

研究速報

光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析 IV*

ディスクの厚み誤差に起因する球面収差の影響

久保田重夫・大里 潔・渡辺 俊夫

ソニー(株)ディスク開発部 MIPS 事業本部 〒141 東京都品川区北品川 6-7-35

(1985年1月14日受理)

An Analysis of Eye Diagram Phase Jitter in Optical Disk Systems IV

The Influence of Spherical Aberration Caused by Disk Thickness Error

Shigeo KUBOTA, Kiyoshi OHSATO and Toshio WATANABE

Disc Development Division, MIPS Group, Sony Corporation,
6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141

In optical disk systems, a laser beam focuses on the pits through a transparent substrate. When the beam passes through the substrate, spherical aberration is caused. This aberration is normally compensated for by the under-corrected spherical aberration of the focusing lens but if the thickness of the substrate varies, exact compensation is not possible. We have simulated the phase jitter caused by compact disks with thickness errors, found that phase jitter increases as a quadratic function of thickness error and confirmed that a thickness error of 100 μm is tolerable.

光ディスクでは、透明な基板を通してレーザービームを集光してピットを読みとっているが、基板をビームが通過するとき球面収差が発生する。この球面収差は、ディスクの厚さ t 、屈折率 N と収束光束の開口数 $\sin \alpha$ の関数で、補正過剰の球面収差である。そこであらかじめ、光束を集光するレンズが補正不足の球面収差をもつように設計して、光束が基板を通過したとき収差が打ち消されるようにしている。レンズはディスクの規格の公称値の (t, N) に合わせて設計されるので、 (t, N) が公称値からはずれたときに球面収差の影響が問題になる。

著者らは光ディスクのアイパターンの符号間干渉にもとづくジッターに、コマ・デフォーカス・非点収差などの収差が及ぼす影響について解析・評価をしてきた¹⁻⁴⁾。ジッターはデジタル信号を扱うシステムで、とくに重要な評価量である。今回、コンパクトディスクに厚み誤差があるとき発生する球面収差がジッターに及ぼす影響について、実験とシミュレーションで評価したので報告する。

はじめに、光ディスクで発生する球面収差を解析的に

検討する。開口数 $\sin \alpha$ の収束光束が、厚さ t 、屈折率 N の平行平板を通過するとき生ずる球面収差 (縦収差) は、

$$\delta z = \frac{t}{N} \left[1 - \frac{N \cos \alpha}{\sqrt{N^2 - \sin^2 \alpha}} \right] \quad (1)$$

$$\simeq \frac{t}{2} \frac{N^2 - 1}{N^3} \sin^2 \alpha \quad (2)$$

で与えられる⁵⁾。ここで、 δz の符号は正で補正過剰の球面収差が発生する。(1)式を $\sin \alpha$ について Taylor 展開して $\sin^2 \alpha$ の項で打ち切り 3 次の球面収差式(2)をうる。(2)式を横収差 δy の式にかきかえ、これを積分して波面収差係数を求める⁶⁾。

$$\delta y = \eta^2 \delta z \cdot \eta \sin \alpha = \frac{t}{2} \frac{N^2 - 1}{N^3} \eta^3 \sin^3 \alpha \quad (3)$$

$$w_{40} = \sin \alpha \int_0^1 \delta y d\eta \\ \simeq \frac{t}{8} \cdot \frac{N^2 - 1}{N^3} \sin^4 \alpha \quad (4)$$

ここで、 η は換算瞳座標で、 $0 \leq \eta \leq 1$ である。デフォー

* 前報: 文献 4) 参照

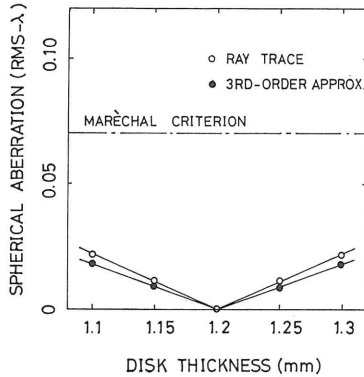


Fig. 1 Root-mean-square wavefront errors of spherical aberrations as a function of disk thickness, as calculated by ray tracing (○) and approximated to third-order aberration (●).

