

アプラナティック単レンズの偏心収差

丸山 晃 一

ペンタックス株式会社 〒174-8639 東京都板橋区前野町 2-36-9

Wavefront Aberration Caused by Fabrication Errors in an Aplanatic Single Lens

Koichi MARUYAMA

PENTAX Corporation, 2-36-9 Maeno-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174-8639

This study discusses the wavefront aberration caused by fabrication errors (lens thickness, surface decentration, tilt) in an aplanatic single lens. Equations have been derived by using a model that considers the fabrication errors as an additional thin optical film on the lens surface. The aberrations calculated with this model by using only its 1st surface data (radius, aspheres) and refractive index agreed very well with what were obtained by ray tracing method using the whole lens data. Furthermore, the condition has been obtained with which no 3rd order aberration is caused by errors.

Key words: aspherical lens, decentration, tilt, optical disk

1. はじめに

光ディスク用対物レンズのような両面非球面の単レンズは、球面収差とコマ収差を補正した、いわゆるアプラナティックレンズにするためには自由度が余り、同じ屈折率、同じ厚さでも、第1面、第2面のパワー配分を変えた異なる形状の設計が可能である¹⁾。その中から、実用的なレンズを得るため、製造時の収差変化を考慮して設計が行われる^{2,3)}。近年のレンズ設計ソフトウェアにとって2面非球面レンズの設計は容易であるが、自動設計だけではレンズの収差補正の限界や量産性向上の限界を知ることは難しい。微少な偏心の存在する光学系の三次収差論は松居により詳しい検討がされている⁴⁾が、光記録用レンズはNAが大きく、偏心によって瞳座標に対して高次の球面収差、コマ収差が大きく発生するため、その評価が必要となった。本報告では、特に両面非球面アプラナティック単レンズの第1面の形状と、製造時に起こりうる偏心誤差（レンズ厚さ誤差、2つの面の横ずれ、傾き）に起因する収差の関係を明確にし、さらに、求めた関係式から誤差感度がゼロになる三次収差レベルの解を導くことで、光ディスク用対物レンズとしての両面非球面単レンズの設計法、および性能の限界について論じる。

横ずれと傾きは、さらに第1面の横ずれ、第2面の横ず

れ、第1面の傾き、第2面の傾きに分けられるが、第2面横ずれによる収差は、第1面横ずれによる収差の-1倍であり、傾きについてはDVDでは一般に第2面が基準軸に対し傾かないようにレンズ取り付けが行われているため、本論文では第1面の偏心（面の光軸方向シフト、横ずれ、傾き）のみを議論する。なお、第2面の傾きによる収差は、第2面が傾いた系全体を傾き角だけ回転させたものと同じ収差になることから、偏心が十分に小さく全系でアプラナティックなレンズ系である場合、-(第1面傾きによる収差+レンズ厚さ×第1面横ずれによる収差+ディスク傾きによる収差)により算出できる。

本文中での軸の定義は、Fig. 1に示すように、光軸を x 軸、光軸に垂直な2つの軸を y 軸と z 軸、光軸からレンズ面上の点 $P(x, y, z)$ までの距離を $h = \sqrt{y^2 + z^2}$ とする。レンズの平行光入射側の面、第1面の形状は、面の光軸上での位置 O を基準として x 軸方向の偏位量 x を h の関数 $X(h)$ として定義する。レンズの厚さは d 、レンズ材料の屈折率を n 、空気の屈折率 n_0 を1、としている。また、収差表示には、入射瞳内の座標を y 方向を $\phi = 0$ とする方位角 ϕ と光軸からの距離 h の極座標表示を用いる。なお、本稿では、第1面に入射する光束が光軸に平行な無限系の場合のみを議論した。

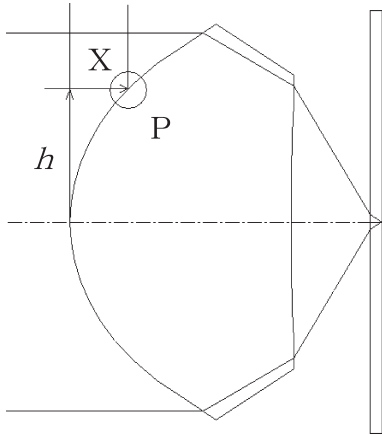


Fig. 1 Schematic configuration of objective lens and disk cover layer.

2. 計算モデル

Fig. 1 のレンズの第 1 面上の点 P に, Fig. 2 に示す薄膜状の厚さの誤差 Δd があると考え, この場合の光路長の変化を求める. 製造誤差は微量で, 1 本の光線が透過する経路の中では薄膜の x 軸方向の厚さは変わらないとみなすと, 偏心による面の変形は, 局所的に平行平板が付着している状態と等価になる.

