

東京大学大学院
理学系研究科天文学専攻
修士論文

近赤外高分散分光器 TARdYS の
カメラシステム開発と
検出器性能評価

学籍番号：35-216132

穂満星冴

指導教員：本原 顕太郎 教授

2023年1月

Abstract

Since the first discovery in 1995, exoplanets have been searched for using various methods: such as radial velocity, transits, astrometry, gravitational microlensing, direct imaging, and pulsar timing. The radial velocity method uses a spectrograph with high spectral resolution to measure the Doppler shift of stellar lines caused by the motion of orbiting planets. Despite increasing number of exoplanet candidates found with the transit method over the past several years, radial velocity measurements are an indispensable method for revealing their nature. Exoplanet exploration has been conducted mainly around sun-like stars, however, in recent years, exploration around M-type stars, which are more abundant in the solar system's vicinity, has been gaining momentum. M-type stars are faint in the visible light due to their low temperature, thus infrared observations are essential.

TARdYS (The Tao Aiuc high Resolution (d) Y band Spectrograph) is a near-infrared high-resolution spectrograph being developed mainly to measure the radial velocity of M-type stars. In this study, we have developed a detector system for TARdYS that drives and reads out the detector and processes its images and evaluated its detector and readout system. For the detector system, an InGaAs photodiode array detector of large format ($1.3k \times 1.3k$) and a data acquisition software MESSIA6 developed at NAOJ are used. MESSIA6 has two sampling modes: Fowler Sampling and Up-the-Ramp Sampling. The detector system can generate final images from unprocessed images sampled by these modes. It is also possible to correct for detector non-linearity on a pixel-by-pixel basis during the generation of the final images.

We then evaluated the performances of the detector and the readout system, that are non-linearity, conversion factor, readout noise, detector glow, dark current, and persistence. The non-linearity is found to be 5% at $1.51 \times 10^5 [e^-]$ (66% of full-well), the conversion factor $3.9 [e^- / ADU]$, the readout noise $3.4 [e^-]$ with Fowler-16 sampling, the median detector glow $0.12 [e^- / read]$, the dark current $1.5 \times 10^{-3} [e^- / s / pix]$ at 120[K], and the persistence fraction 0.7% of the exposure level. In addition, our evaluation revealed that as the number of readouts increases, the readout noise initially decreases but then increases due to the detector glow.

We also evaluated detectors of SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Multi-object Spectrograph). SWIMS is one of the first generation instrument of TAO 6.5m telescope capable of simultaneous two-color imaging, multi-object spectroscopy, and integral field spectroscopy, and is equipped with four HAWAII-2RGs, two each for the shorter wavelength and longer wavelength foci. The detectors at the shorter wavelength focal plane are named B1 and B2, and those at the longer wavelength focal plane are named R1 and R2. Evaluation was conducted concerning non-linearity, conversion factor, readout noise, etc. The non-linearity of B1, B2, R1, and R2 detectors is found to be 10% at 1.10×10^4 , 1.03×10^5 , 1.00×10^5 , and $1.05 \times 10^5 [e^-]$, the conversion factor 2.08, 3.13, 2.28, $2.19 [e^- / ADU]$, and the readout noise 21.0, 29.3, 22.1, $21.6 [e^-]$, respectively. Furthermore, our analysis indicated that B2 has lower quantum efficiency compared to the other detectors. With the development of the TARdYS detector system in this study, it is now ready to be handed over to the Universidad Católica de Chile for integration with the optical system. Moreover, the findings obtained in this study will contribute to the development and evaluation of other instruments that utilize near-infrared detectors of similar types.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 TAO Project 概要	1
1.1.1 TAO サイト	1
1.1.2 TAO6.5m 望遠鏡	1
1.1.3 山頂施設	2
1.2 TARdYS 概要	3
1.3 SWIMS 概要	4
第 2 章 検出器性能評価	6
2.1 近赤外検出器アレイの基礎	6
2.1.1 半導体	6
2.1.2 PN 接合	9
2.1.3 フォトダイオード	10
2.1.4 MOSFET	11
2.1.5 赤外フォトダイオードアレイ検出器	12
2.2 検出器特性	16
2.2.1 暗電流	16
2.2.2 リセットアノマリー	17
2.2.3 非線形性	17
2.2.4 相反則不軌	17
2.2.5 コンバージョンファクターと読み出しノイズ	18
2.2.6 画素間容量	20
2.2.7 量子効率	22
2.2.8 パーシステンス	23
2.2.9 バッドピクセル	26
第 3 章 TARdYS カメラシステムの開発	27
3.1 検出器システム概要	27
3.1.1 検出器	27
3.1.2 アナログフロントエンド	28
3.1.3 デジタルバックエンド	28
3.1.4 画像取得システム	29
3.2 background limited な観測の際の要求性能	30
3.2.1 ピクセルスケール	30
3.2.2 1 ピクセルあたりの波長範囲	31
3.2.3 要求ノイズ性能	32
3.3 画像取得	33
3.3.1 Fowler Sampling	34

3.3.2	Up-the-Ramp Sampling ; UTR (or Sampling Up the Ramp ; SUR)	34
3.4	画像処理	35
3.5	画像取得システムによる処理の流れ	36
第 4 章	TARdYS 検出器システム性能評価	39
4.1	検出器座標	39
4.2	試験環境	40
4.3	非線形性	41
4.3.1	検出器の平均的な非線形性	42
4.3.2	非線形性の補正	43
4.3.3	ピクセル毎の非線形性の補正	45
4.4	コンバージョンファクター	46
4.4.1	フォントランスファー法	46
4.4.2	ピクセル毎のコンバージョンファクター	47
4.4.3	画素間容量による影響	49
4.4.4	積分ノード容量	50
4.5	読み出しノイズ	50
4.5.1	n_{sample} 依存性	50
4.5.2	$n_{osample}$ 依存性	55
4.6	検出器グロー	55
4.7	暗電流	57
4.7.1	暗電流の大きさ	57
4.7.2	積分時間対カウントプロットの y 切片	60
4.7.3	ダーク画像における固定パターン	61
4.7.4	支配的なノイズコンポーネント	62
4.8	リセットアノマリー	63
4.8.1	リセットアノマリーのリセットパルス長依存性	63
4.8.2	リセットアノマリーの継続時間	64
4.8.3	self heating	65
4.8.4	量子効率	66
4.9	パーシステンス	68
4.9.1	パーシステンスの割合	71
4.9.2	トラップの時定数分布	73
4.9.3	パーシステンスのコンバージョンファクター	74
4.9.4	soak 期間中の信号の減少	76
4.9.5	soak 期間中のコンバージョンファクター	79
第 5 章	SWIMS 検出器システム	81
5.1	検出器システム概要	81
5.1.1	HAWAII-2RG™	81
5.1.2	SIDECAR™ ASIC	82
5.1.3	JADE2	82
5.1.4	検出器駆動ソフトウェア	82
5.1.5	検出器と読み出し回路の構成	83

第 6 章 SWIMS 検出器システム性能評価	84
6.1 各検出器で取得された画像	84
6.2 非線形性	86
6.2.1 非線形性の大きさ	86
6.2.2 非線形性の補正	88
6.2.3 ピクセル毎の非線形性	91
6.3 コンバージョンファクター	92
6.3.1 フォトトランスファー法	92
6.3.2 画素間容量による影響	94
6.3.3 回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター	95
6.4 読み出しノイズ	97
第 7 章 総括	100
7.1 本研究の成果	100
7.2 今後の展望	102
付録 A 第 2 章の補足	108
A.1 容量の電圧依存性	108
付録 B 第 3 章の補足	111
B.1 検出器冷却システムの概要	111
B.1.1 温度コントロールシステム	111
B.1.2 真空システム	113
B.1.3 シリアルデバイスサーバー	113
B.1.4 DAQ システム	113
B.2 低温、低圧にすることの意義	113
B.3 真空到達度	114
B.4 開封当初の状況	114
B.5 リーク試験	115
B.5.1 エタノールを用いたリーク試験	115
B.5.2 小型ダイアフラムポンプを用いたリーク試験	115
B.5.3 ヘリウムリークテスト	116
B.6 クライオスタットの修理	117
B.6.1 ネジの増し締め	117
B.7 IR Labs における修理	118
付録 C 第 4 章、第 6 章の補足	120
C.1 中央値補正	120
C.2 各パラメータ値での読み出しノイズ	120
C.3 バッドピクセル	127
C.3.1 cold/warm pixel の選定	127
C.3.2 hot pixel の選定	129
C.3.3 bad pixel map	131

目次

1.1	TAO と他の主要観測サイトとの大気透過率の比較 (0.8 ~ 45[μm])。 (上)TAO サイト (チャナントール山) : 5600[m], 498[hPa], $PWV = 0.5[\text{mm}]$ 、 (中) すばるサイト (マウナケア) : 4200[m], 600[hPa], $PWV = 1.0[\text{mm}]$ 、 (下) VLT サイト (パラナル山) : 2600[m], 737[hPa], $PWV = 6.0[\text{mm}]$ (Yoshii et al. 2010)。	1
1.2	TAO の山頂観測施設の完成予想図。 観測運用棟 (左) と望遠鏡ドーム (右) の二つが橋でつながった構造をしている。	3
1.3	TARdYS の概略図 (左) とチリ・カトリカ大学で製作されたプロトタイプ (右)。	3
1.4	SWIMS の外観 (左) と概略図 (右)。 望遠鏡からの光はコリメータレンズを通過した後、ダイクロミックミラーによって短波長側 (Blue Arm) と長波長側 (Red Arm) に分割される。 分割された光はホイールの回転によって選択されたフィルターやグリズムを通過し、それぞれの焦点面に取り付けられた検出器上に結像する。 これらの光学系は真空中に引かれたデュワー内部の光学ベンチに収納され、 $\sim 80\text{K}$ まで冷却される。	5
2.1	原子の結合によるエネルギーバンドの形成。	6
2.2	金属、半導体、絶縁体のバンド構造。	7
2.3	真性半導体 (上)、n 型半導体 (中)、p 型半導体 (下) のバンド構造の模式図 (左 1)、状態密度 (左 2)、フェルミ分布関数 (右 2)、キャリア密度 (右 1)(出典 : Sze & Ng 2006)。	8
2.4	n 型半導体 (左) と p 型半導体 (右)。 n 型半導体は共有結合の際に一つ電子があまり、p 型半導体は共有結合の際に一つ電子が足りなくなる。	8
2.5	PN 接合の概念図。 ただし、縦軸は電子のエネルギーである。	9
2.6	順バイアス (左)、バイアスなし (中)、逆バイアス (右)。 電子のエネルギーを上側が正、静電ポテンシャルを下向きが正に定めた。	10
2.7	フォトダイオードの回路図記号	10
2.8	光子の入射による光電流の発生。	11
2.9	n チャネル MOSFET の模式図。 電圧がかかっていない状態 (左) では相対する PN 接合により電流は流れないが、電圧が閾値よりも高い状態 (右) では反転層が形成されることにより電流が流れるようになる。	11
2.10	n 型 MOSFET の回路図記号。 図の上側がゲートである。	12
2.11	n チャネル MOSFET によるソースフォロワの概略図。	12
2.12	近赤外フォトダイオードアレイ検出器のハイブリッド構造。 近赤外線に感度を持つフォトダイオードとシリコン読み出し回路をインジウムバンプで接続した構造になっている (出典 : McLean 2008)。	12
2.13	参照ピクセル。 図のようにラスタースキャンで読み出しを行う場合、上下のピクセルは長周期、左右のピクセルは比較的短周期のノイズを低減するために用いられる。	13
2.14	検出器の 1 ピクセル分の回路とアナログフロントエンドの概略図。	13
2.15	検出器の出力電圧。	14

2.16	ゲート-ソース間とゲート-ドレイン間に生じるオーバーラップ容量。リセットスイッチの ON/OFF の際のゲート電圧の変化により、ソース、ドレイン電圧に影響を与える。	15
2.17	チャージインジェクションの概念図。図のような n チャンネル型 MOSFET では反転層に誘起された電子がゲートから離れる際に蓄積電荷の数に影響を与える。	15
2.18	さまざまなサンプリングモード。	16
2.19	画素間容量の概略図。一般的な、画素毎に 1 つの空乏層を持つような検出器 (上) では画素間容量は主に隣接するバンプ間で生じる。一方で、フォトダイオードが完全空乏化しているような検出器 (下) ではフォトダイオード層でも画素間容量が生じる。	20
2.20	IPC による信号のクロストーク。	21
2.21	量子効率測定概念図。	22
2.22	黒体炉を使った量子効率測定セットアップ概念図。	23
2.23	パーシステンスモデル概念図。	24
2.24	空乏層からの電荷の移動。トラップから放出された電荷による電圧の変化は光電荷による電圧変化よりも小さい。	25
2.25	Smith et al. (2008) の Fig.8 に改変を加えた図。最初のフレームに現れるパーシステンスカウントが大きくなる (露光レベルが上がる) につれ、分散の増加率が上がっており、フォントランスファーカーブの傾きが大きくなっていることから、コンバージョンファクターは小さくなっていくことがわかる。	25
3.1	検出器システム概念図。	27
3.2	$1.3k \times 1.3k$ InGaAs フォトダイオードアレイ検出器 (左) とそのピクセル配置図 (右)。参照ピクセルが感光ピクセルを取り囲むように幅 8 ピクセルで配置されている。	28
3.3	GESiCA のブロック図 (Miyatake et al. 2012)	29
3.4	TARdYS の光学系概念図。ただし、全ての反射鏡は等価なレンズに置き換えて図示してある。また、3 つのコリメーターは実際には同じ凹面反射鏡が用いられている。	30
3.5	(a)Fowler Sampling と (b)Up-the-Ramp Sampling の概念図。読み出しにかかる時間 t_{read} は $t_{osample}$ の値によって変化する。	34
3.6	messia による画像取得のフローチャート。	35
3.7	参照ピクセル補正概念図。それぞれのピクセルの出力値から、同じ行にある参照ピクセル 16 ピクセルと同じ列にある参照ピクセル 16 ピクセルの計 32 ピクセルの出力値の平均が減算される。	35
3.8	画像取得の際に行われる処理のシーケンス図。	38
4.1	MUX(左) とパターンマスク (右)。パターンマスクを MUX の上に載せ、ねじ止めをすることで、MUX の一部にのみ光が当たる状態で画像を取得した。	39
4.2	出力画像の座標 (左) と検出器上での対応する座標 (右)。ただし、出力画像では光が当たっているところが黒で示されている。	40
4.3	デュワー内の検出器スタンドに装着された検出器。検出器の裏にはヒーターが取り付けられており、スタンド上部にある温度計と合わせて温度をコントロールすることができる。	40
4.4	黒体炉によるフラット画像取得のセットアップ。外部からの迷光の影響を軽減するために黒い遮光布を被せてある。	41
4.5	取得されたフラット画像。検出器の四隅にバッドピクセルが集中して存在していることが分かる。カウントが低くなっており、バッドピクセルに見えるもののうち、周辺が明るくなっているものは塵によるアーティファクトである。	42
4.6	横軸:フレームナンバー、縦軸:メジアンスタック画像の中央値のプロット。青実線は 2000-5000[ADU] の範囲のデータのフィッティング直線である。	42

4.7	検出器の非線形性。Ratioは図4.6のデータを2000-5000[ADU]で線形フィッティングした直線で画像の中央値カウントを割ったものであり、1に近いほど線形に近いことを意味する。 . . .	43
4.8	フレームナンバー (\propto 積分時間) 対画像の中央値カウントのプロットと、画像の中央値カウント対非線形性のプロット。左側のプロットでは黒点線が実際に測定された積分時間対カウントのプロット、青実線が2000-5000[ADU]で線形フィッティングを行ったもの、赤点線が非線形性補正後のフレームナンバー対カウントのプロットであり、右側のプロットでは、黒点線が左側のプロットの黒点線と青実線の比を用いて求めた非線形性、青実線はRatioの5次のフィッティング曲線、赤点線が非線形性の補正を行なった後の非線形性となっている。ただし、非線形性の補正に用いたフィッティング曲線(右図青実線)は64個のデータセットを全て用いて算出した非線形性のフィッティング曲線であり、個々のデータセットのデータ(右図黒点線)にフィッティングを行った結果ではないことに注意。 . . .	44
4.9	任意に選ばれたピクセルの非線形性補正前の非線形性。 . . .	44
4.10	図4.9と同じピクセルに検出器の平均的な非線形性を用いて非線形性の補正を行った後の非線形性。 . . .	45
4.11	図4.9と同じピクセルについてピクセル毎に非線形性のフィッティングを行った結果を用い、非線形性の補正を行なった後の非線形性。非線形性はウエルのほぼ全域で $\ll 1\%$ の精度で補正できている。 . . .	45
4.12	ウエルの約9割の48000[ADU]でのピクセル毎の非線形性。ただし、検出器の四隅に見られる白い箇所は適切なフィッティングを行うことのできていないバッドピクセルであり、非線形性が小さいわけではないことに注意。非線形性の大きい領域は暗電流の大きい領域と類似のパターンを持っていることが判明した(図4.28参照)。 . . .	46
4.13	中央値画像(左)と標準偏差画像(右)。1296 \times 1296[pix^2]の画像を27 \times 27[pix^2]の領域に分割してその領域内の統計値を計算して生成した48 \times 48の要素を持つ画像である . . .	47
4.14	非線形性補正前(左)と非線形性補正後(右)のフォントランスファーカーブ。白丸はカウントビン内の最頻値、エラーバーは各カウントビンの分散のばらつきを 1σ で示したものであり、フィッティング直線は各カウントビンの最頻値にそのカウントビンの度数で重みをつけて一次関数でフィッティングしたものである。 . . .	47
4.15	メジアンスタック画像(左)とピクセル標準偏差画像(右)。これらの画像は1296 \times 1296の要素を持つ。 . . .	48
4.16	ピクセル毎のコンバージョンファクターの推定値のヒストグラム。 . . .	48
4.17	任意に選ばれた8ピクセルのコンバージョンファクター。ただし、コンバージョンファクターを求める際の線形フィッティングはカウントが2000 \sim 5000[ADU]の範囲にあるデータを用いている。 . . .	49
4.18	$n_{sample} = 100, n_{osample} = 1$ ($t_{int} = 105.16[s]$)のFowler Samplingで取得されたCDS画像。検出器下部にグローが見受けられる。 . . .	51
4.19	読み出しノイズの n_{sample} 依存性。ただし、白丸は感光ピクセルの読み出しノイズ、エラーバーはチャンネル毎に評価した読み出しノイズの標準偏差を示している。ただし、エラーバーは各チャンネルの読み出しノイズの推定値の誤差を含まない。緑実線は $\propto 1/\sqrt{n_{sample}}$ で減衰する理論曲線、青実線は $\sqrt{a/n_{sample} + b^2}$ という固定レベルノイズを含んだ形でフィッティングを行った曲線である。 . . .	52
4.20	$n_{osample} = 2$ の時について作成した図4.19と同様のプロット。 . . .	52
4.21	$n_{osample} = 16$ の時について作成した図4.19と同様のプロット。 . . .	53

4.22	検出器のグローや暗電流によるノイズを含めた読み出しノイズとそこから暗電流の効果を用いた実効的な読み出しノイズの n_{sample} 依存性。緑実線は $\propto 1/\sqrt{n_{sample}}$ で減衰する理論曲線、赤実線は $\sqrt{a/n_{sample} + b^2 + cn_{sample}}$ という読み出し回数と共に増加する成分も含んだフィッティング曲線である。	54
4.23	読み出し 1 回あたりの検出器のグローの画像とその y 軸方向分布。上から 110[s]、74[s]、55[s] 積分のデータである。	56
4.24	暗電流測定の際のセットアップ。検出器をアルミニウム板で遮光することにより、デュワー内の迷光の影響を受けない測定が可能になる。	57
4.25	検出器温度が 120[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。ただし、右図の凡例にある直線の傾きは $ADU/s/pix$ 単位で表された暗電流である。	58
4.26	検出器の温度が 120[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 16 枚をメジアンスタックしたもの (左) と、横軸:積分時間、縦軸:メジアンスタック画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。	59
4.27	検出器温度が 140[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。	59
4.28	検出器温度が 160[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。	60
4.29	アナログフロントエンドのスイッチをオンにした直後の時間対カウントプロット (左) と十分に時間が経った後の時間対カウントプロット (右)。電源投入直後はフィッティング直線の y 切片が大きくなっていることがわかる。	61
4.30	メジアンスタック画像の左下の拡大を拡大したもの (左) とそれをさらに拡大した画像 (右)。暗電流の大きいピクセルと小さいピクセルが隣接している様子が見える。	61
4.31	120[K] の時の暗電流 CDS 画像 2 枚の差分画像 (左) と差分画像の左下の拡大図 (右)。左下のパターンが見えなくなっていることから、CDS 画像で見えていたパターンは固定パターンであったことがわかる。	62
4.32	各読み出し時間におけるノイズコンポーネントの大きさ比較。ただし、読み出しノイズの値としては実効的な読み出しノイズが最も小さくなる $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の値を用いている。青、緑、赤の実線はそれぞれ 120[K]、140[K]、160[K] の時のダークショットノイズ、灰色の実線は §3.2.3 で求めた背景光のポアソンノイズ、赤、緑、青の点線は読み出しノイズとダークショットノイズの寄与が等しくなる時の積分時間で、黒点線は $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の最短積分時間である。	62
4.33	左から、リセットパルスの継続時間が 0.1, 100[ms] の時の積分時間対中央値カウントのプロット。継続時間が 1[ms] の時のプロットは図 4.25(右) を参照。	63
4.34	積分開始から 600[s] までのデータを用いて生成した積分時間対カウントのプロット。リセットアノマリーの影響は積分開始から 100[s] 以内で特に大きい。しかし、暗電流の値が $3.1 \times 10^{-2}[e^-/s/pix]$ と 120[K] にしては大きめなので、積分開始から 10 分が経過した時点でもリセットアノマリーが持続している可能性がある。	64
4.35	検出器バイアスの温度依存性。検出器バイアスは温度が上がると小さくなる負の温度依存性を持っていることがわかる。	65
4.36	量子効率測定の設定アップ (左) とその概念図 (右)。黒体炉からの予期せぬ光の漏れ出しを避けるために、リーク源となりうる場所は可能な限りアルミテープで塞いだ。さらに、漏れ出しによる迷光の影響を避けるために、黒体炉の開口とデュワーのウィンドウの間を黒アルマイト製のフィルターホルダーで繋いだ。ただし、フィルターホルダー内での光の散乱による迷光の影響を低減するためにウィンドウの手前には絞りを入れている。	66

4.37 今回の実験セットアップのスループット。975-1075[*nm*]でトップハット型に近似すると、光学系のスループットは64.4%となる。ただし、近似は900-1150[*nm*]で積分した時に光学系のスループットとトップハットの近似の積分値が同じになるように行った。 66

4.38 812, 900, 925, 950[*K*]における量子効率の測定結果。ただしエラーバーは黒体炉の温度測定誤差 ± 3 [*K*]と、黒体炉開口から検出器までの距離の測定誤差 ± 2 [*mm*]を含んでいる。 67

4.39 812[*K*]で測定された量子効率マップ。検出器の周囲の量子効率が100%を超えてしまっている。これはデュワー内で散乱された光が検出器の側面から入射することで発生していると考えられる。 68

4.40 パーシステンス測定のセットアップ。検出器の前にはLEDが固定してあり、このLEDはデュワー外部に置かれたRaspberry Piによって制御される。 68

4.41 LED制御のためのセットアップの概念図。メカニカルリレーのコイル部に接続されたGPIOピンの出力がHIGHの時のみLEDに電流が流れ、光るようになっている。ここで、メカニカルリレーを途中で挟んだ理由は、Raspberry PiのGPIOピンの出力がLOWの時も500[*mV*]程度の電圧が存在しており、LEDが常に光ってしまっていたためである。また、ソリッドステートリレーを使用した時もLEDに印加される電圧を0[*V*]にすることは出来なかった。 69

4.42 今回行った実験の概要。1回目の積分の最初にLEDを一瞬点灯させ、その後1000[*s*]間の非破壊読み出しを行った。2-4回目の積分ではLEDでの露光によって生じたパーシステンスを約10000[*s*]間にわたって測定した。 69

4.43 1回目の積分でのカウント変化(上)と2-4回目の積分でのカウントの変化(下)。 70

4.44 さまざまな露出レベルにおける、露出レベルに対するパーシステンスの割合。 71

4.45 暗電流を 5×10^{-3} [*ADU/s/pix*]に固定した時の、パーシステンス信号のフィッティング。暗電流の大きさもフィッティングパラメータにしている場合に比べ、暗電流が大きくなっているため、高ケイデンスで読み出しを行った積分開始から100[*s*]程度まではこちらの方がフィッティング精度が良いが、低ケイデンスで読み出しを行った積分の後半ではフィッティング精度が悪化している。 72

4.46 暗電流を 5.0×10^{-3} [*ADU/s/pix*]に固定した時の、さまざまな露出レベルにおける露出レベルに対するパーシステンスの割合。 72

4.47 パーシステンス信号の大きさを規格化した際のパーシステンス信号の増加の様子。 73

4.48 パーシステンス信号を(4.3)の形でフィッティングを行った際の係数。 73

4.49 パーシステンス画像から作成した中央値画像(左)と標準偏差画像(右)。中央値画像の赤枠で囲まれた中心の 18×18 の領域の中央値を横軸に、標準偏差画像の赤枠で囲まれた中心の 18×18 の領域の中央値を二乗したものを縦軸にプロットしたものが図4.50の黒丸である。また、この領域内の検出器グローは平均すると 6.6×10^{-2} [*e⁻/read*]程度である。 74

4.50 異なる露光レベルのパーシステンス信号のフォントランスファーカーブ。二次元ヒストグラムは中央値画像と標準偏差画像の 18×18 の領域内のすべてのデータを、黒点は領域内の中央値のみをプロットしたものであり、赤実線は黒点を直線でフィッティングしたものである。 75

4.51 各露出レベルにおけるパーシステンス信号のコンバージョンファクター。 75

4.52 図4.50の異なる露光レベルのパーシステンスデータのうち、積分時間が115[*s*](最終フレーム)のデータのみをプロットしたもの(黒丸)。ただし、一番左のデータ点は露光から十分に時間が経った(LEDで0[*ms*]のフラッシュ露光をした)後にUp-the-Ramp Samplingで取得した $t_{int} \simeq 115$ [*s*]積分(101枚)のダーク画像の最終フレームのデータを用いている。エラーバーは 18×18 の領域内の 1σ であり、赤点線は、光電子のフォントランスファーカーブ。パーシステンスのカウントが大きくなっても、分散の大きさはあまり変化しない。 76

4.53 Tulloch et al. (2019) の Fig.17. 上がパーシステンス信号、下が LED によるフラッシュ露光後に減少した信号である。露光後 1000[s] 程度は急激にカウントが減少するが、その後は一定のレートでカウントが減少していく。	77
4.54 LED によるフラッシュ露光後の信号の減少の様子。	78
4.55 露光レベル対リーク電流の大きさのプロット。今回の実験では露光レベルとリーク電流の大きさに関係は見られていないが、暗電流の大きさ ($3.7 \times 10^{-3} [ADU/s/pix]$) と比べると一桁程度大きい。ただし、リーク電流と暗電流は向きが逆であることに注意。	79
4.56 Tulloch et al. (2019) の Fig.16. 左図が soak 期間中のフォントランスファーカーブ、右図が detrapp 期間のフォントランスファーカーブと光電荷のフォントランスファーカーブ。soak 期間の開始からまもない間はカウントが減少しているが、途中から暗電流が支配的になりカウントが上昇している。soak 期間中に減少する信号のコンバージョンファクターは光電荷のものに比べて大きいことがわかる。	79
4.57 soak 期間の画像のカウントと分散の時間発展の様子。左側は横軸:露光直後のフレームからのカウント変化、縦軸:分散としたプロット、右側が横軸:積分時間、縦軸:フォントランスファーカーブのフィッティング直線からの残差としたプロットである。	80
5.1 SWIMS の検出器システムの概念図。	81
5.2 HAWAII-2RG™(左) とそのピクセル配置図。参照ピクセルが感光ピクセルを取り囲むように幅 4 ピクセルで配置されている。	82
5.3 簡略化された SIDECAR™ のブロック図 (Loose et al. 2005)	83
6.1 各検出器で取得された 1.5[s] 積分の CDS フラット画像。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。	84
6.2 B2 検出器で得られた CDS 画像の一部を拡大したもの。B2 検出器にはこのような crosshatch pattern が存在する。	85
6.3 SWIMS チームの小山氏により作成された各検出器のバッドピクセルマップ。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。ただし、白いピクセルがバッドピクセルである。	85
6.4 バッドピクセルマスクされた 15[s] 積分の CDS フラット画像。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。ただし、B2 検出器に関しては 17.5[s] 積分の画像から 1.5[s] 積分の画像を減算したのちに参照ピクセル補正をしてある。	86
6.5 横軸:フレームナンバー、縦軸:画像の中央値のプロット。カウントで表したフルウェルは B1: $5.2 \times 10^4 [ADU]$ 、B2: $4.5 \times 10^4 [ADU]$ 、R1: $5.0 \times 10^4 [ADU]$ 、R2: $5.3 \times 10^4 [ADU]$ である。B2 検出器のカウントの伸びが緩やかである理由は §6.3 で述べる。	87
6.6 検出器の非線形性。Ratio は図 6.5 のデータを 2000-5000 で線形フィッティングした直線で画像の中央値カウントを割ったものであり、1 に近いほど線形に近いことを意味する。	87
6.7 非線形性補正適用前と適用後の非線形性の比較。ただし、左側のプロットにおいて、黒点線が非線形性補正前の画像の中央値カウント、青実線は黒点線の 2000-5000[ADU] でのフィッティング直線、赤点線は非線形性補正後の画像の中央値カウントである。また、右側のプロットにおいては、黒点線は左側のプロットの黒点線と青実線の比、青実線は Ratio の 5 次の多項式フィッティング曲線、赤点線が左側のプロットの赤点線と黒点線の比である。ただし、非線形性の補正に用いた Ratio のフィッティング曲線 (右図青実線) は 12 個のデータセットを全て用いて算出したフィッティング曲線であり、個々のデータセットのデータ (右図黒点線) にフィッティングを行った結果ではないことに注意。ウェルのほぼ全域において画像の平均的な非線形性を 1% 以内に抑えられていることがわかる。	89
6.8 非線形性補正前のピクセルの非線形性。ただし、ピクセルは crosshatch pattern のカウントの高いピクセルと低いピクセルから均等に選ばれている。B2 検出器は他の検出器に比べて非線形性の大きさにばらつきが大きい。	90

6.9	図 6.8 と同じピクセルに検出器の平均的な非線形性を用いて非線形性の補正を行った時の非線形性。B2 検出器のピクセルには非線形性の補正が十分でないものと過剰にかかっているものが存在する。	90
6.10	図 6.8 と同じピクセルにピクセル毎に非線形性のフィッティングを行った結果を用いて非線形性の補正を適用した時の非線形性。図 6.9 と比較すると非線形性補正の精度が向上している。	91
6.11	ウェルの約 9 割 (表 6.1 の非線形性フィット範囲 (max) を参照) における非線形性の大きさ。どの検出器でも”picture frame”と呼ばれる、検出器の外縁を縁取るパターンに類似したパターンが見えているが B2 検出器で最も顕著である。また、B2 検出器にはフラット画像でも見えていた crosshatch pattern が確認できる。	92
6.12	中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。2048 × 2048[pix^2] の画像を 64 × 64[pix^2] の領域に分割してその領域内の統計値を計算して生成した 32 × 32 の要素を持つ画像である。これらの画像は R1 検出器のものである。	93
6.13	フォントランスファーカーブの 2 次元ヒストグラムと、フォントランスファーカーブのフィッティング直線。ただし、フィッティングにはカウントが 2000-5000[ADU] の範囲内のデータを用いた。	93
6.14	各検出器のチャンネルごとのコンバージョンファクター。	94
6.15	B2 検出器の中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。検出器の中央から右上にかけて中央値画像のカウントは同程度だが、標準偏差が大きい領域が広がっている。	94
6.16	同じ積分時間 (~ 60[s]) の 2 枚のフラット画像の差分画像。crosshatch pattern は固定パターンであるため、差分を取ることで除去されている。	96
6.17	横軸:中央値画像のカウント、縦軸:標準偏差画像のカウントの二乗とした 2 次元ヒストグラム。ただし、赤実線は最も度数の大きい分散ビンを示している。	98
6.18	B2 検出器の 1.5[s] 積分のダーク画像 (左) と行ごとのカウントの中央値 (右)。リセットアノマリーは検出器の上部に向かうにつれ指数的に減衰しており、検出器の上側 1/3 程度はリセットアノマリーの影響は見られない。	98
6.19	B2 検出器についてフォントランスファーカーブのプロットの表示範囲を -100 ~ 1400[ADU] まで広げたもの。リセットアノマリーによりカウントが大きい場所でも分散はカウントが小さいところと変わらない (コンバージョンファクター換算で $g_c \approx 115[e^-/ADU]$)。このことはリセットアノマリーが読み出しノイズの評価に影響を与えないだけでなく、リセットアノマリーはほぼノイズがないことを意味する。	99
6.20	各検出器のチャンネル毎の読み出しノイズ。ただし、読み出しノイズの電子数への変換の際は、B1,R1,R2 検出器に関しては図 6.14 の対応するチャンネルのコンバージョンファクターを、B2 検出器に関しては回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター $g_c^{param} = 3.13[e^-/ADU]$ を用いている。	99
B.1	検出器冷却システムの概念図	111
B.2	TARdYS のデュワーの外観 (左) と内部 (右)。	112
B.3	2 回分の冷却試験中の圧力と work surface の温度。液体窒素を入れると真空度が悪化し、液体窒素が切れると真空度が改善する様子が見られた。	114
B.4	実験の概念図 (左) と実際のセットアップ (右)	115
B.5	液体窒素タンクを真空引きした時とそうでない時の比較。液体窒素タンクを真空引きした際に、真空度の大幅に改善が見られた。	116
B.6	ヘリウムリークテストのセットアップの概念図 (左) と実際のセットアップ (右)。リークテストは、ヘリウムガスを液体窒素タンクに留めるために液体窒素の注ぎ口はゴム栓で塞ぎ、普段用いている真空ポンプ側のバルブは閉じた状態で行った。	117

B.7	液体窒素ポートと液体窒素タンクの接続部の模式図 (左) とネジの増し締めの様子 (右)。	118
B.8	特定されたリーク箇所。リークはディップろう付けの際にフラックスを抜くための開口部を溶接した場所からであった。	118
B.9	修理後の cold plate の様子。赤丸で囲まれた部分が再溶接箇所。	119
C.1	$n_{sample} = 1$ の時のフォントランスファーカーブ。	121
C.1	$n_{sample} = 1$ の時のフォントランスファーカーブ (続き)。	122
C.2	$n_{sample} = 2$ の時のフォントランスファーカーブ。	123
C.2	$n_{sample} = 2$ の時のフォントランスファーカーブ (続き)。	124
C.3	$n_{sample} = 16$ の時のフォントランスファーカーブ。	125
C.4	$n_{sample} = 16$ の時のフォントランスファーカーブ (続き)。	126
C.5	解析に用いるメジアンスタック画像とそのカウントのヒストグラム。メジアンスタック画像の周辺部は迷光の影響で明るくなっている。	127
C.6	warm/cold pixel の選定の際の画像の分割方法。青色の領域がバッドピクセルが集中しているクラスター領域である。また、方眼は $27 \times 27 [pix^2]$ の領域を示している。	128
C.7	warm pixel map(左) と cold pixel map(右)。warm pixel と cold pixel は白で表されている。	128
C.8	warm/cold pixel をマスクした際の画像のヒストグラム。	129
C.9	ほこりによるアーティファクトを取り除く前 (左) と後 (右) の warm/cold pixel map。	129
C.10	5 枚のリセットフレームを最大値でスタックした画像。宇宙線イベントは見られない。	130
C.11	中央値モザイク画像と中央値減算画像。	130
C.12	hot pixel map。hot pixel も warm/cold pixel と同様に四隅に集中している。	131
C.13	warm/cold pixel map と hot pixel map をマージして作成した bad pixel map。	131

表 目 次

1.1	TAO6.5m 望遠鏡の主要パラメータ (Minezaki et al. 2020)	2
1.2	TARdYS の仕様 (Rukdee et al. 2019)。	4
1.3	SWIMS の仕様 (Motohara et al. 2014)。	5
3.1	1.3k × 1.3kInGaAs 検出器の諸元。	27
4.1	検出器試験時の駆動パラメータ。	41
4.2	非線形性の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	41
4.3	検出器の非線形性。ただし、電子数に直す際のコンバージョンファクター g_c は §4.4.1 で求めた $g_c = 3.88[e^-/ADU]$ を用いており、非線形性補正後のカウントに g_c を乗じて求めている。 . . .	43
4.4	コンバージョンファクターの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	46
4.5	コンバージョンファクターの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	49
4.6	warm pixel の周りの信号のクロストークの様子、割合と、そこから求まるコンバージョンファクターの補正係数。	50
4.7	読み出しノイズの n_{sample} 依存性の測定に用いたデータのパラメータ。	51
4.8	読み出しノイズの $n_{osample}$ 依存性の測定に用いたデータのパラメータ。	55
4.9	$n_{sample} = 1$ に固定し、 $n_{osample}$ を変化させた時の (真の) 読み出しノイズ。	55
4.10	検出器グローの評価に用いたデータのパラメータ。	55
4.11	検出器のグローの強度。	57
4.12	暗電流の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	57
4.13	異なる温度での暗電流の大きさ。	60
4.14	リセットアノマリーのリセットパルス長依存性の調査に用いたデータセットの読み出しパラメータ。	63
4.15	リセットパルスの継続時間を変化させた時の積分時間対カウントプロットのフィッティング直線の y 切片の大きさと暗電流の大きさ。ただし、明らかにアナログフロントエンドの電源 ON/OFF に影響を受けているデータは除外してある。	63
4.16	リセットアノマリーの継続時間の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	64
4.17	リセットアノマリーの大きさから算出された感光ピクセルと参照ピクセルの温度差。	65
4.18	量子効率測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	67
4.19	パーシステンスの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。	69
5.1	HAWAII-2RG™ の諸元。	82
5.2	検出器の読み出し回路の構成。	83
6.1	非線形性測定のための各種パラメーター	87
6.2	各検出器の非線形性の大きさ。ただし、電子数は非線形性補正後のカウントにコンバージョンファクター g_c を乗じて求めており、 g_c は B1,R1,R2 検出器は表 6.4 の値を、B2 検出器は表 6.6 の値を用いている。	88

6.3	warm pixel の周りの信号のクロストークの様子、割合と、そこから求まるコンバージョンファクターの補正係数。	95
6.4	画素間容量の影響を補正した際のコンバージョンファクター。	95
6.5	現在の検出器の回路パラメータ	96
6.6	回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター	96
7.1	TARdYS 検出器システムの性能評価結果。	101
7.2	SWIMS 検出器システムの性能評価結果。	102
B.1	クライオスタットの仕様。	112

第1章 序論

1.1 TAO Project 概要

1.1.1 TAO サイト

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターでは、チリ共和国アタカマ高地のチャナトール山頂 (標高 5,640m) に東京大学アタカマ天文台 (The University of Tokyo Atacama Observatory ; TAO) 6.5m 望遠鏡を建設中である。TAO サイトは良好なシーイング条件 (median FWHM $\leq 0''.8$ (Yoshii et al. 2010, Motohara et al. 2011)) と高い晴天率 ($> 80\%$ (Motohara et al. 2011, Miyata et al. 2008)) を持ち、非常に低い水蒸気量 (可降水量 (Precipitable Water Vapor ; PWV) $\sim 0.5[mm]$ (Motohara et al. 2011, Konishi et al. 2015, Doi et al. 2018)) による赤外線の高い透過率という、他の主要なサイトに比べて赤外線観測に有利な条件を持ったサイトである (図 1.1 参照)。

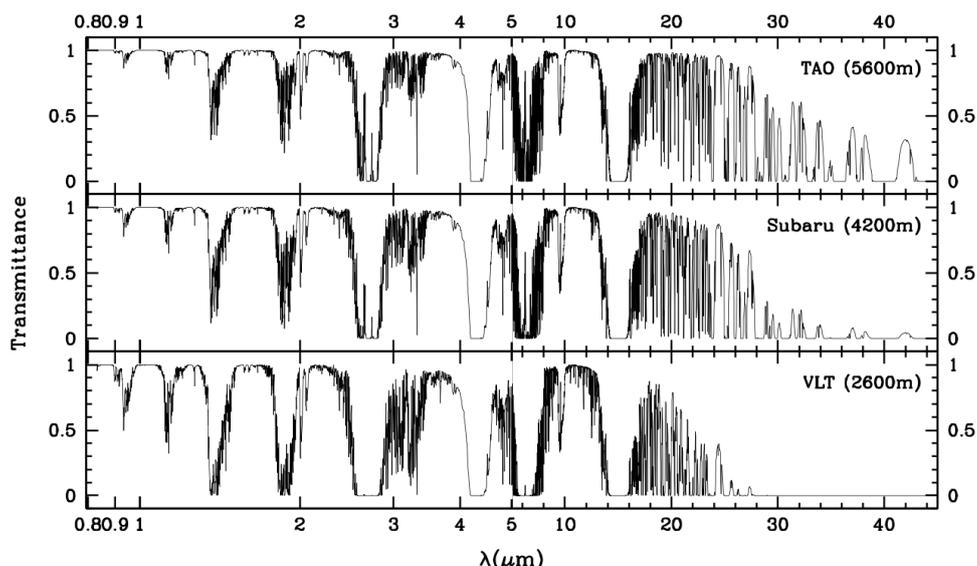


図 1.1: TAO と他の主要観測サイトとの大気透過率の比較 (0.8 ~ 45 [μm])。 (上) TAO サイト (チャナトール山) : 5600[m], 498[hPa], PWV = 0.5[mm]、 (中) すばるサイト (マウナケア) : 4200[m], 600[hPa], PWV = 1.0[mm]、 (下) VLT サイト (パラナル山) : 2600[m], 737[hPa], PWV = 6.0[mm] (Yoshii et al. 2010)。

