



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

Performance Evaluations of a New Astronomical Observation System at Tokyo Gakugei University : Broad-band Filters and Cooling CCD Camera

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鈴木, 海哉, 富田, 飛翔, 西浦, 慎悟, 土橋, 一仁 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/00174484

東京学芸大学新天体観測システムの性能評価

— 広帯域フィルターと冷却CCDカメラ —

鈴木 海哉*¹・富田 飛翔*²・西浦 慎悟*³・土橋 一仁*³

宇宙地球科学分野

(2022年6月27日受理)

SUZUKI, K., TOMITA, T., NISHIURA, S. and DOBASHI, K.: Performance Evaluations of a New Astronomical Observation System at Tokyo Gakugei University: Broad-band Filters and Cooling CCD Camera. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 74 : 67-75. (2022) ISSN 2434-9380

Abstract

We present results of performance evaluations of broad-band filters and a cooling CCD camera installed to an astronomical observation system renovated in March 2020 at the Tokyo Gakugei University. We obtained no serious differences between the transmittance curves of our new four filters and those of photometric standard filters. On the dark current of our cooling CCD camera, ML8300-GPS, we found that the mean values of the dark current image increase in shorter exposure time so that the CCD temperature was high. We also did that there were no significant changes of the values up to exposure time 60 seconds. Our new CCD camera have good response linearities the count ranges from a few 100 or a few 1,000 ADU to over 50,000 ADU.

Keywords: Tokyo Gakugei University 40 cm Telescope, Broad-band filter, Cooling CCD camera, Performance Evaluations

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要 旨

我々は、2020年3月に更新された東京学芸大学の天体観測システムについて、広帯域フィルターと冷却CCDカメラの主な性能評価を行った。4つの広帯域フィルターの透過率曲線は、標準測光フィルターの透過率曲線と大きな差異は見られなかった。冷却CCDカメラML8300-GPSの暗電流成分は、冷却温度が高い程、より早い露光時間でカウント値が上昇するが、露光時間60s程度まではその変化は小さいことが確認できた。また、応答線形性については、数100、数1,000ADUから50,000ADUを越える範囲まで、よい線形性を示すことが分かった。

キーワード：東京学芸大学40cm望遠鏡、広帯域フィルター、冷却CCDカメラ、性能評価

* 1 東京学芸大学 教育学部 学校教育系 中等教育教員養成課程 理科専攻

* 2 東京学芸大学大学院 教育学研究科

* 3 東京学芸大学 広域自然科学講座 宇宙地球科学分野 (184-8501 東京都小金井市貫井北町4-1-1)

1. はじめに

1970年代中頃、東京学芸大学に教育・研究を目的とした口径40cmのカセグレ式反射望遠鏡が設置された。当初、観測には写真乾板が使用されていたが、検出器の発達に併せて、光電子増倍管（石井ほか, 1997）、続いて冷却CCDカメラ（小熊・水野, 1999；高木・水野, 2002）が導入され、様々な教育・研究に用いられてきた。しかし、導入後半世紀という経年による老朽化に加えて、手動による子午環を用いた天体導入など、旧来の仕様では現代の観測天文学の諸要求に対応することが難しくなってきた。

このような状況を背景に、2020年はじめに、田中光化学工業株式会社の協力を得て、新天体観測システムを導入した。新天体観測システムは、鏡筒および主鏡がUK Orion社製のODK16（口径40cm, 焦点距離2720 mm, F6.8）、赤道儀はMathis Instruments社のMI-500、検出器とフィルター・ホイールはFinger Lakes Instrumentation（以下、FLI）社の冷却CCDカメラML8300-GPS（図1）、および、CFW1-5（図2）である。CFW1-5には、Astrodon社のJohnson-Cousinsシステム（例えば、Bessell, 1990）に準拠した広帯域フィル

ターを搭載した（川崎ほか, 2021；土橋ほか, 2021；富田ほか, 2021；土橋ほか, 2022；富田ほか, 2022）。

冷却CCDカメラML8300-GPSには、ON Semiconductor社のKAF-8300のCCDチップが採用されており、ピクセル・フォーマットは3,326×2,504（830万画素）で、光学系補正用のマイクロレンズとMAR glassが装着されている。FLI社のカタログから、表1にML8300-GPSの主な仕様を掲げた。また、表2および図3にON Semiconductor社のカタログ（<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/kaf-8300-d.pdf>, 2022年2月7日最終閲覧）から、KAF-8300の量子効率の波長依存性を示した。カタログ中の図からのデータの読み取りには、フリーソフトウェアSimpleDigitizer（<http://www.alrc.tottori-u.ac.jp/fujimaki/download/windows.html>）を用いた。なお、表2および図3の量子効率は、マイクロレンズとMAR glass装着の影響を含めたものである。ML8300-GPSをODK16に搭載することで、ピクセル分解能は0.409秒角/pix、視野は22.7分角×17.0分角となる（川崎ほか, 2021）。

