

2KCCD のデュワー窓のくもりによる感度ムラについて

この PDF ファイルは、2KCCD カメラの感度ムラについて行った調査に関して、2010 年 7 月 2 日までにまとめた以下の 4 つの報告を並べたものである。これらのレポートで、デュワー窓のくもりによって星の測光値に 0.2 等程度の感度ムラが生じていたことと、過去いずれの期間にこのくもりの影響があったかについて報告する。

- (1) SDSS 領域の観測による 2KCCD カメラのフラット評価(1)—2010 年 4 月 13 日観測分データの解析—
- (2) 2KCCD フラットについての実験
- (3) SDSS 領域の観測による 2KCCD カメラのフラット評価(2)—2010 年 6 月 9 日観測分データの解析—
- (4) ドームフラットの変化の追跡

問い合わせ先

木曽観測所 松永典之 (matsunaga@ioa.s.u-tokyo.ac.jp)

SDSS 領域の観測による 2KCCD カメラのフラット評価(1) — 2010 年 4 月 13 日観測分データの解析 —

松永典之

2010 年 6 月 18 日

概要

星の測光により 2kCCD のフラットを確認するために、Koch et al. (2004) の方法にならって、SDSS カタログのある領域の観測を行った。検出器全体にばらついて存在する 1000 天体以上に対して、SDSS カタログの等級と 2kCCD での等級とを比較すると、ドームフラットを用いて得た機械等級には検出器上の位置に依存したムラが発生していることがわかった。このムラを 10% 以上の強さと、複雑な構造を持っていて、ダーカスカイで作成したフラット画像とも異なる構造を感度ムラを示唆している。ひきつづきの検討が必要である。

1 目的

2kCCD カメラのフラット補正が正しく行えているかどうかを確認するために、視野内の星の等級が検出器上の位置によらず正しく求められるかどうかを調べる。SDSS のように、広い視野について注意深く得られた均質な等級リストと比較することで、2kCCD 側のフラット性を調べることができる。本報告の基本的な手法は、Koch et al. (2004) が ESO 2.2m 望遠鏡の WFI カメラのフラット性を調べるために用いた方法と同じである。

2 観測

15:16:05.30 – 00:06:41.0 (J2000.0) を中心とする球状星団 Palomar 5 の領域である。図 1 に球状星団を中心とした観測視野 $50' \times 50'$ を示す。R バンドと V バンドで、それぞれ 180 秒積分 5 枚、300 秒積分 10 枚の撮像をした。ディザリングのようなことは行わなかった。さらに、北東へ約 $(20', 20')$ と南西へ $(20', 20')$ ずらした領域を R バンドで 3 枚ずつ撮像した（積分時間 300 秒）。

ただし、当日はうすくもりであり、非測光夜であった。

3 一次処理

まず、同じ日にとったドームフラットを用いて解析を行う。ドームフラットの画像でカウントが [0.92:1.08] から外れているものはバッドピクセルとしてリストアップする。[1:10,1:2048] と [2039:2048,1:2048] のオーバーヘッド領域に含まれる 40960 ピクセルを除くと、バッドピクセルは 6521 ピクセル (0.16%) であった。

各画像ごとに、ダークを引いて、ドームフラットで割って、測光用の画像とする。画像をスタックしたりはせず、各画像ごとに独立して測光を行う。

4 星の検出及び測光

測光は、IRAF/DAOPHOT を呼ぶスクリプト集である autodao ソフト¹ を用いて行った。天体の検出は、threshold=3 とする daofind タスクで行った。各画像での検出天体数は、R バンド (300 秒) で 2000 ~ 2500 天体、V バン

¹ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~nmatsuna/Japanese/software/autodao.html>

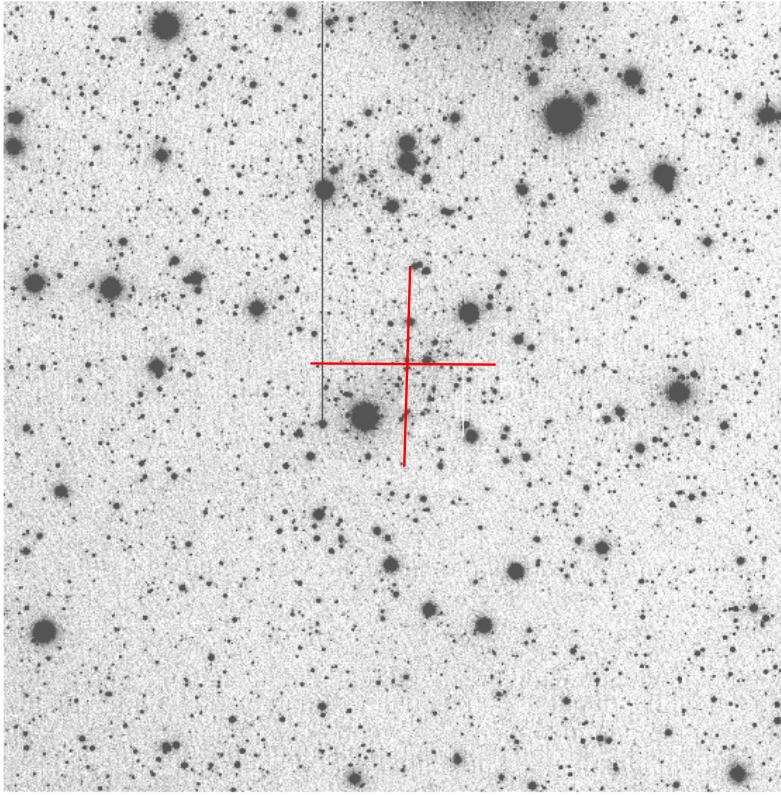


図 1: Palomar 5 方向の観測視野。中心座標は、15:16:05.30 –00:06:41.0(赤い十字)。

ド(300 秒)で 1000~1500 天体であった。図 2 によるとその等級の範囲とそれに対するエラーの変化をプロットした。ただし、以下で述べるカラー項の補正や検出器上の位置に対する依存性を無視しているので、等級は概算値である。

ただし、その星の座標を中心として 13×13 ピクセルの正方形のなかにバッドピクセルを含む天体は以下の解析から取り除く。これによって、およそ 3% 程度の星が除かれる。また、IRAF による測光値の誤差が 0.05 等を超える天体も除く。その結果、比較に用いる天体数は、 R バンド(300 秒)で 1800 天体程度、 V バンド(300 秒)で 1000 天体程度となった。

5 sdss カタログ天体との同定

SDSS の g, r バンド等級と 2kCCD の V, R バンド等級を比較するために、カラー項を考慮に入れて以下のような式を考える。

$$V^* = g + \alpha_V(g - r) + c_V \quad (1)$$

$$R^* = r + \alpha_R(r - i) + c_R \quad (2)$$

$$(3)$$

ただし、 V^*, R^* はそれぞれ機械等級である。 $0.2 \leq g - r \leq 1.5$, $0.1 \leq r - i \leq 1.5$ の天体だけを利用する。また、次節で示すように検出器上の位置による効果があるので、[200:800, 200:1800] の天体だけを使って、この変換式の係数を求める。各画像に対して求めた変換式の係数などを表 1 にまとめた。

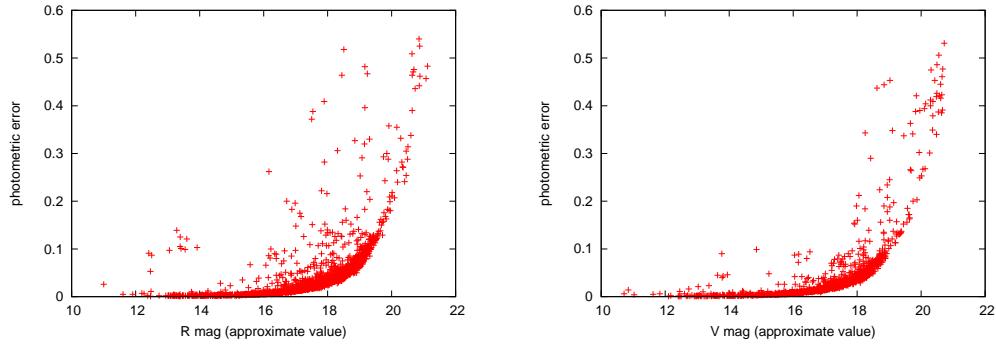


図 2: IRAF/Daophot の出力する測光誤差。左が#167258(R バンド)、右が#167263(V バンド)に対する結果。

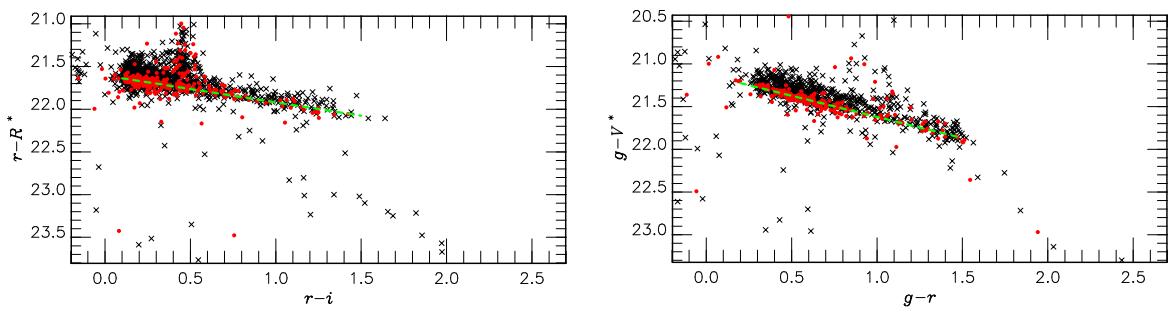


図 3: SDSS カタログと同定できた天体について、SDSS の等級と 2kCCD 画像での機械等級との差を SDSS カタログでのカラーに対してプロットした。赤点は [200:800,200:1800] に写っている星で、黒点はそれ以外の星。赤点に対して変換式 (緑の破線) を求めた。

