

西はりま天文台の60cm反射望遠鏡のハルトマンテスト

高橋敦¹、尾久土正己²、酒造晃子¹、横尾武夫¹

1) 大阪教育大学

2) 兵庫県立西はりま天文台

Hartmann Test of 60cm Reflector at Nishi-Harima Astronomical Observatory

Atsushi TAKAHASHI¹, Masami OKYUDO², Akiko MIKI¹, and Takeo YOKOO¹

1) *Astronomical Institute, Osaka-Kyoiku University, Kashiwara-shi, Osaka, 582*

2) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-53*

E-mail: takahasi@cosmos.cc.osaka-kyoiku.ac.jp

(Received 1994 July 12)

Abstract

We performed a Hartmann test of the 60cm reflector at Nishi-Harima Astronomical Observatory in May 4, 1993. Two months later, however, the optical instruments were replaced and improved. So, we again measured the Hartmann constant in November 16, 1993. The Hartmann constant is 0.9 arcseconds in the first time, while it is 0.3 arcseconds in the second time. Hence, the optical system is improved well. We also performed the simulation of aberration produced by the error in positioning a sub-mirror and compared it with the measurements. We found that the present optical system is in fair arrangement.

Key words: Telescopes - Hartmann test

1. はじめに

西はりま天文台の主力望遠鏡は60cmカセグレン式反射望遠鏡である。1991年に導入以来、一般観望と観測研究に活躍を続けて4年になる。その間、機械系と光学系に見いだされたいくつかの不備な点が改善されてきた。特に光学系については、眼視の測定により、顕著な球面収差が見いだされ、機械系とともに大幅な改修が1993年7月に成されるに至った。光学系の改修の主な点は副鏡と主鏡セルの交換である。

我々は1993年5月4日と11月16日に、この60cmカセグレン式反射望遠鏡のハルトマンテストを行った。前者は光学系の改修前の測定で、後者は改修後の測定になる。ここで、両者の測定結果を比較し、改修についての評価を考察したい。

ハルトマンテストは実際に観測している状態での光学系のテストである。(大沢, 石田 1977) 観測するときの光学系の精度は鏡そのものだけでなく、光軸や鏡に対する加重、主鏡と副鏡の状態等の影響を受けていることが考えられる。(野口, 他 1978) 中でも実際の観測では望遠鏡の構造上、副鏡を動かして焦点を合わせる

ので、その副鏡の位置が、主鏡と副鏡の曲率によってきまる本来の位置からずれることによって球面収差が起ることが知られている(山下 1977)。今回の測定がこの副鏡移動の影響をどのくらい受けているのかも考察するため、副鏡移動による球面収差の量をシュミレートして、測定結果と比較してみた。本報告は2節でハルトマン定数の測定とその解析について、3節でその結果と考察、4節でまとめを述べる。

2. ハルトマンテスト

2-1. ハルトマンテストの原理

まず最初にハルトマンテストの原理を簡単に説明しておく、詳しくは教科書等の文献(水野 1992; 大沢, 石田 1977; 野口, 他 1978)を参照されたい。

ハルトマンテストとは実際の観測が行える状態にした上での光学系の精度を検定する方法である。望遠鏡先端に多数の小孔をあけた板(ハルトマン板)を置き、この状態で恒星を撮影する。このときピントを焦点位置から一定の距離だけ内側にずらした場合(焦点内像)と、同じ距離だけ外側にずらした場合(焦点外像)の2枚の写真を撮影する。そして、その写真上に写ったそれぞれの小孔の座標を測定する。一对の内像と外像を結ぶ直線は光学系における一本の光線をあらわす。ここで測定した全ての小孔像の座標から、それぞれの光線の方程式を決定することができる。これらの光線群が収束する点が焦点であり、焦点を含み光軸に対して垂直な平面を焦点面という。実際には、光線と焦点面との交点は何等かの原因で一点に集中せず、最も収束した場所でも広がりを持つ。この交点の広がりを最小錯乱像と言う。焦点面で、光軸と垂直な方向にX方向とY方向を考え、ある光線が焦点面で光軸からずれる時、X方向へのずれを δX 、Y方向へのずれを δY とすると、成分 $(\delta X, \delta Y)$ のベクトルを取差ベクトルといい、その大きさが収差量 δ となる。この取差ベクトルの大きさの二乗平均を計算し、角度の秒で表したものがハルトマン定数 T であり、これの動径方向成分に関するものを1次元ハルトマン定数 T_r という。これらは焦点面での星像の広がりを表す量であり、実際の収差の目安になるものである。

