

法政大学二連望遠鏡の 遠隔観測システム構築と性能評価：30 cm 望遠鏡と CCD カメラの性能評価

吉田, 尚洋 / Yoshida, Naohiro

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014357>

法政大学二連望遠鏡の 遠隔観測システム構築と性能評価 — 30 cm 望遠鏡と CCD カメラの性能評価 —

CONSTRUCTION OF REMOTE OBSERVATION SYSTEM
AND PERFORMANCE ASSESSMENT
OF HOSEI TWIN TELESCOPES
-- ASSESSMENT OF 30 CM TELESCOPE AND CCD CAMERA --

吉田尚洋

Naohiro YOSHIDA

指導教員 岡村定矩, 八木雅文

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻博士前期課程

A twin optical telescope consisting of a 30-cm reflector and a 13-cm refractor was installed in Koganei campus in March 2015. We have been constructing its remote observation system and assessing its performances. This paper describes the results of the performance test of telescope optics and CCD camera. Hartmann constant of the 30-cm telescope was found to be 1.6 second of arc. Behavior of the bias level of the CCD camera was investigated in detail. Linearity, gain, readout noise and dynamic range of the camera were measured.

Key Words: telescope, remote observation, Hartmann test, CCD camera, linearity, gain, readout noise

1 研究の背景と目的

法政大学理工学部創生科学科には、天文や宇宙に関心のある学生、中高の理科の教職を目指す学生が多いため、実際に天体観測を行う機会を作るという目的で2015年3月、小金井キャンパス西館屋上に法政大学二連望遠鏡 HOTATE (HOsei Twin Astronomical Telescopes) が設置された(図1,2)。口径30cm反射望遠鏡(図3)と口径13cm屈折望遠鏡(図4)の二連望遠鏡である。学生の天体観測の実験、季節の観望会などで活躍している。

夜空の明るい東小金井にある小口径望遠鏡で観測を行うという制限の中で、観測天文学研究室では、空の明るさの影響を受けにくい狭帯域での近傍銀河の長時間撮像観測や、超新星などの突発天体のモニター観測などの研究に取り組む。これらの長時間撮像や、突発天体の連続的な観測には、長期間の夜間観測が求められる。したがって、人が直接操作をせずとも、遠隔の制御が可能な自動観測システムが理想である。一方でサイエンスとしての成果を出すには、より高い観測精度が求められる。その実現のために、光学性能や機械性能の評価、調整、向上が求められる。したがって目的とする研究を行うためには、観測システムの開発と望遠鏡の性能評価が必要不可欠である。

観測天文学研究室メンバーである我々の目標は二つある。第一に、西館屋上に設置された HOTATE を約 100 m 離れた中央館の実験室から遠隔制御し、データを実験室に転送して処理解析を行う遠隔観測システムの開発を行うことである。第二に、研究に用いる 30 cm 望遠鏡の光学性能および機械性能を評価し、CCD カメラの測光性能の評価と合わせて総合的な観測性能を評価することである。プロジェクト全体の成果についての論文(参考文献1)は別途まとめられていて、国立天文台報告に投稿される予定である。本論文ではこの観測性能評価の結果を報告する。



図1: HOTATEのロゴ



図2: 2.6mドーム(協栄産業株式会社)



図3: 口径30cm反射望遠鏡
(Meade FBACF)



図4: 口径13cm屈折望遠鏡
(タカハシTOA-130NS)

2 30 cm 反射望遠鏡の光学性能評価

実際の望遠鏡に搭載されている鏡やレンズには、理想的な光学系モデルとのある程度のずれ、すなわち個性がある。ここでは HOTATE の望遠鏡がどのくらい精度の良い観測ができるのか、どの程度の性能を持つのかを調べた。具体的には、観測精度の向上のための光軸調整、光学性能の定量的評価のためのハルトマンテストを行った。

2.1 ハルトマン板の製作

光軸調整とハルトマンテストに用いるハルトマン板(マスクプレート)を、黒ボール紙(0.8mm厚)で製作した(図5)。30cm反射望遠鏡の筒先に取り付けて使用する。スポット(小孔)が多数空いたこの板を筒先に装着して撮像することで、スポットと同じパターンの点が光点として並ぶ画像を得ることができる(図6)。スポットが大きすぎると短時間の露光でも光量が飽和してしまうため、「1等星を1秒露出で撮影したときに光量が飽和しない」という制限を満たす設計に至るまで試行錯誤した。



図5: 最終版ハルトマン板

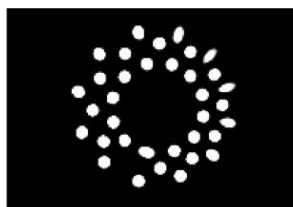


図6: ハルトマン板をつけて撮影した画像

2.2 光軸調整

HOTATE に搭載されている反射望遠鏡は、カセグレン式と呼ばれる形式である(図7)。望遠鏡へ入射した光は主鏡で反射し副鏡に集中する。副鏡で再び反射した光は、主鏡の中央の開口部から接眼部へ抜けて光束を作る。主鏡と副鏡の向きがずれていると光軸が傾き、像がゆがんでしまう。そこで二枚の鏡の光軸を調整し、光学系の性能向上を図る。

