



光ビデオディスクにおける光学系の許容収差量の検討

有本 昭*・尾島 正啓*・後藤 敏彦**

* (株) 日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

** (株) 日立製作所家電研究所 〒244 横浜市戸塚区吉田町 292

(1983年7月13日受理)

Wave Front Aberration Tolerance in an Optical Video-disc System

Akira ARIMOTO,* Masahiro OJIMA* and Toshihiko GOTO**

*Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,

1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

**Consumer Products Research Center, Hitachi Ltd.,

292, Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244

Wave front aberration tolerance of an optical video-disc system employing a diode laser is determined experimentally. Lens aberration is checked by Twyman-Green interferometer. Signals obtained from the video-disc are checked with these lenses. It is shown that wave front aberration must be kept to less than λ (wavelength)/10 to insure satisfactory performance.

1. はじめに

光ディスクの用途は業務用、家庭用と多岐に及び、各用途に対する開発が盛んに行なわれている。

光ディスクでは、高密度の情報記録、および再生を行なうため、 $NA=0.4\sim 0.5$ 前後の回折限界にまで収差を除去したレンズを用いて、微小光スポットを得ている。この微小光スポットを用いて情報の再生を行なうわけであるが、光学系の収差量と信号との関係は、Hopkins¹⁾による理論式の導出および計算、山本²⁾らによる計算がすでに行なわれている。しかし、実験との対応はつけられていない。

本報告は、主として実験によって、レンズを含めた光学系の残存収差量と位相型情報の記録をしている光学系ビデオディスクから得られる信号変調度との関係を追求したものである。この検討結果をもとに残存許容収差量についても議論する。

2. ビデオディスクの光学系

すでに市販されている気体レーザーを用いたビデオディスクと、今後開発が盛んになると思われる半導体レーザ

を用いたビデオディスクの光学系は若干構成が異なるが本質的には同じである。半導体レーザーを用いたビデオディスク光学系の基本構成を Fig. 1 に示す。

半導体レーザーから射出したレーザー光は、光学系を通った後、 $NA=0.4\sim 0.55$ の開口数を有する対物レンズを通してディスク上に微小に絞り込まれる。無収差の状態では、絞り込みスポットの直径は、波長を λ とすると

$$\lambda/NA \quad (1)$$

である (付録1参照)。ディスクにはピットとよばれる情報を含んだ穴が並んでおり、その情報を反射光のなかには含ませ、光検出器によって取り出す。この光学系のなかでディスク上に微小スポットを作り出すのに必要な対物レンズが、設計、製作上最もむずかしいといわれている。

気体レーザー (He-Ne レーザ, $\lambda=633$ nm) を用いた装置では $NA=0.4\sim 0.45$, 780 nm の波長の半導体レーザーを用いた装置では、 $NA=0.45\sim 0.55$ の値が必要である。

当然 NA が大きい半導体レーザー用の対物レンズのほうが収差除去がむずかしくなる。この収差除去の程度が、装置の S/N を左右するといっても過言ではない。

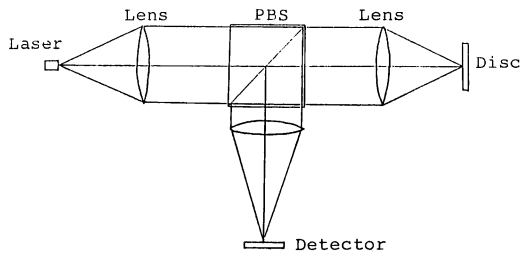


Fig. 1 Optical video disc system, using diode laser.

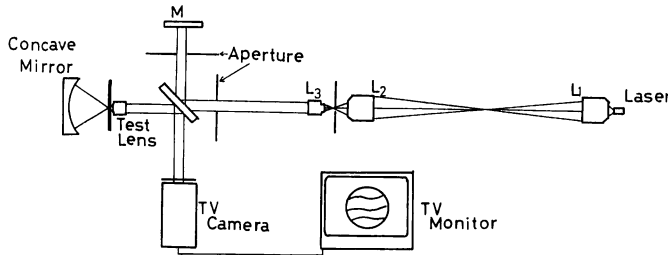


Fig. 2 Twyman Green interferometer for evaluation of the video disc lens. This interferometer uses visible diode laser whose wavelength is 780 nm. Interference patterns are monitored on TV.