表 1: 2kCCD で取得した画像の ID、バンド名、積分時間、観測時のエアマス (sec Z) と、式 (1), (2) の係数。

Frame	Band	Exp [s]	Airmass	c_V	α_V
167253	V	180	1.284	-21.146 ± 0.006	-0.498 ± 0.009
167254	V	180	1.277	-21.148 ± 0.006	-0.479 ± 0.009
167255	V	180	1.270	-21.125 ± 0.007	-0.500 ± 0.010
167256	V	180	1.264	-21.144 ± 0.007	-0.499 ± 0.010
167257	V	180	1.258	-21.128 ± 0.007	-0.488 ± 0.009
167263	V	300	1.236	-21.126 ± 0.006	-0.495 ± 0.009
167264	V	300	1.237	-21.140 ± 0.006	-0.502 ± 0.009
167265	V	300	1.239	-21.112 ± 0.008	-0.496 ± 0.011
167266	V	300	1.242	-21.031 ± 0.009	-0.481 ± 0.013
167267	V	300	1.247	-21.098 ± 0.007	-0.483 ± 0.010
167273	V	300	1.306	-21.173 ± 0.006	-0.492 ± 0.009
167274	V	300	1.321	-21.327 ± 0.006	-0.487 ± 0.008
167275	V	300	1.337	-21.181 ± 0.007	-0.490 ± 0.010
167276	V	300	1.355	-21.244 ± 0.006	-0.485 ± 0.009
167277	V	300	1.374	-21.351 ± 0.006	-0.490 ± 0.008
Frame	Band	Exp [s]	Airmass	c_R	α_R
167248	R	180	1.349	-19.942 ± 0.010	-0.293 ± 0.039
167249	R	180	1.332	-20.795 ± 0.005	-0.295 ± 0.017
167250	R	180	1.319	-20.995 ± 0.005	-0.319 ± 0.014
167251	R	180	1.308	-21.299 ± 0.004	-0.303 ± 0.012
167252	R	180	1.298	-21.497 ± 0.003	-0.308 ± 0.008
167258	R	300	1.251	-21.608 ± 0.003	-0.312 ± 0.007
167259	R	300	1.245	-21.594 ± 0.003	-0.295 ± 0.008
167260	R	300	1.241	-21.583 ± 0.003	-0.312 ± 0.008
167261	R	300	1.238	-21.613 ± 0.003	-0.320 ± 0.007
167262	R	300	1.236	-21.638 ± 0.003	-0.317 ± 0.007
167268	R	300	1.254	-21.596 ± 0.004	-0.301 ± 0.009
167269	R	300	1.261	-21.119 ± 0.004	-0.305 ± 0.012
167270	R	300	1.269	-21.593 ± 0.003	-0.320 ± 0.008
167271	R	300	1.279	-21.625 ± 0.003	-0.319 ± 0.008
167272	R	300	1.290	-21.740 ± 0.003	-0.309 ± 0.007

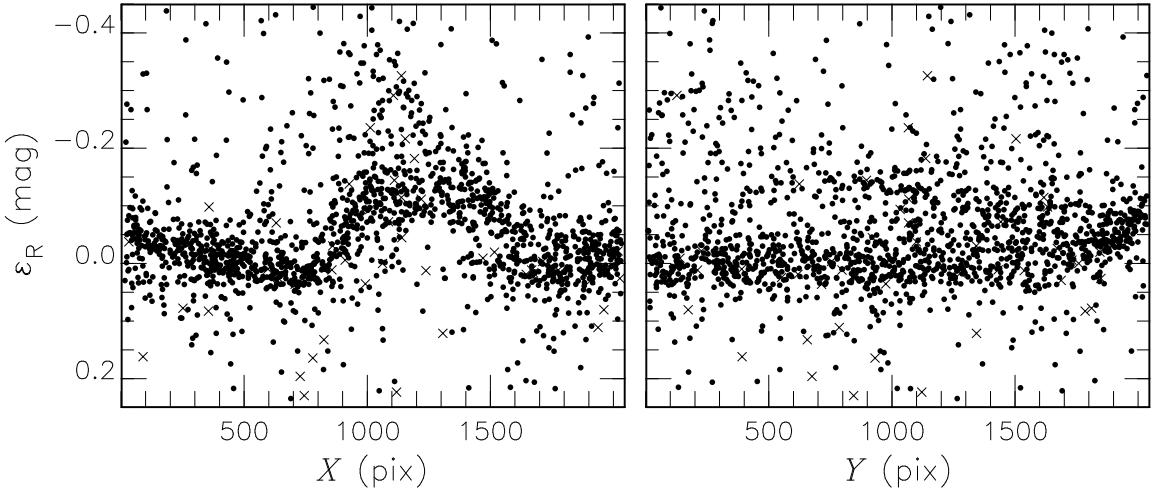


図 4: #167258(R , 300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。

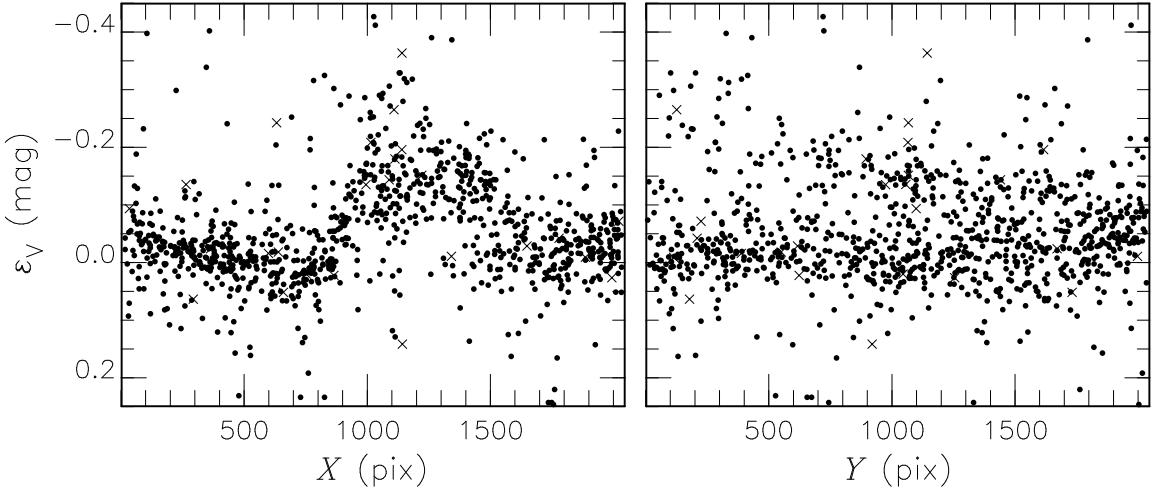


図 5: #167263(V , 300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。

6 検出器上の位置による等級のずれ

前節で求めた変換式により、各 SDSS 天体の V, R バンドでの予想機械等級が計算できる。これを実際に測光で得た機械等級 V^*, R^* と比較したずれ ε を計算する。

$$\varepsilon_V = V^* - (g + \alpha_V(g - r) + c_V) \quad (4)$$

$$\varepsilon_R = R^* - (r + \alpha_V(r - i) + c_R) \quad (5)$$

このずれが、フラットであればよいが、実際には図 4, 5 に示すように、検出器上の場所によってずれてしまっている。この図で負の値をもつということは、 V^* または R^* が過大に明るくなっているということで、フラットが原因だとすればフラットがその位置でへこんでしまっていると考えられる。このずれには特定のパターンがあり、各画像でほぼ同じ形のずれで、しかも V, R どちらのバンドでも共通していた。また、北東に $(20', 20')$ ずらした画像 3 枚と、南西に $(20', 20')$ ずらした画像 3 枚でも同様の結果が得られた。

図 4, 5 に示したずれを、 X 方向に 10 次、 Y 方向に 4 次の多項式曲面で近似した。フィットした多項式曲面から、ドームフラットがどれだけ歪んでいるかを補正するための FITS 画像を、球状星団方向を観測した各画像に対

表 2: SDSS カタログと 2kCCD 画像の測光値の比較から得たフラットの歪み同士の比較。 V バンドのデータは #167262 と、 R バンドのデータは #167267 とピクセルごとに比較した。検出したフラットの歪みがフレームごとにどれだけ異なるかという標準偏差と、最大と最小のずれの差。検出器の [200:800,200:800] の部分だけを利用した場合と、検出器全体を利用した場合の 2 つ結果を示した。

Frame	Band	[200:800,200:800]		Whole Area	
		Std. Dev. (%)	Max–Min (%)	Std. Dev. (%)	Max–Min (%)
167253	V	1.458	7.43	1.590	23.30
167254	V	1.465	7.24	1.824	30.11
167255	V	1.034	5.14	1.286	20.78
167256	V	1.379	6.62	1.728	24.72
167257	V	1.021	6.41	1.467	21.75
167263	V	1.458	7.19	2.031	37.12
167264	V	0.880	4.28	1.136	16.90
167265	V	0.851	4.74	3.553	87.41
167266	V	7.556	115.62	18.150	319.49
167273	V	0.569	2.99	0.968	18.13
167274	V	1.073	5.38	1.709	24.10
167275	V	0.774	4.42	1.321	20.27
167276	V	0.921	5.70	1.561	24.96
167277	V	0.981	5.45	1.461	22.54
<hr/>					
Frame	Band	[200:800,200:800]		Whole Area	
		Std. Dev. (%)	Max–Min (%)	Std. Dev. (%)	Max–Min (%)
167248	R	1.897	9.23	2.509	32.81
167249	R	1.719	8.81	2.491	38.33
167250	R	1.051	5.08	1.550	28.42
167251	R	0.980	5.08	1.456	41.51
167252	R	0.977	4.04	1.223	26.72
167258	R	0.600	2.74	1.170	31.55
167259	R	0.836	4.19	1.044	25.92
167260	R	0.789	4.19	1.244	19.15
167261	R	0.599	3.25	1.049	26.23
167268	R	1.083	5.57	1.684	40.94
167269	R	1.063	4.60	1.524	25.37
167270	R	0.579	3.30	0.852	20.90
167271	R	0.650	3.81	1.151	31.98
167272	R	0.644	3.90	1.123	31.82

