



等倍屈折率分布型レンズの3次収差解析

西 壽 巳

日本板硝子(株)中央研究所 〒664 伊丹市鴻池字街道下一番

(1992年11月20日受付, 1993年1月27日受理)

3rd Order Aberration Analysis of a Radial Gradient Index Lens with Unit Magnification

Hisami NISHI

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

(Received November 20, 1992; Accepted January 27, 1993)

The 3rd order aberration coefficients and an entrance pupil shape of a radial gradient index rod lens with unit magnification, have been calculated as normalized symbolic forms. Comparing contribution balances among surfaces and medium aberration coefficients, major factors affecting image errors have been cleared.

1. はじめに

円筒形の多成分硝子やポリマーにイオン交換法や重合などの手法を用いて, その半径方向にパラボリックな屈折率分布を持たせた半径方向屈折率分布型媒質 (radial gradient index medium)¹⁻³⁾ は, アレイ状に配置して, 複写機⁴⁾ やファクシマリの読み取り用⁵⁾, LED プリントなどの書き込み用⁶⁾ 正立等倍結像レンズとして広く用いられている. この種の媒質は媒質自体に屈折力 (power) があるため薄肉レンズを軸状でスタックしたものと等価であり, 素子長の調整のみで1枚のレンズで正立等倍像を結ぶ共役点つまり主点位置をレンズ媒質外に置くことができる. この最大の特長を生かして, 最も早くから実用化され SLA (selfoc lens array)⁷⁾ の名で商品化されていた. 最近の高速, 高解像度の要求に伴って, より明るくより画角の大きいものが開発, 商品化されてきた. 例えば, SLA 20 (画角 20 度) などである.

この正立等倍レンズアレイの解像度に関する考察は種々行われている. しかし, いずれも屈折率分布を冪級数展開した時に2次の項までしか考慮されておらず, 1次近似の領域の解析に留まっていたし⁸⁾, 瞳の物体高依存性つまり口径食を考慮せずに数値的に光線追跡を行って

いるだけでマクロな見通しが得られていなかった⁹⁾.

面湾曲等の3次の収差を計算するためには, 屈折率分布は少なくとも4次の項まで含めて考慮する必要がある. 光線方程式を数値的に解き光線収差を求める方法はコンピュータを用いれば容易に達成できる方法だが全体を見渡すマクロ的な見通しが得られない. そのため従来より均質レンズ系では各面の収差寄与を把握するのに3次収差係数¹⁰⁾が用いられている.

本報告では, 1次近似量として瞳形状を解析的に求めた後, 3次の収差係数を数値的ではなく解析的に導出し規格化表現により整理した. 各係数の寄与率を比較するとともに横収差を求めた. この結果, すべての条件について数値計算することなく本レンズ系の収差の挙動が容易に把握できた. なお, 本報告では色収差は考えない.

2. 瞳形状

半径方向屈折率分布型レンズ媒質の開口角はすでに求められている¹¹⁾が, 軸外も含めた一般的な場合の瞳形状について計算された報告はない. そこで, まず瞳形状を解析的に求める.

座標系は Fig. 1 に示すように円筒型媒質の中心軸を光軸つまり Z 軸にとり, 諸量を以下のように定義す

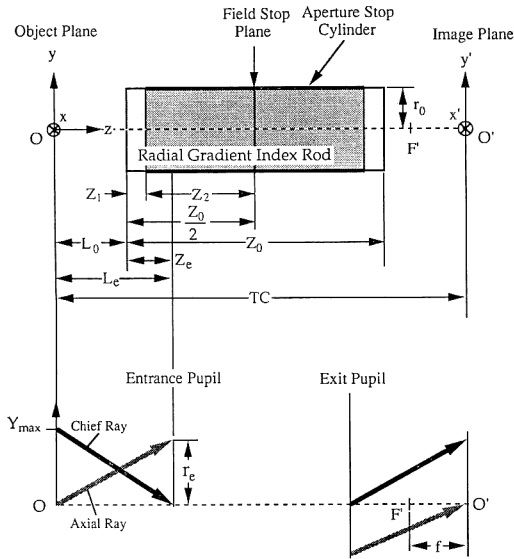


Fig. 1 Coordinates and dimensions of a radial gradient index rod. (a) Dimensions, (b) Chief ray and axial ray.

る。子午面は Y-Z 平面, 球欠面は X-Z 平面である。媒質部分は \$Z_0\$ の長さがあり, 屈折率分布は式(1)で与えられるとする。3次収差までを取り扱うので6次以上の項は無視する。

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

$$r^2 = x^2 + y^2$$

ただし,

$$G = gr_0$$

\$r_0\$: 媒質半径, \$n_0\$: 軸上の屈折率, \$h_4\$: 4次の係数。

ここで, \$G\$ は媒質の屈折率差を表す量であり, \$n_0, G, h_4\$ の三つの量で硝材の特徴を記述できることになる。SLA では明示的な絞りは存在せず, 真ん中に位置する視野絞り (field stop) を中心として対称光学系を構成する。視野絞り位置の片側について考えると式(2)で定義できる開き絞り (aperture stop) の機能を持たない部分 (長さ \$Z_1\$) と, もつ部分 (長さ \$Z_2\$) の二つの部分に分離することができる。開き絞りの機能は半径 \$r_0\$ の媒質外周部が有効的に円筒状の絞りを形成する。

$$gZ_1 = \phi_1, gZ_2 = \frac{\pi}{2}, Q = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2)$$

