

## 光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析\*

久保田 重夫

ソニー(株)技術研究所 〒141 東京都品川区北品川 6-7-35

(1983年7月28日受理)

An Analysis of Eye Diagram Phase Jitter  
Caused by Coma in the Optical Disc

Shigeo KUBOTA

Audio/Video Technology Center, Sony Corporation,  
6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141

We have devised a method of analysing eye diagram phase jitter caused by intersymbol interference and coma in the Compact Disc Digital Audio pickup system. The eye diagram of the read-out signal is calculated as a convolution of the line spread function and the input signal which is a random sequence of run-lengths generated on the computer simulating the actual channel bit stream of the Compact Disc system. Jitter values were calculated from phase advance and lag of zero-cross for each transient, and they showed very good agreement with the measured values. Using this method, we have found that when the optical parameters of an aberration-free pickup system are  $NA=0.45$  and  $\lambda=0.78 \mu\text{m}$ , the peak-to-peak value of phase jitter caused by intersymbol interference is 70 ns, and when the disc tilts  $1^\circ$  in the scanning direction, this is increased to 185 ns by the effect of coma.

## 1. はじめに

コンパクトディスク・デジタルオーディオは直径 12 cm で、60 分、2 チャンネルの超 Hi-Fi オーディオプログラムを再生することができる (Fig. 1)。しかし、トラック方向の記録密度がきわめて高いため、符号間干渉の影響を無視することができない。一般に、光ディスクの符号間干渉に基づくアイパターンのジッターを計算する方法を考案したので報告する。

## 2. 変調方式と符号間干渉

解析に取り上げた CD 方式の諸元を Table 1 にまとめた。2 チャンネルのオーディオ信号と訂正符号からなる 2.03 Mb/s のデータビットストリームは、Table 2 に示した変調方式に従って 4.3218 Mb/s のチャンネルビットストリームに変換される<sup>1)</sup>。1 チャンネルビットは 231 ns であるから、線速 1.25 m/s で再生すると、最小反転間隔はディスク上で  $0.87 \mu\text{m}$  である。

一方、スポットサイズの推奨条件は、

$$\lambda/NA \leq 1.75 \mu\text{m} \quad (1)$$

である。 $\lambda$  はレーザー波長で、市販の半導体レーザーとしては  $\lambda=0.78 \mu\text{m}$  のものが安定に供給されている。開口数  $NA=0.45$  の対物レンズを使用すると、スポットサイズは  $1.75 \mu\text{m}$  になる。これは最小反転間隔の 2 倍になるから、いま、スポットの中心がある反転上にあるとすると、スポットの裾が前後の反転にかかることがありうる。このとき、再生信号の反転の位相が前後の反転の影響を受けてジッターが生ずる。この現象を符号間干渉という。

符号間干渉を低減させるには、 $NA$  を 0.45 より大きくしてスポットサイズを  $1.75 \mu\text{m}$  より小さくしていけばよい。しかし、あまり  $NA$  を大きくすると、諸々のパラメータが変動したとき符号間干渉が増加しやすくなる。そこで、符号間干渉に基づくジッターを計算機シミュレーションで求めることができれば、たとえば、いろいろな  $NA$  のもとでジッターを評価関数にして公差解析を行ない、その増加率を比較して最適  $NA$  を決めることなどができるので有用と考える。

## 3. ディスクの傾きにより増加するジッター

Fig. 2 にピックアップ光学系のレイアウトを示した。フォーカス、トラッキングのサーボ信号検出素子は省略

\* 第8回光学シンポジウム (1983年6月20日, 東京) において講演

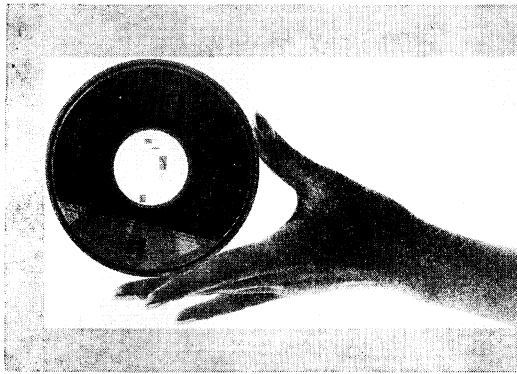


Fig. 1 Compact Disc Digital Audio.