して作成した。この曲面がどれだけ安定しているか調べるために #167262 (R , 300 秒) と #167267 (V , 300 秒) を基準にして、どれだけピクセル値の分散があるかを調べた。表 2 がその結果である。

7 補正を加えた新フラット画像

前節で得られた多項式曲面を用いてドームフラットを補正したものを新しいフラット画像として利用する。#167266 はうまく比較ができなかったのでそれを除き、表 2 の各画像から作った補正用画像を合成して、それを最初の 1 次処理で用いたフラット画像に掛け合わせたフラット画像を合成した。

図 6 に、 V バンド、 R バンドそれぞれの新フラット画像と両者の比を示した。多項式曲面の歪んだ形状がそのまま見えている。

7.1 スカイフラット画像との比較

伊藤さん作成の R バンド 300 秒積分のスカイフラットとの比をとると(図 7)、やはり補正曲面のパターンがそのまま見える。これが正しいとすれば、観測装置の感度ムラがこのように複雑なパターンを持っている。

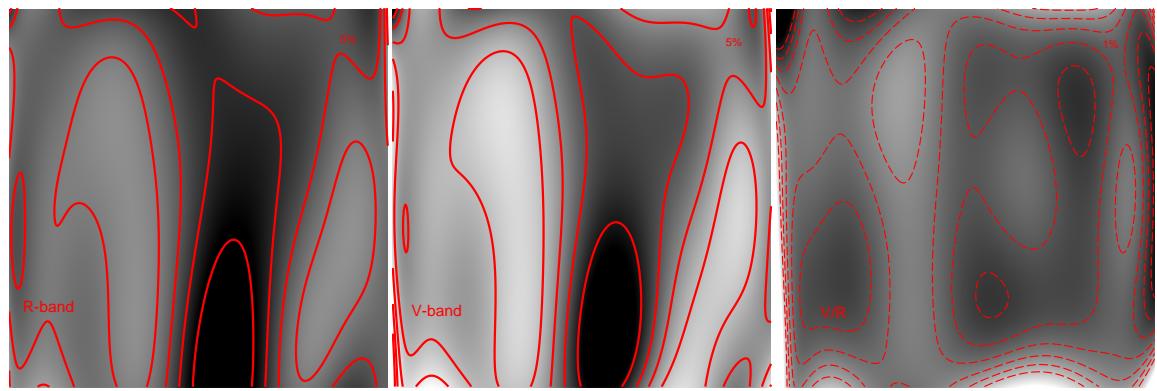


図 6: SDSS カタログと 2kCCD の測光結果との比較から作成したフラット画像の構造。(左) R バンド、(中央) V バンド、(右) V バンドと R バンドとの比。

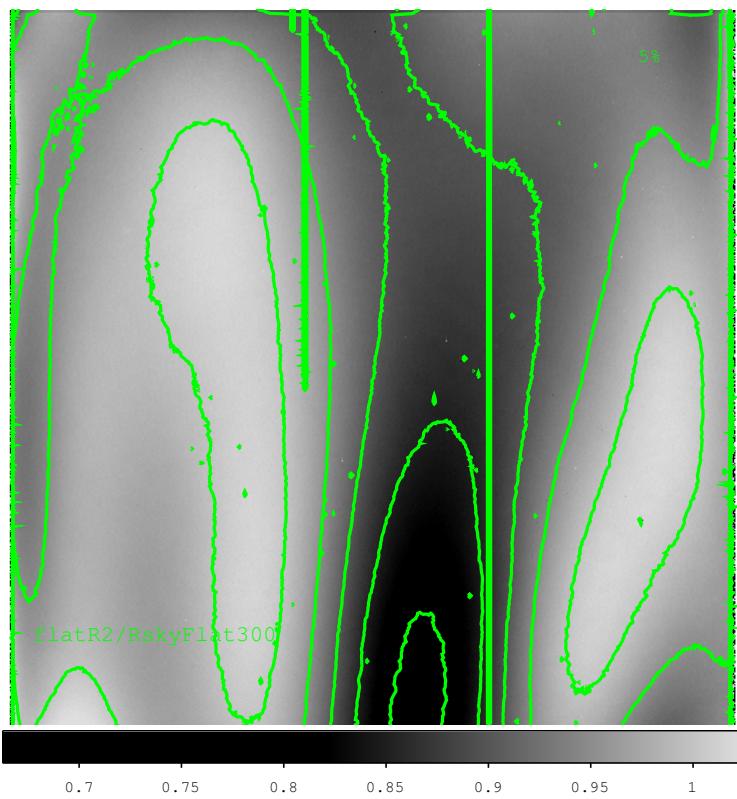


図 7: 本研究で作成した新しいフラット画像と、ダーカスカイから作成したフラット画像の比。

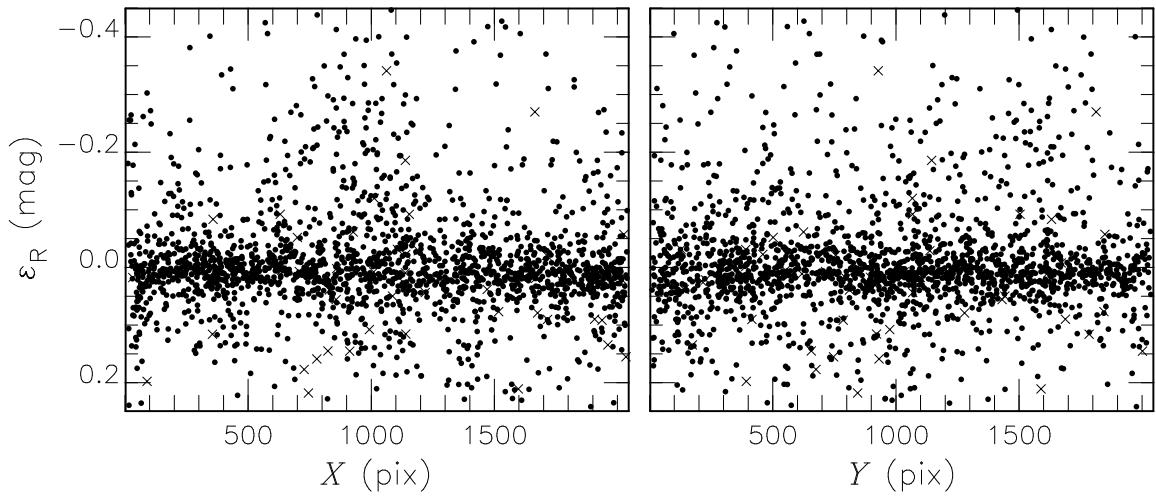


図 8: #167258(R , 300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。ただし、新たに作ったフラット画像を使って解析し直した結果。

7.2 新フラット画像による測光結果

新フラット画像を用いて一次処理をやり直し、再び測光と SDSS との比較を行った結果は、予想通り検出器上の位置によるずれの変化がなくなった(図 8, 9)。

8 画像内の PSF の変化

検出器上での PSF の変化による影響が出でていないことを確かめるため以下のようなチェックを行った。

ドームフラットをそのまま用いた画像から、 $A=[375:825, 1100:1550]$, $B=[1135:1585, 1135:1585]$, $C=[950:1400, 200:650]$ という 3 つの領域を切り出した(図 10)。それぞれについて独立に PSF を求めて測光する。その結果得られる SDSS カタログとのずれ(図 11, 12)は、図 4, 5 と同じ傾向のずれを示している。

9 まとめ

Koch et al. (2004) と同様の方法で、SDSS カタログとの比較により 2kCCD のフラットをチェックした。それによると 10% 以上のムラが存在し、高次の構造をもっている。ただし、非測光夜であったこともあり、さらに他の条件によるデータを用いて確認が必要である。

参考文献

- Koch et al. 2004, Astron. Nachr., 325, 299–306

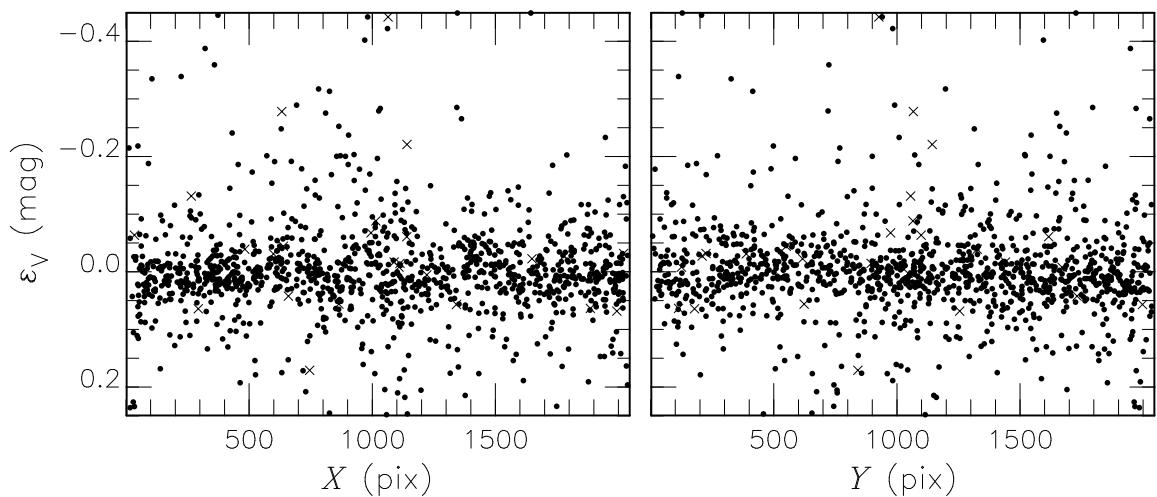


図 9: #167263(V , 300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。ただし、新たに作ったフラット画像を使って解析し直した結果。

