



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

| | |
|------------|---|
| Title | 40 c mカセグレン望遠鏡の球面収差 |
| Author(s) | 及川, 賢一; 水野, 孝雄 |
| Citation | 東京学芸大学紀要. 第4部門, 数学・自然科学, 42: 145-151 |
| Issue Date | 1990-08 |
| URL | http://hdl.handle.net/2309/36034 |
| Publisher | 東京学芸大学紀要出版委員会 |
| Rights | |

40cmカセグレン望遠鏡の球面収差

及川 賢一・水野 孝雄

地学教室*

(1990年3月31日受理)

OIKAWA, K. and MIZUNO, T.: Spherical Aberration of the 40cm Cassegrainian Reflector. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Sect. 4, 42: 145-151 (1990) ISSN 0371-6813

We have examined by Hartmann test whether the secondary mirror is set up at the appropriate position where spherical aberration is not produced. We have measured the distance r_H of Hartmann-holes from optical axis and the distance r_P of Hartmann-spots (unfocused images) from optical axis. On the assumption that the surface of the primary mirror is parabolic and the surface of the secondary mirror is hyperbolic, we can obtain the analytical function of r_H and r_P . The coefficients contained in the function of r_H and r_P have been determined by the least square method so as to fit the measured values of r_H and r_P . These fits in r_H and r_P are excellently good. Since it has been already confirmed that the primary mirror is parabolic, it is concluded that the secondary mirror is fairly hyperbolic. Another conclusion is that the focal point of the secondary mirror is different from that of the primary mirror by 36mm at the usual position of the secondary mirror. This difference exceeds twice permitted value not to produce spherical aberration.

It is necessary to make a new secondary mirror with the hyperbolic surface of $a=512\text{mm}$ and $e=1.962$, because the secondary mirror cannot be moved to the position where spherical aberration is not produced. (in Japanese)

KEY WORDS: Spherical Aberration, Cassegrainian Reflector, Hartmann Test

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, Koganei-shi, Tokyo 184, Japan.

1. 緒 言

東京学芸大学地学教室の40cmカセグレン望遠鏡(口径40cm, 主焦点距離1,600mm, 合成焦点距離5,000mm)の主鏡と副鏡の焦点不一致に起因する球面収差について検査した。

これまでに行われたこの望遠鏡に関する検査には, 根岸・大脇(1978)のフーコーテストとゾーンテストによる主鏡の研磨精度検査, 吉崎(1986)のハルトマンテストによるハルトマン定数と主鏡・副鏡の形状および歪曲収差と等級効果の検査, 久保田・大脇・水野(1989)の天文測定的方法による歪曲収差と等級効果の検査がある。しかし, どの検査も副鏡の適正位置は求めておらず, 球面収差に関する検査は本研究がはじめてである。

2. 球面収差と副鏡の位置

球面収差を除去するには「光(行)路長一定の条件」を満足させなくてはならない。「光路長

* 東京学芸大学(184 小金井市貫井北町4-1-1)

一定の条件」とは、物点（光源）から像点（焦点）までの光路長が光学系を通るすべての光線の間で等しいということで、そのとき球面収差はなく光束は正確に一点で交わる。

本学の望遠鏡は、放物面の主鏡と双曲面の副鏡を使用したクラシカル・カセグレン式と呼ばれる種類のものである。

放物面は物点が無限遠にある場合に、また双曲面は物点はその幾何学的焦点にある場合に「光路長一定の条件」を満たす。すなわち、凹の放物面は光軸に平行な入射光束をその幾何学的焦点に、凸の双曲面は幾何学的焦点に向かう入射光線をもう一つの幾何学的焦点に集める。

カセグレン望遠鏡に使われている鏡には前述の性質があるので、副鏡の幾何学的焦点（以下単に焦点という）が主鏡の焦点（主焦点）と一致していれば球面収差は生じない。いいかえれば、副鏡の焦点と主鏡の焦点が一致していない場合には球面収差を生じるわけである。このとき、副鏡の焦点が主焦点よりも主鏡側にある場合には正の球面収差を、光源（星などの天体）側にある場合には負の球面収差を生じる（図1）。