Table 1 Main parameters of Compact Disc Digital Audio system.

Playing time	approx. 60 min
Scanning velocity	1.2-1.4 m/s
Track pitch	1.6 $\mu\text{m}$
Diameter of the disc	120 mm
Thickness of the disc	1.2 mm
Number of channels	2 and/or 4
Sampling frequency	44.1 kHz
Quantization	16 bits linear
Channel bit rate	4.3218 Mb/s
Data bit rate	2.03 Mb/s
Channel modulation code	EFM*
Error correction code	CIRC**

\* eight to fourteen modulation

\*\* cross interleave read-solomon code

Table 2 Eight to fourteen modulation format.

Minimum run length*	3 channel bits
Maximum run length	11 channel bits
Window length	1 channel bit

\* run length=distance between the transients in the signal

してある。レーザー光は厚さ 1.2 mm のディスクを通して集光されるため、ディスクが傾くとコマが生じる。とくにコマフレアの方向がスキャン方向に一致すると符号間干渉が増加する。

Fig. 3~5 は、実験的にディスクをスキャン方向に、おのおの  $0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$  傾けてアイパターンの変化を調べたものである。傾角が大きくなるほどジッターが増加して、反転部分の線幅が広がるのがわかる。

ディスクが傾いたとき発生するコマを定量化するため光線追跡をした。5次までのコマ収差係数を用いて、得られた波面収差のフィッティングを行なった。コマは NA が大きいほど、また傾角が大きくなるに従い増加

する (Fig. 6)。波面収差関数より線像強度分布と OTF を計算した。

Fig. 7 に示すように、非対称収差であるコマの特徴は位相伝達関数 (PTF) に顕著に現われる。PTF は低空間周波数で位相進みを、高空間周波数で位相遅れを示している。これは系の伝達特性に位相歪を伴うことを意味する。位相歪は伝送系が非対称なインパルス応答を有するときに生ずる<sup>2)</sup>。ここで、 $\nu_H$  は最小反転間隔に対応する基本周波数で、 $\nu_L$  は最大反転間隔に対応する基本周波数である。

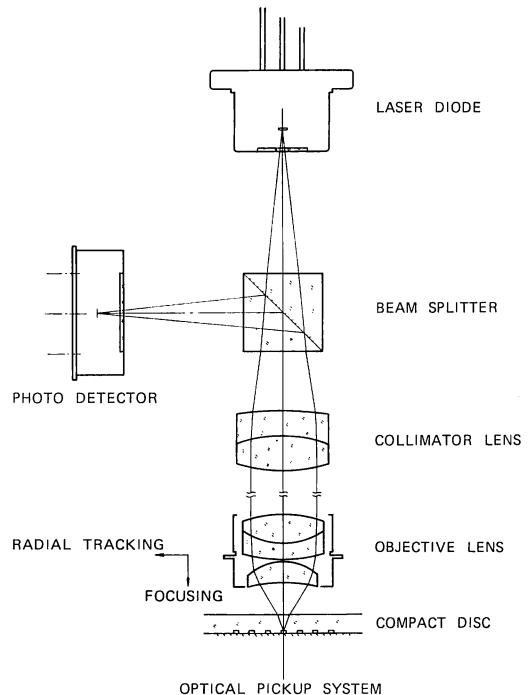
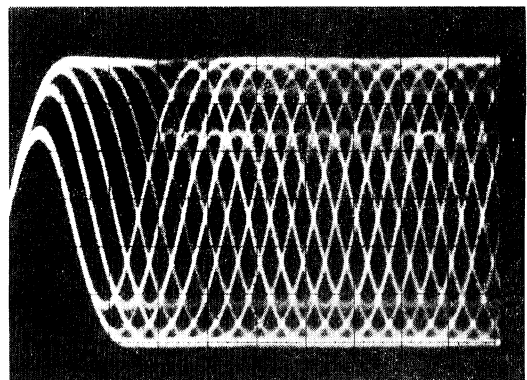


Fig. 2 Optical pickup system configuration.

