

次世代光ディスクシステムの再生マージンシミュレーション

Reproducing Margin Simulation of Next Generation Optical Disk System

柳澤 琢磨, 野本 貴之

Takuma Yanagisawa, Takayuki Nomoto

要 旨 青紫色レーザーと高開口数の対物レンズを用いた次世代光ディスクシステムの再生信号シミュレータを開発した。このシミュレータは信号処理効果も含めたシステムマージンの計算が可能である。これを用いて、次世代の再生専用型光ディスクシステムのマージンシミュレーションを行った。その結果、リミットイコライザを用いることで、記録容量25ギガバイトのシステムが実現可能で、さらに適応型イコライザやクロストークキャンセラまで用いれば、さらなる大容量な光ディスクシステムが実現できる可能性があることが分かった。

Summary We have developed a reproducing signal simulator for a next generation optical disk system with a blue laser and an objective lens whose numerical aperture is large. This simulator can calculate the system margins by applying various signal processing. By using this simulator, we calculated the reproduction margin of a next generation read-only optical disk system. As a result, it was found out that a 25-gigabyte system can be realized by applying the Limit-equalizer, and furthermore, the use of an adaptive equalizer and a crosstalk canceller give the possibility of realization of more large capacity system.

キーワード： スカラー回折 信号処理 システムマージン リミットイコライザ クロストーク キャンセラ

1. まえがき

一般家庭におけるAVシステムの主役がVHSからDVDへ移行しつつあるなか、より高精細なハイビジョン映像を記録再生するための次世代光ディスクシステムの要求が高まってきている。DVDと同じ直径12cmのディスクにデジタルハイビジョン映像を2時間以上記録する為には、約25ギガバイト(以下、GBと略す)の記録容量が必要とされている。

一般的に、光ディスクの記録容量は、記録再生ドライブの光源波長を、対物レンズの開口数

をNAとすると $(NA/\lambda)^2$ に比例する。今年2月、当社を含めSONY、松下電器産業、Philipsなど国内外の9社によって提案されたBlu-ray Discシステムでは、 $\lambda=405\text{nm}$ の青紫色レーザーを用いるとともに、 $NA=0.85$ の対物レンズを用いることで、式(1)に示すようにDVDの約5倍(23.3~27GB)の記録容量を達成しようとしている。

$$\frac{\text{Blu-ray Disc の記録容量}}{\text{DVDの記録容量}} = \frac{(0.85/405)^2}{(0.60/650)^2} \quad (1)$$

しかしながら、この理論は、ディスクとドライブがどちらも理想状態、つまりピックアップ光学系が完全無収差のときにのみ成立するもので、ディスクチルトに代表されるディスク製造公差や、フォーカス目標値ずれなどのドライブ製造公差によってピックアップ光学系に収差が存在する場合には成り立たない。

このため、新しい光ディスクシステムの実現性を、その安定性も含めて総合的に検討するためには、「どの程度の製造公差を含んだディスクを、どのような信号処理を搭載したドライブで再生すれば、どの程度のマージンが確保できるか」というような「システムマージン設計」が重要となってくるのである。

この「システムマージン設計」を実測値のみで行おうとすると、ディスク最適化と同時にドライブ最適化を平行して行う必要があり、非常に膨大な時間と労力を要する。また、時として意図した通りの公差を与えられているかどうかの確認が難しく、測定結果になかなか確信が持てない場合がある。

そこで筆者らは、開発期間の短縮と、実測結果を補強または補間することを目的に、ジッタ値やエラー率を評価関数としてシステムマージンが計算できる光ディスク再生マージンシミュレータを開発した。

このシミュレータの概要とともに、今回、これを用いて、Blu-ray Discシステムに準拠した再生専用型光ディスクシステムのマージンシミュレーションを行ったので、その結果を紹介する。

なお、今回紹介するシミュレーション結果は、Blu-ray Disc規格が正式に提案される前に行ったものであるため、一部のディスクパラメータ（例えばトラックピッチなど）はBlu-ray Disc規格とは異なっている。

2. スカラー回折計算とベクトル回折計算の比較

光ディスクの再生信号を計算するにはディスク上の位相ピットや相変化マークによる回折現象を

扱わねばならない。回折モデルとしては、光の複素振幅のみをフーリエ変換で記述するスカラーモデルと、マクスウェル方程式を光ディスクの境界条件のもとで解くベクトルモデルがある。前者は非常に高速であることから周波数解析など総合的な信号評価に適しており、CDやDVDなど、従来の光ディスクシステム開発にも多用されてきた⁽¹⁾。一方、後者は厳密な電磁波の振る舞いを計算できるため、高い精度を要する計算や偏光特性などを解析評価する場合に用いられている。再生ジッタ値やエラー率などを評価関数とするシステムマージン計算に対しては前者が適しているが、スカラー回折モデルはもともと近似を用いており、対物レンズのNAが非常に大きい場合は、その計算結果はかなり誤差を含むことが指摘されている。しかしながら、このことは「NAが非常に大きい場合は、スカラー回折モデルを適用してはいけない」ということを意味している訳ではない。「何を計算した結果が、どの様に異なるのか」を理解しておけば、スカラー回折モデルを適用できる可能性がある。