以上定義した \$n_0, G, h_4, \phi_1, r_0\$ の五つの量を用いて, 以後の議論で言及する諸量を表すことができる。このうち, \$r_0\$ のみがディメンジョンを含む量であり, スケールファクタとして用いることができる。物体と媒質との作動距離 \$L_0\$ は近軸追跡より容易に式(3)で記述できる。

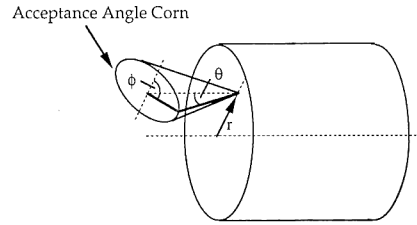


Fig. 2 Numerical aperture of a radial gradient index rod.

$$L_0 = \frac{r_0}{n_0 G \tan(\phi_1)} \quad (3)$$

式(1)のようなパラボリックな半径方向屈折率分布を持つ媒質の入射面 (第1面) の規格化半径位置 \$R\$ における開口角 \$\theta\$ は Fig. 2 において式(4)で与えられている¹¹⁾。入射位置 \$R\$ での許容入射角 \$\theta\$ は媒質外周部 (開き絞り相当部分) に接する光線で決定されている。

$$\sin^2 \theta = n_0^2 G^2 \frac{(1-R^2)}{(1-R^2 \sin^2 \phi)} \quad (4)$$

ただし, \$R = \frac{r}{r_0}\$ である。

式(4)より出発して, 物体高 \$Y_0\$ の場合の第1面 (媒質面) に投影された瞳の形状を1次近似で求める。

$$\sin \theta = \tan \theta = \frac{r^2}{L_0} \quad (5)$$

$$\sin \phi = \sin(\phi_1 + \phi_2) = \frac{x Y_0}{r r_2} \quad (6)$$

$$r_2^2 = x^2 + (y - Y_0)^2 \quad (7)$$

Fig. 3 より式(5)~(7)が容易に求まり式(4)に代入して変形すると最終的に,

$$\frac{x^2}{r_{a1}^2} + \frac{(y - \frac{r_0^2}{Y_{max}} - Y_0)^2}{r_{a1}^2 (Y_{max}^2 - Y_0^2)} = 1 \quad (8)$$

が得られる。なお, ここで式を見やすくするため

$$Y_{max}^2 \equiv r_0^2 + (n_0 G L_0)^2 = \left[\frac{r_0}{\sin(\phi_1)} \right]^2 \quad (9)$$

$$r_{a1}^2 \equiv \frac{r_0^2}{Y_{max}^2} (Y_{max}^2 - r_0^2) \quad (10)$$

とおく。

式(8)より, 第1面に投影された瞳は主光線が座標 \$(0, y_c) = (0, \frac{r_0^2}{Y_{max}} - Y_0)\$ を通過する楕円形として導かれた。\$Y_{max}\$ は最大物体高に相当する。

さて, Fig. 3 に示すように主光線が光軸と交わる位置 \$Z_c\$ が瞳位置であり, 式(8)で与えられる第1面での瞳形状をこの位置に投影して瞳形状を求める。瞳位置 \$Z_c\$ は

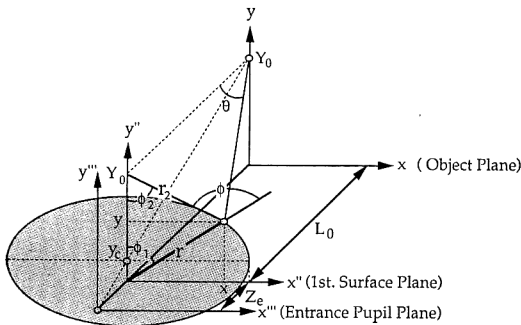


Fig. 3 Entrance pupil coordinate.

$$Z_e = \frac{r_0^2}{n_0^2 G^2 L_0} = \frac{r_0}{n_0 G} \tan(\Phi_1) \quad (11)$$

と物体高 Y_0 に依存しない形で求まる. L_0 と Z_e を用いて式(8)の楕円を拡大投影すれば

$$\frac{x^2}{r_e^2} + \frac{y^2}{r_e^2(1-\hat{Y}^2)} = 1 \quad (12)$$

が楕形状として求まる. ここで規格化物体高さ $\hat{Y} = Y_0/Y_{\max}$, そして, r_e を軸上 ($\hat{Y}=0$) での瞳半径

$$r_e = \frac{Y_{\max} r_0}{\sqrt{Y_{\max}^2 - r_0^2}} = \frac{r_0}{\cos(\Phi_1)} \quad (13)$$

としている. 最終的に楕形状として式(12)が得られる. また, 物体と入射瞳の距離は式(14)で与えられる.

$$L_e = L_0 + Z_e = \frac{2r_0}{n_0 G \sin(2\Phi_1)} \quad (14)$$

以上の計算より, r_0, Φ_1 の値が決まれば, $Z_0 \geq Z_1 + (\pi/g)$ の任意の長さの媒質 (等倍でなくてもよい) の軸外入射時の入射瞳が子午面方向を短軸とする楕円形状として導かれたことになる.