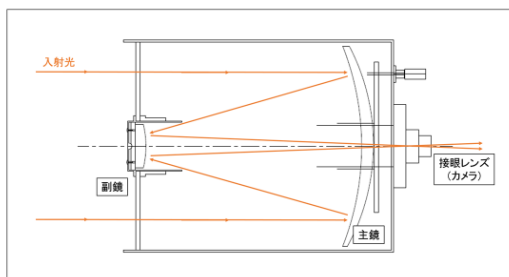


図7: カセグレン式望遠鏡のしくみ(協栄産業提供、改変)

副鏡の裏側に光軸調整機構があり、三か所のねじの締め具合を調節することで副鏡の傾きを微調整でき、光軸のずれを修正できる。調節ごとのフィードバックとして、ハルトマン板を筒先に装着し、明るい天体を撮像する(図5とは別の試作の板を使用)。撮影された画像には、ハルトマン板のスポットと同じパターンの光点が点対称に並

んでいることが理想である。この光点の並びが対象に見えるようになるまで微調整を繰り返す。

三つのねじに番号をふり、「どのねじを左右どちら回りにどのくらい回したか」を記録し、2016年5月24日と2016年8月4日の二日間で微調整を20回程繰り返した。初期状態ではスポット像が画像右下方向に偏っている(図8)、調整後では非対称具合が改善された(図9)。しかし調整後も、画像の左方最外周のスポットは像が異常にゆがんでぼやけている。



図8: 光軸調整前(2016年5月24日撮影)

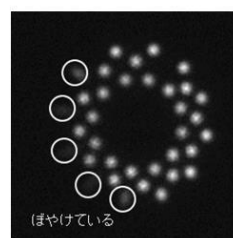


図9: 光軸調整後(2016年8月4日撮影)

スポット像のゆがみの原因として、望遠鏡の向きによる重力の影響や、フォーカスレバーによる圧迫の影響が考えられる。これを確認するための測定を2016年10月14日に行った。望遠鏡の姿勢を変えながら、またフォーカスレバーの位置を動かしながら、北極星方向(北向き高度約36°、時角-4.5^h)、天頂近く(西向き高度約30°)、南(高度約25°)の三か所を撮影した(図10)。しかし最外周のスポット像がぼやけている様子は、どの画像においても変化はなかった。つまりスポット像のゆがみは重力やフォーカスレバー位置によるものではないことが分かった。その原因を特定することもできなかった。メーカーに問い合わせているが回答は得られていない。

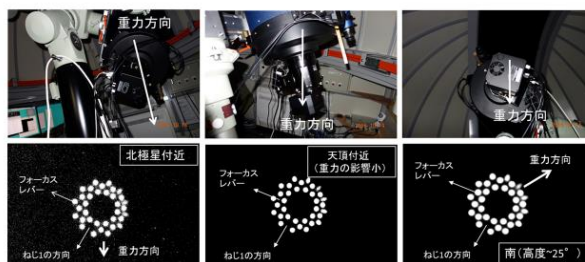


図10: 三つの異なる姿勢で撮影したスポット像

2.3 ハルトマンテスト

実際の鏡やレンズには収差がある。ハルトマンテストは、望遠鏡の収差を実験的に調べる方法の一つである。この章では光軸方向をz軸、光軸に対して垂直な方向にx軸とy軸をとって説明する(図11)。明るめの星を視野に入れて、望遠鏡筒先にハルトマン板(図5)を入れ、ピントを焦点位置から内側にずらした露出(焦点内像)と、外側にずらした露出(焦点外像)を何回か行う。理想的な光学系であれば、光軸に垂直な二面で観測すると、焦点内外像それぞれの撮像画像で、ハルトマン板のスポットと同じパターンが互いに点対称に現れるはずである。しかし、

現実の光学系には収差があるため、正確な点対称のパターンにはならず、焦点面における光線も一点に交わらない。この xy 平面における光点の広がり最小になる像を最小錯乱像という (図 12)。

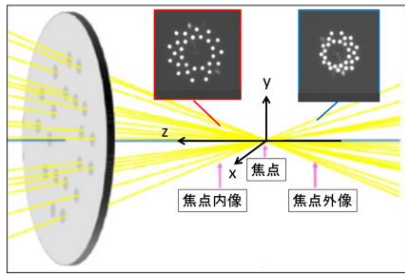


図11: ハルトマンテストのイメージ図
(参考文献[2]の図を改変)

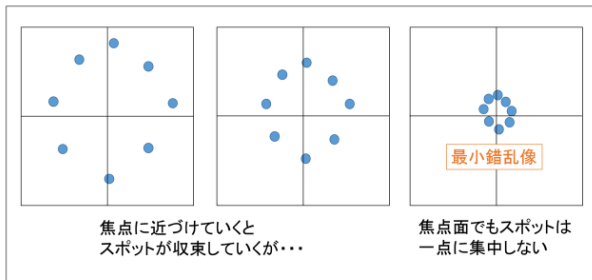


図12: 最小錯乱像のイメージ

そこで、焦点内外像それぞれについて、光軸に垂直な方向に xy 座標をとり、スポットのパターンの座標位置を比べ、対応する点を結んだ線が焦点面と交わる場所のずれのベクトルを収差ベクトルとする。この収差ベクトルの大きさの二乗平均 (RMS) を計算し、角度の秒 (1 秒は 1 度の $1/3600$) で表したものがハルトマン定数であり、望遠鏡の光学性能を定量的に表す指標となる。最小錯乱像面の z 軸での値は、そのときの観測において最もピントの合う位置であることを意味する。観測のたびにハルトマンテストを行い、その観測における最適なフォーカス値を求めるシステムを作ることも目標の一つである。