光線の経路中に厚さ t の平行平板が θ 傾いて置かれた場合, 平行平板による光路長の付加量 ΔOPD は,

$$\begin{aligned} \Delta OPD &= t \{ -\cos\theta + \sqrt{(n^2 - \sin^2\theta)} \} \\ &= \Delta d \cos\theta \{ -\cos\theta + \sqrt{(n^2 - \sin^2\theta)} \} \end{aligned} \quad (1)$$

である.

ここに, 面形状式 $X(h)$ を h で微分した $X'(h)$ が

$$\tan\theta = X'(h) \quad (2)$$

であることを利用して式 (1) を変形すると

$$\Delta OPD = \Delta d [-1 + \sqrt{(n^2 + (n^2 - 1) X'^2)}] / (1 + X'^2) \quad (3)$$

となり, 光軸方向に厚み誤差 Δd がある場合に付加される光路長が, 厚み誤差量とその位置での面形状の微分 X' から求められる. 式 (3) をもとに, 面の光軸方向シフト, 面横ずれ (ディセンター), 面傾き (ティルト) による収差を求める.

3. 面の光軸方向シフト (レンズ厚さ誤差)

式 (3) は, Δd が面内のすべての箇所でも均一であると考えれば, 面の光軸方向シフトによる光路長増加量を示している. Δd が定数であったとしても, 面の傾き X' が h

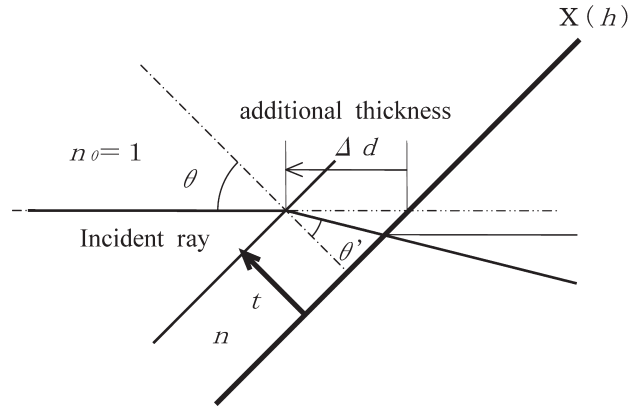


Fig. 2 Thin film model.

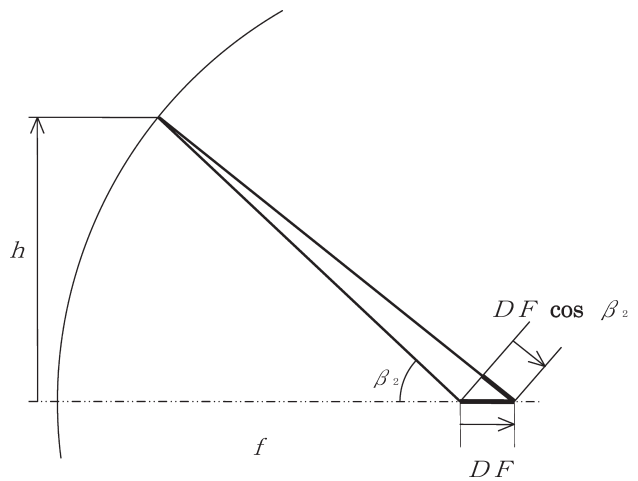


Fig. 3 Optical path difference by defocus.

の関数であり, h によって光路長付加量が異なるため収差が発生する. レンズ面全体が連続的に変形するので, 波面収差を評価する際には, 光軸上での光路長の増加分 ($= \Delta d (n-1)$) と, 波面収差評価の基準点 (焦点位置) の変化 (デフォーカス) による波面収差の付加分を差し引かなければならない. 式 (3) から, 光軸上の光路長増加分とレンズパワーの変化によるデフォーカスの影響を引いて -1 倍すると, 波面収差 WFA が得られる. レンズ厚さ変化によって発生するデフォーカス量 DF は, f を全系の焦点距離, X の 2 次微分を $X''(h)$ として, $c = X''(0)$ で与えられる第 1 面の近軸曲率を c として式 (4) となる.

$$DF = \Delta d f^2 \{ c^2 (n-1)^2 / n \} \quad (4)$$

評価基準点が変わったことによる波面収差は, レンズが正弦条件を満足していることを前提とすると, Fig. 3 に示す DF と $DF \cos \beta_2$ の差であり式 (5) となる.