Fig. 3 Eye diagram when disc tilts  $0^\circ$ .  
 $NA=0.47$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $\lambda=0.78 \mu\text{m}$

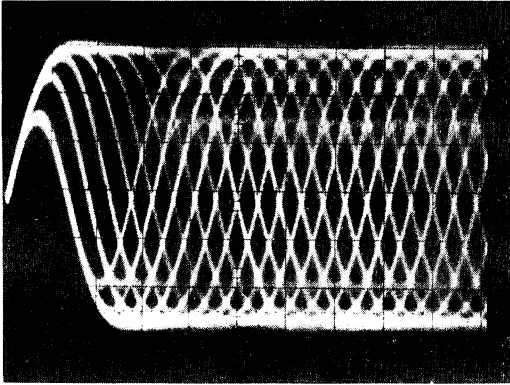


Fig. 4 Eye diagram when disc tilts 0.5°.  $NA=0.47, \theta=0.5^\circ, \lambda=0.78 \mu\text{m}$

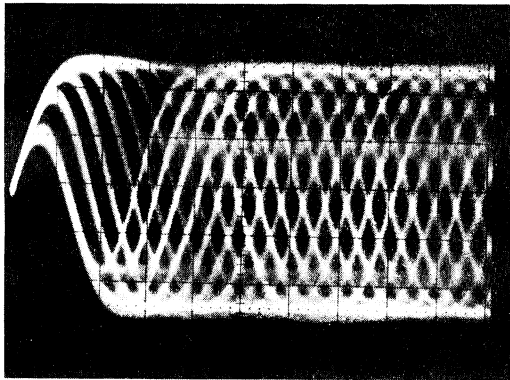


Fig. 5 Eye diagram when disc tilts 1°.  $NA=0.47, \theta=1^\circ, \lambda=0.78 \mu\text{m}$

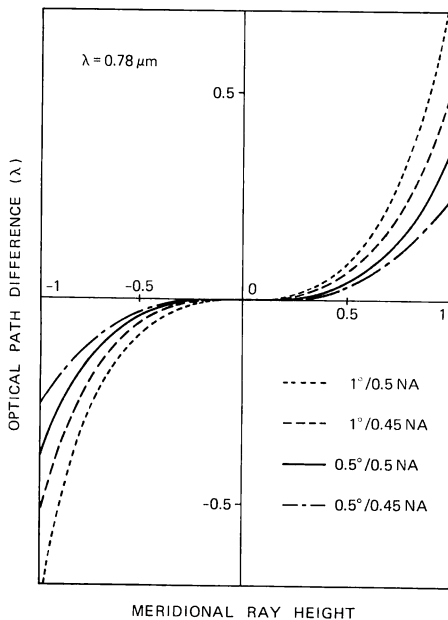


Fig. 6 Coma (OPD) caused by disc tilt.

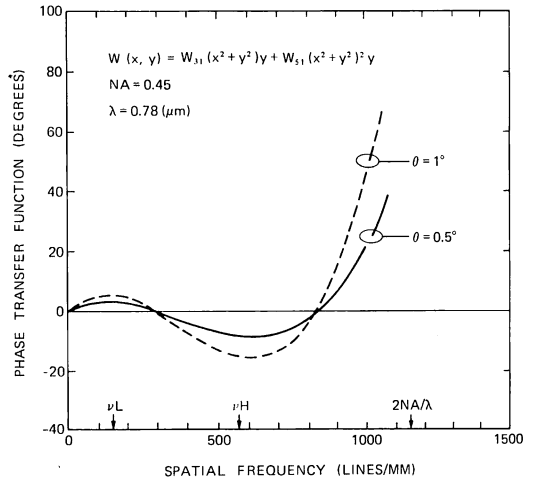


Fig. 7 Phase transfer function. Phase distortion due to coma is shown.

