HBS用CCDカメラ CRYOCAM-2の性能テスト(2)

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

博士課程後期1年
秋田谷 洋

博士課程前期1年
中山 覚

平成11年7月14日

1 はじめに

HBSでは受光用CCDカメラとして、TI社のCCDチップ、TC–215(ピクセルサイズ: 12μm四方、フォーマット:1024 × 1024 ピクセル) を搭載したMicro Luminetics社製CRYOCAMを使用してきた。この度、HBSの受光感度向上と観測波長域の拡大を目的として、SITe社CCDチップSI–502A(ピクセルサイズ:24μm四方、フォーマット:512×512 ピクセル) を使用したCCDカメラ、CRYOCAM–2を導入することとなった。

このカメラの導入により、4000–9000Å の波長域における量子効率が従来の20–60%に対して50–85%となり、受光感度が向上する。また、3600–4000Å の波長域の感度も向上するため(量子効率40–60%)、光学系の改修と併せて、HBSの観測可能波長域を短波長側で ∼ 3600Å まで拡張する。

CRYOCAM–2を観測で使用するためには、性能試験を行ないカメラの特性を十分知ることが重要である。1998年12月に、第1次試験を行なっており既に報告した。その結果を踏まえて、今回さらに詳細な試験を行ない、観測の際に必要となるカメラの主な特性を明らかにした。一時的な動作不良は見られたものの、それ以外の結果を総合すると、観測に供するにあたって満足できる結果が得られた。

2 実験の概要

CRYOCAM–2に関しては、1998年12月にシャッター開閉などの基本動作の確認、gain(ADU–electron数比)の測定、readout noise、熱雑音の測定などを行ない、既に報告した(『HBS用CCDカメラCRYOCAM–2の性能テスト(1)、1999.5.4、秋田谷)。付録Aに抜粋を掲載した。

今回、CRYOCAM–2が実際の観測に耐えうる仕様になっているかを確認し、観測データの定量評価の際に必要となるカメラの諸特性を明らかにするために、以下の項目について実験を行なった。

- linearityの測定と観測で使用するgain設定の決定(3.1節)
- dark画像の特性(3.2節)
- シャッター開閉速度(3.3節)
- readout noiseのADC速度依存性(3.4節)

- dark、bias の CCD 温度依存性 (3.5 節)
- dark、bias の TEC(Thermo-Electric-Cooler) 温度依存性 (3.6 節)
- 異なる gain 設定間のカウント比例性 (3.7 節)
- 残像現象 (3.8 節)

実験は、1999 年 6 月 4 日 (金) から 7 日 (月) にかけて、国立天文台堂平観測所の暗室、91cm 望遠鏡ドームにて、秋田谷、中山の 2 名が実施した。実験計画書を付録 B に掲載した。

3 節に各実験の概要と結果を示す。なお、3.1 節、3.2 節、3.3 節、3.7 節、3.8 節は秋田谷が、3.4 節、3.5 節、3.6 節は中山が担当した。

3 実験と結果

3.1 linearity の測定と観測で使用する gain 設定の決定

3.1.1 背景

理想的には、CCD チップの各ピクセルにおける ADU カウント値は入射光量に比例するべきだが、実際はそうなってはいない。特に、このような非線形の効果は、CCD に溜る電子数が多くなるほど大きくなると予想される。

この実験では、観測で使用する可能性のある各 gain 設定における、入射光量に対する ADU 値の線形性を調査する。これをもとに、非線形の効果が生む偏光度測定誤差を評価し、使用に適した gain 設定、および、その設定での使用可能な上限 ADU 値を決定する。

3.1.2 gain 設定の決定と実験

前もって、カメラのソフト上での gain 設定 $8\times4(g'=2.39[\mathrm{ADU}/e^-])$、$8\times2(g'=1.20[\mathrm{ADU}/e^-])$、$8\times1(g'=0.598[\mathrm{ADU}/e^-])$、$4\times1(g'=0.299[\mathrm{ADU}/e^-])$、$2\times1(g'=0.15[\mathrm{ADU}/e^-])$ において大雑把な積分時間きざみで線形性の調査を行なった。これにより、明天体用 (低 gain 設定) としては後述する $|\gamma-1|<1/200$ の条件を満たしそうなものとして、8×1、4×1 の 2 設定を選択し、詳細な時間きざみでの線形性調査を行なった。また、暗天体用 (高 gain 設定) としては、ソフトで設定しうる最大の gain 設定 $8\times8(g'=4.78[\mathrm{ADU}/e^-])$ を選択し、同様の詳細な線形性調査を行なった。

各 gain 設定において、安定かつチップ上で一様に近い光を、積分時間を変化させて照射した。光源としては、定電圧電源 (それぞれ a few volt で使用、安定性は 0.01V 以下) に接続したハロゲンランプ前にすりガラスを設置したものを使用した。完全な一様光は作れなかったが、チップ上の ADU カウント値最大の領域約 900 ピクセル程度で、ピクセル間の ADU 値の標準偏差が photon noise から予想される値の約 2 倍程度以下になるように設定できた。この領域で、カウントが 6000–9000ADU 程度ずつ増加するように積分時間を増加させ、60000ADU のカウントが得られる積分時間まで画像取得を行った。Bias、Dark 画像取得は適宜行った。

尚、gain $2\times1(g'=0.15[\mathrm{ADU}/e^-])$ での実験の際、約 36,000 ADU で blooming を生じた。このときの electron 数は、$36,000/g'=240,000e^-$ となり、これが full well となる。

3.1.3 各 gain 設定における線形性と偏光度測定誤差

$8 \times 8(g' = 4.78[\mathrm{ADU}/e^-])$、$8 \times 1(g' = 0.598[\mathrm{ADU}/e^-])$、$4 \times 1(g' = 0.299[\mathrm{ADU}/e^-])$ の 3 設定について詳細な線形性を調査した。基本処理として、各積分時間での光照射画像について、複数画像の平均化と前後の Dark 平均画像の差引きを行なった。

各積分時間における ADU カウントとして、画像内で ADU カウント値が最大となる領域 x:201–300、y:231–260 の 900 pixels における平均値を用いた。照射光は画像内では完全に一様ではなかったが、pixel 間の ADU カウント値の標準偏差は、photon noise から予想される標準偏差の約 2 倍以下におさまっていたので (表 1)、選択した領域内での照射のむらは無視できるとした。

但し、gain 8×8 においては、領域内での ADU カウント値のばらつきが、photon noise から予想される標準偏差よりも小さくなっている。これは、gain 8×8 の実験の直前に、gain の異常変化 (4.1 節参照) が発生し、そのまま実験を行なってしまった可能性がある。実測の ADU カウント値のばらつきから推量すると、実際の gain が倍程度になっていたかもしれない。但し、この場合は、ダイナミックレンジ最大の ADU 値 (~ 65,000 ADU) における electron 数は gain 8×8 の場合の倍程度になる。このときの linearity に問題がなければ、ダイナミックレンジ一杯における electron 数がさらに少なくなる、gain 8×8 の設定における linearity は問題がないと言えるだろう。

線形性を表す関数として、

$$N_{\mathrm{ADU}} = a \times t^{\gamma} \tag{1}$$

を仮定する。ここで、N_{ADU} [ADU] は ADU カウント値、t [sec] は積分時間、a [ADU/sec] は入射光の強度を表す比例定数、γ は線形性からのずれを表す指数で、線形性が完全なとき 1 である。

さて、CCD の線形性が式 (1) で表されるときに、常光強度が I_{o}、異常光強度が I_{e} の天体を観測する場合を考える。このとき、真の偏光度 P_{real} は、

$$P_{\mathrm{real}} = \frac{I_{\mathrm{o}} - I_{\mathrm{e}}}{I_{\mathrm{o}} + I_{\mathrm{e}}} \tag{2}$$

とかける。一方で、CCD の線形性の悪さにより、観測で得られる偏光度 P_{obs} は、

$$P_{\mathrm{obs}} = \frac{I_{\mathrm{o}}^{\gamma} - I_{\mathrm{e}}^{\gamma}}{I_{\mathrm{o}}^{\gamma} + I_{\mathrm{e}}^{\gamma}} \tag{3}$$

となる。式 (3) を $P_{\mathrm{real}} \ll 1$ の仮定を置き適当に近似を行ない変形すると、偏光度測定における誤差 $\Delta P = P_{\mathrm{obs}} - P_{\mathrm{real}}$ は、

$$\Delta P \sim (\gamma - 1) P_{\mathrm{real}} \tag{4}$$

gain 設定	積分時間 [sec]	平均カウント値 [ADU]	ピクセル間標準偏差 [ADU]	photon noise から予想される標準偏差 [ADU]
8×8 (?)	100	30067	245(!)	379
8×1	50	31557	197	138
4×1	80	33542	197	100

表 1: 各 gain 設定の適当な積分時間における、領域 x:201–300、y:231–260 の 900 pixels の平均 ADU 値、ピクセル間標準偏差、photon noise による標準偏差の理論値。gain 8×8 でピクセル間標準偏差が理論値より小さくなっているのは、gain の異常変化による可能性がある (本文参照)。

すなわち、

$$\frac{\Delta P}{P_{\rm real}} \sim \gamma - 1 \tag{5}$$

となる。

積分時間 t と ADU カウント値 $N_{\rm ADU}$ の測定値を、各 gain 設定ごとに図 1、2、3 に示した。併せて、十分線形性が良いと思われる $0 \leq N_{\rm ADU} \leq 10000$ での比例関数フィッティング (式 (1) で $\gamma = 1.0$ とした場合の関数) と、$0 \leq N_{\rm ADU} \leq 65000$ での式 (1) のフィッティングをそれぞれ破線、一点鎖線で示した (gain 8×8 では両者はほぼ一致)。これによると、高 gain 設定である gain 8×8 では、ダイナミックレンジ一杯で $\gamma = 1.0$ と良い線形性を示すのに対して、低 gain 設定である、gain 8×1、4×1 では、$\gamma > 1$ となる傾向があり、gain が低いとその傾向は強い。

図 4 には、それぞれの gain 設定について、式 (1) のフィッテイングで使用する $N_{\rm ADU}$ の範囲の上限 (下限は 0 ADU) を変えた時の、上限の ADU 値に対する $\gamma - 1$、および、偏光度測定誤差 $\Delta P/P$ を示した。フィッティングでは、まず $0 \leq N_{\rm ADU} \leq 10000$ の範囲で $\gamma = 1.0$ として式 (1) を適用して比例係数 a を決定し、以後は、a を固定して、積分範囲の上限 $N_{\rm max}$ を 5000 きざみで増やしながら、$0 \leq N_{\rm ADU} \leq N_{\rm max}$ の範囲で、式 (1) を適用し、それぞれの $N_{\rm max}$ における γ を決定した。

gain 8×8 では、$N_{\rm max}$ がダイナミックレンジ一杯の 65000 ADU になっても、$\gamma - 1 \sim 0$ であり、全ダイナミックレンジにおいて、偏光度測定誤差 $\Delta P/P$ は無視できる程度である。もし、先述したように、gain 8×8 の実験時に gain 設定が変化していたとしても、その時の gain は gain 8×8 の gain に比べて、低くなっていたと推定されるので、この実験で得た良い線形性が、よりダイナミックレンジあたりの電子数が少ない真の gain 8×8 設定時に極端に悪くなるとは考えにくい。以上より、高 gain 設定としては gain 8×8 を標準の gain 設定とする。

一方、低 gain 設定である gain 8×1、4×1 では、$N_{\rm max}$ が大きくなるにつれて線形性が悪くなり $\gamma - 1$、すなわち偏光度測定誤差 $\Delta P/P_{\rm real}$ が大きくなる。

HBS で生じる偏光度測定誤差は、天体の偏光度が大きい時はスペクトル間の cross talk により $\Delta P_{\rm crosstalk}/P \sim 1/50$ の程度である (Kawabata et al. 1999, PASP, 111, 898)。ここで、線形性の悪さが生む偏光度測定誤差の許容量を、$\Delta P_{\rm max}/P \sim (1/4) \cdot \Delta P_{\rm crosstalk}/P \sim 1/200$ と設定すると、ダイナミックレンジ一杯で $|\Delta P/P| = |\gamma - 1| < \Delta P_{\rm max}/P$ となるのは、ここで調査した低 gain 設定の中では、gain 8×1 のみとなる。よって、低 gain 設定としては、gain 8×1 を推奨設定と決定する。

なお、上記の偏光度測定誤差 $P/\Delta P$ の許容範囲の条件を緩める場合、もしくは、積分で使用する最大 ADU 値を要求する誤差に応じて抑える場合は、明天体用に gain 4×1 を使用することもできるだろう。しかし、gain 4×1 ではダイナミックレンジ一杯で full well の 90%に相当する電子が蓄積されることになるので、hot pixels における電子の飽和や hysteresis(残像) 現象などの発生に、より注意する必要がある。

3.1.4 まとめ

gain $8 \times 8 (g' = 4.78[{\rm ADU}/e^-])$、$8 \times 1 (g' = 0.598[{\rm ADU}/e^-])$、$4 \times 1 (g' = 0.299[{\rm ADU}/e^-])$ の 3 設定について、線形性の調査を行なった。gain が小さい gain 8×1、4×1 においては、最大カウント値があがるにつれて、線形性が悪くなることが明らかになった。線形性の悪さが及ぼす偏光度測定誤差が、ダイナミックレンジ一杯を使った観測において cross talk による測定誤差の 1/4 程度以下となる gain 設定として、低 gain 設定としては gain $8 \times 1 (g' = 0.598[{\rm ADU}/e^-])$、高 gain 設定としては gain $8 \times 8 (g' = 4.78[{\rm ADU}/e^-])$ をそれぞれ観測時の標準 gain 設定として選択した。

CCD の full well はおよそ 240,000 e^- であることが分かった。

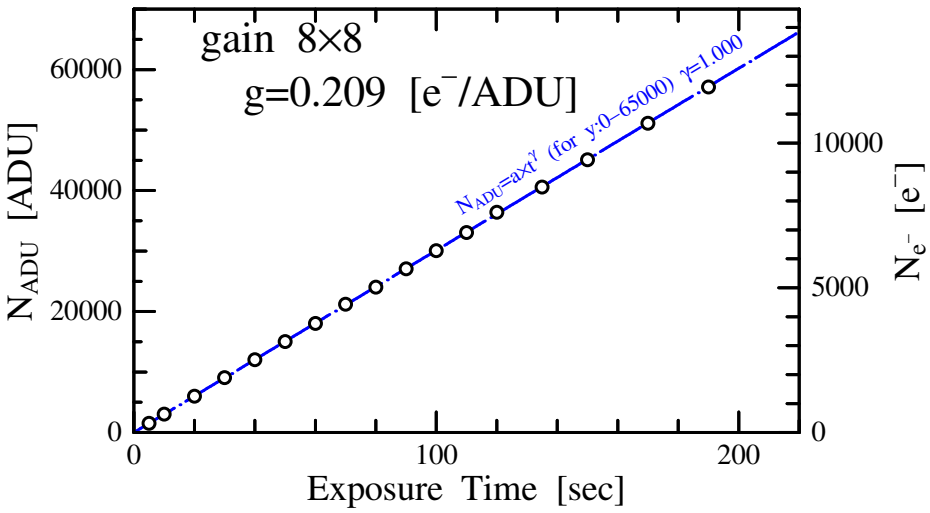


図 1: gain 8×8 における線形性。積分時間 t [sec] に対してカウント値 $N_{\mathrm{ADU}}[\mathrm{ADU}]$ をプロットした。鎖線は $0 \leq N_{\mathrm{ADU}} \leq 65000$ の範囲において式 (1) をフィッティングしたもの。

