

アプランティック単レンズの設計と光ディスク光学系への応用

田中 康弘・山形 道弘・笹埜 智彦

松下電器産業株式会社 AVC 商品開発研究所 〒571-8501 門真市大字門真 1006

Lens Design for Aplanatic Singlet and Its Application to Optical Disk System

Yasuhiro TANAKA, Michihiro YAMAGATA and Tomohiko SASANO

AVC Products Development Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 1006, Kadoma, Kadoma 571-8501

An objective lens for optical disk system satisfies aplanatic condition. We simulated the lens design parameters of aspherical singlets satisfying aplanatic condition. Higher numerical aperture (NA) limits lens bending range. The minimum point of the third order spherical aberration is approximate to the range. High NA objective lenses have to be designed to consider fabrication error. We found that satisfying sine condition for the second surface of the lens makes wide decentering tolerance. As a focus error detection lens has small NA, aplanatic condition is satisfied in wide lens bending range. We designed an aplanatic detection lens whose NA is 0.05 and telephoto ratio is 0.4.

1. はじめに

光ヘッドは光ディスクシステムのキーデバイスである。光ヘッドの光学系は、集光機能をもった対物レンズとトラッキング、フォーカシングおよび再生信号の検出光学系と、ディスクからの反射光を分離するための波面分割光学系と、半導体レーザーからの光を平行光に変換したり、楕円ビーム補正をするためのコリメート光学系などから成り立っている。これらの機能を、いかにシンプルな光学系で達成するかは、光ヘッドの大きな課題である。

対物レンズはすでにプラスチックモールドやガラスマールドの非球面単レンズが使用されている¹⁻³⁾。これらの対物レンズは光ディスクの高密度化にともない、開口数(NA)の高いものが求められており、製造公差も非常に厳しいものとなってきた。また光ヘッドの光学系をよりいっそうシンプル化するためにも、対物レンズだけでなく、検出光学系などにもさまざまな工夫がなされ、非球面を使ってよりシンプルかつ高機能化が図られている^{4,5)}。

光ディスク用の対物レンズは球面収差と正弦条件をほぼ完全に補正したアプランティックレンズである。2つの面を非球面化することによるアプランティック化⁶⁾、片面非球面でアプランティックに近いパワー配置を示した例⁷⁾

も報告されている。また高NAアプランティックレンズについて詳細なデータを示した報告もされている⁸⁾。しかし実際のレンズ設計においては、製造誤差の許容度にも留意して設計しなくてはならない。

本論文では、片面非球面の単レンズをベースにして、アプランティックレンズの形状を検討する。またレンズ全体としての正弦条件だけでなく、レンズの後面での正弦条件を満たすことによって、レンズの製造誤差を緩和する設計が可能なことを示す。さらに、検出光学系への適用を目指して、単レンズでテレフォト光学系を達成する場合のパワー配置についても報告する。

2. 厚肉アプランティック単レンズの設計

2.1 厚肉単レンズの近軸パラメーター

画角が狭い光ディスク用の対物レンズでは、まず球面収差が完全に補正されており、さらに軸外コマ収差が補正されていることが必要となる⁹⁾。近軸近傍の軸外コマ収差は、正弦条件によってその補正状況が確認できる。まず片面非球面レンズにおいてアプランティック条件を満足するレンズのパラメーターについて検討する。

焦点距離 f 、中心厚み d 、屈折率 n の単レンズを考える。レンズには平行光が入射し、入射面側から第1面、第2面とする。単レンズの自由度としては第1面と第2面のパワ

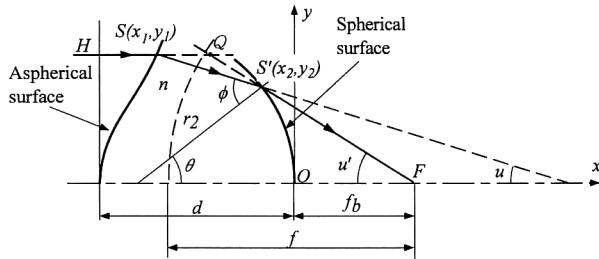


Fig. 1. Coordinates of a singlet having aspherical surface on the first plane.

