法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

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 PERFOEMANCE 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くいるため、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30 cm 反射望遠鏡(図3)と口径13 cm 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。



図1: HOTATEのロゴ



図3: 口径30cm反射望遠鏡 (Meade FBACF)



図2:2.6mドーム(協栄産業株式会社)



図4: 口径13cm屈折望遠鏡 (タカハシTOA-130NS)

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。

230 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(0.8 mm 厚)で製作し た(図5)。30 cm 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

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。



(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が (図 8)、調整後では非対称具合が改善された(図 9)。し かし調整後でも、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。



(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 カ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 像それぞれの撮影画像で、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が最小になる像を 最小錯乱像という(図12)。



(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 さと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(Hα、 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。



光軸方向をz軸とし、それに垂直な方向に $X \ge Y$ 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 $zin \ge zout$ とする(本研究では $zin=1 \ge zout=9999$ 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 $\Delta X_i, \Delta Y_i$ とする。すなわち、

$$\Delta X_i = X_i - X'_i, \ \Delta Y_i = Y_i - Y'_i \tag{1}$$

$$X_0 = \sum X_i / n, \ Y_0 = \sum Y_i / n \tag{2}$$

ここで n はスポットの数である。座標差の平均は、

$$\Delta X_0 = \sum \Delta Xi / n, \ \Delta Y_0 = \sum \Delta Yi / n \tag{3}$$

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、

$$x_i = X_i - X_0, \qquad y_i = Y_i - Y_0$$
 (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、

$$\Delta x_i = \Delta X_i - \Delta X_0, \ \Delta y_i = \Delta Y_i - \Delta Y_0 \tag{5}$$

で求められる。この (Δx_i , Δy_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、

$$\Delta x_i = a x_i + b y_i, \qquad \Delta y_i = -b x_i + a y_i \quad (6)$$

とおいて、*a*,*b*を最小二乗法で求める。最小錯乱像面位 置zは、

$$z = (Z_{out} + Z_{in})/2 + a(Z_{out} - Z_{in})/4$$
(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、

$$\delta x_i = (\Delta x_i - ax_i - by_i) / 2,$$

$$\delta y_i = (\Delta y_i + bx_i - ay_i) / 2$$
(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、

$$R = (2.06 \times 105 / f) \times (\Sigma \delta_i / n) \tag{9}$$

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℃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。Hαバンド のフィルターの厚さが2mm で、他のバンドのフィルター は厚さが4mm 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 Ηα 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 Hα 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℃)

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
Ηα	1.723	4437	4900
В	1.644	5190	5300
v	1.637	5178	5300
R	1.630	5198	5300
1			

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 オ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。Hα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 Hα 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が小さいのは最小 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ルリデューサ・フ ラットナー(×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×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 (℃) 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 いとは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℃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。



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に考えられるの 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℃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 Ne と CCD が読み出したカ

ウント N_e が線形関係 $N_e = g \times N_e$ 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_e とtのグラフを描き、 N_e 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(1s,2s,4s,8s,…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。



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1s,2s,4s,256s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、 Nc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≦*N*_e≦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≤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1sのデータだけ極端に外れた値を(-50%)を示したため、1sは除外した。しかしそれ以外 の露光時間のデータは、Nc≦300 も含めて、線形性から のずれを±3%程度に収めることができた。露光時間1s に関しては解決策を出せなかった。今後の課題である。



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、

$$g = N_e / N_e \quad [e/\pi \, \dot{p} \, \checkmark \, \dot{r}] \tag{10}$$

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、

$$\sigma(N_e) = g \ \sigma(N_c) \tag{11}$$

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、

$$g = N_c / \sigma (N_c)^2 \tag{12}$$

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Hα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。



30000 カウント以下のデータを直線で近似すると、

$$\sigma (N_c)^2 / 2 = 0.420 N_c + 185.3 \tag{13}$$

こうしてゲインが得られた。

g



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、

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も求められる。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、

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、

$$DR \sim 65000 / 9.6 \sim 6500 \tag{18}$$

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℃)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℃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/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 <u>http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/thesis/takimoto2014.pdf</u>
[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]SAOImageDS9 home page : <u>http://ds9.si.edu/site/Home.html</u>[6]IRAF official site : <u>http://iraf.noao.edu/</u>