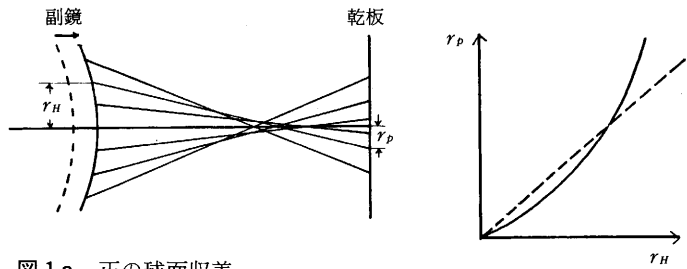


図1a 正の球面収差
副鏡は主鏡側に移動している。
そのときの r_H と r_P の関係グラフ(r_H-r_P 曲線)は下に凸である。

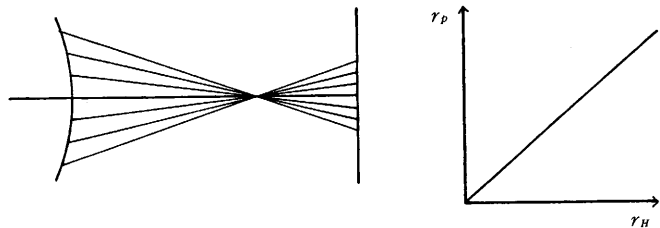


図1b 無収差
副鏡は適正位置にある。
そのときの r_H-r_P 曲線はわずかに下に凸であるがほとんど直線である。

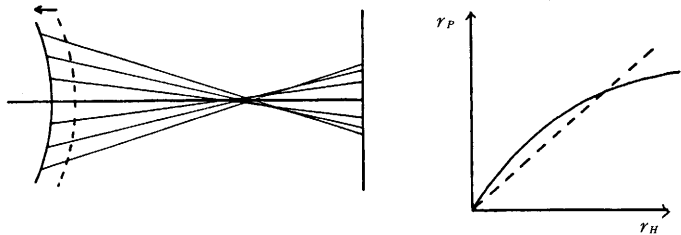


図1c 負の球面収差
副鏡は光源側に移動している。
そのときの r_H-r_P 曲線は上に凸である。

3. 検査方法

球面収差の正負は、ハルトマン板（図2）を望遠鏡の前面に装着して（図3）、星の焦点外像（図4）を撮影すれば容易に判別できる。

ハルトマン入射孔の光軸からの距離を r_H 、焦点外像の対応するハルトマン・スポットの光軸からの距離を r_P とおき、横軸に r_H ・縦軸に r_P をとった r_H-r_P 図を描く（図1）。グラフが下に凸ならば正の球面収差が生じている（副鏡の焦点が主焦点より主鏡側にある）。グラフが上に凸な

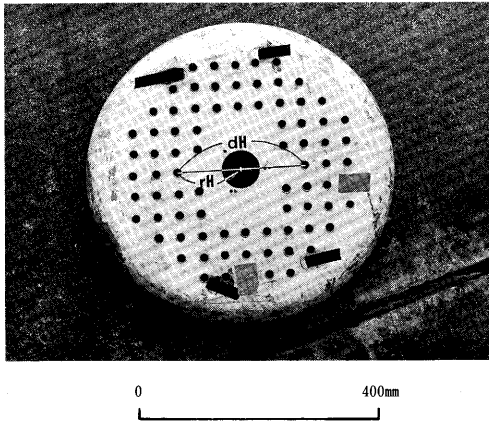


図2 ハルトマン板

らば負の球面収差が生じている（副鏡の焦点が主焦点より光源側にある）。

この、副鏡の位置と r_H , r_P の関係は数式で表すことができる。望遠鏡は光軸を中心として回転対称なので、放物面と双曲面を放物線と双曲線として扱うことにする。また、主鏡と副鏡にはここで考慮する球面収差以外の収差はないものとする。