一配置がある。すなわち第1面の曲率半径 r_1 と、第2面の曲率半径 r_2 は、ベンディングにより変化させることができ。第1面の曲率半径 r_1 は、第2面の曲率半径 r_2 を変数にすると、

$$r_1 = \left(1 + \frac{n-1}{n} \frac{b}{r_2}\right) / \left(\frac{1}{n-1} \frac{1}{f} + \frac{1}{r_2}\right) \quad (1)$$

で与えられる。また第2面の頂点から焦点までの距離、すなわちバックフォーカス f_b は、

$$f_b = f \left(1 - \frac{d}{r_1} \frac{n-1}{n}\right) \quad (2)$$

となる。片面非球面レンズではレンズの最周辺を通るマージナル光線と、光軸を通る光線の光路長を等しくすることで、そのマージナル光線が通るNAに対して球面収差が補正される¹⁰⁾。レンズのパワー配置、中心厚みを変えながら、球面収差が補正された状態での正弦条件の不満足量を計算し、アラナティック条件を満足するレンズのパワー配置、レンズ厚みの組み合わせを求めた。

2.2 第1面が非球面の場合

まず第1面が非球面の場合について考える。Fig. 1に第1面が非球面の場合の光路図と座標を示す。xy座標の原点を第2面の頂点とする。光軸上を通る光線と、マージナル光線の光路長が等しくなるよう第1面の非球面上の点を求める。角度 u' で像点 F を通る第2面からの射出光線を表す直線と、曲率半径が r_2 である第2面の球面はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$y = -\tan u' (x - f_b) \quad (3)$$

$$(x - r_2)^2 + y^2 = r_2^2 \quad (4)$$

式(3)と式(4)より、第2面での光線が屈折する点 $S'(x_2, y_2)$ の座標は、

$$x_2 = \cos^2 u' (r_2 + f_b \tan^2 u') \pm \sqrt{r_2^2 + f_b^2 \tan^2 u' (2r_2 - f_b)} \quad (5)$$

$$y_2 = -\tan u' (x_2 - f_b) \quad (6)$$

で与えられる。点 S' における球面の法線と光軸がなす角度を θ 、点 S' への入射角を ϕ とするとスネルの法則より、

$$n \sin \phi = \sin(u' - \theta) \quad (7)$$

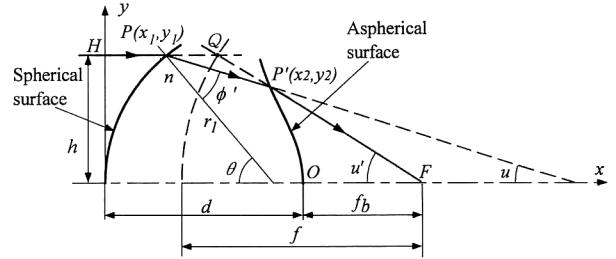


Fig. 2. Coordinates of a singlet having aspherical surface on the second plane.

が成り立ち、第2面への入射光線 SS' の光軸に対する傾角が決まる。球面収差をゼロとするためには、軸上を通る光線と、マージナル光線の光路長が等しいことより、

$$\overline{HS} + n\overline{SS'} + \overline{S'F} = dn + f_b \quad (8)$$

を満足しなくてはならない。ここで、式(8)の左辺の第3項は、

$$\overline{S'F} = \sqrt{(f_b + x_2)^2 + y_2^2} \quad (9)$$

である。また左辺の第1項は第2項を用いて、

$$\overline{HS} = d + x_2 - \overline{SS'} \cos(\phi - \theta) \quad (10)$$

と表すことができる。式(10)を式(8)に代入すると、第2項の $\overline{SS'}$ は、

$$\overline{SS'} = \frac{d(n-1) + f_b - x_2 - \overline{S'F}}{n - \cos(\phi - \theta)} \quad (11)$$