ハルトマン定数はシーイングと併せて光学性能評価に反映される。ここで「シーイング」について説明する。実際の観測では、大気の乱れなどにより、本来は点光源であるはずの星像が広がってしまう現象が起こる。これを大気ゆらぎと呼ぶ。大気ゆらぎは観測地点の地表近くの乱流や望遠鏡ドーム内での温度勾配などでも発生し、これによる星像の乱れをシーイングと呼ぶ。シーイングは点光源の像の半値全幅 (FWHM) として定義され、ハルトマン定数と同じく単位は角度の秒で表される。一般的に、シーイングが 1 秒程度の観測環境においては、ハルトマン定数が 0.5 秒より小さければ、その望遠鏡の分解能を最大限活かすことができると評価する。つまり、観測環境の良さや望遠鏡の分解能が見合っているかを確認するのである。例えば、シーイング 0.5 秒という良い観測環境であっても、望遠鏡のハルトマン定数が 2 秒であれば、4 秒程度の分解能の撮像しかできないということである。国立天文台のすばる望遠鏡が設置されているハワイ島マウナケ

ア山頂など優れた観測地点ではシーイングが 0.5 秒程度であるが、日本国内では良いところでも 1 秒程度である。撮像の角度分解能 (像サイズ) を決めるものには、望遠鏡の回折効果 (口径と観測波長の比で決まる)、光収差、検出素子の画素サイズなどがあるが、地上での可視光観測の場合は、角度分解能はほとんどシーイングで決まる。

2.3.1 ハルトマン定数と最小錯乱像面位置の計算

ハルトマンテストの測定は、五種類のフィルター (Ha、B、V、R、I) で、フォーカサーの位置を最小 (1) と最大 (9999) に設定して行う。測定によって得られた画像をそれぞれ解析する。各スポットの座標を天文学分野で広く使われている FITS 画像解析ソフトウェア (SAOImage ds9 と IRAF: 参考文献 5, 6) を用いてリストに記録する。このリストファイルを読み出し、ハルトマンテストの解析計算を Python プログラムで実行する。ハルトマン定数およびベストフォーカスの計算手順を参考文献 3 に従って以下に示す。

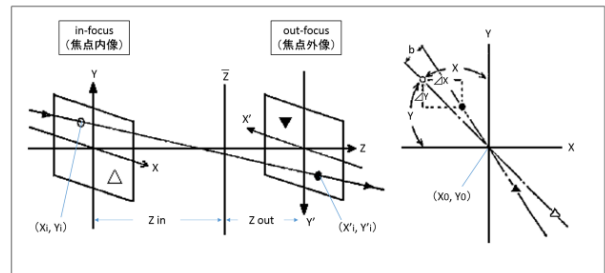


図13: ハルトマンテストの概略図
(参考文献[3]の図を改変)

光軸方向を z 軸とし、それに垂直な方向に X と Y を取る (図 13)。焦点内像と焦点外像を撮影した位置をそれぞれ z_{in} と z_{out} とする (本研究では $z_{in}=1$ と $z_{out}=9999$ である)。焦点内外像で測定したそれぞれのスポットの座標を (X_i, Y_i) , (X'_i, Y'_i) とする。重心の座標を (X_0, Y_0) とし、焦点内外像での座標差を ΔX_i , ΔY_i とする。すなわち、

$$\Delta X_i = X_i - X'_i, \Delta Y_i = Y_i - Y'_i \quad (1)$$

$$X_0 = \sum X_i / n, Y_0 = \sum Y_i / n \quad (2)$$

ここで n はスポットの数である。座標差の平均は、

$$\Delta X_0 = \sum \Delta X_i / n, \Delta Y_0 = \sum \Delta Y_i / n \quad (3)$$

となる。焦点内像の重心は焦点外像の重心に投影されるとする。座標原点を焦点内像のスポットの重心に取ったときの焦点内像のスポットの座標は、

$$x_i = X_i - X_0, \quad y_i = Y_i - Y_0 \quad (4)$$

となる。焦点内外像の座標差 (ΔX_i , ΔY_i) とそれぞれの平均との差は、

$$\Delta x_i = \Delta X_i - \Delta X_0, \Delta y_i = \Delta Y_i - \Delta Y_0 \quad (5)$$

で求められる。この $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ には、焦点内外像の大きさの違い a と撮影時のカメラの微小回転 b が含まれている。そこで、

$$\Delta x_i = ax_i + by_i, \quad \Delta y_i = -bx_i + ay_i \quad (6)$$

とにおいて、 a, b を最小二乗法で求める。最小錯乱像面位置 \bar{z} は、

$$\bar{z} = (Z_{out} + Z_{in})/2 + a(Z_{out} - Z_{in})/4 \quad (7)$$

で求められる。また、最小錯乱像面における各光線の横収差は、

$$\begin{aligned} \delta x_i &= (\Delta x_i - ax_i - by_i) / 2, \\ \delta y_i &= (\Delta y_i + bx_i - ay_i) / 2 \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。 $(\delta x_i, \delta y_i)$ は収差ベクトルと呼ばれ、収差ベクトルの大きさ $\delta_i = \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2}$ の平均値をハルトマン定数 R と呼び、角度の秒で表す。すなわち、

$$R = (2.06 \times 105 / f) \times (\Sigma \delta_i / n) \quad (9)$$

ここで、 f は望遠鏡の焦点距離で、 f と δ の単位はいずれも mm である。ハルトマン定数は最小錯乱円の半径の指標である。

2.3.2 結果と考察

ハルトマンテストのための観測は 2016 年 11 月 25 日に行った。気温は 10°C であった（ドーム内の温度計、データロガーの記録温度、フォーカサーの記録温度を平均した）。B バンドの撮影結果を図 14 に、得られたハルトマン定数と最小錯乱像面位置を表 1 に示す。前節 (2.2) の光軸調整後でも、五つのフィルターのうち I バンドではスポット像位置の測定が困難になるほどの干渉パターンが見られたため、ハルトマンテストからは除外した。