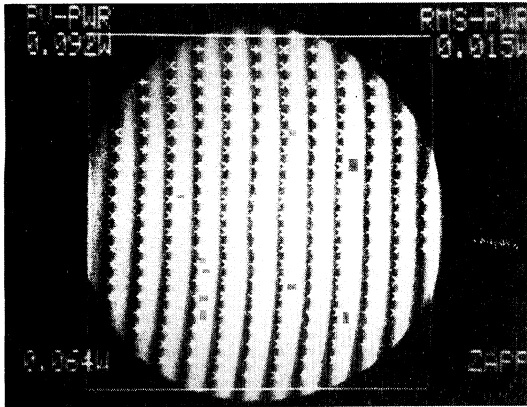


Fig. 3 Surface error of concave mirror in the Twyman Green interferometer.

本論文は、光学系の収差量（主として対物レンズの収差）とビデオディスク盤から得られる信号変調度との関係を定量化することを目的とする。なお、ここでは半導体レーザを用いることを前提とする。

3. ビデオディスク用対物レンズの波面収差測定

対物レンズ収差の測定には、半導体レーザを光源とした、トワイマン-グリーン干渉計を用いた。干渉計の構成を Fig. 2 に示す。

実際の装置に用いる半導体レーザを用いることによって色収差の影響を除去できる。

レンズの測定を行なう前に、干渉計自体の精度と基準凹面鏡の精度を測定した。干渉計はレンズの代りに平面鏡を配置したもので測定し、 $\lambda/15$ 以内に収差が抑えられていることを確認した。また凹面鏡も別途 He-Ne レーザを用いた市販の干渉計を用いて測定したところ p-p 値で $1/11$ 波長 (He-Ne レーザ) であることを確認した (Fig. 3)。これは 780 nm の波長に直すと、約 $\lambda/15$ になる。したがって、本干渉計自体の精度も $\lambda/10$ 以内であると推定した。

$NA=0.5$ 、焦点距離 $f=4.5$ mm の仕様で製作したレンズの波面収差干渉図形の例を Fig. 4 に示す。(a)から(e)になるにつれて収差量が増加している。同一の仕様で作られたレンズであるため、この結果はレンズの差は設計上よりも製作上のばらつきによって発生していると結論づけられる。とくに(d)の図形からは偏芯コマと考えられる干渉図形が得られた。

4. 波面収差量とビデオディスク信号変調度との関係

3章でレンズの波面収差を測定した結果 $<\lambda/1.5$ の範囲内で、収差が大きくばらついていることがわかった。これらのレンズを用いて、ディスクから得られる信号変調度を測定し、許容波面収差量の限界を求めた。

測定光学系を Fig. 5 に示す。

レーザピックアップから平行光束をだし、被検対物レンズを通過させ、ディスク盤(片)に集光させる。ディスク盤は焦点面内で、ボイスコイルによってトラック方向に微小振動させる。変調信号を含んだ反射光はレーザピックアップの光検出器によって読みとられ、電気回路を通してシンクロスコープ上に表示される。その値をもって信号変調度を測算する。変調度の定義は、ディスクのピットのないミラー部からの反射光信号を1としたときの、変調信号の p-p 値をもって表わした。使用したディスク盤(片)は、市販のビデオディスク盤の外周部のキャリア信号(約 8 MHz)の記録されている部分を用いた。

Fig. 6 に信号変調度と波面収差量との関係を示す。ただし測定系の精度から $\lambda/10$ 以内の値は参考値として考える。

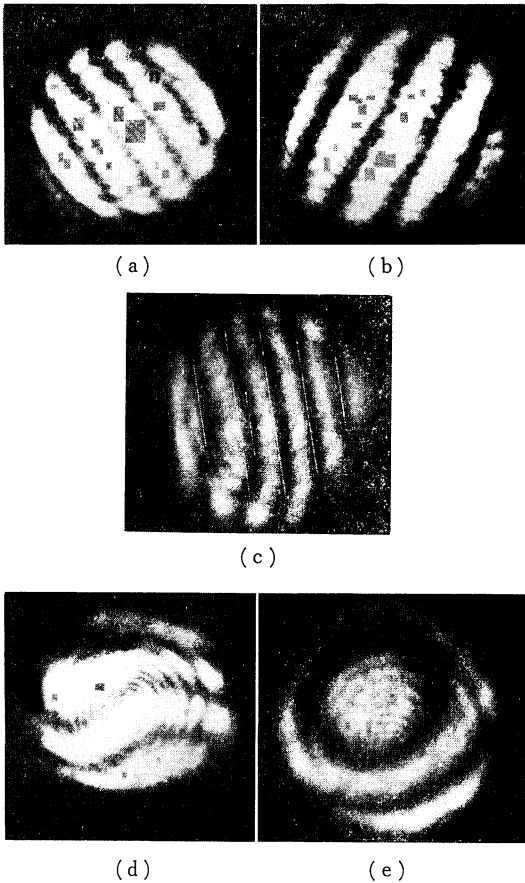


Fig. 4 Interference patterns of the lens aberration. The wave front aberrations are (a) $\lambda/27$, (b) $\lambda/18$, (c) $\lambda/6$, (d) $\lambda/4$ and (e) $\lambda/1.5$.