として求めることができる。したがって第1面とマージナル光線の交点 $S(x_1, y_1)$ の座標は、式(10)と式(11)より、

$$x_1 = d - \overline{HS} \quad (12)$$

$$y_1 = y_2 + \overline{SS'} \sin(\phi - \theta) \quad (13)$$

となる。正弦条件の不満足量 SC は、焦点 F を中心とし、半径が焦点距離 f である円と、単レンズへの入射光線 HS と、射出光線 $S'F$ の交点 Q との距離で、

$$SC = y_1 / \sin u' - f \quad (14)$$

で与えられる。正弦条件不満足量 SC がゼロとなるレンズのパワー配置、レンズ厚みの組み合わせを数値計算で順次求めることで、第1面側が非球面でアラナティック条件を満足する単レンズのパラメーターを求めることができる。

2.3 第2面側が非球面の場合

次に第2面を非球面にした場合について検討する。第1面側が非球面の場合は、まず球面収差がゼロとなる非球面上の点を求め、そのときの正弦条件不満足量を計算した。しかし第2面側が非球面の場合は、計算の都合上まず正弦条件を満足する非球面上の点を求め、その上で球面収差量を計算する。Fig. 2に第2面が非球面の場合の光路図と座標を示す。xy座標の原点を第1面の頂点とする。第1面は球面でその曲率半径を r_1 とすると、その球面の式は、

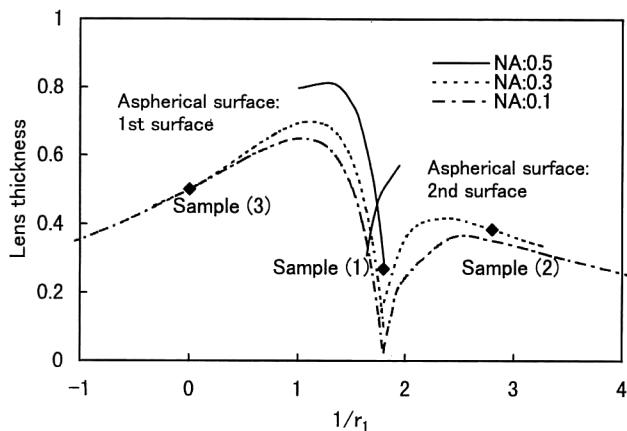


Fig. 3. Lens design parameters satisfying aplanatic condition.

$$(x - r_1)^2 + y^2 = r_1^2 \quad (15)$$

となる。射出光線 $P'F$ の光軸に対する角度を u' とすると、まず正弦条件が成り立つためには入射光線の高さ h が、

$$h = f \sin u' \quad (16)$$

でなければならない。入射光線高さが h のときに第1面の球面上の入射点 $P(x_1, y_1)$ の座標は、

$$x_1 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - h^2} \quad (17)$$

$$y_1 = h \quad (18)$$

となる。第1面の入射点 P ではスネルの法則より

$$\sin \theta = n \sin \phi' \quad (19)$$

が成り立ち ϕ' が求まる。レンズ内を通るマージナル光線 PP' と射出光線 $P'F$ を示す直線の式はそれぞれ、

$$y = -\tan(\theta - \phi')(x - x_1) + y_1 \quad (20)$$

$$y = -\tan u'(x - (d + f_b)) \quad (21)$$

となる。式(20), (21)より第2面の非球面とマージナル光線との交点 $P'(x_2, y_2)$ の座標は、

$$x_2 = \frac{(d + f_b) \tan u' - x_1 \tan(\theta - \phi') - y_1}{\tan u' - \tan(\theta - \phi')} \quad (22)$$

$$y_2 = y_1 - (x_2 - x_1) \tan(\theta - \phi') \quad (23)$$

となる。式(17), (18)と式(22), (23)より点 P と点 P' の座標が求まったので、マージナル光線の光路長を計算できる。軸上光線の光路長が $dn + f_b$ であるから、軸上光線とマージナル光線の光路長の差 OPD_a は、

$$OPD_a = \overline{FP'} + n\overline{PP'} + \overline{HP} - (dn + f_b) \quad (24)$$