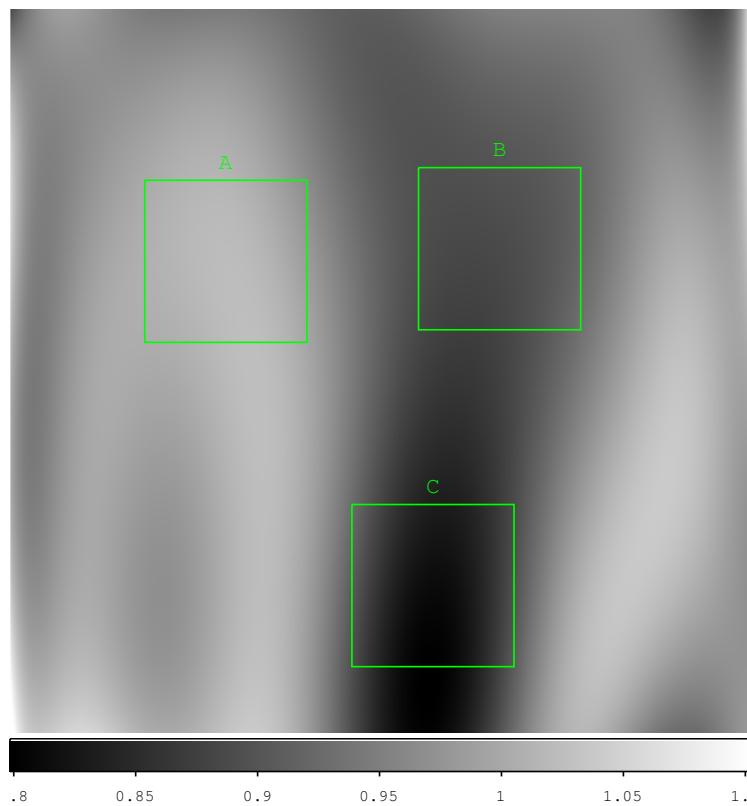


図 10: 切り出して独立に測光を行った 3 つの領域。

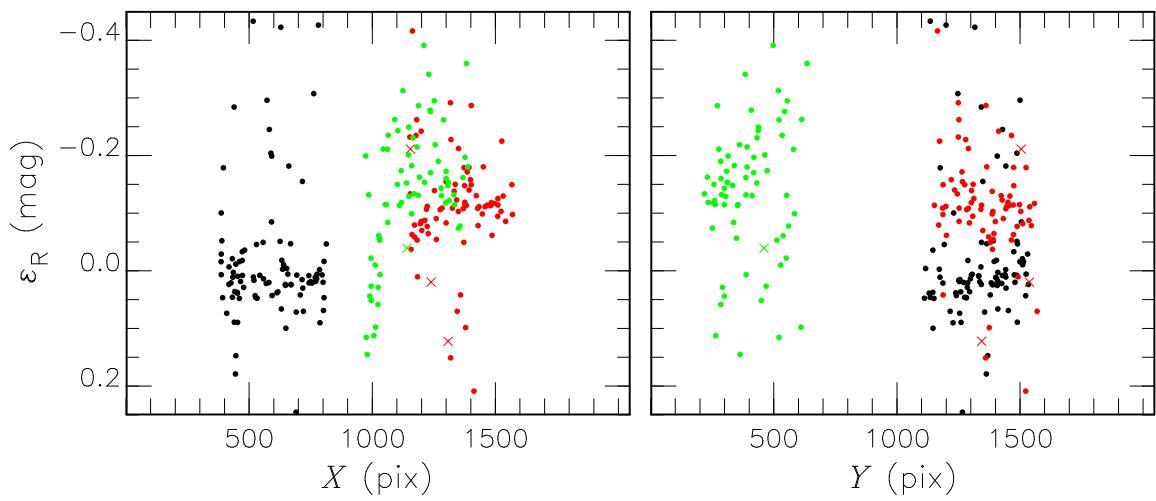


図 11: 図 4 と同じ。ただし、3 つの領域 (A=白, B=赤, C=緑) それぞれについて独立に測光した値を用いた。図 4 と同じような傾向が見られる。

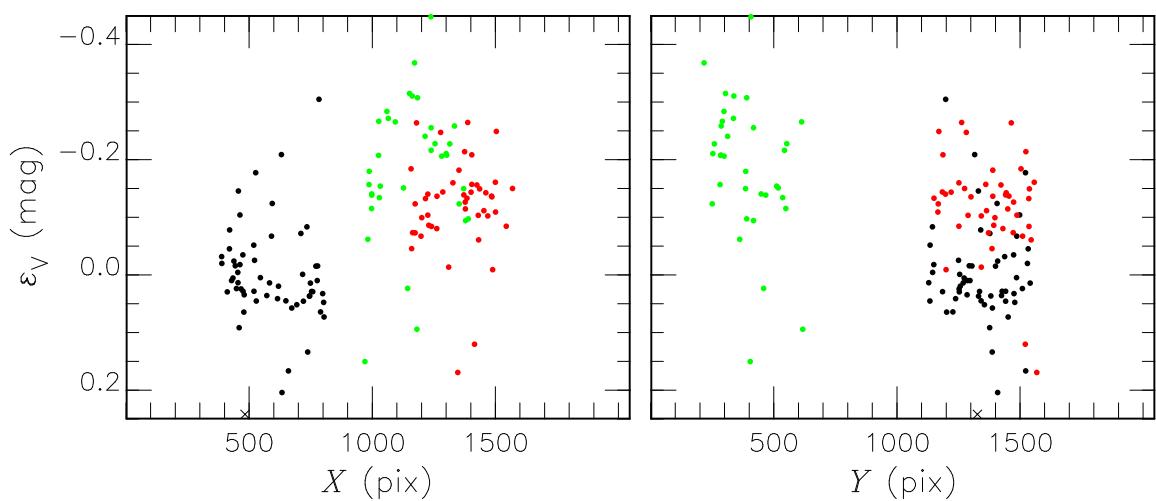


図 12: 図 5 と同じ。ただし、3 つの領域 (A=白, B=赤, C=緑) それぞれについて独立に測光した値を用いた。図 5 と同じような傾向が見られる。

2KCCD フラットについての実験

松永、青木、樽沢、征矢野、三戸

2010年6月18日

概要

5月31日から6月1日にかけて、シュミット望遠鏡 + 2KCCD カメラのフラットに影響を与えるかもしない光漏れとデュワー窓の汚れについてテストを行った。鏡筒先端にカバーをかけることで、筒先以外からの光漏れがほとんどないことが確認できた。また、望遠鏡がスクリーンを見ている状態では、ドーム内の光が反射して検出器に入るものの、その影響は小さい。

それらの実験中に、デュワーの窓が少し汚れていることに気づいた。この汚れを拭き取る前後でドームフラットを取って比べたところ、その変化は±0.3%程度であった。ただし、この変化はドームフラットのような面光源に対するものであり、点光源の感度ムラにどのような影響が出るかは別に調べる必要がある。

1 光漏れの確認について

1.1 目的

フラットデータ取得時に余計な光が入っていないかどうか確かめる。ドームを暗くした状態でシャッターを開いて180秒の積分を行うと、余計な光が入らなければ暗電流(無視できる)だけとなるはずである。もし、余計な光があればその原因を特定するため、いくつかの条件でこのダークに相当するような積分を行った。

1.2 取得したデータと解析

表1に5月31日のテストで取得したデータの一覧をあげる。

170583–585と170594–596の3枚ずつでそれぞれバイアス画像を作る。ただし、バイアスを合成したり、バイアスを引いたりするときには、オーバースキャン領域を使ってレベルの調節を行う。フラットの補正是行わない。

- 170586–588 (dark0.fits)
構造は何も見えず、バイアス画像そのものと言ってよい。imstatisticsを使い 10σ を1回した上で求めた統計値は、平均値はほぼゼロ(-0.18)、標準偏差が8.71であった。この標準偏差は、読み出し雑音(6.76ADU; ウェブページの値)よりやや大きい。
- 170589 (d170589.fits)
構造は何も見えず、バイアス画像そのものと言ってよい。平均値はほぼゼロ(0.32)、標準偏差が13.25であった。上のdark0.fitsが3枚の平均であったことを考えると、この標準偏差のレベルもほぼ同じである。したがって、鏡筒の横などから入ってくる光はほぼ無い。これは、たとえドームフラット用ランプについていても関係ない。
- 170590 (d170590.fits)
遮光カバーをとると、ドーム内の光がスクリーンに当たって入ってきて、レベルが上がる。平均値が