1.1.2 TAO 6.5m 望遠鏡

TAO 6.5m 望遠鏡は、主鏡 (6.5[m])、副鏡 (0.9[m])、第三鏡 (1.1[m] \times 0.75[m]) のリッチー・クレチアン型光学系を採用している (表 1.1 を参照)。望遠鏡を構成するすべての鏡は軽量なハニカム構造になっており、主鏡は空気圧アクチュエータで支持され、鏡面形状はリアルタイム波面測定によりアクティブに制御される。焦点は全部で 4 つ (大型観測装置用のナスミス型 2 つ、持ち込み観測装置用のベントカセグレン型 2 つ) 存在し、

ナスミス焦点には第一期観測装置の SWIMS、MIMIZUKU、NICE のうち 2 台が、ベントカセグレン焦点には第二期観測装置の TARdYS のファイバーフィード光学系が設置される予定である。合成 F 値は 12.2 であり、すばる望遠鏡のカセグレン焦点の F 値と同じである。これにより TAO6.5m 望遠鏡とすばる望遠鏡の観測装置は、わずかな改造を加えるだけでもう一方の望遠鏡に取り付けることができる (Yoshii et al. 2020)。

望遠鏡の 3 枚の鏡や支持システムを含む光学部品はアリゾナ大学の Richard F. Caris Mirror Lab によって製作、試験され、望遠鏡マウントは、株式会社西村製作所が日本で設計、製作、組立、試験を行った。詳細は Minezaki et al. (2020) を参照のこと。

表 1.1: TAO6.5m 望遠鏡の主要パラメータ (Minezaki et al. 2020)

光学系	基本光学系	リッチー・クレチアン
	合成 F 値	12.2
	焦点距離	75074[mm]
	プレートスケール	2".7475[/mm]
	視野	$\phi 25'$
主鏡 (M1)	直径	6512.6[mm]
	曲率半径	16256[mm]
	円錐係数	-1.004
	有効口径	6153.8[mm]
副鏡 (M2)	直径	916[mm]
	曲率半径	2657[mm]
	円錐係数	-1.58331
主鏡-副鏡間距離		6943.2[mm]
第三鏡 (M3)	長軸直径	1100[mm]
	短軸直径	750[mm]
焦点		ナスミス $\times 2$ 、ベントカセグレン $\times 2$
バックフォーカス		4000[mm]
コーティング	M1,M2,M3	アルミニウム

1.1.3 山頂施設

TAO の山頂施設は大きく分けて望遠鏡エンクロージャと観測運用棟の二つからなりこれらは橋でつながっている。山頂施設の完成予想図を図 1.2 に示す。

望遠鏡エンクロージャは高床式で、固定ベース構造および回転カーセル構造から成っており、カーセル構造はベース構造に固定された台車上で動く。エンクロージャのベース構造には制御室、コンプレッサー室、電気設備室、冷却装置室などがある。また、観測運用棟は観測室、サーバー室、発電機室、電気設備室、ラウンジ、鏡面コーティング装置、研究室等から成る (Doi et al. 2018, Yoshii et al. 2014, 2020)。



図 1.2: TAO の山頂観測施設の完成予想図。観測運用棟 (左) と望遠鏡ドーム (右) の二つが橋でつながった構造をしている。

1.2 TARdYS 概要

TARdYS (TAO AIUC high resolution (d) Y-band Spectrograph) は TAO 6.5m 望遠鏡の第二期近赤外線観測装置として開発中の装置であり、 $0.843 - 1.117[\mu\text{m}]$ をカバーする、Y バンドに特化した $R = 66000$ のファイバーフィード型高分散赤外線分光器である。この装置の概略図とプロトタイプを図 1.3 に示す。検出器とカメラ光学系の最終レンズは液体窒素デューワーの中に設置され、それ以外は室温というセミクライオジェニックなセットアップになっており、分光器のサイズを小さくし、運用上の複雑さを可能な限り減らしている (Doi et al. 2018)。望遠鏡で集光された光はベントカセグレン焦点から光ファイバーを通過して望遠鏡エンクロージャの隣の観測運用棟にある TARdYS まで導かれ、エシエル回折格子により分散された後、クロスディスパーザーにより次数分離され検出器上で結像する。

TARdYS のスペックを表 1.2 に示す。TARdYS は南半球に設置される数少ない視線速度 (RV) 測定に最適化された近赤外分光器の一つであり、TAO サイトの高い近赤外線透過率を生かした恒星の視線速度測定により、主に M 型星周りの系外惑星の探査を行う。

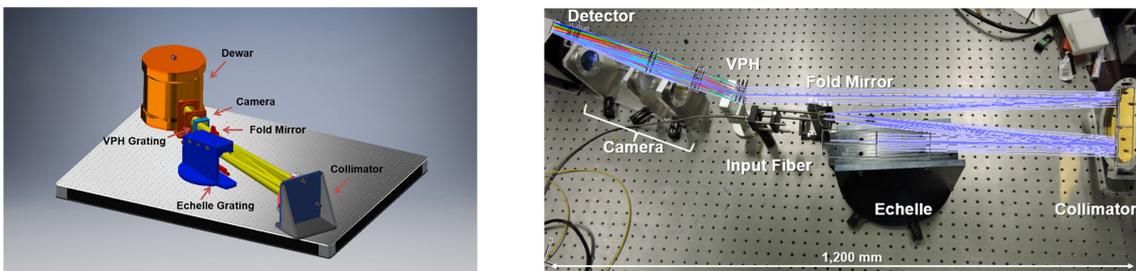


図 1.3: TARdYS の概略図 (左) とチリ・カトリカ大学で製作されたプロトタイプ (右)。

表 1.2: TARdYS の仕様 (Rukdee et al. 2019)。

波長	0.843 – 1.117[μm]	
検出器	1.3k × 1.3k InGaAs フォトダイオードアレイ検出器	
波長分解能	66000	
RV 測定精度	< 2.2[m/s] ¹	
次数	133 _{rd} – 175 _{th}	
視野	$\phi 0'4$	
入力	Fiber and image-slicer	
光学配置	White pupil	
回折格子	製品	Richardson Gratings™R6 Echelle
	格子周波数	13.33[/mm]
	ブレード角	80.6°
	寸法	180 × 30[mm]
クロスディスペルザ	製品	Kaiser Optical system, Inc. 透過型 VPH 回折格子
	格子周波数	333[/mm]

¹ スペクトル型 M9 の恒星を波長 $1\mu\text{m}$ で $S/N = 100$ で観測した場合 (Reiners et al. 2010)。

1.3 SWIMS 概要

SWIMS(Simultaneous-color Wide-field Multi-object Spectrograph; 近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置) は、TAO6.5m 望遠鏡の第一期近赤外線観測装置として東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターで開発された装置である (Konishi et al. 2012, Motohara et al. 2014)。SWIMS は、TAO6.5m 望遠鏡の特長を最大限に利用するため、波長 0.9 – 1.4[μm] と波長 1.4 – 2.5[μm] の 2 色を同時に観測する設計となっている。図 1.4 に SWIMS の外観と概略図を示す。入射光はダイクロミックミラーにより短波長側の Blue Arm と長波長側の Red Arm に分けられ、それぞれの焦点面に搭載された検出器上で結像する。観測モードは、撮像、多天体分光、面分光の 3 モードを備えており、観測モードはデューワー上部に取り付けた多天体分光マスク交換ユニット (Multi-Object Spectroscopy Unit; MOSU) と各 Arm に配置されたフィルターホイールによって切り替える。MOSU には多天体分光マスクや面分光ユニット (Integral Field Unit ; IFU) が収納されている。IFU の光学系は非常にコンパクトに設計されており、MOSU で他のスリットマスクと同様に扱うことができる (Kitagawa et al. 2014)。また、MOSU がマスクと IFU をロボットアームで焦点面に引き出すことで、観測中も迅速に観測モードの切り替えが可能である (Takahashi et al. 2014)。フィルターホイールには広帯域・中間帯域・狭帯域フィルタとグリズムが配置され、ホイールの回転により撮像モードと分光モードを切り替える。

SWIMS は 21A から 22B まですばる望遠鏡に持ち込まれ、PI 観測装置として共同利用に供されていた。今後、一旦日本に輸送し、改修されたのちに、チリに持ち込まれる予定である。

SWIMS のスペックを表 1.3 に示す。SWIMS は広い視野 (TAO6.5m 望遠鏡搭載時で $\phi 9'6$) と 2 色同時観測により高効率の近赤外線観測を実現する。高い近赤外線透過率や長い望遠鏡占有時間といった優位性を持つ TAO6.5m 望遠鏡と SWIMS を組み合わせることにより独創的な観測が可能となり、様々な科学目標に迫ることが可能となる。

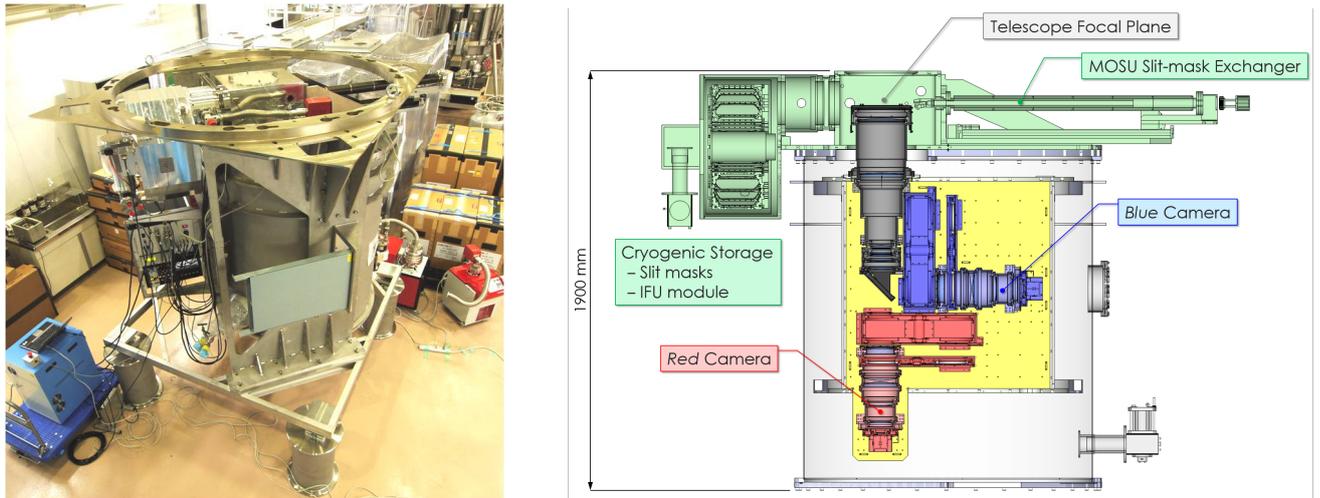


図 1.4: SWIMS の外観 (左) と概略図 (右)。望遠鏡からの光はコリメータレンズを通過した後、ダイクロイックミラーによって短波長側 (Blue Arm) と長波長側 (Red Arm) に分割される。分割された光はホイールの回転によって選択されたフィルターやグリズムを通過し、それぞれの焦点面に取り付けられた検出器上に結像する。これらの光学系は真空中に引かれたデュワー内部の光学ベンチに収納され、 $\sim 80K$ まで冷却される。

表 1.3: SWIMS の仕様 (Motohara et al. 2014)。

	すばる望遠鏡	TAO6.5m 望遠鏡	
観測モード	撮像、多天体分光、面分光		
波長	0.9 – 1.4[μm](blue)/1.4 – 2.5[μm](red)		
視野	6'6 × 3'3	ϕ 9'6	
検出器	HAWAII-2RG × 2[/arm]	HAWAII-2RG × 4[/arm]	
ピクセルスケール	0"096[/pix]	0"126[/pix]	
望遠鏡焦点	カセグレン	ナスミス	
焦点面曲率半径	2400[mm]	1250[mm]	
寸法	2[m] × 2[m] × 2[m]		
重量	2.5[ton]		
分光波長分解能	1950 – 3030(blue)/1550 – 2760(red)		
5 σ 限界等級 ¹	撮像	$J = 24.8, H = 24.3, K_s = 24.4$	$J = 24.5, H = 24.0, K_s = 24.1$
	分光	$J = 22.0, H = 21.3, K = 21.2$	$J = 21.7, H = 21.0, K = 20.9$

¹ 限界等級はシーイング 0"5、積分時間 3600s とした時の点源天体の AB 等級である。

第2章 検出器性能評価

2.1 近赤外検出器アレイの基礎

2.1.1 半導体

同種の原子が近づくと、全く同じエネルギーを持っていた軌道同士が相互作用することにより、エネルギーの低い方と高い方にずれた新しい二つの軌道を作る。原子の数が増えていくと、それに応じて軌道の数も増え、複数の原子間の相互作用により少しずつずれたエネルギー準位作り出し、結晶のような原子が非常に多く集まった構造では、エネルギー準位が非常に狭い間隔で並んで、図 2.1 のようなバンド状の準位を作る。このような連続とみなすことができる一連のエネルギー準位のことをエネルギーバンドと呼び、特に価電子 (最もエネルギーが高い電子が詰まった軌道にある電子) のあるエネルギー準位によって作られるエネルギーバンドを価電子帯、その上のエネルギーにある空軌道によって作られるエネルギーバンドを伝導帯と呼ぶ。また、価電子帯と伝導帯の間にある電子が取り得ない一連のエネルギーを禁制帯、禁制帯の幅をバンドギャップと呼ぶ。

伝導帯は空きの準位が多くあるため、電子は自由に動くことができるため伝導電子になるに対し、価電子帯は空きの準位がないため、電子は動くことができず、伝導電子にはなることができない。

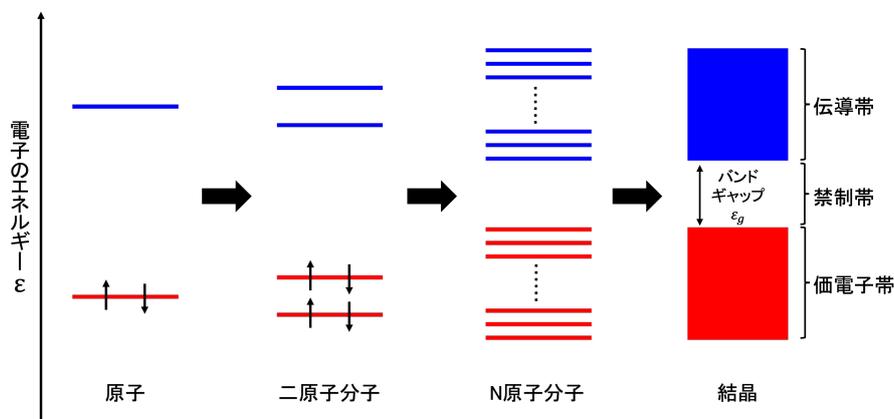


図 2.1: 原子の結合によるエネルギーバンドの形成。

結晶は大きく金属、半導体、絶縁体の3つの種類に分類することができる。

金属は価電子を含むバンドに空きがある構造になっており、価電子はそのまま伝導電子になることができる。

一方、半導体や絶縁体では、伝導帯と価電子帯の間の禁制帯の中にフェルミ準位 E_f が存在するため、価電子にバンドギャップを越えるエネルギーを与えて価電子帯から伝導帯へと電子を励起することで初めて伝導電子が得られる。半導体は禁制帯がある物質の中でも、バンドギャップが比較的小さいものである。半導体は、熱等のエネルギーにより価電子帯の電子の一部が伝導帯に励起されて伝導電子になることや、価電子帯から励起した電子の抜けた場所にホール (正孔) が発生し、正の荷電粒子の様に振る舞うことにより若干の電気伝導性を持つ。それに対して絶縁体はバンドギャップが大きく、ほとんど伝導帯に電子が励起しないため、電気伝導性を持たない。

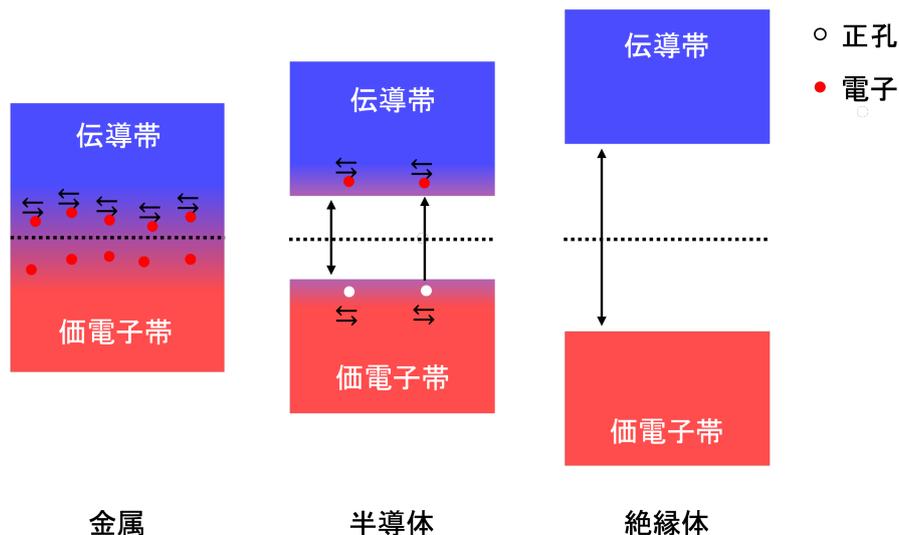


図 2.2: 金属、半導体、絶縁体のバンド構造。

2.1.1.1 真性半導体、n 型半導体、p 型半導体

これまで述べてきたような、不純物が混ざっておらず、伝導電子とそれと同数の正孔が電荷キャリアであるような半導体を真性半導体と呼ぶ(図 2.3(a) 参照)。それに対し、不純物から供給された電子や正孔がおもな電荷キャリアとなる半導体のことを不純物半導体と呼ぶ。

不純物半導体の中でも電子が主なキャリアになるような半導体を n 型半導体とよぶ。n 型半導体では図 2.3(b) のようにフェルミ準位がバンドギャップの中心より上側に存在するため、伝導帯に多数の電子が存在する。例えば、図 2.4(左) のようにシリコンの半導体にリン (P) やヒ素 (As) などの 5 価の元素を添加 (ドーピング) した時を考えると、1 つの電子が共有結合されずに余ることになる。余った電子は少しのエネルギーを受け取るだけで伝導帯へ励起され、伝導電子になることができる。この場合のリンやヒ素のように半導体に電子を与える不純物のことをドナーと呼ぶ。

一方、正孔が主なキャリアになるような半導体を p 型半導体と呼ぶ。p 型半導体では図 2.3(c) のようにフェルミ準位がバンドギャップの中心より下側に存在するため、価電子帯に多数の正孔が存在する。例えば、図 2.4(右) のようにシリコンにホウ素 (B) などの 3 価の元素をドーピングした時のことを考えると、共有結合のための電子が一つ足りない状態になる。そのため、小さなエネルギーでシリコンからの電荷を受け取ることができ、その結果、価電子帯には電子の足りない正孔ができる。この正孔に電子が移動してくることにより正孔も移動するため、この正孔はキャリアになることができる。この場合のホウ素のように電子を受け入れて、半導体に正孔を与える不純物のことをアクセプタと呼ぶ。

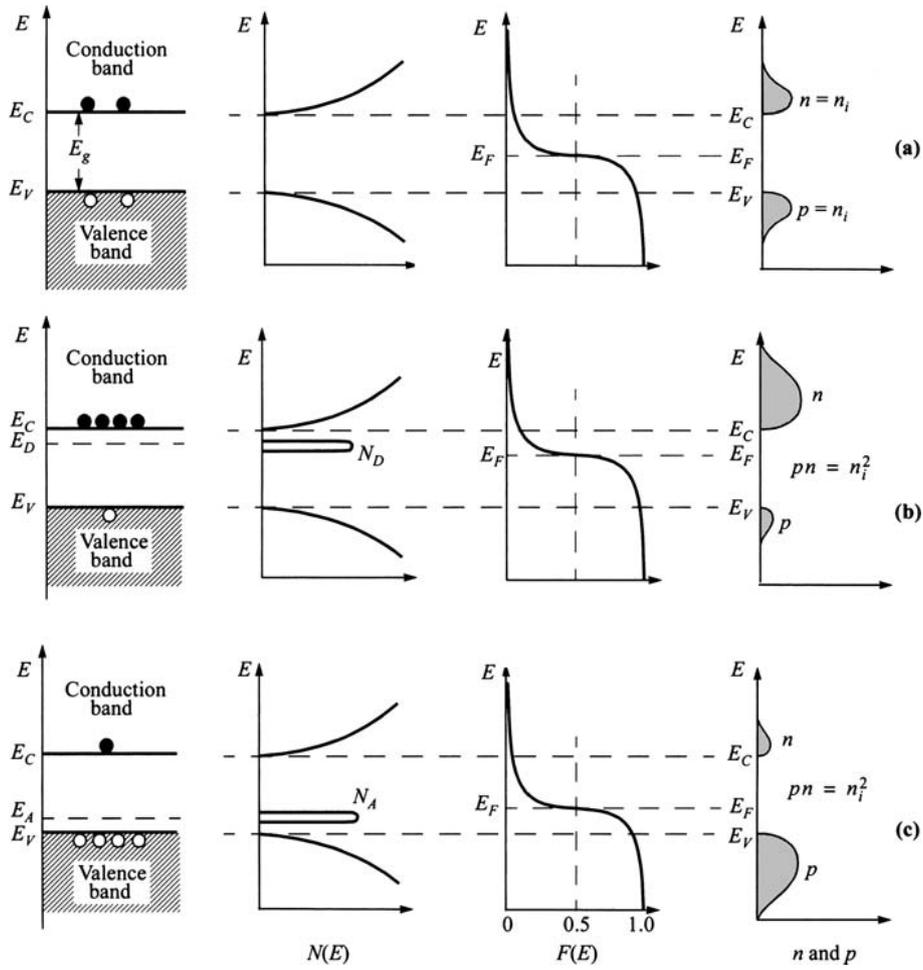


図 2.3: 真性半導体 (上)、n 型半導体 (中)、p 型半導体 (下) のバンド構造の模式図 (左 1)、状態密度 (左 2)、フェルミ分布関数 (右 2)、キャリア密度 (右 1)(出典: [Sze & Ng 2006](#))。

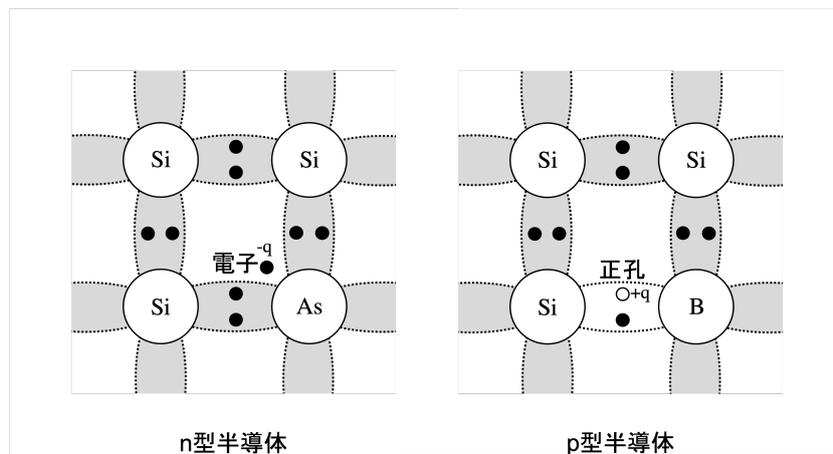


図 2.4: n 型半導体 (左) と p 型半導体 (右)。n 型半導体は共有結合の際に一つ電子があまり、p 型半導体は共有結合の際に一つ電子が足りなくなる。

2.1.2 PN 接合

p 型半導体と n 型半導体が一つの結晶内でつながったものを PN 接合と呼ぶ。PN 接合の接合部ではフェルミ準位が p 型領域と n 型領域で一致するようにキャリアが拡散し、電子と正孔が再結合する。これにより、接合面付近にキャリアがいなくなったイオン化した領域ができる。これを空乏層と呼ぶ。また、空乏層領域内の電場により発生する電位差 V_0 をビルトインポテンシャルと呼ぶ。

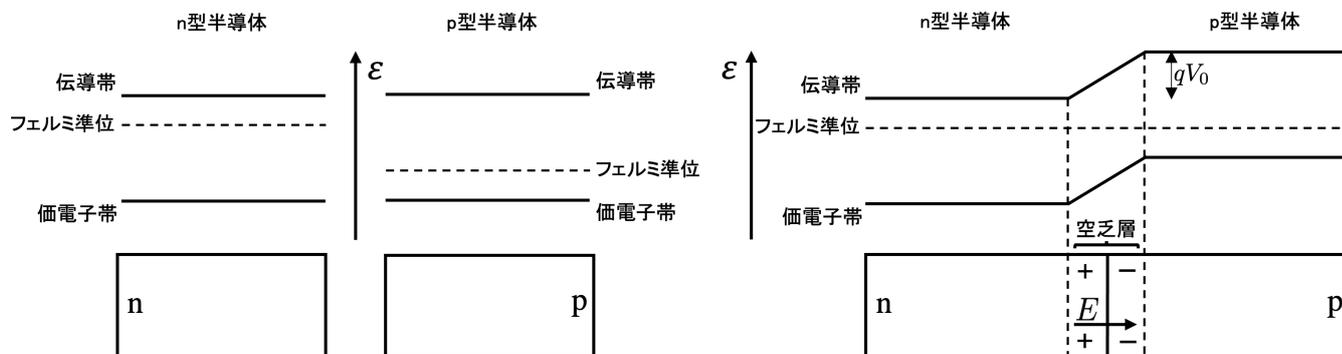


図 2.5: PN 接合の概念図。ただし、縦軸は電子のエネルギーである。

2.1.2.1 バイアス

- 順バイアス

p 型半導体側に n 型半導体側に比べて正の電圧を印加することを順バイアスをかけるという。順バイアスをかけると、ビルトインポテンシャルがバイアスの分だけ小さくなり、n 型領域の多数キャリアである伝導電子が p 型領域へ、p 型領域中の多数キャリアである正孔が n 型領域へ拡散し、電流が流れる。また、この際、空乏層領域の厚みはバイアスなしの場合に比べて薄くなる。

- 逆バイアス

p 型半導体側に n 型半導体側に比べて負の電圧を印加することを逆バイアスをかけるという。逆バイアスをかけると、ビルトインポテンシャルがバイアスの分だけ大きくなり、n 型領域の少数キャリアである正孔が p 型領域へ、p 型領域中の少数キャリアである伝導電子が n 型領域へ拡散し、電流が流れる。しかし、拡散されるキャリアは順バイアスの時に比べて非常に少ないため、電流も非常に小さくなる。また、この際、空乏層領域の厚みはバイアスなしの場合に比べて厚くなる。

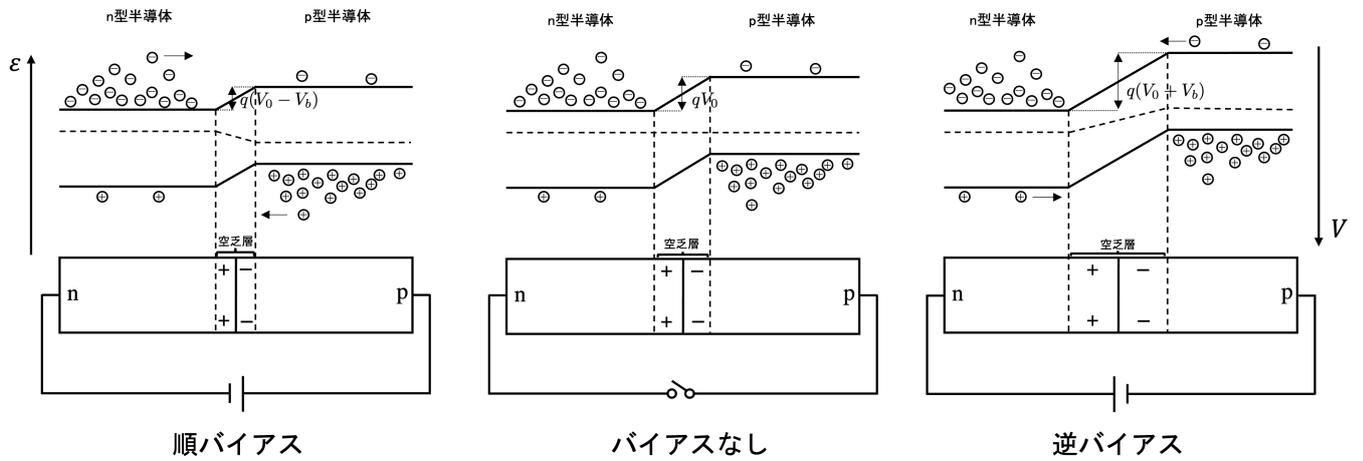


図 2.6: 順バイアス (左)、バイアスなし (中)、逆バイアス (右)。電子のエネルギーを上側が正、静電ポテンシャルを下向きが正に定めた。

2.1.3 フォトダイオード

フォトダイオードとは内部光電効果によって光のエネルギーを電流に変換する電子部品であり、図 2.7 のような記号で表される。



図 2.7: フォトダイオードの回路図記号

フォトダイオードは通常、逆バイアスをかけて用いる。十分なエネルギーを持つ光子が半導体結晶に入射すると、内部光電効果により電子正孔対が生成される。空乏層やその付近で生成された荷電粒子は、空乏層の内部電場によって移動し、伝導電子は n 型半導体へ、正孔は p 型半導体にドリフトすることで電流が流れる。この際に流れる光電流は、吸収される光子数に比例するのでフォトダイオードは光検出器として用いることができる。しかし、光が入射しなくても少数キャリアの移動や、電子の熱励起等により小さな電流が発生する。これを暗電流と呼ぶ。

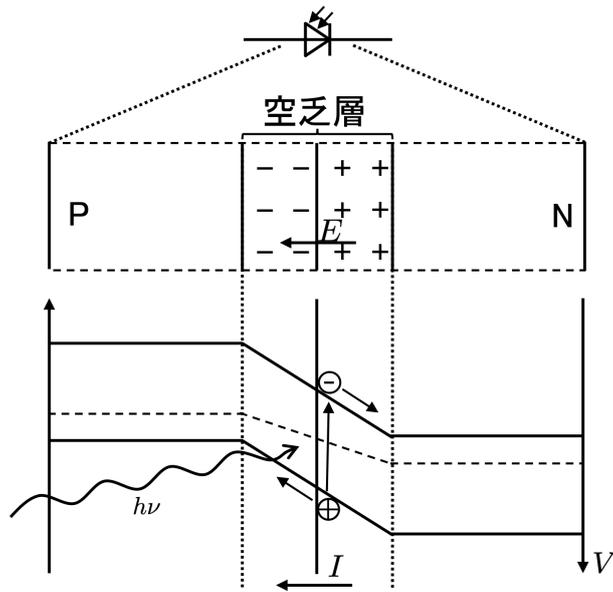


図 2.8: 光子の入射による光電流の発生。

2.1.4 MOSFET

フォトダイオードからの出力電流は電圧に変換された後に読み出されることが多い。その際にはよく MOSFET を使ったソースフォロワンプが用いられる。

MOSFET は Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) の略称である。図 2.9 に n チャネル型 MOSFET の例を示す¹。ゲート、ソース、ドレインの 3 つの端子を持ち、ゲートに印加する電圧によって、ソースとドレインの間を流れる電流を制御する。

ゲートに電圧をかけない状態では、2 つの相対する PN 接合により、電流はほとんど流れない。しかし、ゲート電圧を閾値 V_{th} よりも高くすると、ゲートの下に電子が集まり、n 型領域 (n 型反転層と呼ぶ) が形成され、ソースとドレインの間に電流が流れるようになる²。

また、n チャネル MOSFET は図 2.10 のような記号で表される。

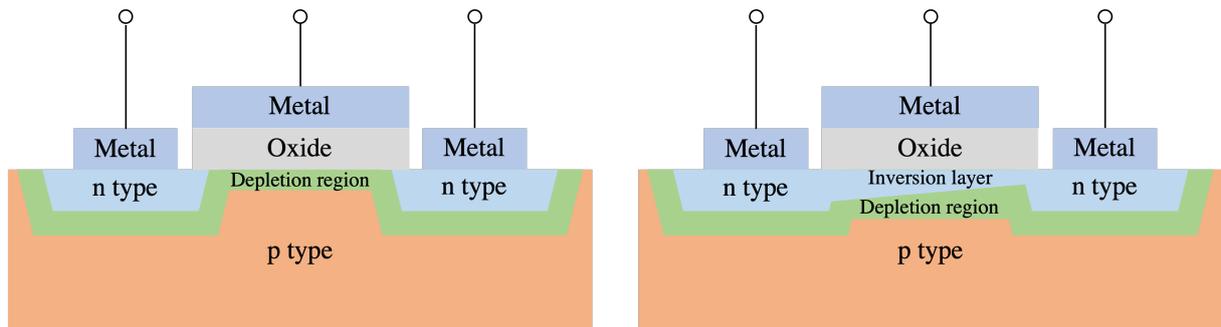


図 2.9: n チャネル MOSFET の模式図。電圧がかかっていない状態 (左) では相対する PN 接合により電流は流れないが、電圧が閾値よりも高い状態 (右) では反転層が形成されることにより電流が流れるようになる。

¹n 型半導体と p 型半導体を入れ替えると p チャネル型になる。
²この性質を用いると MOSFET はスイッチとして用いることができる。



図 2.10: n 型 MOSFET の回路図記号。図の上側がゲートである。

この MOSFET を用いて図 2.11 のようなソースフォロワ回路を構成することができる。ソースフォロワ回路はゲート端子が入力、ソース端子が出力になっており、入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} はほぼ等しくなる。

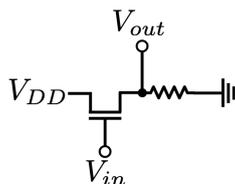


図 2.11: n チャネル MOSFET によるソースフォロワの概略図。

2.1.5 赤外フォトダイオードアレイ検出器

フォトダイオードアレイとは複数のフォトダイオードを配列したものである。赤外線を観測する場合、光子のエネルギーがシリコンのバンドギャップよりも小さいため、InGaAs、HgCdTe、InSb のようなシリコンよりもバンドギャップの小さい半導体を用いたフォトダイオードを使用する。一方で、その読み出し回路 (Readout integrated circuit ; ROIC もしくは Multiplexer ; MUX) は製造技術が発達しているシリコンで製作することが多く、赤外検出器はフォトダイオードアレイと読み出し回路を図 2.12 のようにインジウムで電氣的に接続した構造になっている。このような検出器のことをハイブリッドアレイ検出器と呼ぶ。

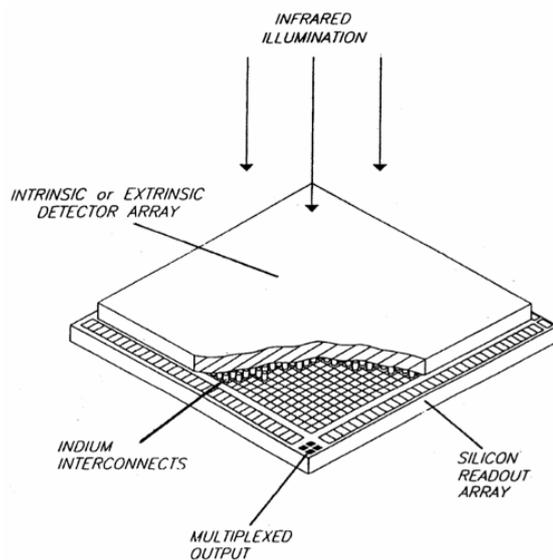


図 2.12: 近赤外フォトダイオードアレイ検出器のハイブリッド構造。近赤外線に感度を持つフォトダイオードとシリコン読み出し回路をインジウムバンプで接続した構造になっている (出典 : McLean 2008)。

また、近赤外フォトダイオードアレイは多くが感光ピクセルの周囲に参照ピクセルと呼ばれるピクセルを持つ。参照ピクセルは、感光性を持たないが、感光ピクセルと読み出し回路は同一で、同じように読み出しを行うことができる画素のことであり、バイアス電圧の変動や、 $1/f$ ノイズ、温度ドリフトを補正するために用いられる。

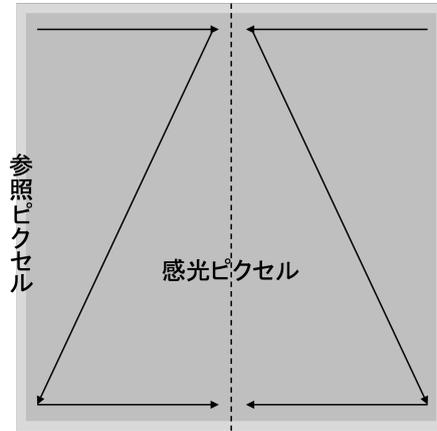


図 2.13: 参照ピクセル。図のようにラスタースキャンで読み出しを行う場合、上下のピクセルは長周期、左右のピクセルは比較的短周期のノイズを低減するために用いられる。

2.1.5.1 検出プロセス

赤外検出器は ROIC のスイッチを使って接続するフォトダイオード (ピクセル) を変えていくことで順次読み出しを行う。信号処理回路の概略図を図 2.14 に示す。

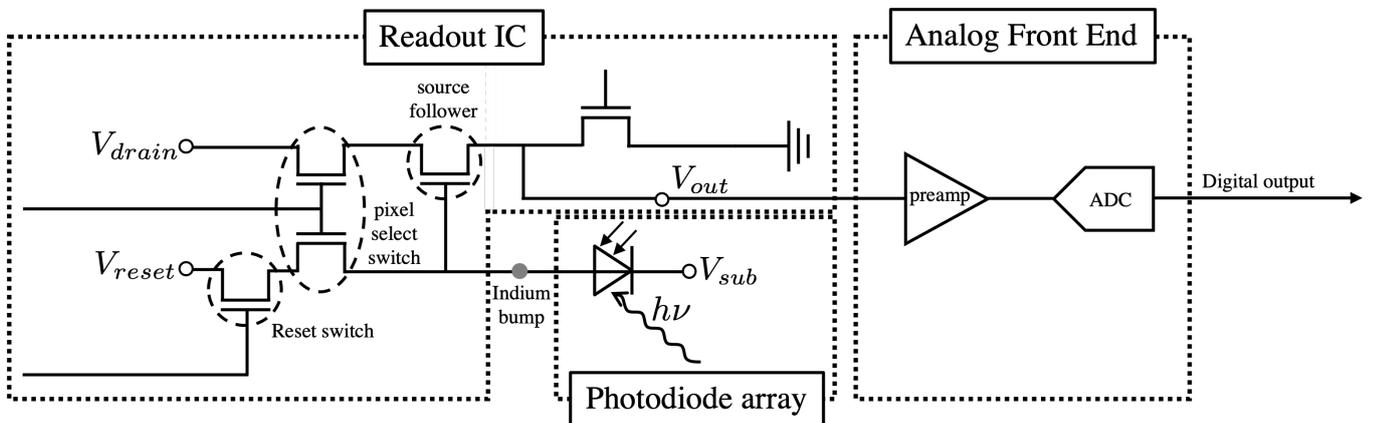


図 2.14: 検出器の 1 ピクセル分の回路とアナログフロントエンドの概略図。

検出器に入射した光子は以下のような過程を経て読み出される。

1. 内部光電効果により、電子と正孔のペアが生成される。
2. 空乏層の電場により電子と正孔が分離され、蓄積される。
3. 電荷が蓄積されることで逆バイアスが減少し、フォトダイオードによる電圧降下が変化する。

4. ソースフォロワのゲートに印加される電圧が変化する。
5. ピクセルの選択スイッチをオンにする。
6. ゲート電圧に応じた電圧が出力される。
7. 出力電圧がプリアンプで増幅される。
8. A/D 変換器で電圧がデジタル信号に変換される。
9. (リセットスイッチをオンにしてフォトダイオードをリセットする。)
10. 画素の選択スイッチを切り替え、他の画素の読み出しに移る。

ただし、9 番のリセットは省略することも可能であり、リセットを行わない読み出しのことを非破壊読み出し (non-destructive readout) と呼ぶ。

図 2.15 は検出器の出力電圧を示している。リセットスイッチを ON にしている間は出力電圧はリセット電圧 (Reset level) にほぼ張り付いているが、リセットスイッチを OFF にすると異なる電圧 (Pedestal level) に変化する。これは主にリセットスイッチの MOSFET におけるクロックフィードスルーとチャージインジェクションが原因である (Yu 2010, McLean 2008)。クロックフィードスルーとは、リセットスイッチの ON/OFF の際のゲート電圧の変化が、ゲートとドレイン/ソースのオーバーラップ容量を通して蓄積電荷数に影響を与える現象のことであり、チャージインジェクションとは、リセットスイッチが ON の時にゲートの直下の反転層に誘起された電荷がスイッチを OFF にしたときに蓄積された電荷数に影響を与える現象である。

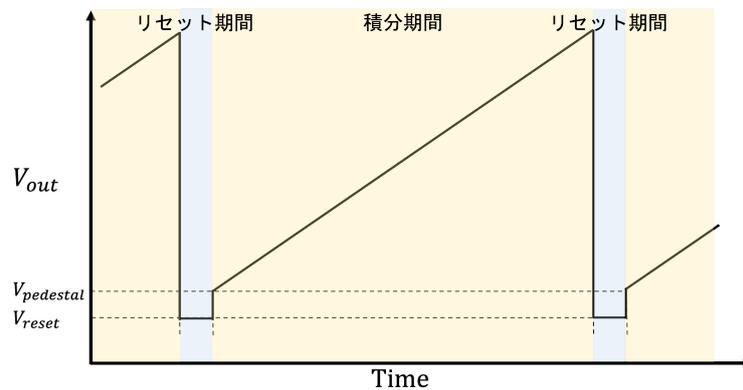


図 2.15: 検出器の出力電圧。

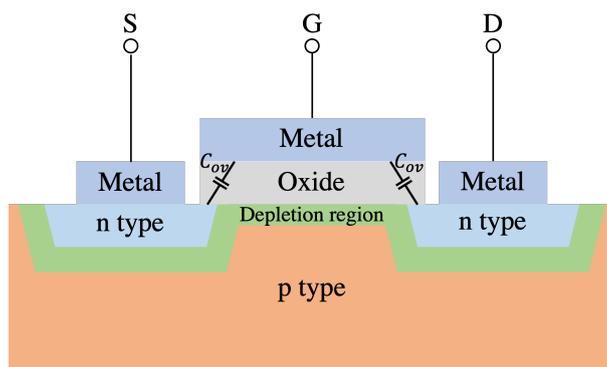


図 2.16: ゲート-ソース間とゲート-ドレイン間に生じるオーバーラップ容量。リセットスイッチの ON/OFF の際のゲート電圧の変化により、ソース、ドレイン電圧に影響を与える。