図5のように、主焦点を原点として光軸方向に x 軸を、それと垂直に r 軸をとる。そのとき主鏡は次式で表される。

$$r^2 = -4p(x-p). \quad (1)$$

ここで、 $(p, 0)$ は頂点、 $(0, 0)$ は焦点である。

また、副鏡は次式で与えられる。

$$\frac{(x-t)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1. \quad (2)$$

ただし、

$$t = s + a, \quad (3)$$

$$e = \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}}, \quad (4)$$

$$f = t - ae, \quad (5)$$

$$d = s - f = a(e-1). \quad (6)$$

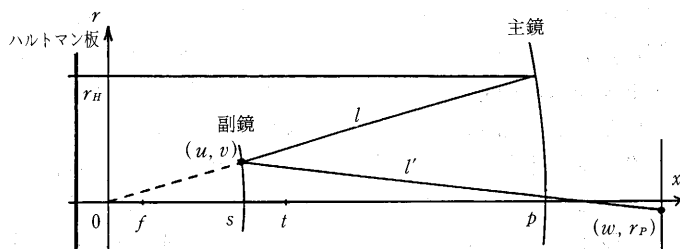


図5 カセグレン望遠鏡の光路

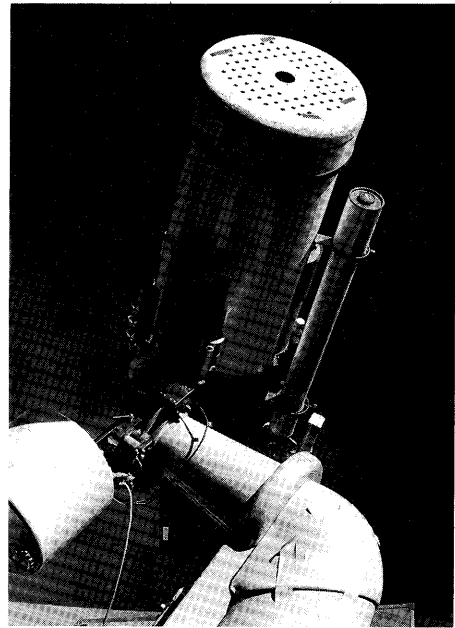


図3 ハルトマン板を装着した40cmカセグレン望遠鏡

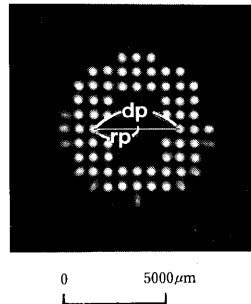


図4 ハルトマン入射孔の焦点外像 (ハルトマン・スポット)

ここで、 $(t, 0)$ は中心、 $(s, 0)$ は頂点、 a は半主軸、 e は離心率、 $(f, 0)$ は焦点、 d は頂点から焦点までの距離である。 d は副鏡の形状にのみ依存した量である。また、主焦点を原点としているので、 f そのものが主鏡と副鏡の焦点のずれの量を表わす。

光軸からの距離が r_H のハルトマン入射孔を通った入射光線は、主鏡で反射して1次反射光線 l となり、主焦点 (原点) に向かって進む。 l の方程式は、次の通りである。

$$r = kx. \quad (7)$$

$$k = \frac{r_H}{p - r_H^2/4p}. \quad (8)$$

1次反射光線 l と副鏡の交点を (u, v) とすると、 l が点 (u, v) で反射した2次反射光線 l' の方程式は次のようになる。

$$r = h(x - u) + v. \quad (9)$$

ただし、

$$u = \frac{b^2 t - \sqrt{(b^2 t)^2 - (b^2 - a^2 k)(b^2 t^2 - a^2 b^2)}}{b^2 - a^2 k}, \quad (10)$$

$$v = ku, \quad (11)$$

$$h = \frac{2 + k(m - 1/m)}{2k - (m - 1/m)}, \quad (12)$$

$$m = \frac{b^2(u - t)}{a^2 v}. \quad (13)$$

したがって、焦点外像が撮影されるプレートの x 座標を w とすると、プレートに写るハルトマン・スポットの光軸からの距離 r_P は、

$$r_P = h(w - u) + v \quad (14)$$

となる。

式(8), (10), (11), (12), (13), (14)により r_P は r_H の関数である。その関数に含まれる係数のうち、 p, s, w の値は直接メジャー等で測ることができる。したがって、 r_H と r_P の関数では、 a, b だけを未知の係数として扱えるので、 r_H と r_P の測定値に対して最小二乗法を適用することにより a, b を算出することができる。係数 a, b が求めれば(4)式から e が、(5)式から f が、(6)式から d が得られる。

4. 観測・測定

ハルトマン入射孔の焦点外像はナイフエッジテストで求めた焦点位置から96.08mm外側で撮影して得た。撮影した3枚の乾板のデータを表1に示す。光源としての星には、シーイングの影響を避けるために最低30secの露出時間が必要なので2等星の βT_{au} を用いた。撮影乾板には103aEを使用し、現像は2倍に希釈したパンドール(20°C, 6.0min)により行った。