$$DF \times [1 - \sqrt{1 - (h/f)^2}] \quad (5)$$

式 (4), 式 (5) から, デフォーカス付加分として差し引

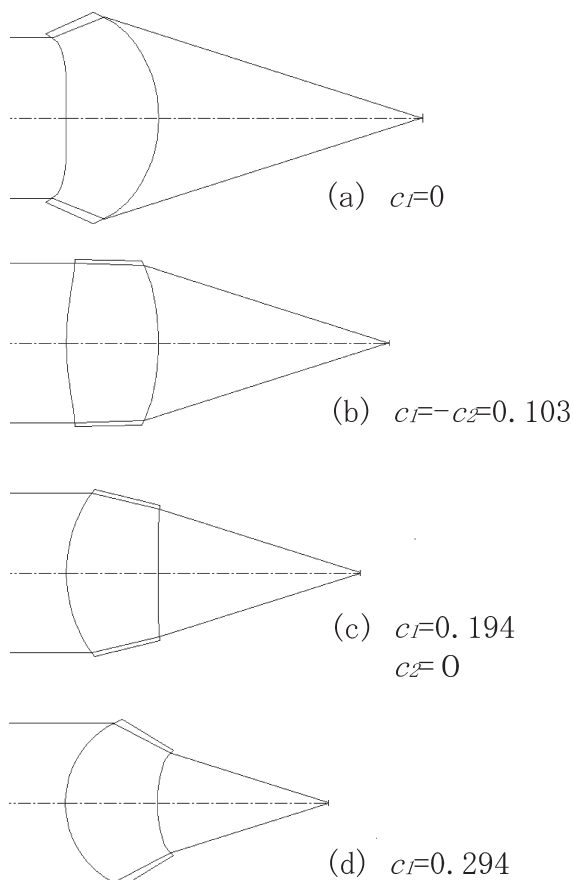


Fig. 4 Several configurations of aplanatic lenses ($f=10.0$, $NA=0.30$).

く量は式 (6) となり,

$$-\Delta df^2 c^2 (n-1)^2 \times [1 - \sqrt{1 - (h/f)^2}] / n \quad (6)$$

波面収差 WFA は式 (7) となる.

$$\begin{aligned} \text{WFA} = & -\Delta d \left(\frac{-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}}{1 + X'^2} \right) \\ & - (n-1) \\ & + f^2 c^2 (n-1)^2 [1 - \sqrt{1 - (h/f)^2}] / n \quad (7) \end{aligned}$$

面の光軸方向シフト収差発生感度 SS は式 (8) となる.

$$\begin{aligned} \text{SS}(h) = & - \left(\frac{-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}}{1 + X'^2} \right) \\ & - (n-1) \\ & + f^2 c^2 (n-1)^2 [1 - \sqrt{1 - (h/f)^2}] / n \quad (8) \end{aligned}$$

レンズの第 1 面の形状から光軸方向シフト発生感度が求められるということは、第 1 面の形状によって偏心感度をゼロにする可能性があることになる。アプラナティックレンズの設計では、高次の非球面項は球面収差と正弦条件を満足するために使われるため、偏心収差が全く発生しないように第 1 面の形状を決めてしまうと完全なアプラナティックレンズではなくなってしまふ。ここでは、アプラナティ

ックレンズのまま、低 NA で偏心収差が発生しないための条件を求める。

非球面の形状を表す関数 $X(h)$ を、レンズ設計によく使われる、円錐定数 κ , m 次の非球面係数 A_m を用いる式 (9) であるとして、式 (8) の $X'(h)$ に式 (10) を代入し h の 4 乗までの項で近似すると、式 (11) に示す低次のシフト感度 ss が求められる。

$$X(h) = ch^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa) c^2 h^2}] + \sum A_m h^m \quad (9)$$

$$X'(h) = ch / \sqrt{1 - (1 + \kappa) c^2 h^2} + \sum m A_m h^{(m-1)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{ss}(h) = & h^4 c (n-1)^2 [(\kappa c^3 + 8A_4) \\ & - 0.25\{c/f^2 - c^3(1+n^{-1})^2\}] / (2n) \quad (11) \end{aligned}$$