我々はこれら4枚の広帯域フィルターに対して1) 透過率の波長依存性（透過率曲線）に基づく仕様の確認、冷却CCDカメラに対して、2) 露光時間に

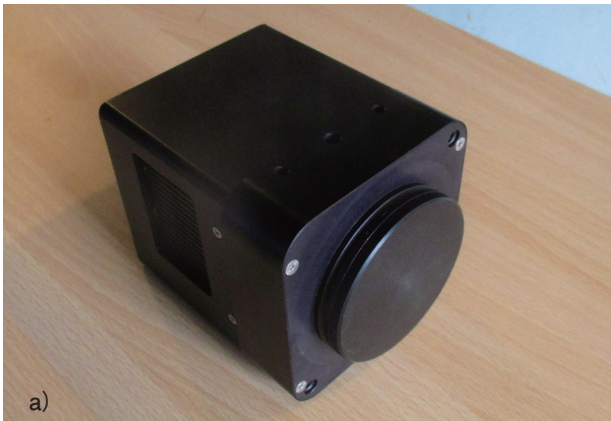


図1 冷却CCDカメラ ML8300-GPS の a) 前面と b) 背面



図2 フィルター・ホイール CFW1-5

表1 ML8300-GPSの主な仕様

サイズ	94mm×94mm×121.3mm
重量	1.3 kg
CCD	On Semiconductor KAF-8300
CCDタイプ	表面照射型
画素フォーマット	3,326 pix×2,504 pix (830万画素)
画素サイズ	5.4 μm/pix
冷却温度	外気温から-55°
強度分解能	16ビット
読み出しノイズ	11 e ⁻ -RMS@1.5MHz
メカニカルシャッター	φ45

表2 KAF-8300の量子効率 (QE)

λ (nm)	QE (%)	λ (nm)	QE (%)	λ (nm)	QE (%)	λ (nm)	QE (%)
350	19.72	550	56.87	750	34.93	950	7.179
360	25.01	560	55.94	760	33.21	960	6.087
370	30.70	570	55.22	770	33.35	970	5.263
380	36.26	580	53.29	780	32.55	980	4.499
390	37.84	590	53.19	790	30.17	990	3.811
400	37.97	600	51.38	800	28.85	1000	3.043
410	39.57	610	49.75	810	27.66	1010	2.537
420	39.05	620	51.17	820	25.86	1020	2.096
430	43.27	630	50.28	830	24.03	1030	1.588
440	44.86	640	48.38	840	22.50	1040	1.191
450	45.11	650	47.46	850	21.12	1050	0.9263
460	43.93	660	47.59	860	19.45	1060	0.5293
470	47.50	670	46.71	870	17.60	1070	0.5162
480	48.54	680	45.12	880	16.19	1080	0.3856
490	49.49	690	43.53	890	15.04	1090	0.2647
500	51.50	700	41.34	900	13.54	1100	0.2565
510	51.77	710	40.55	910	12.00		
520	54.15	720	38.31	920	10.72		
530	55.28	730	36.26	930	9.623		
540	56.80	740	35.93	940	8.504		

対する暗電流成分の安定性の調査, 3) 入力照度に対する応答信号の線形性の調査, を行った。本稿ではこれら性能評価の結果を報告する。

2. 広帯域フィルターの仕様

2. 1 フィルター・システム

天体の撮像観測では, 通常, 測光標準システムに準拠した広帯域フィルターを用いる。新天体観測システムに導入したAstrodon製の広帯域フィルターも, Johnson-Cousinsシステム (例えば, Bessell, 1990) に準拠しているとされるが, その透過率曲線が測光標準システムの透過率曲線と完全に一致するということはほぼ有り得ないのが普通である。フィルターの透過率曲線は, 測光精度に直接関係するため, これら広帯域フィルターの透過率曲線の性質を把握しておく必要がある。以降, 本稿では新天体観測システムにおけるフィルター群を, 便宜上, 学芸大フィルター・システムと呼び, 測光標準システムのBフィルターに準拠したものを B_{TG} フィルター, V , R_C , I_C フィルターに準拠したものを, それぞれ, V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} フィルターと呼称する。

2. 2 実験装置および実験

4つの広帯域, B_{TG} , V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} フィルターの透

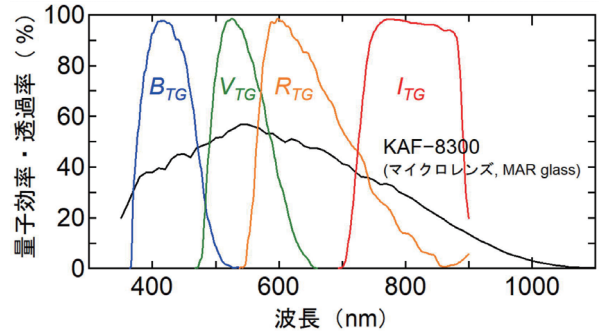


図3 KAF-8300の量子効率の波長依存性 (黒色実線) と学芸大フィルター・システムの B_{TG} (青色実線), V_{TG} (緑色実線), R_{TG} (橙色実線), I_{TG} (赤色実線) フィルターの透過率曲線。横軸は波長 (nm), 縦軸は量子効率 (%) または透過率 (%) を示す。なお, KAF-8300の量子効率については装着されたマイクロレンズとMAR glassを考慮している

過率曲線を測定するため, 東京学芸大学基礎自然科学講座分子化学分野の日本分光製の可視分光光度計V-650を用いた。実験は, 2022年5月23日に, D_2 ランプおよびヨウ素タングステン (WI) ランプを光源とし, 測定の間隔を1 nmとして行った。

2. 3 結果—透過率曲線

図3に, 実験から得られた B_{TG} , V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} フィルターの透過率曲線を, また, この透過率曲線をほぼ再現する透過率曲線の数値データを表3に示した。これら透過率曲線から, 各フィルターのピーク波長, 最大透過率, 帯域 (最大透過率に対する相対的な透過率が50%以上となる波長帯), 中心波長 (帯域に対して中心となる波長), バンド幅 (半値幅) を求め, 表4にまとめた。

2. 4 考察—透過率曲線

本研究で得られた学芸大フィルター・システム, B_{TG} , V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} の透過率曲線とBessell (1990) による標準測光システム, B , V , R_C , I_C の透過率曲線を, 図4に掲げた。