表 1: 5月31日に行ったテストで取得したデータ一覧。バイアス画像以外の画像の積分時間はすべて180秒である。フィルターはRバンドを使った。

cd No.	時刻	説明
170583-585	5/31 16:20	バイアス
170586-588	5/31 16:31	望遠鏡筒先をハルトマン板+遮光カバーで覆った。ミラーかバーは開いている。
170589	5/31 16:48	遮光カバーで覆ったまま、ドームフラットライト(ND=1.4)をつけた。
170590	5/31 17:01	遮光カバーを外して、ドームフラットライトをOFF。
170591	5/31 17:12	ドーム南にあるUPSのLEDに上着をかけて隠した。
170592	5/31 17:19	ドーム南にあるUPSのLEDを元の状態に。
170594-596	6/1 01:32	バイアス
170597-599	6/1 01:52	ミラーカバー閉じた状態でダーク。
170600-602	6/1 02:28	ミラーカバー開いた状態で積分。スクリーンを向いている。

108.4、標準偏差が17.8となった。構造は見えず、非常にフラットに見える。観測時にはスクリーンを見たりはせず、ドームスリットが空いている状態なので、検出器へ届くドーム内の光はずつと少ないはずである。

- 170591 (d170591.fits)

ドーム内で明るく見えるUPSのLED(緑色に点灯)を隠すと、平均値が83.6へ落ちた(標準偏差16.3)。さきほどのドーム内を照らしている光の20%近くが、このLEDであると考えられる。

- 170592 (d170592.fits)

上記LEDの覆いを外すと、d170590.fitsのレベルへ戻った(平均値108.0、標準偏差17.3)。

- 170597-599 (dark1.fits)

前項までのテストは午後4時から5時半頃に行っていて、ドームの外はまだ明るい。そこで、深夜になってから同じようなテストを行った。鏡筒筒先には何もなく、ミラーカバーを閉じた状態で180秒間露出すると、バイアスと見分けのつかない画像が取れる。平均値は-0.21、標準偏差は10.1。(dark0.fits)の結果をほぼ再現している。標準偏差が少し大きいが理由はわからない。

- 170600-602 (dark2.fits)

ミラーカバーを開けると、スクリーンを見ている状態にすると、ドーム内の光が入り、d170590.fitsの結果と同じになった。平均値は100.9、標準偏差は14.7。

1.3 まとめ

以上の結果から、望遠鏡筒先以外から入ってくる光子は検出器へ落ちる成分は無いか、あっても無視できる量であることがわかった。また、スクリーンを見ている状態では、ドーム内の光が検出器へ入ってくる。これはほぼフラットで、Rバンドでは180秒積分で100ADUほどの量である。通常、フラットランプの光量は、60~90秒で20000~25000カウントになるようにNDフィルターで調節する。したがって、この光がフラットに与える影響は0.5%以下である。ただし、ドーム内の光の波長依存性は確認する必要がある。

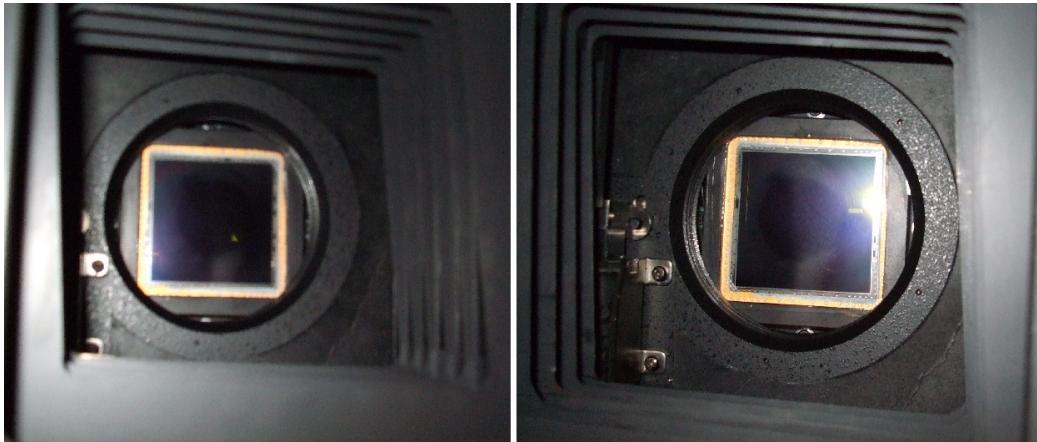


図 1: 2KCCD カメラのデュワー窓の写真 (5月 31 日撮影)。左右の 2 方向から撮影した。見えにくいが、窓の下側の中央当たりにかすかに白い汚れがある。

2 デュワー窓の汚れ

2.1 目的

前日のテスト (第 1 節) で鏡筒の中に入っている光漏れが見えないか等を調べているときに、2KCCD カメラ・デュワーの窓がかすかに白っぽく汚れていることに気づいた (図 1)。この汚れは、ちょうど乾燥空気を当てている部分 (カメラ下側、南側) にあり、2010 年 4 月 13 日に行なった SDSS 領域の観測によるフラットのチェックで星の測光値が他からずれていた領域に相当する。そこで、この汚れの影響をドームフラットによって調べる。

2.2 取得したデータと解析

表 2 に 6 月 1 日のテストで取得したデータの一覧をあげる。

170635-639 のバイアスを合成して、それをフラット用生画像から差し引いて、それぞれのグループごとにフラット画像を合成する。オーバースキャン領域を使ったレベルの調節も行って、バイアスの合成・差し引きをする。その後、各グループのフラット画像を imcombine で合成して、規格化した (表 3)。

図 2 は、デュワーを拭く前後での B バンド・R バンドそれぞれのフラット画像である。等高線は -4 %, -2 %, 0 %, 2 %, 4 % のレベルで引いた。次に、拭く前後でのフラット画像の変化を、FlatB12 と FlatR12 で調べた。さらに、B バンドの場合の変化と R バンドの場合の変化と比を取って (FlatRatio)、窓の汚れの影響が波長に依存するかどうかを調べた。

図 3 は、R バンドの変化 (左) と 2 つのバンドでの変化の違い (右) を示したものである。ただし、大きなスケールの構造が見やすくなるように、Kernel Radius=5 の Gaussian で Smooth した表示になっている。等高線のレベルは -0.2 %, -0.1 %, 0 %, 0.1 %, 0.2 % で、画像下側の汚れに相当する部分で $\pm 0.3\%$ の変化と円環状にもう少し小さい変化があったことがわかる。FlatR12 の図で黒い部分は、汚れを拭く前のフラット画像が暗かったことを意味していて、汚れによって光が遮られていたと考えられる。円環状のパターンは干渉縞か。

表 2: 6月1日に行ったテストで取得したデータ一覧。バイアス画像以外の画像の積分時間はすべて180秒である。フィルターはRバンドを使った。

kcd No.	時刻	説明
170613-617	6/1 13:40	FlatR1: デュワー窓を拭く前のドームフラット、Rバンド (ND=2.6、90秒積分)
170619-624	6/1 14:05	FlatB1: デュワー窓を拭く前のドームフラット、Bバンド (ND=1.4、90秒積分)
170625-629	6/1 15:00	FlatR2: デュワー窓を拭いた後のドームフラット、Rバンド (ND=2.6、90秒積分)
170630-634	6/1 15:20	FlatB2: デュワー窓を拭いた後のドームフラット、Bバンド (ND=1.4、90秒積分)
170635-639	6/1 15:40	バイアス

表 3:

Name	Band	積分時間 (ND フィルター)	説明
FlatR1	R	90秒 (ND=2.6)	デュワー窓を拭く前のフラット
FlatB1	B	90秒 (ND=1.4)	デュワー窓を拭く前のフラット
FlatR2	R	90秒 (ND=2.6)	デュワー窓を拭いた後のフラット
FlatB2	B	90秒 (ND=1.4)	デュワー窓を拭いた後のフラット
FlatR12	R	90秒 (ND=1.4)	FlatR1 を FlatR2 で割ったもの。
FlatB12	B	90秒 (ND=2.6)	FlatB1 を FlatB2 で割ったもの。
FlatRatio	—	—	FlatR12 を FlatB12 で割ったもの。

