

技術報告

光ディスク用屈折率分布型対物レンズ

西 壽巳・市川 裕之・遠山 実

日本板硝子(株)中央研究所 〒664 伊丹市鴻池字街道下1

(1985年11月30日受理)

Gradient Index Objective Lens for the Optical Disk System

Hisami NISHI, Hiroyuki ICHIKAWA and Minoru TOYAMA

Central Research Laboratory, Nippon Sheet Glass Co., Ltd.,
1, Kaidoshita, Konoike, Itami 664

Using a radial gradient index (GI) medium, an aplanatic singlet has been designed, manufactured and evaluated for an objective lens of an optical pickup of the compact disk (CD) system. A plano-plano and a plano-convex (The second surface is flat.) lenses were designed and their optical performance were compared with a conventional triplet objective lens. An aplanatic solution of a plano-convex lens was obtained by optimizing the refractive index coefficients of the radial GI medium, lens thickness and one curvature. Tolerances of the refractive index coefficients and lens surface tilts were estimated. The radial GI medium was manufactured using modified ion exchange technique. The convex surface was fabricated using a conventional curve generating machine. Optical performance of the lenses were tested by Fizeau interferometry. The results show diffraction limited performance, that is, rms wave front aberration within the Maréchal criterion, in the specified image field. We replaced the standard objective lens of a CD player by the radial GI singlet and obtained high quality CD music. Considering the results of evaluations of the radial GI singlet, we confirmed that it was available for the CD system.

1. はじめに

コンパクトディスクシステム用の対物レンズは、半導体レーザーからの光ビームを約 $1\ \mu\text{m}$ 程度の微小スポットに絞るために、その波面収差を回折限界以内におさえてはならない。この種の対物レンズは、システムのフォーカスおよびトラッキング追従機構により光軸と平行ないし垂直な方向に駆動されているため、あまり広い視野は要求されない。しかし、視野内ではその最良像点における波面収差の標準偏差 OPD_{rms} は、Maréchal の criterion ($0.07\ \lambda$) 以内にする必要がある。

一般的に、焦点距離 $f' = 4\sim 5\ \text{mm}$ 、作動距離 $\text{WD} = 1.5\sim 2.5\ \text{mm}$ 、開口数 $\text{NA} = 0.45\sim 0.47$ 、視野直径 $0.15\ \text{mm}$ 以上という仕様のものがよく用いられている。とくに F 値が1に近く大変明るいレンズのため高次にわたる球面収差と、視野角が約 1° と狭いため非対称収差の

うち最初に現われるコマ収差のみを、それぞれ補正したアプラナートを実現せねばならない。

このCD用対物レンズとして、当初より均質ガラスを用いた2群3枚構成のものが使用されてきたが、レンズ枚数が3枚と多く、さらに一つずつ調芯作業を必要とするため小型、軽量、低コスト化には限界があった。それに対して、均質媒質を使用しつつも片面ないし両面を非球面形状としてシングレット化を図ったものが数多く報告されている。媒質にプラスチックを用いたもの^{1,2)}、ガラスを用いたもの^{3,4)}、さらにガラス球面レンズに非球面量分のプラスチックを附着せしめたもの⁵⁾などさまざまなものがあり、すでに実用化されているものもある。いずれもモールド技術を用いて非球面を成型しており、大量生産には適しているが大規模な設備を必要とする。

さらに異なったアプローチとして、面は通常の球面ないし平面とし媒質の屈折率分布により非球面効果を出す

屈折率分布型レンズ (gradient index lens) がある。この種のレンズはイオン交換法に代表される化学的プロセスにより、一度に大量の同一屈折率分布をもつ媒質が得られるため、レンズ個々に非球面量を付与する必要がない。さらに通常の研摩設備を利用できるなど数々の特長をもっている。