図4から, Bフィルターに対して, B_{TG} フィルターの透過率は全体的にやや短波長側にシフトしていることが分かる。また, Vフィルターに対して V_{TG} フィルターの透過率曲線は短波長側に伸びており, R_{TG} フィルターの透過率曲線は長波長側において, R_C フィルターよりもわずかに透過率の減衰が早くなっている。 I_{TG} フィルターの透過率曲線は, I_C フィルターの透過率曲線に対して, 透過率の高い波長帯で短波長側・長波長側の両方に広がっている。

表3 学芸大フィルター・システムの透過率曲線

B_{TG}		V_{TG}				R_{TG}				I_{TG}					
λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)	λ (nm)	T (%)		
364	0.0	470	50.9	467	0.0	600	35.1	537	0.0	650	82.6	693	0.0	860	94.0
366	0.9	480	32.8	470	0.3	610	26.6	545	0.6	660	76.7	695	0.1	870	94.1
368	14.8	485	22.8	478	4.8	620	16.2	550	8.7	670	70.4	700	0.5	875	93.4
370	29.6	490	17.9	480	9.6	630	9.5	560	29.6	680	66.3	705	3.1	880	91.5
373	41.9	500	8.7	482	18.4	640	5.4	570	65.0	700	54.6	710	10.8	885	81.5
376	50.4	510	3.2	484	27.7	650	1.8	575	80.9	710	50.6	720	33.9	890	55.8
380	60.0	520	1.3	490	48.9	660	0.1	580	87.7	730	44.0	730	60.5	895	31.5
385	72.3	530	0.2	500	76.2	662	0.0	585	95.1	750	29.4	740	83.3	900	19.5
390	79.2	539	0.0	510	91.8			590	97.2	760	26.5	750	93.1		
400	92.7			520	97.6			598	98.5	780	20.9	760	96.7		
410	97.3			527	98.5			600	98.2	800	13.9	770	98.2		
418	97.7			530	97.8			605	97.5	810	12.7	774	98.4		
420	97.5			540	96.0			610	96.1	830	6.3	780	98.2		
430	95.9			550	87.4			615	95.5	850	3.0	790	98.0		
440	90.4			560	80.0			620	92.7	860	0.7	800	97.6		
450	84.3			570	70.2			630	89.5	870	1.1	820	96.7		
460	69.1			580	58.5			640	85.2	890	3.3	840	96.1		
465	62.2			590	48.5			645	85.1	900	5.8	850	95.7		

表4 学芸大フィルター・システムの仕様

フィルター名	B_{TG}	V_{TG}	R_{TG}	I_{TG}
中心波長 ^{注1)} (nm)	423.3	539.7	639.1	808.4
ピーク波長 ^{注2)} (nm)	418	527	598	774
バンド幅 ^{注3)} (nm)	95.5	99.2	148.8	165.7
帯域 ^{注4)} (nm)	375.5 - 471.0	490.1 - 589.3	564.7 - 713.5	725.5 - 891.2
最大透過率 (%)	97.7	98.5	98.5	98.4

注1) 帯域の中心となる波長
 注2) 透過率が最大となる波長
 注3) 半値幅
 注4) 相対的な透過率が50%以上となる波長帯

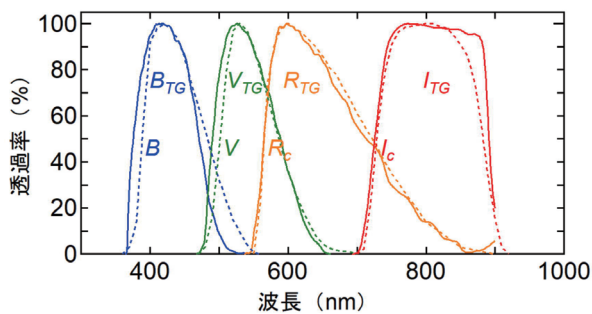


図4 学芸大フィルター・システム, B_{TG} (青色実線), V_{TG} (緑色実線), R_{TG} (橙色実線), I_{TG} (赤色実線) の透過率曲線と, Bessell (1990) による標準測光システム, B (青色点線), V (緑色点線), R_C (橙色点線), I_C (赤色点線) の透過率曲線。横軸は波長 (nm), 縦軸は最大透過率で規格化した透過率 (%) である

注意すべき点として, V_{TG} フィルターの透過率曲線では, 850nmあたりから長波長側で透過率の上昇が見られる。今回の研究では, 900nmより長波長における実測データは得られなかったが, KAF-8300の量子効

率 (図3) が長波長になるほど減衰していくことを考慮すれば, 大きな影響はないと考えてよい。

天体の測光では, 透過率曲線の違いは等級や色のずれとして現出することになるが, 4つのフィルターの透過率曲線は, いずれも測光標準フィルターと同一では無いものの, 極端に異なるものでも無く, そのため, 通常の色補正による補正が可能と予想される。

3. 暗電流成分の安定性

3. 1 暗電流成分

CCDカメラは, 半導体の光電効果によって生じた自由電子を電気信号として, 天体の電子的画像を記録する。しかし, この自由電子は, CCDカメラが置かれた環境に由来する熱エネルギーによっても生じ得る。この熱エネルギーによって生じた電気信号を, 暗電流 (ダーク) 成分と呼ぶ。ML8300-GPSでは, この暗電

流成分を抑えるためにベルチェ素子を用いて, CCDチップKAF-8300を外気温の -55° まで冷却できる。

しかし, 例えCCDカメラが冷却されていても, 暗電流成分は, 周辺の熱エネルギーによって必然的に発生し, 定性的には露光時間が長いほどより大きな暗電流成分が生じる。そのために, 露光時間に対して生じる暗電流成分の大きさを把握する必要がある。