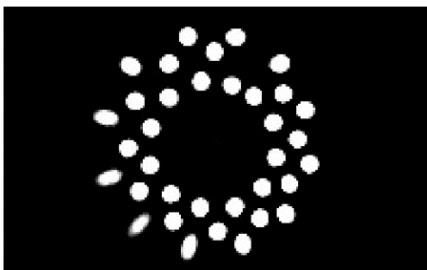


図14: Bバンド・Focus=9999のハルトマンテスト画像

表 1 の最小錯乱像面位置およびベストフォーカスの値の単位は 1/10000 inch (=2.5 μm) である。ここで「ベスト

フォーカス」について説明する。ベストフォーカスとは、その日そのときの観測において、最もピントの合うフォーカス値を眼視測定（一度の露光で、フォーカス値を変えるのと同時に視野内の星をわずかに移動させ、最も星像が小さくなるフォーカス値を探す測定）によって求めた値である。理想的には、計算によって求めた最小錯乱像面位置と測定で導いたベストフォーカスは一致する。このフォーカス値はフィルターの厚さに相関する。Ha バンドのフィルターの厚さが 2 mm で、他のバンドのフィルターは厚さが 4 mm であるため、B、V、R バンドはフォーカス値が一致するはずである。これを踏まえて結果を考察する。B、V、R バンドの最小錯乱像面位置は概ね一致していることが確認でき、また Ha バンドとの差はおよそ +750 であることが分かった。一方で、どのバンドについても最小錯乱像面位置とベストフォーカスにずれがあり、そのずれ具合は Ha バンド (-450 程度) と他のバンド (-200 程度) とで異なる（補足解析は次節 2.3.3 に記載）。

表1: ハルトマンテスト結果(気温10°C)

| バンド | ハルトマン定数R | 最小錯乱像面位置Z | ベストフォーカスF |
|-----|----------|-----------|-----------|
| Ha | 1.723 | 4437 | 4900 |
| B | 1.644 | 5190 | 5300 |
| V | 1.637 | 5178 | 5300 |
| R | 1.630 | 5198 | 5300 |
| I | - | - | - |

ハルトマン定数の単位は角度の秒 (") である。ハルトマン定数は 1.6 秒程度であった。シーイングが約 3 秒以上の観測環境では分解能を十分活かすことができるが、3 秒よりも小さい良条件であったとしても、その分解能を活かしきれないということである（ハルトマン定数が 0.5 秒以下ならば、シーイングが 1 秒の測定において分解能を十分に活かすことができる）。11 月 25 日に法政大学小金井キャンパスのある東小金井で実際に観測された星像サイズは約 3.8 秒角であった。典型的なシーイングサイズを知るには年間を通して観測データを蓄積する必要がある。

2.3.3 光線追跡図と光線分布図

表 1 より、プログラムの計算によって得られた最小錯乱像面位置と、眼視測定で得られたベストフォーカスにずれがあることが確認できた。一致するべき二つのフォーカス値のずれを追究すべく、補足の解析を行った。

ハルトマンテストの測定において、ハルトマン板の各スポットを通った光がどのような軌跡を描くのかを調べた。方法は以下の通りである。筒先にハルトマン板を付けた状態で Focus=1, 9999 以外の値 (1000, 2000, …, 8000, 9000) で撮像し、可能な限り (スポット位置を記録できる限り) ハルトマンテストを行う。その過程で得られる各スポットの変換座標を x 平面、 y 平面それぞれに投影してプロットする。このプロットを各フォーカス値の測定において行い、各スポットに対するプロットの回帰直線を求める。この回帰直線は、各スポットを通過した実際の光の

光線モデル（光線追跡図）である（図 15, 16）。横軸にフォーカサーの目盛り値を、縦軸に座標位置を示した。図 15, 16 のそれぞれ中央に着目すると、最小錯乱像面位置付近で 2-4 本の光線だけが他から大きく外れていることが分かる。Ha バンドの測定では、焦点面に近いフォーカスにおけるスポット位置を記録することができず、光線追跡図を作ることができなかった。そのため光線追跡図のずれている直線のスポットが Ha バンドでも同じようにずれるのかの再現性を確認することはできなかった。

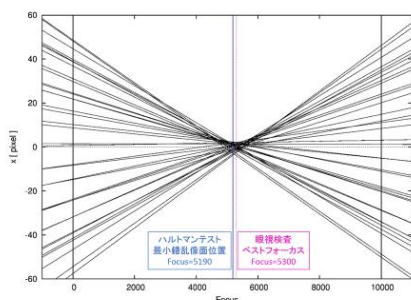


図15: Bバンド測定時の光線追跡図(x平面)