式 (11) の右辺が 0 になる場合、すなわち、

$$c = 0 \quad (12a)$$

$$\kappa c^3 + 8A_4 = 0.25\{c/f^2 - c^3(1+n^{-1})^2\} \quad (12b)$$

の 2 つの場合に、微少なレンズ厚さ変化に対し三次の球面収差が発生しないことが導かれる。

ここで、Fig. 4 に焦点距離 10 mm, 厚さ 3.5 mm, 開口数 (NA) = 0.30 で第 1 面の曲率半径を変えて設計したアプラナティックレンズの形状を示す。第 1 面の曲率 c_1 に対し連続的に解は得られる。Fig. 4 (a) は c_1 が 0, (b) は $c_1 = -c_2 = 0.103$, (c) は $c_1 = 0.194$, (d) は $c_1 = 0.294$ でバックフォーカスと第 2 面の r が等しいメニスカス形状である。これらのレンズのシフト感度 $ss(h)$ はそれぞれ $0.000000h^4$, $-0.000080h^4$, $0.000057h^4$, $0.000425h^4$ となっている。(a) が式 (12a) を満足する状態であり、(b) と (c) の間に式 (12b) を満足する状態がある。Fig. 5 に、レンズ厚さが 0.010 mm 厚くなった場合の波面収差図を示す。期待通り、(a) は NA 0.15 程度まで収差をほとんどたない。しかし、周辺部で急激に収差が増加している。形状を見ると、Fig. 4 (a) のように第 1 面のパワーが弱いレンズでは、第 1 面の周辺部は急激に負のパワーをもつ方向になり、急激な非球面成分の変化が球面収差を発生させていることが理解できる。一方、Fig. 4 (d) のように第 2 面のパワーが強くなる側では、周辺部で急激に正のパワーをもつ方向に変形しているのが特徴的であるが、厚さ変化に対する球面収差変化には形状変化は式 (7) のように X'^2 で利くため、Fig. 5 の球面収差は (a) も (d) も + 方向に変化している。レンズの開口数 (NA) は、第 2 面での全反射の発生、第 1 面への入射角が 90° に達する、レンズコバ厚がゼロになる、のどれかにより制限されるため、明るいレンズほど曲率の選択の幅は狭くなる。Fig. 4 (a) のよう

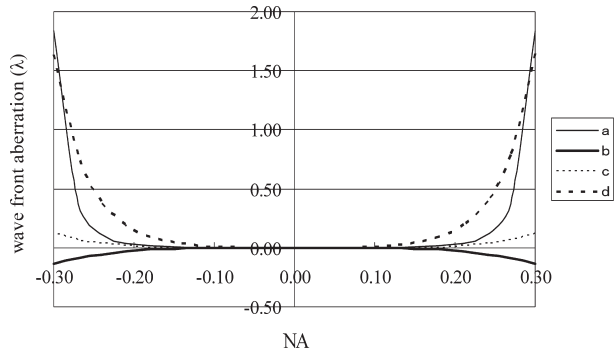


Fig. 5 Wavefront aberrations with surface shift of 0.01 mm.

な近軸曲率 c が 0 (式 (12a) を満足するレンズ) の場合, NA は第 2 面で全反射が発生することで制限され, CD 用の $NA=0.45$ の光線は通らない. したがって, 高 NA が必要とされる光ディスク用対物レンズでは, $c=0$ として光軸方向シフト感度をゼロにした設計を行うことは, 高 NA で厚さ変化による波面収差変化が大きくなるだけではなく, 実用上必要な NA を確保できないため, 光軸方向シフト感度をゼロにするには非球面に対応する必要がある.

4. 面の横ずれ

レンズ面の横ずれで発生する収差は, いわゆる軸上コマになる. 面が光軸に垂直な方向に横ずれしたとき, 光軸方向の厚さ誤差量 Δd は位置の関数となる. ここで, Fig. 6 に示すように, 面がずれる方向を y 方向 ($\phi=0$) にとり, 偏心率を Δy とすると, 偏心率 Δy の 2 乗以上の項は無視しうるものとして, 光軸方向厚さ誤差量 Δd は

$$\begin{aligned} \Delta d &= \Delta y dX/dy = \Delta y X'(y/h) \\ &= \Delta y X' \cos \phi \end{aligned} \quad (13)$$

であり, このときの光路長変化 ΔOPD は式 (14) となる.

$$\Delta OPD = \Delta y X' \cos \phi [-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}] / (1 + X'^2) \quad (14)$$

ここで, レンズの横ずれに起因するレンズ厚さの変化は弱い楔状で, 平行平板とは異なる. そのため $[-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}] / (1 + X'^2)$ の項の X' と実際の光線が入射する点での傾きが異なることでも誤差をもつが, この項の寄与はレンズ面の傾きが 0 度~70 度まで変化しても 0.5 倍程度に変化するのみであるので, 傾き変化が 0.1 度もない製造誤差を考えると, 平行平板で近似できる.