そこで、まず筆者らはNA=0.85の対物レンズを用いて、再生専用ディスクを再生した場合に、スカラー回折計算によるアイパターンとベクトル回折計算(境界要素法)によるアイパターンを比較した。ただし、ここでは(2T, 2T)~(8T, 8T)までの単一周期ピット列の再生波形の単純重ね合わせとした。この際、ベクトル回折計算では実際のピックアップ光学系と同様に、円偏光入射+PBS検出とした。

計算パラメータを表1に、計算結果を図1に示す。最短周期信号と最長周期信号の振幅比(12/18)や、そのDCレベル差(アシンメトリ)などは両者ほぼ同じであるものの、全ての周波数にわたってスカラー回折計算の方がベクトル回折計算よりも信号振幅が大き目に計算されていることが分かる。信号振幅が実際よりも大き目に計算されてしまうと、最終的な評価関数であるジッタ値やエラー率を計算する際に、S/Nの違いとして影響してくる。しかしながら幸いなことに、この影響

表1 基本パラメータ

Wavelength	425 nm
NA of an objective lens	0.85
Thickness of a cover layer	0.1 mm
Track pitch	0.340 μ m
Data bit length	0.119 μ m
Recording code	17PP
Capacity	25 Gbytes
Pit width	0.100 μ m
Pit depth	0.064 μ m

は、実際のS/Nと等しくなるように、計算された信号にある定数をかけて一様に振幅を小さくするか、付加するノイズ量を一様に大きくすることで簡単に吸収することができる。

このことからNA=0.85のシステムであっても、一度、S/N値が実測値と同じになるように、信号振幅もしくはノイズ量をキャリブレーションしてしまえば、ジッタ値やエラー率を評価関数とするマージンシミュレーションに対して、スカラー回折モデルを適用できる可能性があることが分かった。ちなみに、このアイパターンを描くための計算時間はスカラー回折計算がわずか数秒であるのに対し、ベクトル回折計算は約15時間かかっている。

3. システムマージンシミュレータの概要

システムマージンを計算するためには、ジッタ

値やエラー率を評価関数とする必要がある。光ディスクシステムの場合、ジッタ値やエラー率を悪化させる要因は、主に図2に示す3項目に分類可能である。

従って、統計的な評価量であるジッタ値、もしくはエラー率を正しく計算するためには、統計的に扱えるように大量のデータを計算するとともに、ノイズはもとよりクロストークと符号間干渉を正確にモデル化することが重要である。

ジッタ値(エラー率)悪化要因

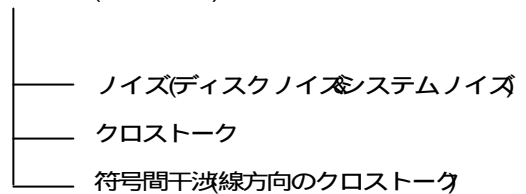


図2 エラー率悪化要因

3.1 ノイズモデル

ノイズを大きく2つに分けると、ディスクの表面粗さや記録ピット形状のバラツキなどによるディスクノイズと、レーザーノイズやアンプノイズに代表されるシステムノイズに分けられる。ともにノイズであるが、前者は再生光学系の伝達関数(Optical Transfer Function: 以下OTFと略す)がかかるた