収差量が $\lambda/10$ 以内に抑えられている良好に収差が除去されているレンズでは信号変調度が 0.6~0.7 と得られているのに対して $\lambda/2 \sim \lambda/1.5$ では、約 0.4 と半減しているのがわかる。信号変調度が半分ということは dB 表示の S/N 比では 6 dB の差となってあらわれてくる光学系の収差による S/N の低下を 1 dB 以内に抑えるには回折限界の一応の目安とされる Rayleigh の基準 $\lambda/4$ では不十分であることを **Fig. 6** は示している。

5. 非点収差の影響

4章で検討した収差は、球面収差、コマ収差等が複雑に混じり合ったいわゆる複合収差であったが、この章では、とくに非点収差のみの影響を調べることにする。その理由として、半導体レーザー自体が非点収差を有していることはよく知られた事実³⁾であり、他の光学素子が無

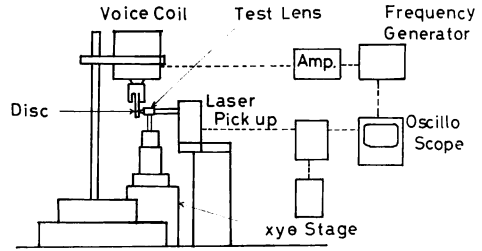


Fig. 5 Schematic diagram for estimation of the signal modulations obtained from the video disc. The disc plate vibrates in the focal plane of the lens. Signal are obtained by the laser pick up.

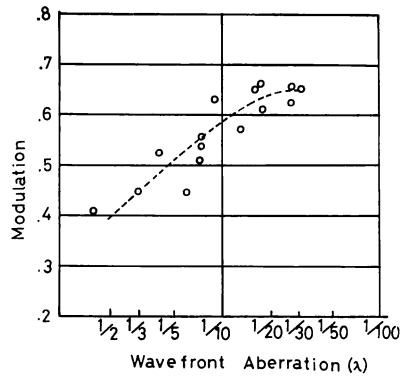


Fig. 6 Relation between the signal modulations of the video disc and the wave front aberrations.

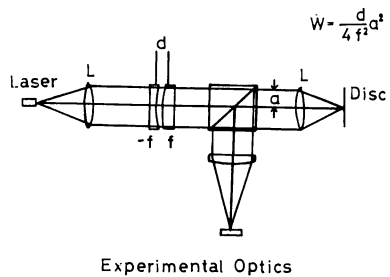


Fig. 7 Schematic optics to generate the astigmatic aberration in the video disc laser pick up.

収差であるとしても、その影響が現われるおそれがあるためである。測定光学系としては **Fig. 7** のような光学系を用いた。

非点収差を任意量発生させるために、非点収差量の異なるレーザーを用いる代わりに、光路中にシリンドリカルレンズ2個を配置し、その間隔を変えるという方法を用いた。2個のシリンドリカルレンズの焦点距離を $+f$ 、 $-$

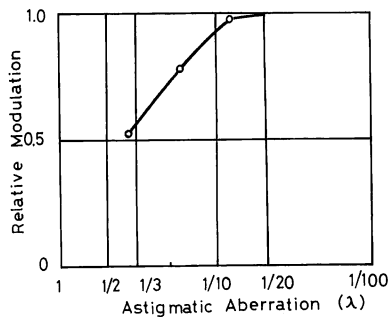


Fig. 8 Relative modulation vs. astigmatic aberrations. Aberration-free case is normalized to 1.

f , 光束半径 a , レンズ間隔を d とすると非点収差による波面収差の絶対値は

$$W = \frac{1}{4} \left(\frac{a}{f} \right)^2 d \quad (2)$$

で与えられる(付録2参照). ここで間隔を変えたときの変調度を測定し, 波面収差との関係を調べた. その結果を Fig. 8 に示す.

無収差の場合との対応をつけるために, 無収差の変調度 M_0 と実際の収差のある場合の変調度 M との比

$$M_c = \frac{M}{M_0} \quad (3)$$

を相対変調度として定義した. 今回の場合 $M_0 = 0.65$ である. この結果も, 無収差の場合とはほぼ同じ変調度を得るには波面収差の許容値は $\lambda/10$ 以内であることを示している. 半導体レーザーの非点隔差 Δz と, 波面収差 W との関係は, カップリングレンズの NA に依存し

$$W = \frac{(NA)^2}{4} \Delta z \quad (4)$$

で与えられるので³⁾, $NA = 0.15$ のレンズを用いたときは

$$\Delta z \leq 14\lambda \approx 11 \mu\text{m} \quad (5)$$

以内が必要であることを示している.

