

# なゆた望遠鏡新ドームフラット

高山正輝

兵庫県立大学天文科学センター 西はりま天文台 〒679-4313 兵庫県佐用郡佐用町西川内 407-2

## New dome-flat system for 2m-Nayuta telescope

Masaki Takayama

Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,  
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan  
takayama@nhao.jp

(Received 2021 October 30; accepted 2021 December 17)

### 概要

なゆた望遠鏡のドームフラットシステムを刷新した。従来のスクリーン斜めからの一点照射に代わり、ランプを望遠鏡トップリングに設置した4点正面照射へと改修した。

また西はりま天文台近赤外撮像装置NIC(Nishi-harima Infrared Camera)を用いて新しいランプシステムの性能評価を行なった。NICの $J$  bandを用い、新しいドームフラット・ポジションとして望遠鏡高度 $40^\circ$ 、ドーム方位と望遠鏡方位の角度差 $71^\circ$ が導出された。

続けて、トワイライトフラットが十分均一な光源であると仮定し、トワイライト画像との比較からドームフラットの円周方向の一様性と、半径方向の一様性について調査した。ドームフラット画像の円周方向には $J$ 、 $H$ 、 $K_s$  band共に依然として輝度の偏りが存在することが明らかになった。しかしながら3つのband全てで円周方向の輝度のばらつきによる標準偏差は、平均値の1%以下であった。

また $J$ と $H$  bandではドームフラットの半径方向の輝度の偏りは検出できなかったが、その標準偏差の上限值としてそれぞれ8.5%と3.8%を得た。一方 $K_s$  bandではわずかに画像中心のカウントが高く、周縁部で低くなる傾向が見られた。カウントの平均値に対する標準偏差は2.6%であった。

旧ドームフラット画像では、トワイライトフラットに対する差異の標準偏差は $J$  bandで14%、 $H$  bandで8.8%、 $K_s$  bandで17%であった(cf. 石黒 他 2011)。したがって、新しいドームフラットは旧ドームフラットに比べ4割から一桁程度、輝度ムラが小さくなった。

### Abstract

The dome-flat system for 2m-Nayuta telescope has been updated. In the previous system, one lamp irradiates the flat-screen diagonally. In the new system, four lamps on the top-ring of the telescope irradiate the screen head-on.

We examined the performance of the new lamp system by using NIC (Nishi-harima Infrared Camera). Using the  $J$  band frames, the telescope elevation of  $40^\circ$  and the difference of azimuth angle between the enclosure and the telescope of  $71^\circ$  have been derived as the best position for taking the flat images.

The uniformity along the circumference and the radial direction in the flat images has been investigated by a comparison with the twilight flat images. There was still unevenness of the luminosity along the circumference of the  $J$ ,  $H$ , and  $K_s$  band flat-images. However, the standard deviations along the circumference of the flat images in all three bands were below 1%.

We could not find unevenness of the luminosity along the radial direction of both  $J$  and  $H$  band flat-images. The estimated upper limit of the standard deviations in the  $J$  and  $H$  bands were 8.5% and 3.8%, respectively. On the other hand, there were higher values of count in the center of the flat-images in the  $K_s$  band and lower values of count in the rim. The standard deviations along the radial direction of the flat images in the  $K_s$  band was 2.6%.

The unevenness of the intensity in the previous dome flat were 14%, 8.8%, and 17% in the  $J$ ,  $H$ , and  $K_s$  bands, respectively. Therefore the new flat system has achieved to decrease the unevenness of the intensity roughly a 40 percent or an order.

**Key words:** Instruments — Dome flat — Nishi-harima Infrared Camera (NIC)

## 1. はじめに

西はりま天文台2mなゆた望遠鏡ドームには、以前よりドームフラット取得のためのスクリーンとランプが設置されていた。このシステムでは壁から伸びたロッドの一箇所からスクリーンを照射していた。また、ランプから

の光はスクリーンの正面からではなく斜め下から入射する設計となっていた。そのため、スクリーンの中心と端、および上下ではスクリーンの輝度が異なる問題が指摘されていた(石黒 他 2011)。

そこで2020年から2021年にかけて、ドームフラットランプの改修を行い、新たなシステムを構築した。なお、フラッ

トスクリーンは現状のものを継続して使用する。新しいドームフラットランプとその制御電源装置は、東広島天文台1.5 mかなた望遠鏡のドームフラットシステムを踏襲した。完成したランプシステムについて、カセグレン焦点に取り付けられている西はりま天文台近赤外撮像装置NIC(Nishi-harima Infrared Camera)を用いてその性能評価を行った(データ取得日は2021年1月28日、29日、2月18日、12月1日、3日、5日)。本論文ではこれらの結果について報告する。