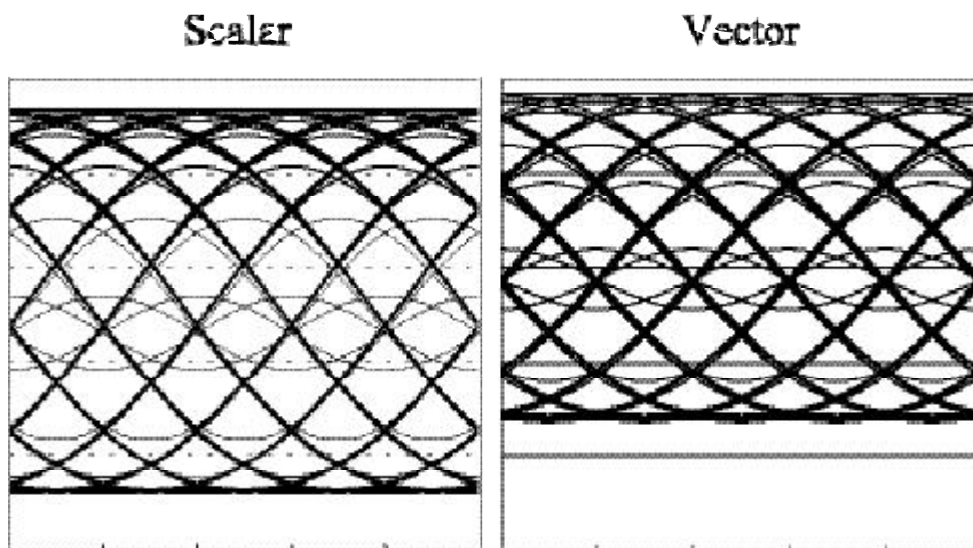


図1 スカラー回折計算とベクトル回折計算のアイパターン

めに高域減衰型のスペクトルを持つのに対し 後者はホワイトノイズである場合が一般的である(図3参照)。OTFがかかる前のディスクノイズのスペクトルについては充分議論されるべきところであるが、ディスク反射膜特性や記録方法などを考えても特定の周波数成分を持つ要素もないことから、今回はホワイトノイズで近似した。振幅分布としては両ノイズともにガウシアン分布と仮定した。

3.2 クロストークと符号間干渉を正しく計算するために

クロストークも符号間干渉も記録ピットに対してビームスポットの方が大きいために複数の記録ピットを同時に再生してしまうことで生じる。これを正確にシミュレートするためには、実際のディスクと同様に2次元的に配置されたピット列にビームスポットを照射したときの回折計算を行う必要がある。逆に言えば、このような回折計算を行うだけでおのずと符号間干渉やクロストークも計算されることになる。この場合、図4に示すように2次元ピット列に周期性を持たせると計算時間を短縮することができる。ただし、周期単位の大きさはビームスポットよりも大きくする必要がある。

以上を踏まえて、実際に作成したシミュレータ

のフローを図5に示す。初めに、記録変調コードに基づいて2次元ランダムピット配列を生成する。これを2次元OTFに通すことで再生信号を得る。同様に、ガウシアンホワイトノイズを2次元OTFに通すことでディスクノイズを生成する。この再生信号とディスクノイズはシステムノイズと足し合わされ、波形等化などの信号処理部に送られる。信号処理部では実際のドライブと同様に、PLL(Phase Locked Loop)をかけながら各種信号処理が施され、最終的にATC(Auto Threshold Control)回路を通した上でジッタ値やエラー率が計算される。

なお次世代システムでは、より大容量かつ安定性の高いシステムが求められていることから、かなり複雑な信号処理が必要となる。これらの信号処理⁽²⁾についての詳しい説明は参考文献に譲るが、システムマージンを考える上で信号処理の効果を無視することはできないので、それぞれの特徴を簡単に記しておく。

3.2.1 従来型イコライザ(Conventional-EQ)

CDやDVDでも用いられている一般的な波形等化方法である。符号間干渉低減効果と伴にS/N改善効果を有するが、S/N改善のためにブースト量を大きくし過ぎると逆に符号間干渉を増加させてしまう。