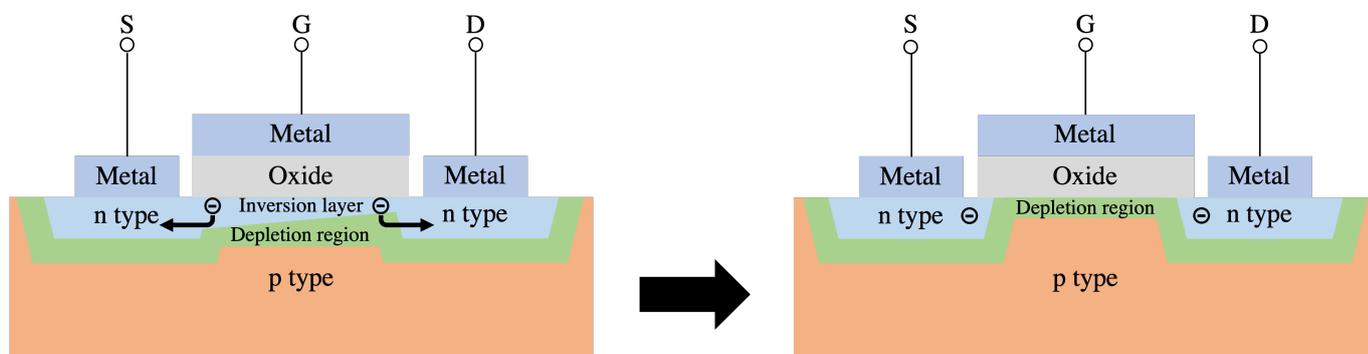


図 2.17: チャージインジェクションの概念図。図のような n チャネル型 MOSFET では反転層に誘起された電子がゲートから離れる際に蓄積電荷の数に影響を与える。

2.1.5.2 サンプルングモード

赤外フォトダイオードアレイ検出器でよく用いられるサンプルング方法は大きく分けて 4 つの種類がある。

1. Single-sampling

リセット後、積分終了時の一度だけ読み出しを行うサンプルングモード。

2. CDS (Correlated-double Sampling)

積分開始時の信号を読んだ後に、積分終了時の信号を読むサンプルングモード。これらの信号の差をとることで、リセットノイズ等を抑制することができる。

3. Fowler sampling

アレイをリセット後、積分の最初と最後にアレイを一回以上読み出すサンプルングモード。前半と後半の読み出し回数が m 回の場合を特に Fowler- m Sampling と呼ぶ。リセットノイズ等を抑制することができる、また、読み出し回数を増やすことで読み出しノイズを低減することができる。

4. Up-the-Ramp Sampling

積分の最初と最後に何度も信号をサンプルングするのではなく、積分中に一定の間隔で何度も信号をサンプルングするサンプルングモード。リセットノイズ等を抑制できるほか、データ処理により宇宙線イ

ペントや飽和の影響を除去することが可能である。また、read noise limited な観測では最も S/N 比を高くすることができる (Garnett & Forrest 1993)。

このうち 3、4 については非破壊読み出しが可能な検出器に特有なサンプリングモードである。

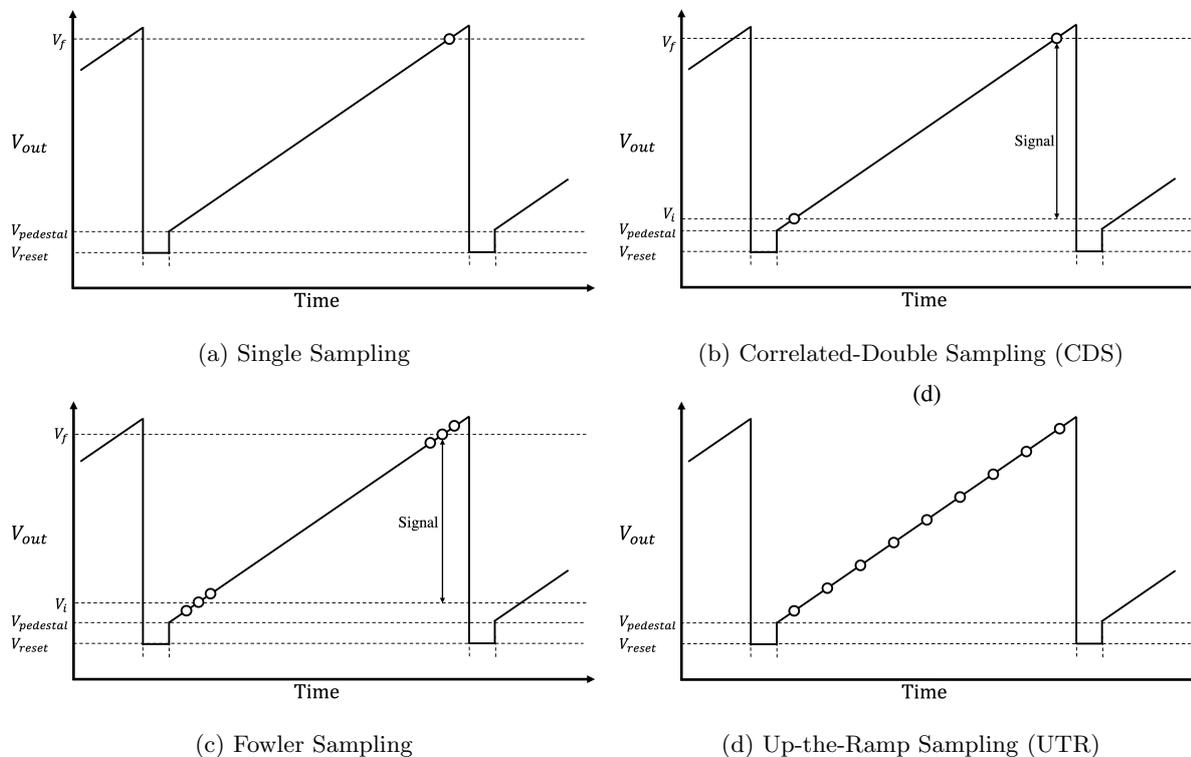


図 2.18: さまざまなサンプリングモード。

2.2 検出器特性

2.2.1 暗電流

暗電流とは検出器に検出器に光が入射していないにもかかわらず流れる電流のことである。暗電流は電荷の発生する場所により大きく 3 つに分けられる。

- 中性領域からの少数キャリアの拡散電流
 §2.1.2.1 でも述べたように、p 型や n 型の半導体でも正孔や電子の一方だけがキャリアとして存在しているわけではなく、もう一方の電荷も少数ながら存在している (少数キャリア)。少数キャリアが拡散により空乏層まで到達すると、空乏層内の電場により移動し暗電流となる。
- 空乏層での生成電流
 空乏層内で熱励起によって生成された電子-正孔対が空乏層内の電場により空乏層をドリフトすることで暗電流となる。空乏層内に格子欠陥があると、電子がトラップ準位を介して励起されるため、生成電流は大きくなる。
- 検出器材料結晶界面からの表面リーク電流
 検出器材料結晶と、皮膜や結晶成長基板のヘテロ界面では、検出器材料結晶の結晶構造に乱れが生じ、禁制帯中にエネルギー準位が作られる。そのため、界面近傍の電子が熱エネルギーを得ると、界面準位を介して電子が価電子帯から伝導帯に励起され暗電流となる。

これらはいずれも強い温度依存性を持つため、検出器の温度を下げると低減することができる。

また、宇宙線イベントによっても露光とは関係のない電流が流れる。検出器に入射した宇宙線は検出器基板、フォトダイオード層、マルチプレクサで吸収されると、イオン化や核励起に伴う発光等により電子-正孔対を生成し、電流が流れる。宇宙線がフォトダイオード層やマルチプレクサで吸収される場合はこのイベントは吸収したピクセルにのみ影響を与えるが、検出器基板、特に基板上部で吸収された場合、広範囲の画素が電荷の拡散や発光の影響を受けるため、宇宙線イベントは淡く広がったものになる (Smith et al. 2006, Brown 2007)。

2.2.2 リセットアノマリー

リセットアノマリーとは、積分開始後、数秒から数分に及ぶ、出力レベルの特異な非線形的振る舞いのことである。かつてはこの現象は、リセットによる過渡現象と考えられていたため、リセットアノマリーと呼ばれているが、現在では検出器クロックケイデンスの変化に伴う温度変化 (self heating/cooling) によるバイアスレベルの変化が原因であると考えられている (Smith et al. 2006)。

検出器の MUX にあるソースフォロワーの MOSFET ではピクセル選択スイッチによるアドレス指定時のみ電流が流れ、熱が発生する。クロックのケイデンスが常に一定であれば、毎回の読み出しで同じ温度が再現され、リセットアノマリーは生じないが、クロックのケイデンスが変化すると、読み出し中、ひいては各読み出し間に検出器の温度は変化し、それに伴いバイアスレベルも変化する。

リセットアノマリーによる影響は参照ピクセル減算により部分的には補正することが可能だが、参照ピクセルの存在する検出器の端と感光ピクセルのある検出器中央付近との温度勾配により、完全な補正はできない。

2.2.3 非線形性

フォトダイオードアレイの非線形性は

- 電荷蓄積によって空乏領域が狭くなることによる接合容量の増加 (§A.1 参照)
- ソースフォロワーや、A/D 変換器等での非線形性

などによって生じ (Biesiadzinski et al. 2011a, Plazas et al. 2017)、一定のフラックスを検出器に照射して信号を時間の関数として記録することによって評価が可能である。

2.2.4 相反則不軌

相反則不軌 (reciprocity failure) とは、低フラックスの光に対する検出器の感度が高フラックスの光に対するものに比べて低くなる現象のことであり、count rate non-linearity と呼ばれることもある (Bohlin et al. 2005, 2006)。これにより、検出器に同じフルエンスの光を照射しても低フラックスの光を長時間入射させた時の信号が高フラックスの光を短時間入射させた時の信号よりも小さくなってしまふことで、暗い星の等級の過大評価につながる。相反則不軌の原因は、電荷トラップによる信号電荷の一部の喪失もしくはリーク電流が有力な候補であるが、正確なメカニズムはいまだに明らかになっていない (Biesiadzinski et al. 2011b)。

相反則不軌は、検出器の出力から求まるフラックスと、校正されたフォトダイオードの出力から求まる校正されたフラックスをさまざまな光源の明るさで比較することにより測定することができる。 x を校正されたフラックス、 y を検出器の出力から求まるフラックスを校正されたフラックスで規格化したものとする、

$$y = \alpha \log(x) + \beta \quad (2.1)$$

という関係に従うことが示されており、過去の測定では $\alpha \leq 10$ [%/dex] 程度の値が報告されている (Hill et al. 2010, Biesiadzinski et al. 2011b)。

2.2.5 コンバージョンファクターと読み出しノイズ

コンバージョンファクター $g_c[e^-/ADU]$ は電子数とカウントを関係付ける変換係数である。

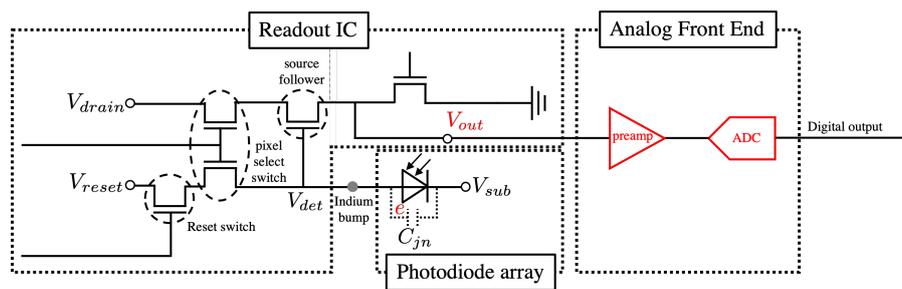
コンバージョンファクターの設計値は A/D 変換器の変換係数 $\mu_{ADC}[V/ADU]$ を電子が 1 つ蓄積された時の A/D 変換器への入力電圧の変化 $\Delta V_{in}[V/e^-]$ で割ることで求められる。

$$g_c = \frac{\mu_{ADC}}{\Delta V_{in}} = \frac{\mu_{ADC}}{\frac{e}{C_{node}} \times A_{MUX} \times A_{amp}} = \frac{C_{node}\mu_{ADC}}{eA_{MUX}A_{amp}} \quad (2.2)$$

ただし、

- e : 電気素量。
- C_{node} : 積分ノード容量。フォトダイオードの接合容量や MOSFET のゲート容量、配線間の寄生容量などを合わせた容量のこと。
- A_{MUX} : ソースフォロワでのゲイン ($\Delta V_{out}/\Delta V_{det}$)。
- A_{amp} : プリアンプでのゲイン。

である。



読み出しノイズ σ_{read} は、出力電圧のランダムな変動に起因する、画素に蓄積された電荷の測定値の不確かさである。

読み出しノイズの主な原因に以下のようなものがある。

1. リセットノイズ (kTC ノイズ)

リセットノイズは、画素をリセットする際に生じる熱力学的なノイズである。有限温度では、リセットスイッチをオンにしても熱ノイズにより電位は揺らいでおり、リセットスイッチをオフにしてリセット動作を終了する際、この揺らぎがノイズ電荷としてサンプリングされる。

系が平衡状態にあるとき、電圧 V に $kT/2$ のエネルギーが分配される。コンデンサのエネルギーは $CV^2/2$ なので、電荷の揺らぎ ΔQ は

$$\frac{1}{2} \frac{(\Delta Q)^2}{C} = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{kT}{2}$$

$$\Delta Q = \sqrt{kTC} \quad (2.3)$$

という大きさを持つ。よってリセットノイズは kTC ノイズと呼ばれることもある。

2. $1/f$ ノイズ

$1/f$ ノイズの主な原因は MOSFET からのランダムテレグラフシグナルノイズ (Random Telegraph Signal Noise ; RTN) の重ね合わせだと考えられている (Smith et al. 2006, Brown 2007)。RTN は MOSFET の $Si-SiO_2$ 界面のトラップに電荷が trap/detrap されることによりチャネルのポテンシャルが変化し、しきい値電圧、ひいては、チャネル電流が変動することで出力信号が二値以上の離散的な値をとることによるノイズである (Kuroda et al. 2018)。

3. 温度ドリフト

マルチプレクサ等の MOSFET において温度が変動すると、しきい値電圧が変化することで出力信号に影響を与える。その変化は $\sim 1500[e^-/K]$ に及ぶこともある (Hall 2006, Smith et al. 2006, Brown 2007)。

4. バイアスドリフト

外部ノイズのピックアップ等の原因でバイアス電圧が変動し、出力電圧にも影響を与える。

5. 量子化ノイズ

連続的なアナログ電圧を、離散化 (量子化) されたデジタル信号に変換する際に A/D 変換の分解能に依存した誤差が発生する。

$g_c[e^-/ADU]$ を求める際にはフォントランスファー法 (Janesick et al. 1985) を用いることが多く、電子数で表された量を小文字で、カウントで表された量を大文字で表記することとすると、定義よりコンバージョンファクターは電子数とカウントを以下の式で関係付ける。

$$n = g_c N \quad (2.4)$$

ただし、 n はある画素に溜まった電子数、 N は出力のカウントである。ノイズはショットノイズと読み出しノイズに大別される。

$$\Sigma_{tot}^2 = \Sigma_{shot}^2 + \Sigma_{read}^2 \quad (2.5)$$

ここで、 Σ_{shot} は光源、背景光、検出器の暗電流等が寄与するポアソンショットノイズ [ADU^2] である。コンバージョンファクターを用い、変形すると、

$$\Sigma_{tot}^2 = \left(\frac{\sigma_{shot}}{g_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{read}}{g_c} \right)^2 \quad (2.6)$$

を得る。また、ショットノイズはポアソン分布に従うので、

$$\Sigma_{tot}^2 = \frac{n}{g_c^2} + \left(\frac{\sigma_{read}}{g_c} \right)^2 \quad (2.7)$$

と書き直すことができる。これは (2.4) を用いると、

$$\Sigma_{tot}^2 = \frac{1}{g_c} N + \left(\frac{\sigma_{read}}{g_c} \right)^2 \quad (2.8)$$

とも表すことができる。この式を用いると、画像を複数回取得した時、横軸:ある画素の平均カウント (単位:ADU)、縦軸:ある画素の (不偏) 分散 (単位:ADU²) としてプロットした傾きからコンバージョンファクターが、 y 切片から読み出しノイズがわかる。

2.2.6 画素間容量

フォトダイオードアレイは検出器の画素で発生した電荷を、画素外に転送することなく電圧を測定する非破壊読み出し方式で動作している。このようなアレイでは、図 2.19 のように、隣接する画素とカップリングにより画素間に微小な浮遊容量が生まれ、画素の読み出し電圧に影響を与えることがある。この浮遊容量のことを画素間容量 (Interpixel Capacitance ; IPC) と呼ぶ (Moore et al. 2004, 2006, Finger et al. 2006, Linpeng 2009)。

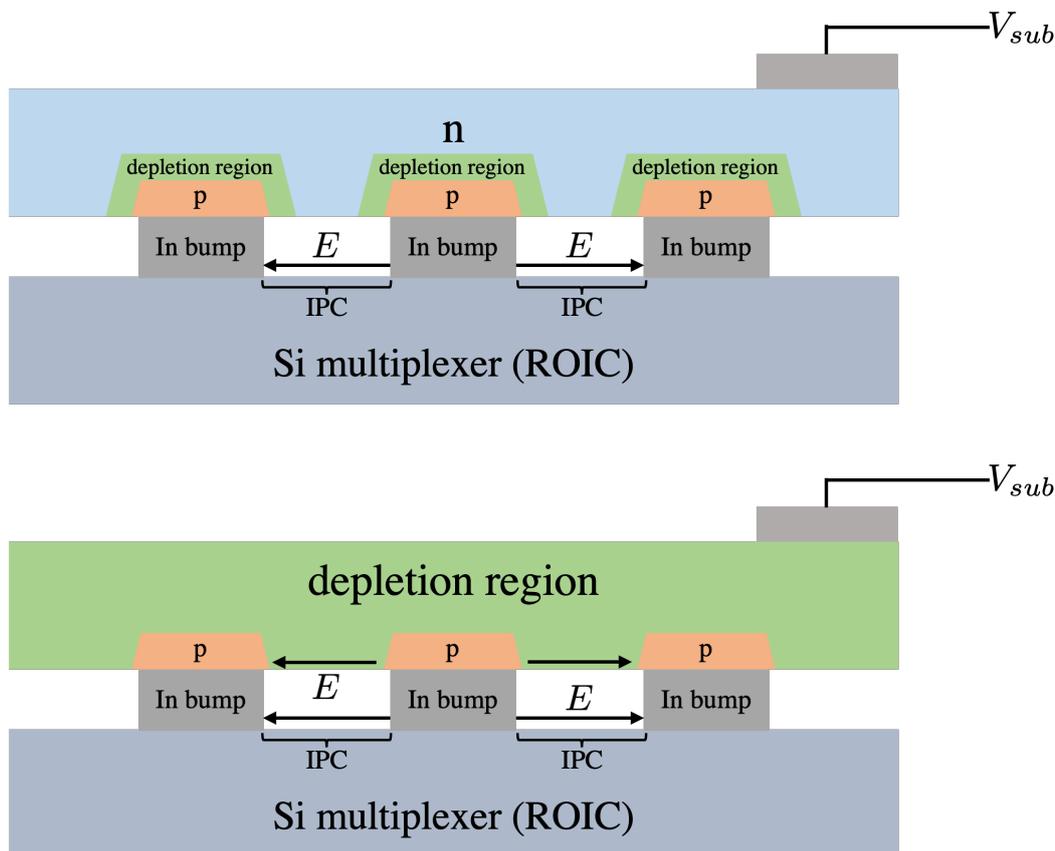


図 2.19: 画素間容量の概略図。一般的な、画素毎に 1 つの空乏層を持つような検出器 (上) では画素間容量は主に隣接するバンプ間で生じる。一方で、フォトダイオードが完全空乏化しているような検出器 (下) ではフォトダイオード層でも画素間容量が生じる。

画素間容量は以下のような効果をもたらす。

1. クロストークの発生

ある画素で強い信号が発生すると、隣接する画素で弱い信号が発生する (容量結合クロストーク)。隣接する画素に現れる信号は、画素間容量がなければ中央の画素に現れるはずの信号であるため、中央の画素の信号が減衰してしまう。この減衰は電荷拡散クロストークによる減衰と勘違いされることもあるが、容量結合クロストークと電荷拡散クロストークは全く異なるメカニズムによるものであり、電荷拡散クロストークは電荷収集の前に発生し、確率的であるのに対して、容量結合クロストークは電荷収集後に発生し、決定論的であるという違いがある。

2. ポアソンノイズの減衰

画素間容量により、測定されるポアソンノイズは減衰する。その結果、フォントランスマー法によっ

て求められるコンバージョンファクターを過大評価してしまい、検出器アレイが実際よりも多くの光子を集めているように見える。

ここで、真のポアソンノイズ $\tilde{\Sigma}_{shot}$ と画素間容量によって減衰されたポアソンノイズ Σ_{shot} の間には次のような関係がある。

$$\tilde{\Sigma}_{shot}^2 = R(\alpha, \beta) \Sigma_{shot}^2 \quad (2.9)$$

ただし、 $R(\alpha, \beta)$ はポアソンノイズの補正係数であり、 α, β は図 2.20 にあるように、それぞれ全信号に対する x 軸、 y 軸方向に現れる信号の割合とする。 $R(\alpha, \beta)$ は α, β の二次までで

$$R \simeq 1 + 4(\alpha + \beta) + 14(\alpha + \beta)^2 - 4\alpha\beta \quad (2.10)$$

と書ける (Todo 2015)。すると、(2.5) より

$$\begin{aligned} \Sigma_{tot}^2 &= \frac{\tilde{\Sigma}_{shot}^2}{R} + \Sigma_{read}^2 \\ &= \frac{1}{R} \left(\frac{\tilde{\sigma}_{shot}}{\tilde{g}_c} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{read}}{\tilde{g}_c} \right)^2 \\ &= \frac{1}{R\tilde{g}_c} N + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{read}}{\tilde{g}_c} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

が得られる。ただし、 $\tilde{g}_c, \tilde{\sigma}_{shot}, \tilde{\sigma}_{read}$ はそれぞれ真のコンバージョンファクター、ショットノイズ、読み出しノイズである。これより、§2.2.5 で求めたコンバージョンファクター g_c は真のコンバージョンファクター \tilde{g}_c の R 倍になっていることがわかる。このポアソンノイズの減衰を考慮することで、より正確なコンバージョンファクターの推定を行うことが可能になる。

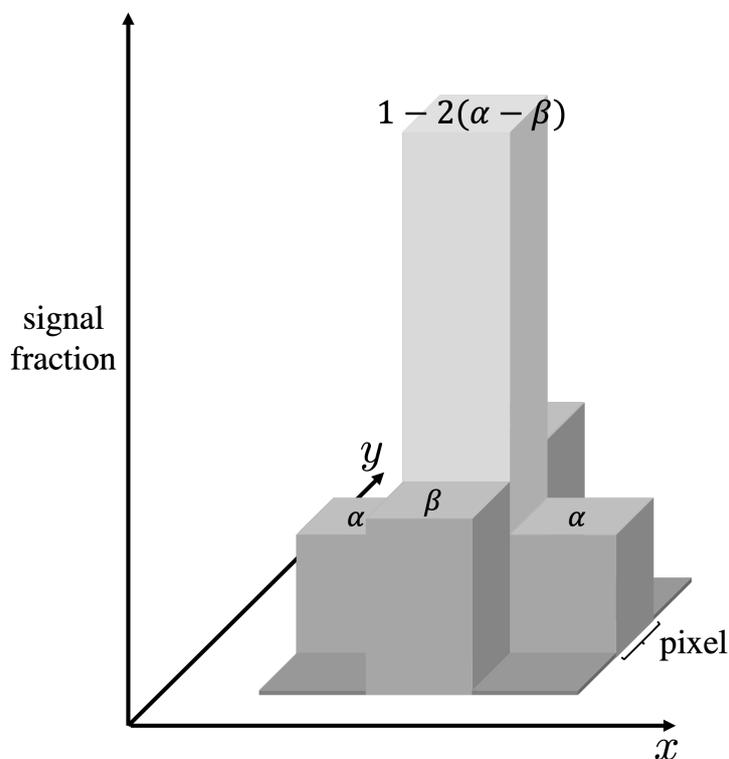


図 2.20: IPC による信号のクロストーク。

2.2.7 量子効率

量子効率とは、入射する光子が信号に寄与する電子に変換される割合である。

検出器表面に入射した光のうち、一部は反射され、失われる。表面を通過した光は検出器材料に吸収されると電子-正孔対を生成する。その中でも信号電荷は大部分が空乏層で生成される。光子は空乏層だけでなく、中性領域でも吸収されるが、中性領域で生成された電荷は多くが空乏層に到達する前に再結合し信号電荷とはならない。例えば、p 型半導体の中性領域で生成された電子-正孔対のうち、拡散によって空乏層にたどり着いた電子は空乏層をドリフトし n 型領域に移動することで信号となるが、多くの電子は p 型半導体の中性領域の多数キャリアである正孔と再結合してしまう。

量子効率は検出器全体で一定というわけではなく、変動している。中にはサブピクセルレベルで量子効率に変化しているものもあり、特に分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy ; MBE) で結晶成長させた HgCdTe 検出器アレイでは crosshatch pattern と呼ばれる格子状のパターンがよく見られる。crosshatch pattern は結晶成長の際に生じた、HgCdTe 層の表面形状に由来するものと考えられている (Schlawin et al. 2021)。

量子効率は既知のフルエンスを検出器に照射することで測定することができる。図 2.21 のように、検出器のピクセルを一辺 w の正方形とし、検出器面から光源までの距離を l とすると、ピクセルの見込み立体角 $d\Omega$ は

$$d\Omega = \left(\frac{w}{l}\right)^2 \quad (2.12)$$

であるから、直径 D の面光源から積分時間 t_{int} の間にピクセルに入射する光子数 n_{ph} は、

$$n_{ph} = I \times \left(\frac{w}{l}\right)^2 \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times t_{int} \quad (2.13)$$

となる。ここで、 I は入射光子流束である。

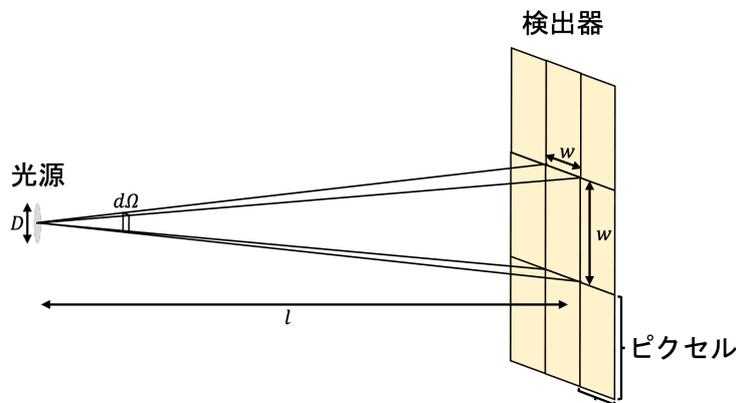


図 2.21: 量子効率測定概念図。

特に、黒体炉を用いた量子効率測定の場合、黒体炉からの輻射強度はプランクの法則に従うため、

$$B_\lambda = \frac{2hc^2/\lambda^5}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} \quad (2.14)$$

である。よって、光子流束は、

$$I_\lambda(T) = \frac{2c/\lambda^4}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} \quad (2.15)$$

であり、これを波長で積分すると、

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2c/\lambda^4}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} d\lambda \\
 &= \int_{x_2}^{x_1} \frac{2c}{e^x - 1} \left(\frac{x k_B T}{hc} \right)^4 \frac{hc}{k_B T} \frac{dx}{x^2} \\
 &= 2c \left(\frac{k_B T}{hc} \right)^3 \int_{x_2}^{x_1} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \\
 &= 2 \times 2.998 \times 10^{10} [cm/s] \left(\frac{1.381 \times 10^{-16} [cm^2 \cdot g/s^2/K] \times T[K]}{6.626 \times 10^{-27} [cm^2 \cdot g/s] \times 2.998 \times 10^{10} [cm/s]} \right)^3 \int_{x_2}^{x_1} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \\
 &= 2.01 \times 10^{10} [cm^2/s/K^3/str] \times T[K]^3 \times \int_{x_2}^{x_1} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \tag{2.16}
 \end{aligned}$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned}
 x \equiv hc/\lambda k_B T &= \frac{6.626 \times 10^{-27} [erg \cdot s] \times 2.998 \times 10^{10} [cm/s]}{1.381 \times 10^{-16} [erg/K] \times \lambda [cm] \times T[K]} \\
 &= 1.44 [cm \cdot K] \times \frac{1}{\lambda [\mu m]} \times \frac{10^4 [\mu m]}{1 [cm]} \times \frac{1}{T[K]} \\
 &= 1.44 \times 10^4 [\mu m \cdot K] \times \frac{1}{\lambda [\mu m]} \times \frac{1}{T[K]} \tag{2.17}
 \end{aligned}$$

であり、また、

$$d\lambda = -\frac{hc}{k_B T} \frac{dx}{x^2} \tag{2.18}$$

である。

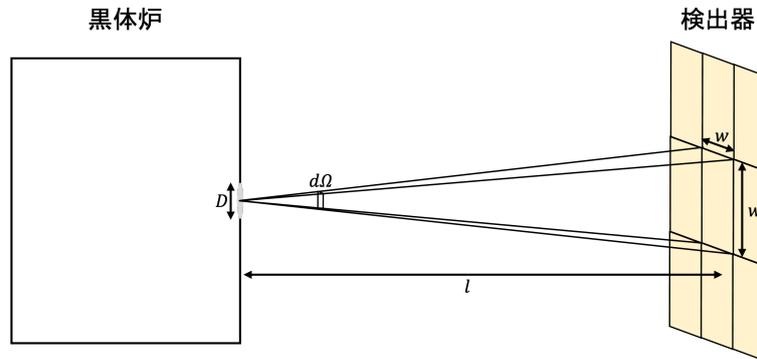


図 2.22: 黒体炉を使った量子効率測定の設定アップの概念図。

2.2.8 パーシステンス

半導体内には不純物原子や格子欠陥によって禁制帯中にドナー準位やアクセプタ準位以外のエネルギー準位が作られることがある。このような準位を持つ場所をトラップと呼ぶ。半導体のフリーキャリアがトラップの付近に存在すると、持っていたエネルギーを光や熱として放出し、捕獲される。パーシステンスは、フォトダイオードのPN接合において光によって発生した電荷が蓄積し、空乏領域の幅が狭まり間欠的にトラップがキャリアに晒される領域で、電荷の捕獲と放出が起こることにより生じると考えられている。

図 2.23 に Smith et al. (2008) で提唱されたパーシステンスモデルの概念図を示す。図 2.23(a) は露光前の PN 接合部の様子を示している。露光前は空乏層には捕獲するフリーキャリアがないため、空乏層内のトラップは充填されていない。露光されると、生成された光電荷により図 2.23(b) のように空乏層が縮小する。すると、空乏層が中性領域に変化した場所では未充填のトラップがフリーキャリアに晒されることとなり、電荷を捕獲し始める。しばらく時間が経過すると、トラップに捕獲される電荷とトラップから放出される電荷がつりあう平衡状態に到達する (図 2.23(c) 参照)。検出器がリセットされると、空乏層の幅が元に戻り、充填されたトラップが空乏層内に現れる。トラップされた電荷が熱エネルギーや光子のエネルギーを受け取り、解放されると、図 2.23(d) のように空乏層内の電場により空乏層をドリフトする。こうして解放された電荷は光電荷と同様に蓄積され、図 2.23(e) のように空乏層の幅が少し狭くなる。このようにして現れる以前の露光に由来する信号がパーシステンス信号である。

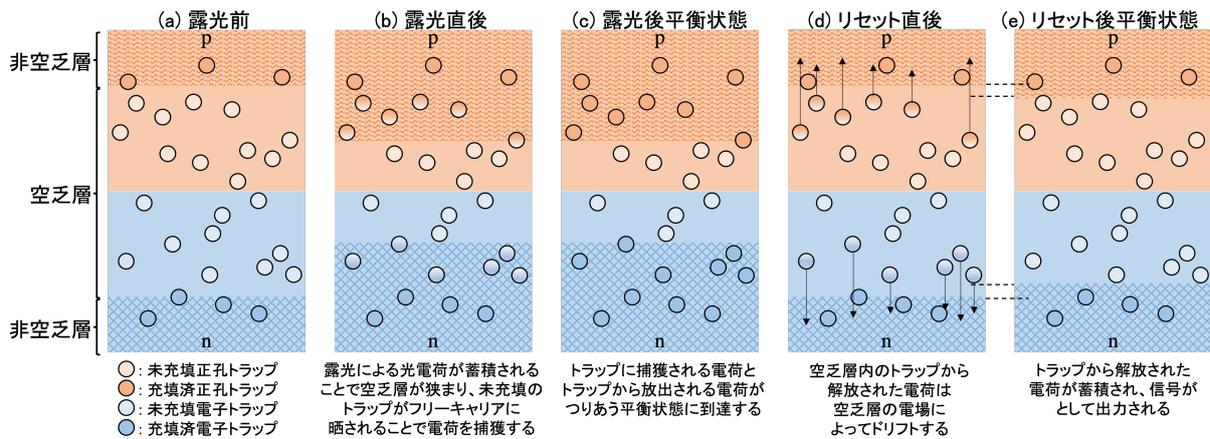


図 2.23: パーシステンスモデルの概念図。

トラップへの電荷の出入り自体は画素の測定値に影響を与えない。電荷が電場中を移動して初めて、画素電圧の変化を観測することができる。フォトダイオードの n 領域と p 領域は導電性であるため、電場は非常に小さい。一方で、空乏層は絶縁体であり、強い電場が存在する。図 2.24(a) は、空乏層で発生した光電子と正孔のペアが、この電場によって振り分けられる様子を示している。これはエネルギー的には、空乏層の全幅を、つまり、空乏層の電位差を 1 つの電子が移動することと等価である。図 2.24(b) は、空乏層にあるトラップから放出された電子が n 型領域に移動し、信号を加える過程を示している。この例では、放出された電荷は空乏層の 1/3 しか通過しないので、(空乏層の静電容量の変化を無視すると³⁾ 光電荷の信号の 1/3 しか発生しないことになる ($\Delta E = CV\Delta V$)。この例ではトラップから解放された電荷は光電子の 1/3 に等しい電圧の変化をもたらすが、実際にはトラップは半導体材料全体に広く分布しており、パーシステンス電荷がもたらす電圧変化の大きさはさまざまである。だが、その大きさは光電荷による電圧変化の大きさに比べると小さい、つまり、コンバージョンファクターは光電荷のものに比べて大きくなる。

パーシステンス電荷のコンバージョンファクターは露光レベルによっても変化する。図 2.23 のモデルでは、露光レベルが高くなるほど空乏層の幅が狭くなるため、リセット時の空乏端からより離れたトラップにも電荷が捕獲されることになる。すると、電荷がトラップから解放された際に、空乏層内をより長距離移動する、つまり、移動する電位差も大きくなり、図 2.25 のようにコンバージョンファクターは光電荷のものに近い小さくなるはずである。

³実際には接合容量は電圧依存性を持つ。§A.1 参照。

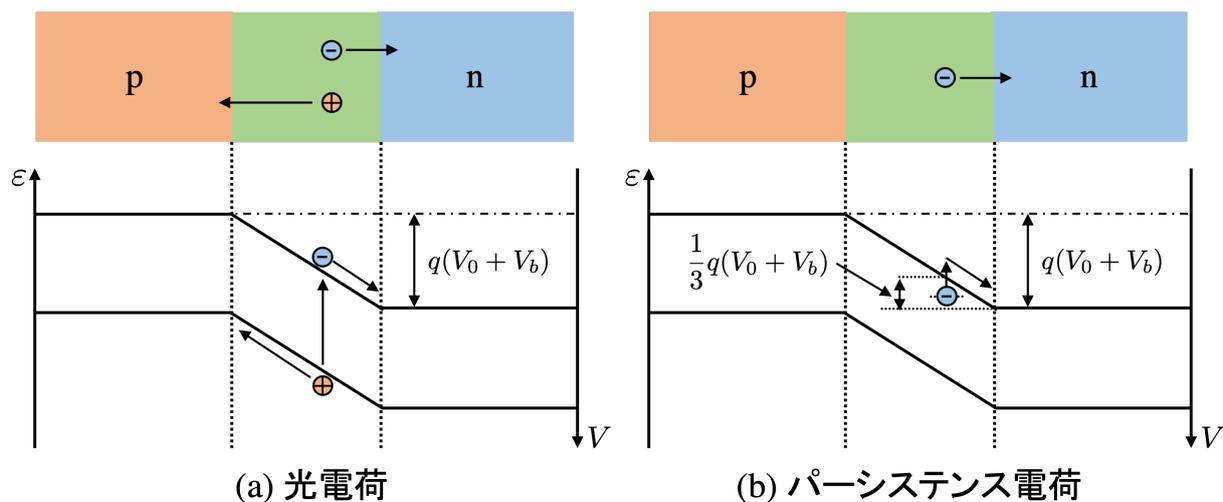


図 2.24: 空乏層からの電荷の移動。トラップから放出された電荷による電圧の変化は光電荷による電圧変化よりも小さい。

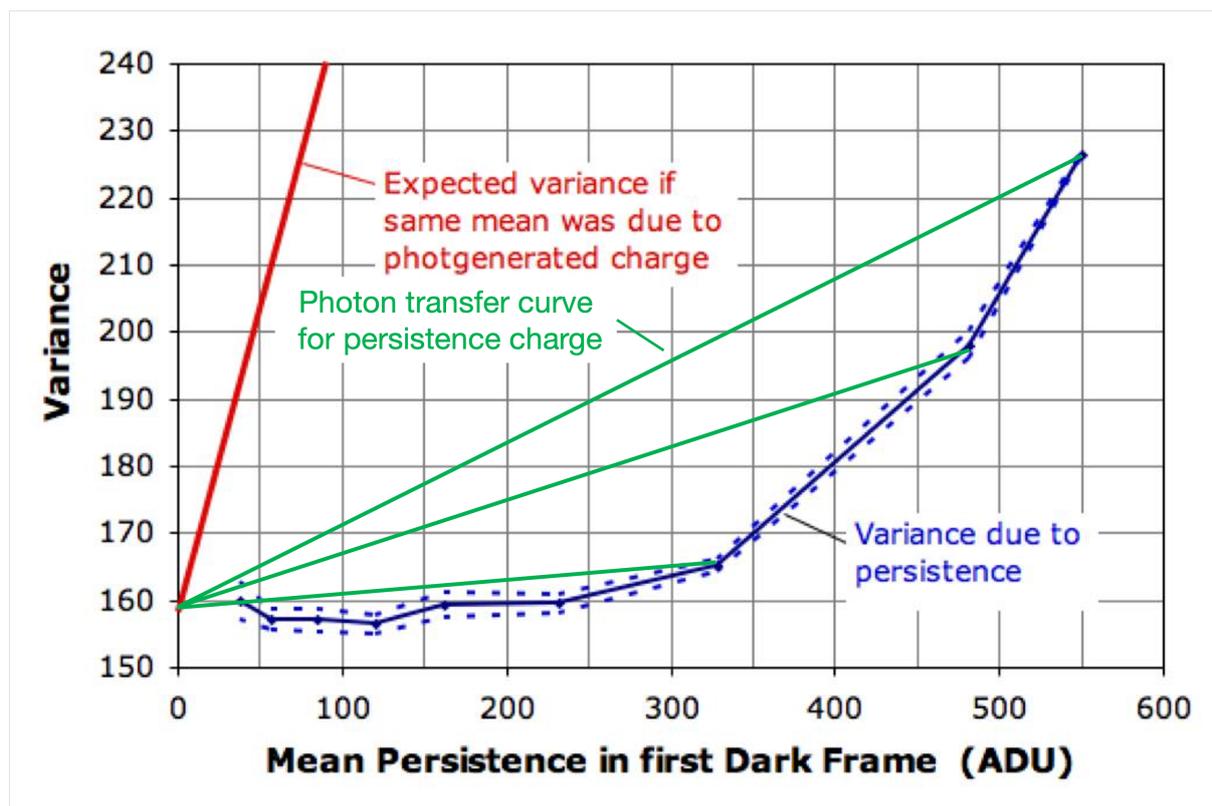


図 2.25: Smith et al. (2008) の Fig.8 に改変を加えた図。最初のフレームに現れるパーシステンスカウントが大きくなる（露光レベルが上がる）につれ、分散の増加率が上がっており、フォントランスファーカーブの傾きが大きくなっていることから、コンバージョンファクターは小さくなっていくことがわかる。

2.2.9 バッドピクセル

バッドピクセルの定義はメーカーやユーザーにより異なるだけでなく、使用する指標 (暗電流、量子効率等) にも大きく依存する。そこで、今回はピクセルを以下のように分類することにする。

