

# 光学器械を使う人のために

## —第 8 回 非球面レンズの応用—

吉 田 正 太 郎\*

### 8-1 球面収差とコマ

はじめに球面収差とコマについて、簡単に説明しておきましょう。

球面単レンズに、光軸に平行な単色光線が入射すると、図 47 上のように、周辺に近い光線 1 と、光軸に近い光線 7 とは、それぞれ集まる点がちがいますから、光軸上の像がボケることになります。これを球面収差といいます。

光軸に斜めに入射する平行光束の場合は、図 47 下のように屈折するので、こんどは像が扇形にボケます。これをコマといい、光束の傾角  $\omega$  が增大すると、ますます目立つようになります。

球面収差は視野中心部の像をわるくしますから、光学器械にとって最大の障害です。いっぽうコマは、有用な視野を狭くするおもな原因であり、また天体位置の写真測定の場合に、星の光度の違いによって黒みの重心が移動するなどのトラブルを起こします。

### 8-2 球面収差のない非球面単レンズ

さて図 48 のように、光軸に対して回転対称な  $k$  個の屈折面が共軸にならんでいるとし、物点 P から出発した光線の第 1 面までの長さ PA を  $l_1$ 、つぎの媒質中の光線の長さを  $l_2$ 、…… 最終面  $k$  から像点 P' までの長さを  $l_{k+1}$  とします。物界の屈折率は  $n_1$  とし、一般に

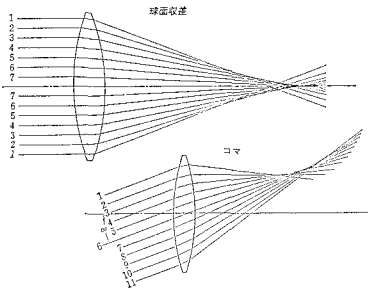


図 47 球面収差 (上) とコマ (下)

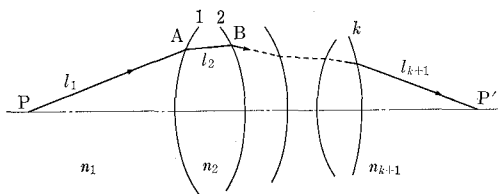


図 48 光路長一定の原理

第  $\nu$  面の前方の屈折率が  $n_\nu$ 、したがって像界の屈折率は  $n_{k+1}$  とします。

このとき、入射点 A がレンズ面上のどこであっても、つぎの (4) 式が成立するならば、球面収差がありません。これを光路長一定の原理といいます。

$$\sum nl \equiv n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots + n_{k+1} l_{k+1} = \text{一定} \quad (4)$$

すなわち、ある瞬間に物点 P から各方向に出発した光線が、同時に像点 P' に到達するようであれば、球面収差は皆無です。

たとえば屈折面がただ 1 個で、物界が空気、像界が屈折率  $n$  のガラスとし、物体は有限距離にあるとすると、球面収差のないレンズは図 49 A の「デカルトの卵形レンズ」になります。このレンズの前面は 4 次の非球面、後面は像点 P' を中心とする球面です。

デカルトの卵形レンズにおいて物点を無限遠とすれば、図 49 B の楕円面レンズです。このとき前面の離心率  $e$  は  $1/n$  になります。後面は焦点 F を中心とする球面です。

つぎに図 48 において物界が屈折率  $n$ 、像界が空気、物点は無限遠とすれば、図 49 C の双曲面レンズになります。このレンズの前面は平面、後面は屈折率  $n$  を離

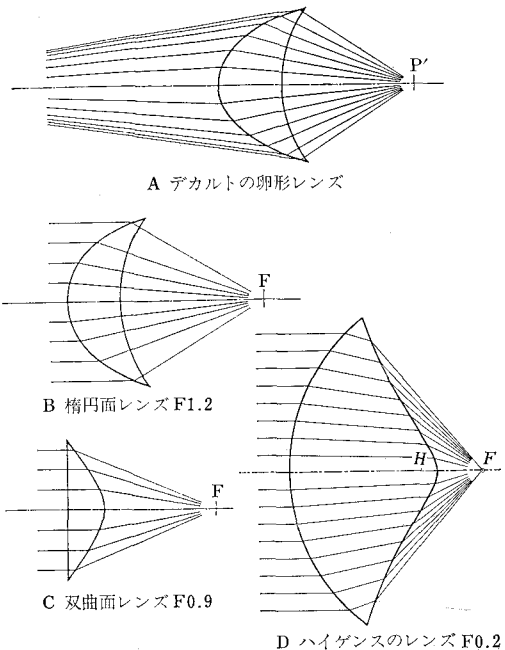


図 49 球面収差のない非球面レンズ

\* Shotaro Yoshida

心率とする双曲面です。

また、レンズ前面は焦点を中心とする球面とし、後面を非球面にして球面収差を除去すると、図 49 D の「ハイゲンスの無収差レンズ」になります。

A, B, C, D いずれも、ガラスは硼珪クラウン BK7,  $n_a=1.51633$  として計算しました。A は像の大きさが物体の大きさの 1/2 の場合です。