本稿では、この屈折率分布型媒質を用いたコンパクトディスク用対物レンズの設計例と、その結果に基づいて実際に試作したレンズの評価結果を述べる。

2. 設 計

2.1 光線追跡

屈折率分布型媒質を含むシステムの設計には、不均質媒質中の光線追跡が可能なレンズ設計ソフトウェアを用意してはならない。この不均質媒質中の光線追跡は(1)式で記述される微分方程式の形の光線方程式を解くことにより実行される。

$$d/ds(n(\mathbf{r})d\mathbf{r}/ds) = \nabla n(\mathbf{r}) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{r} は光線の位置ベクトル、 s は光線に沿う線素である。この微分方程式は屈折率 $n(\mathbf{r})$ が関数で与えられ、微分可能なルンゲクッタ法を用いて容易に数値解が求まる。これに対する高速追跡法⁶⁾を用いたレンズ設計ソフトウェアを開発し設計を実施した。また、最適化はDLS法(減衰最小自乗法)ないしそれに準じたアルゴリズムを用いて行なった。

2.2 設計条件

設計に先立ち以下の条件を設定した。

- (1) 波長は 780 nm とする。
- (2) 平凸レンズ (シングレット) とし、片面のみ球面とする。
- (3) 光ディスクはレンズの負荷とする。つまり、ディスク裏面に集光する。
- (4) 絞りは第1面に置く。第2面に置くとWDが短くなる。
- (5) 屈折率分布 $n(\mathbf{r})$ は(2)式で表わされるように光軸からの距離 r について変化するラジアル分布型のものとする。

$$n^2(r) = n_0^2 [1 - (gr)^2 + h_4(gr)^4 + h_6(gr)^6 + \dots] \quad (2)$$

ここで、 n_0 は軸上の屈折率、 g, h_4, h_6, h_8 はそれぞれ2次の項と、4次以上の高次項である。媒質中の近軸追跡に影響を与える項は、 n_0 と g の2項である。この屈折率分布は軸上の屈折率が周辺部より高くほぼ自乗型の分布をしており、媒質自体がパワー

$$\phi = n_0 g \sin^2(gZ_0) \quad (3)$$

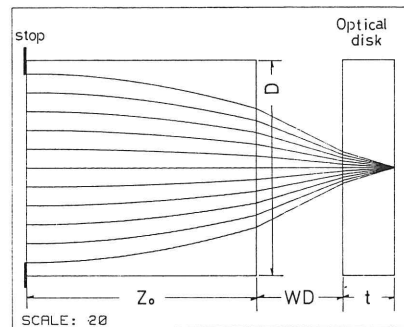


Fig. 1 Typical example of the plano-plano radial GI lens for the CD system (Type A).

Table 1 Typical optimized specifications of a plano-plano radial GI singlet (Type A).

EFL = 4.5 mm	Aperture = 2.188 mm
NA = 0.45	$D = 5.0$ mm
WD = 2.0 mm	$Z_0 = 5.333$ mm
$R_1 = \infty$	$R_2 = \infty$
$n_0 = 1.6602$	$g = 0.17/\text{mm}$
$h_4 = 0.7044$	$h_6 = -0.4809$
$h_8 = 0.2932$	GIH _{max} = 0.014 mm
$n_{\text{disk}} = 1.55$	$t = 1.2$ mm

EFL: Effective focal length, D : Outer diameter.

をもつのが特徴である。

以下の節では、plano-plano と plano-convex の2種類の形状をもつ屈折率分布型レンズについて述べる。

2.3 Plano-plano 型レンズ (タイプAレンズ)

シングレットとして最も簡単な形状のものは、Fig. 1のように両面が平面で構成されるレンズである⁷⁾。

最初にこのレンズの可能性を検討してみた。球面収差は非球面項に相当する(2)式中の h_4, h_6, h_8, \dots の係数を最適化することにより限りなく小さくできる。しかし、媒質が(3)式で表わされる唯一のパワーをもつだけであり、コマを補正するためのベンディングが行なえない。実際、 n_0, g, Z_0 の値を変えてもアプラナチックな解は見つからなかった。Table 1は焦点距離 $f' = 4.5$ mm, $g = 0.17 \text{ mm}^{-1}$ の設計例である。Fig. 2は光線収差を示している。軸外では、3次のコマのため OPD_{rms} が著しく増加し、視野が大変狭く、視野直径は 0.028 mm しかない。さらにレンズの厚みも $Z_0 = 5.333$ mm と厚く重量増加を招くなどの欠点のため、CD用対物レンズとして用いるには困難である。