横ずれの場合, 近軸でデフォーカス成分は存在しない

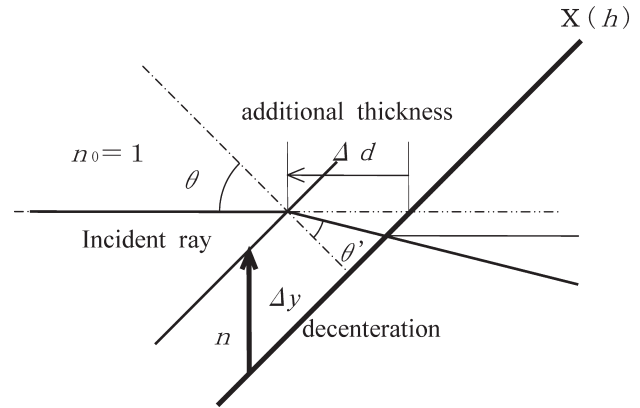


Fig. 6 Decentered surface.

が, 光路長変化から波面収差量 WFA を得るためには, 光路長の付加量から波面の傾き (ティルト) 成分の影響を差し引く必要がある. レンズがアプラナティックレンズであると仮定しているため, 第 1 面入射前の波面の傾きは収差を発生させないので, 単純に波面の傾き成分 $\Delta y c y (n-1)$ を引く.

$$\begin{aligned} WFA &= -\Delta y (X' \cos \phi [-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}] / \\ &\quad (1 + X'^2) - c y (n-1)) \\ &= -\Delta y (X' [-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}] / (1 + X'^2) \\ &\quad - c h (n-1)) \cos \phi \end{aligned} \quad (15)$$

面の横ずれ収差発生感度 DS は式 (16) となる.

$$\begin{aligned} DS(h) &= - (X' [-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2 - 1) X'^2\}}] / (1 + X'^2) \\ &\quad - c h (n-1)) \cos \phi \end{aligned} \quad (16)$$

ここでも, 非球面の形状を式 (9) として, 式 (16) を h の 3 乗までの項で近似し, 近軸の横ずれ感度 ds を求めると式 (17) が得られる.

$$ds(h) = -h^3 \{0.5c^3 (\kappa + 1/n) + 4A_4\} (n-1) \cos \phi \quad (17)$$

横ずれ感度には三次収差レベルで非球面の 4 乗の項が現れることと, 式 (16) の最初の X' 項より, 高次非球面成分が直接的に高次偏心コマに現れることがわかる. 横ずれ感度ゼロの条件は式 (18) となり,

$$\kappa c^3 + 8A_4 = -c^3/n \quad (18)$$

第 1 面を式 (18) を満足する非球面として, 球面収差, コマ収差を補正すれば, 三次収差レベルで面の横ずれコマ収差が発生しないレンズが得られる. $c \neq 0$ の場合, 三次収差の設計では, 4 次の非球面成分を円錐定数 κ にもたせても 4 次の係数としてもたせても同じ効果が得られることか

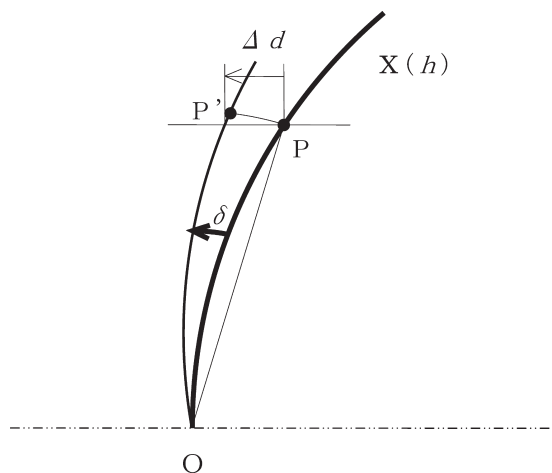


Fig. 7 Tilted surface.

ら、非球面係数 A_4 をゼロに決めると

$$\kappa = -1/n \quad (19)$$

というきわめて単純な式に至る。すなわち、レンズの屈折率を決めれば、レンズ厚さ、ディスク厚さなどによらず円錐定数 κ が固定した値になる。

光ディスク用対物レンズは、一般に Fig. 1 に示したレンズのように、ディスクの記録面保護層の平行平板部分を含んで収差補正される。そこで、絞りが第 1 面にある光ディスク用レンズの収差係数をディスク込みで求めると、第 1 面の非球面係数 κ , A_4 と c , 第 2 面の非球面係数 κ_2 , A_{42} , 第 2 面の曲率を c_2 , レンズ厚さを d , ディスクの屈折率を n_D , 厚さを t として球面収差係数 I, コマ収差係数 II は式 (20), 式 (21) となる。

$$\begin{aligned} I = & c^2(n+2)/n - c(2n+1)/(n-1) + n^2/(n-1)^2 \\ & + d\{c^4(n-1)^2/n^3 - c^3(n+2)(n-1)/n^2 \\ & + c^2(2n+1)/n - cn/(n-1)\} + (8A_4 + \kappa c^3)(n-1) \\ & + \{1 - dc(1-1/n)\}^4(8A_{42} + \kappa_2 c_2^3)(1-n) \\ & + t(1-n_D^2)/n_D^3 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} II = & c(1+1/n) - n/(n-1) + d[-c^3(n-1)/n^3 \\ & + c^2(n+2)/n^2 - c(2n+1)/\{n(n-1)\} + n/(n-1)^2] \\ & + \{1 - dc(1-1/n)\}^3 d/n(8A_{42} + \kappa_2 c_2^3)(1-n) \\ & + \{t(1-n_D^2)/n_D^3\}(d-n)/\{n-dc(n-1)\} \end{aligned} \quad (21)$$