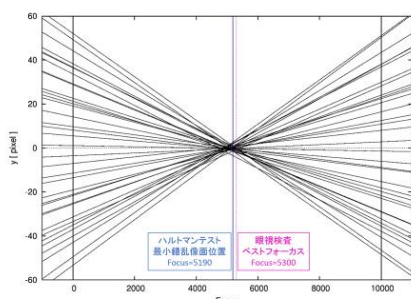


図16: Bバンド測定時の光線追跡図(y平面)

この光線追跡図より、任意のフォーカス値におけるハルトマン板を付けた撮影画像をシミュレーションできる。選択したフォーカス値に対応する全スポットの x 座標と y 座標をプロットすることで、疑似的にそのフォーカス値に設定して撮影して得られる画像をつくることができる。これにより実際に撮影したのでは像が重なってスポットの分布がよく分からない焦点近くの様子を調べられるようになる。今回の測定における最小錯乱像面位置およびベストフォーカス付近の光線分布図を作成した（図 17）。

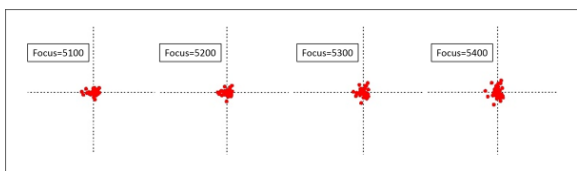


図17: Bバンド測定時の光線分布図

図 17 を見ると、スポット像の広がり小さいのは最小錯乱像面位置（Focus=5190）よりもベストフォーカス（Focus=5300）の方であることが分かる。つまり実際に最もピントの合うフォーカス値を示しているのは、眼視観測によるベストフォーカスであることが分かった。今回作成したハルトマンテスト解析プログラムは付録をもと

にしているが、この計算式は HOTATE 望遠鏡の光学系の特有の状況は想定していない。HOTATE の CCD カメラは、光学系の一部をなしているフォーカリデュサー・フラットナー（ $\times 0.75FR$ ）と一体で望遠鏡に取り付けてあり、フォーカスを変えると CCD カメラは $\times 0.75FR$ と一体となって動いてしまう。しかしこのモデルであっても、焦点面の移動量は線形性を持つため、問題となっているずれについて説明することはできない。今回の測定ではこのことの原因、またハルトマンテストへの影響を調べることができなかった。今後の課題である。

3 CCD カメラの性能評価

3.1 バイアスの安定性

バイアスとは、露出時間 0 で露光せずに読み出したデータ（CCD 素子の A/D 変換のオフセット値）である。ドーム内が暗い状態でシャッターを閉めたまま 0 秒露出を撮ることで測定できる。露出 0 秒なので、出力される読み取り値も 0 になるのが理想だが、現実には CCD から画素ごとの電荷を読み出すときに一定のバイアス電圧をかけて、読み出し雑音が混入しても負の値が発生しないようにするため読み取り値は 0 にはならない。バイアスは CCD から読み出されたすべての画像に含まれている。したがって画像解析の際には、天体の光など必要な読み取り値と分離するために、データからバイアスを差し引く処理を行う。観測中のバイアスがどれくらい安定しているのかを調べるために、いくつかの条件下でバイアスのみの測定を行った。

バイアスの安定性の測定は 2016 年 8 月に始めた。当初の観測データから、時間経過によりバイアス値が変動することが分かっていたため、SIPS（CCD カメラ操作ソフトウェア）で撮影時間や撮影枚数を変えて測定を重ねた。バイアス測定の結果は、横軸が経過時間（min）、縦軸にバイアス値（count）と CCD 温度（ $^{\circ}C$ ）をプロットしたグラフにまとめた（図 18-図 24）。初めに分かったことは、バイアス変動は CCD カメラ温度が影響していること、連続測定ではバイアス変動が極端に大きくなることであった。図 18 を見ると、バイアスは CCD 温度の上昇・低下と相関していることが分かる。次に図 19 を見ると、時間間隔を空けない測定では、バイアスは CCD 温度の振る舞いと独立に上昇と低下を繰り返すことが分かる。また図 18 と図 19 では CCD 温度に $5^{\circ}C$ 程度の大きな差があることも判明した。CCD 温度が比較的高い図 19 の方が外気温は低い。ドーム内温度の大幅な変動を防ぐため、観測時以外はエアコンの電源を ON にしているが、エアコンの ON/OFF はバイアスに影響しなかった。よって、外気温やドーム内温度よりも、読み出し動作の違いが CCD 温度を上げる要因であると可能性がある。

図 18 と図 19 の結果を踏まえ、どのくらいの時間間隔を設ければバイアスが安定するのかを調べるための測定を 2017 年 1 月に行った。図 18 と図 20、図 21 を見比べる

と、1-2 分間隔ではバイアスおよび CCD 温度に変動が見られるが、3 分間隔では変動が抑えられていることが分かる (± 10 カウントの範囲)。よって「データ読み出しの後、次の読み出しまでに 3 分の間隔を空ける」ことが望ましいと結論付けられた。