式(12)より入射瞳形状が求まったが, 射出瞳は入射瞳の共役像として得られるので, Fig. 1において入射瞳と視野絞りに対して対称位置に等倍倒立像として存在する. Fig. 4に示すように, 球欠面 (x 方向) での瞳半径は r_e で一定であるが, 子午面 (Y 方向) での瞳半径は規格化物体高の増加とともに急速に減少し, $\hat{Y}=1$ で

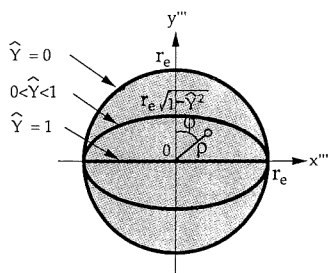


Fig. 4 Vignetting of entrance pupil.

はゼロとなり子午方向では回折スポット径は無限大になってしまう. ただし, 瞳面積もゼロになる. SLA のような開口効率ゼロにまで及ぶレンズアレイにおいて, 1次近似の範囲では, 規格化物体高の増加に伴う口径食による子午面スポットサイズの増加が解像度を低下させる主因になっている.

3. 3次収差係数

k 枚からなる共軸レンズ系 (像面は $k+1$ 面) における3次光線収差は3次収差係数を用いて表すことができる. 均質媒質の3次収差係数は Buchdahl¹⁰⁾ によるものがよく知られており, Sands が屈折率分布型媒質を含む系に拡張している. 本報告では, 積分形で表される Sands の収差係数式¹²⁾ を等倍の半径方向屈折率分布に適用し解析解を求めた. なお, 色収差は考慮しない. さて, Sands の文献等では屈折率の表現式(15)がわれわれが通常用いる式(1)とは異なるが簡単な式(16)で換算できる.

$$n(r) = N_0 + N_1 r^2 + N_2 r^4 \quad (15)$$

$$N_0 = n_0, N_1 = -\frac{n_0 g^2}{2}, N_2 = \frac{n_0 g^4}{8} (4h_4 - 1) \quad (16)$$

3次収差係数は Fig. 1 に示すように2本の独立な光線を近軸追跡して求められる. 軸光線 (axial ray, "a" の suffix で表す) は軸上物点 (0, 0, 0) から出て入射瞳の最外周点 (0, r_e, L_e) を通過する光線, 主光線 (chief ray, "b" の suffix で表す) は軸外の最大物体高 (0, $Y_{\max}, 0$) から出て入射瞳の中心 (0, 0, L_e) を通る光線である. これらの追跡で, j 番目の面を通過する光線の光軸からの距離および傾斜角度 ($v = dy/dz$) を $y_{a_j}, y_{b_j}, v_{a_j}, v_{b_j}$ で表し, 面を通過後の光線角度, 屈折率には v', N' の表現を用いる. 本報告では, 物体面は $j=0$, 屈折率分布型媒質は面 $j=1, j=2$ で囲まれ, 媒質番号は $j=1$, 像面は $j=3$ である. また, 共役像は空気中にあり, j 番目の屈折率 N_{0j} は $N_{00} = N'_{02} = 1$ である. $j=1, j=2$ 面における光線高さ y と傾き v は以下の式で与えられる.

$$y_{a1} = \frac{L_0}{L_e} r_e = r_e \cos(\Phi_1) \quad (17)$$

$$v_{a1} = \frac{r_e}{L_e} = n_0 G \sin(\Phi_1) \quad (18)$$

$$y_{a2} = -y_{a1} \quad (19)$$

$$v'_{a2} = v_{a1} \quad (20)$$

$$y_{b1} = \frac{Z_e}{L_e} Y_{\max} = r_0 \sin(\Phi_1) \quad (21)$$

$$v_{b1} = -\frac{Y_{\max}}{L_e} = -n_0 G \cos(\Phi_1) \quad (22)$$

$$y_{b2} = y_{b1} \quad (23)$$

$$v'_{b2} = -v_{b1} \quad (24)$$

像点での結像誤差 (image error: $\Delta x, \Delta y$) は規格化物体高 (像高) $\hat{Y} = Y_0/Y_{\max}$ と入射瞳の規格化極座標 (ρ, φ) を用いて式 (25), (26) で表される。

$$\Delta x = \sigma_1 \rho^3 \sin(\varphi) + \sigma_2 \hat{Y} \rho^2 \sin(2\varphi) + (\sigma_3 + \sigma_4) \hat{Y}^2 \rho \sin(\varphi) \quad (25)$$

$$\Delta y = \sigma_1 \rho^3 \cos(\varphi) + \sigma_2 \hat{Y} \rho^2 [2 + \cos(2\varphi)] + (3\sigma_3 + \sigma_4) \hat{Y}^2 \rho \cos(\varphi) + \sigma_5 \hat{Y}^3 \quad (26)$$