式 (20), 式 (21) が同時にゼロになる条件で第 2 面非球面項を消去すると、アプラナティックレンズのレンズ厚さ d と κ , A_4 , c , n_D , t との関係が導かれる (式 (22))。

$$\begin{aligned} d = & \{c(n+1)n^2 - n^4/(n-1) + tn^3(n_D^2-1)/(n_D^3)\} / \\ & \{c(n-1) + c^2(n-1)(n+1)n - cn^3 \\ & + (8A_4 + \kappa c^3)(n-1)n^2\} \end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) に式 (18) を代入し、所望のレンズ厚さ d が得られる条件で曲率 c を決定、その後第 1 面の 6 次以上の高次非球面係数と第 2 面の非球面を最適化することで、低次の横ずれコマ収差をゼロに保った設計が容易にできる。

5. 面の傾き (ティルト)

Fig. 7 のように、面の傾きが z 軸を中心とする回転であるとして、波面収差の発生感度を求める。ここでも、製造誤差が微少である仮定から δ の 1 乗項のみで議論すると、 z 軸を中心回転する面の傾きで発生する光軸方向の厚さ変化量 Δd は、面上の点 P の位置を (X, y, z) , 回転角度を δ (rad.) として、 z 軸から点 P までの距離 OP が

$$OP = \sqrt{(X^2 + y^2)} \quad (23)$$

点 P から δ 倒れた後の点 P' までの距離 PP' は

$$PP' = OP \times \delta \quad (24)$$

光軸方向の厚さ変化量 Δd は、PP' の x 方向成分 + PP' の y 方向成分 \times 面の傾きによる x 方向成分、であるから式 (25) となる。

$$\begin{aligned} \Delta d = & OP \times \delta \times \{y/\sqrt{(X^2 + y^2)}\} \\ & + OP \times \delta \times \{X/\sqrt{(X^2 + y^2)}\} \times dX/dy \\ = & \delta(y + X dX/dy) \\ = & \delta(h + XX') \cos \phi \end{aligned} \quad (25)$$

式 (25) の場合の光路長付加を求め、光軸上の波面の傾き成分 (= $\delta h(n-1) \cos \phi$) を除いた式 (26) が、面ティルト時の波面収差となる。

$$\begin{aligned} WFA = & -\delta((h + XX')[-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2-1)X'^2\}}] / \\ & (1 + X'^2) + h(n-1)) \cos \phi \end{aligned} \quad (26)$$

面のティルトに対する収差発生感度 TS は式 (27) となり、横ずれの場合と同様に、 h の 3 乗までの項でティルト感度を近似 (式 (28)) すると、三次収差レベルで面のティルトに対し収差変化がない条件、式 (29) が得られる。

$$\begin{aligned} TS = & -((h + XX')[-1 + \sqrt{\{n^2 + (n^2-1)X'^2\}}] / \\ & (1 + X'^2) + h(n-1)) \cos \phi \end{aligned} \quad (27)$$

$$ts = -h^3 c^2 (n-1) / (2n) \cos \phi \quad (28)$$

$$c^2 = 0 \quad (29)$$

式 (28) には、横ずれ変化の場合の式 (17) と異なり非球面項の寄与がない。面のティルトでは非球面係数 A_4 , κ に依存せず曲率の 2 乗に比例したコマが発生するため、 c を

Table 1 Lens data.