一カスの波面収差係数を w_{20} とする, 最良フォーカス位置は $w_{20} = -w_{40}$ で与えられるが, この像面位置で評価すると球面収差の RMS 波面収差値は,

$$v = 0.0745 |w_{40}| \quad (5)$$

である。

集光レンズは(4)式で求めた光ディスクで発生する球面収差を打ち消すように設計する。公称値: $t = 1.2$ mm, $N = 1.5$ の光ディスクを想定し, これに合わせて開口数 $\sin \alpha = 0.45$ の非球面単玉レンズを設計し, ディスクの厚みを変えて評価した⁷⁾ 結果を **Fig. 1** に示す。RMS 波面収差(○)は設計に用いた公称値の厚み 1.2 mm で極小になり, その前後で公称値との差の絶対値 $|\Delta t|$ に比例して増加する。この増加分は厚み誤差により発生した球面収差による。したがって, (4)の全微分で解析的に評価できる。全微分式は,

$$dw_{40} = \frac{\partial w_{40}}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial w_{40}}{\partial N} \Delta N + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 w_{40}}{\partial N^2} (\Delta N)^2 \quad (6)$$

$$= \frac{1}{8} \cdot \frac{t}{N^3} \sin^4 \alpha \left\{ (N^2 - 1) \frac{\Delta t}{t} - (N^2 - 3) \frac{\Delta N}{N} + (N^2 - 6) \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

となる。

厚み誤差 Δt により生ずる球面収差を(7)式より評価し, RMS 波面収差に換算して **Fig. 1** 上にプロットした(●)。 $|\Delta t| = 0.1$ mm に対して RMS 波面収差は $v = 0.018\lambda$ ($\lambda = 780$ nm) である。一方, 光線追跡より求めた RMS 波面収差は $|\Delta t| = 0.1$ mm に対して $v = 0.021\lambda$ で, 3次収差近似に比べて約 15% 大きい。この差は高次収差の寄与によるものである。一方, 開口数 $\sin \alpha = 0.5$ の場合の RMS 波面収差を(7)式を用いて 3次収

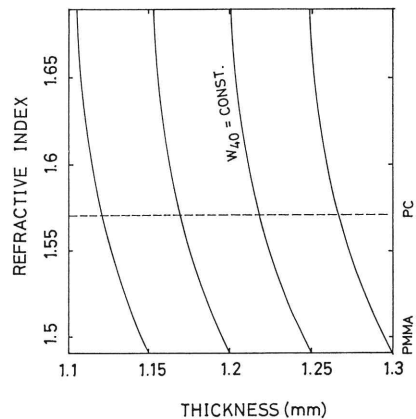


Fig. 2 Constant spherical aberration curves as a function of disk thickness and refractive index.

Table 1 Spherical aberration caused by disk thickness error.

	$\sin \alpha$	Δt (mm)	rms wavefront error (λ)
3 rd order approx.	0.45	0.1	0.018
Ray tracing	0.45	0.1	0.021
3 rd order approx.	0.5	0.1	0.027

差近似で評価すると, $|\Delta t| = 0.1$ mm に対して $v = 0.027\lambda$ となり, $\sin \alpha = 0.45$ の場合に比べて約 50% 増加する (**Table 1**)。したがって, 開口数の大きい対物レンズを使うシステムほど, ディスクの厚み誤差を厳しく管理する必要がある。

屈折率変化 ΔN による球面収差の増加分も(7)式により評価できる。しかし, **Fig. 1** で球面収差を極小にするディスク厚が, 材質の屈折率の変更により, 設計に用いた公称値の厚さよりどの程度動くか興味がある。そこで見方をやや変えて, (7)式より $dw_{40} = 0$ するための $(\Delta t, \Delta N)$ の間の関係式, すなわち, 球面収差の不変式を検討する。

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{N^2 - 3}{N^2 - 1} \frac{\Delta N}{N} - \frac{N^2 - 6}{N^2 - 1} \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \quad (8)$$

(8)式は集光レンズの開口数によらず成り立つ。(8)式を積分して得られる等収差曲線を (t, N) 平面上にプロットする (**Fig. 2**)。 (8)式の右辺の第一項の係数は $1 \leq N \leq 1.73$ の範囲で負であるから, ディスク基板材料をこの範囲でやや高い屈折率をもつものに変更するときは, 基板の厚さをやや薄くして球面収差の増加分を補償することが望ましい。しかし, たとえば材料を poly-methyl methacrylate (PMMA) から polycarbonate (PC) に変更する場合を考えると, 屈折率差は $\Delta N =$

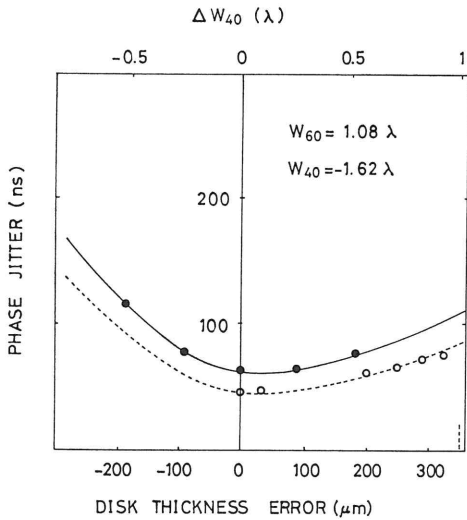


Fig. 3 Calculated eye diagram phase jitter (●) and measured jitter (○) as a function of disk thickness.