ここで, 3次収差係数 σ_i は j 番目の面 (surface) での寄与分 a_{ij} と j 番目の媒質中の転送による (transfer) の寄与分 a_{ij}^* のそれぞれの和で表される。

$$\sigma_i = \mu \left(\sum_{j=1}^k a_{ij} + \sum_{j=1}^k a_{ij}^* \right) = \sigma_i^* + \sigma_i \quad (i=1 \sim 5) \quad (27)$$

$$\mu = -\frac{1}{N'_{0k} v'_{ik}} = -\frac{1}{n_0 G \sin(\Phi_1)} \quad (28)$$

面の寄与分 a_{ij} は, 本報告では全面が平面のため簡単になり, j は省略して

$$a_1 = a, \quad a_2 = aq, \quad a_3 = aq^2, \quad a_4 = 0, \quad a_5 = aq^3 \quad (29)$$

$$q = \frac{v_b}{v_a} \quad (30)$$

$$a = \frac{1}{2} N_0 \left(\frac{N_0}{N'_0} - 1 \right) \left(\frac{N_0}{N'_0} + 1 \right) y_a v_a^3 \quad (31)$$

が得られる。式 (17) ~ (24) を式 (29) ~ (31) に代入して面の寄与分の総和 σ_i^* を求めると次式が得られる。

$$\sigma_1^* = \mu(a_{11} + a_{12}) = r_0 G^2 (n_0^2 - 1) \cos(\Phi_1) \sin^2(\Phi_1) \quad (32)$$

$$\sigma_2^* = \mu(a_{21} + a_{22}) = 0 \quad (33)$$

$$\sigma_3^* = \mu(a_{31} + a_{32}) = r_0 G^2 (n_0^2 - 1) \cos^3(\Phi_1) \quad (34)$$

$$\sigma_4^* = \mu(a_{41} + a_{42}) = 0 \quad (35)$$

$$\sigma_5^* = \mu(a_{51} + a_{52}) = 0 \quad (36)$$

絞りに対して対称な光学系のため球面収差 ($i=1$) と非点収差 ($i=3$) の項以外は1面と2面で符号が反対になりキャンセルされる。

一方, 媒質 ($j=2$) の寄与 $a_1^* \sim a_5^*$ は, j を省略して

$$a_1^* = \frac{1}{2} \mathcal{V} (N_0 y_a v_a^3) + \int \left[4N_2 y_a^4 + 2N_1 y_a^2 v_a^2 - \frac{1}{2} N_0 v_a^4 \right] dz \quad (37)$$

$$a_2^* = \frac{1}{2} \mathcal{V} (N_0 y_a v_a^2 v_b) + \int \left[4N_2 y_a^2 y_b + N_1 y_a v_a (y_a v_b + y_b v_a) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} N_0 v_a^2 v_b \right] dz \quad (38)$$

$$a_3^* = \frac{1}{2} \mathcal{V} (N_0 y_a v_a v_b^2) + \int \left[4N_2 y_a^2 y_b^2 + 2N_1 y_a y_b v_a v_b - \frac{1}{2} N_0 v_a^2 v_b^2 \right] dz \quad (39)$$

$$a_4^* = \lambda^2 \int \left(\frac{N_1}{N_0^2} \right) dz \quad (40)$$

$$\lambda = N_0 [y_a v_b - y_b v_a] \quad (41)$$

$$a_5^* = \frac{1}{2} \mathcal{V} (N_0 y_a v_b^3) + \int \left[4N_2 y_a y_b^3 + N_1 y_b v_b (y_a v_b + y_b v_a) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} N_0 v_a v_b^3 \right] dz \quad (42)$$

と表される。

ここで, $\mathcal{V} A = A_{j+1} - A_j$, 積分は j 面から $j+1$ 面に至る間の範囲を行う。媒質中の転送マトリクスは式 (43) で与えられる。

$$\begin{bmatrix} y(z) \\ v(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gz) & \frac{1}{g} \sin(gz) \\ -g \sin(gz) & \cos(gz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(0) \\ v(0) \end{bmatrix} \quad (43)$$

Helmholz-Lagrange invariant は

$$\lambda = -r_0 n_0 G \quad (44)$$

である。式 (17) ~ (24) の初期条件の下で式 (43) を用いて媒質中の追跡を行うが **Fig. 5** に示すように媒質の真ん中を原点にする座標変換を行うと, 積分範囲は $Z=0 \rightarrow Z_0$ から $\Phi = -\left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi\right) \rightarrow +\left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi\right)$ にな

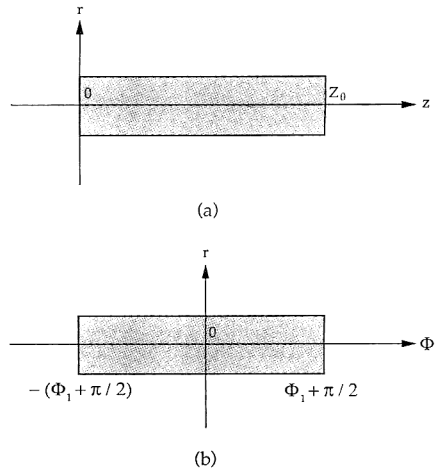


Fig. 5 Introducing new coordinate system for integrations. (a) Old coordinate, (b) New coordinate.