Example 1						
surface	r	$c (=1/r)$	d	n		
1	2.209	0.4527	2.800	1.54052		
2	-5.146	-0.1943				
3	infinite	0.0000	0.600	1.57975	disk	
4	infinite	0.0000				
asp	κ	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}
1	-0.5679	0.0000E+00	9.3306E-05	-2.7946E-04	8.1793E-05	-1.2494E-05
2	0.0000	2.4254E-02	-1.2185E-02	5.1095E-03	-1.5304E-03	1.9095E-04
Example 2						
surface	r	$c (=1/r)$	d	n		
1	2.292	0.4363	2.800	1.54052		
2	-4.598	-0.2175				
3	infinite	0.0000	0.600	1.57975	disk	
4	infinite	0.0000				
asp	κ	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}
1	-0.6490	0.0000E+00	1.4706E-04	-4.6971E-04	1.3467E-04	-2.0139E-05
2	0.0000	2.1521E-02	-1.2546E-02	5.1925E-03	-1.4484E-03	1.6591E-04
Example 3						
surface	r	$c (=1/r)$	d	n		
1	2.157	0.4636	2.800	1.54052		
2	-5.608	-0.1783				
3	infinite	0.0000	0.600	1.57975	disk	
4	infinite	0.0000				
asp	κ	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}
1	-0.5242	0.0000E+00	1.3315E-05	-1.2473E-04	3.7437E-05	-6.2933E-06
2	0.0000	2.6187E-02	-1.1180E-02	4.5878E-03	-1.4465E-03	1.9973E-04

ゼロに近づけることだけがティルト感度を下げるのに有効である。前述のように、レンズ厚さの厚いレンズほど曲率を小さくできティルト感度も若干小さくなるが、 $c=0$ では高NAレンズを作れない。結局、面傾きについては、レンズ成型用金型の構造を面の倒れが発生しないように作ることになる。非球面形状の1次微分が直接コマにはならないということは、面傾きによるコマは横ずれによるものより高次の成分が少ないという設計実感と一致する。

ここまでの偏心収差の導出では全系で収差補正されている仮定をしているが、第1面より後の系の構成は何も限定していない。つまり、3つの偏心収差についての検討結果は、単レンズに対しても光ディスク用レンズのように平行平板を含んで収差補正されたレンズであっても、第1面の偏心について成り立つものである。

6. 誤差感度の検証と設計例

以下に、DVD用対物レンズを想定した波長658 nmに

対し、焦点距離3.30 mm、 $NA=0.60$ のレンズの設計例を示す。Table 1に設計例の数値データを、Fig. 8, 9, 10にレンズ厚誤差0.01 mm、第1面の横ずれ0.005 mm、第1面の傾き0.001 rad.がある場合のy断面内の光線の波面収差を示す。また、Table 2に実光線追跡で求めた波面収差RMS値を示す。グラフの横軸は、第1面への光線入射高さを射出側のNAに換算したものとしている。実線は本検討によって得られたシフト、横ずれ、傾き感度に変化量を掛け、波長 λ で割った値であり、プロットは実光線追跡によって得たものである。

Example 1は面の光軸方向シフト感度を低下すべく式(12)を満足するDVD対物レンズ仕様のレンズ、Example 2は低次横ずれ感度がゼロになるよう式(19)を満足する設計である。偏心感度を求める際に、変化量の2乗比例項の寄与を無視したが、計算値比較のように、製造誤差の寄与の検討範囲内では十分な精度をもっている。

近似式による誤差感度低減については、Example 1の

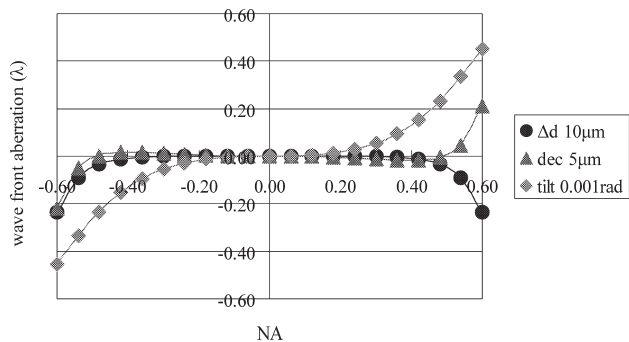


Fig. 8 Wavefront aberrations of Example 1 with figure errors.

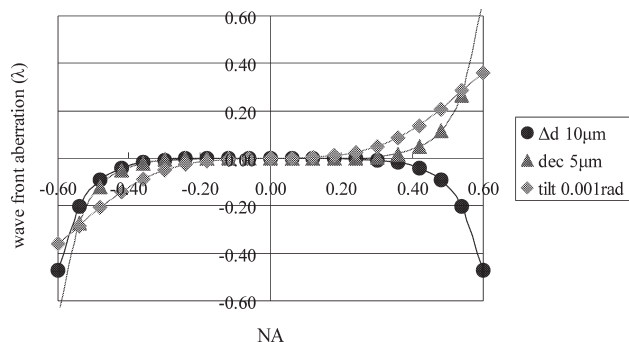


Fig. 9 Example 2.