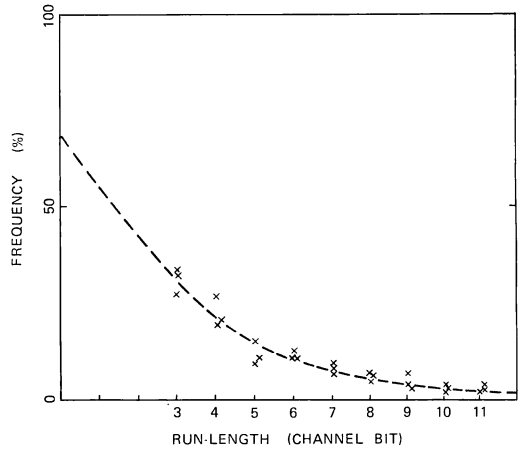


Fig. 8 Typical statistical distribution of run-lengths in the music program.

#### 4. 計算機シミュレーション

アイパターンの符号間干渉に基づくジッターを計算機シミュレーションで統計的に評価した。1,000個の反転をランダムに発生させ入力信号とした。このとき各反転間隔が実際の音楽プログラムにおける生起確率に近い確率で分布するようにした (Fig. 8)。選んだ反転の数はジッターを統計的に評価するのに十分な数である。

系のインパルス応答がスポットの線像強度分布で表わされると仮定した。したがって、再生信号のアイパターンは入力信号と線像強度分布のコンボリューションより以下のように計算される。

まず、反転の座標を  $x = \xi_i, (\xi_0 < \xi_1 < \dots < \xi_N)$  とする

とき、反転間隔  $p_i = \xi_i - \xi_{i-1}$  は 3, 4, 5, ..., 11 のうちの任意の整数値をランダムにとるものとする。ただし、単位はチャンネルビットで、1チャンネルビット =  $0.29 \mu\text{m}$  である。これより入力信号は、

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \xi_{2i-1} < x < \xi_{2i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

で定義される。

スポットの線像強度分布を  $h(x)$  とするとき、再生信号  $f(x)$  は  $g(x)$  と  $h(x)$  のコンボリューションで与えられる。

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi)h(x-\xi)d\xi \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \int_{\xi_{i-1}}^{\xi_{2i}} h(x-\xi)d\xi$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} H(x-\xi_i) \quad (4)$$

ここで  $H(x)$  はナイフエッジエネルギー分布で、線像強度分布  $h(x)$  より

$$H(x) = \int_{-\infty}^x h(\xi)d\xi \quad (5)$$

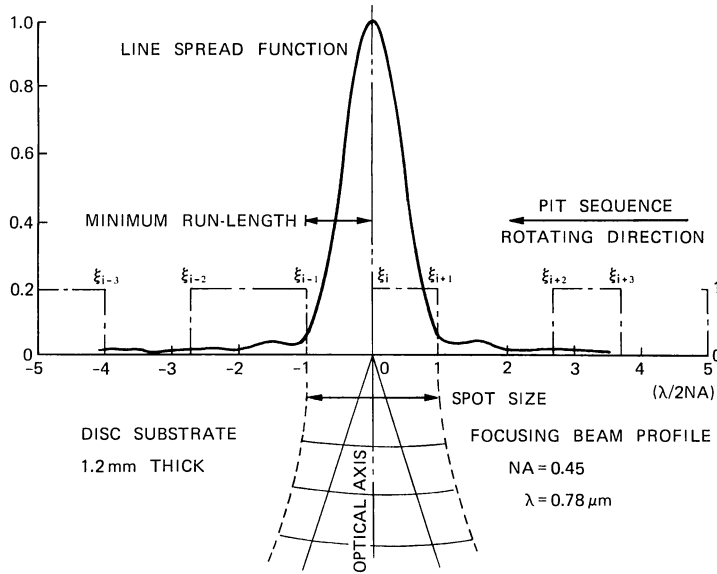


Fig. 9 Line spread function and input random sequence of run-lengths when disc tilts  $0^\circ$ .