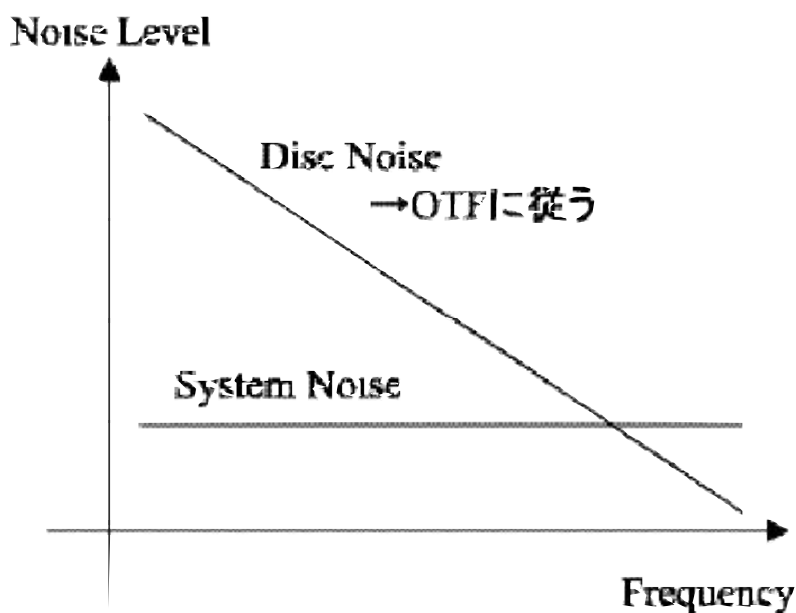


図3 ノイズモデルの説明

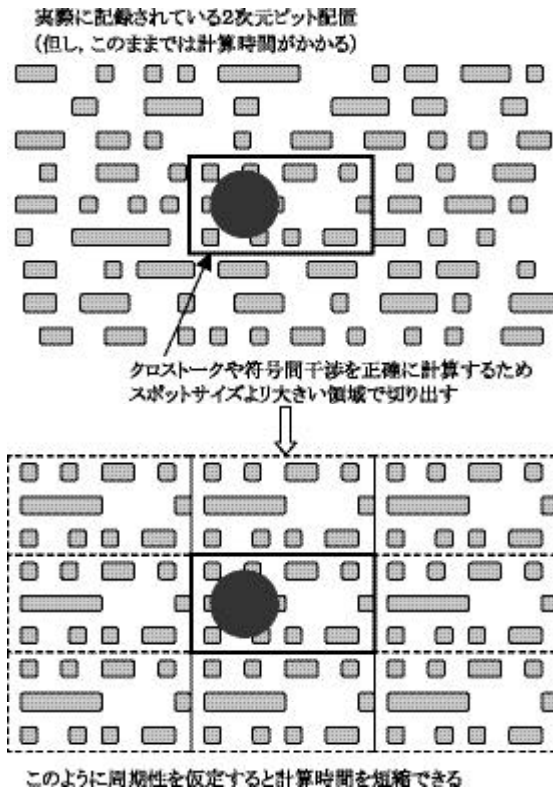


図4 再生信号を計算するための2次元ビット列モデル

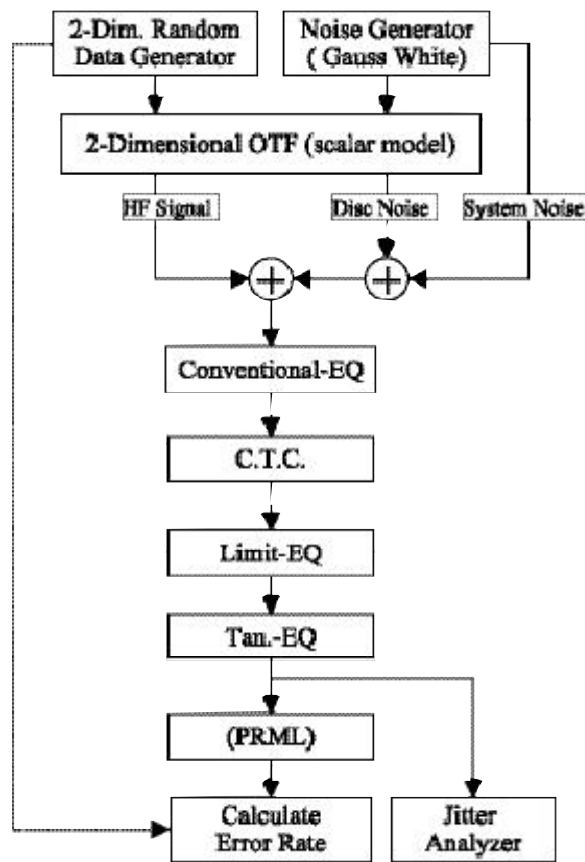


図5 システムマージンシミュレータのフロー

3.2.2 クロストークキャンセラ(C.T.C.)

3ビーム光学系と単純なFIRフィルタで構成される。適応的にフィルタ係数を制御することで半径方向に劣化するような光学的収差に対してマージン拡大効果を有する。

3.2.3 リミットイコライザ(Limit-EQ)

符号間干渉を増加させることなくS/Nを改善できる非線形イコライザ。簡単なFIRフィルタとリミッタで構成される。特にディスクノイズが大きい場合に有効である。

3.2.4 適応型タンジェンシャルイコライザ(Tan-EQ)

単純なFIRフィルタであるが、適応的にフィルタ係数を制御することで線方向に劣化するような光学的収差に対してマージン拡大効果を有する。

3.2.5 Partial Response Maximum Likelihood(PRML)

信号伝送系を既知の伝送特性でモデル化した上で、連続する複数の信号サンプル値のパターンに対して、最も確からしいサンプル系列を選択するデータ復号手法。S/Nが低くてもエラー率の悪化を抑えることが可能。ただし、今回のシミュレーションでは用いていない。

4. 計算値と実測値の比較

本章では計算結果と実測結果を比較する。

4.1 ボトムジッタのトラックピッチ依存性

電子ビーム記録装置で作製した記録容量25GBの再生専用ディスクと、NA=0.85の対物レンズを搭載したピックアップを用いてジッタ値の測定を行い、シミュレータの計算結果と比較した。基本パラメータは表1に示す値と同じであるが、記録容量を25GBに保ったままトラックピッチを0.22~0.30 μm まで変化させている。