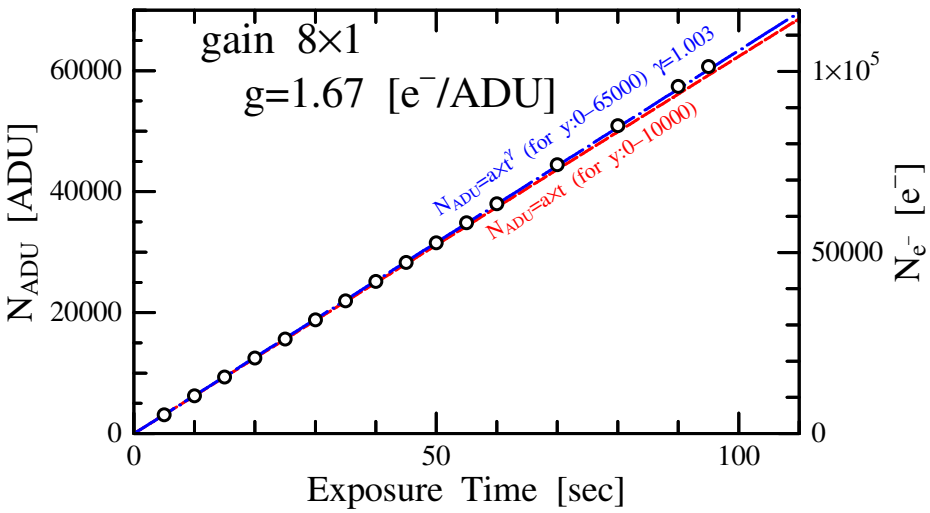


図 2: gain 8×1 における線形性。積分時間 t [sec] に対してカウント値 $N_{\mathrm{ADU}}[\mathrm{ADU}]$ をプロットした。破線は $0 \leq N_{\mathrm{ADU}} \leq 10000$ の範囲において式 (1) で $\gamma = 1.0$ としたときのフィッティング。鎖線は $0 \leq N_{\mathrm{ADU}} \leq 65000$ の範囲において式 (1) をフィッティングしたもの。

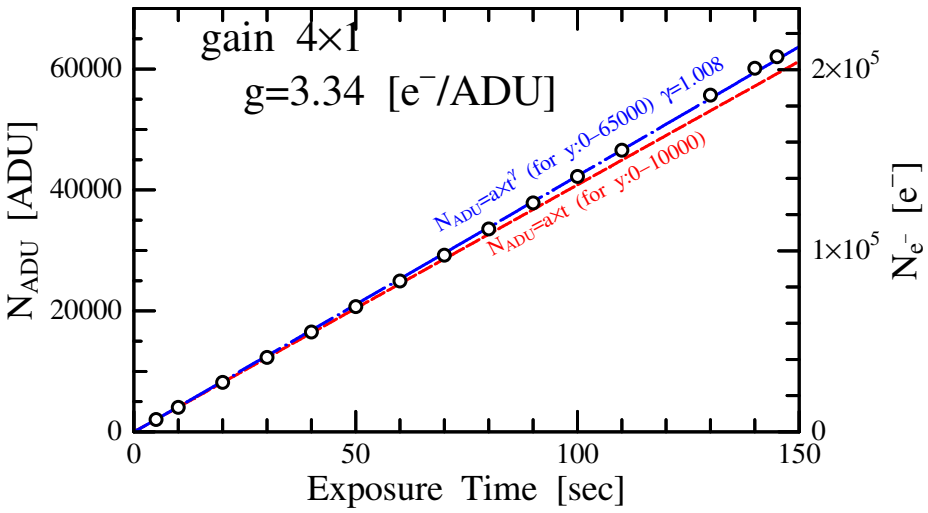


図 3: gain 4×1 における線形性。積分時間 t [sec] に対してカウント値 $N_{\rm ADU}$[ADU] をプロットした。破線は $0 \leq N_{\rm ADU} \leq 10000$ の範囲において式 (1) で $\gamma = 1.0$ としたときのフィッテイング。鎖線は $0 \leq N_{\rm ADU} \leq 65000$ の範囲において式 (1) をフィッティングしたもの。

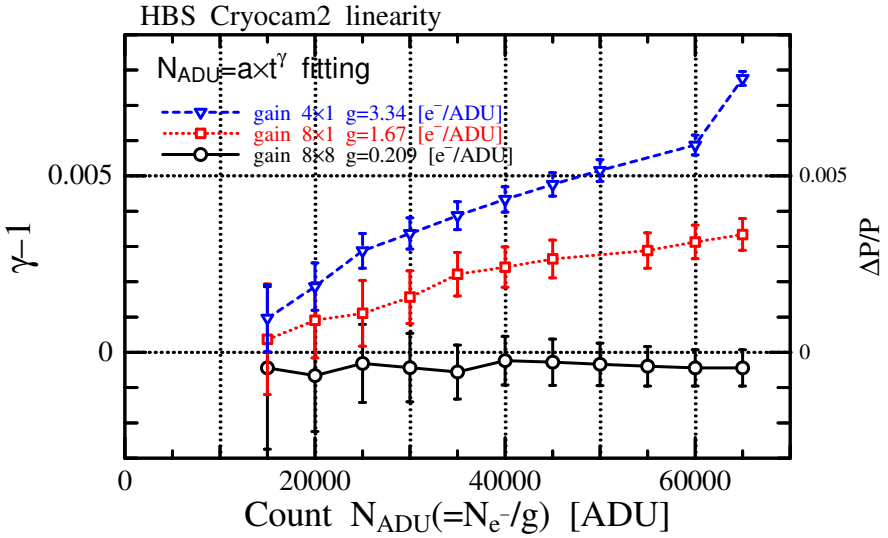


図 4: 各 gain 設定の実験結果に式 (1) をフィッティングする際、$N_{\rm ADU}$ の範囲を変化させたときの γ の変化。横軸にフィッティングで使用した $N_{\rm ADU}$ の範囲の上限 (下限は 0 ADU)、縦軸 (左) に $\gamma - 1$ を示した。縦軸 (右) は、線形性の悪さが与える偏光度測定誤差を天体の偏光度 P と誤差 ΔP の比、$\Delta P/P$ で示した。

3.2 dark 画像の特性

3.2.1 背景

CRYOCAM2 は、冬季には CCD 温度を $\sim -70°$C 以下に冷却して使用することになるが、この程度の冷却温度では長時間積分時の熱雑音が無視できない。ここでは、積分時間による熱雑音の増加を調査し、単位ピクセル、単位時間あたりの熱雑音量を求める。また、hot pixels の数を調査する。

3.2.2 実験

gain 8×1、ADC speed 50KHz(Low) で、CCD 温度を $-61°$C で一定にし、積分時間 10–2000 sec で dark 画像を取得した。dark 画像は各積分時間ごとに 2–3 枚づつ取得した。各 dark 画像の前後には bias 画像を取得し dark 画像から差し引いた。実験中、TEC 温度は $\sim 37°$C から $\sim 33°$C まで緩やかに変化したが、この間の bias の変動は $\sim$ 2ADU 程度と小さく、また、dark 画像取得ごとに bias 画像を取得し dark 画像から差し引いているので、TEC 温度の変動による bias 変動の影響は無視できる。

3.2.3 dark 画像の特徴

100 sec 積分の dark 画像の x 断面、y 断面を図 5(1)、(2) に示した。それぞれ、y 方向の全ピクセル、x 方向の全ピクセルで平均をとっている。

x 断面 (図 5(1)) をみると、x 方向の両端にくらべて中心付近で熱雑音が $\sim$ 2ADU($\sim 3e^-$) 程度小さくなっている。変化は滑らかである。

一方、y 断面 (図 5(2)) では、両端の約 30 pixels で極端に熱雑音が高くなっている。その他の領域では熱雑音は比較的一定で、ばらつきはせいぜい 1ADU($\sim 1.5e^-$) の程度である。y 方向の両端の約 30 pixels 幅の領域は観測時には使用するべきではない。

3.2.4 dark 画像の積分時間に対する線形性

dark 画像のカウント値について画像内中間値を求め、積分時間に対して示した (図 6)。熱雑音カウント値は、ほぼ積分時間に対して比例している。各点に対して、重み付けをせずに比例関数 $N_{\rm ADU} = a \times t$($N_{\rm ADU}$ [ADU/pixel]:熱雑音カウント値、a [ADU/sec/pixel] : 単位時間あたりの熱雑音カウント値、t [sec] : 積分時間) をフィッティングし、単位時間、ピクセルあたりの熱雑音として、$a = 0.20$[ADU/sec/pixel] を得た。gain 8×1 における変換係数 $g = 1.67[e^-/{\rm ADU}]$ を用いると、$0.33[e^-/{\rm sec/pixel}]$ となる。この値は、CCD 温度が $-70°$C の時に得た値、$0.064[e^-/{\rm sec/pixel}]$(性能テスト (1) 報告書参照) の約 5 倍の高い値になっている。これは、今回の設定温度が $-61°$C であり、前回の実験時よりも約 $10°$C 程度高いためである。

3.2.5 hot pixels の数

実際に使用するチップ中心付近での hot pixels の傾向をつかむため、以後は、周囲の 50pixels 幅の領域を除いた部分、すなわち、x:51–462、y:51–462 の $412 \times 412 = 169,744$ pixels の部分を選んで議論する。この領域で、各積分時間ごとにカウント値の中間値をとり、その値より 5 倍もしくは 10 倍以上大きいカウントをもつピクセルを hot pixels とみなし、その数を dark 画像の積分時間に対してプロットした (図 7)。右の縦軸には、これらのピクセルが全体に占める割合を併せて示した。図 7 によると、hot pixels のうち平均的な熱雑音より 5 倍以上のカウントをもつものでも、全体の a few $\times$ 0.01 percent (x:51–462、y:51–462 の領域で数十ピクセル) 程度である。この程度の数では、観測において hot pixels がもたらす誤差は、熱雑

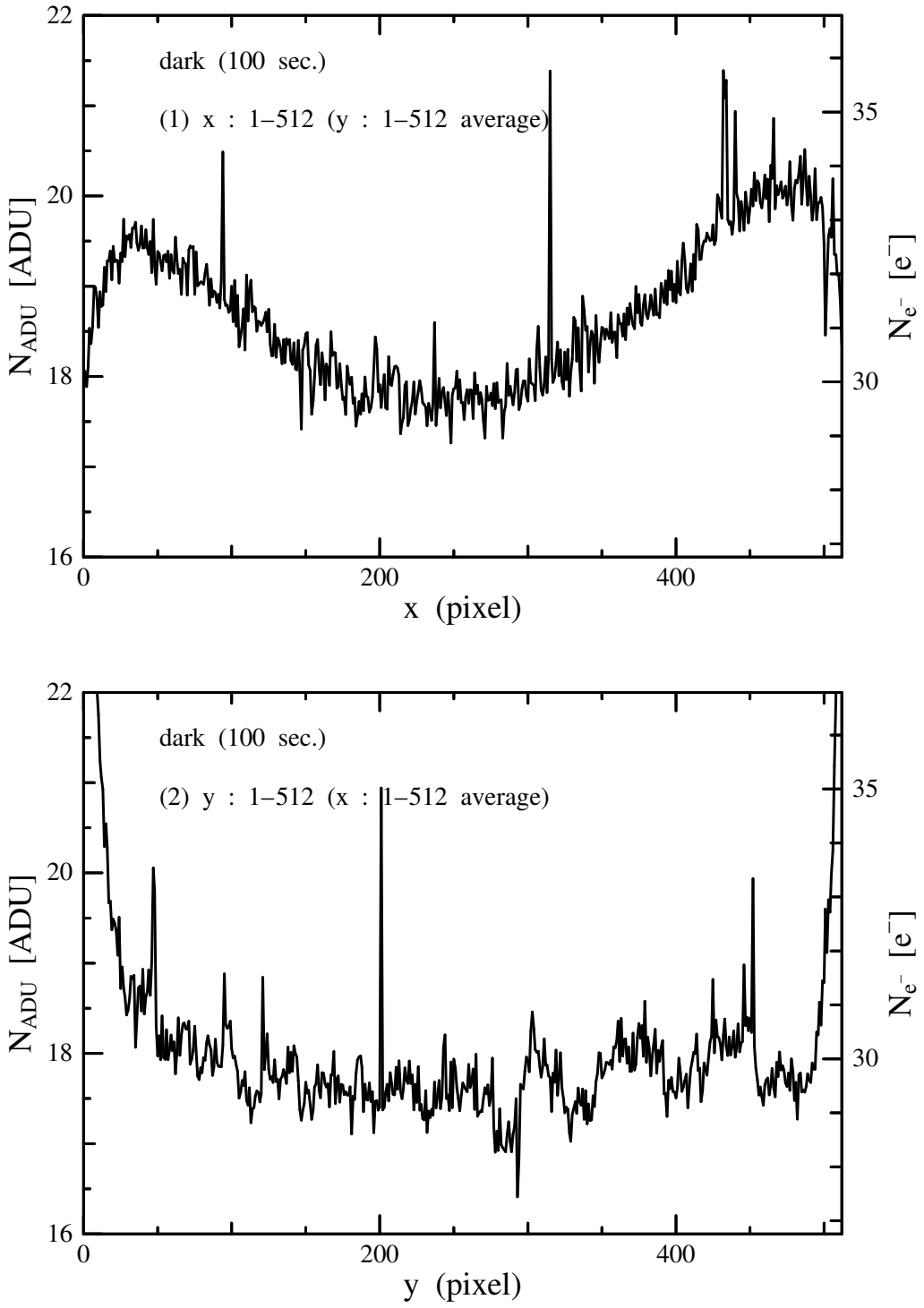


図 5: dark 画像のカウント分布。(1)x 断面。y 方向の全ピクセルで平均。(2)y 断面。x 方向の全ピクセルで平均。gain 8×1、ADC speed 50KHz、CCD 温度 $-61°C$ における 100 sec 積分 dark 画像