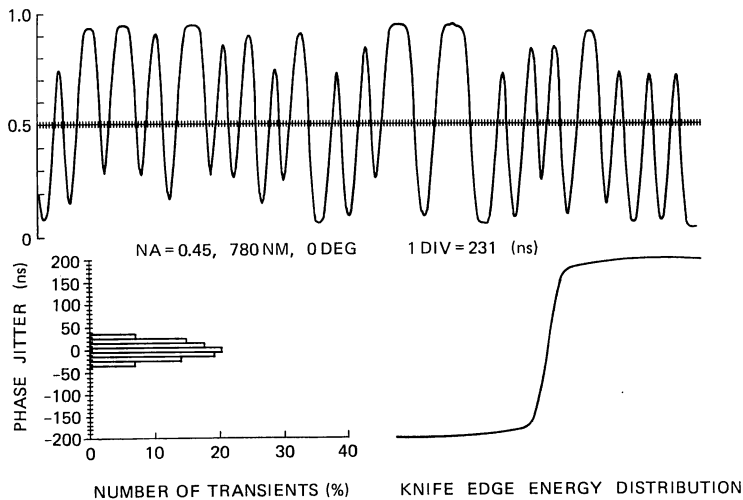


Fig. 10 Simulated eye diagram, jitter histogram and knife edge energy distribution when disc tilts  $0^\circ$ .

で与えられる。

いま、イメージパッチサイズを十分カバーする数を  $2\alpha$  とするとき、級数(4)は  $-\alpha < x - \xi_i < \alpha$  を満たす反転の集合からの寄与の和で打ち切ることができ、この条件を満たす最小の奇数を  $i=2m-2r+1$ , 最大の偶数を  $i=2m$  とするとき、(4)は  $2r$  個の反転からの寄与の和として

$$f(x) = \sum_{i=2m-2r+1}^{2m} (-1)^{i-1} H(x - \xi_i) \quad (6)$$

と書ける。一度ナイフエッジエネルギー分布のテーブルを作成すれば、補間公式を用いて(6)式より再生信号であるアイパターンを迅速に計算することができる。

Fig. 9 に無収差時の線像強度分布と入力信号の関係を示した。横軸の単位は  $\lambda/2NA$  である。この単位を使うと、スポットサイズと最小反転間隔の関係が明瞭である。図でスポット中心は入力信号のある反転上にあり、その裾が先行する反転にかかっている。したがって、再生信号の反転の位相は先行する反転の影響を受け、符号

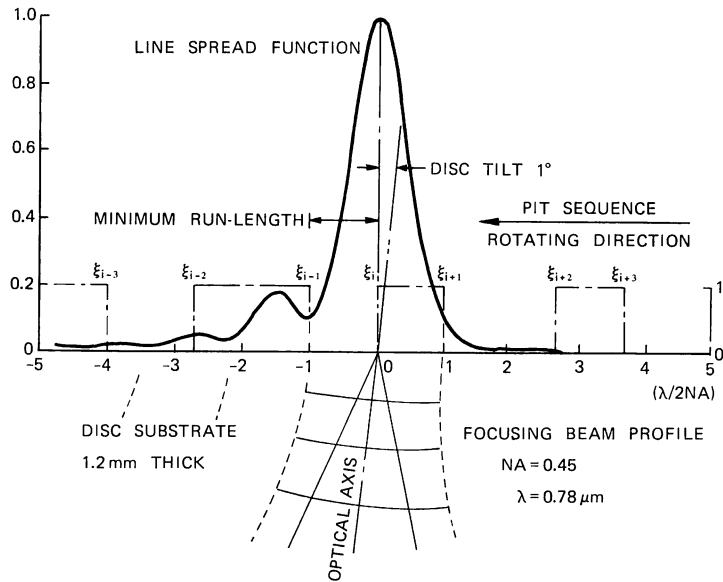


Fig. 11 Line spread function and input random sequence of run-lengths when disc tilts 1°.