る。媒質中での各光線の高さと傾きは式(45)~(48)で与えられる。

$$y_a = -r_0 \sin(\Phi) \tag{45}$$

$$y_b = -r_0 \cos(\Phi) \tag{46}$$

$$v_a = -G \cos(\Phi) \tag{47}$$

$$v_b = G \sin(\Phi) \tag{48}$$

式(37)~(42)は偶関数と奇関数に分類でき、偶関数 $\int \sin^{2n}(\varphi) \cos^{2m} \varphi d\varphi$, ($n, m=0, 1, 2$) 以外の奇関数の積分がゼロになる性質を利用して以下の結果を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_1^* = \mu a_1^* = G^2 r_0 \left[\cos(\Phi_1) \sin^2(\Phi_1) \right. \\ \left. + \frac{1}{\sin(\Phi_1)} \left\{ \left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi \right) - h_4 \left[\frac{\sin(4\Phi_1)}{8} \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \sin(2\Phi_1) + \frac{3}{2} \left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi \right) \right] \right\} \right] \tag{49} \end{aligned}$$

$$\sigma_2^* = \mu a_2^* = 0 \tag{50}$$

$$\begin{aligned} \sigma_3^* = \mu a_3^* = G^2 r_0 \left\{ \cos^3(\Phi_1) + \frac{h_4}{2 \sin(\Phi_1)} \right. \\ \left. \times \left[\frac{\sin(4\Phi_1)}{4} - \left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi \right) \right] \right\} \tag{51} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_4^* = \mu a_4^* = G^2 r_0 \frac{1}{\sin(\Phi_1)} \left[\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi \right] \\ \sigma_5^* = \mu a_5^* = 0 \tag{53} \end{aligned}$$

なお、ここで注意すべき結果はレンズ長が以下の関係にあるときはすべて正立等倍像を形成するが、3次収差係数 $\sigma_1^*, \sigma_3^*, \sigma_4^*$ つまり、球面収差と非点収差、ペッツバル和は媒質長の増加に合わせて大きくなり像の劣化をまねく。

$$gZ_0 = 2 \left(\Phi_1 + \frac{\pi}{2} + n\pi \right), \quad n=0, 1, 2, \dots \tag{54}$$

以上の結果より、面の寄与分(式(32)~(36))と媒質の寄与分(式(49)~(53))が解析的に求まった。さらに、各係数を $\hat{\sigma}_i^* = \frac{\sigma_i^*}{G^2 r_0}$, $\hat{\sigma}_i^* = \frac{\sigma_i^*}{G^2 r_0}$ と規格化した規格化収差係数の符号等を表にまとめると **Table 1** のようになる。 h_4 をパラメータとして各規格化収差係数の変化

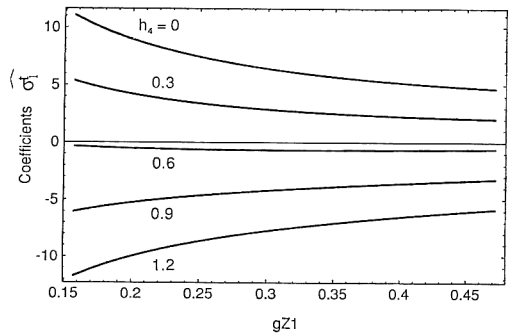


Fig. 6 Normalized spherical aberration coefficients of medium contribution vs. gZ_1 .

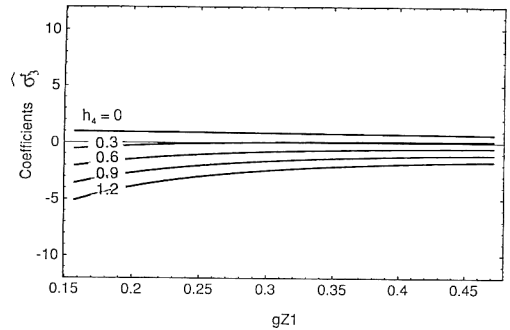


Fig. 7 Normalized astigmatism aberration coefficients of medium contribution vs. gZ_1 .

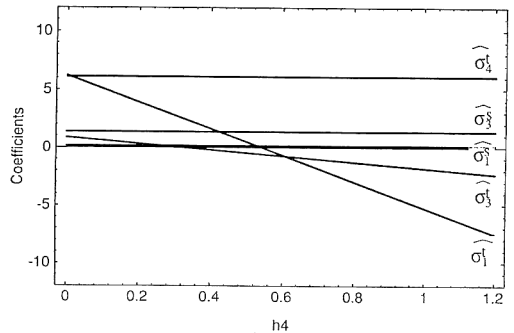


Fig. 8 All residual normalized aberration coefficients vs. h_4 ($gZ_1=0.1\pi$).