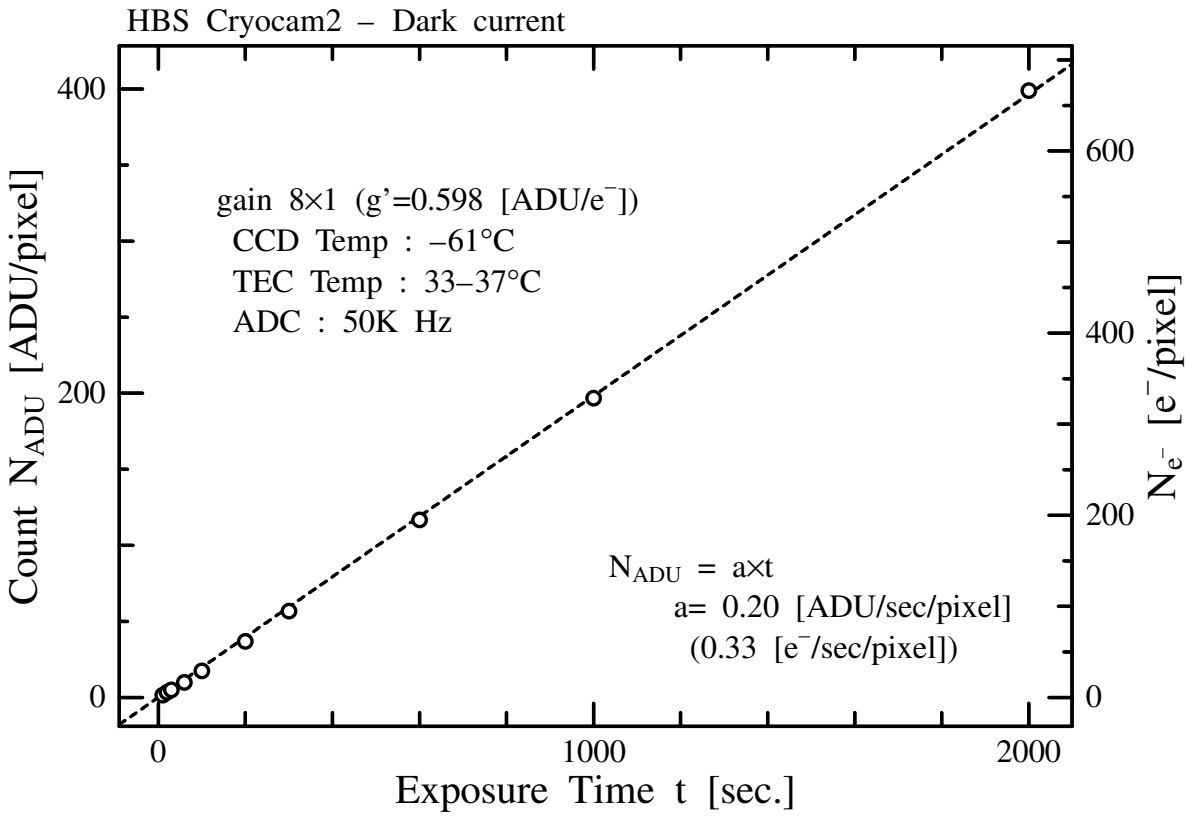


図 6: 積分時間に対する熱雑音の変化。熱雑音としては各積分時間ごとに画像内全ピクセルの中間値を採った。右の縦軸には、electron 数に変換した熱雑音を示した。比例関数 fitteing により、熱雑音量は $a = 0.20[\mathrm{ADU/sec/pixel}](0.33[e^-/\mathrm{sec/pixel}])$ となった。(CCD 温度 $-61°\mathrm{C}$。)

音そのものが生む誤差に比べると大きくはない。冬季の観測では今回の実験における設定温度 ($-61°$C) より低い CCD 温度で使用できるため、hot pixels の影響はより小さくなると考えられる。

3.2.6 まとめ

熱雑音は、CCD 温度 $-61°$C において、$0.33e^-$/sec/ADU であった。

熱雑音はチップ上の位置により若干変化するが、中心付近ではその変化は小さく、滑らかである。y 方向の両端 (約 30 pixels 程度) では中心付近に比べて極端に熱雑音が大きくなるので、この領域は観測に使用するべきではない。

平均の熱雑音の 5 倍以上のカウントを持つ hot pixels の数は、CCD 温度 $-61°$C において、画像全体の a few $\times$ 0.01 percent (数十 pixels) 程度と少なく、hot pixel の存在が直接観測に与える悪影響は大きくはないだろう。

3.3 シャッター開閉速度

3.3.1 背景

CRYOCAM2 では CCD チップの中心から両側に刃がスライドする形式のシャッターを使用している。シャッターは CCD チップ直前の収束光中に位置するため、シャッター開閉の際にチップ上の位置によって光線の照射時間に差が生じる。シャッターの刃は 4 本のスペクトル (天体、近傍空それぞれの常光・異常光線) の並び方向に移動するため、照射時間の差が偏光度測定に系統的な誤差を生むことになる。

この実験では、シャッターの刃の移動速度とシャッター開閉に要する時間を測定する。また、シャッターの開閉に伴う照射時間のむらが及ぼす偏光度測定誤差を、積分時間の関数として求め、観測における積分時間決定の際の資料を与える。

3.3.2 実験

定電圧電源に接続したハロゲンランプの前に拡散板を設置し、チップ全体に光が照射されるようにした (一様な照射ではない)。積分時間を 1 秒から 20 秒まで 1–2 秒きざみで変化させ、それぞれ適当枚数の画像を取得した。dark 画像は適宜取得し、光を照射した画像から差し引いた。カメラは通常の姿勢で設置した。実験中の気温は約 $26°$C であった。

3.3.3 シャッター開閉速度、開閉時間

シャッターの刃は CCD chip の y 方向に移動する。積分時間 t のとき、chip 中心のカウント値を $I_{\rm cent}(t)$、中心から Δy だけ離れた位置でのカウント値を $I_{\rm edge}(t)$ とし、その比を

$$r(t) = \frac{I_{\rm edge}(t)}{I_{\rm cent}(t)} \tag{6}$$

とする。さらに、

$$\Delta(t) = 1 - \frac{r(t)}{r(\infty)} \tag{7}$$

を定義する。$r(t)/r(\infty)$ は、シャッターの開閉時間に対して積分時間が十分長ければ 1 であるが、積分時間が短くなると、チップの中心に対してチップの端における照射時間の割合が減少するため、1 より小さくなる。よって、t$\rightarrow\infty$ で $\Delta(t)\rightarrow 0$、一方、t$\rightarrow 0$ で $\Delta(t) > 0$ である。

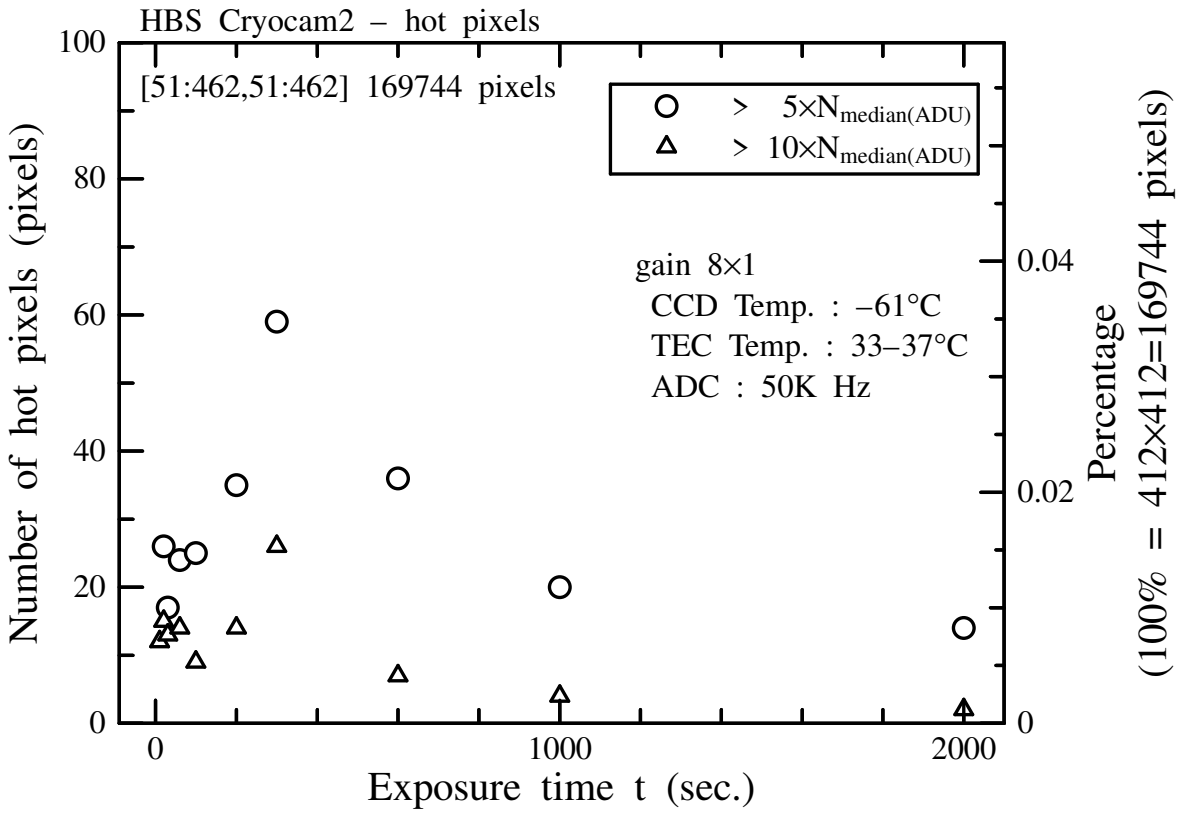


図 7: 積分時間ごとの hot pixels の数。○ : 画像内 x:51–462、y:51–462 の領域のカウント値の中間値より 5 倍以上大きいカウントをもつピクセル数。△ : 同領域のカウント値の中間値より 10 倍以上大きいカウントをもつピクセル数。

領域	v (pixels/sec)	v (m/s)	シャッター開閉速度 (sec)
領域 a	65000	1.6	0.008
領域 b	53000	1.3	0.010

表 2: シャッターの刃の移動速度、シャッター開閉時間。$\Delta y = 200$pixels、pixel size $= 24\mu m$ とした。

さて、シャッターの刃の移動速度を v、chip 中心、及び、中心から Δy だけ離れた位置における単位照射時間あたりのカウントを、それぞれ $\alpha_{\rm cent}$、$\alpha_{\rm edge}$ とすると、$r(t)$ は、

$$r(t) = \frac{\alpha_{\rm edge}(t - 2\Delta y/v)}{\alpha_{\rm cent} t} \tag{8}$$

となる。ここで、$\Delta y/v$ にかかる factor 2 は、シャッターの開、閉両方の動作を考慮したことによるものである。
これを、式 (7) に代入すると、

$$\Delta(t) = \frac{2\Delta y}{vt} \tag{9}$$

となる。

ここでは、実験で得た画像から $\Delta(t)$ を導出し、式 (9) との比較によりシャッターの開閉速度 v を求める。

チップ中心付近のカウント $I_{\rm cent}(t)$ して、ピクセル座標 x:101-300、y:232–281 の領域の 10,000 pixels の平均をとった。また、チップ端のカウント $I_{\rm edge}(t)$ としては、チップの両端にあたる、ピクセル座標 x:101-300、y:11–60 の領域 (領域 a) と x:101-300、y:451–500 の領域 (領域 b) の 2 領域を選び、それぞれについて領域内の 10,000 pixels の平均をとった。いずれの場合も $\Delta y \sim 200$ pixels とした。$I_{\rm cent}(\infty)$、$I_{\rm edge}(\infty)$ としては、近似的に、シャッター開閉時間に対して十分長いと考えられる 20 秒積分の画像のものを使用した。

$I_{\rm edge}(t)$ として領域 a、領域 b を使用した場合の $\Delta(t)$ の測定量を、図 8、9 に示した。

また、それぞれについて、式 (9) をフィッティングしたものを実線で示した。$\Delta(t)$ は上記のモデルでよく説明できる結果を示した。フィッティングにより求めた v、及びシャッター開閉時間 $(= 2 \times 256\text{pixels}/v)$ を表 2 に示す。

これらより、シャッターの刃の移動速度は少なくとも $\sim 50,000$ pixels/sec (~ 1.2 m/s)、開閉に要する時間は $\sim 1/100$ sec 以下であることが分かった。

但し、シャッター速度はカメラの姿勢や外気温、使用回数の増加などによって変化する可能性があるため、定期的に実験を行いシャッター速度を調査するのが望ましい。

3.3.4 偏光測定に及ぼす系統誤差

常光スペクトルがチップの中心に結像し、異常光スペクトルがチップ中心から y 方向に Δy だけはなれた位置に結像しているとする。このとき、積分時間 t、常光、異常光の単位時間あたりの強度をそれぞれ $\alpha_{\rm o}$、$\alpha_{\rm e}$ とすると、真の偏光度

$$P_{\rm real} = \frac{\alpha_{\rm o} t - \alpha_{\rm e} t}{\alpha_{\rm o} t + \alpha_{\rm e} t} = \frac{\alpha_{\rm o} - \alpha_{\rm e}}{\alpha_{\rm o} + \alpha_{\rm e}} \tag{10}$$

に対して、測定する偏光度は、$\Delta t = 2\Delta y/v (v$ はシャッターの速度) とすれば、

$$P_{\rm obs} = \frac{\alpha_{\rm o} t - \alpha_{\rm e}(t - \Delta t)}{\alpha_{\rm o} t + \alpha_{\rm e}(t - \Delta t)} \sim P_{\rm real} + \frac{\alpha_{\rm o}}{\alpha_{\rm e} + \alpha_{\rm e}} \frac{\Delta t}{t} \tag{11}$$

となる。結局、偏光度測定の系統誤差 $\Delta P = P_{\rm obs} - P_{\rm real}$ は、

$$\Delta P \sim \frac{\alpha_{\rm e}}{\alpha_{\rm o} + \alpha_{\rm e}} \frac{\Delta t}{t} \sim \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{t} \sim \frac{\Delta y}{vt} \tag{12}$$