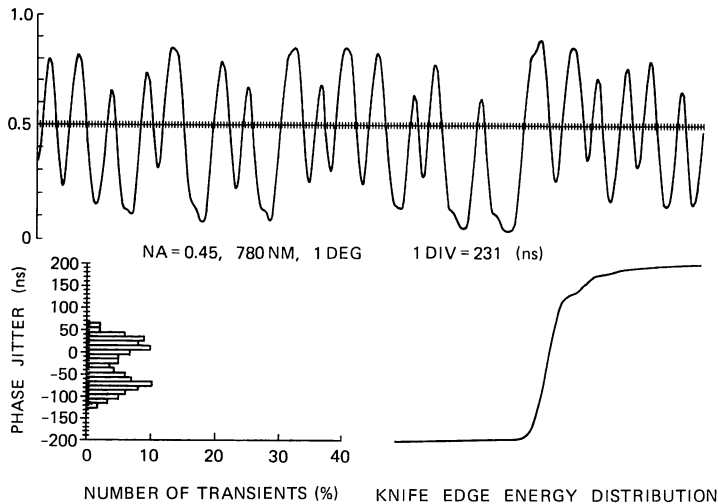


Fig. 12 Simulated eye diagram, jitter histogram and knife edge energy distribution function when disc tilts 1°.

間干渉が発生しているはずである。

**Fig. 10** はシミュレーションで作成されたアイパターンである。各反転のデシジョンレベルとの交点における位相の進み遅れを調べた。ジッターの分布は p-p 値で 70 ns の幅をもっている。これは  $\lambda=0.78 \mu\text{m}$ ,  $NA=0.45$  の無収差光学系の純粋な符号間干渉の効果によるものであり、この光学定数で達成できるジッターの理論限界値である。

次に、ディスクが傾くとコマが発生する。コマが存在すると **Fig. 11** のように線像強度分布はサイドピークをもち、その高さは傾角  $1^\circ$  のとき中心値の 20% になる。この状態ではサイドピークが先行する反転を読むため、再生信号の反転の位相は進み符号間干渉が増加する。

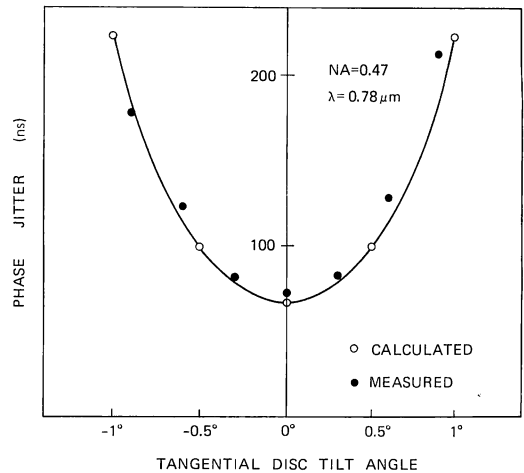
ディスク傾角  $1^\circ$  のとき、ジッター分布の p-p 値は 185 ns に増加する (**Fig. 12**)。