光路長一定の原理からわかるように、球面収差だけ除去するには、共軸光学系内のどれか 1 面だけを非球面にすればよいわけです。ニュートン式、カセグレン式、グレゴリー式の反射望遠鏡も、シュミット・カメラも、みな (4) 式の光路長一定の原理を満足しています。

**8-3 1面を非球面にしたアプラナート単レンズ**

球面収差もコマもない光学系をアプラナートといえます。それには光路長一定の (4) 式と、正弦条件の (3) 式 (6月号参照) の OSC ゼロとを、両方とも満足すればよいわけです。しかし実際には感剤粒子の大きさや眼の視力に限度がありますから、(3) 式 (4) 式をある程度まで外れても実用上さしつかえなくて、このような光学系もアプラナートと称しています。

ところで、図 50 A1, A2, A3 は、単レンズの後面を球面とし、球面収差は前面を非球面にして完全に除去し、レンズの周辺部で正弦条件を正確に満足させたレンズです。中間帯ではいくらか (3) 式から外れて OSC がマイナスになりますが、実用上さしつかえない程度です。A1 はガラス BK7 で明るさ F0.8, A2 はガラス重フリント SF6 ( $n_a=1.80518$ ) の F0.8, A3 はガラス SF6 で F0.6 の例です。

図 51 はニコン非球面レンズ F1.0 で、図 50 A1 のなかまです。図のように、眼底(網膜)を観察するときに使います。この片面非球面単レンズは、照明レンズと観察レンズを兼ねているわけです。

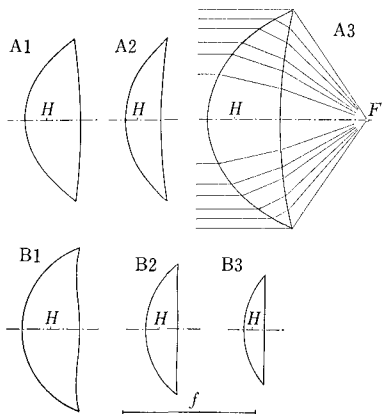


図 50 A: 前面非球面アプラナート単レンズ, B: 後面非球面アプラナート単レンズ

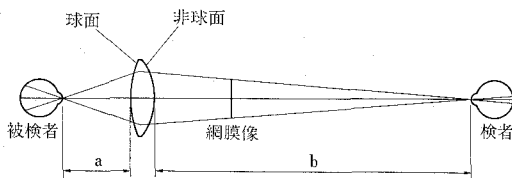


図 51 眼底検査用非球面レンズ

つぎに図 50 B1, B2, B3 は、前面を球面にして、後面の非球面で球面収差を完全に除去し、レンズ周辺部で正弦条件を満足させたレンズです。ガラスはみな BK7 で、B1 は明るさ F0.8, B2 は F1.0, B3 は F1.2 です。

(3) 式の OSC は、同じガラス、同じ F 数で比較すると、前面非球面 (A) のほうが後面非球面 (B) より、ずっと良好です。すなわち、前面非球面アプラナート単レンズのほうが役に立ちます。

**8-4 完全アプラナート単レンズ**

ほんとうのアプラナート単レンズ、すなわち (3) 式の OSC ゼロと (4) 式を完全に満足するには、2 面の非球面が必要です。図 52 はその一例で、ガラス BK7 で作った F0.62 の単レンズです。

ところで、前面の曲率半径  $r_1$ 、後面の曲率半径  $r_2$ 、ガラス材料の屈折率を  $n$  とすると、うす肉の単レンズの焦点距離  $f$  は、つぎの式で計算されます。肉厚  $d$  をふくむ補正項は、ここでは省略します。

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

したがって、 $n$  と  $f$  を指定しても、 $r_1/r_2$  という比は自由にえらべます。この値をふつう  $\sigma$  と書きますが、これをいろいろに変更すると、形状の異なるレンズ群が得られます。この作業をベンディングといいます。

ガラス BK7,  $f=100, d=20$  として、両面非球面アプラナート単レンズにベンディングをした例を図 53 にしめします。どの単レンズも球面収差やコマは皆無ですが、非点収差や歪曲はそれぞれ違います。明るさは図に 0789 と記したレンズが最大 (約 F1.1) になっています。図 52 の両面非球面単レンズも、ガラス BK7,  $f=$

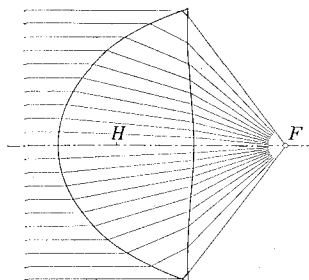


図 52 両面非球面アプラナート単レンズ F0.62

100,  $d=80$  として、ベンディングによって最も明るいものを探した結果です。

つぎに図 54 上は今まで用いられていた光ディスク用レンズで、球面レンズ 3 枚構成のアプラナートです。図 54 下は現在では主流になっている、同じ目的の非球面単レンズです。これは後面を球面で代用しています。