- Normal pixels
平均的な振る舞いを示す集団
- Bad pixels
平均から逸脱した振る舞いを示す集団
 - Warm pixels
ベースライン (以下リセットフレームと呼ぶ) 減算後に参照ピクセル補正を行なった画像 (以下 CDS 画像と呼ぶ) のカウントが平均的な集団に比べて有意に高いピクセル
 - Cold pixels
CDS 画像のカウントが平均的な集団に比べて有意に低いピクセル
 - * Dead pixels
カウントが読み出しノイズの範囲内に入っているようなピクセル
 - * Inverse pixels
読み出しノイズより大きな絶対値の負のカウントを持つピクセル
 - * Insensitive pixels
量子効率が低いピクセル
 - (広義の)Hot pixels
リセットフレームのカウントが有意に高いピクセル
 - * (狭義の)Hot pixels
リセットフレームで飽和しているピクセル
 - * Quasi-hot pixels
リセットフレームで飽和してはいないが有意に高いカウントを持つピクセル

第3章 TARdYS カメラシステムの開発

3.1 検出器システム概要

検出器システムは大きく分けて検出器、アナログフロントエンド (AFE)、デジタルバックエンド (DBE)、データ取得 (DAQ) システムの4つからなる。検出器システムの概念図を図 3.1 に示す。まず、DAQ システムからデジタルバックエンドに画像取得のコマンドが送られる。すると DBE がそれに対応するクロックパターンを AFE に送信する。AFE はクロックパターンに従ってクロックパルスを生じ、結果のアナログ出力を検出器から受け取る。その後 A/D 変換を行い、デジタルデータを DBE に送信する。デジタルデータは一旦 DBE で保存されたのち、DAQ システムへ送られ、画像が生成される。

以下では各コンポーネントについて詳しく見ていく。

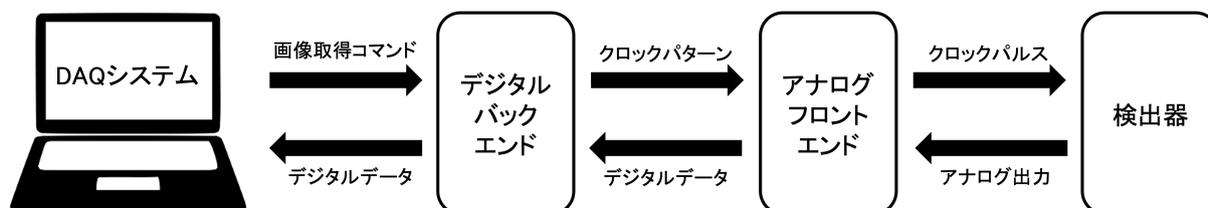


図 3.1: 検出器システムの概念図。

3.1.1 検出器

1.3k × 1.3k InGaAs フォトダイオードアレイ検出器

TARdYS には 1.3k × 1.3k InGaAs フォトダイオードアレイ検出器¹が採用されている。この検出器は、フォトダイオードアレイと読み出し回路 (Readout IC ; ROIC もしくは Multiplexer ; MUX と呼ばれる) をインジウムバンパと呼ばれる金属接点で接続した、ハイブリッドアレイ検出器と呼ばれる検出器であり、フォトダイオードアレイの材料としては近赤外に感度を持つ InGaAs が用いられている。この検出器の諸元を表 3.1 に示す。

表 3.1: 1.3k × 1.3k InGaAs 検出器の諸元。

全ピクセル数	1296 × 1296[<i>pix</i> ²]
感光ピクセル数	1280 × 1280[<i>pix</i> ²]
ピクセルサイズ	15 × 15[<i>μm</i> ²]
イメージングエリア	19.2 × 19.2[<i>mm</i> ²]
出力チャンネル数	2 or 8

この検出器の各辺には図 3.2 のように、幅 8 ピクセルずつ参照ピクセルが存在する。

¹ 浜松ホトニクス株式会社製。

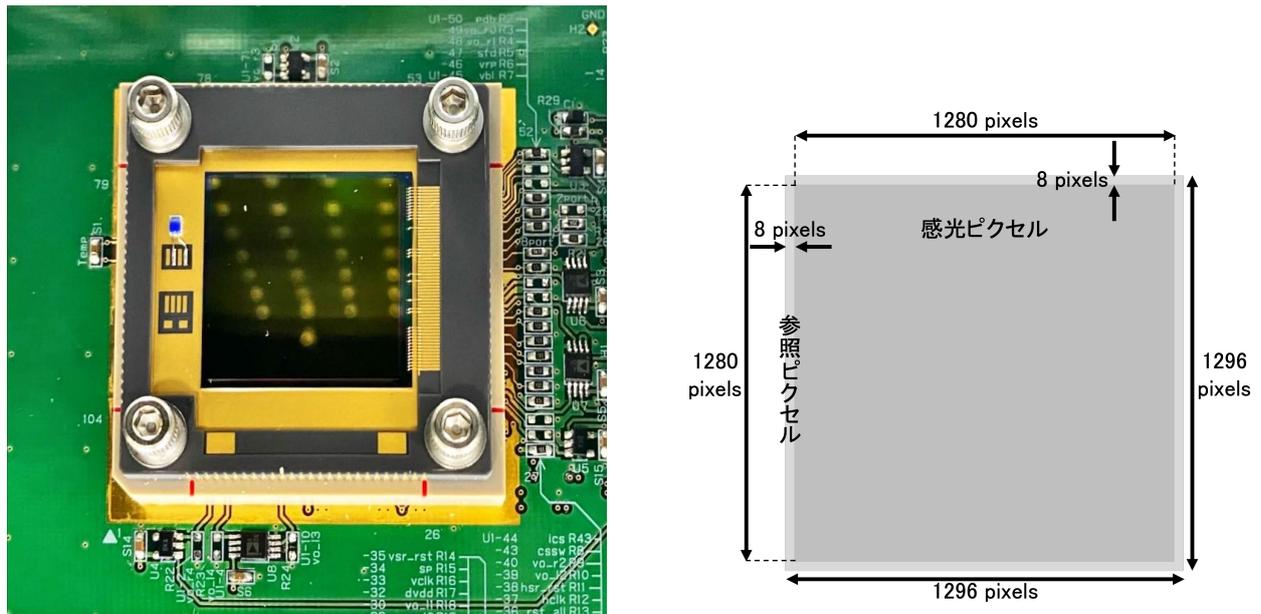


図 3.2: $1.3k \times 1.3k$ InGaAs フォトダイオードアレイ検出器 (左) とそのピクセル配置図 (右)。参照ピクセルが感光ピクセルを取り囲むように幅 8 ピクセルで配置されている。

3.1.2 アナログフロントエンド

IRCA3

IRCA3 は、クロックパルスの生成や検出器からの信号の処理等を行うアナログ回路であり、クロックドライバー、DAC (Digital to Analog Converter)、プリアンプ、ADC (Analog to Digital Converter) 等が搭載されている。IRCA3 はデジタルバックエンドで生成された検出器制御信号からクロックパルスを生成し、検出器を駆動する。検出器からの出力信号は、まずプリアンプに入り、増幅されたのちに ADC でデジタル信号に変換され、デジタルバックエンドへ送信される。

3.1.3 デジタルバックエンド

GESiCA

GESiCA (Miyatake et al. 2008, Miyatake et al. 2012) (Gigabit Ethernet SiTCP CMC board for Astronomy) は Hyper Suprime-Cam のために開発されたデジタル信号処理ボードであり、ネットワークプロセッサ、クロックシーケンサー、フレームグラバーなどの機能を持つ。GESiCA のブロック図を図 3.3 に示す。

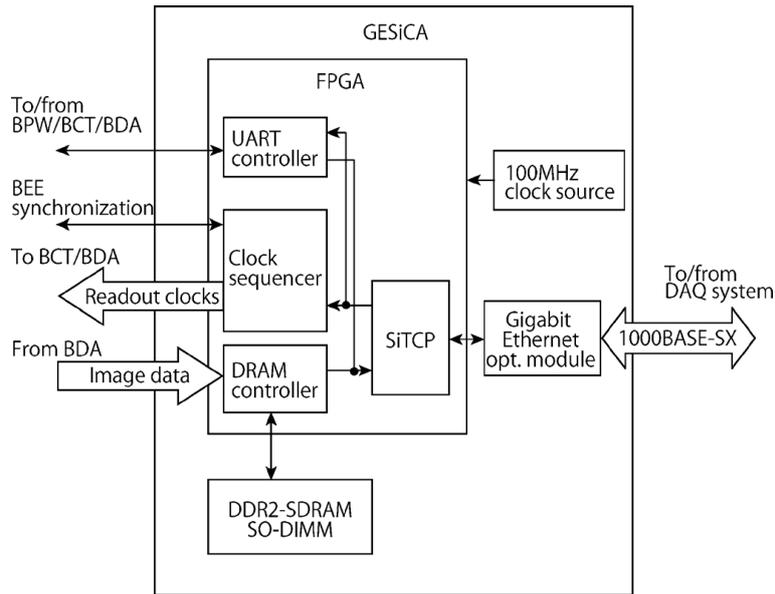


図 3.3: GESiCA のブロック図 (Miyatake et al. 2012)

ネットワークプロセッサは **SiTCP** を採用している。**SiTCP** は高エネルギー物理実験の為に高エネルギー加速器機構 (KEK) で開発された技術で、**SiTCP** を Field Programmable Gate Arrays (FPGA) に実装する事で FPGA をイーサネットに接続する事が出来る。これにより、**GESiCA** はギガビットイーサネットを使用した高速画像データ転送が可能になっている。フレームグラバは 2GB の Double-Data-Rate2 Synchronous Dynamic Random Access Memory (DDR2-SDRAM) Small Outline Dual In-line Memory Module (SO-DIMM) を用いており、**GESiCA** が 16 ビット画像データを受信すると、データは FPGA に送られ、SDRAM に書き込まれ、保存される。これらのデータは、その後 SDRAM から読み出され、**SiTCP**/Gigabit Ethernet 経由でホストコンピュータに送信される。クロックシーケンサは、検出器とアナログフロントエンドを制御するクロックを生成するために使用される。このクロックシーケンサは、FPGA に内蔵されたランダムアクセスメモリ (RAM) にクロックのパターンを記憶させる方式を採用している。読み出しクロックのパターンは $10[ns]$ 単位で設定でき、 $\pm 1[ns]$ 以内の精度を持っている。

また、**GESiCA** は Common Mezzanine Card の規格に沿って作られており、後述の M6 CMOS にマウントされている。

M6 CMOS

M6 CMOS は **GESiCA** とアナログフロントエンドとのインターフェース基板である。**GESiCA** 内の CMOS レベルの信号から LVDS の信号への変換やその逆を行うほか、デジタルフロントエンドに電源を供給する役割も果たしている。

3.1.4 画像取得システム

TARdYS DAQ システム

DAQ システムの検出器駆動用のソフトウェアは、国立天文台の中屋秀彦氏から提供された MESSIA6 を使用する。このソフトウェアは c 言語で書かれており、Linux 系のオペレーティングシステムのインストールされたホストコンピュータ上で動作する。ソフトウェアはサーバソフトの messia とクライアントソフトの m からなる。各種コマンド実行の際は、ターミナルウィンドウを 2 つ立ち上げ、一方のターミナルでサー

パーツソフトを実行し、もう一方のターミナルからクライアントソフト m でコマンド送信を行う。本研究では MESSIA6 を Python でラッピングしたソフトウェアの開発をおこなった。このソフトウェアの詳細については §3.4、§3.5 を参照のこと。

3.2 background limited な観測の際の要求性能

TARdYS を TAO6.5m 望遠鏡に搭載して観測する場合を想定したときに、background limited な観測を行うために検出器システムに要求される性能を考える。具体的には、暗電流、読み出しノイズについて達成すべき値を計算する。

3.2.1 ピクセルスケール

望遠鏡からの光は、光ファイバーを通して TARdYS まで導かれる。光ファイバーのコア径は $\phi 50[\mu\text{m}]$ であり、これは視野 $\sim 0.4[\text{arcsec}]$ に対応する。また、ファイバーからの光はイメージスライサーによって分割されたのちに図 3.4 のように TARdYS の光学系 (white pupil configuration) に入射する。

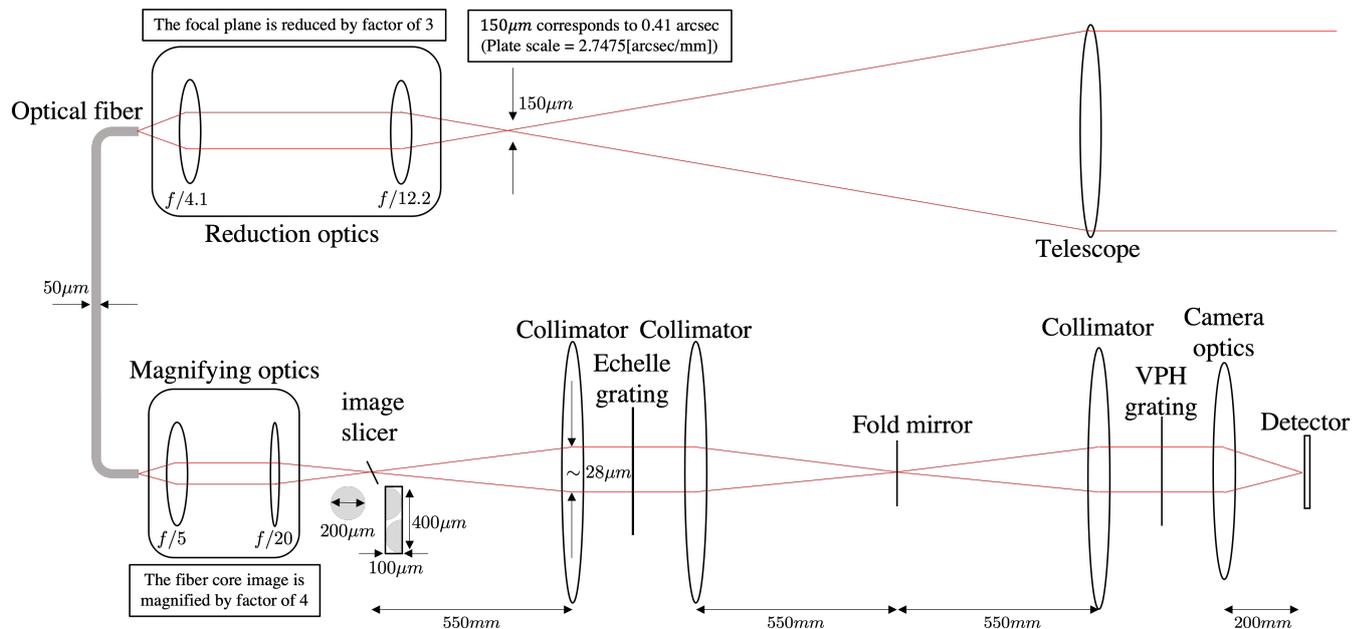


図 3.4: TARdYS の光学系の概念図。ただし、全ての反射鏡は等価なレンズに置き換えて図示してある。また、3つのコリメータは実際には同じ凹面反射鏡が用いられている。

ここで、コリメータの焦点距離 $f_{coll} = 550[\text{mm}]$ とカメラ光学系の焦点距離 $f_{cam} = 200[\text{mm}]$ を用いると、ファイバー像の拡大率 M は、

$$M = \frac{f_{cam}}{f_{coll}} = \frac{200}{550} \simeq 0.364 \tag{3.1}$$

であるので、検出器上でのファイバー像の大きさ w_{det} は、

$$w_{det} = 100 \times \frac{200}{550} = \frac{400}{11} \simeq 36.4[\mu\text{m}] \tag{3.2}$$

である。1.3k × 1.3k InGaAs フォトダイオードアレイ検出器のピクセルサイズ w_{pix} は 15[μm] であるから、スリット像は約 2.43[pix] でサンプリングされ、ピクセルスケール θ_{pix} は、

$$\theta_{pix} \simeq 0.206 \times \frac{15}{36.4} \simeq 0.0824[\text{arcsec}/\text{pix}] \quad (3.3)$$

となる²。

3.2.2 1 ピクセルあたりの波長範囲

同じ向きで入射した光の波長による分散角の違いを考える。 m を次数、 λ を波長、 d を隣接する溝間隔、 i, θ をそれぞれ入射光、反射光と回折格子の法線のなす角とすると、干渉条件の式は

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta) \quad (3.4)$$

と書くことができる。これを i を定数として微分すると、

$$md\lambda = d\cos\theta d\theta \quad (3.5)$$

を得る。カメラ光学系への入射角の違い $d\theta$ と検出器面での位置の違い dx の関係は、

$$dx = f_{cam} d\theta \quad (3.6)$$

であるので、線分散 $dx/d\lambda$ は、

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{dx}{d\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{mf_{cam}}{d\cos\theta} \quad (3.7)$$

となる。最も線分散が大きくなり、1 ピクセルに入る波長範囲が狭くなることで背景光が小さくなる時を考え、 $m = 175$ 、 $f_{cam} = 200[\text{mm}]$ 、 $d = 1/13.33[\text{mm}]$ 、 $\theta = 80.6^\circ$ ³を代入すると、

$$\begin{aligned} \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_{m=175} &= \frac{175 \times 200}{\cos(80.6^\circ)/13.33} \\ &\simeq 2.86 \times 10^6 \\ &= 2.86 \times 10^6 \times \frac{10^6[\mu\text{m}]}{1[\text{m}]} \frac{1[\text{m}]}{10^{10}[\text{\AA}]} \\ &= 286[\mu\text{m}/\text{\AA}] \end{aligned} \quad (3.8)$$

を得る。よって、1 ピクセルに落ちる波長範囲 λ_{pix} は、

$$\lambda_{pix} \simeq \frac{w_{pix}}{\left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_{m=175}} = 15/286 \simeq 0.0524[\text{\AA}/\text{pix}] \quad (3.9)$$

である。また、波長分解能は、

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{1.117 \times 10^4[\text{\AA}]}{0.052[\text{\AA}/\text{pix}] \times 2.43[\text{pix}]} \simeq 8.77 \times 10^4 \quad (3.10)$$

である。

²スライスマイラーを使ってスライスをしなない場合は、スリット像が分散方向に 72.7 μm に広がる、つまり、4.85[pix] でサンプリングされるため、波長分解能は $R = 4.4 \times 10^4$ とスライスマイラーを使用しない場合の半分になる。

³リトロウに近似し、 θ をエシェルグレーティングのブレース角 $\theta_B = 80.6^\circ$ とした。

3.2.3 要求ノイズ性能

望遠鏡に入射する光子によって単位時間、単位波長あたりに生成する電子数 $n_{e,\lambda}[e^-/s/\text{\AA}]$ は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 n_{e,\lambda} &= \eta \times f_\lambda[\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{\AA}] \times A[\text{cm}^2] \times \frac{\lambda}{hc}[\text{/erg}] \\
 &= \eta \times f_\lambda[\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{cm}] \times \frac{1[\text{cm}]}{10^8[\text{\AA}]} \times A[\text{cm}^2] \times \frac{\lambda}{hc}[\text{/erg}] \\
 &= \eta \times 10^{-8}[\text{cm}/\text{\AA}] \times f_\nu[\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{Hz}] \times \frac{c[\text{cm}/\text{s}]}{\lambda^2[\text{cm}^2]} \times A[\text{cm}^2] \times \frac{\lambda}{hc}[\text{/erg}] \\
 &= \eta \times 10^{-8}[\text{cm}/\text{\AA}] \times f_\nu[\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{Hz}] \times \frac{A}{h\lambda}[\text{cm}/\text{s}/\text{erg}]
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

ここで、 η はシステム効率、 f_ν は天体からの単位周波数あたりのフラックス、 A は望遠鏡の有効面積、 h はプランク定数である。ここに AB 等級の定義式

$$m_{AB} \equiv -2.5 \log(f_\nu[\text{erg}/\text{s}/\text{cm}^2/\text{Hz}]) - 48.60 \tag{3.12}$$

を代入すると、

$$\begin{aligned}
 n_{e,\lambda} &= \eta \times 10^{-8} \times 10^{-\frac{48.60}{2.5} - 0.4 \times m_{AB}} \times \frac{A}{h\lambda} \\
 &\simeq 3.63 \times \eta \times 10^{-28 - 0.4 \times m_{AB}} \times \frac{A}{h\lambda} [e^-/s/\text{\AA}]
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

を得る。ここで、Y バンドなので $\lambda = 1[\mu\text{m}]$ とし、システム効率を $\eta = 0.1$ (Rukdee et al. 2019) とすると、

$$\begin{aligned}
 n_{e,\lambda} &= 3.63 \times \eta \times 10^{-28 - 0.4 \times m_{AB}} \times \frac{A}{h\lambda} \\
 &= 3.63 \times 0.1 \times 10^{-28 - 0.4 \times m_{AB}} \times \frac{\pi \times (615.4/2)^2}{6.626 \times 10^{-27} \times 10^{-4}} \\
 &\simeq 1.63 \times 10^{7 - 0.4 \times m_{AB}} [e^-/s/\text{\AA}]
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

と書くことができる。ただし、等級が $m_{AB}[\text{mag}/\text{arcsec}]$ で表されるような広がった天体では、視野 $S[\text{arcsec}^2]$ を用いると、

$$\begin{aligned}
 n_{e,\lambda} &= 1.63 \times 10^{7 - 0.4 \times (m_{AB} - 2.5 \times \log(S))} [e^-/s/\text{Hz}] \\
 &= 1.63 \times 10^{7 - 0.4 \times m_{AB}} \times S [e^-/s/\text{Hz}]
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

となることに注意。

また、ノイズ $N[e^-]$ は以下のように表すことができる。

$$N = \sqrt{\sigma_{obj}^2 + \sigma_{sky}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{read}^2} = \sqrt{(n_{obj} + n_{sky} + n_{dark})t_{exp} + \sigma_{read}^2} \tag{3.16}$$

ここで、 σ_{obj} , σ_{sky} , σ_{dark} , σ_{read} はそれぞれ、天体、背景光、暗電流、読み出しに由来するノイズであり、 n_{obj} , n_{sky} , n_{dark} はそれぞれ天体、背景光、暗電流に起因する単位時間あたりの電子数である。

暗電流

暗電流については、最も背景光の小さくなる場合でも無視できるほど小さいことを要求する。Y バンドの背景光には OH 夜光の輝線が多数含まれている。そのため背景光は OH 夜光のない波長域で最小となり、このような輝線間の連続光による背景光は Y バンドで $20.05[\text{mag}/\text{arcsec}^2]$ である (Sullivan & Simcoe 2012)。この時、1 ピクセルあたりで生成される背景光由来の電子数を考える。ファイバーの視野は、

$$S = \pi \times (0.206)^2 \simeq 0.133[\text{arcsec}^2] \quad (3.17)$$

である。よって、単位時間、単位波長あたりの電子数は、

$$\begin{aligned} n_{sky, \lambda} &= 1.63 \times 10^{7-0.4 \times m_{AB}} \times S \\ &= 1.63 \times 10^{7-0.4 \times 20.05} \times 0.133 \\ &= 2.07 \times 10^{-2} [e^-/s/\text{\AA}] \end{aligned} \quad (3.18)$$

と書くことができる。検出器面ではファイバー像の分散方向に垂直な方向の長さは、 $400[\mu\text{m}] \times M = 145.5[\mu\text{m}]$ 、つまり、 $9.70[\text{pix}]$ に相当するので、1 ピクセルに単位時間あたりに生じる背景光由来の電子数は

$$n_{sky}^{pix} = \frac{2.07 \times 10^{-2} \times 0.0524}{9.70} \simeq 1.1 \times 10^{-4} [e^-/s/\text{pix}] \quad (3.19)$$

である。

よって、1 ピクセルに生じる暗電流 n_{dark} の要求性能は、

$$n_{dark} \ll 1.1 \times 10^{-4} [e^-/s/\text{pix}] \quad (3.20)$$

である。

読み出しノイズ

読み出しノイズについては、最も背景光のノイズが小さくなる場合でも読み出しノイズリミットにならないような値を要求値とする。すなわち、読み出しノイズが背景光のポアソンノイズよりも小さくなることを要求する。

典型的な積分時間を $t_{exp} = 1000[\text{s}]$ とすると、検出器のピクセルの背景光由来のポアソンノイズの下限値は、

$$\sigma_{sky, min}^{pix} = \sqrt{1.1 \times 10^{-4} \times 1000} \simeq 0.33[e^-] \quad (3.21)$$

となる。よって、読み出しノイズ σ_{read} の要求性能は、

$$\sigma_{read} \ll 0.33 [e^-] \quad (3.22)$$

である。

3.3 画像取得

TARdYS のカメラに用いられているフォトダイオードアレイ検出器は、その他の多くの近赤外フォトダイオードアレイ検出器と同様に非破壊読み出しが可能である。つまり、読み出しの際に蓄積された電荷をリセットせず、積分を続けながら複数回のサンプリングを行うマルチサンプリングが可能である。図 3.6 に messia による画像取得のフローチャートを示す。messia は Fowler Sampling と Up-the-Ramp Sampling の 2 つのサンプリングモードを提供しており、ここではこれらのサンプリングモードの挙動について述べる。

messia で設定可能な読み出しに関連するパラメータは $n_{sur}, n_{sample}, n_{osample}, t_{wait}, reset_sub, ref_sub$ の 6 つである。ただし、パラメータ名は MESSIA6 をラッピングしている TARdYS DAQ システムの変数名を用いている。

画像の積分時間 t_{int} は図 3.5 のように、Fowler Sampling か Up-the-Ramp Sampling かによらず

$$t_{int} = n_{sur}(t_{wait} + n_{sample}t_{read}) \quad (3.23)$$

で表すことができる。ただし、Fowler Sampling の時は $n_{sur} = 1$ である。また、画像 1 枚の読み出し時間 t_{read} は

$$\begin{aligned} t_{read} &= (4.5 \times 10^{-6} + 0.5 \times 10^{-6} \times n_{osample}) \times (1296 + 1) \times \frac{1296}{8} \\ &= 1.05 \times [1 + 0.1 \times (n_{osample} - 1)] [s] \end{aligned} \quad (3.24)$$

である。

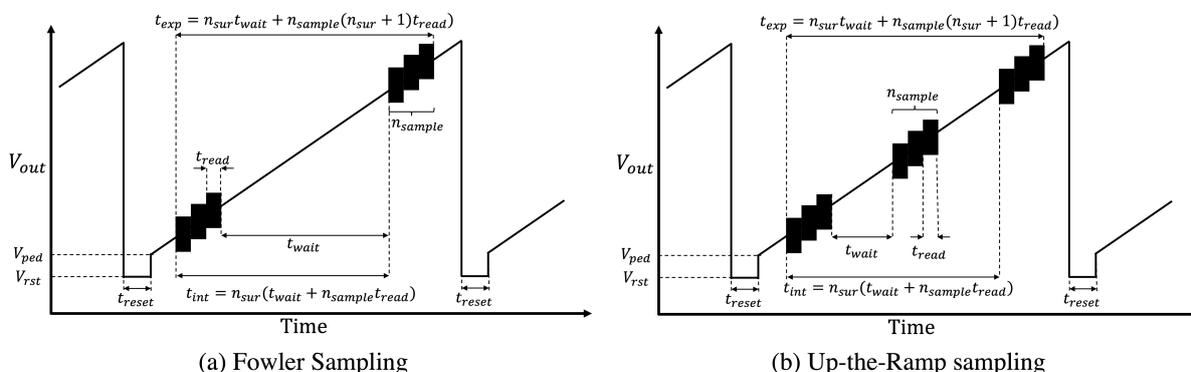


図 3.5: (a)Fowler Sampling と (b)Up-the-Ramp Sampling の概念図。読み出しにかかる時間 t_{read} は $t_{osample}$ の値によって変化する。

3.3.1 Fowler Sampling

図 3.5(a) は Fowler Sampling の概念図である。Fowler Sampling ではグローバルリセット後、積分を開始すると、まず n_{sample} 回の読み出しを行う。その際に ADC では各ピクセルにつき $n_{osample}$ 回連続でサンプリングを行う。その後、 $t_{wait}[s]$ だけ時間をおいた後、積分開始時と同様の方法で n_{sample} 回の読み出しを行う。したがって、積分の開始時と終了時でそれぞれ n_{sample} 枚の画像が生成される。

messia は積分開始時、終了時の画像、各 n_{sample} 枚を平均し、 $reset_sub$ が False であれば各読み出しタイミングの平均画像 2 枚が出力される。 $reset_sub$ が True であれば積分終了時の平均画像から積分開始時の平均画像 (リセットフレーム) を減算した画像 (CDS 画像) を作成する。その後、 ref_sub が False であれば、リセットフレームと CDS 画像が出力される。もし、 ref_sub が True であれば CDS 画像を参照ピクセル補正した画像が生成され、リセットフレームとともに出力される。

3.3.2 Up-the-Ramp Sampling ; UTR (or Sampling Up the Ramp ; SUR)

図 3.5(b) は Up-the-Ramp Sampling の概念図である。Up-the-Ramp Sampling では最初の n_{sample} 回の読み出しの後の $t_{wait}[s]$ の待機と n_{sample} 回の読み出しを n_{sur} 回だけ繰り返し、積分で n_{sample} 枚の画像が $n_{sur} + 1$

セットだけできることとなる。ただし、各読み出しの際はピクセル毎に ADC で $n_{osample}$ 回連続でサンプリングを行う。

messia は各読み出しタイミングの n_{sample} 枚の画像を平均し、 $n_{sur} + 1$ 枚の平均画像を生成する。もし、 res_sub が False であれば、 $n_{sur} + 1$ 枚の平均画像がそのまま出力され、 $reset_sub$ が True であればリセットフレームを除く n_{sur} 枚の平均画像からリセットフレームを減算した CDS 画像が作成される。その後、 ref_sub が False であれば、リセットフレームと n_{sur} 枚の CDS 画像が出力される。もし、 ref_sub が True であれば、CDS 画像を参照ピクセル補正した画像が生成され、リセットフレームとともに出力される。

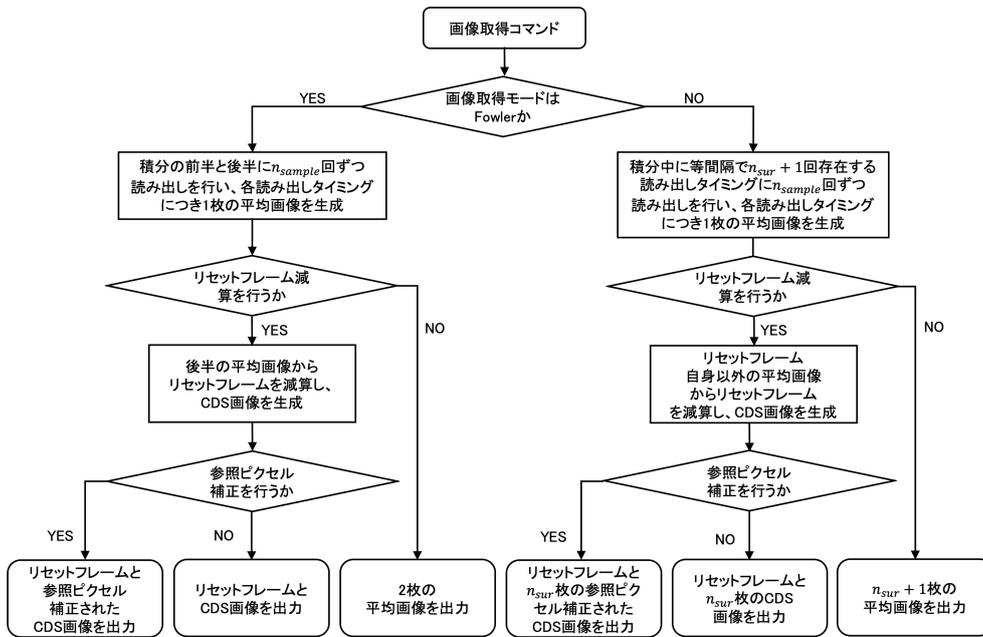


図 3.6: messia による画像取得のフローチャート。

3.4 画像処理

我々は、今後の拡張性などを考慮し、リセットフレーム減算や参照ピクセル補正を行い、画像を生成するシステムを Python で実装した。参照ピクセル補正は各ピクセルの出力値から、同じ行の参照ピクセル 16 ピクセルと同じ列の参照ピクセル 16 ピクセルの計 32 ピクセルの出力の平均値を差し引くことで行われる (図 3.7 参照)。

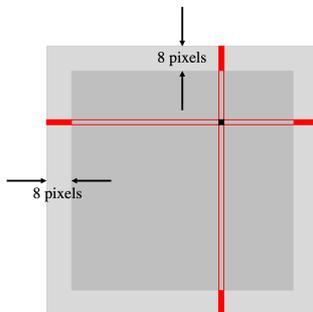


図 3.7: 参照ピクセル補正の概念図。それぞれのピクセルの出力値から、同じ行にある参照ピクセル 16 ピクセルと同じ列にある参照ピクセル 16 ピクセルの計 32 ピクセルの出力値の平均が減算される。

画像生成のモードは

- CDS
最終フレームからリセットフレームを引き算し、参照ピクセル補正した画像を生成する。
- Ramp
リセットフレームを含む全ての読み出しタイミングの平均画像からリセットフレームを引き、参照ピクセル補正を行う。そのようにしてできた画像について、全てのピクセルのカウントの時間変化を最小二乗フィッティングし、単位時間あたりのカウントの増加量 $[ADU/s]$ を値としてもつ画像 (Ramp 画像) を生成する。
- None
CDS 画像も Ramp 画像も生成しない。

の 3 つが存在する。

ただし、設定により、参照ピクセル補正の直後に非線形性の補正を行うことも可能であり、補正を行う際は、ピクセルごとに非線形性を測定した結果を用いて補正を行なっている。測定の詳細については §4.3 を参照のこと。また、現時点では、最終フレームまでに飽和したピクセルは飽和する前までのデータを用いてフィッティングを行うようになっているが、宇宙線の衝突などによる急激なカウントの増加を除外したフィッティングは実装していない。宇宙線の影響を考慮したフィッティングについては今後の課題である。

3.5 画像取得システムによる処理の流れ

最後に、今回開発した画像取得システムの処理の流れについて説明する。今回開発した画像取得システムの処理の流れを示したシーケンス図を図 3.8 に示す。

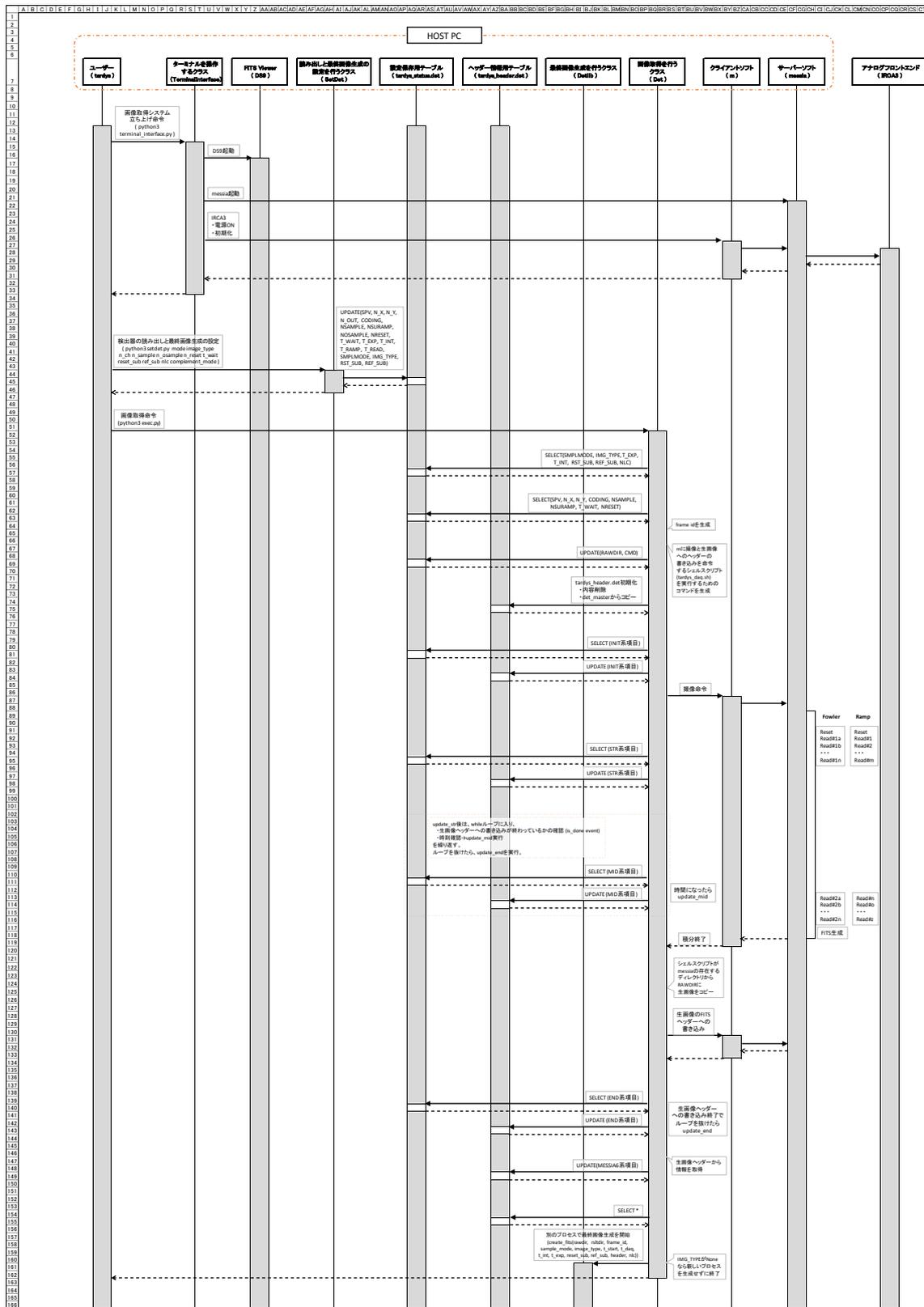
まず、host PC のターミナルにおいて `terminal_interface.py` を実行すると、DS9 や messia の立ち上げと、IRCA3 の起動、初期化を行う。その後、`setdet.py` を実行し、観測者の希望するサンプリングモード、画像生成モード、読み出し回数、読み出しタイミングの間隔などの情報を渡すと、渡した情報と、そこから導かれる読み出し時間、積分時間、露出時間等の読み出しパラメータの計算結果を status テーブルに保存する。

この状態で `exec.py` が実行されると、FITS 画像のヘッダーへの書き込みの内容を保存する header table が初期化されたのちに、status table と通信を行い、読み出しパラメータを取得する。取得したパラメータから、撮像と生画像へのヘッダーの書き込みを行うシェルスクリプト `tardys_daq.sh` を実行するためのコマンドが生成され、このコマンドを status テーブルに格納する。この処理が終了すると、`tardys_daq.sh` が実行され、設定した読み出しパラメータでのサンプリングが開始される。その後、積分開始前と開始時、半分終了時、終了後に生画像が指定されたディレクトリに保存された後のタイミングで適宜データベースと通信を行い、header table の情報のアップデートを行う。次に、messia によって生画像のヘッダーに書き込まれた情報に基づき header table を更新し、更新が完了すると、header table から全ての情報を取得してヘッダーオブジェクトを生成する。もし、画像生成のモードが `None` であれば、その時点で終了し、`CDS` もしくは `RAMP` の時は、別プロセスで `create.fits` メソッドを実行し、最終画像生成を開始する。新たなプロセスで最終画像生成が始まると、画像取得を行っていたプロセスは終了し、次の撮像が可能になる。

最終画像生成は §3.4 で述べたように行われ、その後に受けとったヘッダーオブジェクトに `exec.py` の実行から最終画像の生成までに要した時間や、オーバーヘッドなどの情報の追加をした後に、最終画像のヘッダーに書き込みを行う。その後、指定されたディレクトリに保存を行い、FITS viewer に最終画像が表示される。

最後に、画像取得システムの終了の際は `terminal_interface.py -cmd exit` を実行することで、IRCA3 の電源を切ったのちに、messia を終了することができる。

第 3 章 TARdYS カメラシステムの開発



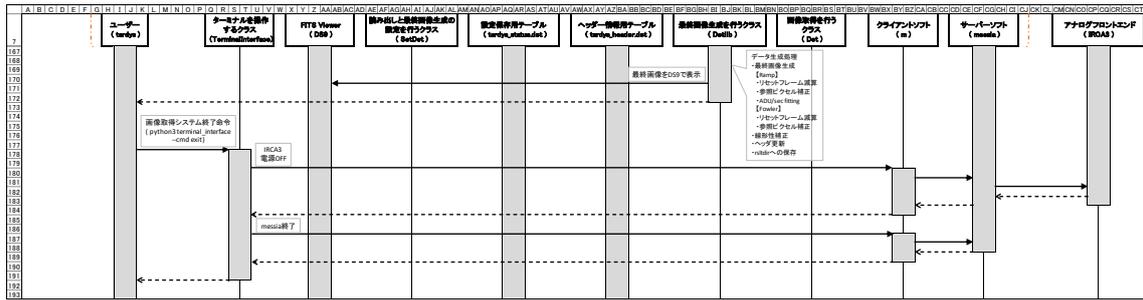


図 3.8: 画像取得の際に行われる処理のシーケンス図。

第4章 TARdYS 検出器システム性能評価

ここでは、開発したシステムを用いて InGaAs フォトダイオードアレイを駆動した時に得られる性能について述べる。特段の言及がない限り、検出器の性能評価は 120[K] で行われており、また、解析に使用する画像は (参照ピクセル補正された)CDS 画像であるとする。また、読み出しの前のグローバルリセットの継続時間は 0.1[ms] で、評価の際は、バッドピクセルマップによるマスクは行っておらず、参照ピクセルのみをマスクしている。ただし、バッドピクセルは §C.3 で述べるように、十分に少なく、中央値による評価にはほとんど影響を与えない。

4.1 検出器座標

検出器の性能評価に先立って、MUX を用いて検出器上での位置と出力される画像上での位置の対応づけのための試験を行なった。今回の試験で使用する画像は、MUX 上にアルミニウム製のパターンマスクをマウントし、光を導入することにより取得された。