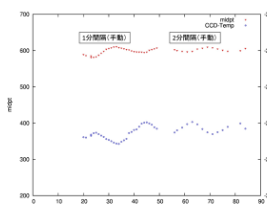


図18: 1分-2分間隔で手動測定
2016年9月16日測定
外気温24.8°C

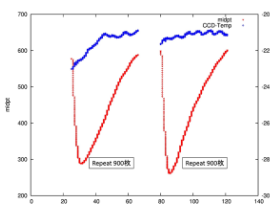


図19: 900枚連続で自動測定
2016年9月22日測定
外気温19.2°C

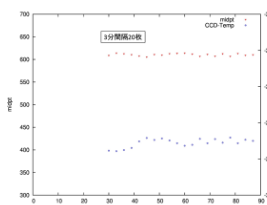


図20: 3分間隔で測定
2017年1月24日測定

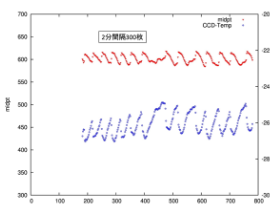


図21: 2分間隔で測定
2017年1月24日測定

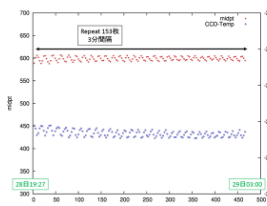


図22: 3分間隔で測定
2016年9月28日夜中に測定

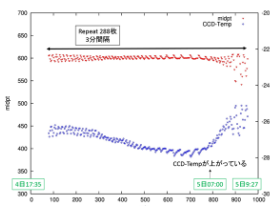


図23: 3分間隔で測定
2016年10月4日夜中から
朝にかけて測定

将来的に夜通しの観測をすることを考慮し、夜通しのバイアス測定も行った。図 22 と図 23 は双方とも 3 分間隔の自動測定という点は共通である。夜中 19 時-27 時の時間帯に測定した図 22 は、3 分の間隔を空けていることによりバイアスおよび CCD 温度が安定しており、先の結論の裏付けにもなっている。しかし、同じ条件で翌朝 9 時まで測定を続けた図 23 では、CCD 温度の変動、またそれに伴うバイアスの変動が見られる。図 23 の CCD 温度が急上昇している時刻を見ると朝 7 時であることが分かる (同じ測定を別日に実施したが、同様に朝 7 時に CCD 温度が上昇していた)。この原因として一番考えられるのは朝日であるが、太陽光 (もしくはそれに伴う外気温・ドーム内温度の変化) が CCD 温度にどの程度影響するのかを解明することはできなかった。また図 22 では見られなかった深夜の CCD 温度の低下が図 23 では確認できることの意味も不明である。なお他の観測の結果より、CCD がよく冷えていれば (-30°C 以下)、バイアスは安定する傾向にあることも分かった。

3.2 線形性 (Linearity)

CCD に入ってきた光電荷数 N_e と CCD が読み出したカ

ウント N_c が線形関係 $N_c = g \times N_e$ として近似できるのは、カウントがどの範囲かを調べる。 g はゲインである (次節 3.3 に記載)。回路内での A/D 変換や電圧増幅アンプの箇所が必ずしも線形ではないことにより、実際の CCD では線形性は制限される。一般に N_e は直接求めることはできないが、同じ明るさの天体や光源 (フラット) を観測している場合、 N_e は露光時間 t に比例する。したがって、そのような状態で N_c と t のグラフを描き、 N_c のどの範囲で線形性が成り立つのかを調べる。CCD には貯められる電荷の上限 (飽和値) があり、どのタイミングで、またどのように飽和するのかも確かめる。

ドーム内で白熱電球の光が満遍なく当たるようにフラット板と呼ばれる白い板を設置し、望遠鏡を向ける。Ha バンドに設定し、露光時間を (1 s, 2 s, 4 s, 8 s, …) のように変えて撮影した。撮影した各画像からバイアスを引き、ドームフラット (ドーム内を明るくした状態でフラット板を撮影したデータ) で割る。そうして得られた画像のカウント平均値をその露光時間に対するカウント値とした。この結果を、横軸をカウント値 N_c 、縦軸を露光時間 t (s) としてプロットしたものを図 24 に示す。上図の破線は露光時間 1 s, 2 s, 4 s, 256 s 以外のデータでフィットした線形モデル、下図は線形モデルからの相対誤差である。

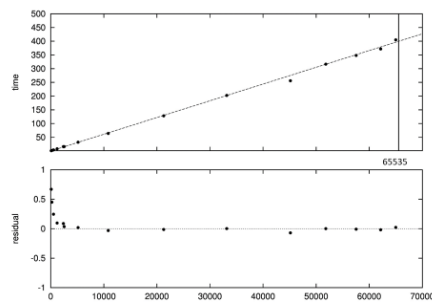


図24: リニアリティ解析

CCD 素子には電荷を溜められる上限があり、通常は A/D 変換の上限値 65535 がその飽和レベルの近くになるように読み出し回路を設計する。図より 65000 カウント付近まで CCD は飽和していないことが分かる。露光時間 1 s, 2 s, 4 s, 256 s を除いたデータから求めた線形モデル (図 24 の上図の近似直線) は、 $N_c = 0.0061 t$ となった。線形モデルからの相対誤差 (図 24 の下図) より、 N_c が小さくなると、急激に残差が大きくなることが分かる。カウント値が $300 \leq N_c \leq 65000$ の間では線形モデルからのずれは約 3% 以内である。一方、カウント値の小さい $N_c \leq 300$ の露光時間は近似から除外した 1 s, 2 s, 4 s のものである。これらのプロットの残差の振る舞いは、CCD の線形性からのずれというよりも、露光時間の不正確さが原因であると言える。それはカメラのシャッター速度が影響しているのだと考えられる。露光時間が短いとシャッター速度の精度が大きく影響してしまう。そこでシャッター速度を約 0.7 秒であると概算し、 $N_c = 0.0061 (t - 0.7)$ としたモデルを当てはめて残差を改めて計