Table 1 3rd order coefficients.

Aberrations	Surface contributions			Transfer contribution	Total
	1st	2nd	Sub total		
Spherical	μa_{11}	μa_{11}	$2\mu a_{11}$	μa_1^*	$2\mu a_{11} + \mu a_1^*$
Coma	μa_{21}	$-\mu a_{21}$	0	0	0
Astigmatism	μa_{31}	μa_{31}	$2\mu a_{31}$	μa_3^*	$2\mu a_{31} + \mu a_3^*$
Petzval	0	0	0	μa_4^*	μa_4^*
Distortion	μa_{51}	$-\mu a_{51}$	0	0	0

を Fig. 6~8 に示す. Fig. 6~8 より規格化収差係数は以下の結果を得る.

- (1) レンズ長の増加または共役長の減少に合わせて単調減少する.
- (2) 面の寄与分は媒質の寄与分に比べて十分小さい.
- (3) 屈折率の4次の係数 h_4 の変化に対しては球面収差が敏感に変化する. これは, h_4 が均質媒質レンズ系の非球面項に相当することに起因する.
- (4) h_4 の変化に対して非点収差成分も変化するがペッツバル和は媒質のパワーに依存するのみであり h_4 に対しては一定である.

4. 横 収 差

規格化収差係数を横収差を表す式 (25), (26) に代入すると, スケールファクタ r_0 と屈折率差を表す G を共通項として整理され以下の式を得る.

$$\Delta x = G^2 r_0 [(\delta_1^i + \delta_1^t) \rho^3 \sin(\varphi) + (\delta_3^s + \delta_3^t + \delta_4^t) \hat{Y}^2 \rho \sin(\varphi)] \quad (55)$$

$$\Delta y = G^2 r_0 [(\delta_1^i + \delta_1^t) \rho^3 \cos(\varphi) + (3\delta_3^s + 3\delta_3^t + \delta_4^t) \hat{Y}^2 \rho \cos(\varphi)] \quad (56)$$

Fig. 9, 10 は式 (55)~(56) を用い, 口径食を考慮した各規格化像高における横収差図である. Fig. 9 は SLA 12 相当 ($G=0.12$, $Q=0.2$, $r_0=0.5$ mm) の場合の横収