2-2. 撮影と測定

このハルトマン板は5月の測定の際に自作し、11月も同じものを使った。今回の測定に用いたハルトマン板は、一辺56cmの正方形の内部に格子状に配列した48個の小孔を持つ。小孔は一辺1cmの正方形であり、それぞれの間隔は7cmとなる。ハルトマン板は段ボール紙で、鏡筒の先端にはまるように切り合わせてつくった。ハルトマン板の主鏡側は光を反射しないように艶のない黒色に塗装した。

ハルトマン像の撮影においては、測定の簡便さを意図して、従来の写真撮影ではなく、ビデオカメラによる撮影を行い、VTRに録画した。しかし、写真撮影と異なりビデオは光を積分できないため、測定の段階で光量が不足することがわかり、なんらかの手段で光の増幅または積分を行う必要があった。

まず5月はベガを測定天体を選び、光増幅を行う装置であるI.I. (Image Intensifier)をビデオカメラの前に付けて撮影した。外像と内像はドローチューブによって、それぞれ焦点から $\pm 50\text{mm}$ 移動させて像を得た。11月の測定では、シリウスを測定天体を選び、I.I.を使用しなかった。焦点からの移動量は $\pm 40\text{mm}$ とした。

ハルトマン像を計測するために、このビデオ画像を大阪教育大学天文学研究室にある専用画像処理装置LA525 (PIAS社製)に画像データとして取り込んだ。測定に用いた画像データは、焦点内外像の8画像の対である。画像処理装置の座標測定モードを用い、各小孔像の中心にカーソルを持って行き、その座標値を読みとった。8組の画像について、測定値の平均値をそれぞれの外像内像の座標とした。

11月の画像は光量が不足していたため、そのままではLA525による画像データへの変換ができなかった。

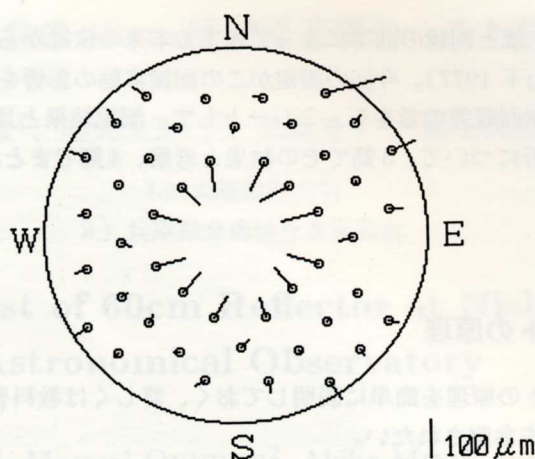


Fig. 1. The distribution map of aberration vectors, averaged of eight images taken in May.

Table 1. Hartmann constants.

	T	T_r
May(before replacement)	1.0"	0.96"
November(after replacement)	0.47"	0.30"

そこで、別の画像処理装置 AVIS により画像積分を行い、増幅画像をビデオテープに再記録した。この画像を LA525 に取り込んで、5月と同様の座標測定を行った。

3. 測定結果と考察

3-1. ハルトマン定数

ハルトマン像の小孔の座標を測定した結果を、先のハルトマンの方法に従って解析した結果を示す。

それぞれの光線の収差ベクトルを、ハルトマン板の各小孔を起点として図示したものを、5月の測定について Fig.1、11月について Fig.2 に示す。5月の結果である Fig. 1 を見ると、収差ベクトルは動径成分が顕著であり、特に鏡の中央近傍で異常に大きな収差量が認められる。このことは、改修前の鏡にかなり大きな球面収差があったことを示している。一方、11月の (Fig.2) では鏡の端の方で小さな収差が見られるが、全体として収差量は小さい値を示し、改修により鏡の精度が大幅に改善されたことが認められる。