2.4 Plano-convex 型レンズ (タイプBレンズ)

次に自由度追加のため片面を球面にすると、媒質自体

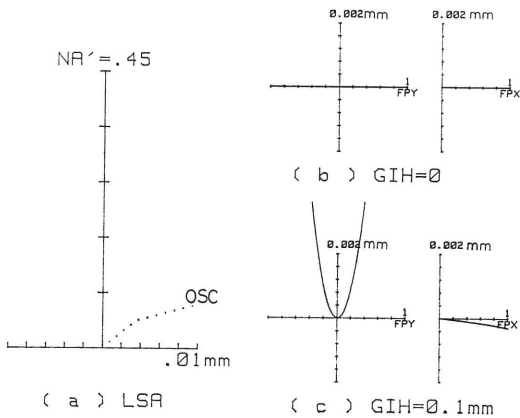


Fig. 2 Type A lens: (a) longitudinal spherical aberration and (b), (c) ray intercept curves vs normalized entrance pupil coordinate.

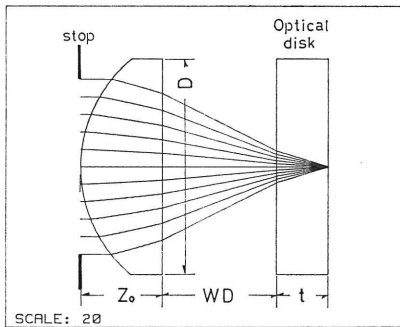


Fig. 3 The plano-convex radial GI lens for the CD system (Type B).

がパワーをもつため外見が平凸形状であっても均質両凸レンズと同じようなベンディングの効果が達成できる。第1面を球面にしても、第2面を球面⁹⁾にしてもアプラナチックな解は存在するが、Fig. 3のように第1面を球面にしたほうが中心厚が薄くWDも大きくとられる。

一方、両面ないし片面を球面とする設計例⁹⁾が、報告されているが、この設計では球面収差の補正しか考慮されていない。コマも補正したアプラナチックなメニスカス形状の設計例¹⁰⁾も報告されているが、両面とも球面のため研磨コストの増大を招くものと考えられる。

Table 2 は $f' = 4.5 \text{ mm}$ での設計例である。第1面のパワーは $\phi_s = 0.178$ であり、媒質のパワー $\phi_G = 0.049$ の2.76倍と大きいのが特徴である。Fig. 4はその光線収差を示す。第1面では、曲率半径が小さいために7次以上の高次の球面収差量が大きくなるが、屈折率分布の2次以上の項 g, h_4, h_6, h_8, \dots を最適化することにより、 $OPD_{rms} = 0.0033\lambda$ と良好に補正された。ベンディングを

Table 2 Optimized specifications of a plano-convex radial GI singlet (Type B).

EFL = 4.5 mm	Aperture = 2.03 mm
NA = 0.45	$D = 5.0 \text{ mm}$
WD = 2.639 mm	$Z_0 = 1.894 \text{ mm}$
$R_1 = 3.252 \text{ mm}$	$R_2 = \infty$
$n_0 = 1.5800$	$g = 0.1288/\text{mm}$
$h_4 = -0.9607$	$h_6 = 0.5677$
$h_8 = -85.83$	$GIH_{max} = 0.115 \text{ mm}$
$n_{disk} = 1.55$	$t = 1.2 \text{ mm}$

EFL: Effective focal length, D : Outer diameter.