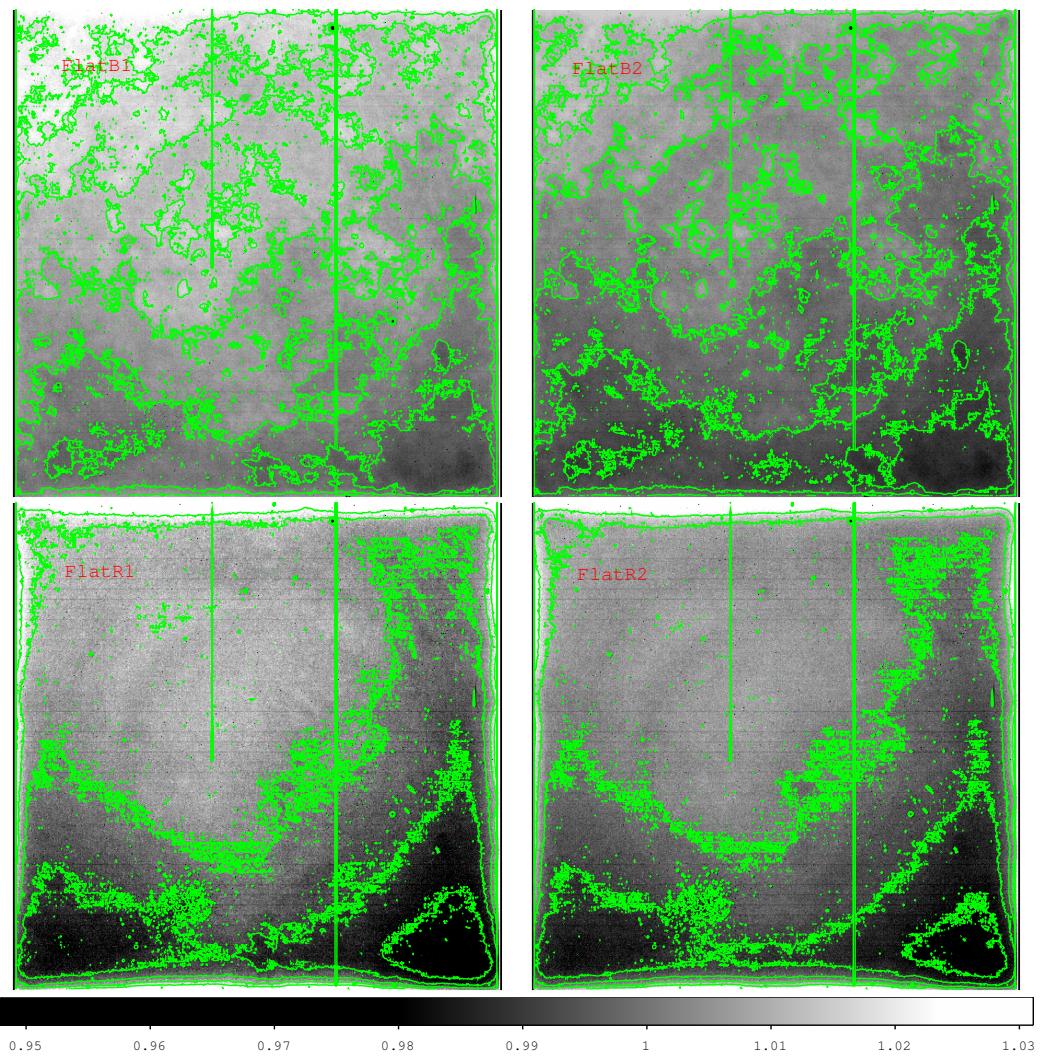


図 2: FlatB1 (左上), FlatB2 (右上), FlatR1 (左下), FlatR2 (右下)。

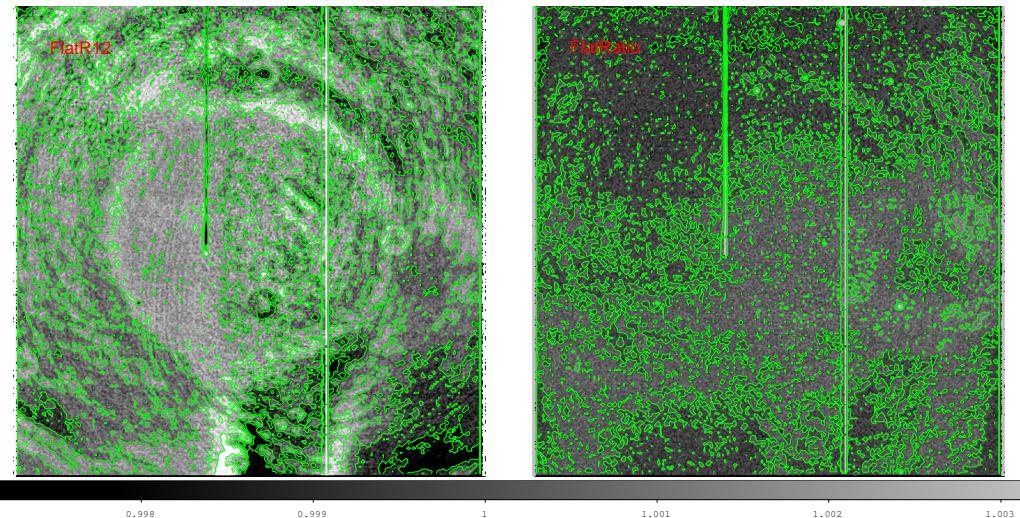


図 3: FlatR12 (左), FlatRatio (右)。

2.3 まとめ

以上のテストから、デュワーの窓の汚れによって、 $\pm 0.3\%$ 程度の影響が出ていたことが確認された。ただし、これはドームフラットのような面光源の場合であり、星に対する感度ムラには異なる影響の出る可能性がある。たとえば、汚れとして付着している微粒子によってミー散乱が生じるとすれば前方散乱が強く起こり、フラットの面光源は散乱されても検出器に届くが、星としては像を結ぶ光子が減少することが考えられる。これは、デュワー窓を拭く前後での星の測光によって比較するべきである。

SDSS 領域の観測による 2KCCD カメラのフラット評価 (2)

— 2010 年 6 月 9 日観測分データの解析 —

松永典之

2010 年 6 月 18 日

概要

SDSS カタログに記載された天体の測光結果から、2KCCD 画像の感度ムラの補正に 0.2 等近くの歪みを検出した (4 月 13 日観測分データの解析)。その後、2KCCD デュワーの窓にかすかな汚れが付着していることがわかった。今回、デュワー窓の汚れを拭き取った状態で、同じ領域の SDSS カタログ天体を同じように観測し、感度ムラの再評価を行った。その結果、前回検出した感度ムラの歪みは無くなつた。0.2 等の大きな歪みは、デュワー窓の汚れが原因であったと考えられる。

1 はじめに

2KCCD カメラのフラット補正が正しく行えているか確認するために、視野内の星の等級が検出器上の位置によらず正しく求められるかどうかを調べる。SDSS のように、広い視野について注意深く得られた均質な等級リストと比較することで、2KCCD 側の感度ムラについて検証することができる。このような手法は、Koch et al. (2004) が ESO2.2m 望遠鏡の WFI カメラについて感度ムラを調べるために用いられている。

Koch et al. (2004) と同じ手法を用い、同じ領域 (球状星団 Palomar 5 の方向) を 4 月 13 日に観測して、感度ムラについて調査を行つた。ドームフラットを用いた測光の結果では、検出器上の位置に依存したムラが発生していることがわかった。特に、画像の中央下部あたりで他とは 0.2 mag という大きなずれが生じた。これは、ドームフラットとスカイフラットの差よりも大きく、スカイフラットであつてもほぼ同じ形で感度ムラが残つてしまふ。

その後、デュワーの窓にかすかな汚れが付着していることが判明した。そこで 6 月 1 日にこの汚れを拭き取つた。その前後でドームフラットを取つて比較すると、ちょうど画面中央下部で $\pm 0.3\%$ 程度の変化が生じた。ただし、この変化は面光源に対するもので星の測光値への影響も同じだとは限らない。そこで、再び球状星団 Palomar 5 の視野を観測し、星の測光値にどのような変化が生じるかを調べる。

2 観測

2010 年 6 月 9 日、15:16:05.30 -00:06:41.0 (J2000.0) を中心とする球状星団 Palomar 5 の領域を観測した。R バンドと V バンドで、それぞれ 180 秒積分 5 枚、300 秒積分 5 枚の撮像をした。ディザリングのようなことは行わなかつた。さらに、北東へ約 $(20', 20')$ と南西へ約 $(20', 20')$ ずらした領域を R バンドで 3 枚ずつ撮像した (積分時間 300 秒)。

当夜、明らかな雲は見当たらず、ほぼ晴れていたようである。ただし、夕方の最初の 3 枚 (170699–701) については、空がまだ暗くなりきつていなかつた。

3 解析

解析は、4月13日の観測データと同様の手法で行った。バイアス引き、フラット化の後、測光を行う。バイアスを引くにあたっては、オーバースキャン領域を利用してバイアスレベルの調節を行った。

フラットとしては、当日撮ったドームフラットを用いる。観測終了後に、Vバンド、Rバンドそれぞれについて10枚ずつ取ったドームフラットを合成したものである。Vバンドのドームフラットには透過係数1.8のNDフィルターを用いて90秒積分を行い、Rバンドでは透過係数2.6のNDフィルターで60秒積分を行った。バイアスレベルを除いたあとの信号は、Vバンド・Rバンドそれぞれで、20,000カウント・26,000カウント程度であった。

各画像ごとに、ダークを引いて、ドームフラットで割って測光用の画像とした。画像をスタックしたりはせず、各画像ごとに独立して測光を行った。測光には、IRAF/DAOPHOTとそのタスクを呼ぶスクリプト集であるautodaoソフト¹を用いた。各画像での検出天体数は、Rバンド(300秒)で4000～5000天体、Vバンド(300秒)で3000～4000天体程度であった。そのうち、DAOPHOTの返す測光誤差が0.05mag以下のものだけを用いる。また、ドームフラットの画像で[0.92:1.08]から外れているものはバッドピクセルとしてリストアップした。測光した天体の座標を中心として、 13×13 ピクセルの正方形の中にバッドピクセルを含む天体も、以下の解析からは除く。その結果、SDSSと比較を行う天体は、Rバンドで約2400個、Vバンドで約1800個となった。SDSSのカタログと比較したところ、それらの9割程度の天体が同定できた。

4 結果

まず、SDSSカタログの等級を2KCCDの測光値と比較するためにフィルター・システムの変換式を求めた。 $0.2 \leq g - r \leq 1.5, 0.1 \leq r - i \leq$ の範囲の天体に対して、

$$V^* = g + \alpha_V(g - r) + c_V \quad (1)$$

$$R^* = r + \alpha_R(g - r) + c_R \quad (2)$$

という変換式を最小二乗法で決定する。この決定には、検出器上で[200:800,200:1800]の範囲に写っている星だけを用いた。図1にSDSSカタログと測光値との比較と求めた変換式の例をプロットした。各画像に対して求めた変換式の係数などを表1にまとめた。