6. 計算との対応

前章までは, 主として実験的に波面収差量と信号変調度との関係を調べてきた. 本章では計算との対応をつける. 計算は Hopkins によって提案された手法を採用し, ピット深さ $0.63/4 \mu\text{m}$, ピット幅 $0.4 \mu\text{m}$ で外周部における 8 MHz の信号に相当するピット長さをを用いた.

収差としては, 3次球面収差, 像点移動, 非点収差の三つを計算した. 横軸に波面収差, 縦軸に信号変調度を

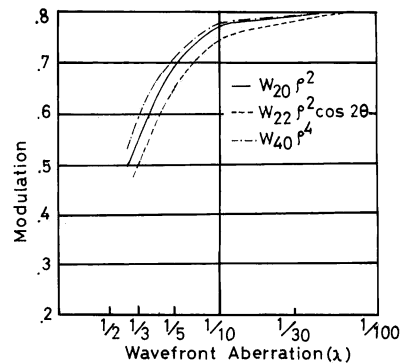


Fig. 9 Calculations of the signal modulations, using mathematical method proposed by H. H. Hopkins.

とったときの関係を Fig. 9 に示す.

この計算においても, 1 dB 以内の信号変調度の低下に抑えるのには, $\lambda/10$ 以内に収差を抑える必要のあることを示している.

7. おわりに

光ビデオディスクにおける光学系の収差量と, そのときの信号変調度との関係を実験によって調べ, かつ理論計算との対応をつけた. その結果, 信号変調度の低下を無収差の場合とくらべ, 1 dB 以内に抑えるのには, 波面収差の p-p 値で $\lambda/10$ 以内に収差を除去する必要があることがわかった.

本研究の推進にあたり, 日頃ご指導をいただく東京大学生産技術研究所小倉啓夫教授に感謝いたします.

付 録

(1) 絞込みスポット径について

光を絞り込んだときのスポット径の定義は光学系の瞳における光束の強度分布によってさまざまであるが, 円形の瞳に一樣な強度分布の光束が入射するときには, エアリーディスクが得られる. このときの第一暗環をスポット径とすると, 回折計算により

$$1.22\lambda/NA^4 \quad (A1)$$

である. また e^{-x^2} のガウス分布を用いるときは e^{-2} なる径で, 瞳の径および絞込みスポット径を定義すると, 絞込みスポット径は

$$\frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{NA} \quad (A2)$$

となる. このように係数がつくもののスポット径は λ/NA のオーダーであり, これを本文では絞り込みスポッ

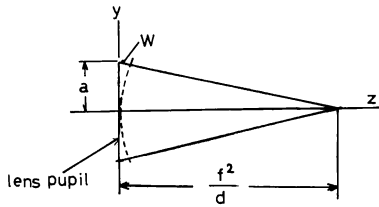


Fig. 10 Wave front aberration, generated by two cylindrical lenses, where f and $-f$ are focal distances of each lens and d is a distance between two lenses.

ト径と呼ぶ。光ディスクでは、この径の中に二つのピットが入ったときが信号の得られる限界で¹⁾あり、この量が重要な意味をもつ。

(2) 式(2)の波面収差の導出

焦点距離 f と $-f$ のシリンダレンズを間隔 d で配置したときの合成レンズの焦点距離 f_g は

$$\frac{1}{f_g} = \frac{1}{f} + \left(-\frac{1}{f}\right) - \frac{d}{f \cdot (-f)} = \frac{d}{f^2} \quad (\text{A3})$$

で与えられる。一方、シリンダレンズの作用しない方向

は ∞ の焦点距離、すなわち平面波であるから、シリンダレンズの瞳位置で f_g の半径をもつ球面 (Fig. 10 の点線) と瞳面との距離が波面収差となる。この距離は、球面を parabolic 近似したときには、Fig. 10 中の符号を用いると

$$z = \frac{y^2}{2f_g} \quad (\text{A4})$$

で与えられる。瞳の半径を a とすると、波面収差の最大は、収差のバランスを考えると、(A4)の最大値の半分が求める値となる。すなわち

$$W = \frac{1}{2} z_{\max} = \frac{a^2}{4f^2} d \quad (\text{A5})$$

である。

文 献

- 1) H. H. Hopkins: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979)4.
- 2) K. Yamamoto and A. Taira: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **329** (1982)148.
- 3) K. Tatsuno and A. Arimoto: Appl. Opt., **20**, 20(1981) 3520.
- 4) 久保田広: 波動光学 (岩波書店, 1971) p. 262.