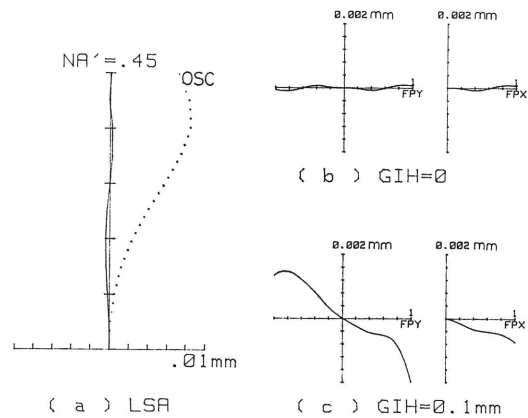


Fig. 4 Type B lens: (a) longitudinal spherical aberration and (b), (c) ray intercept curves vs normalized entrance pupil coordinate.

行なうことにより、一定の境界条件のもとでコマを補正する解を見いだした。Fig. 4(a)中、破線で表わした正弦条件不満足量 (OSC) は、タイプAレンズに比べて十分小さな値になっている。

2.5 軸外特性

3種類のレンズについて、理想像高 (GIH) と波面収差 (OPD_{rms}) との関係を Fig. 5 に示した。タイプAレンズは3次のコマのため視野は大変狭いが、一方タイプBレンズは均質3枚組レンズ¹¹⁾ (Fig. 5(b)) 以上の広い視野をもち、当初の仕様を十分に満たしている。

さらに、波面収差をZernikeの多項式 W_{nm} に展開することにより、各収差成分の分離ができる。タイプBレンズの $GIH = 0.1 \text{ mm}$ における値を Table 3 に示す。球面収差 W_{40}, W_{60}, W_{80} と3次のコマ W_{31} は十分小さく、波面収差の94%は3次の非点 W_{22} の寄与による。すなわち、ほぼアプラナートになっている。

2.6 公差

波面収差を劣化させる支配的な要因は、屈折率分布の

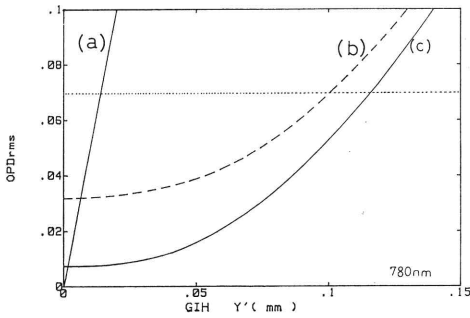


Fig. 5 Wave front error OPD_{rms} vs GIH: (a) Type A lens, (b) homogeneous triplet and (c) Type B lens.

Table 3 Zernike coefficients of the plano-convex radial GI singlet (Type B) at GIH=0.1 mm.

W_{nm}	Aberration	Coefficients
W_{40}	SA_3	0.01618
W_{60}	SA_5	0.02964
W_{80}	SA_7	0.00983
W_{31}	CM_3	0.00000
W_{51}	CM_5	0.02480
W_{22}	AS_3	0.11856

SA_n : n th order Spherical Aberration, CM_n : n th order Coma, AS_n : n th order Astigmatism.

偏差と面の偏心である。とくに、この屈折率分布の公差の大小が屈折率分布型レンズを実現するための鍵となる。

Table 4 は、タイプAレンズとタイプBレンズについて、比屈折率差と屈折率分布定数の公差とを比較したものである。各公差は、 OPD_{rms} を 0.03λ 増加させる定数の変化量として定義した。さらに、比較しやすいように、各公差をレンズ最外周の屈折率変化量 Δn_r として表わした。この結果から、タイプBレンズはタイプAレンズに比べて、 n_0, g の公差は厳しくなるが、 h_4 の公差 Δh_4 は7倍ゆるい。とくにイオン交換法でロッドを製造する場合、イオン交換時間に対して h_4 の変化が n_0, g の変化に比べてきわめて急速であるという現実からして、 Δh_4 が大きいことが重要である。そして、このタイプBレンズに要求される Δ と屈折率の各公差とも現状のイオン交換法を用いた製造技術水準で十分達成できる範囲内にある。

一方、面の偏心についてはかなり厳しい公差が要求される。通常の均質媒質を用いたレンズと異なり、媒質自体に軸をもつため両面を研磨した後に取りを行なうこ

Table 4 Tolerance of refractive index coefficients at the margin.