1.57-1.49=0.08 になり、補償すべき厚さは $\Delta t=0.03$ mm 程度であるから、もし集光レンズの開口数が $\sin \alpha = 0.45$ 付近であれば、とくに補償の必要はない。

ここまで光ディスクの厚み誤差により発生する球面収差を解析的に検討し、RMS 波面収差を用いて評価してきた。コンパクトディスクの規格になっている厚み公差 $|\Delta t|=0.1$ mm に対して、球面収差は $v=0.018\lambda$ だけ増加することがわかった。この収差が実際のコンパクトディスクのピット再生信号にどのように影響するかについて定量的な評価結果は報告されていない。そこでディスクの厚み誤差によるアイパターンのジッターの増加を測定し、規格の意味を確認した。評価プレーヤーは前回の報告(光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析 II)³⁾ に用いたものと同一である。符号間干渉にもとづくジッターはディスクのピットの成形性にも依存するので、できれば同一ディスクの同一個所で測定したい。そこで、集光レンズ ($NA=0.47$) とディスクの間に一定の厚さの平行平板ガラスを挿入し、等価的にディスク基板の厚さを変えた。挿入したガラス板の厚さは $17 \pm 2 \mu\text{m}$ 、平行度は $5''$ 以内であった。材質は硼硅酸ガラス(商品名 Tempax, Schott 社)で、使用光源波長 784 nm で $N=1.4667$ である。(7)式よりガラス板1枚につき発生する球面収差は $\Delta w_{40}=0.048\lambda$ になる。さらに、厚さ 200, 250, 290, $325 \mu\text{m}$ の BK₇ ($N=$

1.5106) の平行平板ガラスを挿入して球面収差を発生させた。ジッターの測定値(●)は光学系に残留する高次の球面収差の影響で、 $\Delta w_{40}=0$ の前後で非対称になると考えられる (Fig. 3)。評価光学系の残留収差は $0.024 \text{ RMS}\lambda$ であるが、これが primary と secondary の球面収差よりなり、かつ、両者の配分が RMS 波面収差を極小にしていると仮定した。このとき、 $w_{60}=1.08\lambda$ 、 $w_{40}=-1.62\lambda$ 、 $w_{20}=0.65\lambda$ となる。これに、(7)の評価式を用いて求めたディスク厚み誤差による球面収差の増加分 Δw_{40} を付加してジッターを計算した、ただし、各点でジッターが最小になるようにデフォーカス w_{20} を調整した。ジッターのディスク厚み誤差による増加量に関して、測定値と計算値はよく一致している。厚み誤差 $100 \mu\text{m}$ に対するジッターの増加量は 20 ns 以下である。これはコンパクトディスクのジッターマージン (230 ns) に比べ、十分小さいといえる。

ジッターは、i) 無収差光学系でも発生する符号間干渉にもとづくジッター: J_0 と、ii) 収差の摂動により生ずる増加分: J_1 に分類できる。

$$J = J_0 + J_1 \quad (9)$$

コマ・デフォーカス等の収差の摂動によるジッターの増加量 J_1 は、波面収差係数の二次形式で近似できることを前回報告した³⁾。今回さらに、球面収差の摂動に対しても、ジッターの増加分 J_1 は波面収差係数の二次形式で近似できることが確認できた。これ迄得られたデータをもとに、次回の報告にて、光ディスクにおけるアイパターンの収差の摂動によるジッターの増加について総合的な体系づけを行ないたい。

おわりにあたり、本研究の機会を与えていただきましたソニー(株) MIPS 事業本部宮岡千里事業本部長と、ご指導賜りました東京大学生産技術研究所小倉磐夫教授に感謝いたします。

文 献

- 1) S. Kubota: CLEO '82, FU-5 (Phoenix, Arizona, 1982).
- 2) 久保田重夫: 光学, **12** (1983) 437.
- 3) 久保田重夫, 岡美智雄, 大里 潔: 光学, **14** (1985) 137.
- 4) 久保田重夫, 佐藤邦宏, 福本 敦: 光学, **14** (1985) 140.
- 5) W. J. Smith: *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1966) Chap. 4.8.
- 6) 草川 徹: レンズ設計のための波面光学 (東海大出版会, 1976) pp. 9, 27.
- 7) Optical Research Associates: CODE V, Pasadena, California, U. S. A.