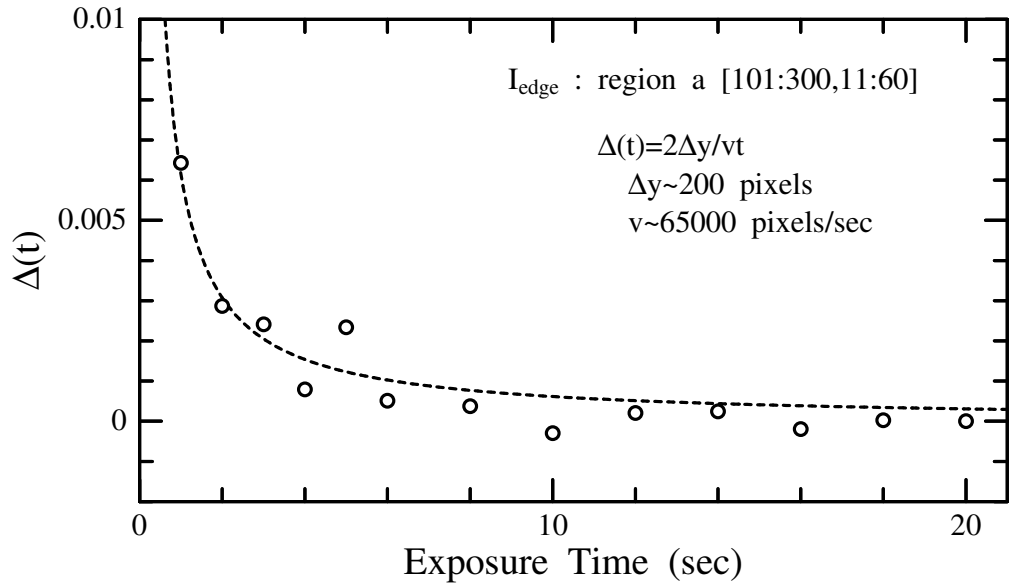


図 8: チップ端のカウントとして領域 a を用いた場合の $\Delta(t)$

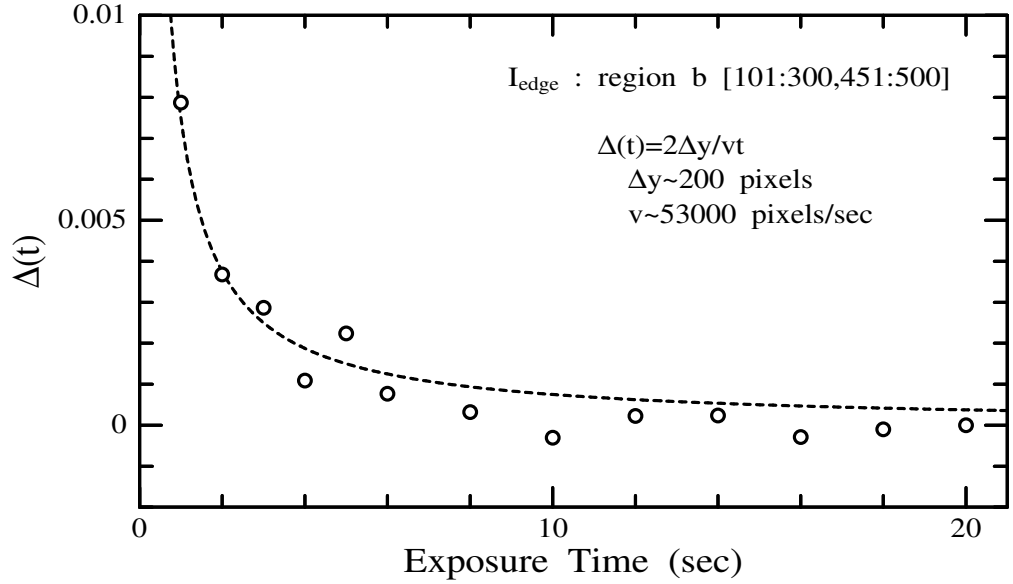


図 9: チップ端のカウントとして領域 b を用いた場合の $\Delta(t)$

となる。ここでは $\alpha_{\rm o} \sim \alpha_{\rm e}$ とした。

$\Delta y \sim 50$pixels、$v \sim 50000$pixels/sec とすると、積分時間 $t = 1$sec のとき、$\Delta P \sim 0.001(0.1\%)$ である。この系統誤差は、積分時間に反比例して減少する。

3.3.5 まとめ

通常のカメラ姿勢、気温 26°C において、シャッターの開閉に要する時間は $\sim 1/100$ sec 以下、刃の移動速度は ~ 50000 pixels/sec (~ 1.2 m/s) 以上であることが分かった。
偏光度測定に及ぼす系統誤差は、積分時間を 1 sec とした時に $\sim 0.1\%$ で、この誤差は積分時間に反比例して減少する。

カメラの姿勢や外気温、使用回数の増加によるシャッター速度の変化については未知である。定期的に実験を行い、調査するのが望ましい。

3.4 ADC 速度による readout noise の変化

3.4.1 目的

ADC 速度を Low(50kHz),Mid(100kHz),High(200kHz) と変化させた場合に readout noise が変化するかを調べる。高速の AD 変換の使用が可能であれば、観測効率のアップに繋がる。そこで Low ばかりではなく、Mid と High の観測での使用可能性を探るための資料を得る。

3.4.2 実験方法

Low(50kHz),Mid(100kHz),High(200kHz) のそれぞれにおいて 15 枚の bias 画像を取得し、カウントの画像間の標準偏差から readout noise を求める。標準 gain (8×1) を使用する。CCD 温度は -59°C、TEC 温度は約 41°C で安定させた。

3.4.3 実験結果

取得したそれぞれの 15 枚の画像間で各 pixel において 3σ rejection を行い、不必要な pixel を除去した。そうして解析した結果は下の表のようになった。なお、下の表に示されている A ~ D 領域はそれぞれ pixel 上の以下のような範囲を表すもので、数値はその領域内で平均化した readout noise である。

A 領域 x :51 ~ 150 y :51 ~ 150

B 領域 x :226 ~ 325 y :226 ~ 325

C 領域 x :351 ~ 450 y :351 ~ 450

D 領域 x :51 ~ 450 y :51 ~ 450

(単位は pixel)

ADU 単位

	A 領域	B 領域	C 領域	D 領域
Low	3.803189	3.815654	3.781205	3.823226
Mid	4.126563	4.120061	4.151499	4.140878
High	4.692483	4.681176	4.739298	4.718603

electron 単位

	A 領域	B 領域	C 領域	D 領域
Low	6.351325	6.372141	6.394526	6.384788
Mid	6.891359	6.929033	6.933004	6.915267
High	7.836446	7.888312	7.914628	7.880067

この結果を見るとLowでは前回のテストと同じ約$6.4e^-$程度の結果を得たが、Midに関してはほぼマニュアルの仕様と同じ$7e^-$程度、Highに至っては約$8e^-$になってしまった。また、領域による違いは$10^{-2}e^-$のオーダーであるのでこれは問題にはあまりならないと思われる。

＊新たに発見された問題点

ほぼ全てのbias image上に縞模様のnoiseが見られた。現れ方としてはカウントにして最高で1ADU程度、幅については20 ~ 50pixel程だった。ADC速度についての依存性についてはMidとLowはそれほどの違いはなかったが、Highだけは縞模様の幅が時折100pixelを超えることがあった。場所についてはその時々で異なる場所で見つかった。その縞模様の断面図を図10に載せておく。

3.4.4 まとめとこれからの方針

一番広い領域をカバーしているD領域においてreadout noiseはLow($6.4e^-$、3.8ADU)を基準にするとMidで8.3%、Highで23.4%上昇している。しかし、HighとMidも十分に使用できる範囲内にある。ただこれまでの性能評価の実験が全てLowに関して行われているのでlinearityその他に関する情報はHighとMidに関しては存在しないため、即使用可というわけにはいかない。

新たに発見された縞模様ノイズの原因を探る。

3.5 dark,biasのCCD温度依存性

3.5.1 目的

dark,biasがCCD温度によってどのように変化していくかを知る。

3.5.2 実験方法

標準gain設定で$-70°C$から$-10°C$まで$5°C$刻で変化させ、300sec darkを取得し、その前後でbiasを取得する。また、HOT pixelと考えられる各CCD温度でのカウントがそれぞれ40000,50000,60000ADU以上になっているpixel数を求める。(但し、使用する領域はx:51-450pixel,y:51-450pixelのみ)

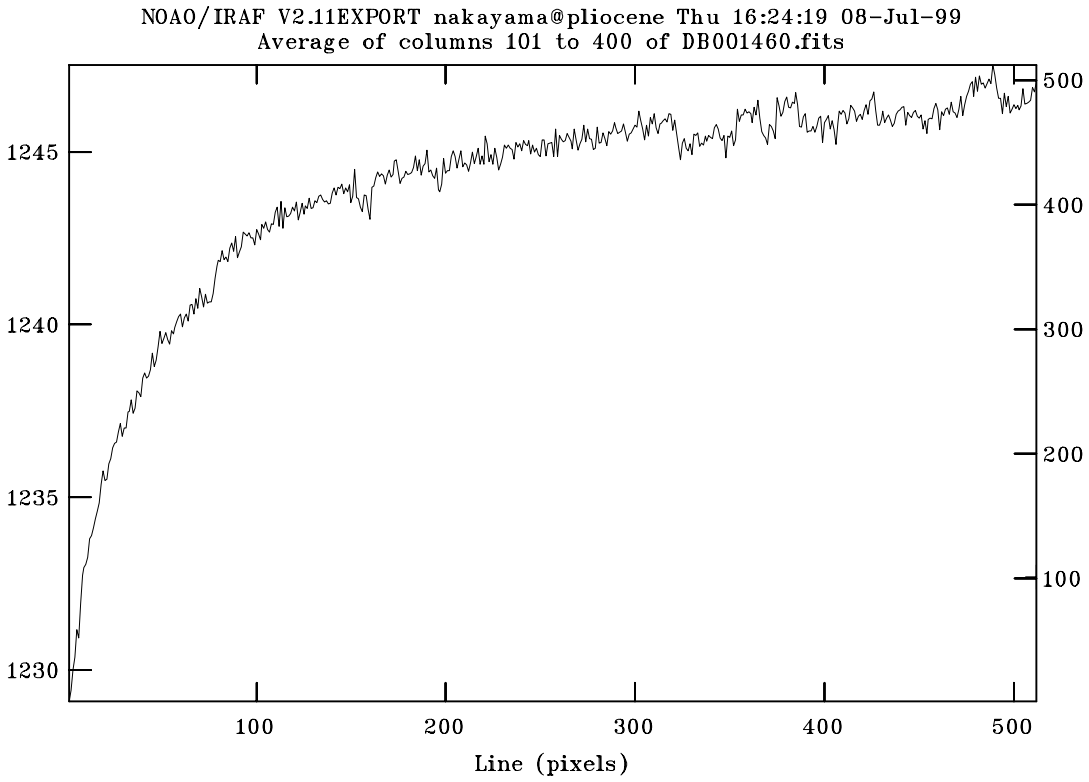


図 10: bias 縞模様の y 方向断面図 (x 方向は 101–400 で平均化)。gain8 × 1、ADC speed 50kHz (Low)。縞模様ノイズは y:320–350 の領域などに見られる。

3.5.3 実験結果

dark とその前後の bias の CCD 温度依存性は図 11 ~図 15 のようになった。dark については ADU 単位だけではなく、electron 単位の表示を行ない、さらに単位時間当たり単位 pixel 当たりの dark の生成率を表示した。なお、カウントは使用する領域 x:51-450pixel,y:51-450pixel の平均値を採ったものである。

各 CCD 温度での 40000,50000,60000ADU 以上の pixel 数

40000ADU 以上

vCCD 温度	-63	-55	-50	-45	-41	-36	-31	-26	-21	-17
pixel 数	0	0	0	0	0	1	1	1	4	81

50000ADU 以上

CCD 温度	-63	-55	-50	-45	-41	-36	-31	-26	-21	-17
pixel 数	0	0	0	0	0	0	1	1	2	12

60000ADU 以上

CCD 温度	-63	-55	-50	-45	-41	-36	-31	-26	-21	-17
pixel 数	0	0	0	0	0	0	1	1	1	6

3.5.4 まとめとこれからの方針

dark は CCD 温度が 17.3°C 上昇すると 10 倍になることが図 13 の fitting 関数 $2.83 \times 10^{(5+T/17.3)}$ によってわかった。また、各 CCD 温度での単位時間当たり単位 pixel 当たりの dark の生成率は下の表のようになる。

CCD 温度	-63	-55	-50	-45	-41	-36	-31	-26	-21	-17
e^-/sec/pixel	0.24	0.89	1.74	3.62	7.00	13.60	27.66	51.50	93.40	166.48

bias の変化は割と CCD 温度に対して緩やかに行なわれている。-50°C 以下ではほぼ線形といっていい。bias に関して dark の前後に取得したもののカウント値に対する差が目に見えて現れたのは -21°C 以上になってからである。前後の差の最大値は -17°C における約 204ADU であった。

HOT pixel については最大でも全 pixel の 0.05%程度であるのでこちらは問題にはならないだろう。それに我々が通常使用するような温度ではほとんど存在しない。

3.6 dark、bias の TEC 温度依存性

3.6.1 目的

CRYOCAM1 では、TEC 温度の変化に伴って bias が大きく変化するという結果が出た。CRYOCAM2 においてもこのような特徴が現れるかを調べ、観測中の指標になるような相関関係を求める。なお、dark についても bias と同じような TEC 温度依存性があるかを調べる。