式(1), (2)で求めた変換式により、各SDSS天体のV, Rバンドでの予想機械等級が計算できる。これを実際に測光で得た機械等級 V^*, R^* と比較したずれ ε を計算する。

$$\varepsilon_V = V^* - (g + \alpha_V(g - r) + c_V) \quad (3)$$

$$\varepsilon_R = R^* - (r + \alpha_R(g - r) + c_R) \quad (4)$$

5月14日に報告したデータでは、このずれが検出器の位置に依存してきた。今回の結果をプロットした例が図2と3である。検出器全体でほぼフラットになっていることが分かる。北東に($20', 20'$)ずらした画像3枚と、南西に($20', 20'$)ずらした画像3枚とでも同じようにフラットであることが確かめられた。ばらつきとしても、測光値の誤差である ± 0.05 magの中に含まれている。

したがって、デュワーの窓が原因で、星の測光値にムラが生じていたと考えられる。

¹ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~nmatsuna/Japanese/software/autodao.html>

表 1: 2KCCD で取得した画像の ID、バンド名、積分時間、観測所のエアマス ($\sec Z$) と式 (1), (2) の係数。

Frame	Band	Exp [s]	Airmass	c_V	α_V
170704	V	180	1.322	-21.488 ± 0.003	-0.507 ± 0.004
170705	V	180	1.311	-21.486 ± 0.003	-0.514 ± 0.004
170706	V	180	1.301	-21.488 ± 0.003	-0.507 ± 0.004
170707	V	180	1.292	-21.450 ± 0.003	-0.512 ± 0.004
170708	V	180	1.284	-21.489 ± 0.003	-0.506 ± 0.004
170714	V	300	1.239	-21.545 ± 0.002	-0.509 ± 0.003
170715	V	300	1.237	-21.443 ± 0.003	-0.510 ± 0.003
170716	V	300	1.236	-21.460 ± 0.002	-0.506 ± 0.003
170717	V	300	1.236	-21.466 ± 0.002	-0.515 ± 0.003
170718	V	300	1.237	-21.490 ± 0.003	-0.508 ± 0.003
170699	R	180	1.395	-21.962 ± 0.002	-0.329 ± 0.005
170700	R	180	1.380	-21.998 ± 0.002	-0.325 ± 0.004
170701	R	180	1.365	-21.990 ± 0.002	-0.329 ± 0.004
170702	R	180	1.351	-21.999 ± 0.002	-0.343 ± 0.004
170703	R	180	1.338	-22.007 ± 0.002	-0.330 ± 0.003
170709	R	300	1.270	-22.060 ± 0.001	-0.336 ± 0.003
170710	R	300	1.261	-22.046 ± 0.002	-0.337 ± 0.003
170711	R	300	1.254	-21.990 ± 0.002	-0.335 ± 0.003
170712	R	300	1.248	-22.008 ± 0.001	-0.336 ± 0.003
170713	R	300	1.243	-22.028 ± 0.001	-0.332 ± 0.003
170719	R	300	1.240	-21.970 ± 0.004	-0.337 ± 0.007
170720	R	300	1.246	-22.023 ± 0.002	-0.331 ± 0.005
170721	R	300	1.252	-22.022 ± 0.002	-0.333 ± 0.004
170722	R	300	1.281	-21.965 ± 0.002	-0.339 ± 0.003
170723	R	300	1.292	-21.970 ± 0.002	-0.341 ± 0.004
170724	R	300	1.304	-21.960 ± 0.002	-0.340 ± 0.004

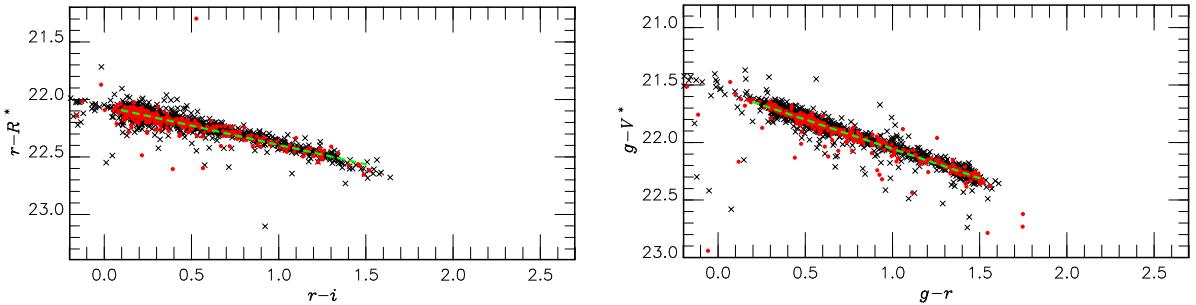


図 1: SDSS カタログと同定できた天体について、SDSS の等級と 2KCCD 機械等級との差を SDSS カタログでのカラーに対してプロットした。赤点は、[200:800,200:1800] に写っている星で、黒点はそれ以外の星。赤点に対して、変換式 (緑の破線) を求めた。

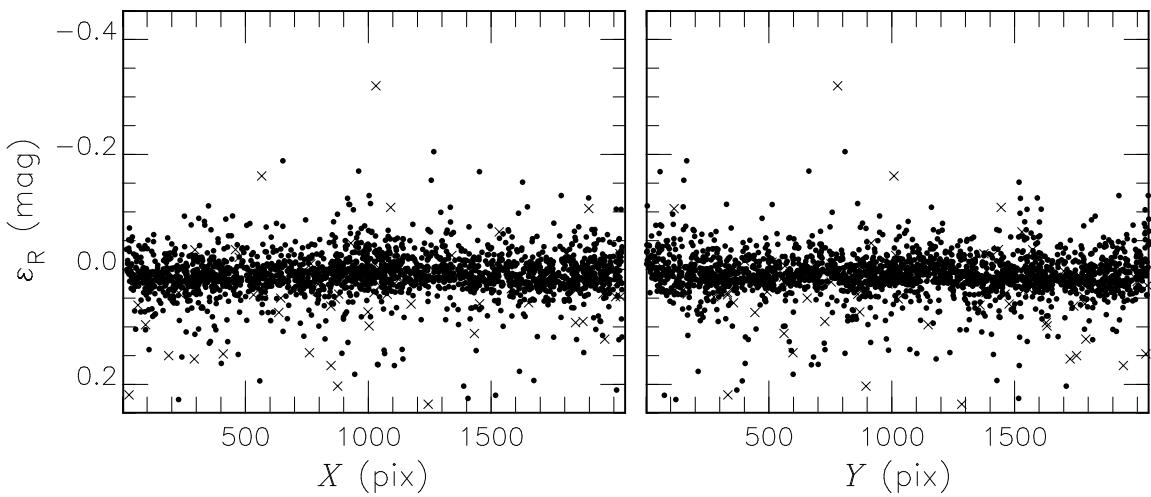


図 2: #170709(R バンド,300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。

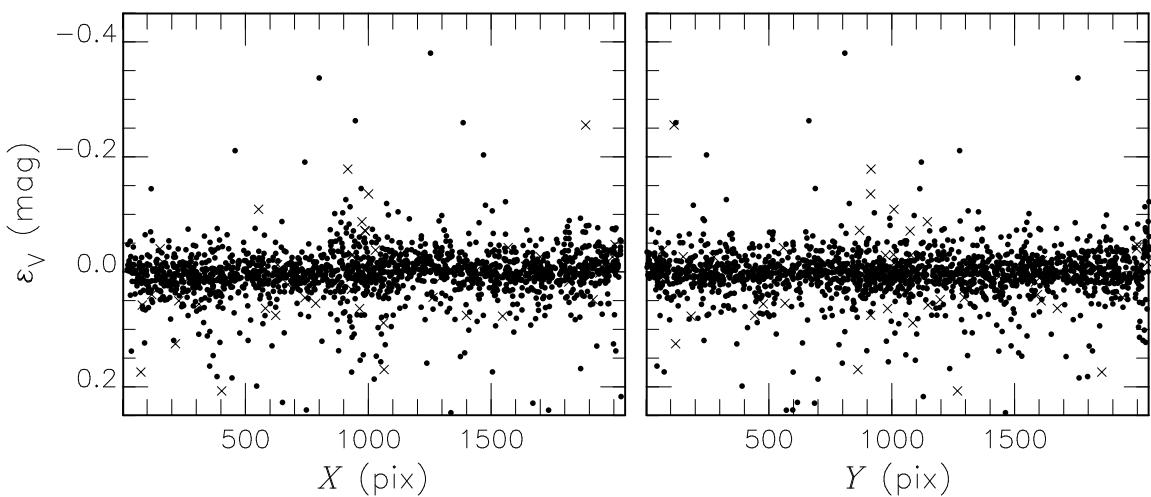


図 3: #170714(V バンド,300 秒) の画像での測光値と SDSS カタログからの予想等級とのずれ。

5 まとめ

SDSS カタログとの比較により、2KCCD フラットカメラの検証を行った。4月 13 日に行った観測ではドームフラットを使った測光で 0.2 mag 程度の歪みが生じていた。しかし、今回同じ手法で行った解析の結果(6月 9 日の観測データ)ではそのような歪みは存在せず、検出器全体にわたって ± 0.03 mag 程度の分散で SDSS のカタログと整合性のある等級が得られた。この変化の理由は、6月 1 日にデュワーの窓を拭いてきれいにしたことにあると考えられる。

デュワーの窓に付着した汚れが原因だとして、どのように歪みが生じたのか今後検証する必要がある。特に、ドームフラットの比較ではそれほど大きな変化は見られないでの、星の測光でだけこのような大きな変化が生じた理由を考える必要がある。

可能性としては、デュワー窓の汚れで強いミー散乱が生じ、点源光は散乱によって失われる一方、フラットのような一様に近い面光源は散乱が起こっても連続的に輝度分布が変化しただけで、それほど変化が起らなかったということが考えられる。しかも、前方光源が強く起こっていたとすれば、検出器へ届く全光量はそれほど変わらないという状況があり得る。