## 2. ハロゲンランプと電源装置

ドームスクリーンを照射するランプはOSRAM社製ハロゲンランプ・HALOSPOT 111を採用した。12 V 75 Wのハロゲンランプで、照射角度すなわちビームの開き角は $36^\circ$ である。これはなやた望遠鏡のトップリングに設置した時に、スクリーン面上で直径およそ2 mの円に相当する。このハロゲンランプ4個を望遠鏡トップリングに均等に配置した。

ランプのON/OFF、および調光のための電源装置として高砂製作所製ZX-S-400Lを採用した。電源装置はナスミス台に設置されシリアル接続されたPCから制御する。

## 3. ランプ光度と検出器素子の飽和

はじめに、フラットランプ光度の増加に対しNIC検出器素子が正常に電荷を貯めることができる上限について議論する。NICはJ、H、K<sub>s</sub>の3 bandがあり、したがって検出器素子が蓄積する電荷の飽和が起こり始めるランプ光度には違いがあると考えられる。ハロゲンランプの光度そのものを数値化することは難しいが、ここではランプシステムに流す電流値(これは電源装置によって任意に設定できる)を光度の代わりと見なし、検出器素子の飽和が起こる上限の電流値を評価する。

フラットフレームは、ドーム方位角 $AZ_d$ と望遠鏡方位角 $AZ_t$ との差 $dAZ$ 、

$$dAZ = AZ_d - AZ_t, \quad (1)$$

を $71^\circ$ 、望遠鏡高度 $EL$ を $40^\circ$ のポジションにて取得した。これは後述の、ドームフラット取得のための最適なポジションに一致している。この試験ではカセグレン焦点の装置ローテータの角度を $0^\circ$ に固定し、ランプ電流値を1 Aから10.5 Aまで変えて撮像した。各bandの露出時間は2秒とし、それぞれの電流の値のときに10枚の画像を取得した。解析にはiraf用いてダーク引きの後、10枚の画像からメジアンによる重ね合わせを行なった。得られた画像のカウントのメジアンと、そのときのランプ電流値をfigure 1に示した。

最も感度の低いJ bandでも、ランプに流す電流が6 Aを超えた辺りからカウントが上がり始める。その後9.5 A程度でH bandのカウントの上昇が高止まり、続いて10 A程度でK<sub>s</sub> bandのカウントの上昇が止まった。以降はランプ光度を増してもカウントは下がるのみであった。すなわち検出器素子の飽和が顕著になるのはH bandで9.5 A以上、K<sub>s</sub> bandで10 A以上であることがわかる。一方、J bandは10 Aを過ぎてもまだ飽和は起きない。以上のことから、2秒露出において3つのband全てで飽和しないためにはランプ電流値は9 A程度を上限とするとよい。

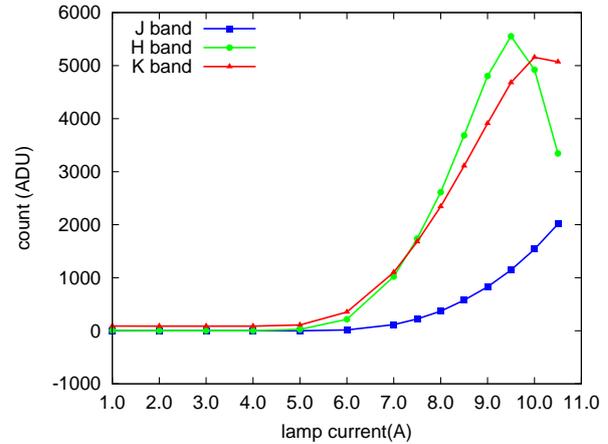


Fig. 1. The median values of count in the flat frames for a given lamp current.