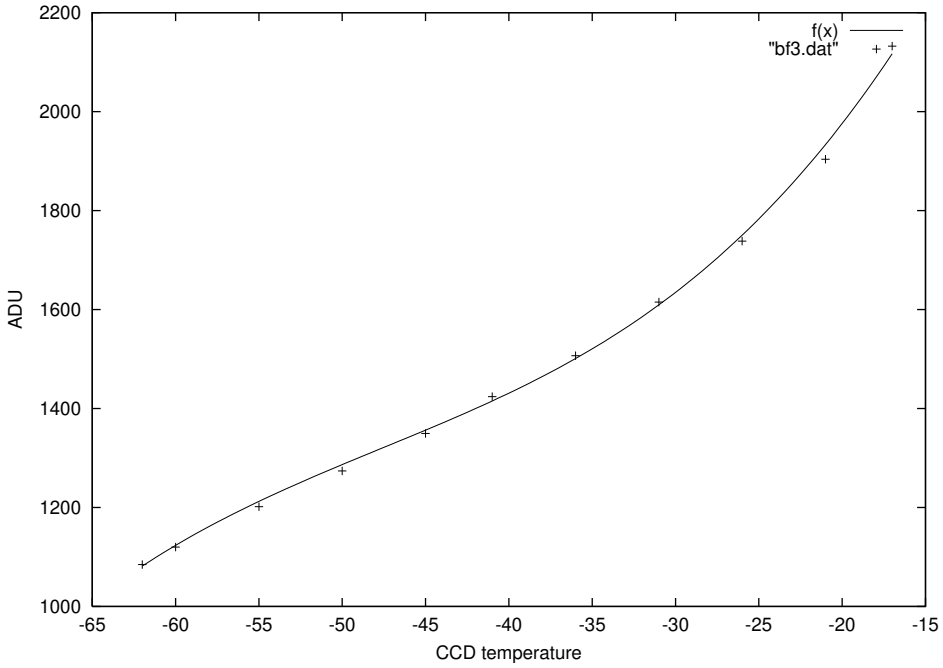


図 11: dark 取得前の bias

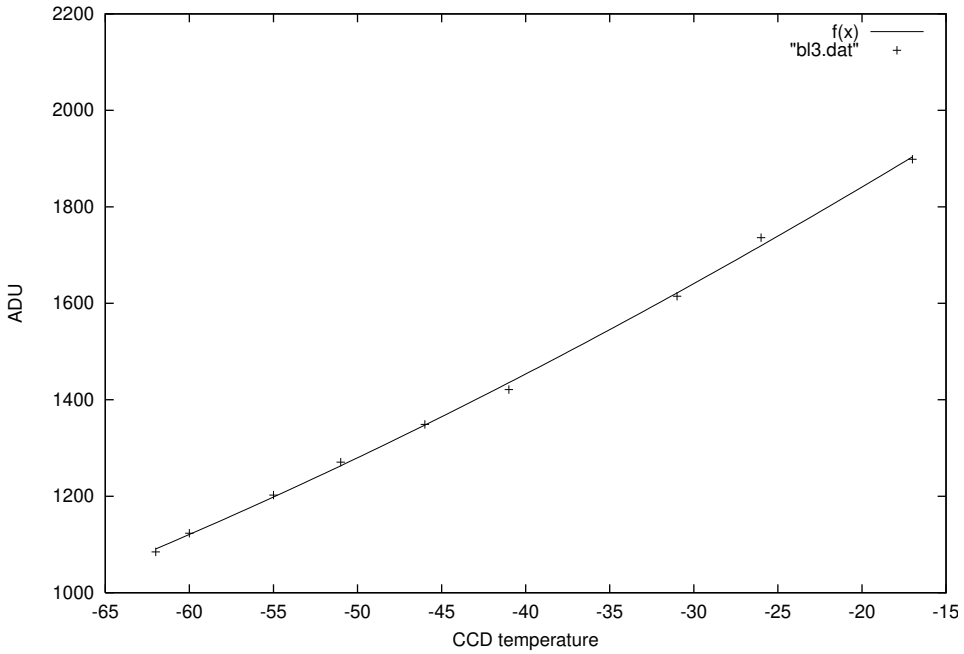


図 12: dark 取得後の bias

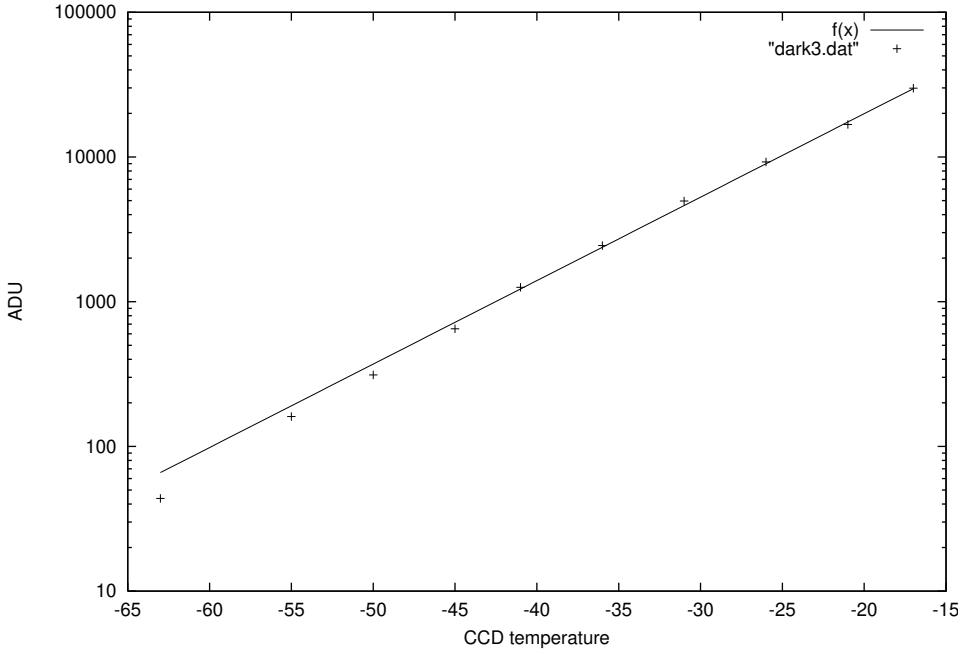


図 13: dark(露出時間 300sec)、関数 $2.83 \times 10^{(5+T/17.3)}$ で fitting

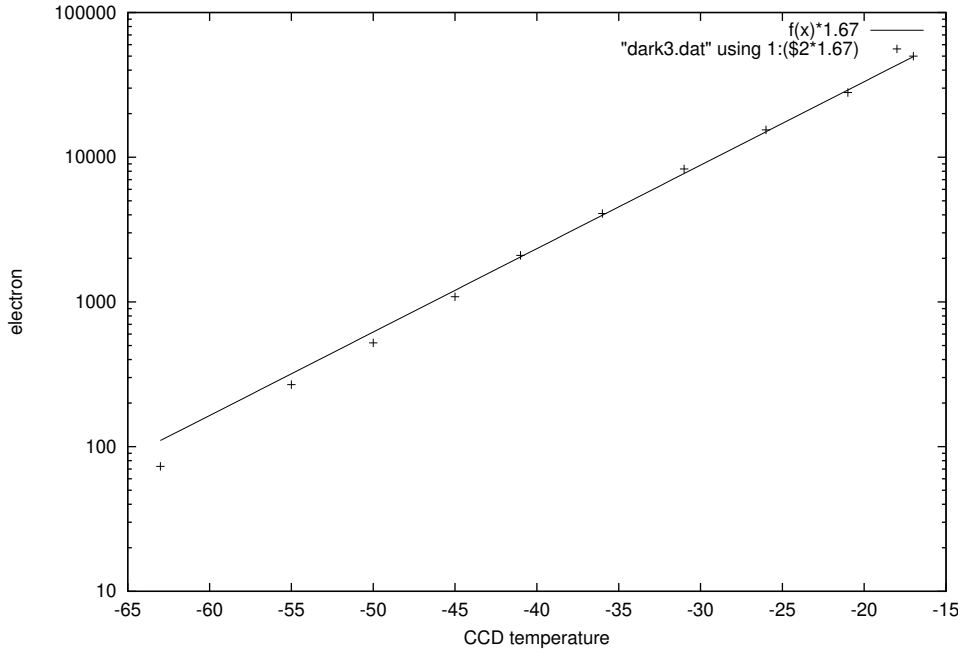


図 14: 図 13 の dark の electron 単位でのカウント

3.6.2 実験方法

CCD カメラのファンを塞ぐなどして TEC 温度を変化させる。そうしておいて gain8 × 8 においては bias のみを取得し、gain8 × 1 においては 100sec dark と bias を取得する。ADC 速度は Low を用いることとする。

3.6.3 実験結果

- gain8 × 8 の bias の TEC 温度依存性

bias の TEC 温度依存性を縦軸 ADU 、横軸 TEC 温度にとると図 16 のようになった。なお、fitting に用いている曲線は 5 次関数 $2.3 \times 10^{-3}x^5 - 4.7 \times 10^{-1}x^4 + 38.6x^3 - 1582x^2 + 32337x - 26724$ である。(最小二乗法による)

31°C ~ 35°C、35°C ~ 48°C,48°C ~ 51° のそれぞれにおいて TEC 温度に対するカウントの変化率がほぼ一定になっている。具体的な値を上げると 31°C ~ 35°C では 19.73ADU/°C,35°C ~ 48°C では 6.56ADU/°C,48°C ~ 51°C では 42.0ADU/°C ほどになった。しかし、どの温度に対しても各々一度しか測定は行なっていないのであくまでこの値は目安として受け止めてもらいたい。

- gain8 × 1 の bias,dark の TEC 温度依存性

bias,dark の TEC 温度依存性を縦軸 ADU 、横軸 TEC 温度にとると図 17 ~図 18 のようになった。なお、gain8 × 8 の場合と異なり、今回は fitting は行なっていない。無理に fitting をしてもあまり良い相関関数は得られないとおもったからである。

TEC 温度に対するカウントの変化率は bias に関しては 31°C ~ 35°C では 2ADU/°C,31°C ~ 35°C ではほぼ一定、49°C ~ 50°C では 25ADU/°C である。dark に関してはだいたい 34°C ~ 45°C くらいではカウントはほぼ一定、46°C ~ 50°C では 5ADU/°C ぐらいでである。(但し、これらは全て目検討である)

また、dark に関しては縦軸 electron 単位、単位時間当たり単位 pixel 当たりの dark 生成率 (electron/sec/pixel) の図も図 19 ~図 20 に載せておく。

3.6.4 まとめとこれからの方針

gain8 × 8 の bias については TEC 温度が $51°C$ で CCD 温度が −55°C になり 1°C ほどそれまでより上昇したが、あとは軒並安定していたので信頼性はまずまずだと思われる。

gain8 × 1 の bias,dark についてはやはり 100sec の時間で TEC 温度を安定させることは困難であった。双方とも 42°C ~ 46°C 付近でカウントが乱れているが、ちょうどこの範囲では TEC 温度の安定性が悪かったことが影響しているのだろう。また 49°C からカウントが著しく上昇しているのは CCD 温度がここから上昇し始めたことに起因しているにちがいない。 (−56°C から −54°C まで上昇した)

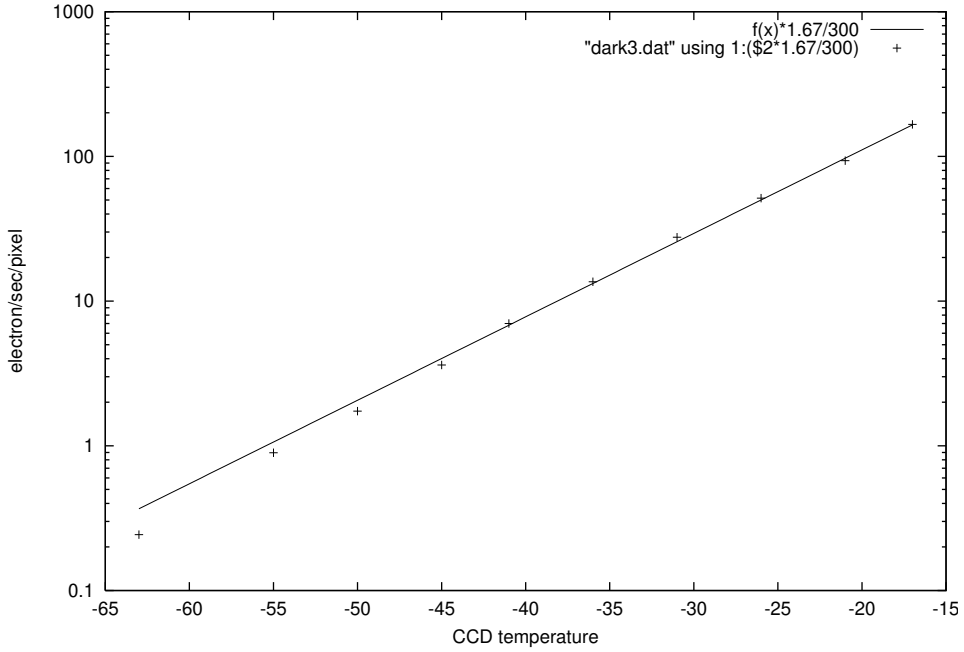


図 15: 単位時間当たり単位 pixel 当たりの dark 生成率 (electron/sec/pixel)