ドームフラットの変化の追跡

松永典之

2010年7月1日

概要

2008年4月以降のドームフラットを調査したところ、数ヶ月単位で窓の汚れが原因と見られるフラットの変化を検出することができた。その変化から、2008年4月以降では2008年8月～11月と2009年8月～2010年5月に窓の汚れの影響があったと考えられる。

2008年4月から2010年5月までのデータを取り出してきて、ドームフラットを作成した。今回の解析では、Iバンドのドームフラットのデータを用いた。ほぼすべて、ND フィルター 1.4 を用いて 50 秒程度の積分を行い、28000 カウント（バイアス込み）のフラックスになるようなデータである。これらのドームフラットを、窓の汚れを拭き取った翌日の2010年6月2日に取得したドームフラットと比較した。

図1にそのうちの15枚のドームフラットについて、2010年6月2日のフラットとの比をとったものを示す。（90度回転していることに注意。ページ左側が画像の上に対応する。）比をとったときの1からのずれはたかだか ±2 大きく分けて2つのパターンが見られる。

- 画像中央下部から縦に2本の筋のように伸びているパターン
- 画像中央に対して点対称にへこんでいる（またはふくらんでいる）パターン

このうち、前者は乾燥空気に由来する窓の汚れが原因だと考えられる。後者の原因は何かよくわからない。比較的長いタイムスケールで変化をしている。例えば、2009年10月から2010年3月では20100602 と比べて画像中央で凸になっていて、それ以外ではほとんどが凹になっている。カウントのレベルとも相関がないようである。なお、夕方と朝とでドームフラットを取っているもののいくつかについてそれぞれ独立にフラットを作つてみたが、夕方と朝とで得られるフラットは変化していなかった。

表1に今回調べたドームフラットの一覧と、上記2つのパターンの有無をリストした。縦筋のパターンが見えるかどうかから判断すると、2008年4月以降では、

- 2008年8月～11月12日（2008年11月12日にKWFC カメラファーストライトのため 2KCCD を外している）
- 2009年8月～2010年5月（2010年2月前後に弱い時期あり）

という時期に、窓の曇りの影響があったと推定される。

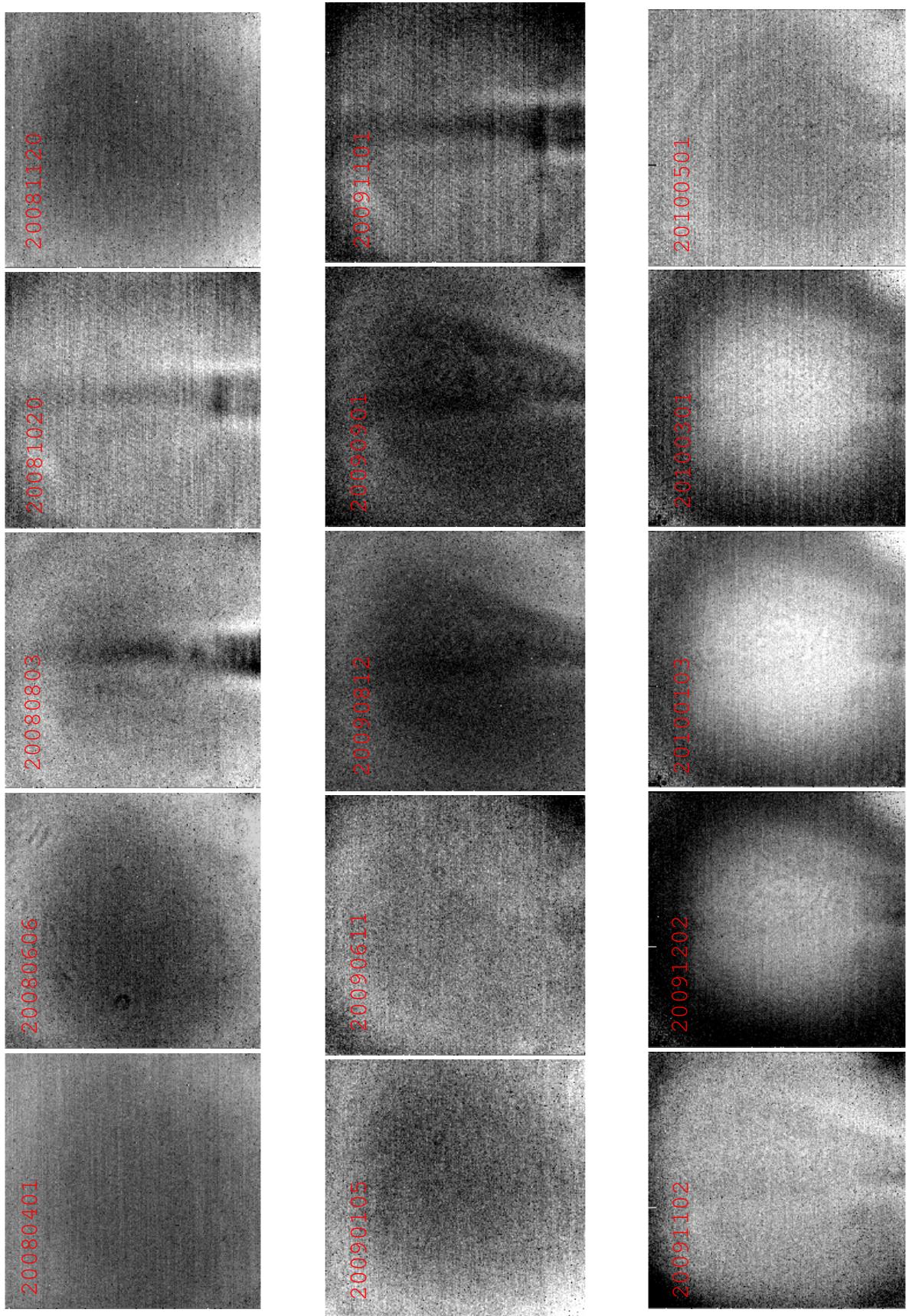


図 1: 窓の汚れを拭き取った後の 20100602 にとったドームフラットに対する、20080401 から 20100501 までに取られたドームフラットの比。画像の中心に対してほぼ点対称なパターンと、中央下部から上に向かって伸びている 2 種類のパターンが特徴的であるが、それぞれ時間的に変化している。

表 1: ドームフラットの変化

日付	縦に伸びるパターン	等心円状パターン	合成した枚数	カウント(バイアス込)
20080401	見えない	ほとんど無い	朝 5 時 5 枚	25000
20080501	見えない	ある(凹)	夕方 7 時 10 枚	29000
20080606	見えない	ある(凹)	夕方 8 時 10 枚	26000–28000
20080612	見えない	ある(凹)	夕方 7 時 10 枚	25000–28000
20080803	強く見える	ほとんど無い	夜 3 時 5 枚	28000
20080818	少し弱いが見える	ほとんど無い	夜 0 時 5 枚	26000–27500
20080914	強く見える	ほとんど無い	夕方 6 時 5 枚 + 朝 5 時 5 枚	28000
20081020	強く見える	ほとんど無い	朝 5 時 5 枚	28000
20081101	はっきり見える	隅で強い(凸)	朝 7 時 10 枚	28000
20081120	見えない	ある(凹)	夕方 5 時 5 枚 + 朝 5 時 5 枚	30000–33000
20081220	見えない	ある(凹)	夕方 5 時 5 枚 + 朝 4 時 5 枚	26000
20090105	見えない	ある(凹)	夜 9 時 5 枚 + 朝 6 時 5 枚	22000–25000
20090201	見えない	ある(凹)	夕方 5 時 5 枚 + 夜 2 時 5 枚	26000
20090302	見えない	ある(凹)	朝 5 時 10 枚	25500
20090401	見えない	ある(凹)	朝 6 時 6 枚	30000
20090501	見えない	ほとんど無い	夕方 5 時 6 枚	31000
20090511	見えない	ほとんど無い	朝 4 時 5 枚	23000–24500
20090601	見えない	ほとんど無い	朝 4 時 5 枚	23000–25000
20090603	見えない	ほとんど無い	夜 3 時 5 枚	24000–26000
20090606	見えない	ほとんど無い	朝 4 時 5 枚	26000
20090607	見えない	ほとんど無い	夜 3 時 5 枚	23000–25000
20090611	見えない	ほとんど無い	夕方 6 時 10 枚 + 朝 4 時 10 枚	25500–27500
20090812	少し弱いが見える	ほとんど無い	夕方 7 時 6 枚	31000
20090901	見える	弱い(凹)	夕方 7 時 5 枚 + 朝 5 時 5 枚	26000
20091004	見える	ある(凸)	夕方 6 時 3 枚 + 夜 2 時 10 枚	25000–26500
20091102	見える	隅で強い(凸)	夕方 6 時 5 枚 + 朝 5 時 5 枚	28000
20091202	少し弱いが見える	全体的に強い(凸)	夕方 5 時 5 枚 + 夜 3 時 10 枚	25000
20100103	少し弱いが見える	全体的に強い(凸)	夕方 5 時 5 枚 + 朝 5 時 5 枚	33000–34000
20100201	ほとんど見えない	全体的に強い(凸)	朝 6 時 5 枚	24000–26000
20100301	少し弱いが見える	全体的に強い(凸)	朝 6 時 5 枚	28000
20100402	少し弱いが見える	ある(凹)	朝 6 時 5 枚	30500
20100501	少し弱いが見える	ある(凹)	朝 5 時 5 枚	30000
20100602	(この画像を基準とする)		夕方 7 時 10 枚	28000