3. 2 実験装置および実験

東京学芸大学中央1号館(旧・自然科学系研究棟1号館)屋上の望遠鏡ドーム内に設置された鏡筒ODK16に, フィルター・ホイールCFW1-5を介して冷却CCDカメラML8300-GPSを取り付けた。ML8300-GPSの制御は, MS-Windows 10上で動作するAstroart7(MSB Software社製)によって行った。

暗電流成分の大きさは, CCDチップの冷却温度に影響されるため, CCDチップの冷却温度を -10°C , -20°C , -30°C の3つの場合に分け, 2021年11月1日には冷却温度 -10°C , 同年11月6日に -20°C , そして, 同年11月8日に -30°C で暗電流成分が記録された画像(以下, 暗電流画像)を取得した。

実験は, まずML8300-GPSを起動し, 1時間の後, 暗電流画像の撮影を開始した。暗電流画像の露光時間は, それぞれの冷却温度に対して, 1, 15, 30, 45, 60, 120, 180, 300, 500, 800, 1,200, 1,800秒とし, 露光時間毎に5枚の画像を取得するという工程を2回繰り返し, 合計10枚ずつ取得した。表5に本実験の詳細を示した。

3. 3 画像解析および結果—暗電流成分

暗電流成分の画像解析には, アメリカ国立光学天文

台で開発され, 現在有志によって維持管理・無償頒布が行われているIRAF (= Image Reduction and Analysis Facility) を用いた。

CCDカメラによって得られた画像中には, 他よりも極端に感度の悪いバッド・ピクセルや宇宙線などの高エネルギー粒子の入射によって生じるホット・ピクセルなどが存在する。本学のML8300-GPSによって得られた画像では, 眼視による検査から, 画像の中央領域にはこのような画素が見られなかった。そこで, 各画像の典型的なカウント値として, 各画像の x 座標1,300 pix - 1,900 pix, y 座標1,000 pix - 1,400 pixの領域の平均のカウント値を, IRAF/imexamを用いて算出した。

表6と図5に, 冷却温度毎の露光時間に対する暗電流成分のカウント値を, そして, 表7に最小二乗法による露光時間に対する暗電流成分の直線近似の結果を示した。図5aからは, いずれの冷却温度においても, 露光時間1sから1,800sの間で, 暗電流成分のカウント値は非常によく直線的に増加していることが分かる。さらに, 図5bからは, 露光時間60sまでは, 冷却温度にかかわらず, 暗電流成分の大きさは数ADU程度で

表5 暗電流画像取得実験のログ

実験日	冷却温度	(露光時間) × 枚数
2021/11/01	-10°C	(1秒, 15秒, 30秒, 45秒, 60秒, 120秒, 180秒, 300秒, 500秒, 800秒, 1,200秒, 1,800秒) × 10枚
2021/11/06	-20°C	(1秒, 15秒, 30秒, 45秒, 60秒, 120秒, 180秒, 300秒, 500秒, 800秒, 1,200秒, 1,800秒) × 10枚
2021/11/08	-30°C	(1秒, 15秒, 30秒, 45秒, 60秒, 120秒, 180秒, 300秒, 500秒, 800秒, 1,200秒, 1,800秒) × 10枚

表6 露光時間に対する暗電流成分

冷却時間 -10°C		冷却時間 -20°C		冷却時間 -30°C	
露光時間 (秒)	カウント値 (ADU)	露光時間 (秒)	カウント値 (ADU)	露光時間 (秒)	カウント値 (ADU)
1	2136.0 ± 0.00	1	2140.6 ± 0.52	1	2147.6 ± 1.51
15	2137.7 ± 0.48	15	2141.1 ± 0.32	15	2148.0 ± 0.82
30	2137.7 ± 0.48	30	2141.3 ± 0.48	30	2147.2 ± 0.42
45	2137.9 ± 0.32	45	2141.4 ± 0.52	45	2147.0 ± 0.00
60	2138.5 ± 0.53	60	2141.4 ± 0.52	60	2147.2 ± 0.42
120	2140.5 ± 0.53	120	2142.6 ± 0.52	120	2147.6 ± 0.52
180	2142.7 ± 0.67	180	2143.8 ± 0.42	180	2148.5 ± 0.53
300	2147.2 ± 0.79	300	2146.0 ± 0.67	300	2150.0 ± 0.67
500	2154.5 ± 0.53	500	2149.8 ± 0.42	500	2152.3 ± 0.67
800	2165.0 ± 0.94	800	2155.3 ± 0.48	800	2155.3 ± 0.67
1200	2179.0 ± 1.05	1200	2162.3 ± 0.48	1200	2158.8 ± 0.63
1800	2199.2 ± 1.55	1800	2172.6 ± 0.52	1800	2164.8 ± 0.42