### 5. ジッターの評価試験と考察

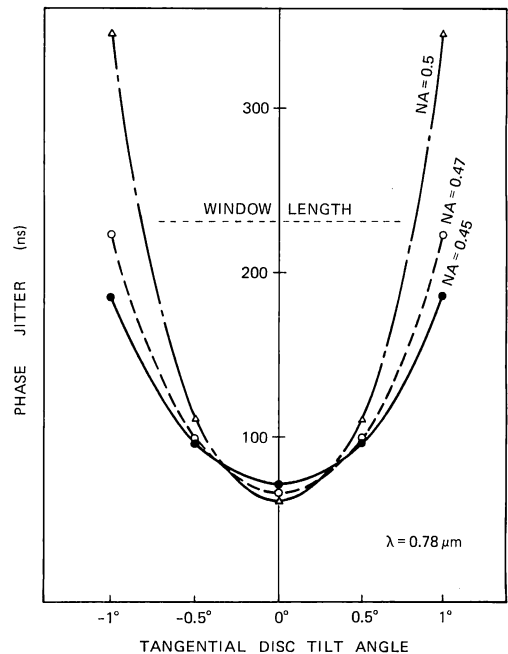
本シミュレーションでは、光ディスクの記録から再生までの過程を一つの伝送路と見たとき、その伝達関数がピックアップ光学系のインコヒーレント照明下の OTF で代表できると仮定した。この方法によれば、partial coherent 理論から導かれる transmission cross coefficient から計算した再生信号に近い結果を得ることができ<sup>3,4)</sup>。とくに、直接入力信号と線像強度分布のコンボリューションを計算するので、CD のチャンネルビットストリームのような非常に長いランダムな時系列を扱うのに有効である。

シミュレーションの妥当性を確認するために、ピックアップ再生信号を波形解析し、ジッターを測定した。用いた波形デジタイザは 200 MHz の帯域をもち、デスクトップ型のコンピュータで制御される。入力信号を 100 ns の間隔で 1 回に 2,000 点ずつサンプリングした。取り込んだ 8 ビットの波形データは制御コンピュータに転送され、補間式を用いて各反転のデシジョンレベルとの交点が計算される。**Fig. 13** は収差の良好に補正された  $\lambda=0.78 \mu\text{m}$ ,  $NA=0.47$  の光学定数をもつピックアップの測定例で、シミュレーション値とよい一致を示した。

本シミュレーションによれば、アイパターンの符号間干渉およびコマによるジッター量を理論的に予測できる。ディスク傾角に対するジッターの増加曲線をいろいろな光学定数に対して計算した (**Fig. 14**)。レーザー波長は  $0.78 \mu\text{m}$  に固定されている。NA を 0.45 より大きくしてスポットサイズを  $1.75 \mu\text{m}$  より小さくしてい



**Fig. 13** Peak-to-Peak phase jitter vs. disc tilt angle in the scanning direction; Calculated and measured values are shown.



**Fig. 14** Peak-to-Peak phase jitter as function of disc tilt angle in the scanning direction for the various parameters.

くと、無収差時の符号間干渉に基づくジッターは低減するが、一方、ディスクが傾いたときのジッターの増加率は高 NA を用いるほど大きくなる。この図をもとにディスクの傾角公差とジッター許容値を考慮して、光学ピックアップの対物レンズの NA をいかに設定したらよいか判断することができる。

## 6. ま と め

コンパクトディスク光学ピックアップのジッター解析結果:

光学定数が  $NA=0.45$ ,  $\lambda=0.78\ \mu\text{m}$  の無収差光学系では, 符号間干渉に基づくジッターは p-p 値で 70 ns である. ディスクが  $1^\circ$  スキャン方向に傾くと, コマの影響によってジッターの p-p 値は 185 ns に増加する.

おわりに, ご指導いただきましたソニー技術研究所宮岡千里所長, オーディオ事業部技術部成瀬庸介課長に感謝いたします. また, 同技術部, 精密機器事業部および

技術研究所の関係諸氏には実験, ディスカッションを通して協力いただきました.

## 文 献

- 1) L. B. Vries, K. A. Immink, J. G. Nijboer, H. Hoeve, T. T. Doi, K. Odaka and H. Ogawa: 67th Convention of Audio Engineering Society, AES, New York, H-8 (1980).
- 2) A. Papoulis: *The Fourier Integral and Its Applications* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1962) Chap. 6.
- 3) H. H. Hopkins: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 1.
- 4) G. Bouwhuis and J. J. M. Braat: Appl. Opt., **17** (1978) 1993.