取得した画像は図 4.2(左) のようになった。これより、画像の位置は検出器上で図 4.2(右) のように対応することがわかる。今後、特段の断りがない限り、画像の原点を左下として表示する。

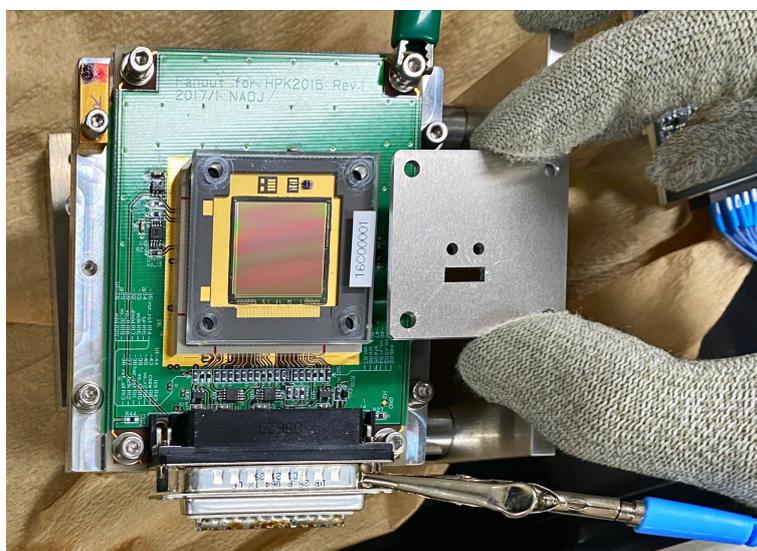


図 4.1: MUX(左) とパターンマスク (右)。パターンマスクを MUX の上に載せ、ねじ止めをすることで、MUX の一部にのみ光が当たる状態で画像を取得した。

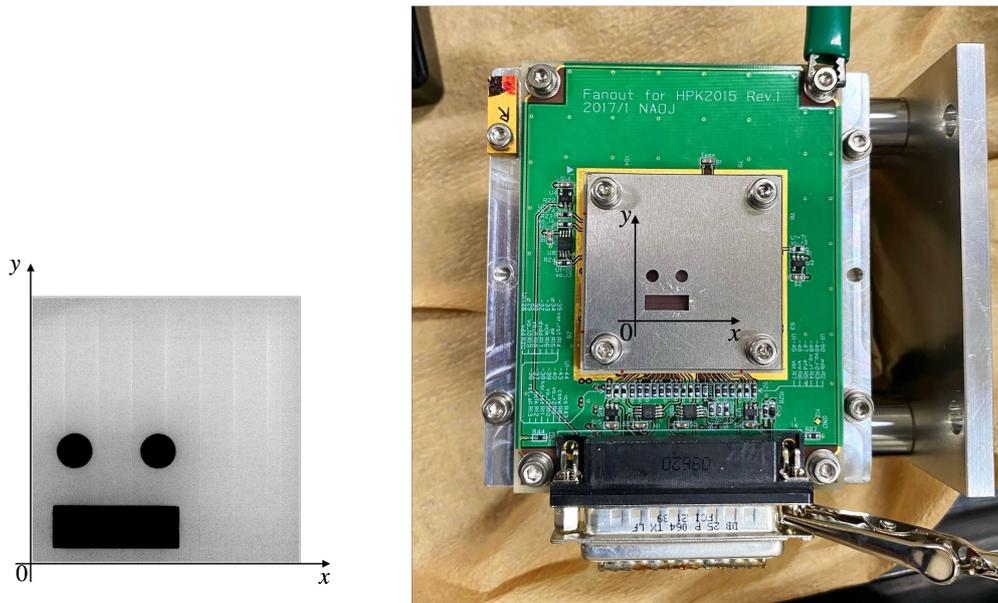


図 4.2: 出力画像の座標 (左) と検出器上での対応する座標 (右)。ただし、出力画像では光が当たっているところが黒で示されている。

4.2 試験環境

検出器の試験は実際に TARdYS に使用されるデュワーを用いて行われた。このデュワーは液体窒素により $\sim 80[K]$ まで検出器を冷却することが可能である。検出器は試験用に製作された検出器スタンドに図 4.3 のようにマウントされている。検出器スタンドはウィンドウの中心と検出器の中心が一致するように設計されており、また、スタンドに設置された温度計とヒーターにより温度コントロールが可能になっている。表 4.1 に検出器の駆動パラメータを示す。

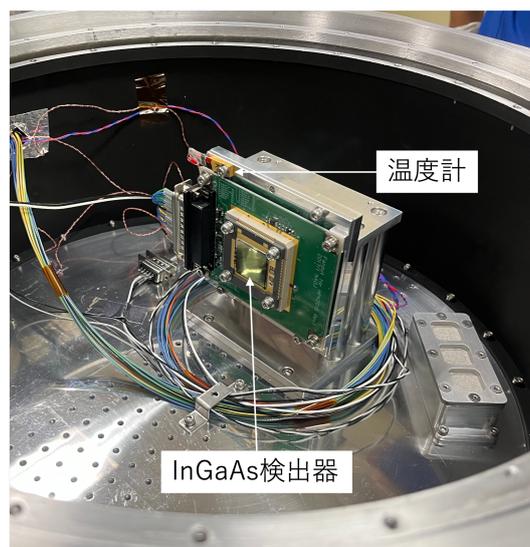


図 4.3: デュワー内の検出器スタンドに装着された検出器。検出器の裏にはヒーターが取り付けられており、スタンド上部にある温度計と合わせて温度をコントロールすることができる。

表 4.1: 検出器試験時の駆動パラメータ。

パラメータ	設定値
出力チャンネル数	8
プリアンプゲイン	5.5556
ADC の変換係数	125[$\mu V/ADU$]

4.3 非線形性

黒体炉を光源とし、1.15[s] 間隔の Up-the-Ramp Sampling で取得した 115[s] 積分 (101 枚) のフラット画像のデータセットを 64 セット用いて検出器の非線形性の解析を行った (表 4.2 参照)。ただし、画像の取得は、黒体炉がセットポイント (690[K]) に到達してからしばらく時間を置き、温度が安定してから行われた。実験のセットアップを図 4.4 に、取得されたフラット画像の例を図 4.5 に示す。

表 4.2: 非線形性の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
UTR	0.1 [s]	100	1	1	115 [s]	64



図 4.4: 黒体炉によるフラット画像取得のセットアップ。外部からの迷光の影響を軽減するために黒い遮光布を被せてある。

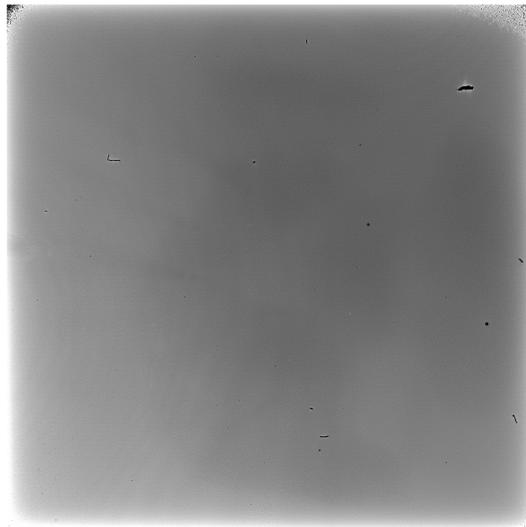


図 4.5: 取得されたフラット画像。検出器の四隅にバッドピクセルが集中して存在していることが分かる。カウントが低くなっており、バッドピクセルに見えるもののうち、周辺が明るくなっているものは塵によるアーティファクトである。

4.3.1 検出器の平均的な非線形性

まず、64 枚の同じ積分時間の CDS 画像をピクセルごとに中央値をとることで生成した画像 (メジアンスタック画像) を生成した。次に、図 4.6 のように、横軸: フレームナンバー、縦軸: メジアンスタック画像の中央値カウントとしたプロットにおいて、非線形性が小さく、かつ、読み出しノイズやポアソンノイズの影響をあまり受けない 2000-5000[ADU] のデータを用いて一次関数でフィッティングを行った。その後、測定データとフィッティング直線の比を求めたものが図 4.7 である。この比 (今後 Ratio と呼ぶ) は非線形性の大きさを表す指標であり、1 に近いほど線形であることを意味する。この Ratio のプロットから求めた検出器の非線形性は表 4.3 のようであった。検出器の非線形性はウェルのほぼ全域で 10% 以下であった。

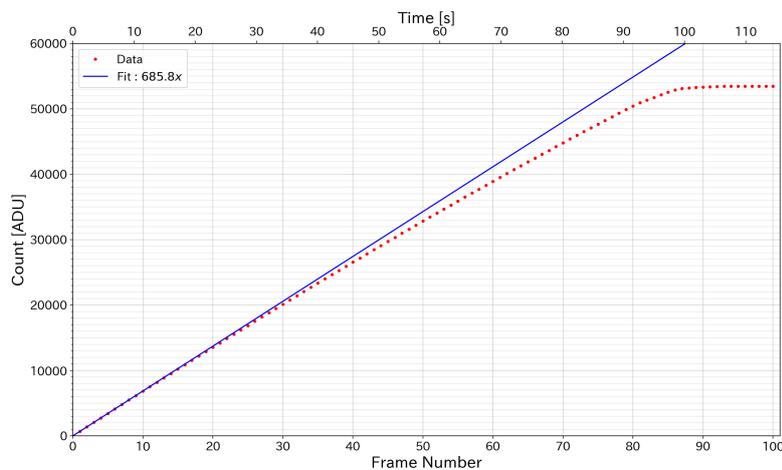


図 4.6: 横軸: フレームナンバー、縦軸: メジアンスタック画像の中央値のプロット。青実線は 2000-5000[ADU] の範囲のデータのフィッティング直線である。

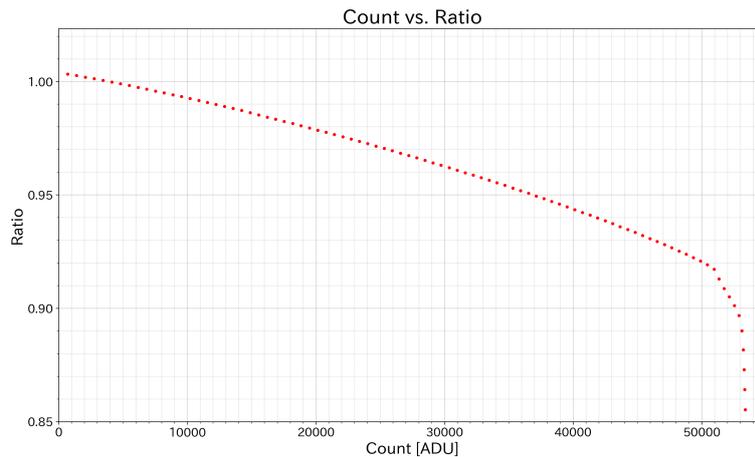


図 4.7: 検出器の非線形性。Ratio は図 4.6 のデータを 2000-5000[ADU] で線形フィッティングした直線で画像の中央値カウントを割ったものであり、1 に近いほど線形に近いことを意味する。

表 4.3: 検出器の非線形性。ただし、電子数に直す際のコンバージョンファクター g_c は §4.4.1 で求めた $g_c = 3.88[e^-/ADU]$ を用いており、非線形性補正後のカウントに g_c を乗じて求めている。

非線形性 < 1% 範囲	カウント	$< 1.2 \times 10^4 [ADU]$
	電子数	$< 4.7 \times 10^4 [e^-]$
非線形性 < 5% 範囲	カウント	$< 3.7 \times 10^4 [ADU]$
	電子数	$< 1.51 \times 10^5 [e^-]$
フルウェル	カウント	$< 5.3 \times 10^4 [ADU]$
	電子数	$< 2.29 \times 10^5 [e^-]$

4.3.2 非線形性の補正

Ratio のプロットにおいてウェルの約 9 割 (48000[ADU]) までで 5 次の多項式フィットを行い、フィッティング曲線で画像のカウントを割ることで非線形性の補正を行なった。その結果の一例を図 4.8 に示す。非線形性の補正により、ウェルのほぼ全域で平均的な非線形性を $\ll 1\%$ に抑えることが出来ている。また、図 4.8(右)の青実線の多項式フィッティング曲線を用いて全ピクセルに同じ非線形性の補正を適用する前後のピクセル毎の非線形性をそれぞれ図 4.9、図 4.10 に示す。ピクセル間の非線形性の違いが小さいため、同一のフィッティング曲線を用いても概ねよく非線形性を補正できている。

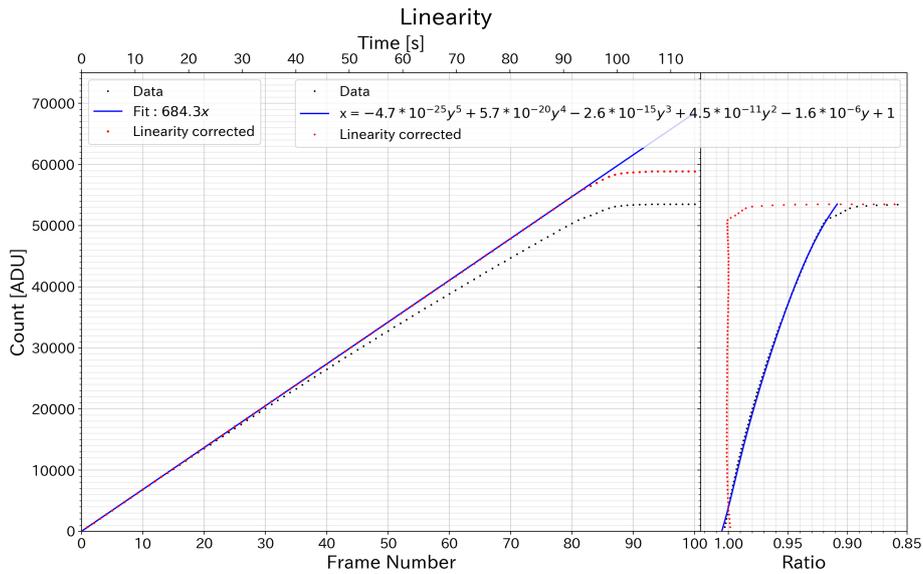


図 4.8: フレームナンバー (\propto 積分時間) 対画像の中央値カウントのプロットと、画像の中央値カウント対非線形性のプロット。左側のプロットでは黒点線が実際に測定された積分時間対カウントのプロット、青実線が 2000-5000[ADU] で線形フィッティングを行ったもの、赤点線が非線形性補正後のフレームナンバー対カウントのプロットであり、右側のプロットでは、黒点線が左側のプロットの黒点線と青実線の比を用いて求めた非線形性、青実線は Ratio の 5 次のフィッティング曲線、赤点線が非線形性の補正を行なった後の非線形性となっている。ただし、非線形性の補正に用いたフィッティング曲線 (右図青実線) は 64 個のデータセットを全て用いて算出した非線形性のフィッティング曲線であり、個々のデータセットのデータ (右図黒点線) にフィッティングを行った結果ではないことに注意。

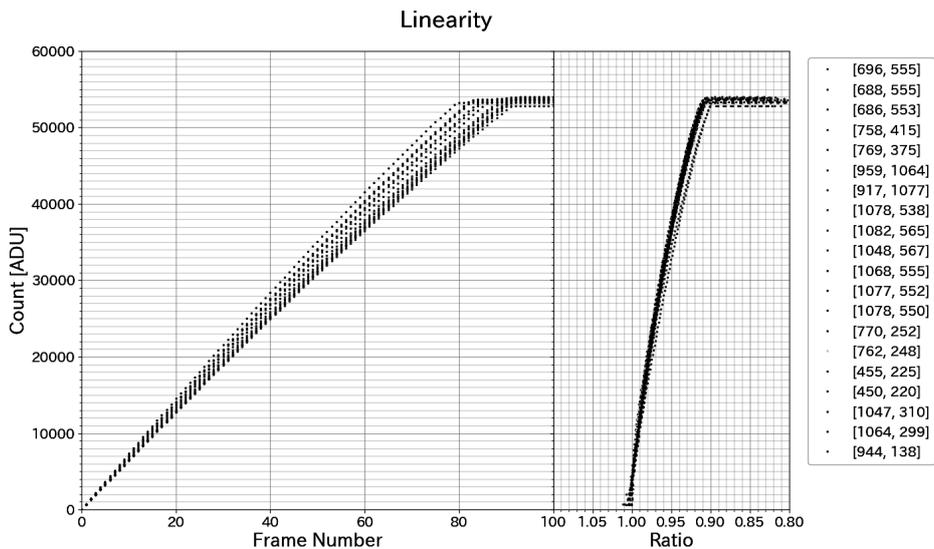


図 4.9: 任意に選ばれたピクセルの非線形性補正前の非線形性。

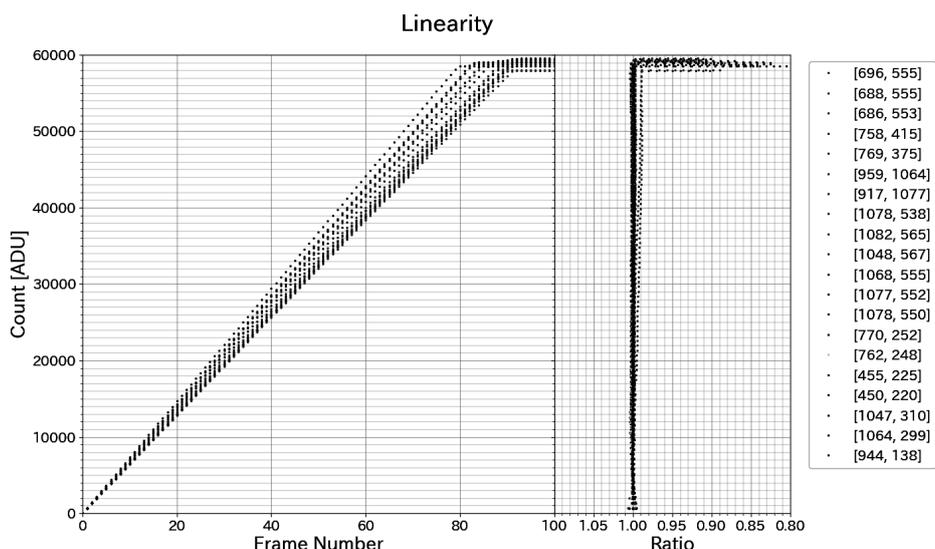


図 4.10: 図 4.9 と同じピクセルに検出器の平均的な非線形性を用いて非線形性の補正を行った後の非線形性。

4.3.3 ピクセル毎の非線形性の補正

画像の中央値ではなく、ピクセル毎に §4.3.1、§4.3.2 と同様のフィッティングを行い、その結果を用いて各ピクセルの非線形性の補正を行なった。図 4.9 のピクセルと同じピクセルについて非線形性補正後の非線形性を示した結果が図 4.11 である。非線形性はウェルのほぼ全域で $\ll 1\%$ の精度で補正することができている。また、ウェルの約 9 割の 48000[ADU] での非線形性のマップを図 4.12 に示す。図 4.28 と見比べると非線形性の大きい領域は暗電流の大きい領域と類似のパターンを持っていることがわかる。

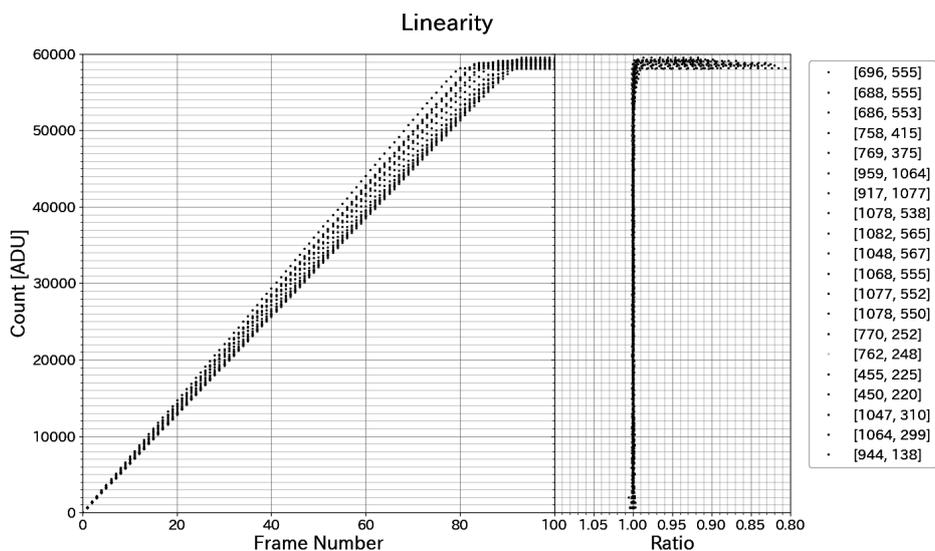


図 4.11: 図 4.9 と同じピクセルについてピクセル毎に非線形性のフィッティングを行った結果を用い、非線形性の補正を行なった後の非線形性。非線形性はウェルのほぼ全域で $\ll 1\%$ の精度で補正できている。

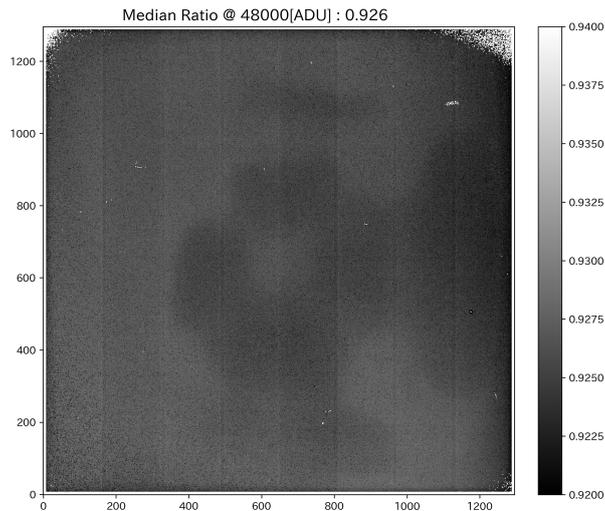


図 4.12: ウェルの約 9 割の 48000[ADU] でのピクセル毎の非線形性。ただし、検出器の四隅に見られる白い箇所は適切なフィッティングを行うことのできていないバッドピクセルであり、非線形性が小さいわけではないことに注意。非線形性の大きい領域は暗電流の大きい領域と類似のパターンを持っていることが判明した (図 4.28 参照)。

4.4 コンバージョンファクター

4.4.1 フォトントランスファー法

解析の際は 1.15[s] 間隔で Up-the-Ramp Sampling で取得した 115[s] 積分 (101 枚) の黒体炉フラットのデータセットを 5 セット用いた (表 4.4 参照)。ただし、この 5 セットは §4.3.1 で用いた 64 セットの中から 5 セットを任意に選んだものである。

表 4.4: コンバージョンファクターの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
UTR	0.1 [s]	100	1	1	115 [s]	5

差分画像を用いたフォトントランスファー法によりコンバージョンファクターを推定する。ここで差分画像を用いる理由は固定パターンによる影響を抑えるためである。理想的な場合、差分画像には平均値の周りの変動のみが残り、差分画像の分散は元々の画像の分散の 2 倍となっている。すべてのピクセルが同じ特性を持つと仮定すると、求めるべき複数回の読み出しによる同一ピクセルのカウントの標準偏差は、差分画像自体のカウントの標準偏差を $\sqrt{2}$ で割ったもので置き換えることができる。つまり、異なるピクセルのカウントの値を同じピクセルの異なる読み出しのカウントと同一視できる。

しかし、実際には、異なるデータセットの同じ露出時間の画像を用いた差分画像は、光源や積分時間の不安定性により 0 を中心とした分布をしているわけではない。よって、まず初めに画像を $27 \times 27 [pix^2]$ の領域に分割し、各領域の中央値を合わせる¹。次に、同じ積分時間の画像 2 枚から、平均画像と差分画像を生成する。ここで、今回はデータセットは 5 セットあるため、1 つの積分時間に対して $\binom{5}{2} = 10$ 枚ずつの平均画像と差分画像ができる。さらに、平均画像を $27 \times 27 [pix^2]$ の領域に分割し、各領域内の中央値を値にもつ 48×48 の

¹§C.1 参照

画像 (中央値画像:図 4.13(左) 参照) を生成し、また、差分画像を $27 \times 27[\text{pix}^2]$ の領域に分割し、各領域の不偏標準偏差/ $\sqrt{2}$ を値にもつ、 48×48 の画像 (標準偏差画像:図 4.13(右) 参照) を生成した。このようにして生成された中央値画像と標準偏差画像から、横軸:中央値画像のカウント、縦軸:標準偏差画像のカウントの二乗 (分散) としたプロットを作成し、一次関数でフィッティングを行う。すると、(2.8) より、フィッティング直線の傾きの逆数がコンバージョンファクターになる。

作成した二次元ヒストグラムを図 4.14 に示す。左が非線形性補正前で、右が非線形性補正後である。非線形性補正前は高カウント側で分散の増加が緩やかになっていたのが、非線形性補正後は線形に近い形になっていることがわかる。検出器の非線形性は §2.2.3 で述べたように電荷蓄積に伴う接合容量の増加が主な原因である。接合容量が増えると (2.2) からわかるようにコンバージョンファクターが大きくなるため、非線形性の補正前のフォントランスファーカーブは高カウント時に傾きが緩やかになっている。

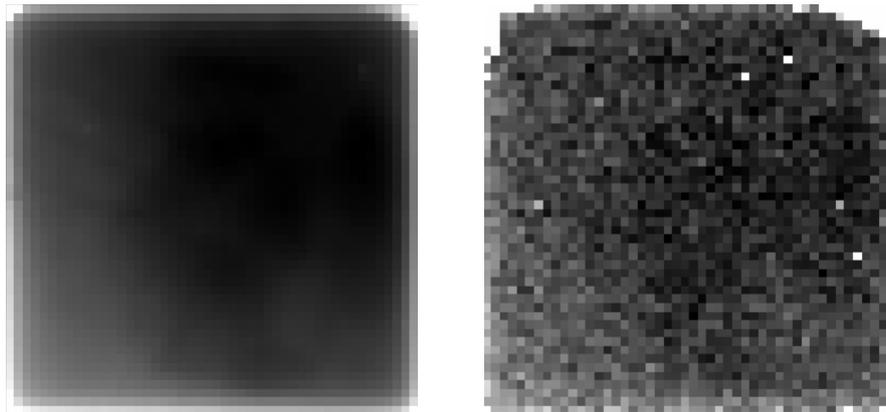


図 4.13: 中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。 $1296 \times 1296[\text{pix}^2]$ の画像を $27 \times 27[\text{pix}^2]$ の領域に分割してその領域内の統計値を計算して生成した 48×48 の要素を持つ画像である

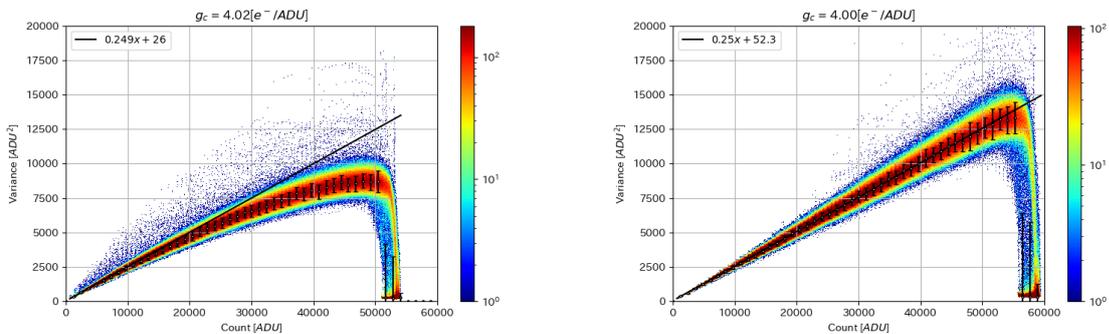


図 4.14: 非線形性補正前 (左) と非線形性補正後 (右) のフォントランスファーカーブ。白丸はカウントビン内の最頻値、エラーバーは各カウントビンの分散のばらつきを 1σ で示したものであり、フィッティング直線は各カウントビンの最頻値にそのカウントビンの度数で重みをつけて一次関数でフィッティングしたものである。

4.4.2 ピクセル毎のコンバージョンファクター

§4.3.1 の解析で用いたものと同じ $1.15[\text{s}]$ 間隔の Up-the-Ramp Sampling で取得した $115[\text{s}]$ 積分 (101 枚) のフラット画像のデータセットを 64 セット (表 4.2 参照) 用い、ピクセル毎のコンバージョンファクターの推定を行った。

pixel-by-pixel のコンバージョンファクターの解析手順は各領域の中央値を合わせるころまでは §4.4.1 と同じである。次に、同じ積分時間の画像 (今回は 64 枚) の同じピクセルのカウント値から中央値と不偏標準偏差を計算するというを全てのピクセルについて行い、メジアンスタック画像とピクセル標準偏差画像を生成する (図 4.15 参照)。これを異なる積分時間の画像について全て行う。すると今回用いたデータセットの場合、各 101 枚の中央値画像と標準偏差画像ができる。この画像を用いると、各ピクセルについてフォントランスファーカーブを作ることができる。そのフォントランスファーカーブを一次関数でフィッティングを行うとフィッティング直線の傾きの逆数からコンバージョンファクターが求まる。

このようにして求めた各ピクセルのコンバージョンファクターのヒストグラムを図 4.16 に示す。得られた結果は §4.4.1 と矛盾のないものであった。ただし、このヒストグラムの広がりには実際のコンバージョンファクターの値のばらつきを意味してはいない。いくつかのピクセルについて、カウントの増加レートとフォントランスファーカーブをプロットした図 4.17 を見ると、コンバージョンファクターが大きく推定されたピクセルが必ずしもカウントの増加が緩やかではなく、また、そもそもフォントランスファーカーブが直線に乗っていない。これは 64 セットでは、ピクセル毎のコンバージョンファクターの推定には不十分であることを意味している。

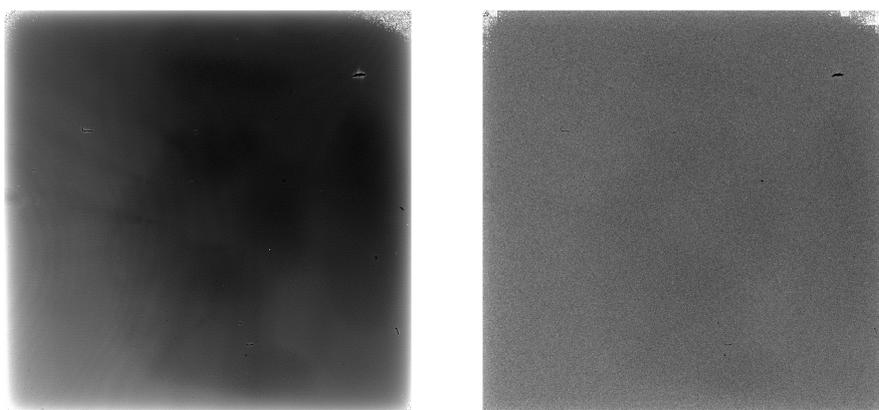


図 4.15: メジアンスタック画像 (左) とピクセル標準偏差画像 (右)。これらの画像は 1296×1296 の要素を持つ。

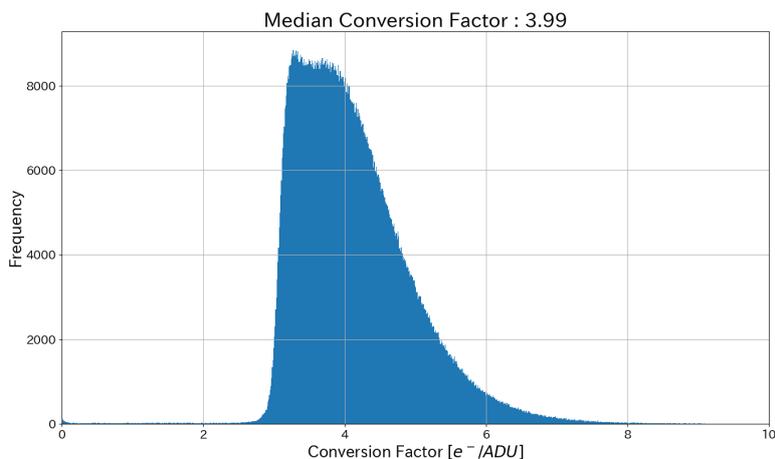


図 4.16: ピクセル毎のコンバージョンファクターの推定値のヒストグラム。

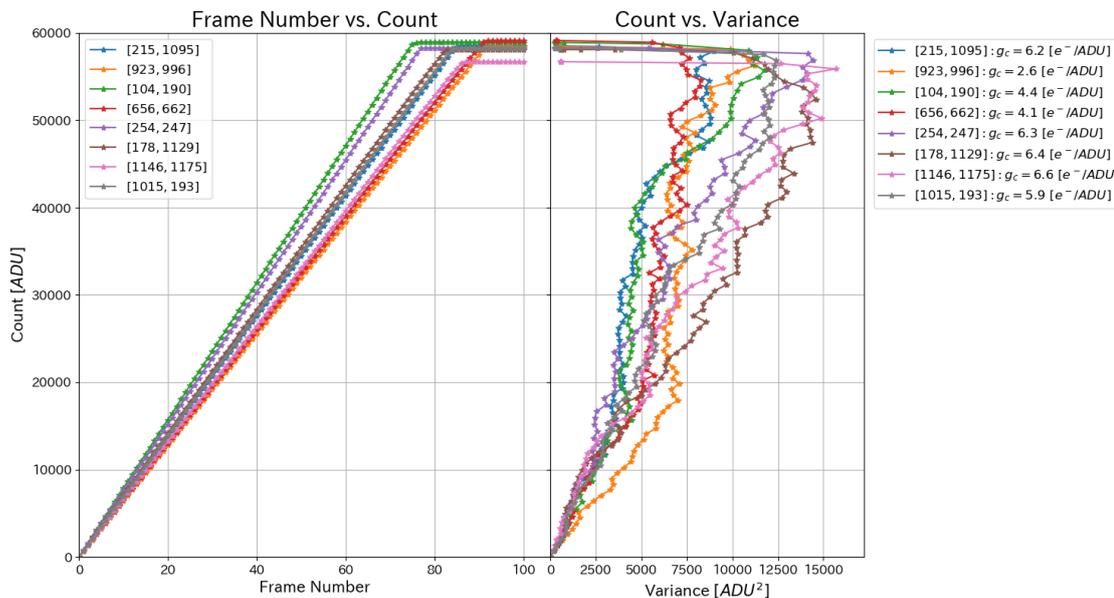


図 4.17: 任意に選ばれた 8 ピクセルのコンバージョンファクター。ただし、コンバージョンファクターを求める際の線形フィッティングはカウントが 2000 ~ 5000[ADU] の範囲にあるデータを用いている。

4.4.3 画素間容量による影響

画素間容量の解析には Folwer-1 Sampling で取得した、1.15[s] 積分のダーク画像を 55 セット用いた (表 4.5 参照)。

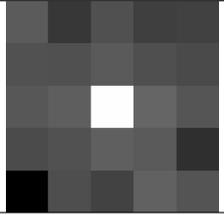
表 4.5: コンバージョンファクターの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
Fowler	0.1 [s]	1	1	1	1.15 [s]	55

今回の解析では、warm pixel と隣接するピクセルのカウント比からクロストークの大きさを求める方法 (warm pixel 法と呼ぶ) を用いて解析を行った。まず、 $27 \times 27 [pix^2]$ の領域の中央値を減算し、領域内のカウントの中央値 (つまり $0 [ADU]$) より 10σ 以上大きいピクセルを warm pixel とした。ただし、warm pixel の周囲の 8 ピクセルにも warm pixel がある場合は両者を解析から除外してある。次に warm pixel を中心とした $5 \times 5 [pix^2]$ の領域を切り出し、中心ピクセルで規格化した。さらに、入射光の非一様性によるカウントの勾配の影響を軽減するため、最外縁の $16 [pix]$ を用いて平面フィットをした平面を減算後、再度中心ピクセルで規格化を行い、すべての warm pixel について平均を取った。

図 4.6 に warm pixel の周りの信号のクロストークの様子と、そこから求めたクロストークの割合、コンバージョンファクターの補正係数を示す。ただし、 α は x 方向のクロストークの大きさ、 β は y 方向のクロストークの大きさである。クロストークの大きさは SWIMS の HAWAII-2RG 検出器に比べて小さいことが判明した (§6.3.2 参照)。また、コンバージョンファクターの補正係数より、画素間容量の影響を補正したコンバージョンファクターは $3.88 [e^-/ADU]$ と求まった。今後の解析の際はコンバージョンファクターとしてこの値を用いることにする。

表 4.6: warm pixel の周りの信号のクロストークの様子、割合と、そこから求まるコンバージョンファクターの補正係数。

クロストーク	
α	0.46%
β	0.29%
R	1.031

4.4.4 積分ノード容量

検出器のピクセルの積分ノード容量は (2.2) から、

$$C_{node} = \frac{g_c e A_{MUX} A_{amp}}{\mu_{ADC}} \quad (4.1)$$

と計算することができる。ここで、 $A_{MUX} = 1$ とし、 A_{amp} 、 μ_{ADC} に関しては表 4.1 で述べた通りである。すると、ノード容量は

$$C_{node} = \frac{3.88 [e/ADU] \times 1.60 \times 10^{-19} [C] \times 1 \times 5.56}{125 [\mu V/ADU]} \simeq 2.8 \times 10^{-14} [F] = 28 [fF] \quad (4.2)$$

と求まる。ただし、実際には、ソースフォロワーのゲインは 1 より少し小さいため、積分ノード容量もこの値よりも少し小さくなる。

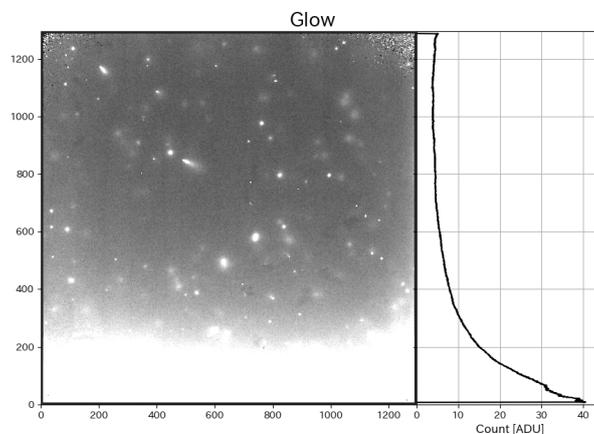
4.5 読み出しノイズ

4.5.1 n_{sample} 依存性

(2.8) からわかるように、検出器の読み出しノイズは図 4.14 のようなフラット画像を用いて作成したフォントランスファーカーブのフィッティング直線の y 切片から求めることが可能である。しかし、これはカウントの大きい領域からの外挿でありあまり精度が高くない。そこで、今回は画像のカウントが 0 に近いダーク画像を用いて読み出しノイズを求めていく。ただし、ここでいう読み出しノイズとは CDS 画像の読み出しノイズのことである。用いたデータは表 4.7 に示すような、Fowler Sampling で $n_{osample} = 1$ に固定し、 n_{sample} の値を変化させた最短露出のダーク画像である。ダーク画像では、読み出し回数を増加させると図 4.18 のように検出器下部にグローが見られることが判明した。このグローについては §4.6 で考察する。

表 4.7: 読み出しノイズの n_{sample} 依存性の測定に用いたデータのパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
Fowler	0.1 [s]	1	1	1	1.15 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	2	1	2.20 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	3	1	3.25 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	4	1	4.30 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	5	1	5.35 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	6	1	6.40 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	7	1	7.45 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	8	1	8.50 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	9	1	9.56 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	16	1	16.90 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	25	1	26.36 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	36	1	37.92 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	49	1	51.58 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	64	1	67.34 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	81	1	85.20 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	100	1	105.16 [s]	5

図 4.18: $n_{sample} = 100, n_{osample} = 1$ ($t_{int} = 105.16[s]$) の Fowler Sampling で取得された CDS 画像。検出器下部にグローが見受けられる。

真の読み出しノイズ

ここでは暗電流やグローによるノイズ増加の影響を、ダーク画像を用いて作成したフォントランスファーカーブを外挿することで除去した真の読み出しノイズを求めていく。解析の手法は §4.4.1 と同じだが、今回は画像の分割の際の各領域の大きさは $9 \times 9 [pix^2]$ とした。

得られた結果を図 4.19 に示す。読み出しノイズは $n_{sample} = 16$ 以降はあまり大きな変化は見られなかったが、最小で $3.4[e^-]$ 程度まで低下した。この結果は §3.2.3 で求めた background limited な観測の際の読み出しノイズの要求性能を満たしていない。

各読み出しが独立であれば、読み出しノイズは $\sigma_{read} \propto 1/\sqrt{n_{sample}}$ に従って減衰していくはずである。しかしながら、実際はそうはならず、 $\sqrt{a/n_{sample} + b^2}$ という形である程度良いフィッティングができる。この傾向は $n_{osample} = 2, 16$ の時も同様であった (図 4.20、図 4.21 参照)。この b で表される固定レベルノイズ成分は $1/f$ ノイズ等による影響であると考えられる。