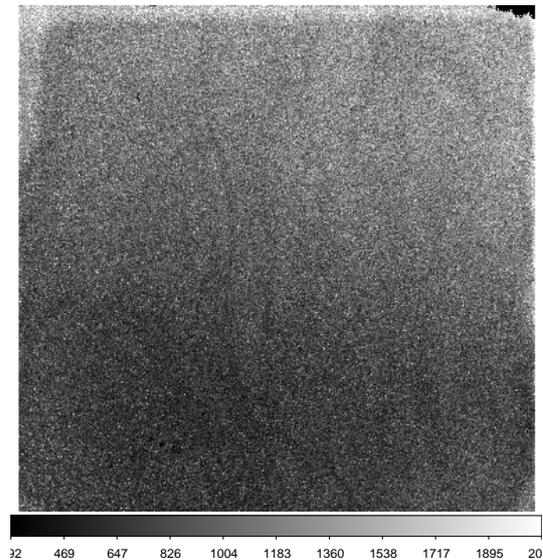


Fig. 2. The flat frame in the J band obtained by combining 120 frames in  $EL=40^\circ$  and  $dAZ=71^\circ$ .

## 4. ドームフラット・ポジション

フラットフレーム取得のために最適な、ドームと望遠鏡の方位角差、および望遠鏡の高度を決定する。ドーム方位と望遠鏡方位の角度の差 $dAZ$ と、望遠鏡高度 $EL$ を変えながらフラットフレームを取得し、最も明るく照射できる方位角と高度を最適なポジションとする。

はじめに、ドーム方位角 $AZ_d$ と望遠鏡方位角 $AZ_t$ との差 $dAZ$ を $71^\circ$ に固定し、望遠鏡高度 $EL$ を $30^\circ$ から $50^\circ$ まで $2^\circ 5'$ 刻みで変えて取得した画像から、最適な高度について議論する。フラットスクリーンを写した画像は、スクリーンの光度の偏りの他に、望遠鏡の光学系による光度の偏り、検出器上の各素子の感度といった様々な要因でフレーム内のカウント値が決まる。そこで、カセグレン焦点の装置ローテータを $-180^\circ$ から $+150^\circ$ まで $30'$ 刻みで回転させて画像を取得し、それらを重ね合わせた画像の明るさをその望遠鏡ポジションでの明るさと定義した。ランプに流

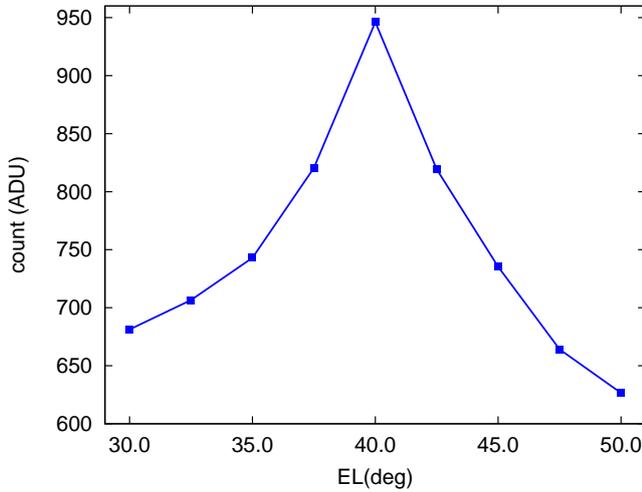


Fig. 3. The median values of count in the  $J$ -band flat frames in a given  $EL$  value.

す電流値は10 Aに設定し、各フレームの露出時間は2秒とした。 $H$ と $K_s$  bandでは検出器の電荷の飽和が起きってしまうため、 $J$  bandのデータを使ってポジションを決定する。以上の設定のもと、それぞれの装置ローテータ角度につき10枚のフラット画像を取得した。一方 $H$ と $K_s$  bandで飽和が起こらない程度まで電流値を下げると、望遠鏡角度とフラットフレームの光度にほとんど相関がなくなることがわかった(後述)。そのため10 Aの高い値の設定で試験を行なった。

ダーク引きを行った後、装置ローテータ角度の異なる120枚の画像からメジアンによる重ね合わせを行い、1枚のフラットフレームを得た。Figure 2は $EL = 40^\circ$ の時の $J$  bandのフラットフレームである。

得られた $J$  bandのフラットフレームのカウン트의メジアンと望遠鏡高度をプロットしたものをfigure 3に示す。カウン트의メジアンは $EL = 40^\circ$ のときが最大となった。また最大値の前後でグラフの左右対称性が良いことから $EL = 40^\circ$ がほぼピークであると考えられる。したがって望遠鏡高度は $40^\circ$ を採用する。これは、なゆた望遠鏡とフラットスクリーンの仕様とも一致する。

続いて、ドーム方位角と望遠鏡方位角との差 $dAZ$ を決める。望遠鏡高度を $40^\circ$ に固定し、 $dAZ$ を $61^\circ$ から $81^\circ$ まで $2.5^\circ$ 刻みで変えながら前述と同様の設定で画像を取得した。