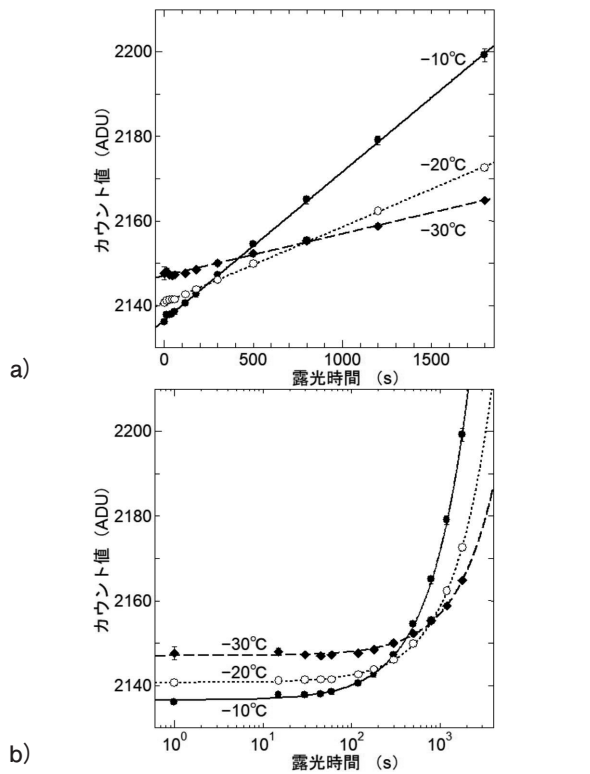


図5 a) 露光時間 (s) に対する暗電流画像の平均のカウント値 (ADU)。黒丸、白丸、黒菱形はそれぞれ冷却時間-10°C、-20°C、-30°C、実線、点線、破線は最小二乗法で得られた、それぞれの近似直線を示す。エラーバーは冷却時間毎露光時間毎の暗電流画像10枚の標準偏差である。b) 図5aの横軸を対数表示したもので、記号・線は図5aに同じ

表7 暗電流成分-露光時間の近似直線

冷却温度	傾き	切片	R ²	フィッティング範囲
-10°C	3.51×10^{-2}	2136.6	0.9996	1 s - 1,800 s
-20°C	1.79×10^{-2}	2140.6	0.9996	1 s - 1,800 s
-30°C	9.92×10^{-3}	2147.0	0.9940	1 s - 1,800 s

あるが、この後、冷却温度が高いほど急激に増加していることが観える。

3. 4 考察—暗電流成分

撮像観測で得られた天体画像のデータには、暗電流成分が含まれているため、これを取り除く必要がある。ML8300-GPSの暗電流成分は、冷却温度が-10°Cから-20°Cでは露光時間が60 sを越えるあたりから、冷却温度が-30°Cでは100 sを越えるあたりから、数ADU以上も増加し、天体の露光時間に合わせた暗電流画像を取得する必要がある。特に冷却温度が高いほど、その影響は大きい。反対に、露光時間が60 sよりも短い場合には、暗電流成分はほぼ一定と考えて良いだろう。

4. 応答信号の線形性

4. 1 CCDカメラの応答信号

一般的に、入射した光子に対する応答信号の線形性は、CCDチップによって異なる。精度の良い測光観測を行うためには、観測に用いるCCDカメラの応答線形性を把握しておかねばならない。本研究では、ドーム・フラット画像を用いて、ML8300-GPSの応答線形性を調査した。

4. 2 実験装置および実験

東京学芸大学中央1号館(旧・自然科学系研究棟1号館)屋上の望遠鏡ドーム内に、ドーム・フラット画像を取得するための白色スクリーンと光源(ランプ)を用意した。白色スクリーンは、図6aのように、望遠鏡ドームの回転ルーフの内側に取り付けた。ドーム・フラットの取得時には、この白色スクリーンがほぼ真南に来るように回転ルーフを調整する。また図6bのように、光源には40Wの白色LEDランプを使用し、これを望遠鏡ドーム内側の北東部と北西部の2箇所に設置した。さらに、その直前に金属製の遮光性フードを置くことで、間接照明によって白色スクリーンを照らすことが出来るようにした。これによって、白色スクリーンの輝度を一様に近付けるためである。

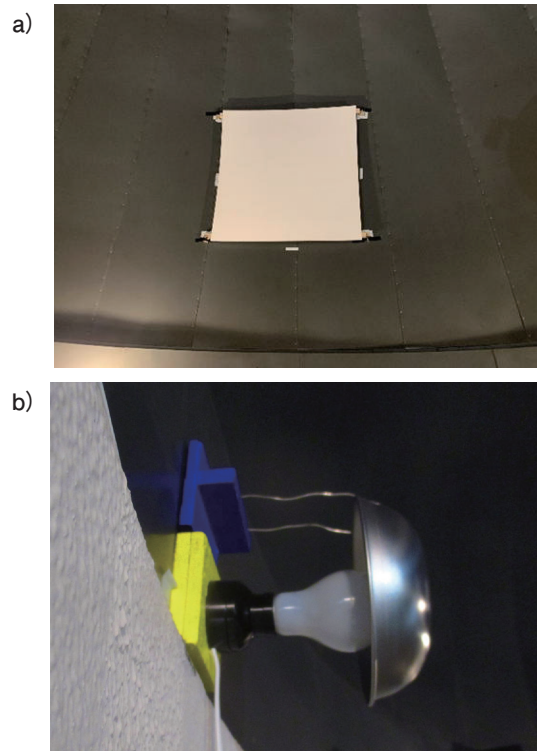


図6 望遠鏡ドーム内に設置した、a) ドーム・フラット用スクリーン、および、b) ドーム・フラット用ライト

望遠鏡と冷却CCDカメラの設定は3. 2と同様である。

実験は, 2021年11月9日, 11月10日, 11月18日, 12月23日, 2022年1月13日の5日間で, 冷却温度を -10°C , -20°C , -30°C とし, B_{TG} , V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} の各フィルターに対して, 様々な露光時間で10枚ずつドーム・フラット画像を取得した。また, 同じ露光時間で10枚