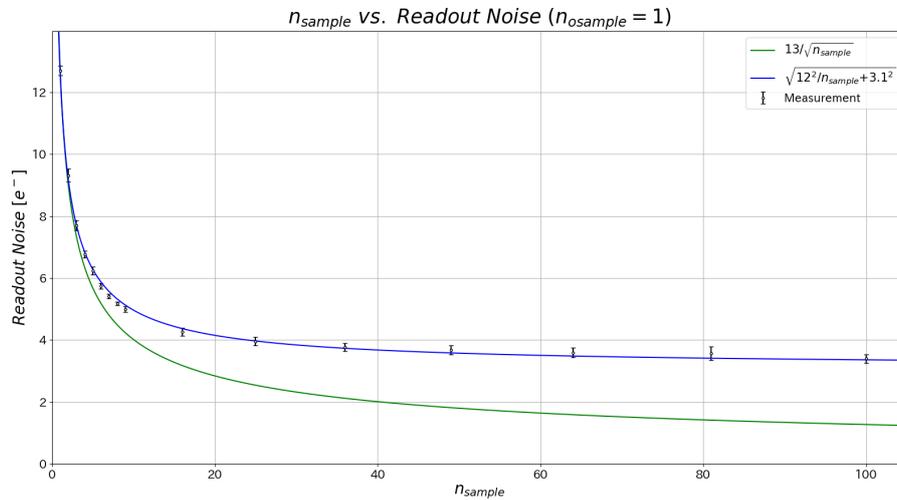


図 4.19: 読み出しノイズの n_{sample} 依存性。ただし、白丸は感光ピクセルの読み出しノイズ、エラーバーはチャンネル毎に評価した読み出しノイズの標準偏差を示している。ただし、エラーバーは各チャンネルの読み出しノイズの推定値の誤差を含まない。緑実線は $\propto 1/\sqrt{n_{sample}}$ で減衰する理論曲線、青実線は $\sqrt{a/n_{sample} + b^2}$ という固定レベルノイズを含んだ形でフィッティングを行った曲線である。

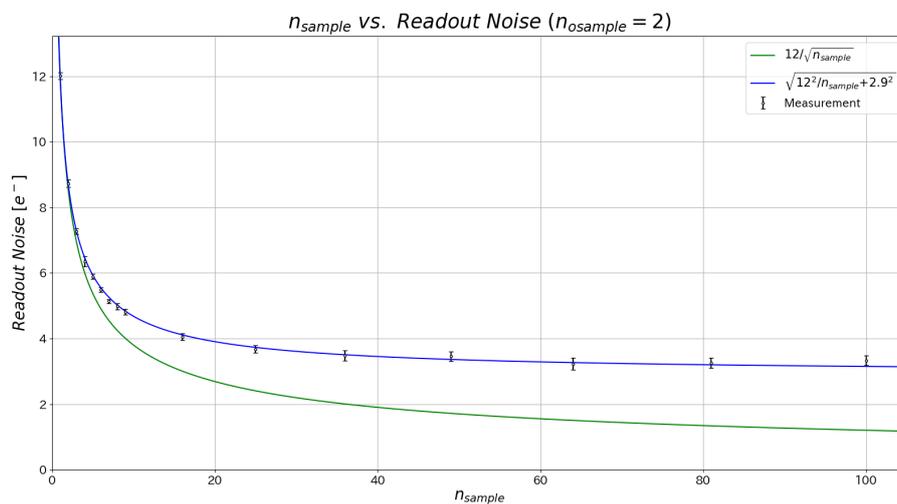


図 4.20: $n_{osample} = 2$ の時について作成した図 4.19 と同様のプロット。

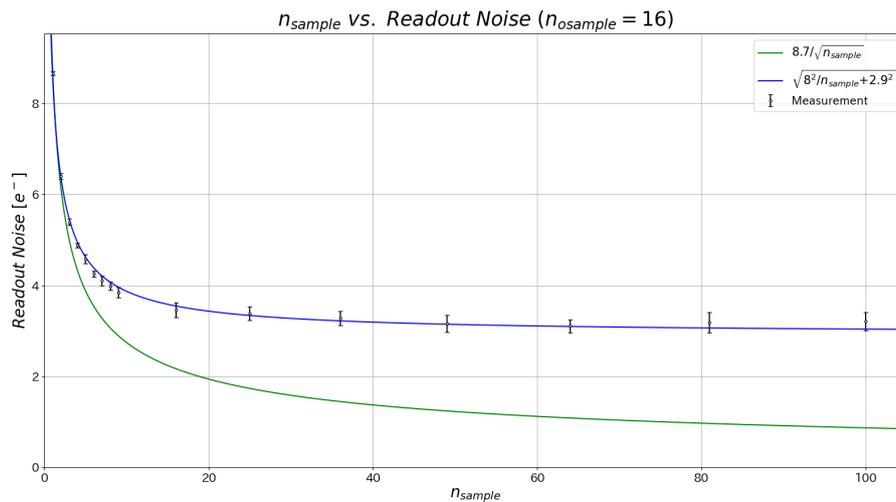


図 4.21: $n_{observable} = 16$ の時について作成した図 4.19 と同様のプロット。

実効的な読み出しノイズ

検出器グローや暗電流によるノイズを含めた読み出しノイズと n_{sample} の関係は図 4.22 の黒丸のようであった。また、ここから暗電流のショットノイズの影響を除いた、真の読み出しノイズとグローのノイズを合わせた読み出しノイズ (実効的な読み出しノイズと呼ぶことにする) と n_{sample} の関係は白丸のようになった。ただし、暗電流の大きさとしては $1.5 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$ を用いている (§4.7.1 参照)。検出器グローは積分時間には依存しないため²、実効的な読み出しノイズも積分時間には依存しない。よって観測の際のノイズ評価には、読み出し回数関数の関数であり積分時間によらない実効的な読み出しノイズと積分時間に比例する背景光や暗電流を別々に考えれば良い。

実効的な読み出しノイズは $n_{observable} = 1$ or 2 の時は、 $n_{sample} = 25$ or 36 or 49 の時が、 $n_{observable} = 16$ の時は $n_{observable} = 16$ or 25 の時が最も実効的な読み出しノイズが小さくなった (§C.2 も参照のこと)。また、実効的な読み出しノイズは $\sqrt{a/n_{sample} + b^2 + cn_{sample}}$ の形である程度良いフィッティングができています。 c は主に検出器グローが占めていると考えられる。実際、検出器グローは $0.12 [e^-/read]$ であり (§4.6 参照)、図 4.22 のフィッティング曲線の c の値と概ね一致している。

²もし積分時間中一定の発光があったとしても、今回はそのような成分は暗電流に含んでいる。

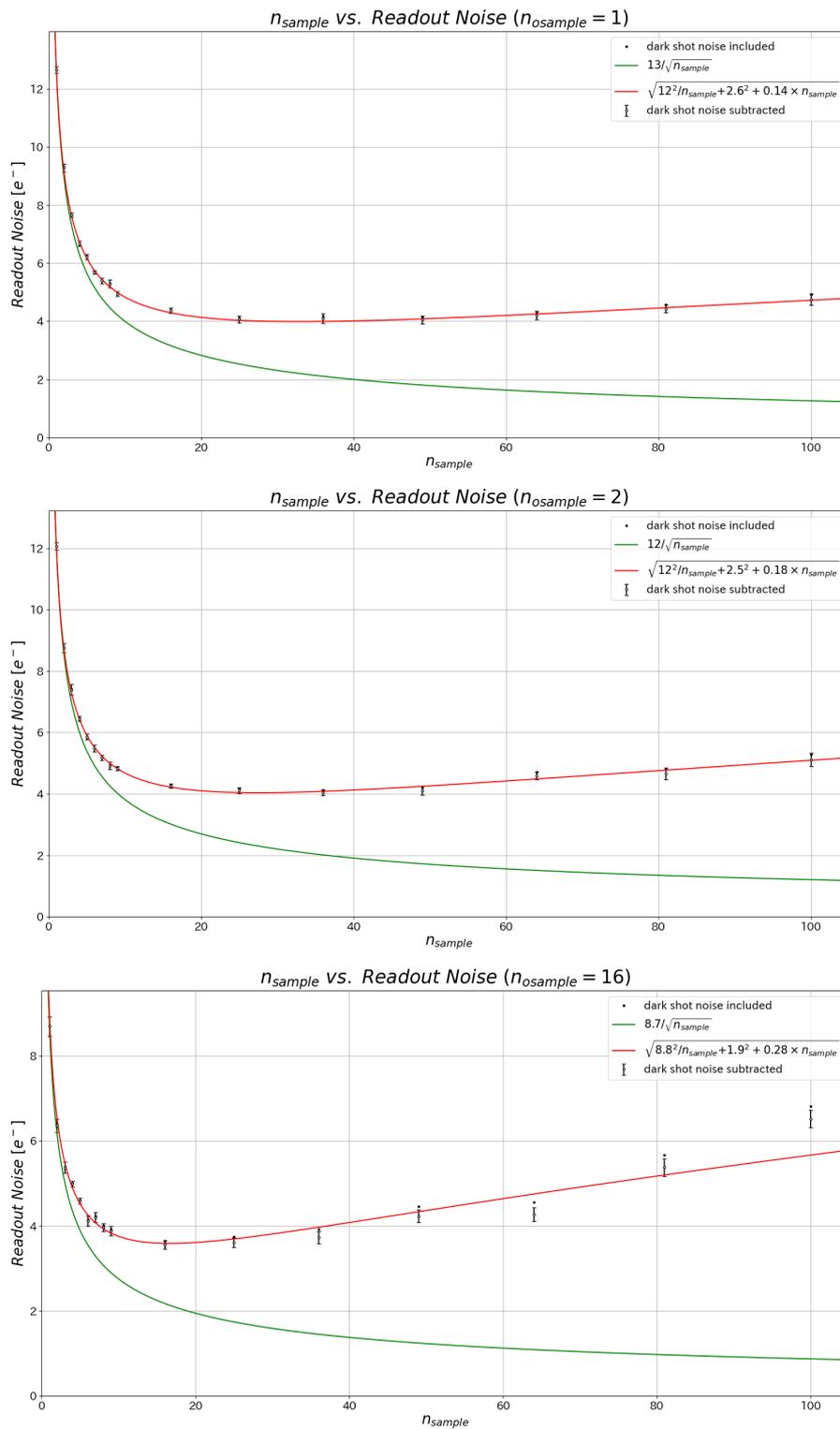


図 4.22: 検出器のグローや暗電流によるノイズを含めた読み出しノイズとそこから暗電流の効果を引きいた実効的な読み出しノイズの n_{sample} 依存性。緑実線は $\propto 1/\sqrt{n_{sample}}$ で減衰する理論曲線、赤実線は $\sqrt{a/n_{sample} + b^2 + cn_{sample}}$ という読み出し回数と共に増加する成分も含んだフィッティング曲線である。

4.5.2 $n_{osample}$ 依存性

Fowler Sampling で $n_{sample} = 1$ に固定し、 $n_{osample}$ の値を変化させた最短露出のダーク画像を用いて解析を行なった (表 4.8 参照)。

表 4.8: 読み出しノイズの $n_{osample}$ 依存性の測定に用いたデータのパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
Fowler	0.1 [s]	1	1	1	1.15 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	1	2	1.26 [s]	5
Fowler	0.1 [s]	1	1	16	2.73 [s]	5

得られた結果を表 4.9 にまとめた。 n_{sample} を増やした時よりも明らかに読み出しノイズの減少幅が小さいことがわかる。 $n_{osample}$ を増加させると、IRCA3 で指定した回数だけ 500[ns] ごとにサンプリングが行われるが、これは n_{sample} を増やした時のサンプリング間隔 ($\geq 1.05[s]$) よりも遥かに短く、低周波のノイズをあまり取り除くことができていないことが原因であると考えられる。

表 4.9: $n_{sample} = 1$ に固定し、 $n_{osample}$ を変化させた時の (真の) 読み出しノイズ。

$n_{osample}$	1	2	16
σ_{read}	12.7 [e^-]	12.0 [e^-]	8.7 [e^-]

4.6 検出器グロー

Up-the-Ramp Sampling で同じ積分時間で異なる読み出し回数としたデータセットを 5 セット用いて検出器のグローの解析を行なった (表 4.10 参照)。Up-the-Ramp Sampling で取得されたデータセットの最終フレームの CDS 画像からメジアンスタック画像を生成し、同じ積分時間で異なる読み出し回数のメジアンスタック画像同士を引き算することで読み出しによるグローの成分のみを抽出することができる。また、読み出し回数の差で割ることにより、読み出し一回あたりのグローが分かる。

表 4.10: 検出器グローの評価に用いたデータのパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
UTR	0.1 [s]	96	1	1	110 [s]	5
UTR	14.7 [s]	7	1	1	110 [s]	5
UTR	0.1 [s]	64	1	1	74 [s]	5
UTR	9.5 [s]	7	1	1	74 [s]	5
UTR	0.1 [s]	48	1	1	55 [s]	5
UTR	5.1 [s]	9	1	1	55 [s]	5

解析の結果を図 4.23 に示す。図の左側は読み出し一回あたりのグローの画像、右側は x 方向の中央値を取ることによって得た、グローの y 軸方向の分布である。どの組み合わせにおいても、同じようなグローの強度分布を示しており、グローは読み出し回数に比例する成分であることがわかる。検出器上の位置とグローの強度を表 4.11 にまとめた。グローは最大で $1.4[e^-/read]$ 程度の値を持っており、検出器下部から $800[px]$ 程度まで影響を及ぼすことがわかった。このグローは水平レジスタ由来であると考えられる。

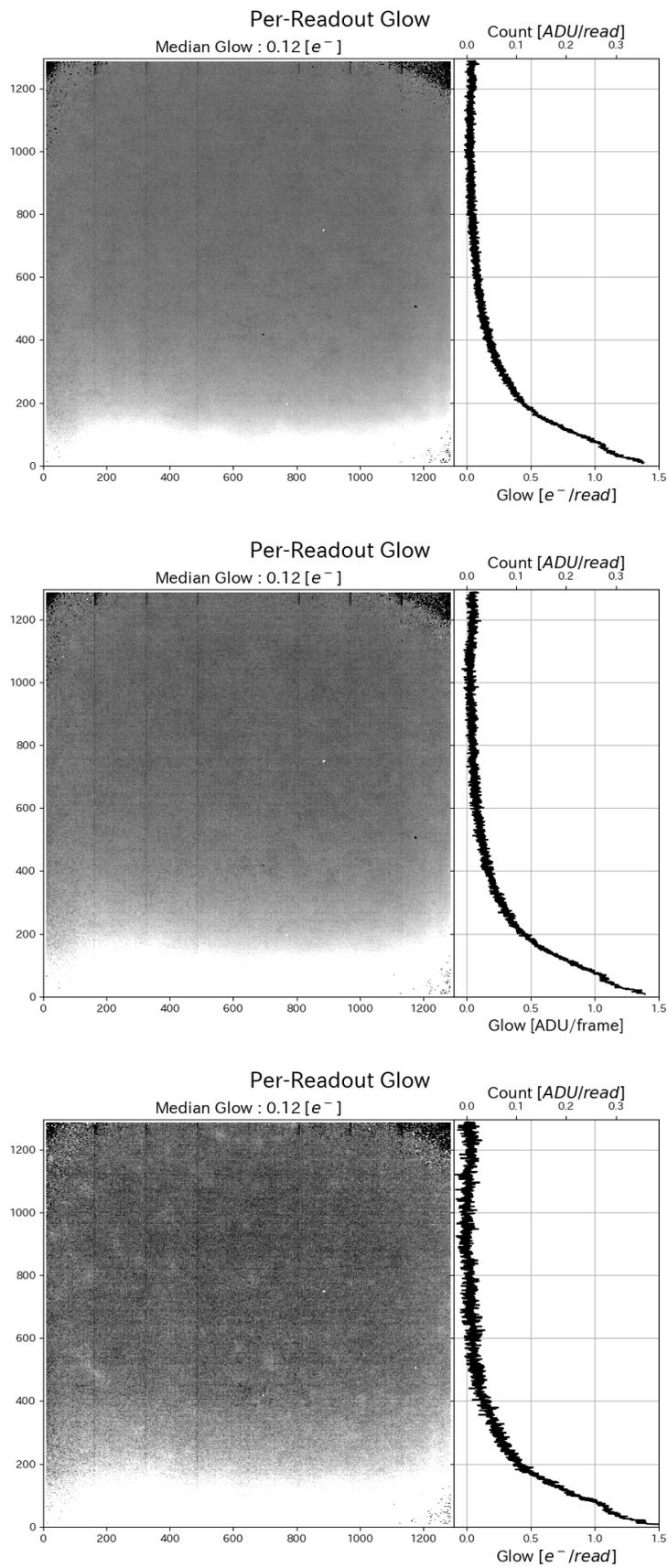


図 4.23: 読み出し 1 回あたりの検出器のグローの画像とその y 軸方向分布。上から 110[s]、74[s]、55[s] 積分のデータである。

表 4.11: 検出器のグローの強度。

検出器上の位置	グロー強度	
	カウント	電子数
$y < 50$	$> 0.28 [ADU/read]$	$> 1.1 [e^-/read]$
$y < 100$	$> 0.22 [ADU/read]$	$> 0.87 [e^-/read]$
$y < 200$	$> 0.11 [ADU/read]$	$> 0.43 [e^-/read]$
$y < 400$	$> 0.043 [ADU/read]$	$> 0.17 [e^-/read]$
全体	$0.031 [ADU/read]$	$0.12 [e^-/read]$

4.7 暗電流

データ取得は図 4.24 のように検出器前面にアルミニウムの板をねじ止めし、遮光をして行った。こうすることで、輻射シールドのケーブル用のパンチホールから漏れ出す 300[K] の輻射や fanout board の部品からのエレクトロルミネセンス等の影響を防ぐことが可能である。

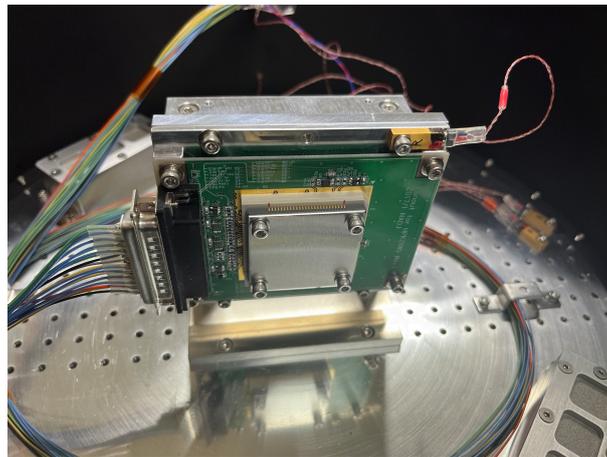


図 4.24: 暗電流測定の際のセットアップ。検出器をアルミニウム板で遮光することにより、デューワー内の迷光の影響を受けない測定が可能になる。

4.7.1 暗電流の大きさ

暗電流の測定に用いたデータは Up-the-Ramp Sampling で取得した $t_{int} \simeq 10000[s]$ 積分 (31 枚) のダーク画像であり、120[K], 140[K], 160[K] のものをそれぞれ 16, 5, 2 セット用意した (表 4.12 参照)。ただし、グローバルリセットのパルス長は 1[ms] である。

表 4.12: 暗電流の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

検出器温度	mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
120[K]	UTR	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	16
140[K]	UTR	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	5
160[K]	UTR	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	2

暗電流は横軸を積分開始からの時間、縦軸を CDS 画像の中央値カウントとしてプロットし、データを直線でフィッティングを行った時の直線の傾きにコンバージョンファクターを乗算することで求めることができる。

● 120[K]

図 4.25(左) は 120[K] で Up-the-Ramp Sampling で取得したりセットフレームと最終フレームを用いて生成された 10000[s] 積分のダーク画像である。ダーク画像には淡く広がった宇宙線イベントが多数見受けられる。これは、今回用いている InGaAs 検出器が基板除去されていないタイプであるため、基板上部で吸収された宇宙線による発光、もしくは、生成された電荷の拡散クロストークにより、引き起こされたものであると考えられる。図 4.25(右) はダーク画像から生成された積分時間対カウントのプロットである。ただし、フィッティングは積分開始から 7000[s] 以降のデータを用いており、他の温度の暗電流の大きさを求めるためにフィッティングを行う際も積分開始から 7000[s] 以降のデータを使用する。複数のプロットのフィッティング直線の傾きより、暗電流の大きさは $\sim 1.4 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$ であると求めた。ただし、この測定にはほとんど検出器グローは影響を与えない。30 回の読み出しで検出器グローは $3.6 [e^-]$ 程度であり、10000[s] の積分では $3.6 \times 10^{-4} [e^-/s/pix]$ の暗電流の過大評価につながる。これはフィッティング直線から求めた暗電流の大きさに比べて十分小さく、無視できる。

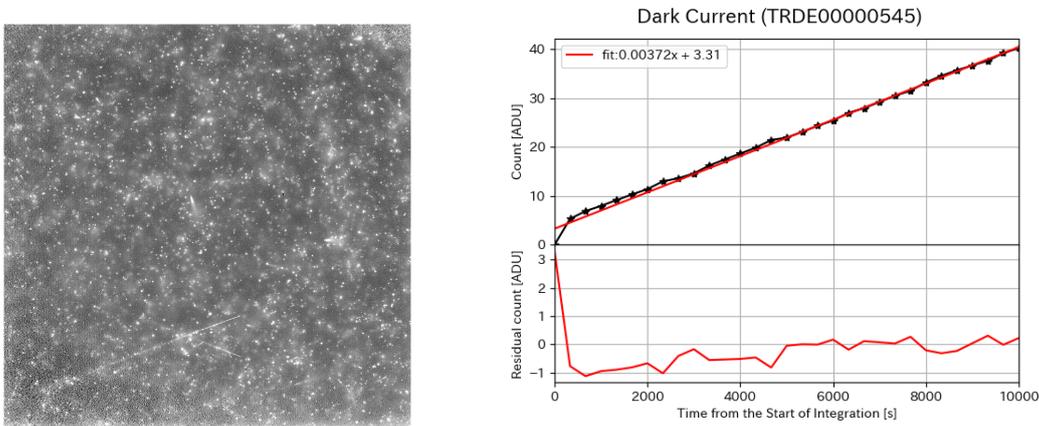


図 4.25: 検出器温度が 120[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。ただし、右図の凡例にある直線の傾きは $ADU/s/pix$ 単位で表された暗電流である。

120[K] で取得した同じ露出時間の 16 枚の CDS 画像のメジアンスタック画像を図 4.26(左) に示す。メジアンスタック画像からわかるように宇宙線の効果は適切に取り除くことができている。また、メジアンスタックした画像から生成した積分時間対カウントのプロットは図 4.26(右) のようになった。プロットの傾きより求まる暗電流は $\sim 1.5 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$ であり、単一の Up-the-Ramp Sampling のデータセットから測定された暗電流の大きさとほぼ同じである。つまり、10000[s] 程度の積分であれば、メジアンスタックを行わなくても画像の中央値をとることで宇宙線の効果を受けない暗電流の測定を行うことができる。よって、メジアンスタックによって宇宙線の効果を除去するのに十分なデータセット数のない 140[K], 160[K] についても十分に信頼できる暗電流の測定値を得ることがわかった。

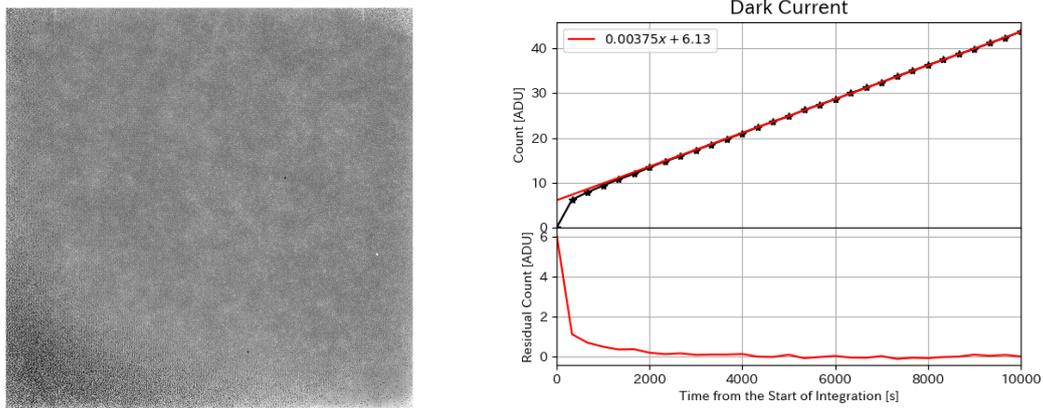


図 4.26: 検出器の温度が 120[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 16 枚をメジアンスタックしたもの (左) と、横軸:積分時間、縦軸:メジアンスタック画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。

• 140[K]

図 4.27(左) は 140[K] で取得した 10000[s] 積分のダーク画像である。120[K] の時も見えていた宇宙線の影響に加え、グローバルな暗電流のパターンも見えてきている。図 4.27(右) にあるランプサイクルの積分時間対カウントのプロットを示す。複数のプロットのフィッティング直線の傾きより求められた、暗電流の大きさは $\sim 5.2 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$ である。

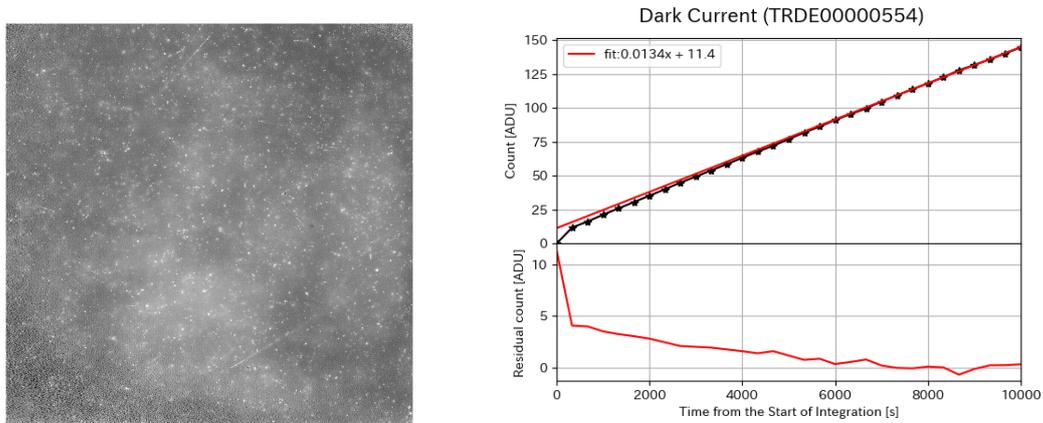


図 4.27: 検出器温度が 140[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。

• 160[K]

図 4.28(左) は 160[K] で取得した 10000[s] 積分のダーク CDS 画像である。宇宙線の影響は、大きな暗電流に埋もれてしまっており、ほとんど確認できない。図 4.28(右) に積分時間対カウントのプロットの一例を示す。フィッティング直線の傾きより、暗電流の大きさは $\sim 5.1 \times 10^{-1} [e^-/s/pix]$ と求められた。

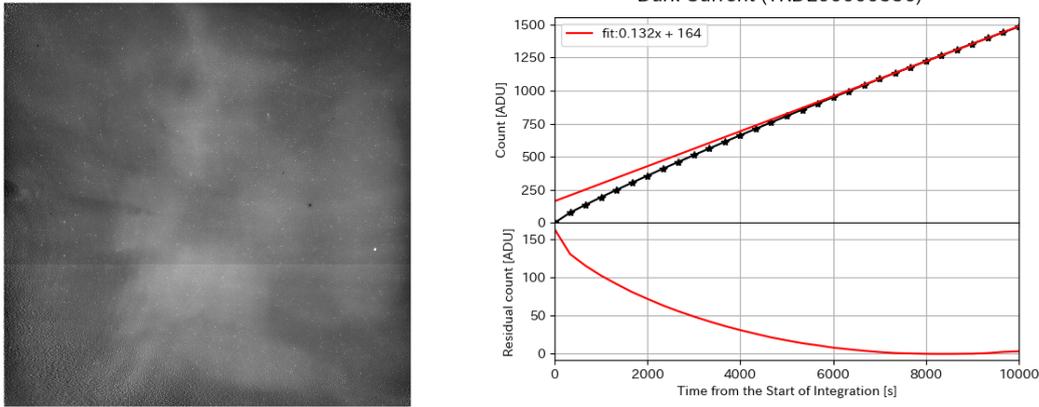


図 4.28: 検出器温度が 160[K] の際の 10000[s] 積分の CDS 画像 (左) と、横軸:積分時間、縦軸:画像の中央値カウントとした時のプロット (右)。

表 4.13 に複数の温度での暗電流の測定結果をまとめた。測定された暗電流の大きさは SWIMS の HAWAII-2RG の $\sim 100[K]$ での暗電流の大きさ $3-6[e^-/s/pix]$ (Terao 2017) に比べて 160[K] では同程度、120, 140[K] では一桁程度小さいという結果になった。しかし、今回の測定の中で最も温度が低く、暗電流も小さい 120[K] での測定でも TARdYS での background limited な観測の際の暗電流に対する要求性能 ($\ll 1.1 \times 10^{-4}[e^-]$) を満たすことはできていない。検出器温度を 120[K] 未満にした時に要求性能を満たすことができるかを調べることは今後の課題である。

表 4.13: 異なる温度での暗電流の大きさ。

検出器温度	暗電流
120[K]	$1.5 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$
140[K]	$5.2 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$
160[K]	$5.1 \times 10^{-1} [e^-/s/pix]$

4.7.2 積分時間対カウントプロットの y 切片

アナログフロントエンドの電源を入れた直後と、十分に時間が経った後の積分時間対カウントのプロットを 図 4.29 に示す。ここで、使用したデータは 120[K] で取得されたものである。電源投入直後にはプロットの y 切片が大きくなっていることがわかる。これはアナログフロントエンドの電源を切ると、検出器に印加されていた逆バイアス電圧がなくなり、空乏層幅が検出器が飽和した時と同じように狭まることで、再び電源を入れて撮像をする際にパーシステンスが生じているものと考えている。ただし、時間が経った後も、 y 切片は完全に 0 になるわけではなく、 $3-5[ADU]$ 程度の値を持ち続けていた。この残存する y 切片はリセットアノマリーであると考えている。

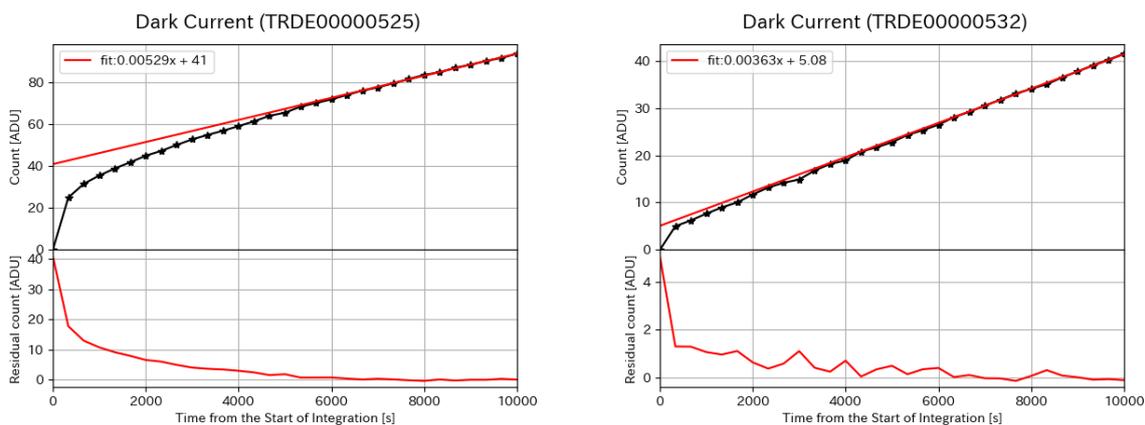


図 4.29: アナログフロントエンドのスイッチをオンにした直後の時間対カウントプロット (左) と十分に時間が経った後の時間対カウントプロット (右)。電源投入直後はフィッティング直線の y 切片が大きくなっていることがわかる。

4.7.3 ダーク画像における固定パターン

長時間積分のダーク画像において、特に画像の左下に暗電流のパターンが現れることが判明した。120[K] のメジアンスタック CDS 画像の左下の領域を拡大したものを図 4.30 に示す。画像から暗電流の大きいピクセルと小さいピクセルが隣り合って存在している様子が見てとれる。

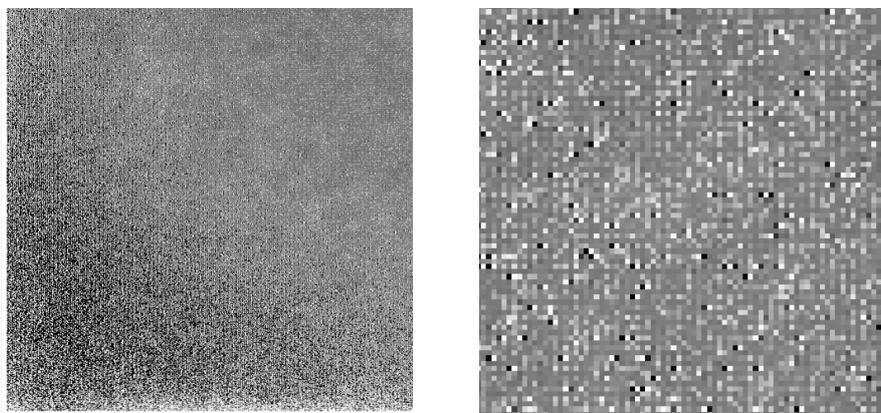


図 4.30: メジアンスタック画像の左下の拡大を拡大したもの (左) とそれをさらに拡大した画像 (右)。暗電流の大きいピクセルと小さいピクセルが隣接している様子が見える。

このパターンは異なるデータセット間で同じ固定パターンであることがわかっている。異なるデータセットの 10000[s] 積分のダーク画像同士を引き算したのが図 4.31 である。差分画像では暗電流のパターンが消えていることがわかる。現状、このパターンがなぜ生まれるかはわかっておらず、パターンの発生機構、観測に与える影響、他の素子でも発生するか否かなどの調査が必要である。

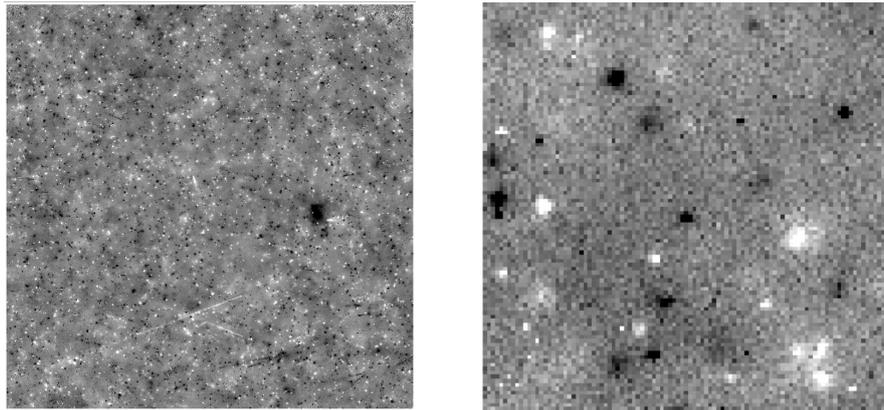


図 4.31: 120[K] の時の暗電流 CDS 画像 2 枚の差分画像 (左) と差分画像の左下の拡大図 (右)。左下のパターンが見えなくなっていることから、CDS 画像で見えていたパターンは固定パターンであったことがわかる。

4.7.4 支配的なノイズコンポーネント

暗電流によるショットノイズと読み出しノイズのどちらが支配的になるのかの比較を行う。ただし、読み出しノイズは実効的な読み出しノイズが最も小さくなる $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の値 $\sigma_{read} = 3.4[e^-]$ を用いることにする。

横軸を積分時間、縦軸をノイズの大きさとしたプロットを図 4.32 に示す。暗電流によるショットノイズは 120, 140, 160[K] の時、それぞれ積分時間が 770.7, 222.3, 22.7[s] を超えると読み出しノイズよりも支配的になることがわかった。ただし、 $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の最小積分時間は 43.6[s] であるので 160[K] の時は常に暗電流によるショットノイズの方が読み出しノイズよりも大きくなる。

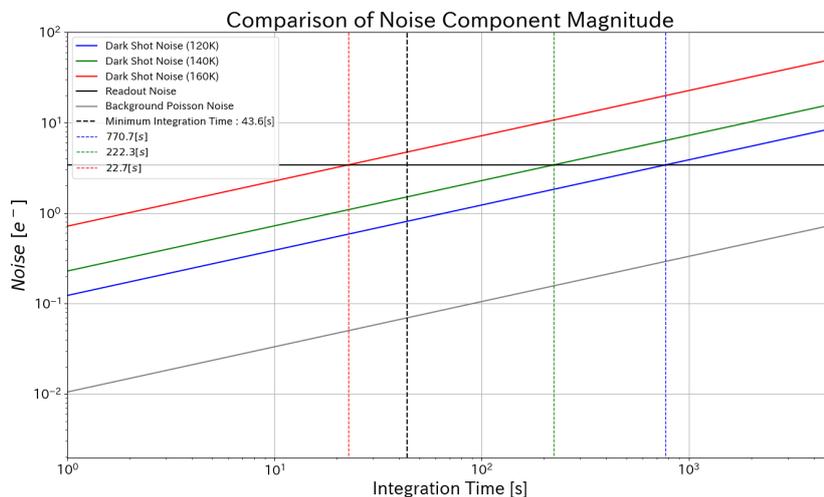


図 4.32: 各読み出し時間におけるノイズコンポーネントの大きさ比較。ただし、読み出しノイズの値としては実効的な読み出しノイズが最も小さくなる $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の値を用いている。青、緑、赤の実線はそれぞれ 120[K], 140[K], 160[K] の時のダークショットノイズ、灰色の実線は §3.2.3 で求めた背景光のポアソンノイズ、赤、緑、青の点線は読み出しノイズとダークショットノイズの寄与が等しくなる時の積分時間で、黒点線は $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ の時の最短積分時間である。

4.8 リセットアノマリー

4.8.1 リセットアノマリーのリセットパルス長依存性

暗電流の試験で見えていたリセットアノマリーの大きさが積分開始前のリセットパルスの継続時間に依存するかを調べるために、パルス長 0.1[ms]、1[ms]、100[ms] と変化させ、 y 切片の大きさを確認した。

解析に使用したデータは表 4.14 の通りである。ただし、リセットパルス長が 1[ms] の際のデータは暗電流の解析に用いたものと同一である。

表 4.14: リセットアノマリーのリセットパルス長依存性の調査に用いたデータセットの読み出しパラメータ。

グローバルリセット継続時間	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
0.1 [ms]	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	8
1 [ms]	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	16
100 [ms]	332.3 [s]	30	1	1	10001 [s]	5

パルス長を変化させたときのフィッティング直線の y 切片の大きさと暗電流の大きさを表 4.15 に、グローバルリセットの継続時間を 0.1, 100[ms] とした時のプロットの例を図 4.33 に示す。暗電流の大きさはリセットパルス継続時間に影響を受けない。一方で、パルス長 1[ms] の時 (図 4.25(右) 参照) に比べ、100[ms] の時はアノマリーが大きく、0.1[ms] の時はアノマリーが小さいことがわかる。しかし、リセット時間を短くしすぎると電荷が完全にリセットできない可能性があることに注意されたい。電荷のリセットとリセットアノマリーのバランスを取った適切なリセット時間は今後探っていく必要がある。

表 4.15: リセットパルスの継続時間を変化させた時の積分時間対カウントプロットのフィッティング直線の y 切片の大きさと暗電流の大きさ。ただし、明らかにアナログフロントエンドの電源 ON/OFF に影響を受けているデータは除外してある。

グローバルリセット継続時間	リセットアノマリー	暗電流
0.1 [ms]	< 3 [ADU]	1.3 [$e^-/s/pix$]
1 [ms]	3-5 [ADU]	1.5 [$e^-/s/pix$]
100 [ms]	> 10 [ADU]	1.4 [$e^-/s/pix$]

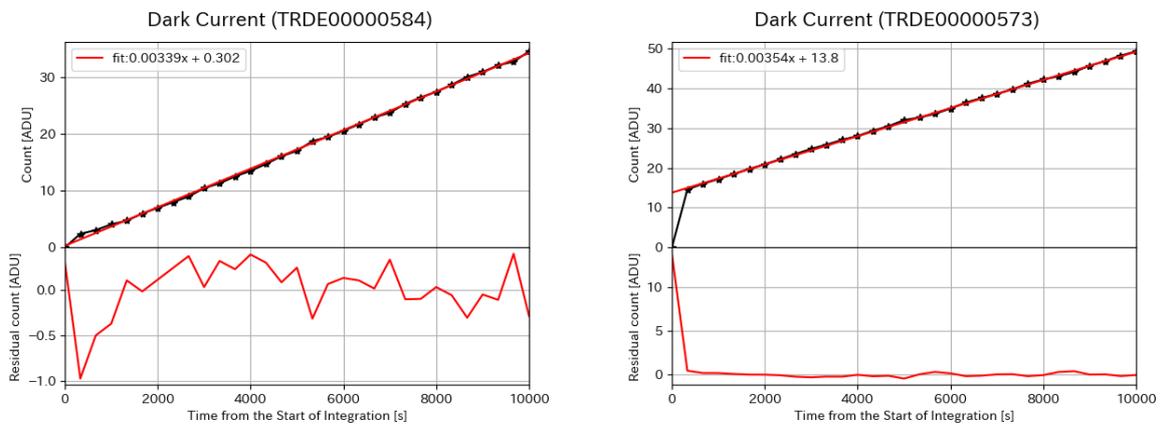


図 4.33: 左から、リセットパルスの継続時間が 0.1, 100[ms] の時の積分時間対中央値カウントのプロット。継続時間が 1[ms] の時のプロットは図 4.25(右) を参照。

4.8.2 リセットアノマリーの継続時間

図 4.25(右) や図 4.33 を見ると、リセットアノマリーはリセットフレームの次のフレーム、つまり、積分開始から 5 分半程度経過した時点以降は、大きな影響を及ぼしていないように見える。

リセットアノマリーがどの程度の時間持続するのかを調べるために検出器温度を 120[K] として、20 秒間隔で Up-the-Ramp Sampling で取得した $t_{int} \simeq 600[s]$ のデータを 5 セット用いて積分時間対カウントのプロット作成した (表 4.16 参照)。図 4.34 はその一例である。ただし、フィッティングは積分開始から 400[s] 以降の領域を用いて行われた。

表 4.16: リセットアノマリーの継続時間の測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
Fowler	19 [s]	30	1	1	602 [s]	5