次に、各収差量からハルトマン定数 T と 1次元ハルトマン定数 T_r を計算した。5月と11月の結果を Tab.1 に示す。ハルトマン定数は光学系の精度を数量的に評価する目安となる量である。久保田 (1964) によれば、 $1.5'' > T_r > 0.5''$ ならば良い対物鏡、 $0.5'' > T_r$ ならば理想的な対物鏡であるとされている。今回の測定では、5月では $T_r = 0.96''$ であったものが、改修により11月の測定では $T_r = 0.30''$ という小さな値を示している。ハルトマン定数で見ても、この望遠鏡の光学系が大幅に改善されたことがうかがえる。

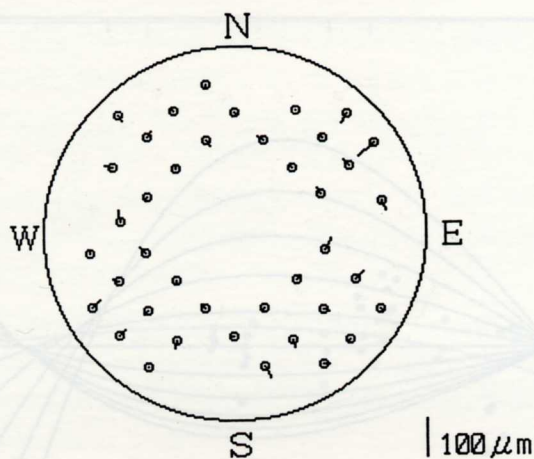


Fig. 2. The distribution map of aberration vectors, averaged of eight images taken in November.

3-2. 副鏡の位置について

カセグレン式の反射望遠鏡でのハルトマンテストは、主鏡と副鏡、両方の鏡を通過してきた光線がつくる像を測定することになる。その時、主鏡と副鏡の位置がそれぞれの鏡の曲率によって決められた本来の位置からずれている場合、結像に球面収差が生じる（山下、1977）。今回の測定では、ビデオカメラの取り付けの都合により、副鏡が必ずしも正規の位置にあるとはいえない。そのため、今回の測定結果にあらわれた球面収差がこのような光学系の配置の不正に原因する可能性が考えられる。

そこで、カセグレン光学系における光線追跡の数値シミュレーションを行い、副鏡が正規の位置にない場合のハルトマン像の座標と収差量を見積もった。このような計算結果と測定結果の比較から、鏡面のみに原因する収差を見積もることができる。現実の望遠鏡の光学系のパラメータを設定して、主鏡の光軸に平行な入射光の光線追跡を行った結果をFig.3に示す。横軸は入射光の光軸からの距離 r (mm)、縦軸は焦点面での収差ベクトルの動径成分の大きさ δr であり、副鏡を $h = 20$ (mm)毎に前後に移動させた場合について示してある。ここで、 h は主鏡に近づく方向、また δr は収差ベクトルが鏡の外方向をそれぞれ正としている。

次に、測定結果と副鏡移動による収差シミュレーションを比較し、今回の測定に副鏡移動がどのくらい影響を及ぼしているのか調べてみる。

副鏡の位置をいろいろ変えたとき、シミュレーションと測定値の収差の差が最も小さくなる時を、実際に撮影した時の副鏡の位置であるとした。

まず5月4日の測定では、副鏡を正しい位置から主鏡方向の逆方向に100mm動かした時に発生する収差と測定値の収差との差が最も小さい値を示す（Fig.4）。この移動距離は機構上大きすぎる値であり、鏡の内側の方の収差は、副鏡移動での収差でも拾えない量なので、光学系に少なくとも副鏡移動以外の不備な点が存在していることがわかる。

次に、現在使われている鏡である11月の測定では、副鏡の本来の位置から13mm主鏡側に動かした位置で、最も差が小さいことがわかった（Fig. 5）。ここで、その時の副鏡移動の成分を測定値から差し引いて、再び1次元ハルトマン定数を求めてみると $T_r = 0.30''$ であった。つまり、補正前と全く変わらなかった。