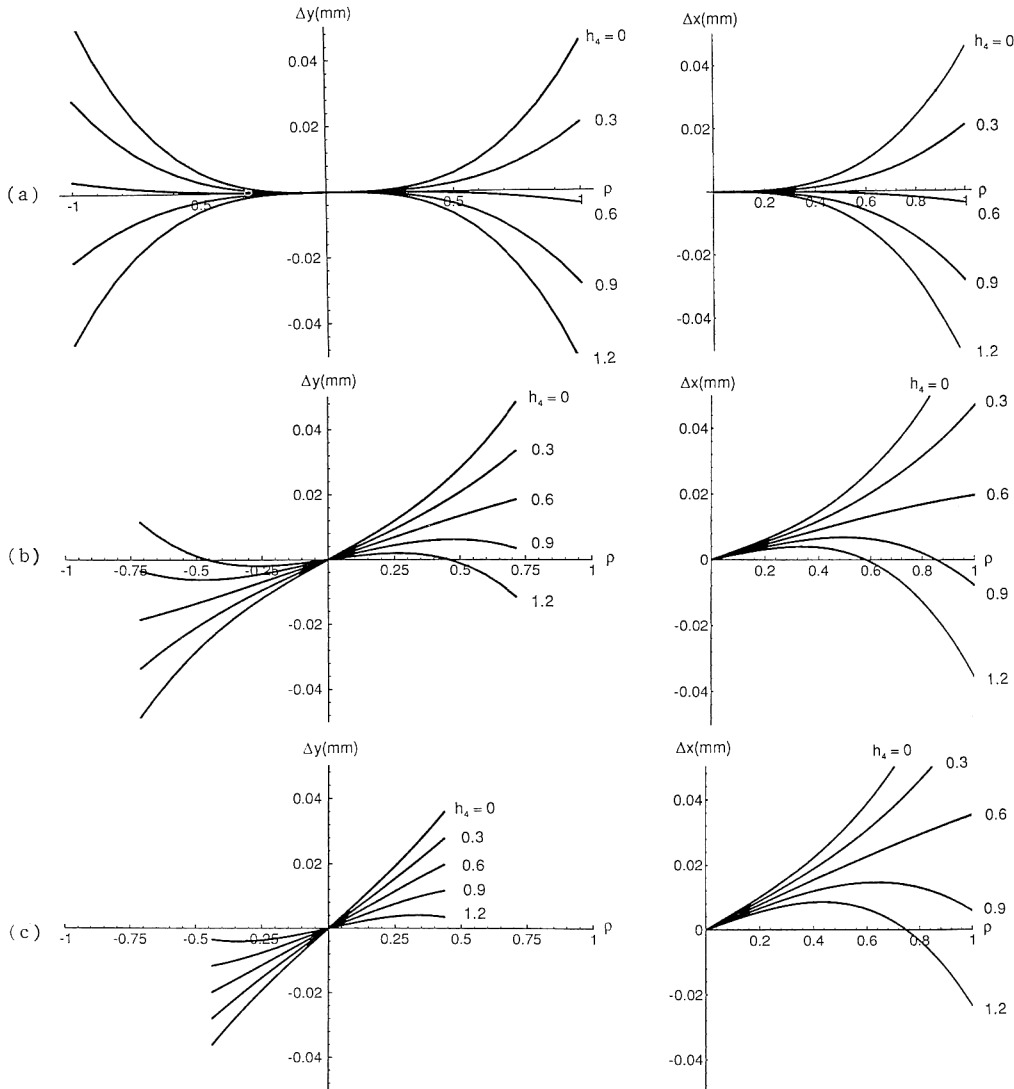


Fig. 9 Image ray errors of $G=0.12$. (a) $\hat{Y}=0$, (b) $\hat{Y}=0.7$, (c) $\hat{Y}=0.9$.

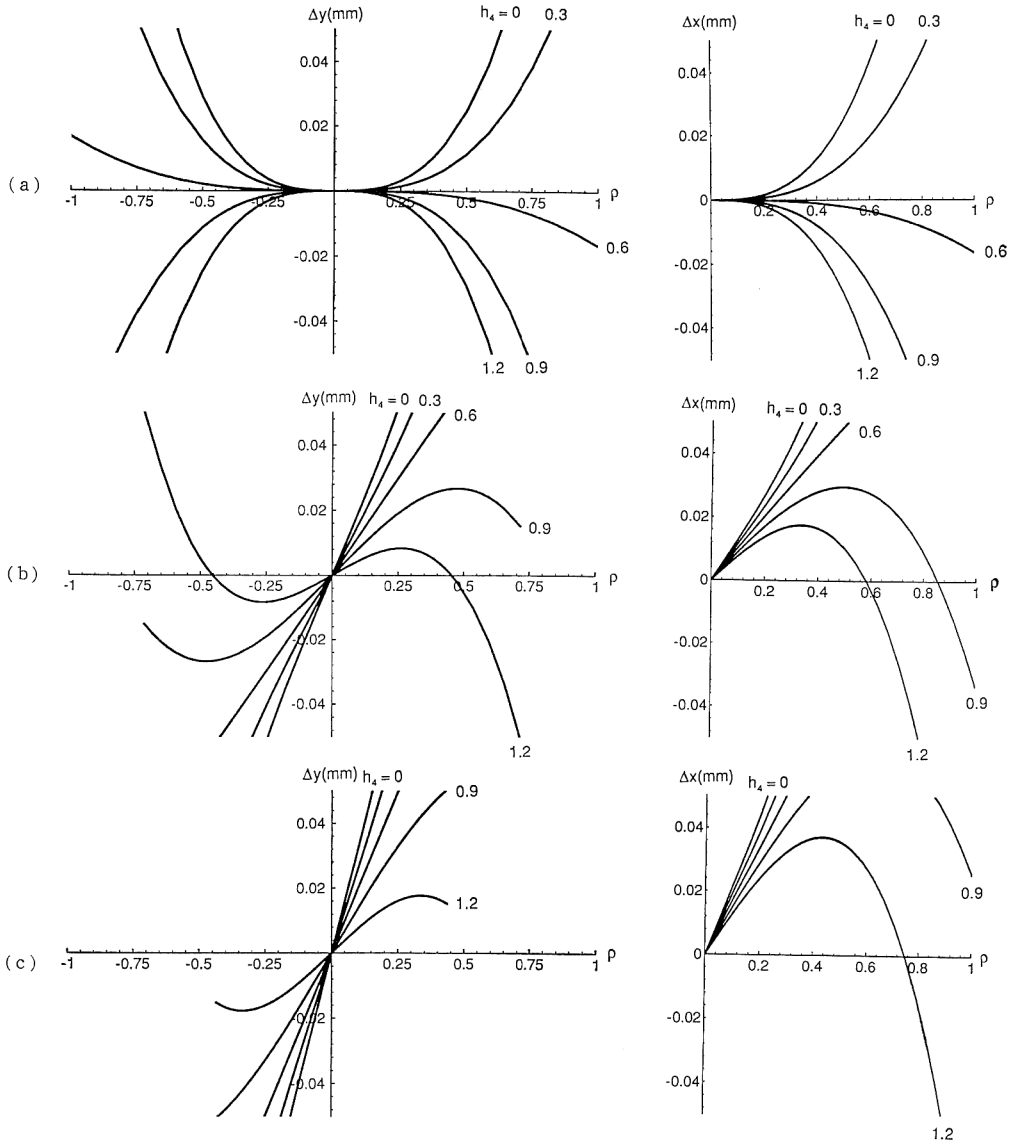


Fig. 10 Image ray errors of $G=0.25$. (a) $\hat{Y}=0$, (b) $\hat{Y}=0.7$, (c) $\hat{Y}=0.9$.