ずつ暗電流画像を取得した。本実験の詳細を表8に示した。

4. 3 画像解析

画像解析にはIRAFを用いた。同一実験日・同一露光時間の暗電流画像10枚を平均し, これを同じ露光時間のドーム・フラット画像から差し引いた。その後,

表8 応答線形性実験のログ

実験日	対象	バンド	冷却温度	(露光時間) × 枚数
2021/11/09	DF	B_{TG}	-30°C	(1s, 10s, 30s, 60s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s) × 10枚
	DF	V_{TG}	-30°C	(1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 30s, 40s, 50s, 55s) × 10枚
	DARK	-	-30°C	(1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 30s, 40s, 50s, 55s, 60s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s) × 10枚
2021/11/10	DF	I_{TG}	-30°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 25s, 28s, 30s) × 10枚
	DARK	-	-30°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 25s, 28s, 30s) × 10枚
2021/11/18	DF	R_{TG}	-30°C	(1s, 2s, 3s, 5s, 8s, 10s, 12s, 13s, 14s) × 10枚
	DARK	-	-30°C	(1s, 2s, 3s, 5s, 8s, 10s, 12s, 13s, 14s) × 10枚
2021/12/23	DF	B_{TG}	-20°C	(1s, 10s, 30s, 60s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s, 550s, 580s) × 10枚
	DF	V_{TG}	-20°C	(1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 30s, 40s, 50s, 55s, 60s, 70s) × 10枚
	DF	R_{TG}	-20°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 23s, 25s) × 10枚
	DF	I_{TG}	-20°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 25s, 28s, 30s, 33s) × 10枚
	DARK	-	-20°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 10s, 12s, 15s, 18s, 20s, 21s, 23s, 25s, 28s, 30s, 40s, 50s, 55s, 60s, 70s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s, 550s, 580s) × 10枚
2022/01/13	DF	B_{TG}	-10°C	(1s, 10s, 30s, 60s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s, 550s, 580s) × 10枚
	DF	V_{TG}	-10°C	(1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 30s, 40s, 50s, 55s, 60s) × 10枚
	DF	R_{TG}	-10°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 23s) × 10枚
	DF	I_{TG}	-10°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 12s, 15s, 18s, 21s, 25s, 28s) × 10枚
	DARK	-	-10°C	(1s, 3s, 5s, 8s, 10s, 12s, 15s, 18s, 20s, 21s, 23s, 25s, 28s, 30s, 40s, 50s, 55s, 60s, 120s, 180s, 300s, 450s, 500s, 550s, 580s) × 10枚

注) DF = ドーム・フラット, DARK = 暗電流画像 (ダーク画像)

表9 ML8300-GPSの応答線形性

B_{TG}						V_{TG}					
-10°C		-20°C		-30°C		-10°C		-20°C		-30°C	
1	132.8 ± 9.63	1	132.5 ± 1.82	1	146.2 ± 2.02	1	1237.2 ± 28.88	1	1113.2 ± 7.31	1	1258.2 ± 8.24
10	1285.8 ± 77.49	10	1315.5 ± 24.79	10	1428.9 ± 25.88	5	6090.2 ± 148.68	5	5437.2 ± 24.62	5	6137.4 ± 37.66
30	3831.4 ± 307.95	30	3978.2 ± 63.18	30	4226.0 ± 37.29	10	12060.4 ± 263.87	10	10852.6 ± 97.69	10	12286.2 ± 44.13
60	7600.1 ± 635.99	60	7991.8 ± 183.39	60	8492.0 ± 114.27	15	18152.5 ± 428.51	15	16195.8 ± 143.53	15	18440.5 ± 36.78
120	15244.7 ± 1191.18	120	16119.3 ± 106.40	120	17006.2 ± 198.40	20	24210.3 ± 641.75	20	21557.7 ± 120.86	20	24497.4 ± 75.18
180	22853.3 ± 1401.58	180	24294.1 ± 483.08	180	25335.3 ± 509.81	30	36031.4 ± 1050.15	30	32468.2 ± 256.47	30	36644.9 ± 215.67
300	38565.7 ± 2284.77	300	39695.6 ± 754.64	300	41785.1 ± 580.88	40	47448.3 ± 807.98	40	43014.1 ± 297.80	40	48736.4 ± 336.15
450	57803.4 ± 2936.32	450	58489.7 ± 1720.51	450	62179.4 ± 629.21	50	58637.6 ± 1748.00	50	53766.0 ± 277.16	50	60589.7 ± 245.46
500	62724.9 ± 688.50	500	61841.7 ± 1172.68	500	63382.2 ± 1.32	55	62937.6 ± 481.39	55	59257.6 ± 519.79	55	63385.5 ± 0.97
550	63382.2 ± 0.92	550	63381.7 ± 8.59			60	63398.1 ± 4.15	60	63012.6 ± 347.69		
580	63380.7 ± 0.67	580	63385.4 ± 3.13					70	63388.0 ± 2.40		
R_{TG}						I_{TG}					
-10°C		-20°C		-30°C		-10°C		-20°C		-30°C	
1	3280.0 ± 22.32	1	2998.9 ± 36.92	1	4944.7 ± 11.06	1	2464.5 ± 12.12	1	2227.0 ± 5.82	1	2374.3 ± 6.75
3	9691.1 ± 56.83	3	8892.5 ± 139.15	2	9737.2 ± 25.56	3	7314.0 ± 14.85	3	6614.7 ± 18.60	3	6976.6 ± 40.30
5	16034.5 ± 85.60	5	14759.1 ± 197.20	3	14538.6 ± 29.25	5	12123.6 ± 35.13	5	11011.1 ± 26.93	5	11609.3 ± 24.04
8	25437.6 ± 136.08	8	23717.1 ± 65.43	5	24187.0 ± 203.76	8	19377.4 ± 59.82	8	17580.6 ± 57.41	8	18511.9 ± 35.26
12	38088.7 ± 176.70	12	35510.6 ± 88.25	8	38585.5 ± 345.92	12	29014.3 ± 177.35	12	26361.8 ± 78.57	12	27760.7 ± 76.40
15	47893.8 ± 789.50	15	44002.3 ± 129.33	10	47954.4 ± 381.63	15	36144.3 ± 126.52	15	32890.8 ± 103.83	15	34401.8 ± 122.67
18	57365.4 ± 1112.33	18	52671.5 ± 178.24	12	57067.0 ± 472.27	18	43386.9 ± 143.35	18	39391.6 ± 134.43	21	48000.5 ± 109.94
21	63360.1 ± 44.60	21	61563.9 ± 318.84	13	62126.5 ± 165.68	21	50428.8 ± 154.20	21	45719.6 ± 130.74	25	56803.7 ± 233.28
23	63397.6 ± 3.44	23	63387.0 ± 2.59	14	63387.7 ± 1.16	25	59456.9 ± 129.54	25	54264.4 ± 142.79	28	63105.8 ± 120.05
		25	63389.7 ± 1.95			28	63322.5 ± 104.43	28	60733.1 ± 161.13	30	63383.5 ± 1.72
								30	63287.9 ± 22.39		
								33	63389.1 ± 2.69		