Figure 4は方位角差 $dAZ$ とカウン트의メジアンをプロットしたものである。 $dAZ = 71^\circ$ のときが最大となった。また最大値前後のグラフの対称性から $dAZ = 71^\circ$ のときがほぼ光度のピークに相当すると思われる。以上のことから、ドームフラット取得時のポジションを望遠鏡高度 $40^\circ$ 、ドームと望遠鏡の方位角の差 $71^\circ$ に決定した。

ここで、ランプ電流値を $H$  bandでも飽和が起こらないと考えられる8.5 Aに設定した場合の試験結果について簡単に触れる。ランプ電流値を10 Aに設定して行なった前述の試験と同様のことを、8.5 Aの下で再度試験したときの $dAZ$ と画像のカウン트의メジアン値の計測結果をfigure 5に載せた。 $J$ 、 $H$ 、 $K_s$ の3つのband全てで、角度とカウン트에ほとんど相関がなくなることがわかった。したがって

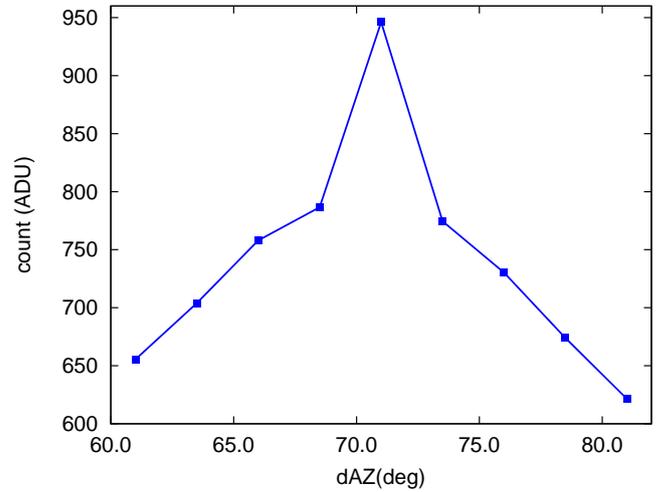


Fig. 4. Same as figure 3 but for a given  $dAZ$  value.