として求まる。 OPD_a がゼロとなるレンズのパワー配置、レンズ厚みの組み合わせを順次数値計算で求めることにより、第2面側が非球面でアプランナティック条件を満足する単レンズのパラメーターを求めることができる。

2.4 アプランナティック条件を満足するパワー配置

前述の方法で計算したアプランナティック条件を満足するレンズのパワー配置を Fig. 3 に示す。焦点距離は 1, 屈折

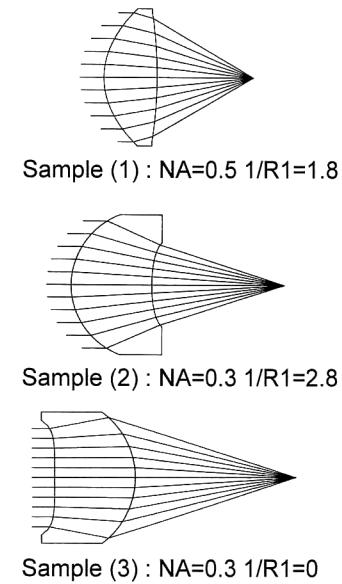


Fig. 4. Configurations of aplanatic lenses.

率は 1.5 とした。マージナル光線として NA が 0.1 と 0.3 と 0.5 の場合について計算した。NA が低いほどアプランナティック条件を満足するパワー配置の範囲は広がっている。また第1面側が非球面の場合と第2面が非球面の場合では、アプランナティック条件を満足する範囲が大きく異なる。一方、NA が高くなるにつれて、アプランナティック条件を満足する範囲は狭まり、また非球面がいずれの面であってもほぼ同じパワー配置に収束する。なお 3 次球面収差係数が最小になる条件は

$$\frac{1}{n_1} = \frac{(2n+1)n}{2(n-1)(n+2)f} \quad (25)$$

で表され¹¹⁾、屈折率 n が 1.5 の場合は、 $1/r_1$ が 1.71 のときに最小値をとる。すなわち NA が大きいときにアプランナティック条件を満足するパワー配置と、薄肉レンズの3次球面収差係数が最小になる条件とは非常に近いことがわかる。

Fig. 4 にマージナル光線においてアプランナティック条件を満足する 3 つのレンズの例を示す。サンプル (1) のレンズは、通常光ディスク用レンズとして採用されている形状に近い。このパワー配置では NA が 0.5 の範囲までアプランナティック条件を満足することが可能である。サンプル (2) のレンズは第1面が凸のメニスカスレンズである。サンプル (3) のレンズは第1面の近軸曲率はゼロ、すなわち平面である。この場合、主点位置は第2面の頂点にある。このようなパワー配置では作動距離を大きくとれるため、光ディスク用の対物レンズとして有利であると考えられる。しかし現実にはこのようなパワー配置をしたレンズは実用化されていない。それは次に述べるように製造誤差に対する

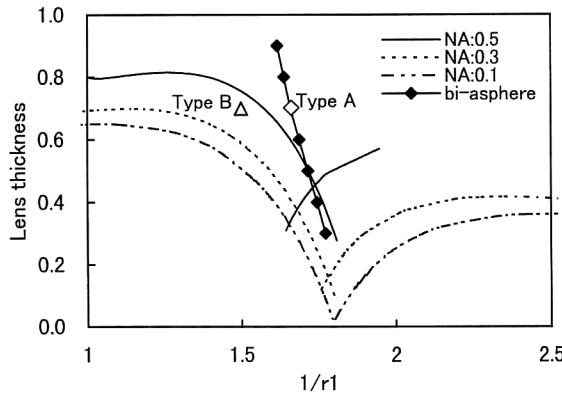


Fig. 5. Lens design parameters satisfying aplanatic condition and bi-aspherical singlets of NA 0.5 considering fabrication error. Type B is another bi-aspherical singlet having the same lens thickness as type A.