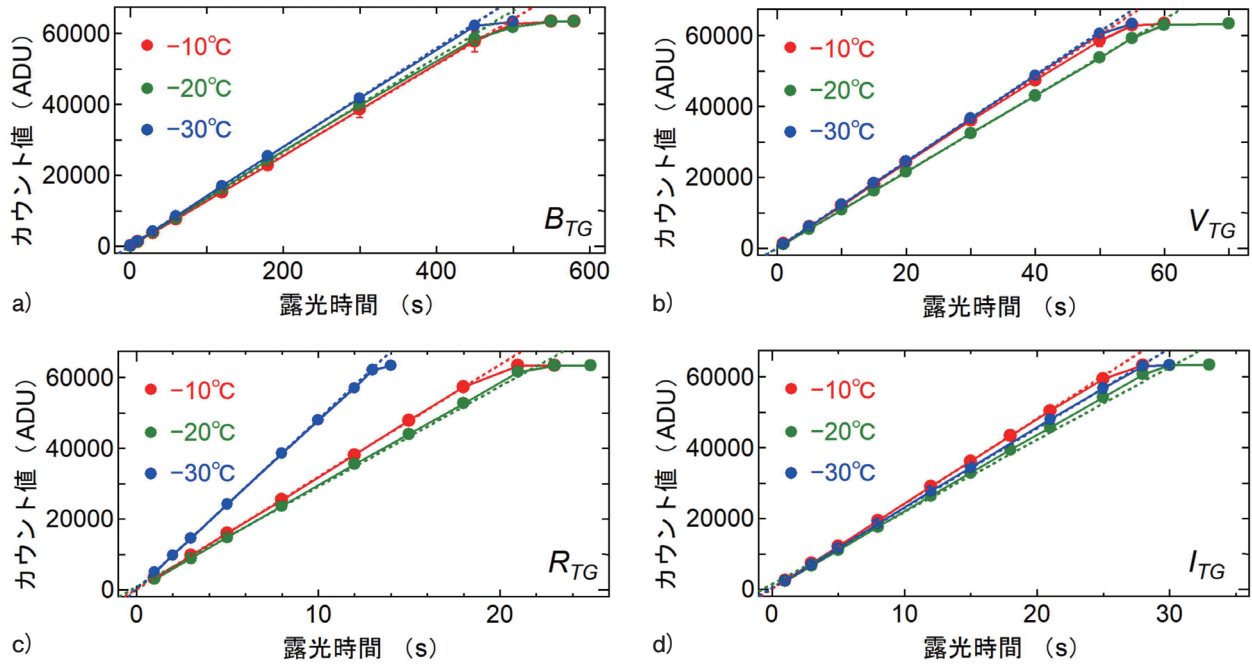


図7 冷却温度 -10°C (赤丸), -20°C (緑丸), -30°C (青丸) における, 露光時間に対するドーム・フラット画像のカウント値。横軸は露光時間 (s), 縦軸はカウント値 (ADU) であり, フィルターは, a) B_{TG} , b) V_{TG} , c) R_{TG} , d) I_{TG} , 3つの点直線は各冷却温度における近似直線である

暗電流画像を差し引いた同一冷却温度・同一露光時間のドーム・フラット画像10枚を平均した。

ドーム・フラット画像のカウント値は, 3. 3と同様に, 画像の中央領域の平均のカウント値をIRAF/imexamを用いて測定した。

4. 4 結果および考察—応答線形性

表9および図7に, フィルター毎冷却温度毎の露光時間に対するドーム・フラットのカウント値を掲げた。図7から, ML8300-GPSは冷却温度・観測波長帯に関わらず, カウント値が数100, 数1,000 ADUから50,000 ADUを越えても, よい応答線形性を示していることが覗える。そして, 60,000 ADUに近付いたあたりから, カウント値が飽和するまで傾きが小さくなっていく。なお, 図7の傾きの違いは, 観測日毎の光源の輝度の違いであり, 応答線形性の調査に対して大きな影響を与えるものではない。

表10に, 図7のそれぞれの応答線形性に対して, 最小二乗法を用いて得られた近似直線の傾き, 切片, 相関係数, フィッティング範囲のカウント値を示した。表10は, 数100, 数1,000 ADUから約40,000 ADUというカウント値の範囲において, ML8300-GPSが非常によい線形性を有することを示唆している。