結果を図6に示す。計算結果と実測結果が非常に良く一致していることが分かる。トラックピッチ0.26 μm (データビット長0.14 μm)近傍をジッタ最小点として、トラックピッチを狭くするとクロストークが増え、トラックピッチを広くすると(データビット長が小さくなるので)符号間干渉が増える傾向が見てとれる。この傾向が計算と実測で非常に良く一致しているということは、今回開発したシミュレータがクロストークと符号間干渉を正確に再現していることを示している。また同時に、2章で述べたように、NA=0.85のシステムにおいてもスカラー回折モデルが充分適用できることをも示している。

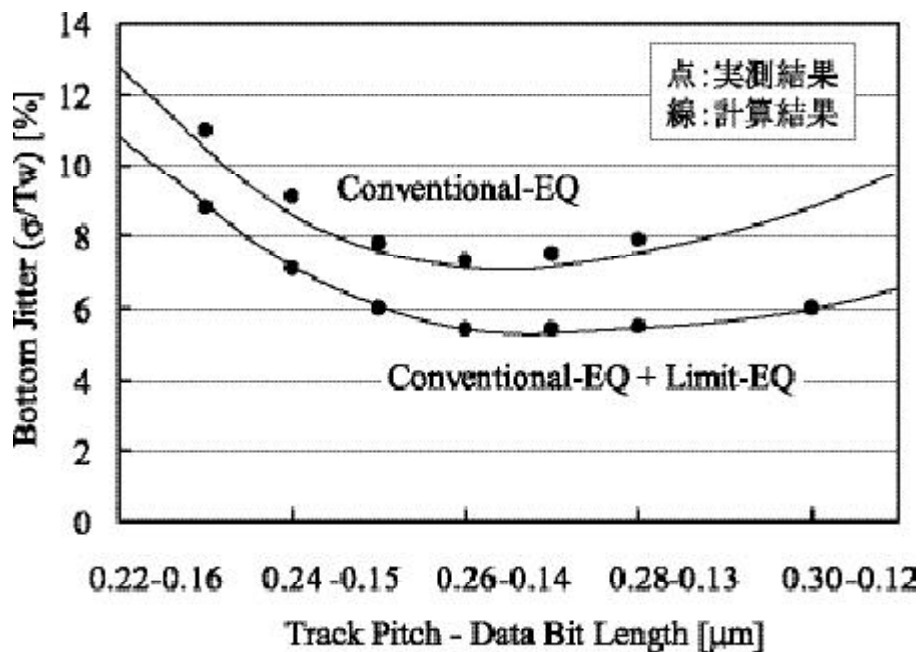


図6 計算値と実測値の比較(ボトムジッタ)

4.2 デフォーカスによるジッタ特性

光ディスク再生光学系の代表的な公差としては、

ディスクの反りやピックアップの取り付け角度誤差などによるチルト公差

ディスク基板もしくはカバー層の厚み公差
フォーカサー系の残差やピックアップ組み立て誤差などによって生じるフォーカス位置公差

などがあり、主に はコマ収差、 は球面収差 また は収差ではないものの収差と同じような光学的な劣化を生じる。

冒頭に述べたBlu-ray Disc 規格では、 のチルト公差に対しては カバー層の厚みを0.1mmとすることで 同じチルト角に対して発生するコマ収差量を小さくし、 のディスクの厚み公差に対しては、カバー層をUV硬化樹脂シートやスピコート法で作製することで 厚み公差自体を小さくするような工夫がされている。しかしながら、 のフォーカス位置公差に対しては ディスク規格としては有効な対応策がなく 記録再生ドライブの信号処理を工夫することで対応することになっている。

そこで、今回はシステム公差として、 の

フォーカス位置公差を例にとり 各種信号処理を用いた場合の再生ジッタ特性を計算と実測で比較した。結果を図7に示す。基本パラメータは表1と同じである。C.T.C.を加えた場合以外は非常に良く一致していることが分かる。C.T.C.を加えた場合においては 実測値の方が計算結果よりも若干ジッタ値が悪くなっているが これはメインビームのサブディテクタへの漏れ込みや、アンプの群遅延特性などが影響していると考えられる。これらは本質的なものではないので、ピックアップの設計によって回避することが可能である。

なお参考として、デフォーカス=±0.3 μmの時のシミュレーションによるアイパターンを図8に示しておく。Conventional-EQのみではアイが開いていないが、Limit-EQを入れることで最短周期振幅が拡大され、さらにTan-EQ およびC.T.C.を入れることでアイが大きく開いていることが確認できる。

またTan-EQとC.T.C.のフィルタタップ係数を用いて、これらの信号処理効果をディスク上の有効スポットとして表現した結果を図9に示す。このような図を用いると 直感的にその効果を確認することができ、実験結果の裏付けにも役立つ。