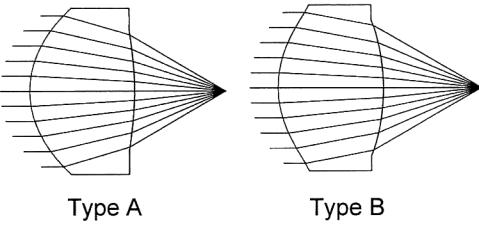


Fig. 6. Configurations of bi-aspherical aplanatic singlets as shown in Fig. 5.

許容度が著しく狭いためである。

3. 製造公差を考慮した設計

前章まではアラナティック条件を数値計算した例を示した。しかし実際のレンズ設計においては製造上の公差を考慮して、いわゆる作りやすいレンズを目指して設計が行われる。特に非球面単レンズにおいてはレンズの第1面と第2面のディセンターによる収差の発生がパワー配置により著しく変化する例が報告されている¹²⁾。実際の設計では、通常のレンズとディセンターしたレンズの2つの構成を同時に最適化することにより、ディセンターに強いレンズを設計することができる。そこでディセンター公差を考慮した両面非球面レンズを、厚みを変えて実際に設計し、そのパワー配置と厚みの関係をFig. 5に示した。実際に設計された両面非球面のパワー配置は、アラナティックレンズを満足する片面非球面のパワー配置と非常に近いことがわかる。ディセンター公差を考慮したレンズ厚みが0.7で、 $1/r_1$ が1.66のレンズをタイプAとし、同じ厚みの $1/r_1=1.5$ のレンズをタイプBとする。それぞれのレンズの形状をFig. 6に示す。またレンズの軸上および軸外波面収差と、第1面と第2面が5 μmディセンターしたときに発生する波面収差をTable 1に示す。形状にはほとんど差が

Table 1. Optical performances and tolerance for fabrication error of two singlets.

Lens	Thickness	$1/r_1$	RMS wavefront aberration (λ)		
			On-axis	Off-axis (2 deg)	Decenter (5 μm)
Type A	0.7	1.66	0.000	0.026	0.002
Type B	0.7	1.50	0.000	0.023	0.086

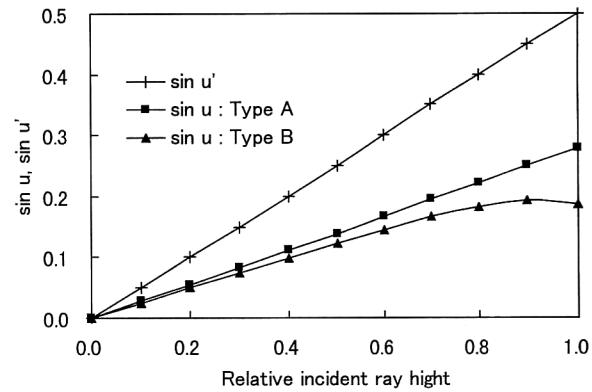


Fig. 7. Sines of ray angle for the second surface vs incident ray height.

なく軸外性能はむしろタイプBのほうが良好である。しかしディセンター時の収差劣化はタイプBのほうがはるかに大きく、5 μm のディセンターで回折限界であるといわれる 0.07λ を上回る収差が発生する。