算した。これをプロットしたものを図 25 の下図に示す。上図は元の線形モデルの相対誤差である。このモデルでも露光時間 1 s のデータだけ極端に外れた値を (-50%) を示したため、1 s は除外した。しかしそれ以外の露光時間のデータは、 $N_c \leq 300$ も含めて、線形性からのずれを $\pm 3\%$ 程度に収めることができた。露光時間 1 s に関しては解決策を出せなかった。今後の課題である。

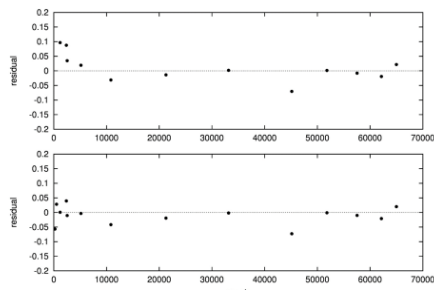


図25: シャッター速度を考慮した線形モデルからの相対誤差

3.3 ゲイン (Gain)

ゲインとは一般的に出力と入力の比を表す用語であり、天文用 CCD カメラのゲイン g は、

$$g = N_e / N_c \quad [\text{e/カウント}] \quad (10)$$

で定義される。ここで N_e は画素に溜まった電荷の数、 N_c はそれに対応するカウント値である。式 (10) より $N_e = gN_c$ であるため、それらの標準偏差の間には、

$$\sigma(N_e) = g \sigma(N_c) \quad (11)$$

の関係がある。ここで N_e はポアソン分布で近似できるため、 $g(N_e) = \sqrt{N_e}$ である。そこで式 (11) は、 $\sqrt{N_e} = g\sigma(N_c)$ となり、両辺を 2 乗すると $N_e = g^2 \sigma(N_c)^2$ となり、ここに $N_e = gN_c$ を代入して、最終的に、

$$g = N_c / \sigma(N_c)^2 \quad (12)$$

が得られる。つまりゲインは、バイアスを差し引いた画像から、画像の平均カウント N_c とその分散 $\sigma(N_c)^2$ を求め、 $\sigma(N_c)^2$ を N_c に対してプロットした図の近似直線の傾きの逆数から求められる。またこの図の y 切片は平均カウント=0 に対応する分散であるため、その平方根が読み出し雑音になる (次節 3.4 に記載)。

ゲインを求めるために、2016 年 12 月 2 日に、フラット板を使って、露光量をさまざまに変えてドームフラット画像を撮影した。使用したバンドは Ha であるが、ゲインの解析にはバンドは関係ない。ドームフラットは完全に一様ではなく、またゴーストの影響があるので、同じ露光量に対して 2 枚のフレームを撮影した。この 2 枚のフレームからそれぞれバイアスを引いたものの差を作ると、平均はほぼ 0 となり、その分散の 1/2 が 1 枚のフラット

フレームの分散になる。2 枚のフレームの平均カウントの平均 N_c を横軸に、その差のフレームの分散を 2 で割った値 $\sigma(N_c)^2/2$ を縦軸にとってデータをプロットしたものが図 26 である。破線は 30000 カウント以下のデータに対してフィットした直線である。

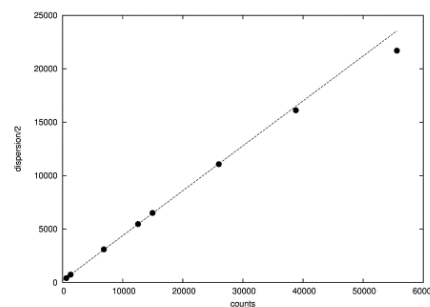


図26: ゲイン解析

30000 カウント以下のデータを直線で近似すると、

$$\sigma(N_c)^2/2 = 0.420 N_c + 185.3 \quad (13)$$

$$g = 2.38 \quad [\text{e/カウント}] \quad (14)$$

こうしてゲインが得られた。

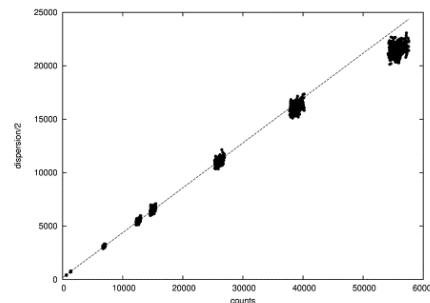


図27: 64×64領域に分けて行ったゲイン解析

40000 カウント以上ではデータが直線より下になる傾向が見られる。これは露光時間が増えると、画素のカウント値に何らかの相関が出て、ポアソン分布からわずかにずれることを意味していると考えられる。フラットフレームを確認すると大局的なパターンが見られたため、これを取り除くために、CCD 素子全体を 64×64 画素の数領域に分けて、各領域内で同じ解析を行った (図 27)。領域ごとに得られるゲインのグラフが図 26 と異なれば原因を推定する手がかりが得られたが、図 27 は図 26 と同じ傾向しか得られず、64×64 画素よりも小さいスケールでの問題であると判明した。詳細な解析からも具体的な原因は特定できず、「データ読み出しの際の電荷転送で、隣接するピクセルへの電荷漏れ出しがある」ことのみ判明したが、図 26 のフィットのずれを説明する十分な検証はできなかった。これ以上の解析は今後の課題とする。

3.4 読み出し雑音 (Readout noise)