R.N. クラークによって副鏡を動かしてよい限度 ΔA は次の実験式で表されることが知られている（吉田、1991）。

$$\Delta A = 0.0058 F^{14.0}$$

ここで、60cm望遠鏡の主鏡のF数、 $F1$ は3.9なので ΔA は13.40mmとなるので、今回の測定においては副鏡

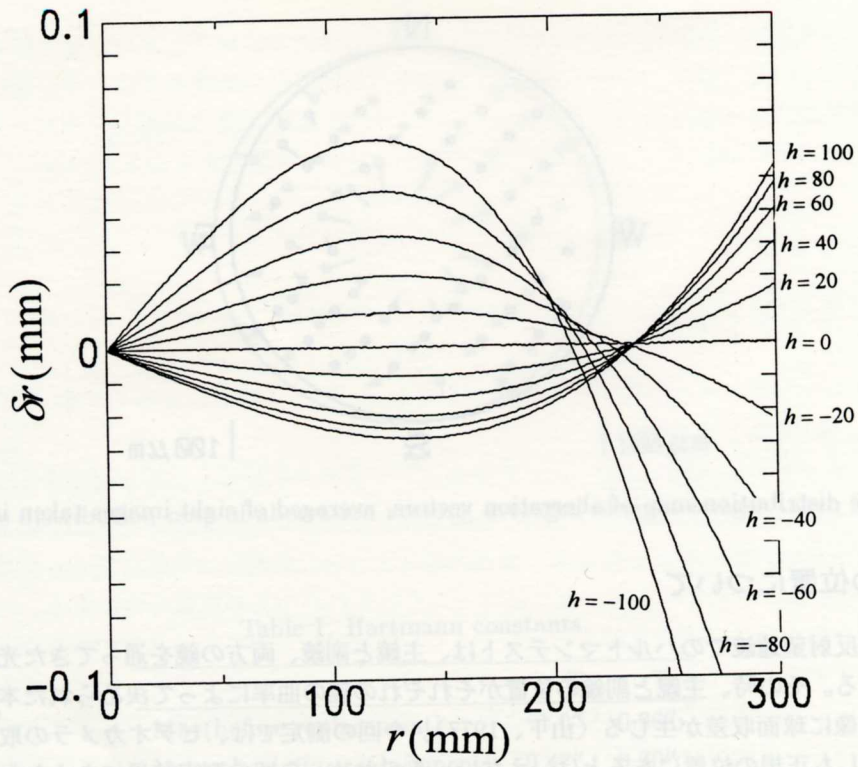


Fig. 3. The amount of aberration by the numerical simulation. The numbers attached on each curve are the values of h .