単レンズの軸外光、すなわち斜め入射の光線に対する性能劣化を抑えるためには正弦条件の補正が必要であった。単レンズの第1面と第2面の間にディセンターが生じるということは、第2面を球面と考えれば斜め光線が入射することと同じことになる。そこでレンズの第2面だけを1つの光学系と考えて、この面において正弦条件が満足されているかどうかを検討した。第2面への入射角を u 、射出角を u' とすると正弦条件は、

$$\frac{n \sin u}{\sin u'} = \beta \quad (26)$$

となる。ここで β は横倍率である。Fig. 7に光線高さに対する入射角の正弦 $\sin u$ と射出角の正弦 $\sin u'$ を示した。射出角の正弦 $\sin u'$ はタイプA、タイプBのレンズとともにレンズ全体として正弦条件を満足しているので、光線高さに比例している。ディセンターに対して収差変化の少ないタイプAのレンズでは、入射角の正弦も同様に光線高さに対して比例している。したがって両者の比は常に一定であり、式(26)を満足している。一方、ディセンターに対して収差変化の大きいタイプBのレンズでは、相対光線高さ0.8以上で入射角の正弦の線形性が急激に崩れている。す

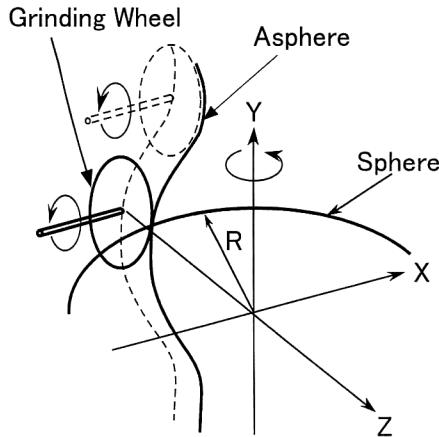


Fig. 8. Machining set up for toric surface.

なわちタイプBのレンズでは第2面における正弦条件が満足していないことがわかる。以上のようにレンズ全体としての正弦条件の補正だけでなく第2面においても正弦条件を補正することによって、ディセンター時の収差変化を抑えた設計が可能であることが確認できた。

4. 検出光学系への応用

光ヘッドの光学系では、対物レンズ以外にもレンズが用いられる場合が多い。特に検出光学系では、集光するために凸レンズを用いたり、あるいは光学系全長を短くするために凸レンズと凹レンズを組み合わせたテレフォト光学系を採用したりしている。筆者らは非点収差方式のフォーカス検出素子を単レンズで構成したプレスガラス素子を開発した⁵⁾。この単レンズの最適パワー配置を前述した方法により検討した。

4.1 非点収差法

非点収差法は光ヘッドのフォーカス検出方式として広く用いられている¹³⁾。光路中にトーリック面などを設けて非点収差を発生させ、その前焦点と後焦点の中間の最小錯乱円上に4分割の受光部を設ける。焦点誤差量に応じて受光部上のスポット形状が変化し、焦点誤差信号を得ることができる。

非点収差法における検出器上でのビーム径 B_d は

$$B_d = 2NA_{ob}D_r f_{dt}/f_{ob} \quad (27)$$

で表される。ここで NA_{ob} , f_{ob} はそれぞれ対物レンズの NA, 焦点距離である。 D_r はフォーカス検出が可能な範囲を示すダイナミックレンジ, f_{dt} はフォーカス検出素子の焦点距離を示す。対物レンズの焦点距離, NA およびフォーカス検出のダイナミックレンジはシステム側からの要求で決まる。フォトディテクター上でのスポットサイズを大きくすると、アライメント誤差に対する許容度を緩和するこ

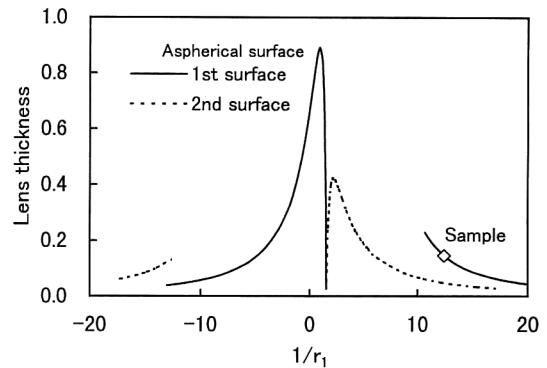


Fig. 9. Aplanatic lens design parameters on condition that NA is 0.05 and refractive index is 1.673.