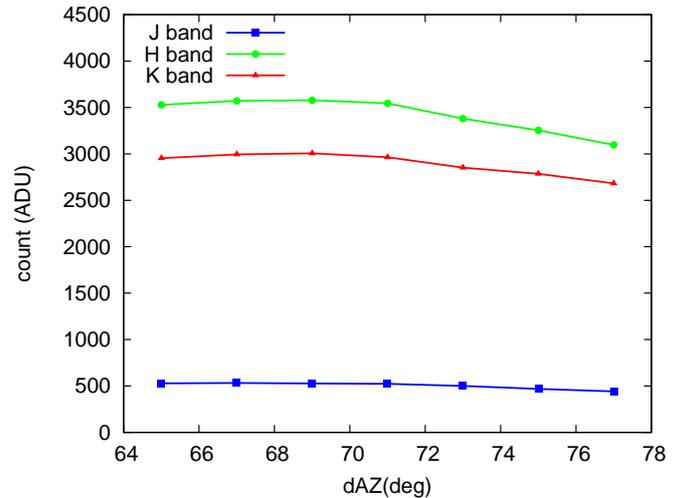
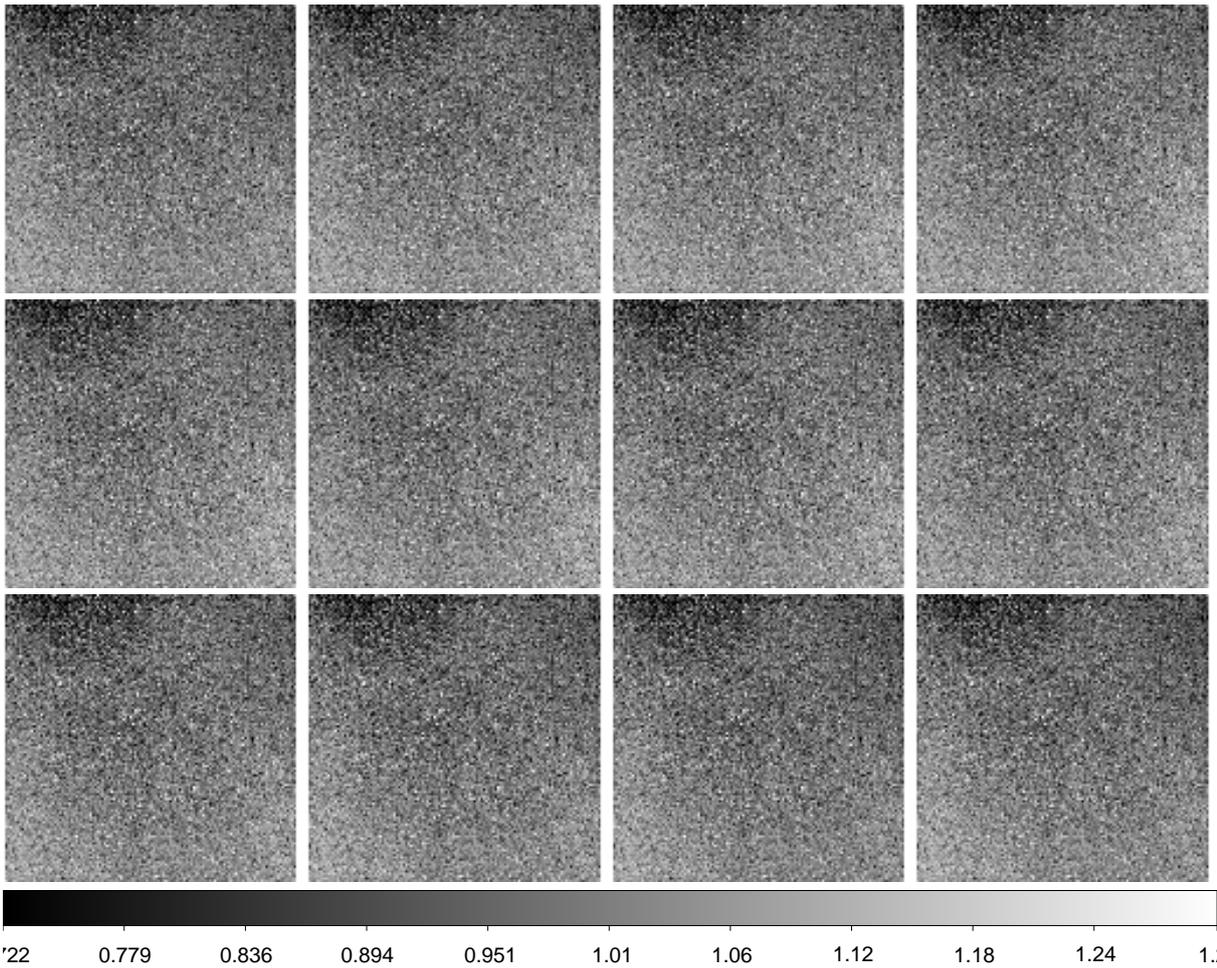


Fig. 5. The median values of count in the flat frames in a given  $dAZ$  value obtained by the lamp current with 8.5 A.

$H$ と $K_s$  bandでは検出器の電荷の飽和が起きってしまうが、ランプ電流値を10 Aとしたときに得たドームフラットポジションを採用することとする。

## 5. ドームフラットの一様性

ドームフラット画像の一様性について調べる。一様性が確保できているかの評価は難しいが、ここではトワイライトフラットと比較し、ドームフラットの円周方向と半径方向の一様性について評価する。なお、この試験では $J$  bandの他に、 $H$ と $K_s$  bandの振る舞いについても評価するため、検出器の露出時間は2秒のままに、ランプ電流値は8.5 Aに設定して試験を行なった。



**Fig. 6.** The flat frames in the  $H$  band normalized by the twilight flat obtained in 21 June 2015. The left top panel corresponds to the rotator angle  $RA$  of  $-180^\circ$ . Next to the right panel is  $RA = -150^\circ$ , while the right bottom panel shows the frame of  $RA = +150^\circ$

### 5.1. 円周方向の一様性

望遠鏡高度  $EL = 40^\circ$ 、ドーム方位角と望遠鏡方位角の差  $dAZ = 71^\circ$  のときに、ドームフラットポジション決定時の試験と同様に、装置ローテータ角度を  $30^\circ$  ずつ回転させながら10枚ずつ、計120枚のフラットフレームを取得した。得られた画像のうち、同じ装置ローテータ角度の画像10枚を重ね合わせたものを規格化し、NIC標準のトワイライトフラット画像(2015年6月21日取得)で割った12枚の画像を得た。