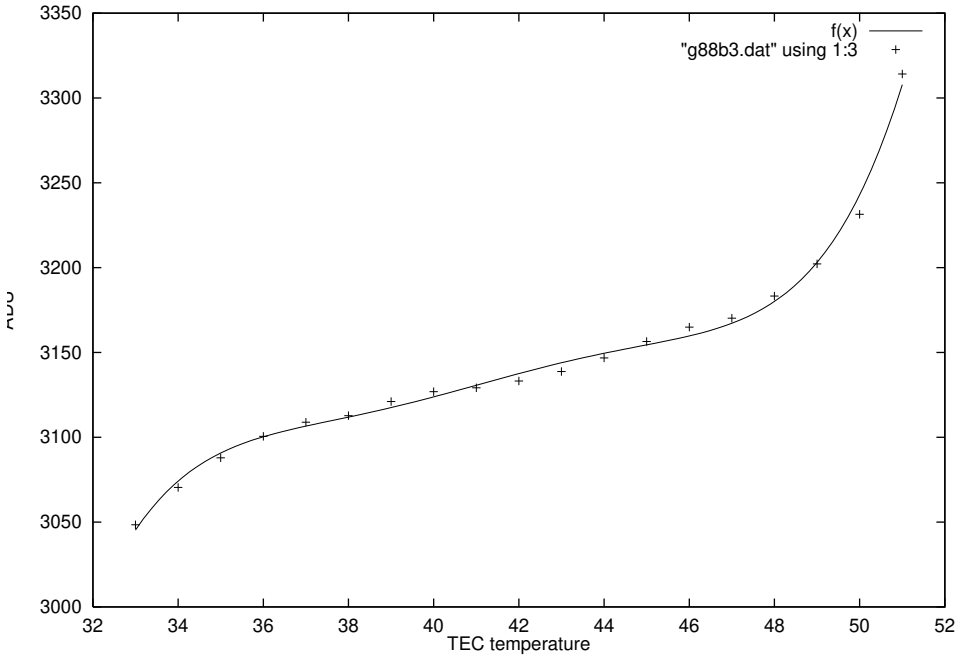


図 16: gain8 × 8 の bias

}

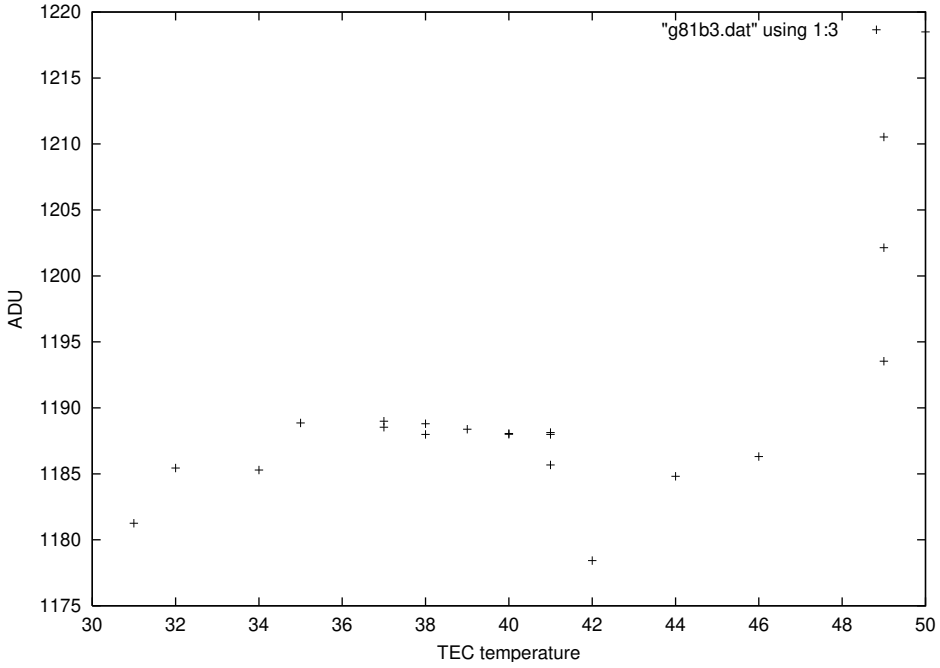


図 17: gain8 × 1 の bias

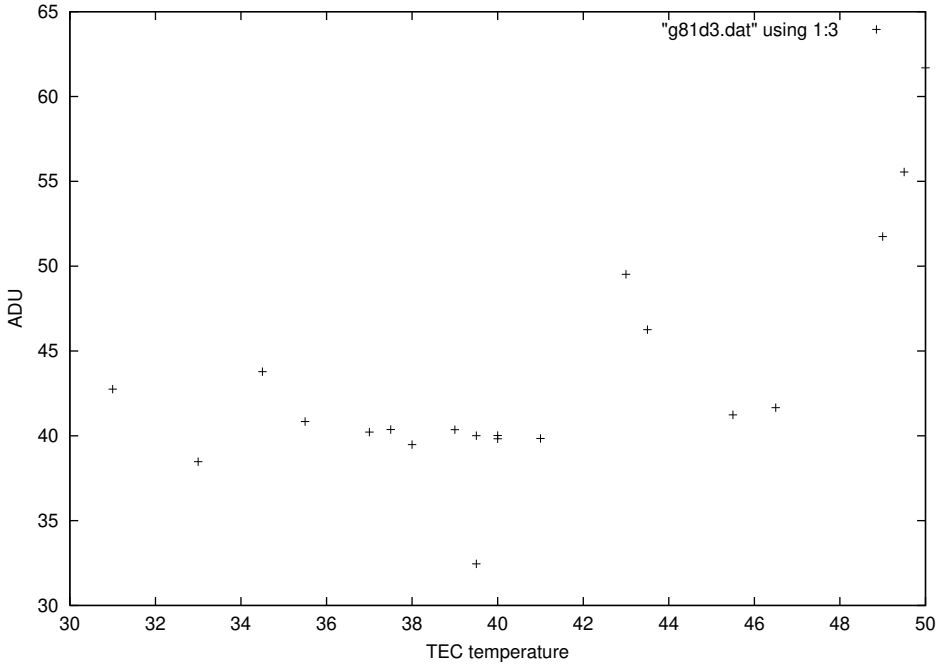


図 18: gain8 × 1 の dark(露出時間 300sec)

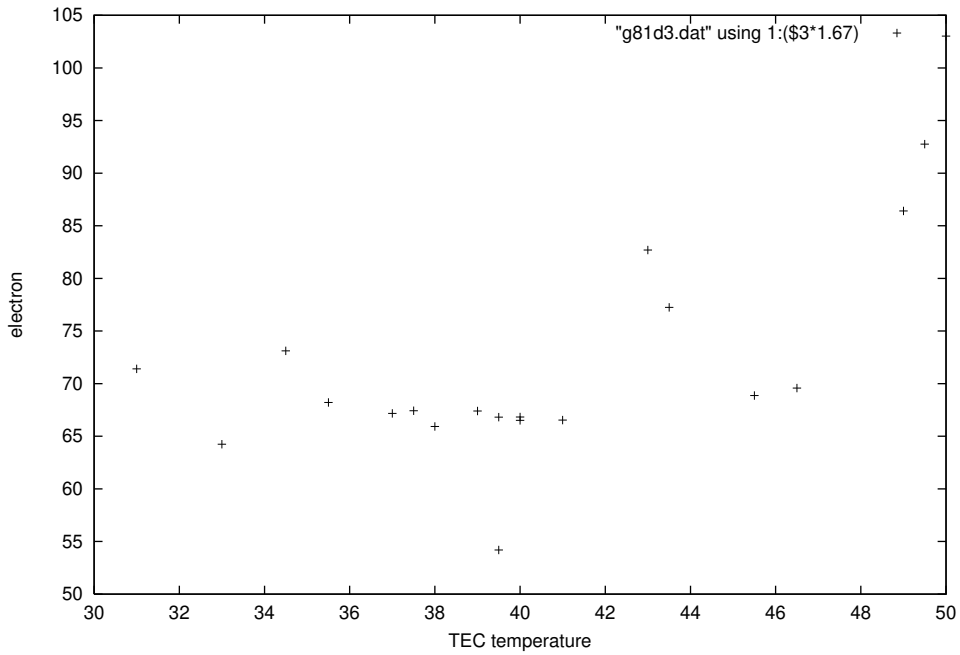


図 19: 図 18 の dark の electron 単位でのカウント

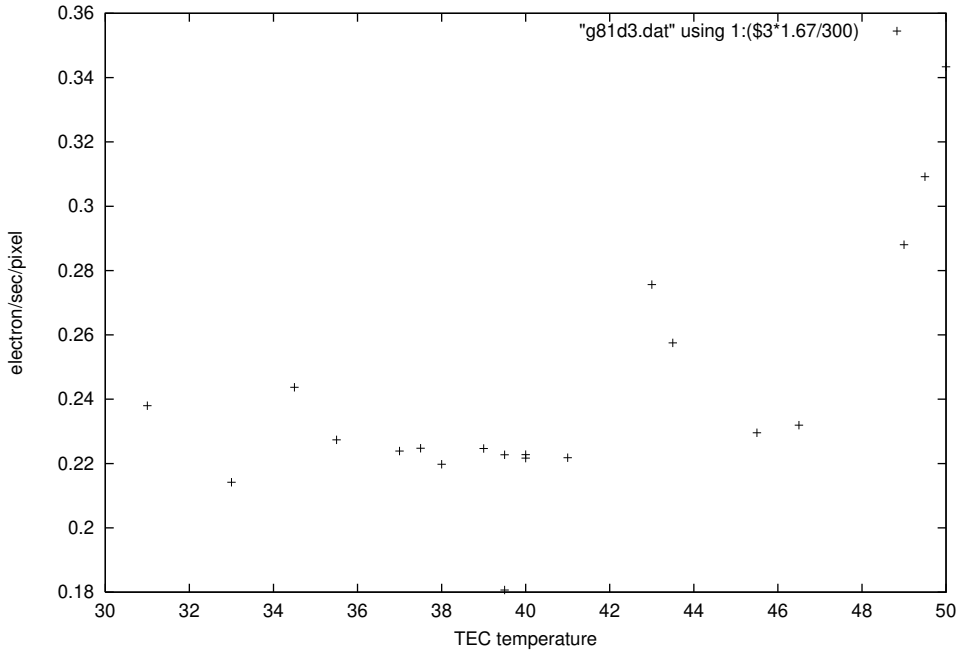


図 20: 単位時間当たり単位 pixel 当たりの dark 生成率 (electron/sec/pixel)

gain8 × 1 と gain8 × 8 の bias の TEC 温度による変化率を比較したところ (35°C ~ 45°C の範囲) だいたい gain8 × 8 は gain8 × 1 の 10 倍程度になる。この結果から考えるに gain を変えても TEC 温度に対する変化率は conversion factor 程度でこれならば暗天体用に gain8 × 8 を使用する必要性はあまり感じられない。

これからの方針としては今回行なっていない 31°C 以下の温度に対する測定を行なうのはもちろんだが、今回行なった範囲についても比較のために測定を行なっていく。(気温が下がるのを待たねばならないので 8 月以降になる見通し)

3.7 異なる gain 設定間のカウント比例性

3.7.1 背景

フラット画像などの較正画像は、各ピクセルにおける絶対カウント値ではなく、画像内でのカウント値の分布が重要である。

gain 設定を変えて全く同じ光量を照射した場合、異なる gain 設定での画像間で、カウント値の比が照射光量やチップ上の位置によらず一定であれば、 フラット画像のような較正画像はこれらの gain 設定間で共有できるとして良い。

ここでは、gain8 × 1 と gain8 × 8 の 2 設定間で、同じ光量の光を照射し、それぞれの設定での画像間の比例性を確かめ、両設定間の較正画像の共有の可能性を探る。

3.7.2 実験

gain8 × 8 において画像内に 5000–35000 ADU 程度のカウントがまんべんなく示されるような時間的に安定したハロゲンランプ光を照射し、20 枚の画像を取得した。これらの画像から適当に得た dark 画像を差し引いて平均化した (図 21)。さらに、光源を全く変化させずに gain 設定を 8 × 1 に変更し、同様に画像を取得し、dark 差し引き、平均化を行なった。

3.7.3 結果

gain8 × 1、gain8 × 8 それぞれの設定で、全く同じ光を照射したときの pixel 座標 (x,y) におけるカウント値を、それぞれ $I_{81}(x,y)$、$I_{88}(x,y)$ とする。また、これらの比、

$$r(x,y) = \frac{I_{81}(x,y)}{I_{88}(x,y)} \tag{13}$$

を定義する。このとき、全 pixel において、

$$r(x,y) = \text{const.} = g'_{81}/g'_{88} \tag{14}$$

(g'_{81}、g'_{88} はそれぞれ gain 8 × 1、gain 8 × 8 での gain [ADU/e^-]) ならば、異なる gain 設定の画像は単にお互い定数倍された画像であるので、フラット画像等の較正画像に互換性があるとして良い。

x:11–500、y:51-450 の領域の 196,000 pixels について、$r(x,y)$ を g'_{81}/g'_{88} で割り規格化した。これを $r_{\rm n}(x,y)$ とする。ここで、g'_{81}/g'_{88} としては、上記領域における $r(x,y)$ のピクセル間中間値 $r_{\rm ave} \sim 7.980$ を用いた。この値は、性能テスト (1) で導出した g'_{81} =0.598、$g'_{88} = 4.78$ から求まる値、$4.78/0.598 = 7.99$ とほぼ一致している。さらに、gain8 × 8 における照射によるカウント値を 1000 ADU ごとの bin に区切

り、各 bin ごとに、その bin に含まれるピクセル間で $r_{\rm n}(x,y)$ を平均し、bin のカウント値に対して示した。これが図 22 である。

図 22 によると、$\sim$ 25000 ADU 程度までは $r_{\rm n} \sim 1$ だが、より大きなカウント値で $r_{\rm n}$ が小さくなり、$\sim$ 40000 ADU で 0.98 近くまで達している。すなわち、同じ光を照射した gain8 $\times$ 8 と gain8 $\times$ 1 画像間では、カウントにより、画像間の比例性に少なくとも 2%の相違があることになる。図 21 のように、今回照射した光は、x 座標が大きい領域で強くなっている。もし、チップ上の位置によって g'_{81}/g'_{88} が異なる傾向があり、g'_{81}/g'_{88} が x が大きい領域でより小さいとすれば、今回のような結果が得られるだろう。ただ、今回の実験のみでは原因ははっきりと断定できない。いずれにしろ、現段階では異なる gain 間の較正画像の共有は行なわない方が良いだろう。

なお、各 bin のカウント値に対して、bin 内での $r_{\rm n}(x,y)$ の標準偏差を図 23 に示した。あわせて、photon noise から予想される標準偏差を破線で示したが、両者は良く一致している。

3.7.4 まとめ

gain8 $\times$ 8 と gain8 $\times$ 1 の両設定で全く同じ光を照射し、ADU カウントの比を取ったところ、ピクセルによって 2%以上の相違があり、gain 比 g'_{81}/g'_{88} がチップ上の位置もしくは入射光強度によって一定ではないことが明らかになった。ただ、これらのどちらが原因であるかは今回の実験からははっきりしない。

現段階では、フラット画像を異なる gain 設定間で共有するのは推奨できない。

3.8 残像現象 (hysteresis)

3.8.1 背景

CRYOCAM-1 では、強い光を照射した後の dark 画像に、微かに以前の照射と同じ形状の画像が現われる残像現象 (hysteresis) が生じていた (1997.2.24、『残像」問題他実験報告』、秋田谷)。

ここでは、CRYOCAM-2 でも同様の現象が起きているかを確認する。

3.8.2 実験

今回の全ての実験に先立ち、長時間 (約 1 ヵ月半) チップに光を照射した積分を行なっていない状態で、500 sec 積分の dark 画像を 4 枚取得し、適当な bias 差し引きの後、平均化した。この画像内には残像現象が全く現われていないと仮定し、 無像残テンプレート画像」とする。(積分時の条件は gain8 $\times$ 8、CCD 温度 -70°C、TEC 温度 40°C。)

一方、今回の全ての実験の最後に、ハロゲンランプを用いて、gain8 $\times$ 1 でチップ内での最大カウントが $\sim$ 45000ADU となるような光を 2 度照射し、その後、gain8 $\times$ 8 として積分時間 250sec、500sec、750sec それぞれで Dark 画像を取得し前後の bias 画像を差し引いた (ここで CCD 温度 -70°C、TEC 温度 $35-37$°C)。

3.8.3 残像の有無

照射光による x 方向のカウント値分布を、y:201-210 の 10pixels 幅の平均値で図 24 に示した。光の照射で生じた最大カウント値 $\sim$ 45000ADU は、約 $75000e^-$(full well の約 30%) に相当する。

照射後の Dark 画像 (bias 差し引き後) のうち、500 sec 積分のものから 無残像テンプレート」を差し引き、x:51–100、y:51–450 の領域の平均カウント値を 0ADU となるような原点補正を行なった。これを、照射光による画像と同様に、x 方向のカウント値分布を、y:201-210 の 10pixels 幅の平均カウント値で図 25