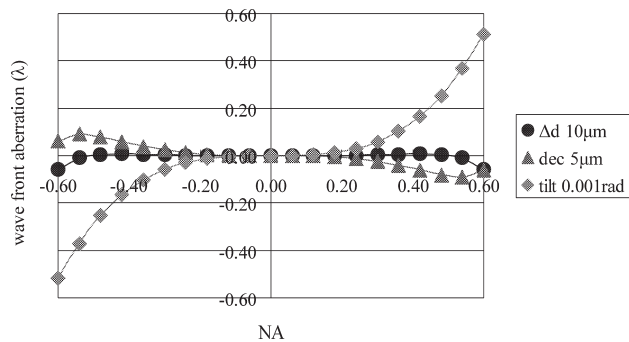


Fig. 10 Example 3.

光軸方向シフト感度は NA 0.40 相当まではほぼゼロであるが、それより高 NA になると高次の球面収差が現れている。Example 2 の横ずれ感度は NA 0.30 相当まで期待通りにほぼゼロであるが、高 NA になると高次のコマ収差が現れ、Example 1 よりも横ずれによる収差が大きくなる結果となった。 NA が 0.4 以下のコリメートレンズなどでは、近似式から得られた偏心感度低減条件を満足すればよいが、光ディスクの対物レンズに用いられる高 NA レンズでは、高次収差成分をキャンセルする必要があることがわかる。横ずれ収差を低減するために式 (17) の $-h^3 \{0.5c^3(\kappa+1/n)+4A_4\}(n-1)$ を負にして低次コマを残すよう κ を変え、曲率 c を大きくして、横ずれ感度を改善

Table 2 RMS value of the wavefront aberrations.

	Shift 0.010 mm	Decenter 0.005 mm	Tilt 0.001 rad.
Example 1	0.031	0.037	0.055
Example 2	0.056	0.097	0.043
Example 3	0.014	0.010	0.063

λ RMS.

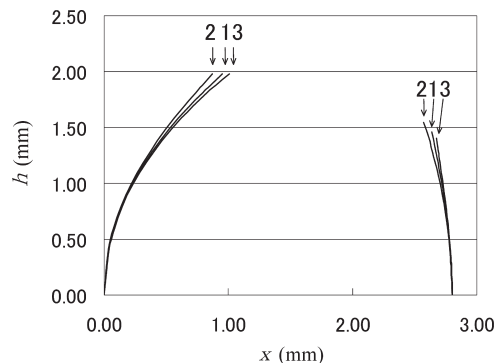


Fig. 11 Comparison of lens surface shapes.

した設計が Example 3 である。傾き感度は若干増加するが、光軸方向シフト感度もよいバランスとなっている。

Fig. 11 にレンズ面の形状の比較図を示す。図中の番号は Example の番号と対応する。偏心感度が変化しても形状の差はわずかであることがわかる。

さらに傾き感度も低減するには、曲率 c を小さくしなければならないが、式 (22) で非球面項を固定した場合、曲率 c を小さくするとレンズ厚さが厚くなることと、屈折率を高くすれば曲率 c を小さくしても同じレンズ厚さを維持できるようになることから、レンズ厚さを厚くするか、高屈折材料を用いることが有効である。実際に DVD より高い NA のブルーレイディスク用の対物レンズでは、DVD で使われている樹脂より高屈折率のガラス材料を用い、焦点距離より厚いレンズ厚とする設計が行われている⁵⁾。

7. ま と め

アplanatic単レンズの面の偏心によって発生する波面収差を、薄膜による光路長付加のモデルから求めた。第 1 面の形状と屈折率から求められた偏心収差は、微小な変化に対して、瞳座標に対する低次の収差だけではなく、光記録用レンズの評価に十分に使える NA 0.6 以上の領域まで、光線追跡によって得られる結果と非常によく一致した。さらに、偏心収差の近似式を求め、低 NA で偏心収差が発生しないための第 1 面形状の条件を導き、おのおのの誤差に対するレンズ設計、加工上の対応の指針を得た。

文 献

- 1) 吉田正太郎：“特に口径比の大きい非球面アプラナート・レンズに関する計算”，東北大学科学計測研究所報告，**6** (1958) 122-226.
- 2) 久保田重夫：“光ディスク用アプラナティック非球面レンズの設計”，光学技術コンタクト，**23** (1985) 471-475.
- 3) 田中康弘，山形道弘，笹埜智彦：“アプラナティック単レンズの設計と光ディスク光学系への応用”，光学，**27** (1998) 720-726.
- 4) 松居吉哉：偏心の存在する光学系の3次の収差論（日本オプトメカトロニクス協会，1990）.
- 5) M. Itonaga, F. Ito, E. Tanaka and T. Tomita: “Investigation of the general design principle of a single lens and the development of a new NA=0.85 single lens,” Jpn. J. Appl. Phys., **42** (2003) 875-879.