測定量 r_H と r_P を求める際に光軸の決定が困難であるので、次のような仮定をした。すなわち、ハルトマン板の中心に関して対称な2つの入射孔間の距離 d_H を測定し、 d_H の中点が光軸と一致しているとして $r_H = d_H/2$ とした。 d_H の測定はメジャーで行った。また、ハルトマン板の焦点外像パターンに関して対称な2つのスポット間の距離 d_P を測定し、 d_P の中点が光軸と一致しているとして $r_P = d_P/2$ とした。プレートでの d_P の座標測定にはNikon万能投影器6c型を使用した。投影レンズは50×にし、スポットの中心を決めやすくするためにスクリーン中心に二重の同心円を描いた。

表 1 乾板の撮影データ

| 原板番号 | 焦点位置 (ナイフエッジテスト) | 露出開始時刻 (1990.2.20) | 露出時間 |
|------|---------------------|-----------------------|------|
| 834 | 3.92mm | 21h23m | 60s |
| 835 | 3.92mm | 21h49m | 60s |
| 836 | 3.92mm | 22h00m | 60s |

未知係数 a , b の最小二乗法による算出に必要な係数 p , s , w の値は次のようにして求めた。主鏡の焦点距離 p は副鏡を鏡筒からはずし, α CMA を光源として主焦点位置をみつけ, メジャーで測定した。その結果, $p=1,602\text{mm}$ であった。また, $w-p$, $w-s$ は容易にメジャーで測ることができるので(図 5 参照), それらの量を求め w , s を導出した。その結果 $w=2,059\text{mm}$, $s=487\text{mm}$ であった。

5. 結 果

各観測プレートについて最小二乗法により得られたパラメータ a , e , d の値を表 2 に示す。 d の平均値は 456mm である。この望遠鏡は, 通常 $s=492\text{mm}$ となる位置に副鏡を設定している。この場合には, 副鏡の焦点と主焦点のずれ f は 36mm となる。

図 6 に, 1例として原板番号 835 で得られたパラメータの値による r_H-r_P 曲線を点線で示す。白丸は測定値である。

表 2 最小二乗法により得られたパラメータの値

| 原板番号 | a (mm) | e | d (mm) |
|------|----------|-------|----------|
| 834 | 396 | 2.161 | 460 |
| 835 | 381 | 2.195 | 455 |
| 836 | 377 | 2.202 | 454 |
| 平均 | 385 | 2.186 | 456 |

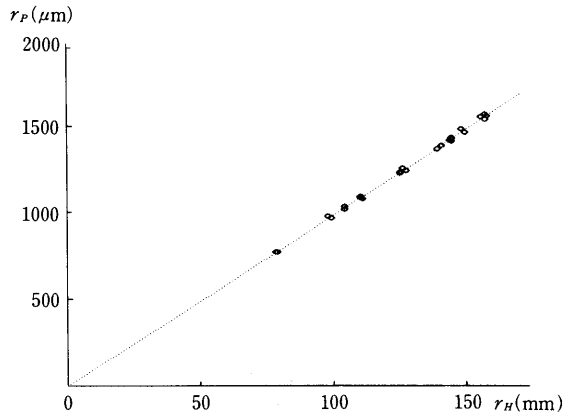


図 6 原板番号 835 で得られた r_H-r_P 図
点線は最小二乗法により得られたパラメータの値による r_H-r_P 曲線である。白丸は測定値である。

6. 検査における仮定

前述の結果から導かれる結論について述べる前に、本研究の球面収差検査方法において行われた主な2つの仮定について言及しておく。その仮定とは、1つは①球面収差以外の収差はないとすることであり、もう1つは② d_H の中心が光軸と一致しているということである。

①の仮定が成立していないときには r_H は変わらないが r_P が変わる可能性がある。②の仮定が成立していないときには一般に r_H も r_P も変わる。

①の仮定において考えられる収差としてはまず光軸が合っていないことによるコマ収差がある。しかし、我々はいわゆる芯出し望遠鏡により光軸合わせをしているので、大きな光軸の狂いはないと判断している。光軸の小さなずれがあったとしてもその場合には像の中心と光軸を結ぶ方向においてはハルトマン・パターンの間隔は一方では伸び、他方では縮む。また、その方向に垂直な方向においてはパターン間隔は変化しない。その結果、光軸の小さなずれがあっても d_P の値はほとんど変化しない。非点収差があった場合には同じ r_H に対してハルトマン・パターンのある方向では大きな r_P を生じるのに対して、別な方向では小さな r_P として現われる。したがって r_H-r_P 図において r_P 方向の分散を大きくはするが回帰曲線を変化させはしない。以上のことにより球面収差以外の収差は結果を変えないと推定される。