実際の撮像観測では, 測光対象の天体のカウント値が, 応答線形性が保たれた範囲になるように露光時間を調整するが, 新天体観測システムにおいては,

表10 ML8300-GPSの応答線形性の近似直線

冷却温度	傾き	切片	R^2	フィッティング範囲
B_{TG} バンド				
-10°C	128.3	-56.94	0.9999	133 - 38566 ADU
-20°C	132.9	52.83	0.9999	133 - 39696 ADU
-30°C	139.5	91.70	0.9999	146 - 41785 ADU
V_{TG} バンド				
-10°C	1201.2	80.76	1.0000	1237 - 36031 ADU
-20°C	1075.8	66.30	1.0000	1113 - 43014 ADU
-30°C	1220.9	62.29	1.0000	1258 - 36645 ADU
R_{TG} バンド				
-10°C	3160.5	175.44	1.0000	3280 - 38089 ADU
-20°C	2937.5	105.25	0.9999	2999 - 44002 ADU
-30°C	4807.8	128.93	1.0000	4945 - 38586 ADU
I_{TG} バンド				
-10°C	2406.0	92.98	1.0000	2465 - 43387 ADU
-20°C	2187.6	64.11	1.0000	2227 - 39342 ADU
-30°C	2293.2	122.18	1.0000	2374 - 34402 ADU

50,000 ADU以下, もしくは, 安全性に考慮して40,000 ADU以下となるように露光時間を調整すれば良いだろう。

5. まとめ

2020年に本学に導入された, 新天体観測システムに対して, その4つの広帯域フィルターと冷却CCDカメラML8300-GPSの性能評価を行った。

Astrodon製の4つの広帯域フィルター B_{TG} , V_{TG} , R_{TG} , I_{TG} の透過率曲線は, 必ずしも測光標準フィルター B , V , R_c , I_c の透過率曲線と同一ではないが, その差異は小さく, 通常の色補正で補うことが可能と考えられる。

冷却CCDカメラML8300-GPSの暗電流成分は, 露光時間0 sから1,800 sの間でよい線形性を示している。より詳細には, 露光時間60 sまでは冷却温度を問わず, ほぼ一定と見なしてよい。しかし, 露光時間が60 sを越えると, 冷却温度が高いほど急激に暗電流成分が増加するため, 実際の撮像観測では, 天体観測時の露光時間に合わせた暗電流画像を取得する必要がある。

また, 同カメラでは, 冷却温度・波長帯を問わず, 数100, 数1,000 ADUから50,000 ADUを越えるカウント値まで, よい応答線形性を示している。天体観測時には, 少しの余裕を考慮して, 目標天体の輝度のピークが, 40,000 ADUを越えないように露光時間を設定するとよい。

謝辞

本研究を遂行するにあたって, 広帯域フィルターの透過率測定では, 東京学芸大学自然科学系基礎自然科学講座分子化学分野の生尾光准教授, 暗電流画像とドーム・フラット画像の取得では, 同大学教育学部の芹澤来渡氏, 荒川琉嘉氏, 松井ひなた氏, ドーム・フラット用スクリーンとライトの設置については田中光化学工業株式会社の田中一幸氏, 本学自然科学系基礎自然科学講座物理科学分野の荒川悦雄教授から多大な協力や助言を頂きました。深く感謝し, 心より御礼申し上げます。また, 本稿の執筆・出版に関して, 著者の一人である西浦は, 学術振興会による科学研究費補助金(20K03226, 代表者 伊藤信成; 22K18583, 代表

者 西浦慎悟)の支援を受けました。心から感謝致します。

参考文献

- Bessell, M. S. (1990), "UBVRI passbands", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **102**, pp.1181-1199.
- 土橋一仁・西浦慎悟・富田飛翔・鈴木海哉・芹沢来渡・松井ひなた・佐藤悠・饗場智ほか東京学芸大学天文学グループ (2021), "東京学芸大学の新しい40cm鏡と制御システムの開発2", *日本天文学会2021年秋季年会集録*, Y06a.
- 土橋一仁・西浦慎悟・川崎優太・富田飛翔 (2022), "東京学芸大学新40cm望遠鏡の特徴と基本性能", *東京学芸大学紀要自然科学系*, 第74集, pp.77-84.
- 石井秀樹・水野孝雄・古沢秀明・小島正順・根本岳志 (1997), "光子計数方式による2光路式光電測光システムの完成と性能評価", *東京学芸大学紀要*, 第4部門, 数学・自然科学, 第49集, pp.71-80.
- 川崎優太・土橋一仁・西浦慎悟・富田飛翔 (2021), "東京学芸大学の新しい40cm鏡と制御システムの開発1", *日本天文学会2021年春季年会集録*, Y10b.
- 小熊隆一・水野孝雄 (1999), "市販CCDカメラの試験的導入とその性能評価", *東京学芸大学紀要*, 第4部門, 数学・自然科学, 第51集, pp.57-65.
- 高木貴博・水野孝雄 (2002), "レプリカグレーティングを用いて標準星の観測により求めたCCDの感度特性", *東京学芸大学紀要*, 第4部門, 数学・自然科学, 第54集, pp.93-100.
- 富田飛翔・土橋一仁・西浦慎悟・鈴木海哉・芹沢来渡 (2021), "東京学芸大学の新しい40cm鏡と制御システムの開発3", *日本天文学会2021年秋季年会集録*, Y11c.
- 富田飛翔・土橋一仁・川崎優太・西浦慎悟 (2022), "東京学芸大学40cm望遠鏡の観測システムの開発", *東京学芸大学紀要自然科学系*, 第74集, pp.85-93.