Figure 6はトワイライトフラットを用いてフラット割りした後の  $H$  bandのドームフラット画像を、装置ローテータ角度の順に並べたものである。視野回転に伴って変化する輝度のムラはなく、装置ローテータ角度が異なってもフラットフレームは均一であるように見える。

ドームフラット画像の円周方向の一様性を定量的に評価するため、画像を第一象限から第四象限までの4つの領域にわけ、それぞれのカウントのメジアンを調べた。 $J$  bandはドームフラット画像、トワイライトフラット画像共に、画像の上端にカウントの異常値を示す領域がある(figure 2参照)。この領域のために第一象限と第二象限はカウントのメジアンが正しいものではなくってしまう。そこで第一象限と第二象限では画像の上部50 pixelを除外し、

残った領域を使ってカウントのメジアンを計測した。

Figures 7–9は装置ローテータ角度に対応する、それぞれの象限内でのカウントのメジアンを示している。ばらつきが大きく、不規則な変動を示す象限がある一方で、 $J$  bandの第一、第二、第四象限、 $H$  bandの4象限全てで装置ローテータ1周( $360^\circ$ )に等しい周期での変動が顕著に見られる。またこれらは対角をなす象限同士(第一象限と第三象限、第二象限と第四象限)を比較すると、位相が半波長分ずれた逆位相の関係になっていることがわかる。すなわち円周方向に光度の偏りがあると言える。

続いて、この光度の偏りを定量的に評価する。装置ローテータ角度の違いで生じる変動の標準偏差をTable. 1に記した。ここで、標準偏差の値は平均値に対する割合で表記している。特にばらつきの大きく、また変動に周期性が見られなかった  $J$  bandの第三象限と  $K_s$  bandの第二象限で標準偏差がそれぞれ2.1%と2.4%と最も大きかった。一方、装置ローテータの回転に伴った変動が見られるband、象限の標準偏差は全て1%未満の低い値が得られた。

以上のことから、ドームフラットは円周方向に光度の偏りが存在することは否定できないものの、その偏りは高々1%と見積もることができる。

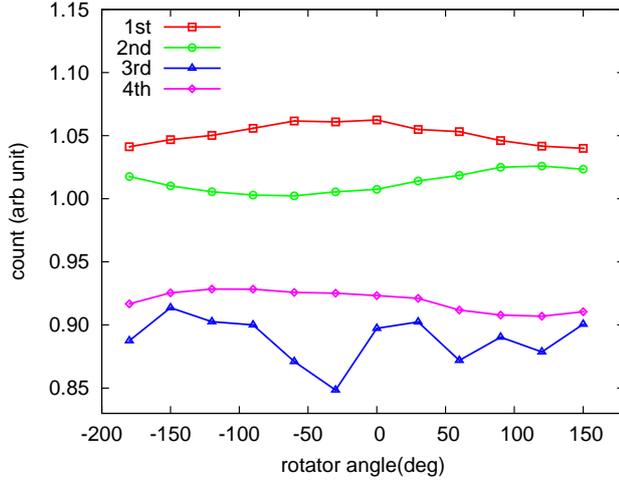


Fig. 7. The median values of the counts in each quadrant of the  $J$ -band frames are plotted.

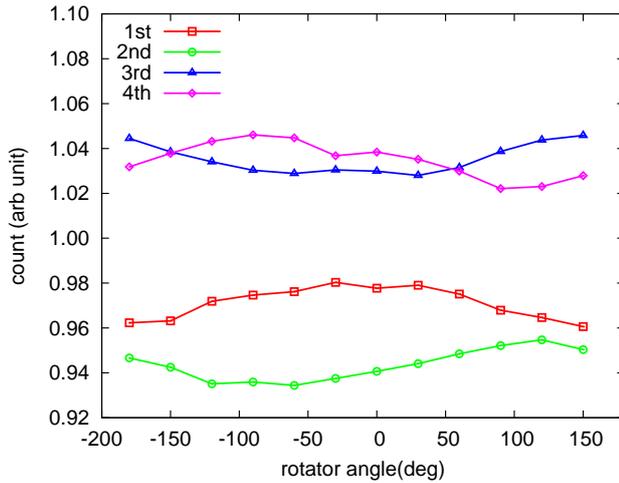


Fig. 8. Same as figure 7 but for the  $H$  band.

