置ずれマージン

コンピュータシミュレーションにより評価した結果、 $1 \times 10^{-3}$ のビットエラーレートでノイズマージンが5.4dB改善され、タンジェンシャルチルト、タイミングオフセット、ピット位置ずれに対するマージンが拡大することを確認した。

今後は実際にディスクを作成し、再生評価を行う予定である。

本研究は、通産省の資金を基に、(財)光産業技術振興協会が受託したNEDOの平成10年度新規プロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステムの研究開発」に関するものである。

#### 参考文献

- 1) <http://www.nedo.go.jp/itd/newprj/nanometa/nanometa0.html>
- 2) S.Kobayashi et al., "Partial Response Recording in Radial Direction" Optical Data Storage Conference Digest, pp42-43, Apr. 1997

- 3) 金子正彦「高密度光ディスク記録技術」映像情報メディア学会誌 Vol. 53, No. 10, pp1367-1373(1999)
- 4) J.Bibb Cain et al., "Punctured Convolutional Codes of Rate  $(n-1)/n$  and Simplified Maximum Likelihood Decoding" IEEE Trans. Inform.Theory, vol.IT-25, No.1, pp.97-100, Jan. 1979

#### 筆者

後藤 利夫(ごとう としお)

- a. 総合研究所ディスクシステム研究部
- b. 1981年4月
- c. 光ディスクの信号処理回路の開発
- d. 光ディスクの未来はまだまだ薔薇色！？

林 英樹(はやし ひでき)

- a. 総合研究所ディスクシステム研究部
- b. 1982年4月
- c. 光ディスクの信号処理回路の開発
- d. 100ギガバイトを目指して研究中です