Lens type	Plano-plano (Type A)	Plano-convex (Type B)
Δ	6.5%	3.6%
Δn_r	(Δn_0)	± 0.0043
	(Δg)	± 0.0006
	(Δh_4)	± 0.0007

$\Delta = \{(n_0 - n_r)/n_0\} \times 100(\%)$, Δ : Relative refractive index difference, n_0 : Refractive index at the center, n_r : Refractive index at the periphery, $\Delta n_r (\Delta n_0) = n_r(n_0, g, h_4, \dots) - n_r(n_0 - \Delta n_0, g, h_4, \dots)$, etc.

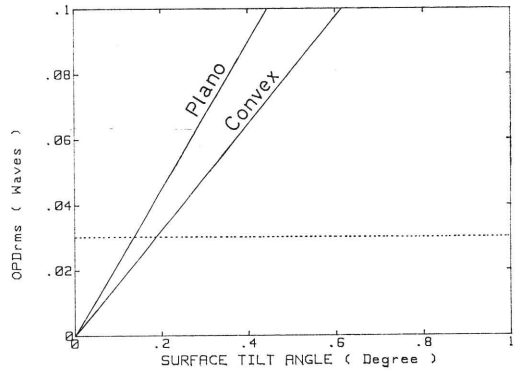


Fig. 6 Tolerance of lens surface tilt.

とができないからである。Fig. 6 に、媒質軸に対する球面および平面の偏心量と OPD_{rms} の関係を示す。 OPD_{rms} を 0.03λ 以内の増加におさえるには、球面および平面はそれぞれ $11'$, $8'$ 以内の偏心量に押さえなくてはならない。そのため、偏心の少ない面の創成方法を開発しなくてはならない。

3. 試作と評価

3.1 試作

次に、設計値をもとに試作を行ない光学性能の評価を実施した。ただし、小型化と屈折率分布型ガラスロッドの製造時間短縮のため、焦点距離 $f' = 3.56$ mm に設計変更をした。屈折率分布型媒質としては、従来のものより耐候性の改善された多成分ガラスを用いて、イオン交換法により製造した。外径約 4 mm の大口径ガラスを採用したことによりイオン交換時の屈折率分布変化が小口径のものに比べてより緩慢になったことと、屈折率分布自動測定装置の開発¹²⁾により要求精度を十分満たす高精度の屈折率制御とその測定が可能になった。

球面は、媒質に対する偏心量をおさえられるように改

良したカーブジェネレータを用いて創成することにより、許公差内の偏心率をもつものが試作できた。

Table 5 にその仕様を示す。

3.2 評価

まず最初に、透過波面の評価を行なった。波面収差は ZYGO 社製のフィゾー型干渉計を用いて測定し、最良像点における OPD_{rms} も ZAPP 解析装置を用いて求めた。測定波長は $\lambda=633\text{ nm}$ である。Fig. 7 は軸上と軸

外 2 点における透過波面の干渉縞と OPD_{rms} 値を示す。さらに、Fig. 8 には OPD_{rms} の設計値と測定値の対応を示す。図中の黒丸は $\lambda=633\text{ nm}$ における測定値を表わし、実線と破線はそれぞれ $\lambda=633, 780\text{ nm}$ 時の設計値を表わす。設計の最適化は $\lambda=780\text{ nm}$ の波長でなされているため、 $\lambda=633\text{ nm}$ のときは若干 OPD_{rms} が増加する。ただし、測定値が計算に対して右にずれているのは、球面の子午面内での偏心が約 $3'$ あるためである。こ