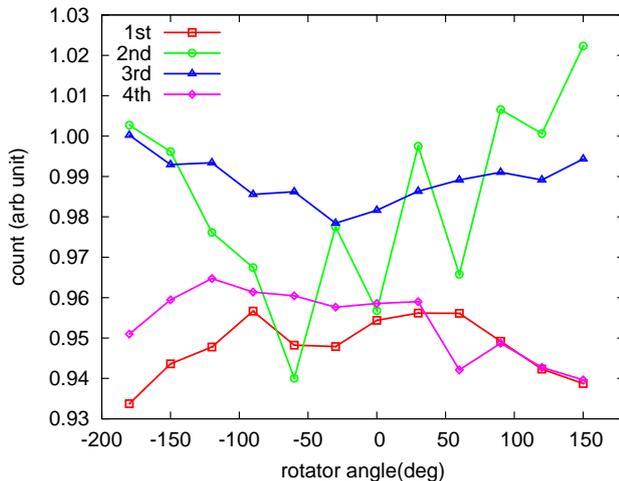


Fig. 9. Same as figure 7 but for the  $K_s$  band.

Table 1. The standard deviations [%] derived from the median values of the count plotted in figures 7–9. Note the standard deviations are normalized by the average values in the whole rotator angle.

band	1st quadrant	2nd quadrant	3rd quadrant	4th quadrant
$J$	0.8	0.9	2.1	0.9
$H$	0.7	0.7	0.6	0.8
$K_s$	0.8	2.4	0.6	0.9

## 5.2. 半径方向の一様性

ドームフラット画像の半径方向の一様性を評価する。はじめに、装置ローテータ角度を変えながら取得した120枚の画像を重ね合わせて1枚のフラットフレームを得る。これをトワイライトフラット画像を使ってフラット補正を行った画像を作成した。この画像の中心から外側に向かうカウントの変動から半径方向の一様性を調べる。Figure 10は重ね合わせ後の $H$  bandの画像である。画像の緑の線で描かれた四角は幅40 pixel、縦100 pixelのサイズで、 $x = 512$  pixelを中心に $y = 1-1024$  pixelの間に10個並んでいる。この緑の四角で囲まれた10領域それぞれについてカウントのメジアンを測り、 $y$ 方向の中心座標と共にプロットした (figure 11)。

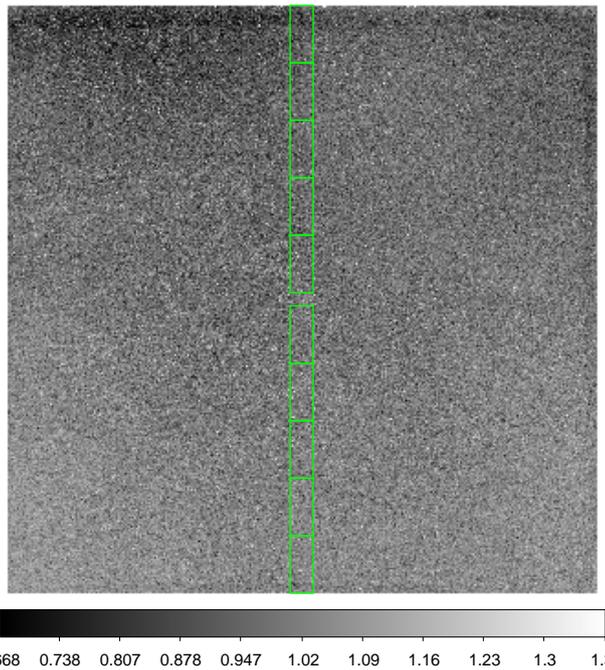
ドームフラットスクリーンの輝度に半径方向の非一様性があったとすると、figure 10に代表される、異なる装置ローテータ角度で取得したフラットフレームを重ね合わせて得た画像において、画像の中心に対して対称な輝度分布を示すことが予想される。すなわちfigure 11の輝度分布は $y = 512$  pixelを中心に左右対称となるはずである。

しかしながら、 $J$ と $H$  bandの値は画像の下から上にかけて、それぞれ単調に増加、または減少している。この傾向はフラット補正前のドームフラット、およびトワイライトフラット画像の双方で見られた。また $J$ と $H$  bandで輝度の傾向が逆であることから、このカウントの単調な増加(減少)がフラットスクリーンの輝度の勾配を反映しているとは考えにくい。したがってこの傾向の主な原因は(a)検出器素子の画素ごとの感度ムラ、(b)望遠鏡とNIC内部を含めたスループットの光路に対する依存性、の2つが候補として考えられる。しかし本試験では原因の切り分けには至らなかった。一方 $y$ 方向のカウントの平均値に対する標準偏差の比は $J$  bandで8.5%、 $H$  bandで3.8%であった。以上から $J$ と $H$  bandのドームフラット画像に半径方向の非一様性があったとしても、それはそれぞれ高々8.5%と3.8%である。