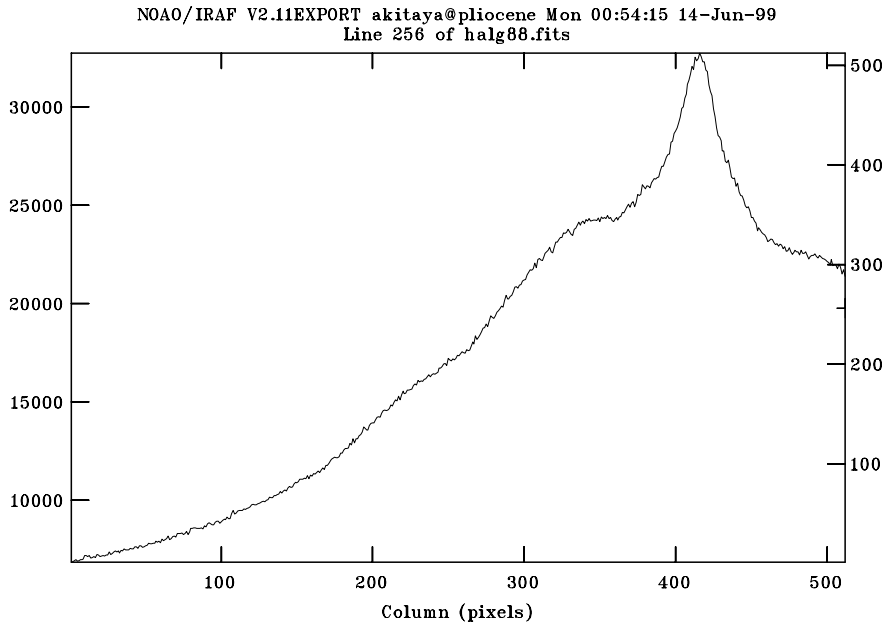


図 21: 照射したハロゲンランプ光による x 方向のカウント値分布。y:256 について示した。

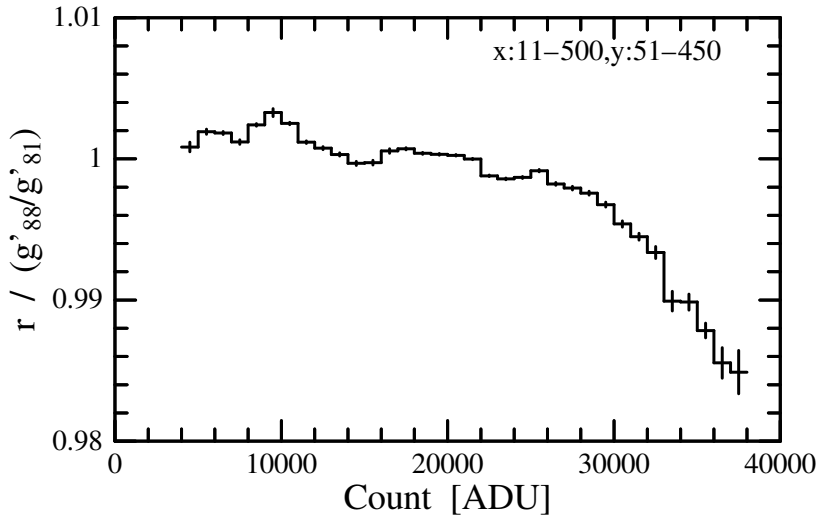


図 22: gain8 × 8 における ADU カウント値を 1000ADU 幅の bin ごとに分け、各 bin に属する全ピクセルの $r_{\rm n}(x,y)$ を平均化した。これを、各 bin の gain8 × 8 における ADU カウント値に対して示した。

に示した。

光の照射によって残像現象が生じた場合は、図 25 中に図 24 と同じような形状のカウント値分布が残像として現われると予想されるが、そのような様子は見られていない。250sec、750sec の Dark 画像についても同様であった (無残像テンプレートとしては、500 sec 積分のものを積分時間に応じてスケール変換して用いた)。よって、今回のように full well の約 30%の電子を生じる程度の光を 2 度照射する程度では、顕著な残像効果は現われないと言えるだろう。

さらに照射回数を繰り返した場合や、サチレーションを起こす程度の強い光を照射した後の残像現象については未知であるので、特に gain8 × 1 のような gain が低い設定でダイナミックレンジ一杯を使った観測をする場合は、dark 画像に残像が現われていないか注意する必要がある。

3.8.4 まとめ

full well の約 30%の電子を生じるような光を 2 度照射する程度では、残像現象は見られなかった。より強い光を照射した後の残像現象についてはまだ不明であり、注意が必要である。

4 異常動作

今回の実験により、以下の 3 つの異常を確認した。

4.1 gain 異常変化

ソフト上で観測者が gain 設定を操作していないにも関わらず、カメラ内部で gain が勝手に変化していると思われる現象が、今回の実験中の一期間、4 時間の間に 3 回ほど発生した。

この現象は、実験中のある画像から bias level が急変化し、画像内のカウントの分布の幅が広がったり狭まったりするものである。ソフト上で gain 設定を一旦他の値に変えてから元に戻すと、正常な状態に戻る。これらのことから、カメラ内部における gain 設定が、観測者の操作なしに勝手に変化しているのではないかと推測した。

画面上の gain 設定の表示は変化しないため、この現象の発生に観測者が気付かない恐れがある。各取得画像のヒストグラムを注意深く確認し、gain 異常変化が起きていないか注意する必要がある。

4.2 縞模様状ノイズ

bias image 上に縞模様 (x 方向) の noise が見られる。縞の幅、数、出現場所はその時々で異なる。振幅は大体 1ADU 程度 (gain 8 × 1) 、縞の幅 (y 方向) は約 20 ~ 50 pixel 程度、数は 3 ~ 8 本ぐらいである。

4.3 木目模様状ノイズ

bias image 上に木目模様の noise が見られる。Cryocam1 の時にも同じようなことがあったが、その時はカメラを電気的に独立にすることで解決した。しかし、今回はカメラは最初から電気的に独立しており、原因は不明である。振幅は gain8 × 1 で数 ADU 程度である。

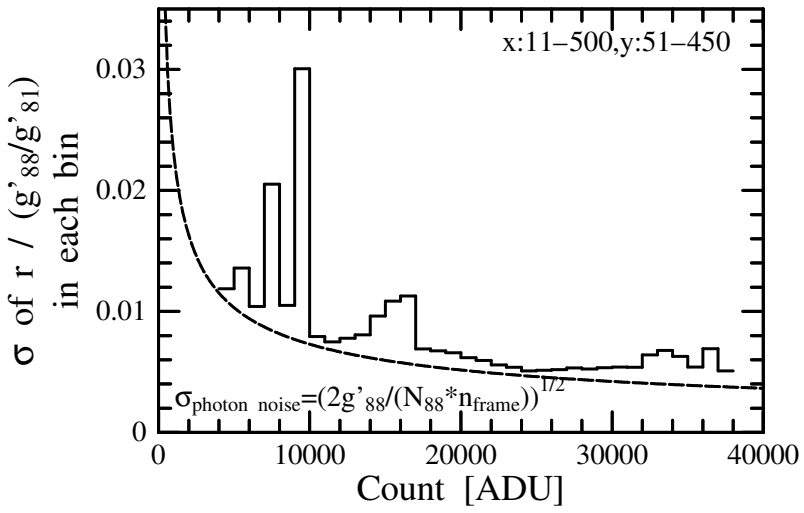


図 23: 各 bin 内における $r_{\rm n}(x,y)$ の標準偏差の実測値と、photon noise から推定される標準偏差の理論値 (破線) の比較。

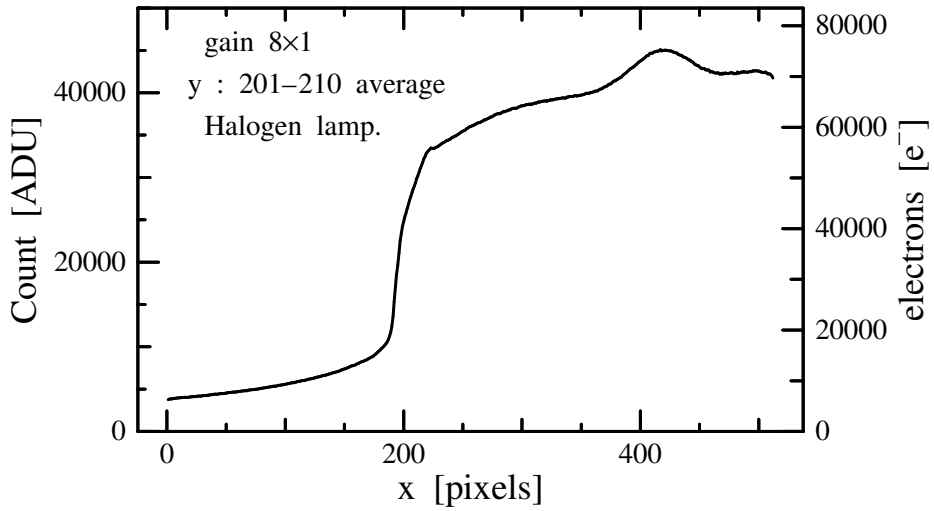


図 24: ハロゲンランプ光の照射による x 方向のカウント分布。y:201-210 の 10pixels 幅で平均化した。

4.1 節の gain 異常変化については、発生に気付かなかった場合、正確なデータ取得が行なえないため、注意が必要である。

4.2 節、4.3 節の各ノイズについては、程度が小さいため、観測に及ぼす影響はそれほど深刻ではないだろう。今回の実験で測定した readout noise は、これらのノイズの影響も含まれた結果であるが、十分低い値が得られている。これらにの異常ついては、メーカーに報告の上、対策を検討する。

5 今回の実験のまとめ

今回の実験により、CRYOCAM–2 の基本的な特性を明らかにした。

観測で使用する gain 設定は、gain8 × 1($g' = 0.598$[ADU/e^-]) とする。この設定では、ダイナミックレンジ一杯 (CCD の full well 約 $240000e^-$ の 46% に相当) で観測した場合でも、CCD の非線形の効果が及ぼす偏光度測定誤差は無視できる程度である。暗天体用として gain の大きい設定、gain8 × 8($g' = 4.78$[ADU/e^-]) の使用も検討したが、TEC 変動による bias の ADU 値の変動の程度が gain とほぼ比例しており、gain を上げても天体の信号に対する bias 変動の割合が変らないことが明らかになったため、あえて gain8 × 8 の設定を使用する必要性はない。

熱雑音は、CCD 温度 -61°C において 0.33 e^-/sec/pixel であった。また、熱雑音は CCD 温度に対して指数関数的に増加し、$\sim$ 17.3°C 上昇するごとに 10 倍となる。TEC 温度に従う熱雑音の変化は見られなかった。

bias の ADU 値変化は TEC 温度や CCD 温度の変化と強い相関をもつため、観測時にはともに安定させる必要がある。TEC 温度 31 $\sim$ 35°C において bias の TEC 温度に対する変化は $\sim$ 2ADU/°C、CCD 温度 -60 $\sim$ -20°C において、bias の CCD 温度に対する変化は $\sim$ 120ADU/°C である。

シャッター開閉によるチップ上での照射のむらが偏光度測定に及ぼす系統誤差 ΔP[%] は、積分時間 t[sec] に反比例し、$\Delta P = 0.1/t$ である。積分時間を数秒とすることで、誤差は無視できる程度となる。ただし、カメラの姿勢差や外気温、使用回数の増加によるシャッター速度の変化は未知である。

readout noise は ADC 速度 50 kHz において $\sim 6.4e^-$ である。readout noise は ADC 速度の上昇とともに若干増加する。今回の実験のほとんどを ADC 速度 50 kHz で行なっているので、この ADC 速度を今後の標準の設定とする。ADC 速度 50 kHz における bias 画像取得所要時間は約 12 sec である。

異なる gain 設定で同じ光量を照射した画像のカウント比は、画像全体にわたって一定ではなかった。よって、現段階ではフラット画像等の較正画像は、使用 gain ごとに取得する必要がある。

今回の実験でははっきりした残像 (hysteresis) 現象は見られなかった。より強い光の照射で現われてくる可能性があるので、注意が必要である。

今回の実験と、1998 年 12 月の第 1 次実験の結果に基づき、現段階における CRYOCAM–2 の性能を表 3 にまとめて示す。これまでの 2 回の実験の結果から判断して、基本的には CRYOCAM–2 を観測に使用する上での大きな問題はないだろう。

さらに詳細な特性を知るために、今後、以下のような実験が必要である。

- 31°C 以下の TEC 温度における bias の TEC 温度依存性の調査。(気温が低下する秋 ~ 冬に行なう。)
- 残像現象の詳しい調査。
- カメラ特性の安定性の調査。(定期的な dark 画像、bias 画像の取得、shutter 速度の測定。)
- bias 画像中の noise の原因解明と除去。

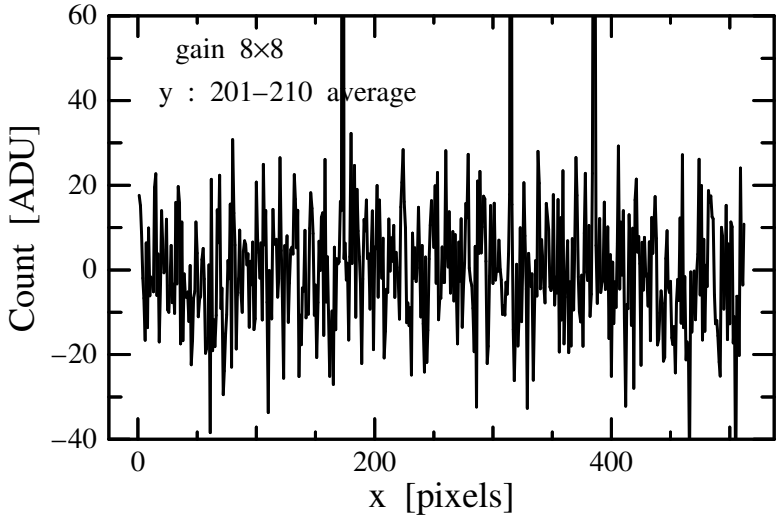


図 25: 光を照射した後の 500 sec Dark 画像から、 無残像テンプレート」を差し引き、原点補正を行なった画像の x 方向のカウント値分布。y:201-210 の 10pixels 幅で平均化した。

gain 設定	8×1
gain	$0.598\mathrm{ADU}/e^-$
ADC 速度	50 kHz(Low)
bias 取得所要時間	約 12 sec
シャッター速度	50000pixels/sec(1/100sec)
シャッター開閉が及ぼす偏光度測定誤差 (積分時間 t [sec])	$0.1/t$ %
熱雑音 (CCD 温度 -70°C)	$0.064e^-$/sec/pixel
熱雑音の CCD 温度依存性	$+17.3$°C で 10 倍
bias の CCD 温度依存性 (CCD 温度 $-61 \sim -20$°C)	120ADU/°C
bias の TEC 温度依存性 (TEC 温度 $31 \sim 35$°C)	2ADU/°C
readout noise	$6.4e^-$
hot pixels($N_{dark} > 5\overline{N_{dark}}$)	< 60 pixels
full well	約 $240000e^-$

表 3: CRYOCAM–2 の諸特性

A　性能テスト (1) の概要

「HBS 用 CCD カメラ CRYOCAM-2 の性能テスト (1)、1999.5.4、秋田谷」の概要。

Format	512 × 512 pixels
Pixel Size	24μm × 24μm
Imaging Area	12.3 mm × 12.3 mm
Dark current(MPP), 20°C	50 pa/cm^2 (Max. 70 pa/cm^2)
Readout Noise	$7e^-$(Max. $9e^-$)
Full Well signal	350,000 e^- (Min. 300,000 e^-)
CTE per pixel	0.99999 (Min. 0.99995)