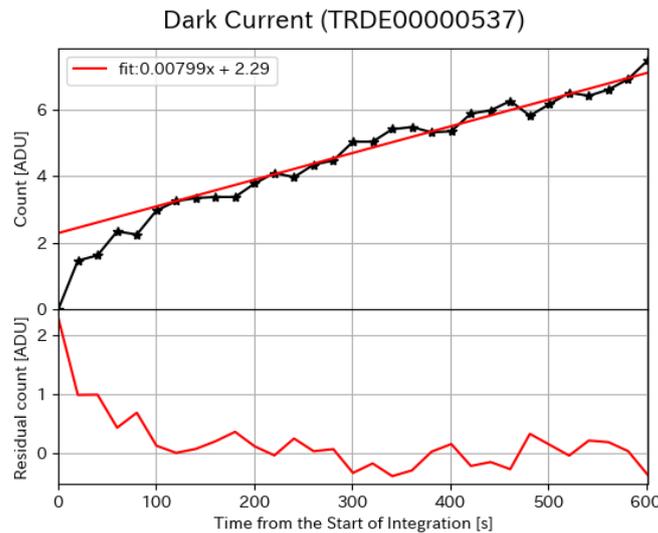


図 4.34: 積分開始から 600[s] までのデータを用いて生成した積分時間対カウントのプロット。リセットアノマリーの影響は積分開始から 100[s] 以内で特に大きい。しかし、暗電流の値が $3.1 \times 10^{-2}[e^-/s/pix]$ と 120[K] には大きめなので、積分開始から 10 分が経過した時点でもリセットアノマリーが持続している可能性がある。

図 4.34 を見ると、リセットアノマリーの影響は積分開始から 100[s] 程度の時間は特に大きい。ただし、それ以降はリセットアノマリーに影響されないと断言はできない。フィッティング直線の傾きに注目すると、そこからとまる暗電流の大きさは $3.1 \times 10^{-2}[e^-/s/pix]$ 程度であり、10000 秒積分の Up-the-Ramp Sampling のデータから求められた暗電流の大きさ ($1.5 \times 10^{-2}[e^-/s/pix]$) よりも有意に大きい。この傾向はどのデータセットでも共通であった。ただし、同じ回数を読み出しを 10000[s] ではなく 600[s] の間で行ったことにより、検出器のグローが原因で暗電流が大きく見えていることに注意が必要である。30 回の読み出しでは $3.6[e^-]$ の検出器グローが発生し、これは $6.0 \times 10^{-3}[e^-/s/pix]$ の暗電流の過大評価につながる。検出器グローの分を差し引いた暗電流の大きさは $2.5 \times 10^{-2}[e^-/s/pix]$ であり、それでも §4.7.1 で測定した大きさに比べてやや大きい。これは、リセットアノマリーが積分開始から 10 分程度は影響を与えている可能性を示唆している。

4.8.3 self heating

検出器のバイアスの温度ドリフトとリセットアノマリーの関係性を調べるためにバイアスレベルの温度依存性調査を行った。解析に使用したデータは §4.7 で使用したデータセット (表 4.12 参照) のリセットフレームである。

各温度のデータセットのリセットフレームをメジアンスタックした画像の参照ピクセルのカウントをチャンネルごとにプロットしたものを図 4.35 に示す。

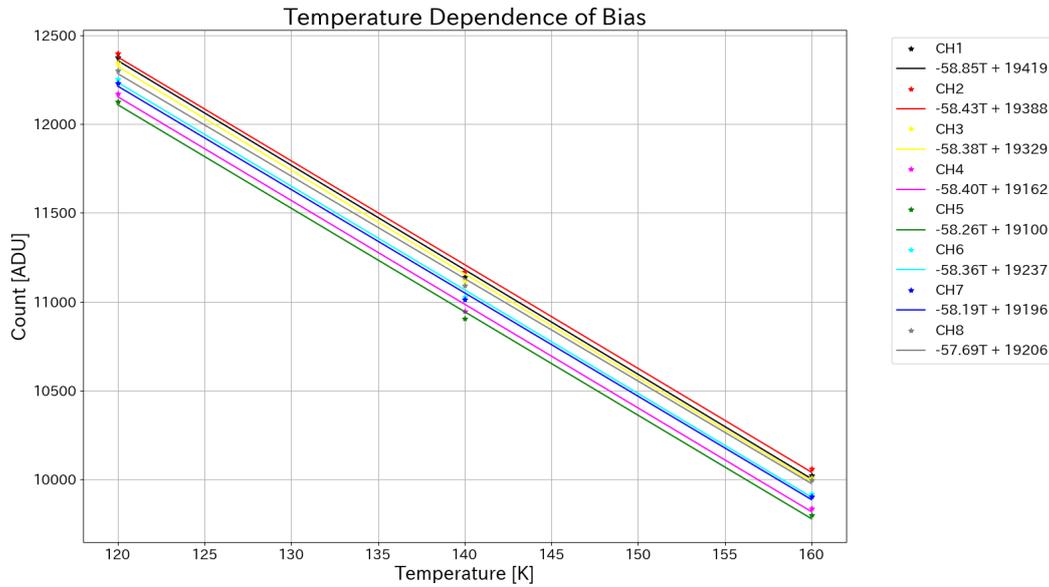


図 4.35: 検出器バイアスの温度依存性。検出器バイアスは温度が上がると小さくなる負の温度依存性を持っていることがわかる。

このプロットより、検出器バイアスはどのチャンネルでも $-58[ADU/K](\approx -2.3 \times 10^2[e^-/K])$ 程度の負の温度依存性があることがわかる。リセットアノマリーが正の値を持つということは、リセットフレームで参照ピクセル補正が過剰に効いていることを意味する。リセットアノマリーが、参照ピクセルと感光ピクセルの温度差のために、参照ピクセルによるバイアスの温度ドリフト補正できていないことが原因であるとすると、バイアスの温度依存性は負であるので、感光ピクセルの温度が参照ピクセルに比べて高いということである。表 4.15 を温度に焼き直した結果が表 4.17 である。ただし、 t_{ph} が感光ピクセルの温度、 t_{ref} が参照ピクセルの温度である。リセットの時間が長くなるほど感光ピクセルと参照ピクセルの温度差が大きくなるという結果が得られた。この結果はリセットアノマリーが self heating 由来であることと矛盾しない。

表 4.17: リセットアノマリーの大きさから算出された感光ピクセルと参照ピクセルの温度差。

リセットパルス継続時間	$t_{ph} - t_{ref}$
0.1 [ms]	< 52 [mK]
1 [ms]	52-86 [mK]
100 [ms]	> 170 [mK]

ただし、このリセットアノマリーが self heating 由来によるものではなく、リセット時に寄生容量に充電され、それが積分の途中で放電されることで信号として振る舞っているなどの他のメカニズムによるものであるという可能性も否定できない。

4.8.4 量子効率

検出器の Y バンドでの量子効率の測定を黒体炉を用いて行った。実験のセットアップと概念図を図 4.36 に示す。実際のデータの取得の際には、図のセットアップをさらに遮光布で覆うことで外部からの迷光を遮断している。

黒体炉の開口とデュワーのウィンドウの間は黒アルマイトのフィルターホルダーで繋がれている。黒体炉から出た光は Y バンドフィルターを通過したのち、ウィンドウを通り検出器に入射する。Y バンドフィルターとウィンドウの透過率は図 4.37 の通りである。975-1075[*nm*] の波長でトップハット型に近似すると、黒体炉から出た光のうち 64.4% の光が透過する。

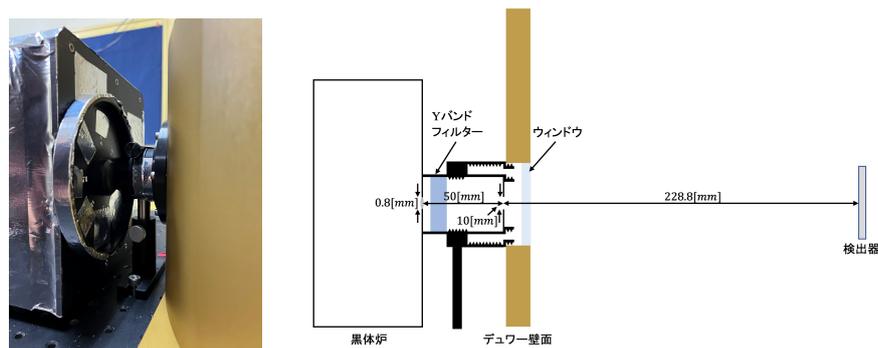


図 4.36: 量子効率測定の設定アップ (左) とその概念図 (右)。黒体炉からの予期せぬ光の漏れ出しを避けるために、リーク源となりうる場所は可能な限りアルミテープで塞いだ。さらに、漏れ出しによる迷光の影響を避けるために、黒体炉の開口とデュワーのウィンドウの間を黒アルマイト製のフィルターホルダーで繋いだ。ただし、フィルターホルダー内での光の散乱による迷光の影響を低減するためにウィンドウの手前には絞りを入れている。

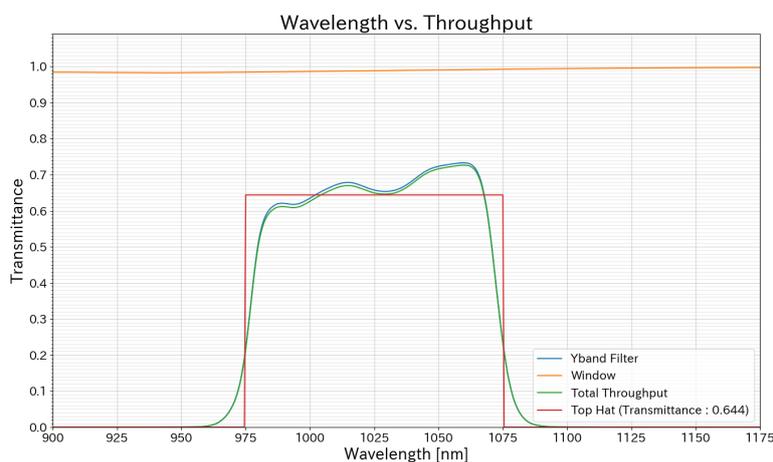


図 4.37: 今回の実験セットアップのスループット。975-1075[*nm*] でトップハット型に近似すると、光学系のスループットは 64.4% となる。ただし、近似は 900-1150[*nm*] で積分した時に光学系のスループットとトップハットの近似の積分値が同じになるように行った。

取得したデータは表 4.18 の通りである。ただし、ON フレーム、OFF フレームはそれぞれ、黒体炉の光を入射させた時とさせていないフレームであり、OFF フレームは ON フレームの直後に取得された。

表 4.18: 量子効率測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

ON/OFF	黒体炉温度	mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}	セット数
ON	812[K]	Fowler	0.1[s]	1	1	1	1.15[s]	5
OFF								
ON	900[K]	Fowler	0.1[s]	1	1	1	1.15[s]	5
OFF								
ON	925[K]	Fowler	0.1[s]	1	1	1	1.15[s]	5
OFF								
ON	950[K]	Fowler	0.1[s]	1	1	1	1.15[s]	5
OFF								

解析の流れは以下の通りである。

1. (2.13),(2.16) に従って検出器 1 ピクセルに入射する光子数を計算する。
2. ON フレームから OFF フレームを引き算し、中央値カウントを計算する
3. 中央値カウントにコンバージョンファクターを乗算し、電子数に直す
4. 電子数を光子数で割りシステム効率を求める
5. システム効率を光学系のスループットで除算し量子効率を求める

解析の結果、検出器の量子効率は 83% という結果を得た (図 4.38 参照)。ただし、この結果は迷光の影響を受けて系統的に高めに出ている可能性がある。まず 1 つ目にフィルターホルダー内で散乱された光が検出器に入射している可能性がある。フィルターホイールに用いられている黒アルマイトは 1[μm] 付近で $\geq 50\%$ の反射率を持つ (Marshall et al. 2014)。次にデュワー内部で反射、散乱された光が検出器に入射している可能性がある。図 4.39 は 812[K] で取得したデータを用いて作成した量子効率のヒートマップである。検出器の周囲が特に明るくなっており、量子効率が 100% を超えてしまっている。これは、検出器の側面から入射した光によるものと考えられる。

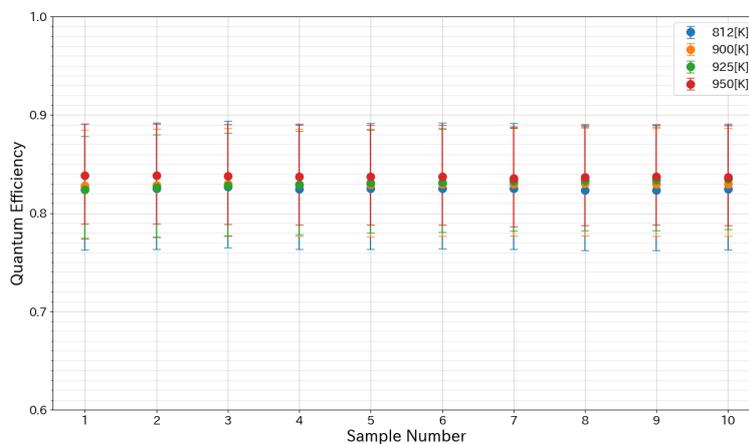


図 4.38: 812, 900, 925, 950[K] における量子効率の測定結果。ただしエラーバーは黒体炉の温度測定誤差 $\pm 3[K]$ と、黒体炉開口から検出器までの距離の測定誤差 $\pm 2[mm]$ を含んでいる。

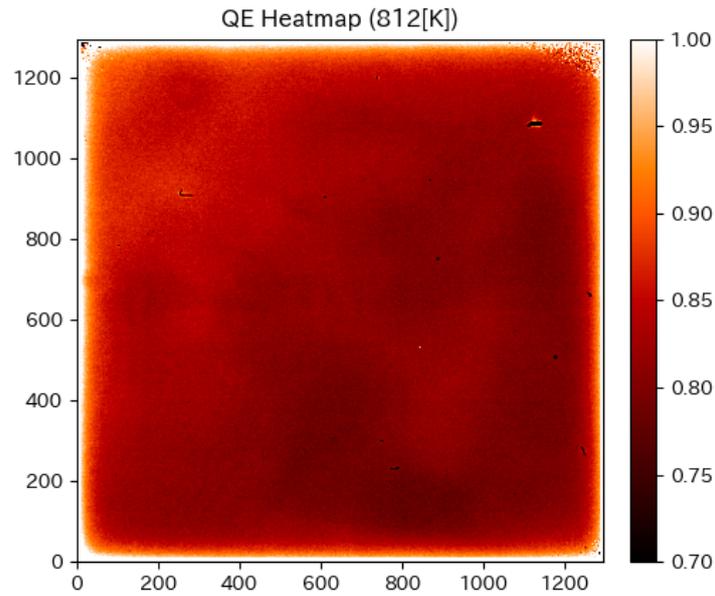


図 4.39: 812[K] で測定された量子効率マップ。検出器の周囲の量子効率が 100% を超えてしまっている。これはデュワー内で散乱された光が検出器の側面から入射することで発生していると考えられる。

4.9 パーシステンス

パーシステンスの実験セットアップを図 4.40 に示す。LED が検出器の前に取り付けられており、その LED は Raspberry Pi とメカニカルリレーを用いて制御されている。メカニカルリレーのコイル部には 5[V] 電源ピンと GPIO17 番ピンと GND ピンが接続されており、接点部には GPIO26 番ピンと LED のアノードが接続されている (図 4.41 参照)。26 番ピンは常に HIGH(3.3[V] 出力) にされており、17 番ピンが LOW(0[V] 出力) から、HIGH に切り替わった状態の時のみメカニカルリレーの可動接点が固定接点と接触し、LED が点灯する。

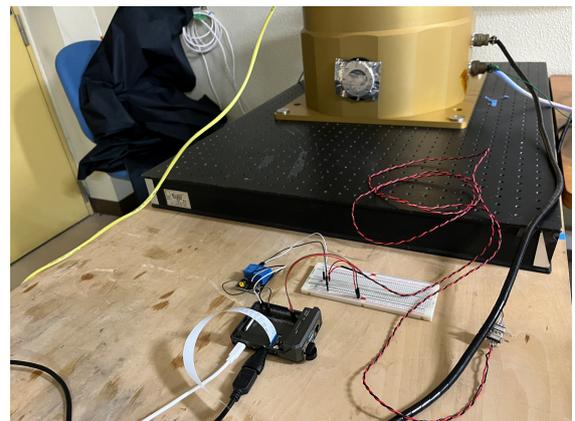
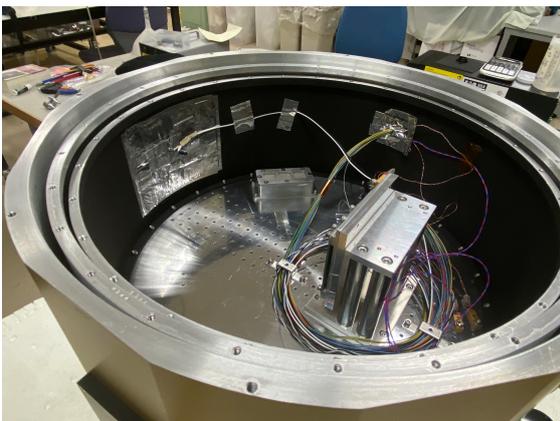


図 4.40: パーシステンス測定のセットアップ。検出器の前には LED が固定してあり、この LED はデュワー外部に置かれた Raspberry Pi によって制御される。

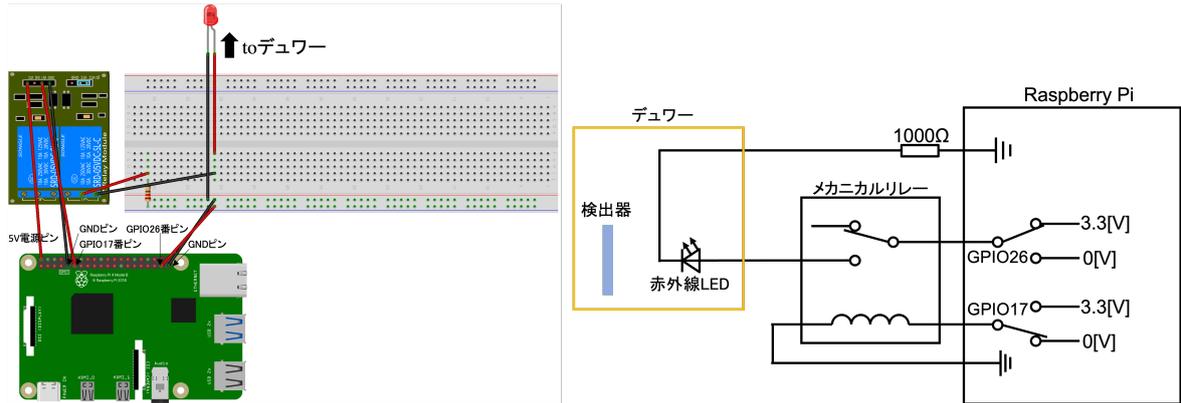


図 4.41: LED 制御のためのセットアップの概念図。メカニカルリレーのコイル部に接続された GPIO ピンの出力が HIGH の時のみ LED に電流が流れ、光るようになっている。ここで、メカニカルリレーを途中に挟んだ理由は、Raspberry Pi の GPIO ピンの出力が LOW の時も 500[mV] 程度の電圧が存在しており、LED が常に光ってしまっていたためである。また、ソリッドステートリレーを使用した時も LED に印加される電圧を 0[V] にすることは出来なかった。

今回の測定では 1 回の測定につき 4 回の積分を行っている。4 回の積分の読み出しパラメータを表 4.19 に示す。図 4.42 のように、1 回目の積分の最初に LED を光らせ、その後 1000[s] 程度リセットを行わず非破壊読み出しを行い (soak 期間)、リセットに続いて、3 回に分けて 10000[s] 程度の積分を行い、パースシステムの信号を観測した (detrap 期間)。

表 4.19: パースシステムの測定に用いたデータの読み出しパラメータ。

	mode	t_{wait}	n_{sur}	n_{sample}	$n_{osample}$	t_{int}
1 回目	UTR	9.0 [s]	100	1	1	1005 [s]
2 回目	UTR	0.1 [s]	100	1	1	115 [s]
3 回目	UTR	10 [s]	100	1	1	1105 [s]
4 回目	UTR	100 [s]	100	1	1	10105 [s]

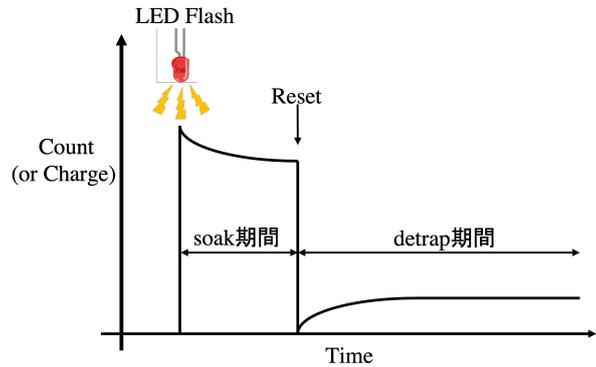


図 4.42: 今回行った実験の概要。1 回目の積分の最初に LED を一瞬点灯させ、その後 1000[s] 間の非破壊読み出しを行った。2-4 回目の積分では LED での露光によって生じたパースシステムを約 10000[s] 間にわたって測定した。

1 回目の積分の非破壊読み出しの結果を図 4.43(上) に示す。プロットより、積分が進むにつれて信号が減少していていることがわかる。この信号の減少については §4.9.4 で考察する。

また、2-4 回目の積分の非破壊読み出しの結果を図 4.43(下) に示す。黒点は累積の信号、青実線はそれを

$$N = \sum_{\tau} N_{\tau}(1 - e^{-t/\tau}) + ct \quad (\tau = 10, 100, 1000) \quad (4.3)$$

の形でフィッティングを行ったものである。ただし、 N_{τ} は時定数が τ 程度のパーシステンス信号の最大値、 c は暗電流の成分である。緑実線、赤実線はそれぞれ信号からパーシステンスの成分、暗電流の成分を抽出したものである。ただし、積分と積分の間には読み出しのオーバーヘッドと読み出しパラメータの変更にかかる時間により、約 8 秒程のデッドタイムがあるため、2 回目と 3 回目、3 回目と 4 回目の積分の間は、その前までの信号を (4.3) の形でフィッティングを行い、補間を行なっている。暗電流の成分は §4.7.1 で求めた暗電流の大きさとほぼ同じ大きさであることから (4.3) の形でのフィッティングは妥当であると言える。

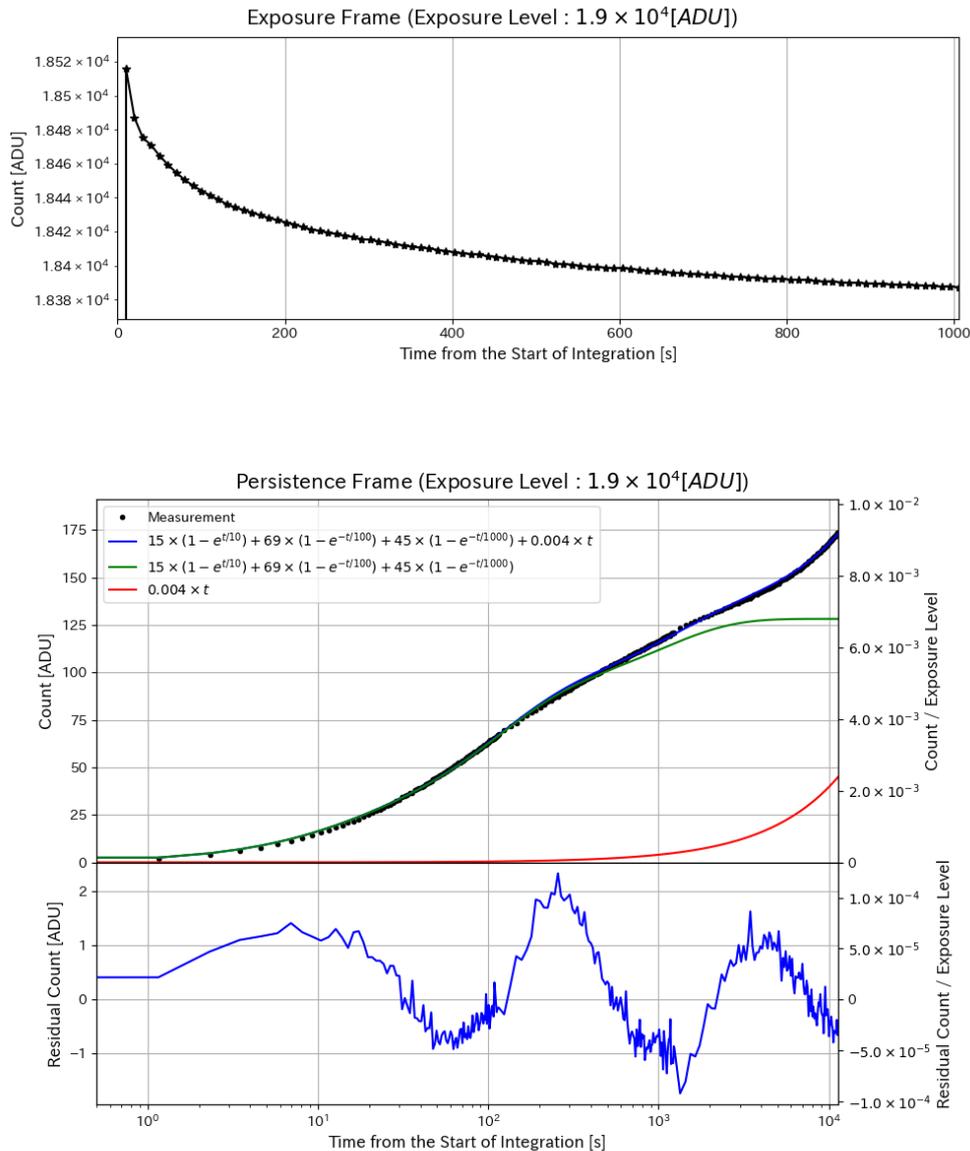


図 4.43: 1 回目の積分でのカウント変化 (上) と 2-4 回目の積分でのカウントの変化 (下)。

4.9.1 パーシステンスの割合

図 4.44 は様々な露光レベルに対して、パーシステンスの割合を示したものである。露出レベルによって大きく異なることはなく、概ね 0.7% 程度のパーシステンスが発生しているが、やや露出レベルが低いほどパーシステンスの割合が大きい傾向が見られた。ただし、実際にこのような傾向があるとは限らない事に注意が必要である。今回、パーシステンスの測定の際の読み出しのケイデンスは一定ではなく、3つの異なるケイデンス ($\sim 1, 10, 100[s]$) で行なっている。このことで、検出器のグローの効果は暗電流の項にうまく含めることができていない可能性がある。

(4.3) で $c = 5 \times 10^{-3}[ADU/s/pix]$ に固定することで、暗電流を一定にしてフィッティングを行った時のフィッティングの一例を図 4.45 に示す。ここで、 $c = 5 \times 10^{-3}[ADU/s/pix]$ という値を採用したのは読み出し回数が 300 回、グローの中央値が $\sim 0.03[e^-/read]$ 、積分時間が $\sim 1 \times 10^4[s]$ であるため、グローは平均して $9 \times 10^{-4}[e^-/s/pix]$ の追加の暗電流のように振る舞うためである。また、異なる露光レベルにおけるパーシステンスの割合をプロットしたものを図 4.46 に示す。これを見ると、露光レベルによるパーシステンス割合の変化がほとんど見られなくなっていることがわかる。

露光レベルによるパーシステンス割合のさらなる調査には、1 回目の積分のリセットの後すぐに次の積分を開始し、一定のケイデンスで読み出しを行う必要がある。検出器の部分読み出しにより、読み出しオーバーヘッドの短縮と、高ケイデンスでの測定が可能になるが、部分読み出しの実装は今後の課題である。

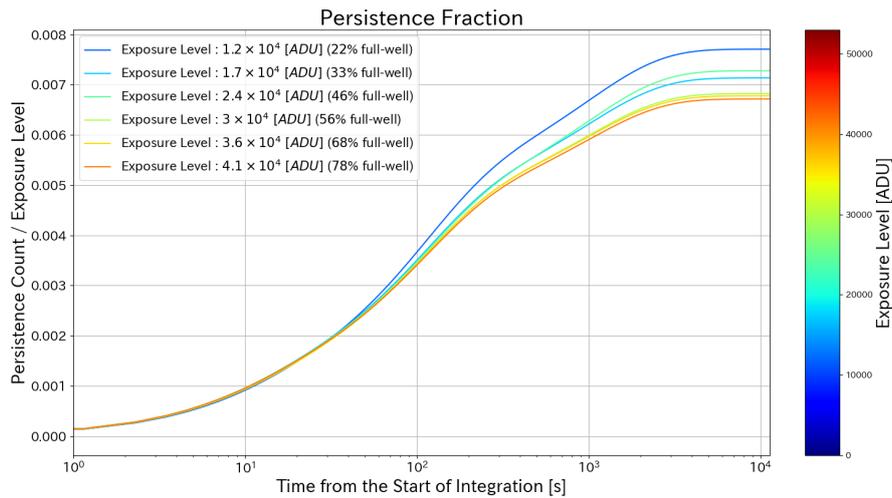


図 4.44: さまざまな露出レベルにおける、露出レベルに対するパーシステンスの割合。

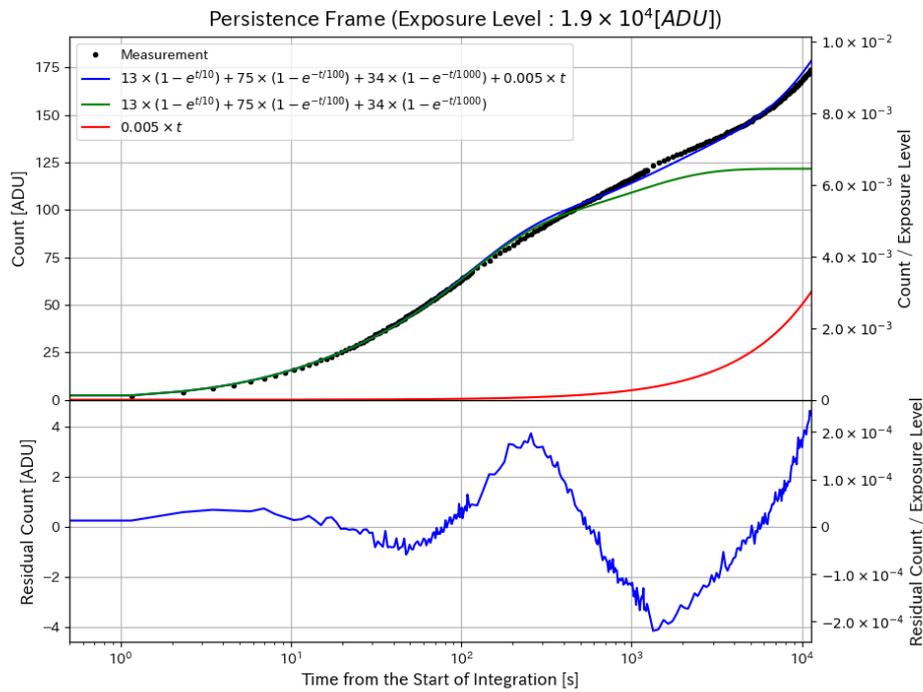


図 4.45: 暗電流を 5×10^{-3} [ADU/s/pix] に固定した時の、パーシステンス信号のフィッティング。暗電流の大きさもフィッティングパラメータにしている場合に比べ、暗電流が大きくなっているため、高ケイデンスで読み出しを行った積分開始から 100[s] 程度まではこちらの方がフィッティング精度が良いが、低ケイデンスで読み出しを行った積分の後半ではフィッティング精度が悪化している。

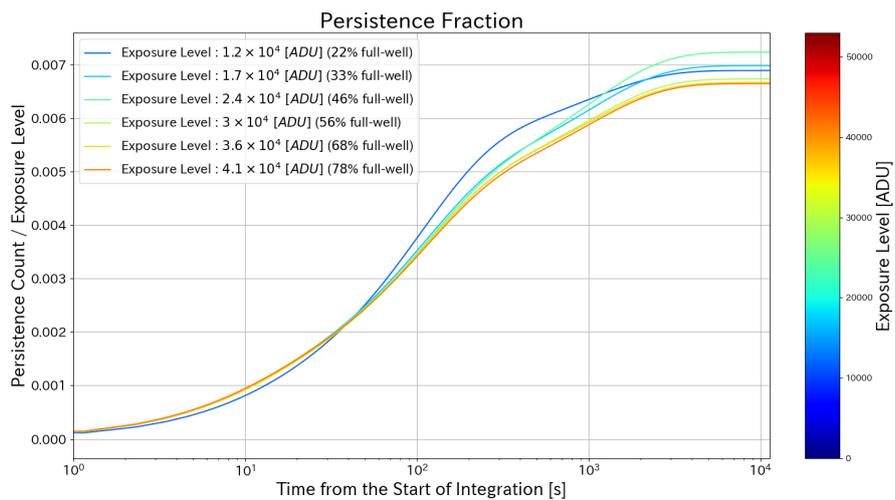


図 4.46: 暗電流を 5.0×10^{-3} [ADU/s/pix] に固定した時の、さまざまな露出レベルにおける露出レベルに対するパーシステンスの割合。

4.9.2 トラップの時定数分布

図 4.47 に最終的なパーシステンスの大きさと規格化したパーシステンス信号の増加の様子を、図 4.48 に各露出レベルでのパーシステンス信号のフィッティング係数 N_τ ($\tau = 10, 100, 1000$) の大きさをプロットしたものを示す。これらより、露出レベルを変化させた事によるトラップの時定数分布の変化はほとんどないことがわかる。これは空乏層内の厚さ方向にトラップの時定数分布が一定であることを意味する。さらに、各 N_τ は露出レベルに線形に増えていることが図 4.48 より明らかなので、ある露光レベルでの N_τ の値を異なる露光レベルでの N_τ の値のスケーリングにより求めることが可能になる。また、図 4.47 より、パーシステンスの半値幅は 100[s] 程度であることがわかる。

ただし、Tulloch et al. (2019) により、露光からリセットまでの時間を変化させると、トラップの時定数分布が変化する、具体的には露光からリセットまでの時間が長いほど時定数の大きいトラップの割合が増えることが報告されており、パーシステンスの補正を行う際には、露光からリセットまでの時間を適切に設定し測定した N_τ を用いる必要がある。

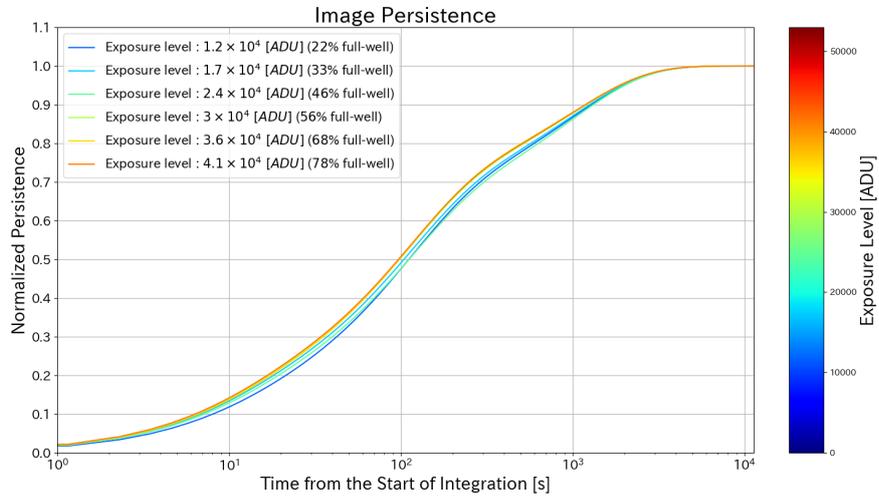


図 4.47: パーシステンス信号の大きさと規格化した際のパーシステンス信号の増加の様子。

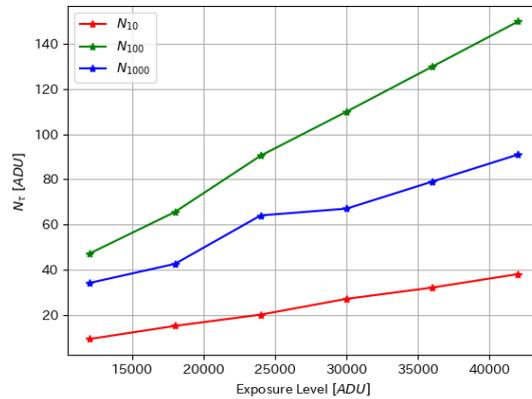


図 4.48: パーシステンス信号を (4.3) の形でフィッティングを行った際の係数。

4.9.3 パーシステンスのコンバージョンファクター

露光後約 1000[s] の非破壊読み出しとリセットに続く、115[s] 積分のダークフレームの非破壊読み出しデータ (表 4.19 の 2 回目の積分のデータ) を 2 セットずつ用いてパーシステンス電荷のコンバージョンファクターの測定を行った。

解析の手法は §4.4.1 とほぼ同様であるが、検出器グローやバッドピクセルの影響を抑えるために 48×48 の要素を持つ中央値画像と標準偏差画像のデータのうち、図 4.49 のように中央の 18×18 の領域のみを用いており、また、中央値補正の際に中央値周りのノイズの補正はしていない。

測定の結果を図 4.50 に示す。ただし、二次元ヒストグラムは中央値画像と標準偏差画像の 18×18 の領域内のすべてのデータを、黒点は領域内の中央値のみをプロットしたものであり、赤実線は黒点を直線でフィッティングしたものである。パーシステンス電荷のコンバージョンファクターは光電荷のコンバージョンファクターよりも大きいことがわかる。これは、§2.2.8 で述べた通り、パーシステンス電荷は光電荷に比べて生じさせる電圧の変化が小さい、つまり、カウントを変化させるために必要な電荷の数が多いためである。

また、図 4.51 のように露光レベルが高いほどコンバージョンファクターが大きくなるという傾向が見られた。これは Smith et al. (2008) のモデル (図 2.23 参照) から導かれる予想に反したものである。

暗電流や検出器グローによるショットノイズがパーシステンス信号のコンバージョンファクターの測定に影響を与えているということは考えづらい。暗電流は $1.5 \times 10^{-2} [e^-/s/pix]$ 、検出器グローは $6.6 \times 10^{-2} [e^-/read]$ であるため、これらによる信号は 115[s] の積分の間にそれぞれ $1.7 [e^-]$ 、 $6.6 [e^-]$ であり、ショットノイズは $2.9 [e^-]$ 、つまり $0.74 [ADU]$ であるため、分散には $0.55 [ADU^2]$ 程度しか影響を与えない。

さらに、図 4.50 のプロットのデータのうち、積分開始から 116[s] 後のデータのみプロットしたものを図 4.52 に示す。パーシステンス測定前の露出レベルが上がるにつれてパーシステンス信号の大きさは大きくなっているが、分散にはあまり変化が見られなかった。これからもパーシステンス電荷のコンバージョンファクターが光電荷のものに比べ大きいことが示唆される。しかし、図 2.25 のようにカウントが大きくなると分散の増加率が大きくなるというような傾向は見られなかった。ただし、図 2.25 においても最初のダークフレームのパーシステンスの大きさが $\sim 300 [ADU]$ のところまではその影響は見受けられていないため、より露光レベルを上げて実験を行うことで分散の増加率が大きくなり、コンバージョンファクターが小さくなっていく可能性がある。このような試験を行うことは今後の課題である。

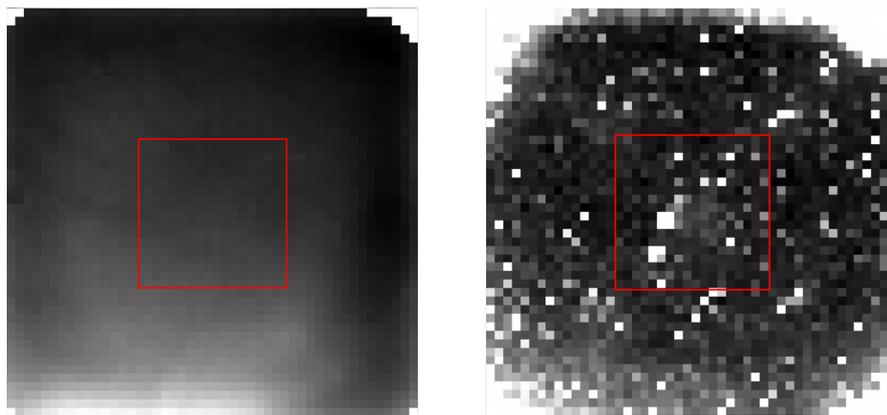


図 4.49: パーシステンス画像から作成した中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。中央値画像の赤枠で囲まれた中心の 18×18 の領域の中央値を横軸に、標準偏差画像の赤枠で囲まれた中心の 18×18 の領域の中央値を二乗したものを縦軸にプロットしたものが図 4.50 の黒丸である。また、この領域内の検出器グローは平均すると $6.6 \times 10^{-2} [e^-/read]$ 程度である。