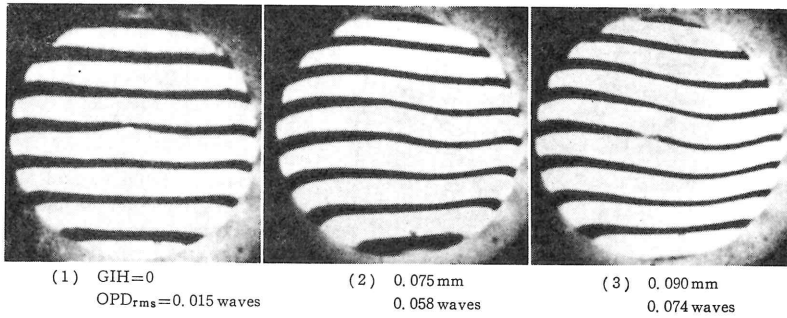


Fig. 7 Wave front error interferograms by Fizeau interferometer at 633 nm.

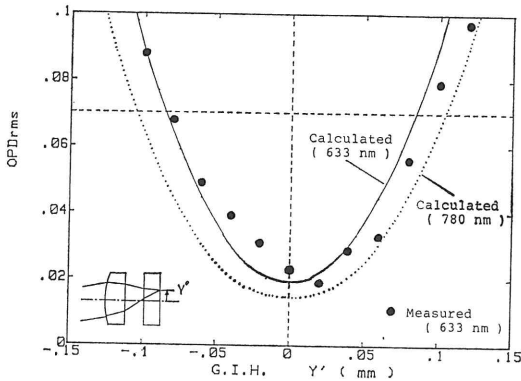


Fig. 8 Comparison between calculated and measured values of wave front error.

Table 5 Specifications of plano-convex radial GI singlet (Type B).

Wave length	780 nm
EFL	3.56 mm
NA	0.45
WD	1.85 mm
Aperture	3.2 mm
Conjugate length	Infinity
GIH_{max}	$> 0.075\text{ mm}$
OPD_{rms}	$< 0.07\text{ waves}$
Weight	0.05 g
Dimensions ($D \times Z_0$)	4 mm \times 1.6 mm

EFL: Effective focal length, D : Outer diameter of the GI rod, Optical disk: $n=1.55, t=1.2\text{ mm}$.

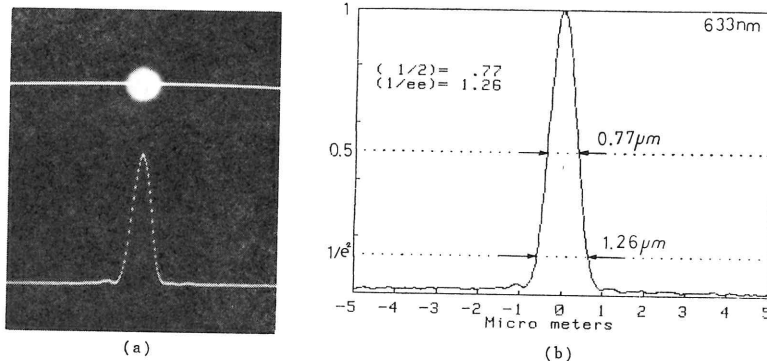


Fig. 9 Point image and its normalized intensity profile at 633 nm: (a) point image and (b) normalized intensity profile.

れば、レンズ単体を同じく子午面内で4.2'ほど逆方向に傾ければ、ほぼ対称な測定値が得られる。また、Fig. 5の焦点距離が $f'=4.5\text{mm}$ における視野直径0.12mmに比べて、Fig. 8の視野が狭くなっているのは、試作したレンズの焦点距離が $f'=3.56\text{mm}$ と約20%短くなっているためである。

Fig. 9は、 $\lambda=633\text{nm}$ 時の軸上における点像とその規格化した強度分布の実測値を表わす。強度分布が $1/e^2$ になるスポット径は $1.26\mu\text{m}$ であり、 $w=0.82\lambda/\text{NA}$ で計算される球面収差が0のときの理論値 $1.15\mu\text{m}$ に近い値となっている。点像の対称性は良好であり、ほぼ回折限界に絞られていた。