8-5 特殊な非球面

レンズの中心と光軸が一致しない、軸外しの非球面レンズもできます。これは軸対称な非球面の一部と考えればよいわけです。

図 55 は、ポーラロイド SX-70 ランド・カメラのファイインダーの一部に用いられている非球面レンズです。記入してある円の直径が 4.75 mm で、上下方向は 15.6 倍に拡大してあります。同社光学技術部の W. T. Plummer が Applied Optics 誌 1982 年 1 月 15 日号に詳しく解説していますが、この図はコンピューターで描かせたものです。

広視界接眼鏡の視野レンズに、放物面と 6 次曲面をつないだ非球面を用いる例は、1959 年 12 月 24 日付のフランス特許 BF 1252810 に出ています。

私が発明した  $\log \cos$  面を用いる非球面レンズについては、U.S.P. 3508811 を参照して下さい。

大型の望遠鏡では、材料の関係で、どうしても反射面

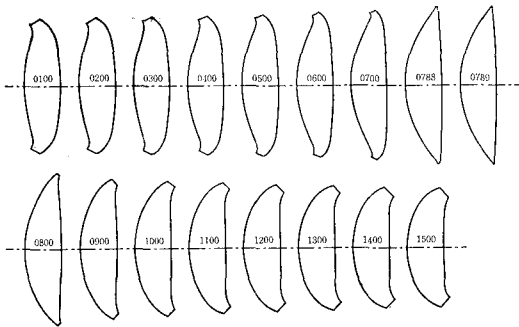


図 53 両面非球面レンズのベンディング

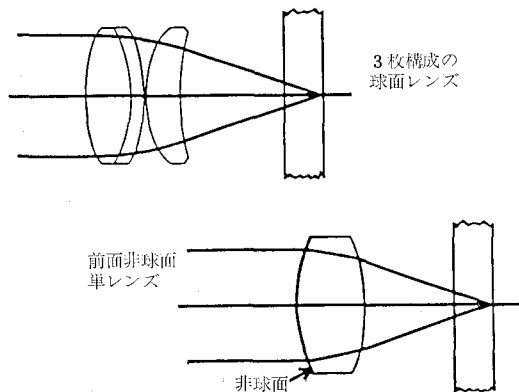


図 54 光ディスク用レンズの例

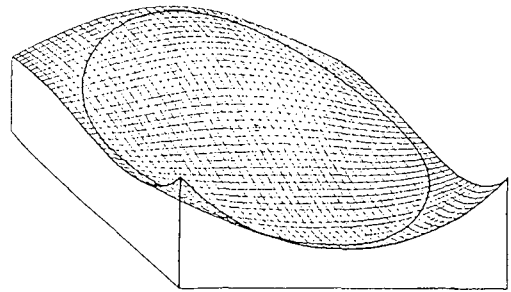


図 55 ポーラロイド SX-70 ランド・カメラに用いられている軸外し非球面レンズ

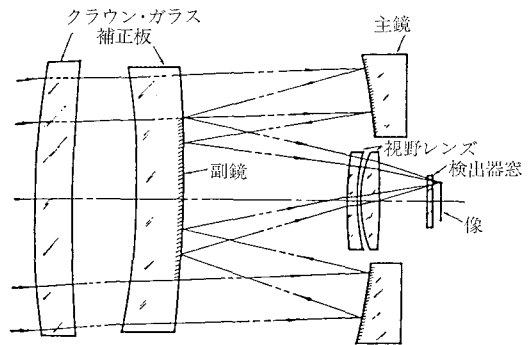


図 56 スター・センサーの一例

を使うこととなりますが、その一例がリッチー・クレチャン系です。これは主鏡も副鏡も 4 次、6 次等の補正項をふくむ非球面になりますが、鏡間距離や所要の F 数によって、鏡面の形状が変わってきます。

中くらいの大きさの光学系では、反射と屈折を併用するカタディオプトリック系も珍しくありません。図 56 はパーキン・エルマー社のスター・センサーの一例で、焦点距離 24.5 cm, 視野直径 5.8°, 明るさ F 1.53, 使用波長は 0.5  $\mu\text{m}$  から 1.1  $\mu\text{m}$  までです。主鏡面は 8 次の非球面ですが、そのほかはみな球面です (K. M. Bystrycky and P. R. Yoder, Jr.: Applied Optics 24, 1206, 1985 年)。

むすび

8 回にわたって、いろいろな光学器械について、ふうふうあまり取り上げられていない問題を中心にして、総合的に解説してみました。「光学器械にはそのような面もあるのか」と皆さんが認識を新たにして下されば幸いです。それが研究や教育の面で、なにかのヒントになることを心から期待しています。

なお、望遠鏡の対物レンズ、シュミット・カメラ、リッチー・クレチャン系などについては、「天文ガイド」(誠文堂新光社発行) 1985 年 4 月から 1986 年 3 月まで 12 回連載しましたので、ご参照下さい。