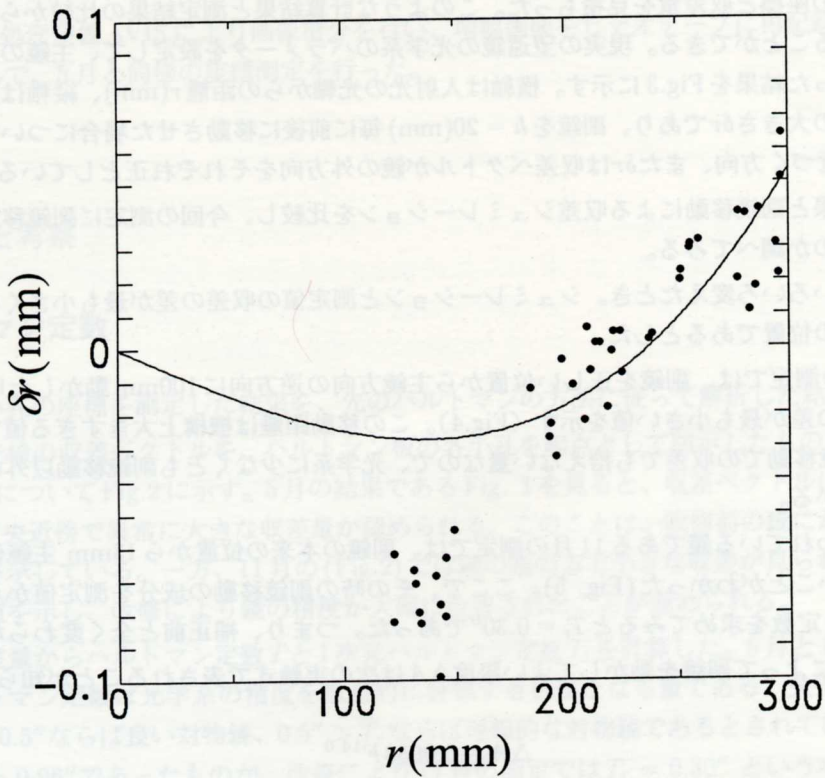


Fig. 4. The fitting on the data measured in May. The value of h is $h=-100$ mm.

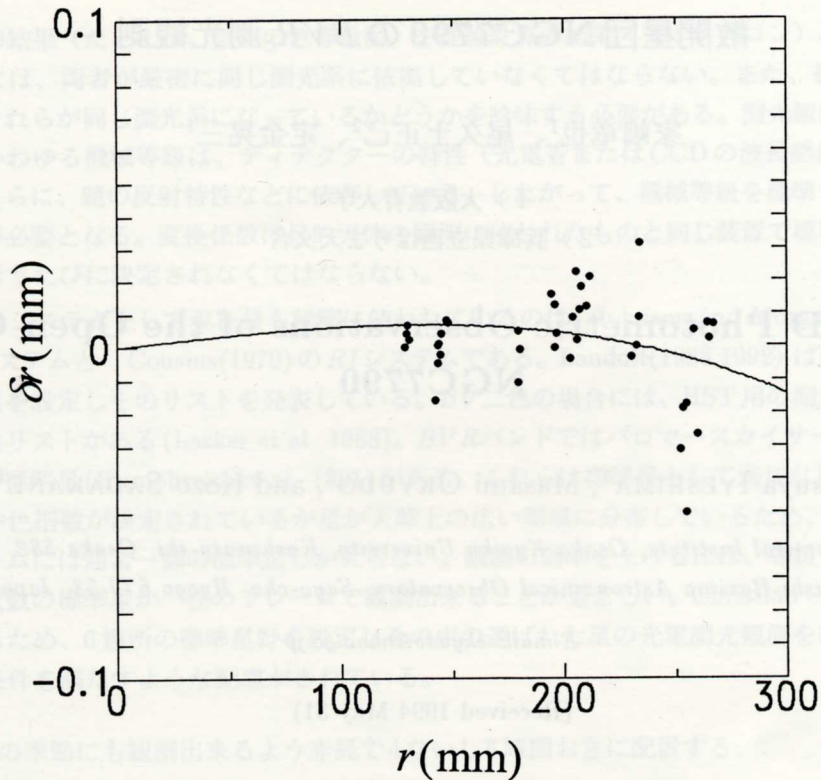


Fig. 5. The fitting on the data measured in November. The value of h is $h=13\text{mm}$.

位置の誤差がこの限界内にあったことになる。

4. まとめ

今回の2つの測定から、7月の改修によって、60cm反射望遠鏡の光学系の精度は非常に良くなっているのがわかる。これは副鏡の鏡面精度が格段に向上したことが大きな要因である。また主鏡セルや副鏡支持機構の改善も成功したことにもよる。光学系の配置も適正であることが判明した。今後はこのようなハルトマンテストがより効率的に高精度に行えるようなシステムの開発が望まれる。

今回の解析において、大阪市立科学館の加藤氏、嘉数氏には、画像処理装置 AVIS 使用の便宜と、多くのご教示をいただいた。両氏に対し感謝申し上げます。

《参考文献》

- 水野孝雄 1992, 『宇宙を観るII』第2章6節, 横尾武夫編(恒星社恒星閣) p36
- 吉田正太郎 1991, 『(天文アマチュアのための)望遠鏡光学・反射編』(誠文堂新光社)
- 大沢清輝・石田五郎 1977, 東京天文台報 18, 42
- 野口猛・征矢野隆夫・青木勉 1978, 東京天文台報 18, 169
- 山下泰正 1977, 東京天文台報 18, 24
- 久保田広 1964, 『光学』(岩波書店)