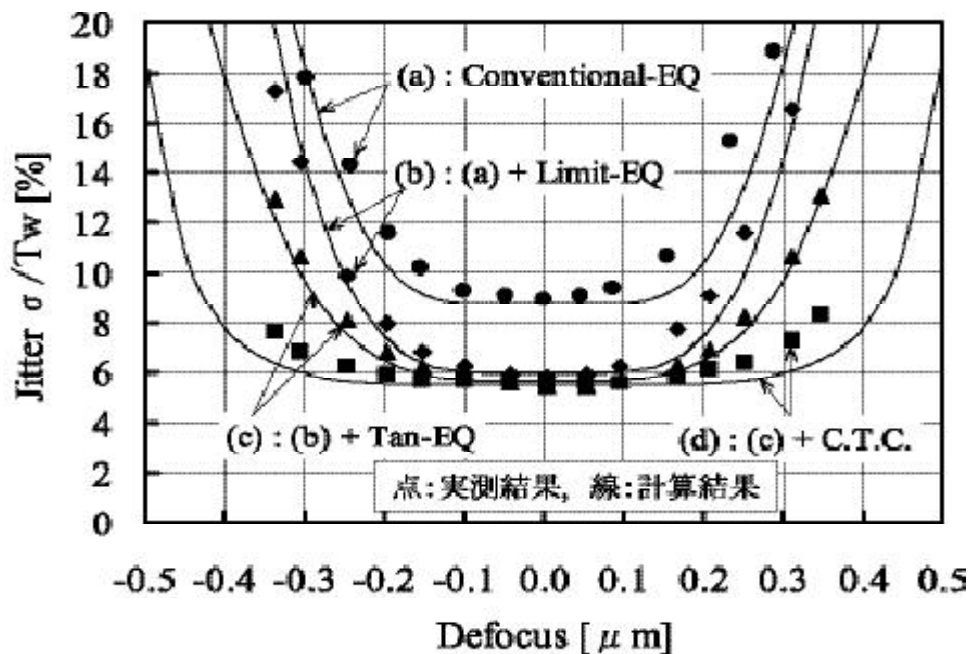


図7 計算値と実測値の比較(デフォーカス特性)

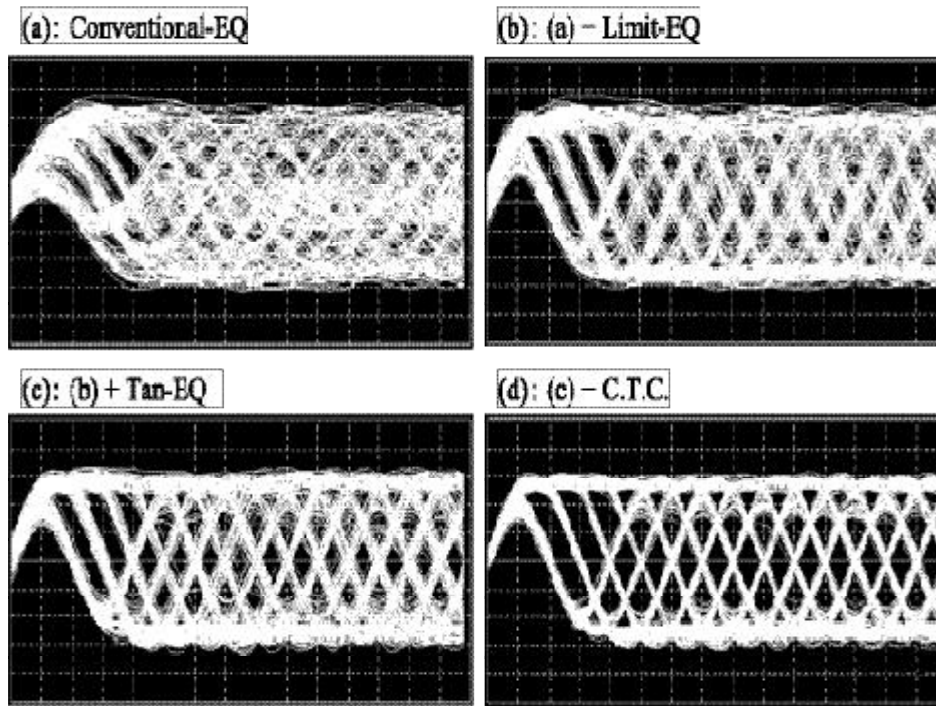


図8 Defocus=0.3 μm の時のアイパターン(計算)