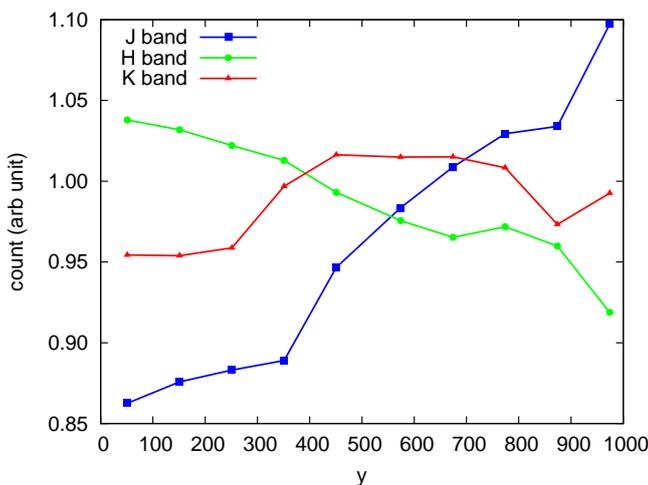
一方 $K_s$  bandでは画像の中心付近がカウントが高く、周縁部では比較的低いカウントを見せた。トワイライトフラットはこれとは逆に、画像中心のカウントが低く、周縁部に行くにしたがって高くなる傾向が見られた。よってドームフラットの $K_s$  bandのカウントは、フラットスクリーンの半径方向の輝度分布を反映していると考えられる。また、そのカウントの平均値に対する標準偏差の比は2.6%であった。

## 6. まとめ

なゆた望遠鏡のドームフラットシステムを刷新した。従来のスクリーン斜めからの一点照射に代わり、ランプを望遠鏡トップリングに設置した4点正面照射へと改修した。



**Fig. 10.** The  $H$  band flat frame made by combining flat frames obtained at 12 rotator angles. The green rectangles with width of 40 pixel and length of 100 pixel are regions to measure the median values of the count.



**Fig. 11.** The median values of the count within the green rectangles as shown in figure 10 are plotted for the  $J$ ,  $H$ , and  $K_s$  bands.

NICの検出器素子が電子数の飽和を起こさないランプ光度の上限を探る試験では、2秒露出においてランプに流す電流値の上限として $H$  bandで9.5 A、 $K_s$  bandで10 Aを得た。一方 $J$  bandでは10.5 Aでも飽和は起こらなかった。またNICの $J$  bandを用い、新しいドームフラットポジションとして望遠鏡高度 $40^\circ$ 、ドーム方位と望遠鏡方位の角度差 $71^\circ$ が導出された。

トワイライトフラットが十分均一な光源であると仮定し、トワイライト画像との比較からドームフラットの円周方向の一様性と、半径方向の一様性について調査した。ドームフラットには依然として円周方向に輝度の偏りが存在することが明らかとなった。しかしながら $J$ 、 $H$ 、 $K_s$ の3つのbandともカウントの標準偏差はその平均値に対して1%以下であった。半径方向の一様性の評価では $J$ と $H$  bandにおいて、輝度の非一様性は検出できなかったが、標準偏差の上限値としてそれぞれ8.5%と3.8%を得た。 $K_s$  bandではわずかに中心のカウントが高く、周辺部で低くなる輝度の勾配が見られた。この変動による標準偏差はカウントの平均値に対して2.6%であった。よってドームフラットの輝度ムラは $J$ と $H$  bandでそれぞれ高々8.5%と3.8%、 $K_s$  bandでは2.6%と言える。

旧ドームフラット画像では、トワイライトフラットに対する差異の標準偏差は $J$  bandで14%、 $H$  bandで8.8%、 $K_s$  bandで17%であった(cf. 石黒 et al. 2011)。したがって、新しいドームフラットは旧ドームフラットに比べ4割から一桁程度、輝度ムラが小さくなった。

## 謝辞

かなた望遠鏡のドームフラットシステムを監修し、今回のドームフラット改修にあたって多くの有益な情報を提供してくださった秋田谷 洋氏に深く感謝いたします。また、多くの有益な指摘をしてくださったレフェリーに多大な感謝をいたします。

## References

石黒正晃, 高橋隼, 禪野孝広, 時政典孝, 黒田武彦. 2011, 西はりま天文台年報, 21, 13