とができる。同時に環境特性によるスポットのずれに対しても強くなる。そのためには式(27)より、検出光学系の焦点距離 f_{dt} を長くする必要がある。しかし焦点距離を長くすると、光学系全長すなわち第1面から焦点までの距離が長くなってしまう。テレフォト光学系は入射側から順に正のパワーと、負のパワーを組み合わせることにより、焦点距離に対して光学系全長を短くできるという特長がある¹⁴⁾。光学系全長を a とすると、テレフォト比は a/f_{dt} で表される。テレフォト比が小さいほど、光学系の短縮効果が大きいことになる。

4.2 テレフォト単レンズのパワー配置

光ディスクのフォーカス検出系では、像面上でのスポットの光量分布が不均一な場合、溝横断ノイズの増大につながる⁴⁾。均一な光量分布を得るためにまず球面収差の補正が必要になる。さらにアライメント誤差などによって生じる斜めの入射光線に対しても光量分布の均一性を保つために、正弦条件を満足させてコマ収差を補正することが必要になる。すなわち検出光学系でもアプランティックレンズであることが望ましい。

単レンズで、軸上に大きな非点収差を出すためには、少なくとも1面をトーリック面にする必要がある。トーリック面は回転対称面でないため、特殊な加工法が必要となる。Fig. 8 にトーリック面の研削による加工法の一例を示す。トーリック面の直交する2つの面対称となる断面のうち、YZ断面では非球面の加工が可能であるが、それに直行するXZ断面では、被加工物を回転させるため、球面の加工しかできない。単レンズの第1面か第2面のどちらかの面をトーリック面にする必要があるため、単レンズの少なくとも1断面は、片面非球面とならざるを得ない。したがって片面非球面で球面収差と正弦条件を補正する必要がある。そこで単レンズでテレフォト光学系を実現するためのレンズのパワー配置を前述の方法により計算した。

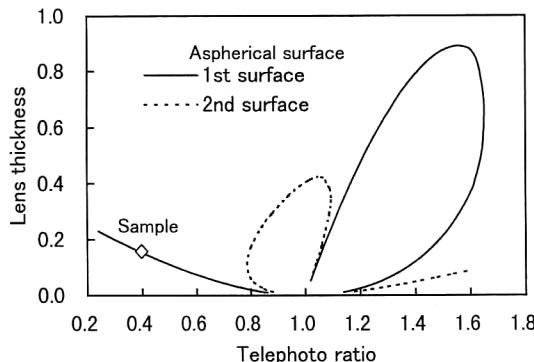


Fig. 10. Lens thickness vs telephoto ratio simulated on the same condition as Fig. 9.

Fig. 9 にアプランティック条件を満足するパワー配置とレンズ厚みの範囲を示す。実際に試作したレンズに合わせて、屈折率を 1.673, NA を 0.05 として計算した。焦点距離は 1 に正規化した。NA が低いために非常に広い範囲のパワー配置にわたってアプランティック条件を満足している。Fig. 10 はテレフォト比をパラメーターにして同じ結果を示したものである。テレフォト比が小さい場合は、第 1 面を非球面にすることで、アプランティック条件が満足できることを示している。Fig. 9 と Fig. 10 に実際に試作したテレフォト光学系の検出レンズの位置を示した。テレフォト比は 0.4 で、 $1/r_1$ は 12.4 である。このレンズのパワー配置は 3 次球面収差が最小になる位置とは大きく異なる。しかし実際には NA が非常に低いため、レンズの第 1 面と第 2 面のディセンター公差は緩いものになっている。

筆者らが開発した単レンズの検出レンズの構成図を Fig. 11 に示す。単レンズでありながら、第 1 面が正、第 2 面が負のパワーをもつことで、テレフォト光学系を構成しており、光学系全長が焦点距離よりも短い。また第 1 面を回転対称な非球面、第 2 面はトーリック面である。先に検討したパワー配置により、検出レンズにおいてもアプランティックレンズとすることことができた。