表 4: SITe SI-502A の仕様

主なテスト項目

- 基本動作確認 (シャッター開閉、冷却温度)
- おもなソフト上の gain 設定における gain、conversion factor の測定
- readout noise の測定
- bias 画像
- 熱雑音の測定

ADC speed	Time (sec.)
Low	12
Medium	9
High	6

表 5: ADC speed による画像取得に要する時間

gain 設定	gain g'[ADU/e^-]	conversion factor [e^-/ADU]
1×1	0.0748 ± 0.0021	13.4 ± 0.4
1×2	0.150 ± 0.004	6.68 ± 0.20
1×4	0.299 ± 0.008	3.35 ± 0.09
1×8	0.599 ± 0.015	1.67 ± 0.04
2×1	0.150 ± 0.004	6.66 ± 0.16
2×2	0.300 ± 0.007	3.33 ± 0.08
2×4	0.599 ± 0.014	1.67 ± 0.04
2×8	1.20 ± 0.03	0.833 ± 0.019
4×1	0.299 ± 0.007	3.34 ± 0.08
4×2	0.598 ± 0.014	1.67 ± 0.04
4×4	1.20 ± 0.03	0.837 ± 0.019
4×8	2.39 ± 0.05	0.419 ± 0.009
8×1	0.598 ± 0.013	1.67 ± 0.04
8×2	1.20 ± 0.03	0.835 ± 0.019
8×4	2.39 ± 0.05	0.418 ± 0.010
8×8	4.78 ± 0.06	0.209 ± 0.003

表 6: ADU カウント比から求めた gain g' 及び conversion factor g

gain 設定	$\sigma_{1(\mathrm{ADU})}$ [ADU](151500 pixels 平均)	$\sigma_{1(\mathrm{ADU})}$ の pixel 間標準偏差 [ADU]	$\sigma_{1(e^-)}$ [e^-]
4×4	8.74	7.59	5.66
1×8	11.4	2.3	19.6
8×1	3.63	2.00	6.05
8×8	26.7	16.4	5.59

表 7: bias 画像から求めた readout noise

熱雑音	0.064[e^-/sec/pixel]

表 8: CCD 温度 $-70\mathrm{C}^\circ$ における熱雑音

	平均カウント ADU / e^-	60ADU($100e^-$) 以上のカウントをもつ pixel 数
500sec dark	19.26 / 32.1	1805 (0.7%)
1000sec dark	41.04 / 68.4	24344 (9.2%)

表 9: dark 画像 (bias 差し引き後) の平均カウント、

B　実験計画

堂平観測所 HBS 用 SITe CCD カメラ CRYOCAM-2
第 2 次性能テスト計画 ver 0.1
May. 29,1999.　　秋田谷 洋

[I] これまでの状況

第 1 次テスト (1998 年 12 月) において、簡単な動作確認を行ない、全ての gain 設定について変換効率を導出した。また、主な gain 設定において readout noise、dark noise を測定し、満足できる値を得た。

[II] テストの目的

1999 年度共同利用で使用を予定している HBS 用 SITe CCD カメラ (CRYOCAM-2) について推奨する設定を決定する。また, それらの設定において定量的なカメラ性能の評価を行い, 観測結果の誤差評価を正確に行うための資料を提供する。

特に重点を置くのは以下の点である。

- linearity の良い CCD well をダイナミックレンジ一杯に使用できる gain 設定を決定する。暗天体用に、最高 gain(8x8) での linearity 特性も明らかにする。(1)、(2)
- シャッター速度について調査し、許される最小の積分時間を明らかにする。(7)
- 異なる gain 間で、sky flat などの較正データが共有できるかを明らかにする。(8)
- bias、dark の安定性、外部要因に基づくに変化について明らかにする。(3)、(4)、(5)、(6)、(9)、(10)

[III] テスト項目と所要時間

(1) 使用 gain 設定の決定	3 + 2(解析)
(2) 各 gain 設定での linearity 特性の測定	5
(3) Dark 画像の特性	3
(4) Dark、Bias の CCD 温度依存性	2
(5) Dark、Bias の TEC 温度依存性	2
(6) ADC 速度による readout noise の変化	0.5
(7) シャッター開閉速度	1.5
(8) 異なる gain 設定間の較正画像互換性	1
(9) 残像の有無	0.5
(10) bias,dark の長期安定性	-

[IV] テスト日程

日時　：1999 年 6 月 4 日 (金) ~ 6 月 8 日 (火)
場所　：堂平観測所 91cm ドーム 2 階暗室
人員　：秋田谷、中山

	午前	午後	夜
6/4		堂平着 ・準備	(9)、(1)、(6)
6/5	(2)	(7)、(3)	(4)
6/6	(3)	(8)、(5)	
6/7	以後解析		
6/8			

[V] 各テストの詳細

---

(1) 使用 gain 設定の決定

・目的

できるだけ広いダイナミックレンジ内で良い linearity を示す gain 設定を選び、標準の設定とする。

・詳細

良い linearity の基準は

「~ 50000ADU までにおいて、|Preal/Δ P| < 200
(cross talk による誤差の 1/4)」

とした。

ここで

Preal : 天体の真の偏光度
Δ P : linearity の悪さが偏光度測定に及ぼす誤差

である。

これを満たすような linearity の設定は、linearity が完全なときの CCD の反応 Ireal に対して、実際の CCD の反応が

Iobs = Ireal^γ

とかけるとき、

「γ >0.995」

となる。

| Δ P=(γ -1)Preal
| と書けるため、
| Preal/Δ P = 1/(γ -1)
| 1/200 > |1/(γ -1)|

| より、γ >0.995

以上より、

「~ 50000ADU において、γ >0.995 となるような gain 設定のうち、gain が最小のものを標準設定として選ぶ」

こととした。

・計画

gain 設定毎に、chip に一様な安定 halogen 光（100sec で ~ 60000ADU）を照射し、10sec から 100sec まで 10sec 刻みで halogen 画像、dark 画像を 1 枚づつ取得。gain 設定は以下の順で変える。

gain 8x4
8x2
8x1
4x1
2x1 この辺りは full well の関係で無理かも。
1x1

gain 8x4,8x2,8x1,4x1,2x1,1x1

exp.time	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
halogen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dark	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

bias を適宜取得。

すぐに解析し、γ >0.995@50000ADU を満たしそうなものを標準の gain 設定として決定し、テスト（2）に移る。

・所要

3 時間（+解析 2 時間）

（2）各 gain 設定での linearity 特性の測定

・目的

テスト（1）で決定した gain 設定と暗天体用の gain 設定（8x8）について、linearity 特性を測定する。

・詳細

Iobs=Ireal^γ

を仮定する。

求められる linearity 特性は、（1）で述べたとおり、

「γ >0.995 @ 50000ADU」

γ を 0.001 の精度で測定するには、観測カウントについて 1\%の精度が

必要。

| 500000ADU において、

| 精度Δ ~ 50000^1.001 - 50000 ~ 544

| よって、544/50000 -> ~ 1\%

さらに、shutter 開閉速度の不定性、photon noise を考慮する。

・計画

100sec で 40000ADU 程度の一様安定 halogen 光を chip に照射。

カウントの peak のあたりで、10x10pix の領域中でのカウントの

ゆらぎが photon noise 程度の一様性を要求。

テスト中、halogen 用電源の電圧を監視。

exp.time	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
halogen	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
dark	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

exp.time	110	120	130	140	150	160
halogen	3	3	3	3	3	3
dark	2	2	2	2	2	2

bias を適宜取得。

・所要

5 時間

---

(3) Dark 画像の特性

・目的

dark noise の積分時間による linearity、hotpixels の変化を知る。

・計画

標準 gain 設定 ((1) で決定)。

以下の手順で dark、bias を取得。CCD 温度、TEC 温度の安定性には留意。

exptime	10	20	30	60	100	200	300	600	1000	2000
dark	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2
bias	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2

・所要

3 時間

---

(4) Dark、Bias の CCD 温度依存性

・目的

dark、bias が CCD 温度によってどのように変化するかを知る。

・詳細

CCD 温度に応じた dark 起源の noise 量を決定する。理論では、

```
ND(T) = 2.55E15 ・N0 ・dpix^2 ・T^-1.5 ・exp(-EG/2kt)
  EG=1.557-(7.021E-4 ・T^2)/(1108+T)
  N0[mA/cm^2] : dark current at room temperature
  dpix[cm]    : pixel size
  EG[eV]      : band gap energy (Si)
```

が知られている。

結果を chip のカタログに記載されている値をもとに計算した理論値と比較し、dark noise が妥当であるか検証する。

CCD 温度による hot pixels の数を求める。

・計画

標準 gain 設定で行なう。

CCD 温度を-70°C から-10°C まで 5°C きざみで変更し、それぞれで 300sec dark を取得する。前後には bias を取得。

CCD Temp	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10
dark(300sec)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
bias	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

・所要

2 時間

---

(5) Dark、Bias の TEC 温度依存性

・目的

TEC 温度の変化によって Dark、bias がどのていど変化するかを測定する。

・詳細

CRYOCAM1 では、TEC の変化によって bias が大きく変化する様子が分かっている。

CRYOCAM2 でもこの特徴が見られるかを調査し、相関関係を求める。

可能な場合は、変換式を導出し、補正の可能性を探る。

・計画

CCD カメラのファンを塞ぐなどして TEC 温度を変化させながら、100sec dark、bias を取得する。(およそ 1°C きざみ)

CCD 温度を一定に保つ。(あらかじめ若干高めに設定する)

・所要

2 時間

---

(6) ADC 速度による readout noise の変化

・目的

ADC 速度の変化によって readout noise が変化するかを調べる。

・計画

ADC Speed を Low(50K)、Mid(100K?)、High(200K?) それぞれで
bias を 15 枚取得し、カウントの画像間標準偏差から readout noise を
求め、比較する。
標準 gain 設定を使用。(8x8 でも差し支えはない)

ADC	Low	Mid	High
bias	15	15	15

---

(7) シャッター開閉速度

・目的

シャッターが両開き構造であるため、chip 上の位置により積分時間が
若干変化する。これが偏光度測定に及ぼす影響を調べる。
これをもとに、可能な最低積分時間を決定する。

・詳細

シャッターはスペクトルに垂直な方向に動く。
安定した光を照射したとき、y:1-50 の部分 (I) でのカウントを I1(t)、
y:451-500 の部分 (II) でのカウントを I2(t) とする。(t は積分時間)

$\Delta(t)=1-(I1(t)/I2(t)) / (I1(\infty)/I2(\infty))$

とすると、理想的には

$\Delta(t)=0$

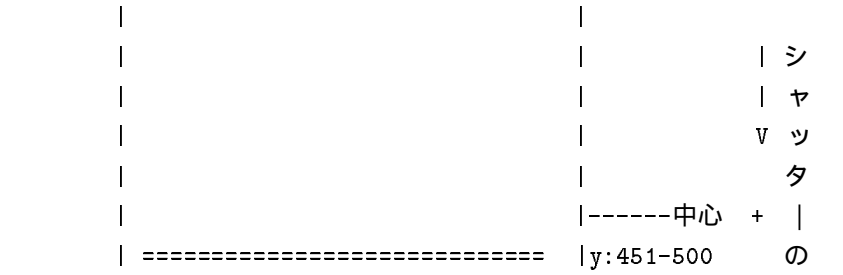
であるべきだが、シャッターの速度が有限な場合は、

$\Delta(t)>0$

となる。
ここで、常光スペクトルが (II) 部分、異常光スペクトルが y:401-450 部に
ある場合、シャッターの速度が偏光度測定に及ぼす系統誤差ΔP は、
先に定義したΔ をもちいて、

$\Delta P=(1/9)\cdot(\Delta/4)$

とかける。
もし、$\Delta P<0.00025(0.025\%)$ と決めれば、$\Delta<0.009(\sim 1\%)$ であればよいことに
なる。



```
 |                                |    (II)    ^ 動
 |                                |            | き
 |                                |            |
 | ============================== |y:  1- 50
 ---------------------------------    (I)
        CCD chip 512x512
```

・計画

標準 gain 設定。

100sec で ~ 30000ADU 程度の halogen 光を照射する。

以下のように、halogen flat 画像と dark 画像を取得し、積分時間とΔの関係を求める。

```
-----------------------------------------------
 exp.time  100   1   2   3   4   5   6   8  100
 flat        6  10  10  10  10  10  10  10    6
 dark        3   3   3   3   3   3   3   3    3
-----------------------------------------------
 exp.time   10  12  14  16  18  20 100
 flat       10  10  10  10  10  10  10
 dark        3   3   3   3   3   3   3
---------------------------------------
```

・所要

1.5 時間

---

(8) 異なる gain 設定間の較正画像互換性

・目的

標準の gain 設定で得た較正画像 (sky flat 等) が、他の gain 設定 (8x8) にも適用できるか調査する。

・詳細

今回のテストでは、標準の gain 設定を決定するが、一方で、暗天体には対しては gain8x8 の設定を用いるほうが良い場合がある。その場合、標準 gain 設定で得た較正画像を gain8x8 に適用できれば、較正観測の効率が良い。

標準の gain 設定、gain8x8 で全く同じ光を照射したとき、それぞれ pixel(x,y) におけるカウントを Ilow(x,y)、Ihigh(x,y) とする。

また、これらの比、

r(x,y) = Ilow(x,y)/Ihigh(x,y)

を定義する。

このとき、全 pixel において、

r(x,y) = const = glow / ghigh

(glow、ghigh はそれぞれ標準の gain 設定、gain8x8 での gain(ADU/electron))

ならば、異なる gain 設定の画像は単に定数倍された画像であるので、flat 等の較正画像に互換性があるとして良い。

・計画

gaix8x8 において画像内に数 1000-40000ADU 程度のカウントがまんべんなく示されるような halogen 光を照射する (~ 60sec くらい)。

光源を安定させて、gain8x8 および標準 gain 設定で画像を取得する。

	gain8x8	標準 gain 設定
halogen	20	20
dark	6	6

これらについて、r(x,y) を求め、Ilow(x,y) と r(x,y) の関係を求める。

・所要

1 時間

---

(9) 残像の有無

・目的

CRYOCAM1 でみられた残像 (hysterisis) 現象の有無を確認する

・計画

「全ての実験に先立ち」gain8x8 で 500 sec dark を 5 枚取得し、無残像 template としておく。CCD 温度は一定とする。

dark(500sec)	5
bias	6

以後、光の照射のあとに 500sec dark を適宜取得し、template と比較し、残像の有無を調べる。

・所要

0.5 時間+α

---

(10) bias,dark の長期安定性

・目的

bias、dark の長時間 (数日) の安定性を調査する。

・計画

実験中に適宜 300sec dark、bias を取得し、変化を見る。

CCD 温度は一定、TEC もできるだけ一定とする。