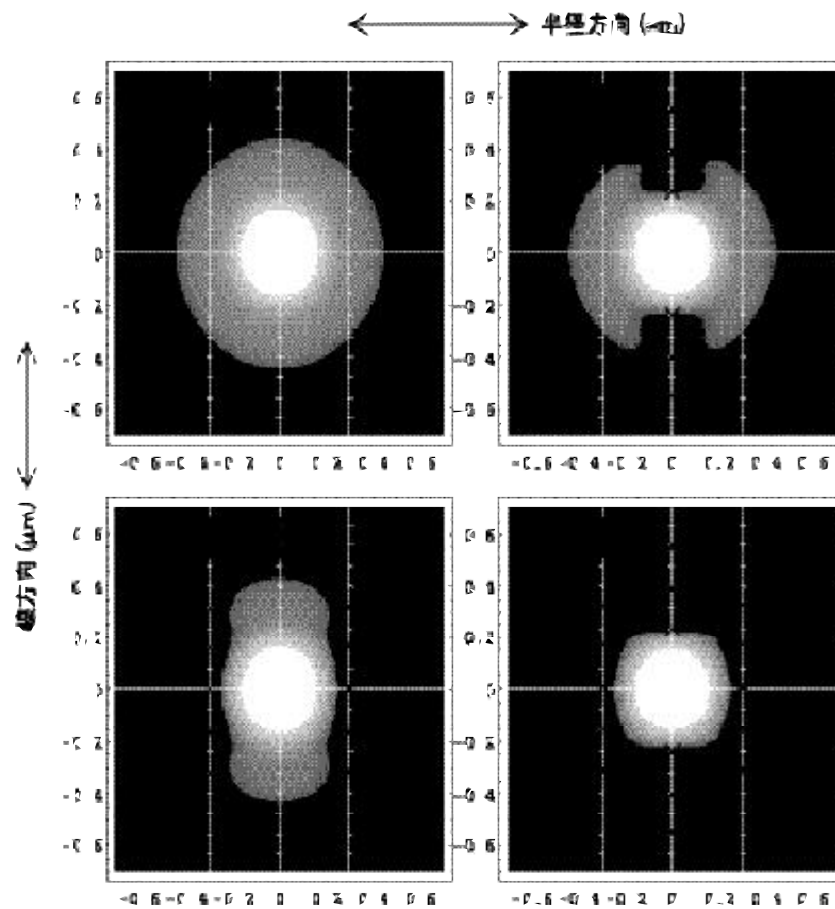


図9 ディスク上の有効ビームスポット(Defocus=0.3 μm の時)
×印はフィルタタップ位置

5. ディスクパラメータ vs デフォーカスマージン

前節までで「信号処理を含めたシステムマージン設計」に対して、本シミュレータが充分有効であることが分かった。そこで、このシミュレータを用いてディスクパラメータの最適化を行った。前節でも述べた通りNA=0.85というシステムではデフォーカスマージン確保が最も厳しくなると予想される為、今回はデフォーカスマージンを評価関数として、トラックピッチとデータビット長の最適化を行った。その際、ジッタ値ではなく、再生限界とより密接な関係があるシンボルエラー

率が $4E-03$ となるデフォーカス量をデフォーカスマージンとして定義した。結果を図10に示す。この図はデフォーカスマージンを等高線表示したもので、図中の太実線は記録容量が25GBになるトラックピッチとデータビット長の組み合わせを、太点線は30GBになる組み合わせを示している。

仮にシステムとして必要なデフォーカスマージンが $\pm 0.3 \mu\text{m}$ とすると、信号処理としてConventional-EQを用いただけでは、記録容量25GBを実現することは難しいが、Limit-EQを用いればトラックピッチを $0.30 \mu\text{m}$ 前後とすることで記録容量25GBが実現できる。さらにTan-EQを用い