最後に実装テストとして、試作したレンズを市販のコンパクトディスクプレーヤに装着し、コンパクトディスクを再生したところ、良好な再生音が得られた¹³⁾。

4. ま と め

屈折率が半径方向に変化する屈折率分布型媒質を用いた第1面を球面とした平凸形状のコンパクトディスク用対物レンズを設計した。最適化により、球面収差とコマ収差が良好に補正されたアプラナートを実現できることを見いだした。設計結果をもとに、焦点距離 $f'=3.56\text{mm}$ の仕様をもつレンズの試作を行なった。その結果厚さが約 1.6mm 、重量わずか 50mg と小型軽量で、設計値に近い光学性能をもつレンズが得られた。また、実用水準に十分到達していることも確認できた。

とくに材質がガラスであるため、温度特性が良好なこと¹⁴⁾、多数枚組レンズのように貼合せ面が存在しないこと、小型、軽量などの特長を生かして車載用コンパクトディスクプレーヤなどへの用途が期待される。残された課題は、量産化技術の開発と低コスト化であるが、近い将来解決されるものと思われる。

おわりにあたり、日頃ご指導いただく日本板硝子(株)

中央研究所新木信夫所長、北野一郎顧問、そしてレンズ試作に協力していただいた光ファインガラス事業部の赤沢旭主席技師、小林勝係員の各氏に深く感謝します。

文 献

- 1) K. Shintani and S. Kubota: "Evaluation of a diffraction-limited plastic biaspheric objective lens," CLEO'84 Tech. Dig. (1984) WB 2.
- 2) T. Kiriki, N. Izumiya, K. Sakurai and T. Kojima: "Plastic aspheric lens for the Compact Disc System," CLEO'84 Tech. Dig. (1984) WB 3.
- 3) 泉谷徹郎, 石灰勲夫, 広田慎一郎: "非球面レンズの高精度プレス," Micro Optics News, **3** (1985) 42-45.
- 4) R. O. Maschmeyer, R. M. Hujar, L. L. Carpenter, B. W. Nicholson and E. F. Vozenilek: "Optical performance of a diffraction-limited," Appl. Opt., **22** (1983) 2413-2415.
- 5) J. J. M. Braat, A. Smid and M. M. B. Wijnakker: "Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems," Appl. Opt., **24** (1985) 1853-1855.
- 6) A. Sharma, D. V. Kumar and A. K. Ghatak: "Tracing rays through gradient-index media: a new method," Appl. Opt., **21** (1982) 984-987.
- 7) K. Fujii, H. Ueno and T. Yamagishi: "New gradient-index rod lenses with low aberration," GRIN Topical Meet. Tech. Dig. (1983) E 4.
- 8) H. Nishi, M. Toyama, T. Yamagishi, K. Fujii and H. Ueno: "Plano-Convex gradient-index singlet," GRIN Topical Meet. Tech. Dig. (1982) C 2.
- 9) 菊地啓介: "屈折率分布型レンズの光ディスク用光ピックアップへの応用," 光学, **10** (1981) 118-127.
- 10) 青野康廣: "屈折率分布型レンズを用いた光ディスク用光ピックアップの設計," Micro Optics News, **1** (1983) 126-130.
- 11) 後藤敦夫: 特開昭 55-4068.
- 12) 西 壽巳, 遠山 実: "セルフォックレンズの球面収差自動測定と屈折率分布定数の算出", 第32回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1985) 29 a-ZD-2.
- 13) M. Toyama, H. Nishi and I. Kitano: "Gradient index objective for the compact disk," GRIN Topical Meet. Tech. Dig. (1985) F 1.
- 14) 石川 朗, 松井 勉, 小林 勝: "屈折率分布型対物レンズの光ヘッド用光学系における特性評価", 第46回応用物理学学会学術講演会予稿集 (1985) 2 p-L-13.