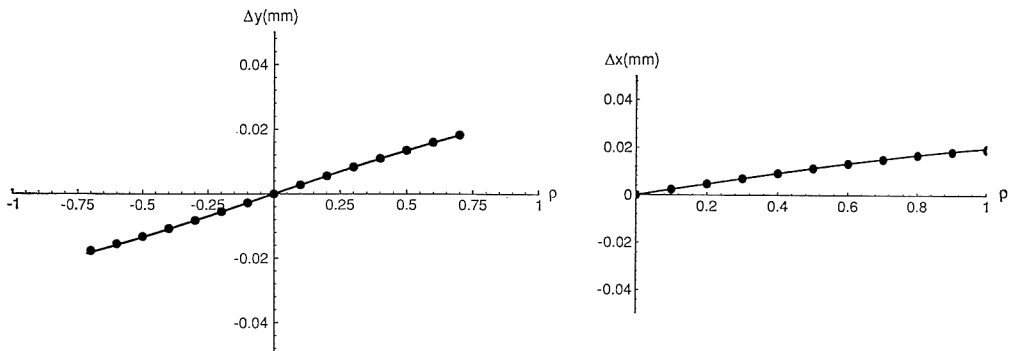


Fig. 11 Calculation image ray errors for the 3rd order analysis (solid curve) and real ray trace (dots). ($n_0=1.6$, $G=0.12$, $r_0=0.5$, $Q=0.2$, $h_4=0.6$, $Y_0=0.7 Y_{\text{max}}$)

差を規格化像高 $\hat{Y}=0, 0.7, 0.9$ について h_4 をパラメータとして計算したものである。Fig. 10 は SLA 20 相当 ($G=0.25, Q=0.2, r_0=0.5$ mm) の場合である。この結果以下の点が明らかになる。

- (1) 式 (55), (56) よりわかるように画角に相当する G が大きくなると 2 乗のファクターで急速に像が劣化する。
- (2) 媒質の球面収差と像面湾曲の項が支配的である。
- (3) 球面収差成分を負にもってくと像を劣化させる最大の項であるペッツバル和の項をある程度キャンセルできる。

最後に 3 次近似の精度を評価するため光線方程式を数値的に解いた結果との比較を Fig. 11 に示す。3 次近似で十分よい精度が得られている。

5. ま と め

正立等倍像を結ぶ半径方向屈折率分布型レンズアレイのレンズ単体について、瞳形状と、規格化された 3 次の収差係数をそれぞれ解析的に求めた。各収差係数をもとに面と媒質の寄与割合が明らかになり全体として見通しのよい評価が行える。この結果を用いて像を劣化させる主要因を明らかにした。今後、これらの計算式を用いれば汎用のレンズ設計ソフトウェアを用いることなく簡単な式でレンズの評価が行え、容易にアレイ状レンズの解析が可能になる。

日本板硝子中央研究所北野一郎顧問他関係各位に感謝します。

文 献

- 1) H. Kita, I. Kitano, T. Uchida and M. Furukawa: "Light-focusing glass fibers and rods," J. Am. Ceram. Soc., **54** (1971) 321.
- 2) I. Kitano, K. Koizumi, H. Matsumura, T. Uchida and M. Furukawa: "A light-focusing fiber guide prepared by ion-exchange techniques," Jpn. J. Appl. Phys. (Suppl.), **39** (1970) 63.
- 3) T. Uchida, M. Furukawa, I. Kitano, K. Koizumi and H. Matsumura: "Optical characteristics of a light-focusing fiber guide and its applications," IEEE J. Quantum Electron., **QE-6** (1970) 606.
- 4) M. Kawazu and Y. Ogura: "Application of gradient-index fiber arrays to copying machines," Appl. Opt., **19** (1980) 1105.
- 5) 小宮一三, 歙崎 実, 簀手喜男, 山下敏夫: "A 4 判密着形イメージセンサ", 信学会技術研究報告, **IE 80-72** (1980) 73.
- 6) 立石和義, 池田泰久, 小谷進太郎: "LED プリンタ", 信学会技術研究報告, **IE 80-71** (1980) 65.
- 7) Selfoc is a registered trade name of the Nippon Sheet Glass Co., Ltd., of Osaka Japan.
- 8) J. Rees and W. Lama: "Reduction/enlargement gradient-index lens array," Appl. Opt., **23** (1984) 1715.
- 9) J. Forer: "Third order aberration analysis of gradient index array," Paper for the Degree of Master of Science, Univ. of Rochester (1983).
- 10) H. A. Buchdahl: *Optical Aberration Coefficients* (Dover, New York, 1968).
- 11) K. Matsushita and M. Toyama: "Unevenness of illuminance caused by gradient-index fiber arrays," Appl. Opt., **19** (1980) 1070.
- 12) P. J. Sands: "Third-order aberrations of inhomogeneous lenses," J. Opt. Soc. Am., **60** (1971) 1436.