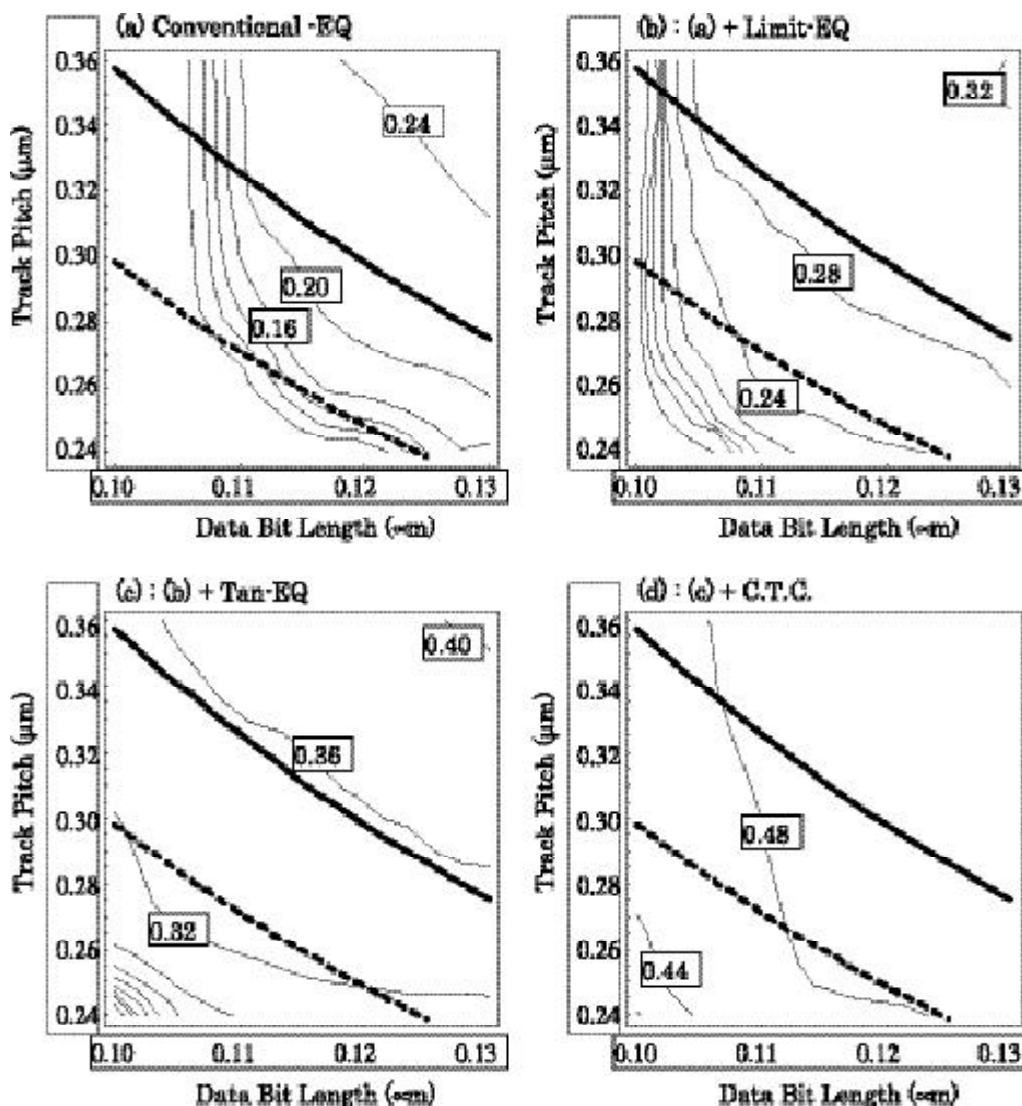


図10 デフォーカスマージンの等高線グラフ(0.04 μm刻み)

太実線は記録容量が25GB、太点線は30GBになる組み合わせを示す

ればトラックピッチ=0.27 μm近傍で30GBが達成でき、C.T.C.まで入れれば、より狭ピッチ側でさらなる大容量な光ディスクシステムが実現できる可能性があることが分かる。

なお、今回は、デフォーカスマージンを評価関数としたが、ディスクチルトやカバー層の厚み誤差、さらにはそれらが同時に存在する場合についてもシミュレーションを行い、システムの安定性を確認している。

6. まとめ

ベクトル計算や実測値との比較を通して、高NAであっても再生マージンの計算に対して、スカラー回折モデルが充分有効であることを確認した。これを踏まえた上で、再生マージンシミュレータを開発し、Blu-ray Discシステムに準拠した再生専用型光ディスクシステムのマージンシミュレーションを行った。その結果、リミットイコライザを用いることで、記録容量25GBのシステムが実現可能で、さらに適応型タンジェンシャルイコライザやクロストークキャンセラまで用いれば、さらなる大容量な光ディスクシステムが実現できる可能性があることが分かった。

なお、今回のシミュレーションではスカラー回折モデルを用いたが、サーボ信号を含めた全てのシミュレーションにスカラー回折モデルが適用できるわけではなく、スカラーとベクトルの両者をうまく使い分けているのが現状である。

昨今、開発期間が急速に短縮され、計算機シミュレーションの必要性が改めて確認されているなか、その目的に合わせて最適な計算モデルを選択することが重要である。

7. 謝辞

本開発にあたり協力して頂いたディスクシステム開発グループの関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) H. H. Hopkins: J. Opt. Soc. Am. 69 (1979) 4.
- 2) F. Yokogawa, S. Miyanabe, M. Ogasawara, H. Kuribayashi, Y. Tomita and K. Yamamoto: Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 819.

筆者

柳澤 琢磨(やなぎさわ たくま)

- a. 研究開発本部総合研究所開発統括部ディスクシステム開発グループ第一開発室
- b. 1991年4月
- c. 光ディスクの高密度化技術開発に従事
- d. 得意分野(技術) 光ディスク信号解析

野本 貴之(のもと たかゆき)

- a. 研究開発本部総合研究所開発統括部ディスクシステム開発グループ第一開発室
- b. 1987年4月
- c. 光ディスク(LD, CD, DVD)システムの開発に従事
- d. 得意分野(技術) 光ディスク信号解析