②の仮定が成立していなく、ハルトマン板の中心と光軸のずれ(ΔC)が10mmである場合の数値実験をした。このとき個々の r_H をもつ入射孔を通る光線追跡をし、それに対応する個々のハルトマン・スポットの位置を導出する。このようにして求めたハルトマン・パターンに対して、ハルトマン板の中心と光軸がずれていないとき($\Delta C=0$)と同じ方法で $r_H=d_H/2$ に対する $r_P=d_P/2$ を計算する。この結果、 $\Delta C=10\text{mm}$ のときの r_P と $\Delta C=0$ のときの r_P との最大の差は $0.5\mu\text{m}$ であり測定精度($\sim 10\mu\text{m}$)より極めて小さい。ハルトマン板の中心が光軸から10mmずれてもハルトマン・パターンにはほとんど影響がなく、 $\Delta C=0$ のときの $r_P=d_P/2$ とほとんど同じであるということがわかった。

我々の検査においては①、②の仮定がもしも成立していないとしても大きくは異なっていないと判断されるので、結果にはほとんど影響がないと推定される。

7. 結 論

主鏡は放物面、副鏡は双曲面であると仮定して得られた r_H と r_P の関数を最小二乗法で求めて描いた曲線は図6でみられるように測定点によくフィットしている。主鏡については $\lambda/4$ の精度で放物面であることが確認されている(根岸・大脇, 1978)。したがって、副鏡は算出された a , e をもつような双曲面にかなり近い形状をしていると判断できる。

Clark (1976) の実験によれば、主鏡の口径比が4のときには f は14.8mm以下でなければ球面収差の影響が像に現れるという。以前から本学のカセグレン望遠鏡は「像が悪い」といわれてきたがその大きな原因として許容範囲の2倍以上にもなっている主・副鏡焦点のずれがあげられよう。

ところが球面収差をなくするために副鏡を36mmほど主鏡から離れる向きに移動させようとするとつぎに述べるような不可避的な困難が生じる。

副鏡の移動量を ΔA , それに応じた合成焦点の移動量を ΔB とすると、本学の望遠鏡には近似的に次のような関係があることが調査により得られた。すなわち、

$$\Delta B = 10.3\Delta A. \quad (15)$$

したがって $\Delta A = 36\text{mm}$ ならば $\Delta B = 371\text{mm}$ である。Clarkによる限界の上限値になるように移動量をおさえたとしても $\Delta A = 22\text{mm}$ なので $\Delta B = 227\text{mm}$ となる。ところが望遠鏡のドロチューブの可動量は通常設定されている合成焦点位置から $\pm 50\text{mm}$ である。したがって $\Delta B \geq 227\text{mm}$ の移動は不可能であり、球面収差の影響がなくなるほどには副鏡を移動できない。 $\Delta A = 36\text{mm}$ の移動を可能にするには鏡筒の製作しなおしが必要となり、かなりの経費を要する。

球面収差除去の他の方法として補正レンズを使用することが考えられるが、補正レンズの設計・製作もかなりの費用を必要とする。

球面収差を除く最も現実的な方策は副鏡の再研磨であろう。具体的には $s = 492\text{mm}$ に副鏡を置くならば $a = 512\text{mm}$, $e = 1.962$ をもつような双曲面に再研磨すればよい。それによりドロチューブの可動範囲内であれば球面収差のない像が得られることになる。副鏡の再研磨（または再製作）はそれほど多くの経費を必要としないのでその方向での解決が望ましい。

8. 謝 辞

本研究を進めるにあたり有益な議論をしていただいた吉崎 潤氏（埼玉県立騎西高校教諭）に感謝する。

参 考 文 献

- Clark, R.N., 1976, *Applied Optics*, **15**, 1266.
久保田宏・大脇直明・水野孝雄, 1989, 東京学芸大学紀要, **41**, 163.
根岸 潔・大脇直明, 1978, 東京学芸大学紀要, **30**, 303.
吉崎 潤, 1986, 東京学芸大学修士論文.