通常の解析では、式 (13) の y 切片の値の平方根を読み出し雑音とするが、HOTATE の場合は特別な事情があ

る。通常はスーパーバイアスフレームと呼ばれるすべての画像に対して処理を施すことができる汎用性のあるノイズの少ないバイアスを用いるが、HOTATEのバイアスは不安定なので、露光のたびにバイアスを取得し、各画像の直後のバイアスを引いている。このためフラットフレーム1枚に、2枚分の読み出し雑音が含まれていることになる。したがって読み出し雑音は $\sqrt{185.3}$ (y切片の平方根)ではなく $\sqrt{\frac{185.3}{2}}$ で評価すべきである。よって、

$$\text{読み出し雑音} = 9.6 [\text{カウント}] = 23 [e] \quad (16)$$

となる。また、読み出し雑音は、直接2枚のバイアス画像を差し引いた画像を作り、そのカウントの分散を2で割って、平方根をとることで求められる。この方法で求めた値は6.3カウント(15e)であった。測定回数が少ないため、この2値のずれの意味は分からない。

3.5 ダイナミックレンジ (Dynamic range: DR)

ダイナミックレンジは、システムが識別できる最大と最小の信号の比である。この値が大きいほど高性能なシステムとみなされる。CCDカメラの場合、最大の信号はCCD素子が飽和する電荷量、最小の信号は読み出し雑音である。つまりダイナミックレンジは、

$$\text{DR} = \text{線形性の上限値} / \text{読み出し雑音} \quad (17)$$

で表される。HOTATEの場合、A/D変換の最大値近くまでCCD素子が飽和することはないため(図24)、線形性の上限値は65000カウント以上である。また、読み出し雑音は9.6カウントと求められている。したがって、

$$\text{DR} \sim 65000 / 9.6 \sim 6500 \quad (18)$$

と判断できる。

4 まとめ

- ・光軸調整の過程で画像の特定の位置にゆがみがあることが判明した。これは撮影時の望遠鏡の向きやフォーカスレバー位置には影響されず、重力や圧迫によるものではないことが分かった。ゆがみの原因は不明である。

- ・ハルトマンテスト(気温10°C)により、HOTATEのハルトマン定数Rは1.6秒であると求められた。シーイングが2Rに相当する3秒角よりも良い(小さい)場合は、得られる画像の分解能はHOTATEの光学系の分解能によって決まる。プログラムで得られた最小錯乱像面位置と、眼視測定で得られたベストフォーカスとの差は、特定の位置の光線の軌跡のずれが影響していると考えられる。その軌跡のずれの原因は特定できなかった。

- ・バイアスの安定性の確認では、今後の観測における

重要な情報を得ることができた。バイアス値はCCD温度(あるいは温度変化率)と相関している可能性があり、時間間隔のない連続測定や、間隔3分未満の測定では、バイアス値が安定しない。データ読み出しの後、次の読み出しまでに3分以上間隔を空けることを徹底することをルールとする。エアコンのON/OFFはバイアス値に影響しないが、外気温やドーム内温度のバイアス値およびCCD温度への影響は不明である。加えて、日付をまたぐ(夜通し)測定では明け方にCCD温度が急上昇すること、CCD温度が-30°C程度まで冷えるとバイアス値は極めて安定する、という結果も得られた。

- ・線形性の確認では、露出時間の短いデータを除いてフィットした結果、A/D変換の最大値まではCCDが飽和していないことを示すことができた。露出時間の短いデータに関してはシャッター速度を考慮した線形モデルも作成した。しかしそれでも露出時間1sのデータの相対誤差は大きいままで、対処法は見つからなかった。

- ・30000カウント以下のデータで計算したゲインは $g = 2.38 [e/\text{カウント}]$ であった。40000カウント以上のデータは近似直線より下回る傾向が見られた。CCDの隣接するピクセル間で電荷の漏れ出しがあることが判明したが、それ以上の原因は特定できなかった。読み出し雑音は9.6カウントと計算でき、この値と線形性の上限値により、ダイナミックレンジは約6500であると分かった。

謝辞

担当指導教員の岡村定矩教授には、本研究の立ち上げから論文完成までの中で終始ご教示いただきました。客員教員の八木雅文准教授は、データ解析手法を詳細にご指南して下さいました。二人の恩師に深謝致します。また、役割分担をしてHOTATEプロジェクトに共に挑んだ研究室メンバーにも感謝致します。

参考文献

- [1] 大橋龍太郎、木原直樹、吉田尚洋、山田龍之介、伊藤綾香、福島広大、岡村定矩(法政大学)、八木雅文(国立天文台、法政大学) 「法政大学二連望遠鏡の遠隔操作システム構築と性能評価」 2017年
- [2] 瀧本絵里香 2015年 広島大学理学部物理科学科 卒業論文 「重力波対応天体探索用チベット望遠鏡 HinOTORI の性能評価」 p.38 図 5.2 <http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/thesis/takimoto2014.pdf>
- [3] 野口 猛・征矢野隆夫・青木 勉 1977年 東京天文台報、18巻 「105cm シュミット望遠鏡のハルトマン検査について」 pp.173-174
- [4] 家 正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利 編 2007年 『宇宙の観測 I-光・赤外天文学 シリーズ現代の天文学 第15巻』 pp.70-71, p.254, p.258, p.276
- [5] SAO Image DS9 home page : <http://ds9.si.edu/site/Home.html>
- [6] IRAF official site : <http://iraf.noao.edu/>