5. まとめ

厚肉アプランティックレンズのパワー配置を、光路長と正弦条件の関係から計算した。NA が低い場合には単レンズのパワー配置の広い範囲にわたってアプランティック条件を満足できるが、NA が高くなるにつれてその範囲は狭くなってくる。しかもその範囲は 3 次球面収差が最小になる値と近いことがわかった。もともと 3 次球面収差は薄肉であり、NA が低い近軸近傍での計算である。それが高 NA の厚肉レンズと一致することは興味深い。

また高 NA の光ディスク用対物レンズの設計において、

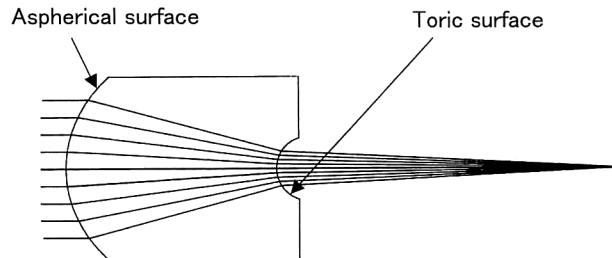


Fig. 11. Schematic configuration of telephoto singlet for focus error detection.

大きな問題となる製造誤差に対するレンズの許容度について検討した。そしてレンズの後面における正弦条件を補正することで、ディセンターに対して許容度の広いレンズを設計できることを示した。

光ディスクの検出光学系においても、収差があると受光部面上のスポットが乱れて、検出信号にノイズが混入する。そこで検出光学系もアプランティックレンズであることが望ましい。ここでは非点収差法を実現する単レンズについて検討した。光学系全長を短縮することからテレフォト光学系が望まれる。一方加工上の制約から片面非球面の断面が存在する。アプランティック条件を検討した結果、前面を非球面にするほうが有利であることが確認できた。今後、光ディスクはよりいっそうの高密度化を目指して、高 NA 化、短波長化が必須となってくる。その要求に本解析を適用していきたい。

文 献

- 1) 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.
- 2) R. O. Maschmeyer, R. M. Hujar, L. L. Carpenter, B. W. Nicholson and E. F. Vozniak: "Optical performance of a diffraction-limited molded-glass biaxial lens," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2413-2415.
- 3) Y. Tanaka, Y. Nagaoka and M. Ueda: "Lens and optics for optical disk system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. 26-4 (1987) 121-126.
- 4) Y. Tanaka, M. Sunohara, J. Murata, T. Nakamura and H. Aikoh: "Molded-glass optical element for focusing servos," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 108-112.
- 5) Y. Tanaka, H. Aikoh, I. Yano, T. Kondou and M. Sunohara: "Single telephoto lens for focus error detection with astigmatic method," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 33-35.
- 6) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, New York, 1987) pp. 197-202.
- 7) R. Straubel and M. Rohr: U. S. Patent No. 934579 (1909).
- 8) 吉田正太郎: "特に口径比の大きい非球面アプランート・レンズに関する計算", 東北大学科学計測研究所報告, **6** (1958) 122-145.
- 9) S. Kubota: "Aplanatic condition required to reproduce

- jitter-free signals in an optical digital disk system," **26**
(1987) 3961-3973.
- 10) 中川治平:レンズ設計工学(東海大学出版,1986) pp. 175-179.
11) 久保田広:応用光学(岩波書店, 1997) p. 26.
12) 久保田重夫:“光ディスク用アラナティック非球面レンズ
の設計”, 第15回微小光学研究会予稿集(1985), Micro Optics
News, **3**, No. 1 (1985) 28-32.
13) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van
Rosmalen and K. S. Immink: *Principles of Optical Disc
Systems* (Adam Hilger, Bristol and Boston, 1985) pp. 70-87.
14) R. Kingslake: *Lens Design Fundamentals* (Academic Press,
Orlando, 1978) pp. 259-268.