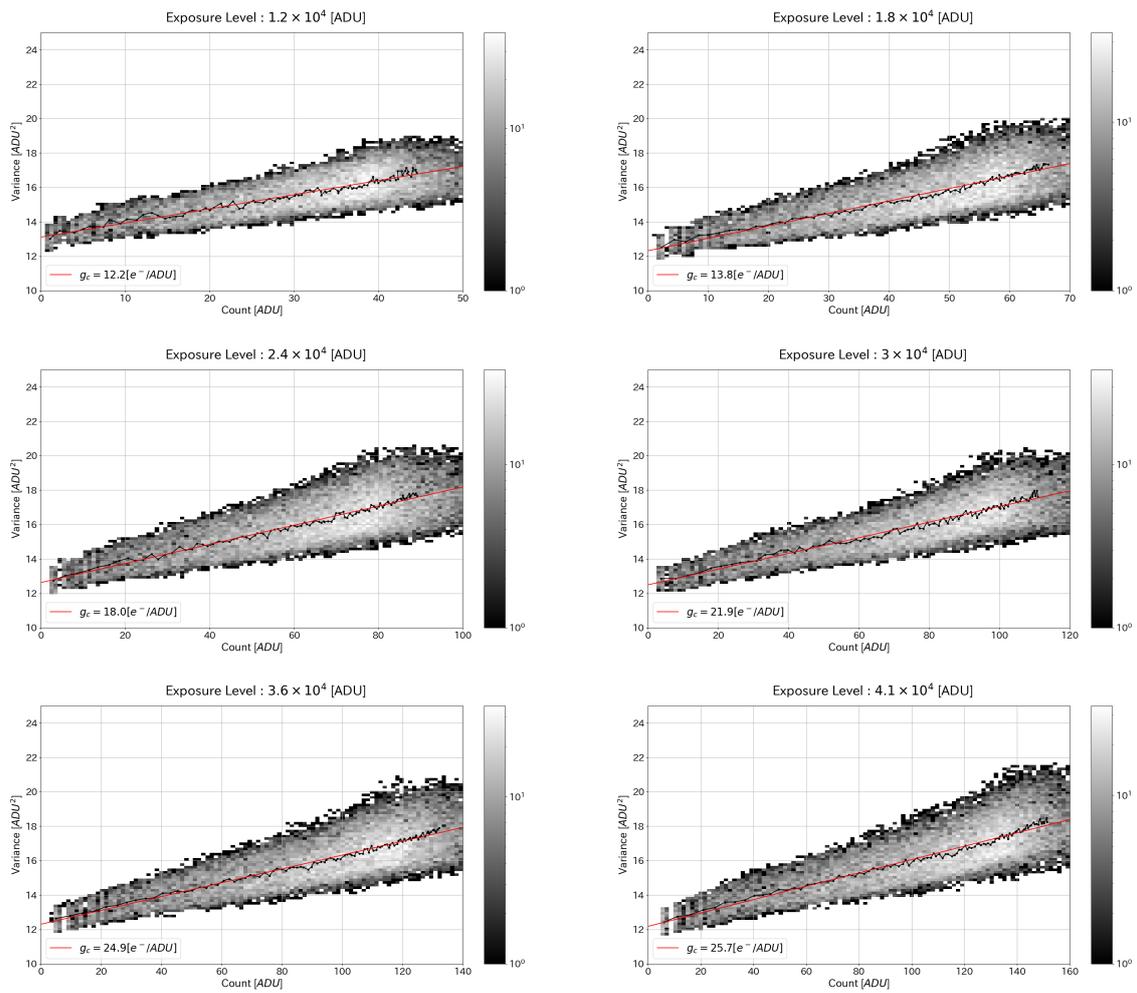


図 4.50: 異なる露光レベルのパーシステンス信号のフォントランスファーカーブ。二次元ヒストグラムは中央値画像と標準偏差画像の 18×18 の領域内のすべてのデータを、黒点は領域内の中央値のみをプロットしたものであり、赤実線は黒点を直線でフィッティングしたものである。

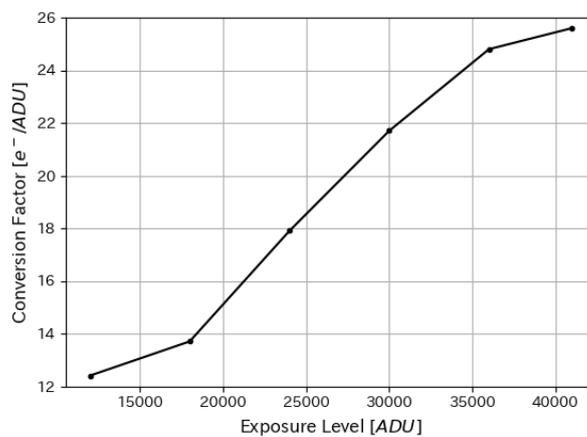


図 4.51: 各露出レベルにおけるパーシステンス信号のコンバージョンファクター。

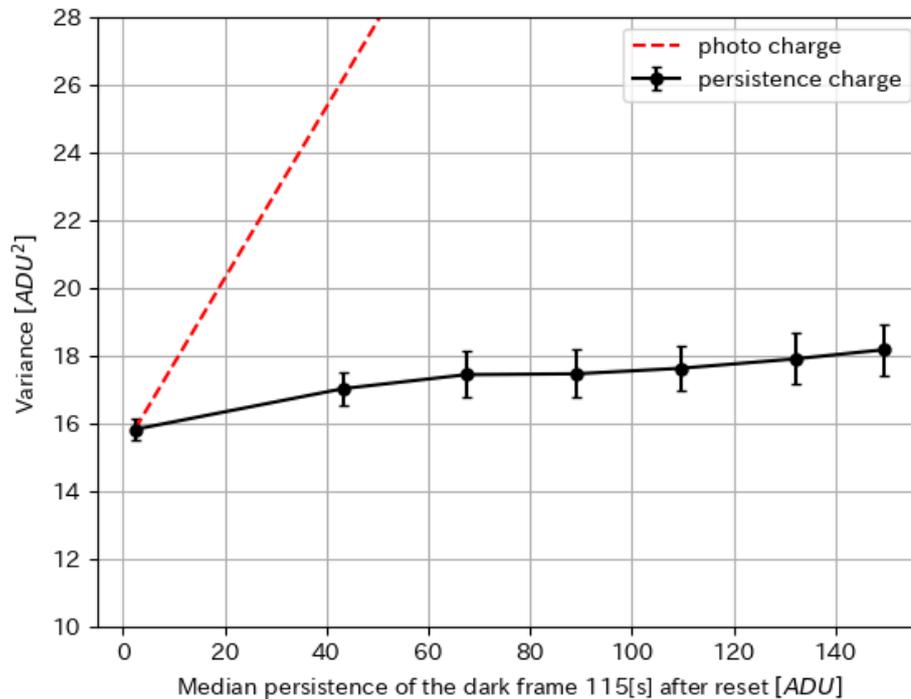


図 4.52: 図 4.50 の異なる露光レベルのパーシステンスデータのうち、積分時間が 115[s](最終フレーム) のデータのみをプロットしたもの (黒丸)。ただし、一番左のデータ点は露光から十分に時間が経った (LED で 0[ms] のフラッシュ露光をした) 後に Up-the-Ramp Sampling で取得した $t_{int} \simeq 115[s]$ 積分 (101 枚) のダーク画像の最終フレームのデータを用いている。エラーバーは 18×18 の領域内の 1σ であり、赤点線は、光電子のフォントランスファーカーブ。パーシステンスのカウントが大きくなっても、分散の大きさはあまり変化しない。

4.9.4 soak 期間中の信号の減少

soak 期間中に見られる図 4.43 のような信号の減少は、同様の実験を行なった [Tulloch et al. \(2019\)](#) の測定においても報告されている (図 4.53 参照)。この信号の減少は [Smith et al. \(2008\)](#) で提唱されたモデルのみでは説明することができない。カウントが変化するためには空乏層の電場内を電荷が移動することが必要だが、格子欠陥が電荷をトラップする時、電荷の位置は大きく変化せず、カウントも変化しないはずであるためである。そこで [Tulloch et al. \(2019\)](#) では電荷が十分な熱エネルギーを得てポテンシャルに逆らい空乏層を移動し、空乏層内に存在するトラップに捕獲されるというモデルを提唱している (今後この電流をトラップ電流と呼ぶことにする)。

このカウントの減少は相反則不軌にも関連した減少である可能性が高い。[Biesiadzinski et al. \(2011a\)](#) ではパーシステンスの大きい検出器では相反則不軌も大きいという結果が得られているほか、パーシステンスも相反則不軌も温度を下げるほど小さくなるという温度依存性が報告されている ([Biesiadzinski et al. 2011a](#), [Tulloch 2018](#))。また、この温度依存性は [Tulloch et al. \(2019\)](#) のモデルと矛盾しない。

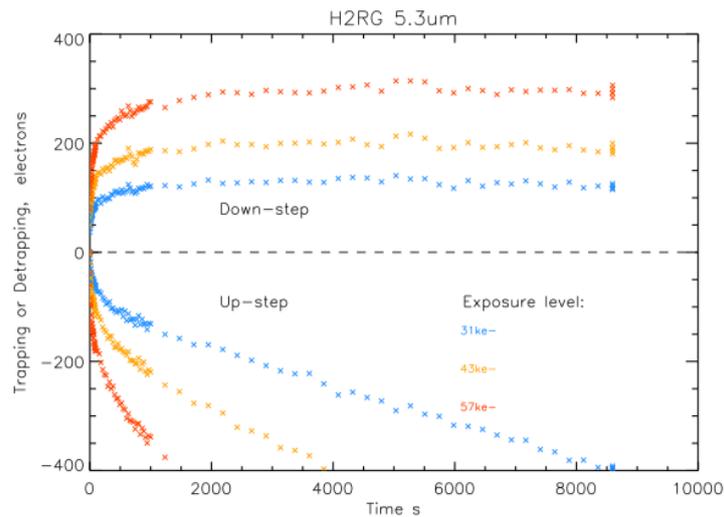


図 4.53: Tulloch et al. (2019) の Fig.17。上がパーシステンス信号、下が LED によるフラッシュ露光後に減少した信号である。露光後 1000[s] 程度は急激にカウントが減少するが、その後は一定のレートでカウントが減少していく。

各露光レベルについて、フラッシュ露光直後のフレームのカウントを基準とした相対的なカウントの時間発展をプロットしたものを図 4.54 に示す。ただし、暗電流と検出器のグローの影響は取り除いてあり、赤実線は積分開始から 900[s] 以上の領域で線形フィッティングを行った結果である。フィッティング直線からの残差を見ると、ほとんどの露光レベルで 800[s] 付近から一定の割合での信号の減少を示していることがわかる。このような一定レートでの信号の減少（リーク電流と呼ぶことにする）は図 4.53 でも見られている。もし、トラップ電流のみが信号の減少の原因だとすると、時間が経つとトラップに捕獲される電荷とトラップから解放される電荷が釣り合う平衡状態に達し、この時カウントの変化はなくなるはずである。よって、このリーク電流はトラップ電流以外にもカウントの減少をもたらす機構があることを示唆している。今回、露光レベルとリークの大きさには図 4.53 に見られるような関係性は見られなかったが、暗電流の大きさ ($3.7 \times 10^{-3} [ADU/s/pix]$) よりも一桁程度大きいことが分かった (図 4.55 参照)。現状、この信号の減少の原因は判明しておらず更なる調査が必要であり、soak 期間を伸ばした実験を行うことが望ましい。

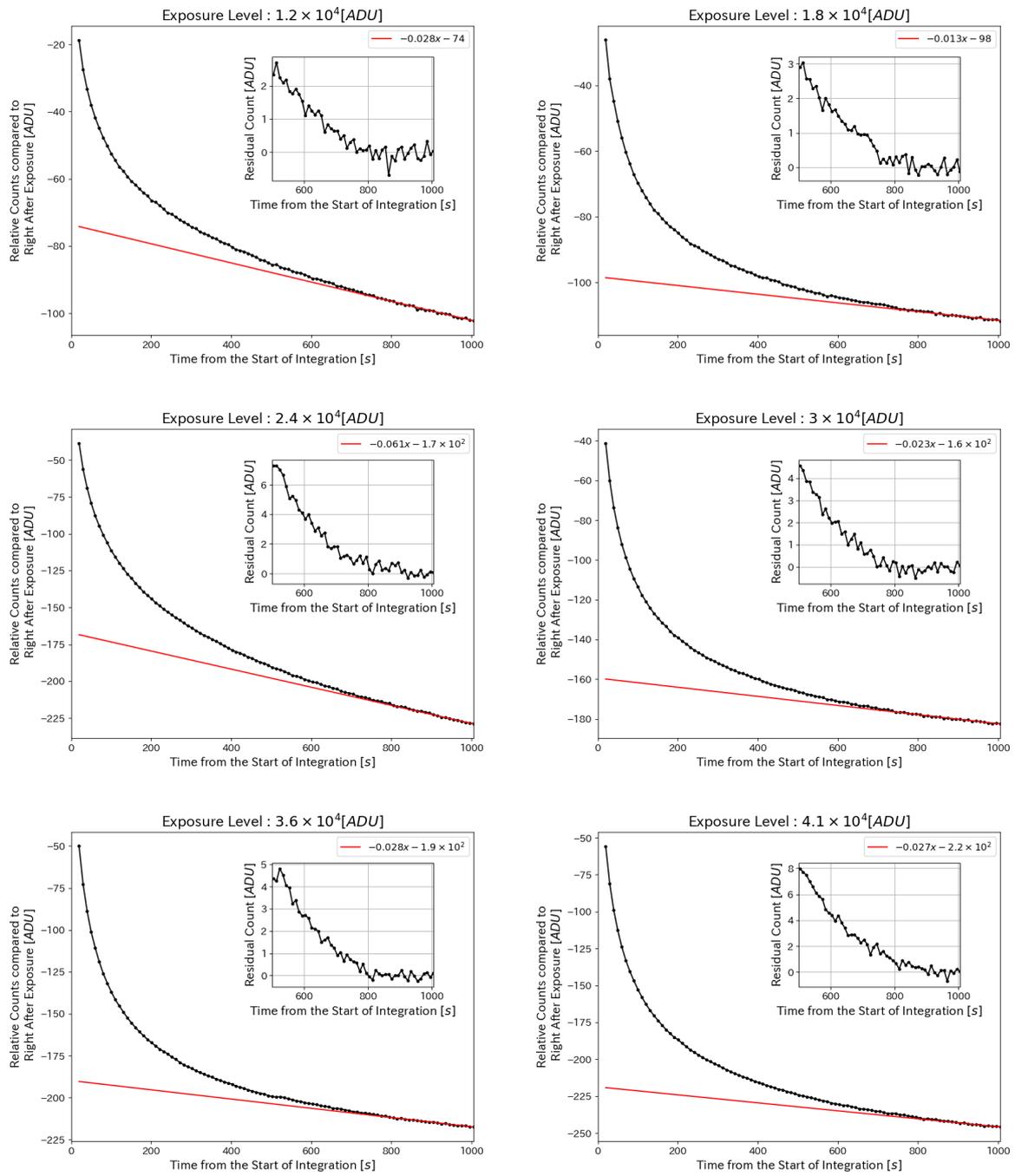


図 4.54: LED によるフラッシュ露光後の信号の減少の様子。

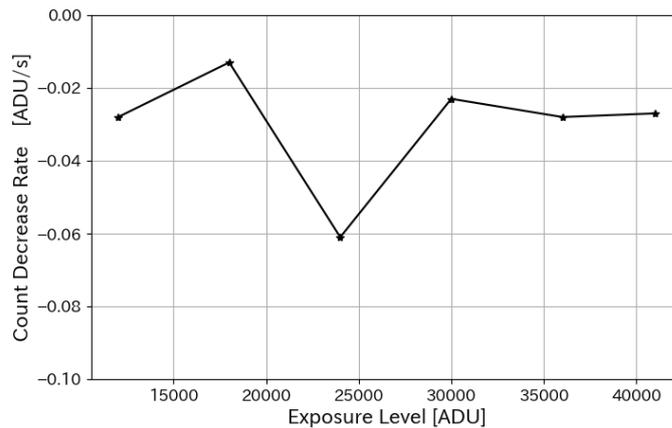


図 4.55: 露光レベル対リーク電流の大きさのプロット。今回の実験では露光レベルとリーク電流の大きさに関係は見られていないが、暗電流の大きさ ($3.7 \times 10^{-3} [ADU/s/pix]$) と比べると一桁程度大きい。ただし、リーク電流と暗電流は向きが逆であることに注意。

4.9.5 soak 期間中のコンバージョンファクター

このモデルではトラップされる電荷は空乏層の一部のみを横切るため、soak 期間中に減少する信号のコンバージョンファクターは光電荷のコンバージョンファクターよりも小さくなることが予測され、実際に [Tulloch et al. \(2019\)](#) では図 4.56 のように soak 期間中に減少する信号のコンバージョンファクターは光電荷のものに比べて大きくなっている。

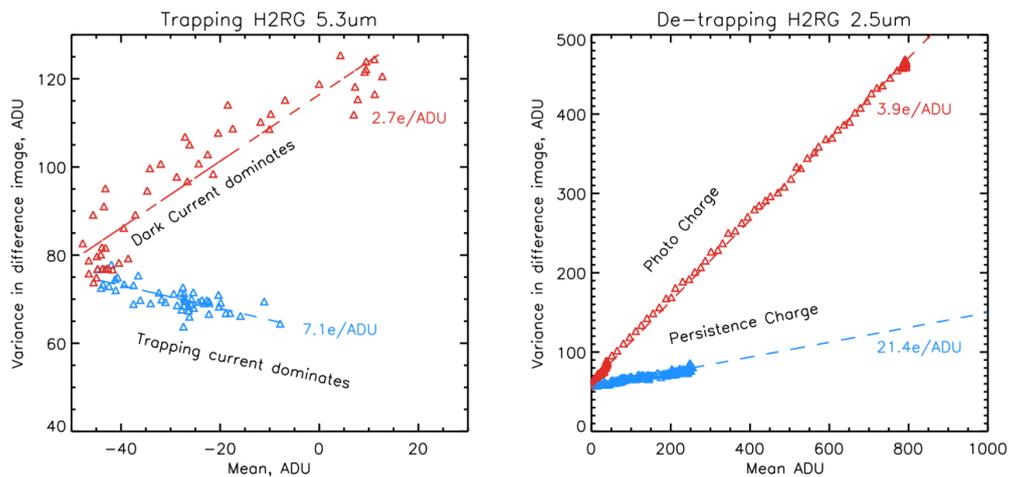


図 4.56: [Tulloch et al. \(2019\)](#) の Fig.16。左図が soak 期間中のフォントランスファーカーブ、右図が detrap 期間のフォントランスファーカーブと光電荷のフォントランスファーカーブ。soak 期間の開始からまもない間はカウントが減少しているが、途中から暗電流が支配的になりカウントが上昇している。soak 期間中に減少する信号のコンバージョンファクターは光電荷のものに比べて大きいことがわかる。

soak 期間中に見られる図 4.43 のような信号の減少の際にトラップされる電荷のコンバージョンファクターと電荷数の調査のために §4.9.3 と同様の解析を soak 期間中についても行った。ただし、露光直後の読み出しをリセットフレームとし、CDS 画像を生成した。

解析の結果を図 4.57 に示す。ただし、二次元ヒストグラムは中央値画像と標準偏差画像の 18×18 の領域内のすべてのデータを、黒点は領域内の中央値のみをプロットしたものであり、青実線は黒点を積分開始から $\leq 50[s]$ の領域でフィッティングしたもの、赤実線は黒点を積分開始から $\geq 900[s]$ の領域でフィッティングしたものである。積分開始から $100[s]$ 程度まではフォントランスファーカーブが直線上に乗り、そこから求まるコンバージョンファクターは光電荷のものとは大きくなった。この結果は Tulloch et al. (2019) のモデルと整合性のある結果になっている。その後フォントランスファーカーブは直線から外れ、積分開始から $700-800[s]$ 程度経過したところで再び直線上に乗るようになった。これはカウントの減少が一定レートになる時間とおおよそ一致している。また、この時の直線の傾きから求まるコンバージョンファクターは光電荷のものとは小さくなっている。これはカウントがリーク電流による減少と暗電流やグローによる増加で打ち消すのに対し、分散は二乗和で足し合わされているため起きている可能性がある。

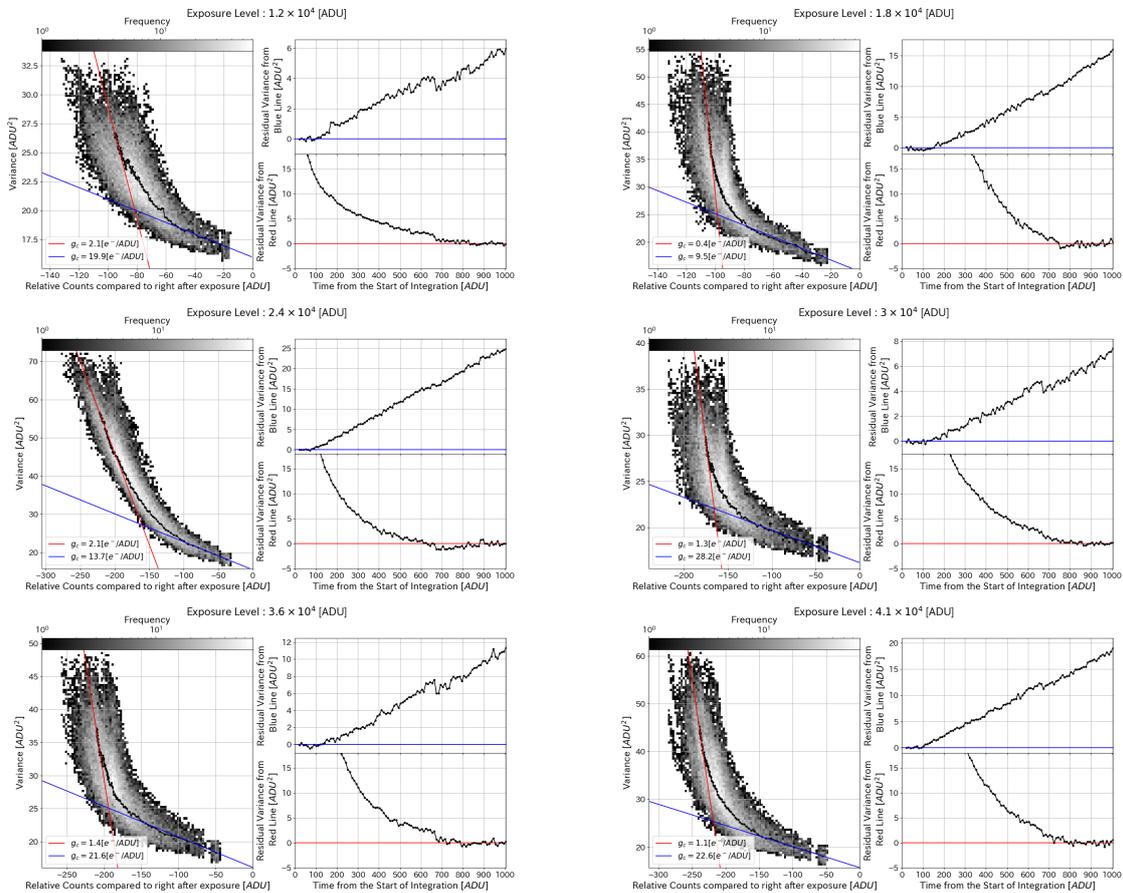


図 4.57: soak 期間の画像のカウントと分散の時間発展の様子。左側は横軸:露光直後のフレームからのカウント変化、縦軸:分散としたプロット、右側が横軸:積分時間、縦軸:フォントランスファーカーブのフィッティング直線からの残差としたプロットである。

第5章 SWIMS 検出器システム

5.1 検出器システム概要

検出器システムの概念図を図 5.1 に示す。SWIMS の検出器には、HAWAII-2RG™ が採用されている。4 台の HAWAII-2RG™ はそれぞれにつき 1 台の Windows マシンにより駆動されている。検出器駆動用の Windows マシンは Red/Blue Arm の各焦点面ごとに Linux PC によって制御されており、これら 2 台の Linux PC は SWIMS 全体の制御を行う OBCP により制御されている。検出器駆動用 PC には Teledyne Imaging Sensors (TIS) により提供された検出器駆動ソフトウェアがインストールされている。画像取得の際は、検出器駆動用 PC からのコマンドはインターフェース用ボードである JADE2 card を経由し SIDECAR™ ASIC に伝えられ、HAWAII-2RG™ を駆動する。HAWAII-2RG™ から出力されるアナログ出力は SIDECAR™ に入り、プリアンプで増幅された後、A/D 変換が行われ 16bit カウントに変換される。デジタル出力はフラットケーブルを経由して JADE2 に送られ、Windows マシン内で動作する TIS 製の専用ソフトウェアが JADE2 と通信を行い、USB2.0 ケーブルを通してデジタル出力を受信し、画像を生成する。

以下では各コンポーネントを少し細かく見ていく。

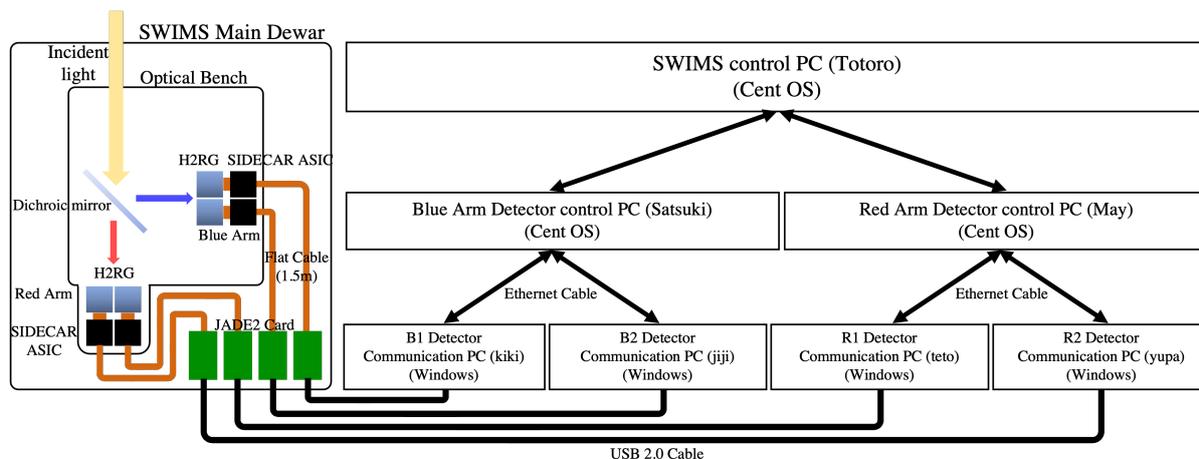


図 5.1: SWIMS の検出器システムの概念図。

5.1.1 HAWAII-2RG™

TIS 製の HAWAII-2RG™ (HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager with $2K \times 2K$ resolution, Reference pixels and Guide mode) はハイブリッドアレイ検出器であり、フォトダイオードアレイの材料としては近赤外に感度を持つ HgCdTe が用いられている。この検出器の諸元を表 5.1 に示す。

表 5.1: HAWAII-2RG™ の諸元。

全ピクセル数	2048 × 2048 [pix ²]
感光ピクセル数	2040 × 2040 [pix ²]
ピクセルサイズ	18 × 18 [μm ²]
イメージングエリア	36.7 × 36.7 [mm ²]
カットオフ波長	1.7 or 2.5 or 5.3 [μm]

HAWAII-2RG™ の各辺には図 5.2 のように、幅 4 ピクセル分ずつ参照ピクセル (Reference Pixel) と呼ばれる特殊なピクセルが存在し、フォトダイオードの代わりに接合容量に対応するキャパシタが組み込んであり、ノード容量は 40 [fF] である (Smadja et al. 2009)。

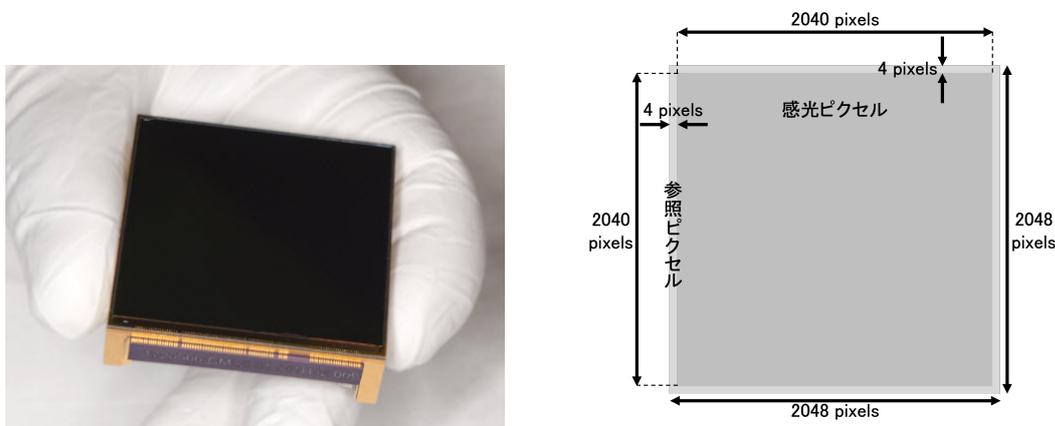


図 5.2: HAWAII-2RG™ (左) とそのピクセル配置図。参照ピクセルが感光ピクセルを取り囲むように幅 4 ピクセルで配置されている。

5.1.2 SIDECAR™ ASIC

SIDECAR™ (System Image, Digitizing, Enhancing, Controlling, And Retrieving) ASIC (Application Specific Integrated Circuit) はアナログイメージセンサ用のプログラマブルな制御およびデジタル化システムである。図 5.3 に簡略化された SIDECAR™ のブロック図を示す。SIDECAR™ は、アナログバイアス生成、クロックパルス生成、A/D 変換、データ処理、JADE2 card との通信などを行う (Loose et al. 2005)。

5.1.3 JADE2

JADE2 (JWST ASIC Drive Electronics) card は、SIDECAR™ と外部制御コンピュータの間のデジタルインターフェースである。JADE2 によって USB 2.0 ポートを通し、外部制御コンピュータから SIDECAR™ へのコマンドの受信と、SIDECAR™ から外部制御コンピュータへのデータの送信を行う。また、検出器や SIDECAR™ を駆動するための電源供給も行なっている。

5.1.4 検出器駆動ソフトウェア

検出器駆動用のソフトウェアは Windows マシン上で動作し、Hardware Abstraction Layer (HAL) Server、SIDECAR ASIC Integrated Development Environment (IDE)、HxRG Socket Server の 3 つのコンポーネン

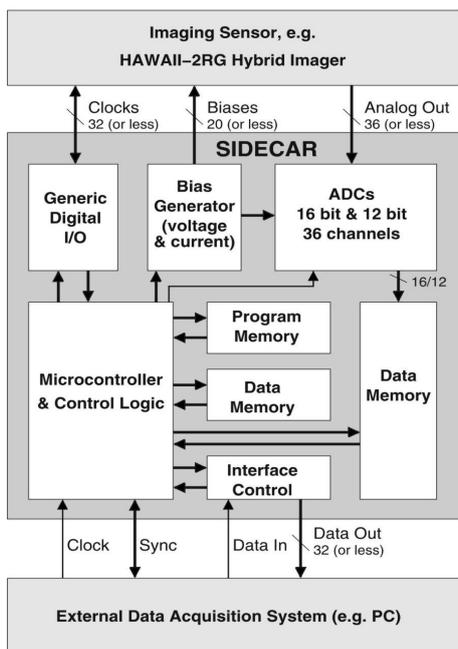


図 5.3: 簡略化された SIDE CAR™ のブロック図 (Loose et al. 2005)

トからなる。HAL Server は JADE2 インターフェースとコンピュータ間の低レベルコミュニケーションを担う。検出器の読み出し、バイアス電圧の変更などのコマンドは全て SIDE CAR ASIC IDE から HAL Server を通じて送信される。ただし、実際の検出器駆動には SIDE CAR ASIC IDE をラッピングしたソフトウェアである HxRG Testing Software が用いられている。HxRG Testing Software は、検出器の読み出し、駆動パラメータの変更などの操作を SIDE CAR ASIC IDE に比べ直感的に行うことができる。また、HxRG Testing Software は Socket Server を用いることで、TCP/IP 通信により、リモートホストのコマンドラインで操作を行うことも可能である。

5.1.5 検出器と読み出し回路の構成

現在、SWIMS に搭載されている 4 台の HAWAII-2RG および読み出し回路の組み合わせは表 5.2 になっている。

表 5.2: 検出器の読み出し回路の構成。

検出器	B1	B2	R1	R2
検出器 ID	16321	17285	196	206
cutoff wavelength	2.5 [μm]	1.7 [μm]	2.5 [μm]	2.5 [μm]
Grade	Science	Engineering	Science	Science
SIDE CAR ASIC ID	54	46	48	52
preamp gain	#10(g=5.6)	#8(g=4.0)	#10(g=5.6)	#10(g=5.6)

第6章 SWIMS 検出器システム性能評価

6.1 各検出器で取得された画像

性能評価には、基本的に CDS 画像 (リセットフレームを用いたベースライン減算後に参照ピクセル補正を行なった画像) を用いる。また、フラット画像はすばる望遠鏡のドームフラットを用いて取得している。各検出器で取得された CDS 画像を図 6.1 に示す。B1 検出器の中央下には大きなバッドピクセルクラスターが存在する。B2 検出器にはリセットアノマリーによる上下方向のカウン트의勾配と、図 6.2 のような crosshatch pattern が存在する (§2.2.7 参照)。

ただし、解析の際は SWIMS チームの小山氏によって作成された図 6.3 のようなバッドピクセルマップを用いてバッドピクセルをマスクしている。また、B2 検出器を用いて Up-the-Ramp Sampling で取得されたデータセットについてはリセットフレームの代わりに、その次のフレームを使ってベースライン減算を行なうことでリセットアノマリーの影響を軽減している。そのようにして得られた画像が図 6.4 である。今後の解析の際はこのようにして処理された画像を用いる。

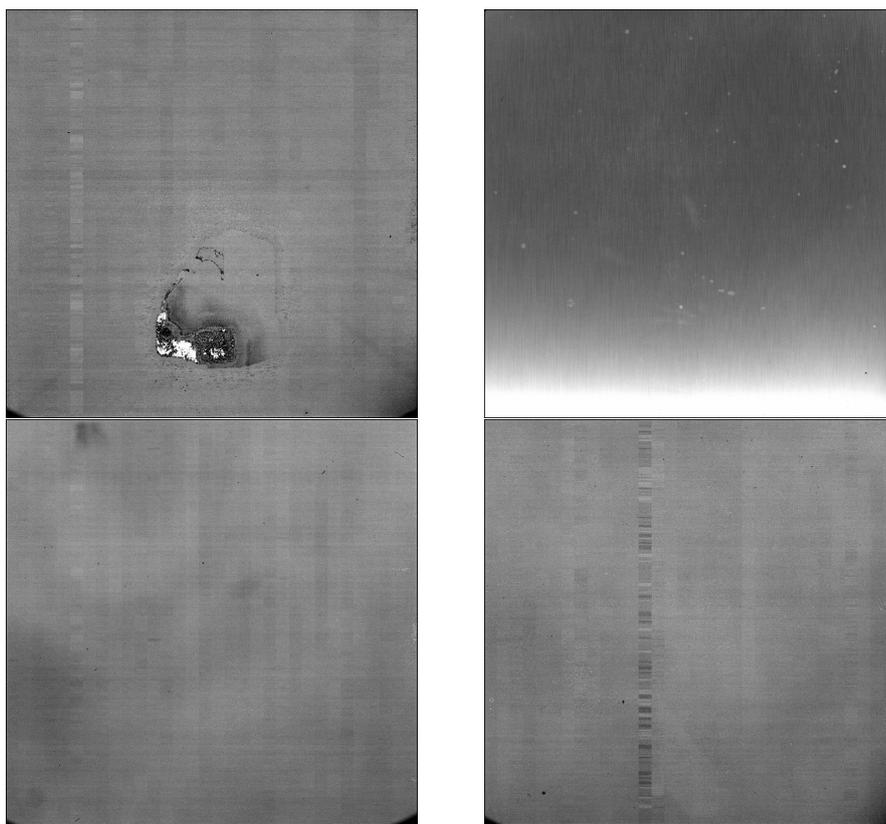


図 6.1: 各検出器で取得された 1.5[s] 積分の CDS フラット画像。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。

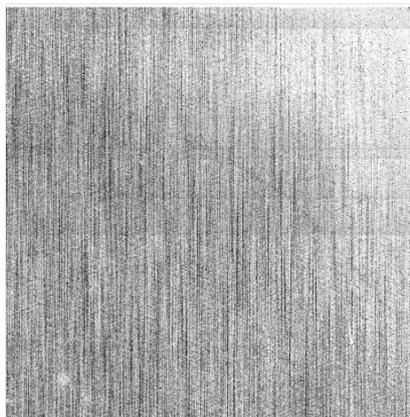


図 6.2: B2 検出器で得られた CDS 画像の一部を拡大したもの。B2 検出器にはこのような crosshatch pattern が存在する。

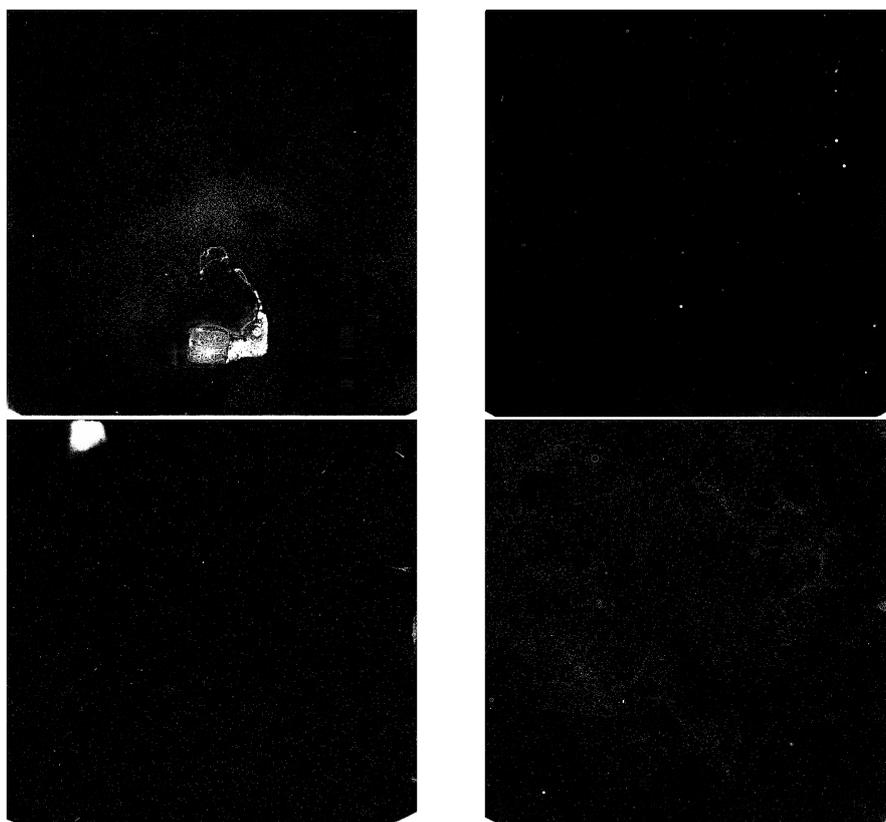


図 6.3: SWIMS チームの小山氏により作成された各検出器のバッドピクセルマップ。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。ただし、白いピクセルがバッドピクセルである。

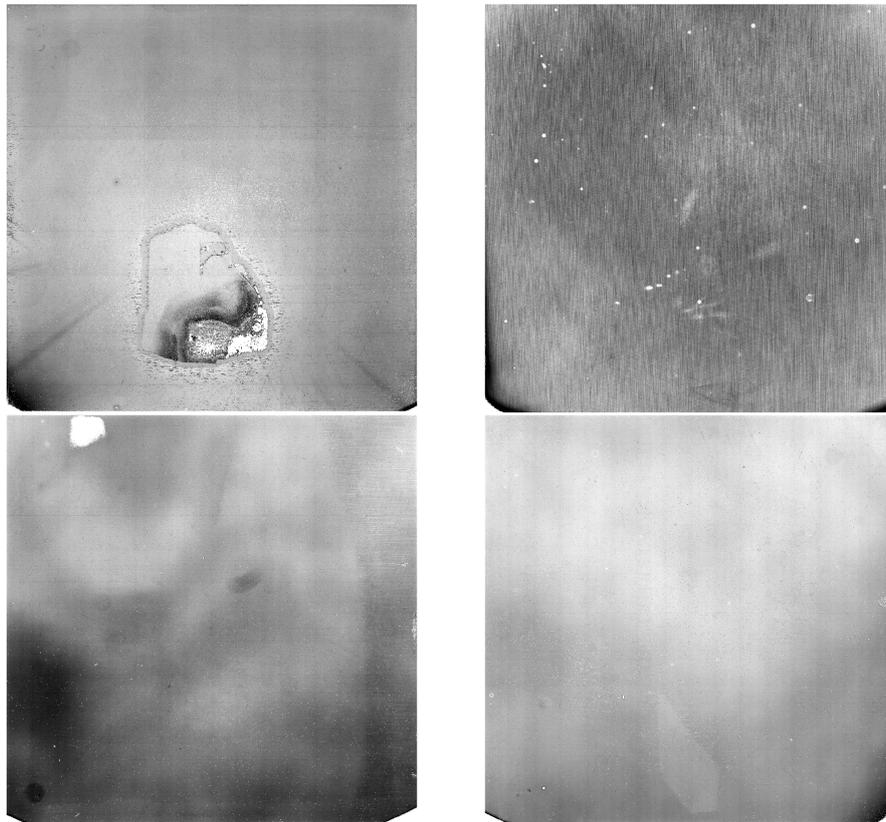


図 6.4: バッドピクセルマスクされた 15[s] 積分の CDS フラット画像。左上から B1,B2,R1,R2 検出器。ただし、B2 検出器に関しては 17.5[s] 積分の画像から 1.5[s] 積分の画像を減算したのちに参照ピクセル補正をしている。

6.2 非線形性

古典的非線形性の解析には、Up-the-Ramp Sampling で 1.5[s] 間隔で取得した 12 セット¹の 300 秒露出 (205 枚) のドームフラット画像を用いた。

6.2.1 非線形性の大きさ

解析の手順は基本的に §4.3 と同じである。まず、12 枚の同じ積分時間の CDS 画像を用いてメジアンスタック画像を生成した。次に、図 6.5 のように、横軸:フレームナンバー、縦軸:メジアンスタック画像の中央値カウントとしたプロットにおいて、非線形性が小さく、かつ、読み出しノイズやポアソンノイズの影響をあまり受けない領域 (表 6.1 の線形フィット範囲参照) のデータを用いて一次関数でフィッティングを行った。その後、測定データとフィッティング直線の比 (Ratio) を求めたものが図 6.6 である。

¹B2 検出器に関してはデータ取得中のデータ破損により 10 セット

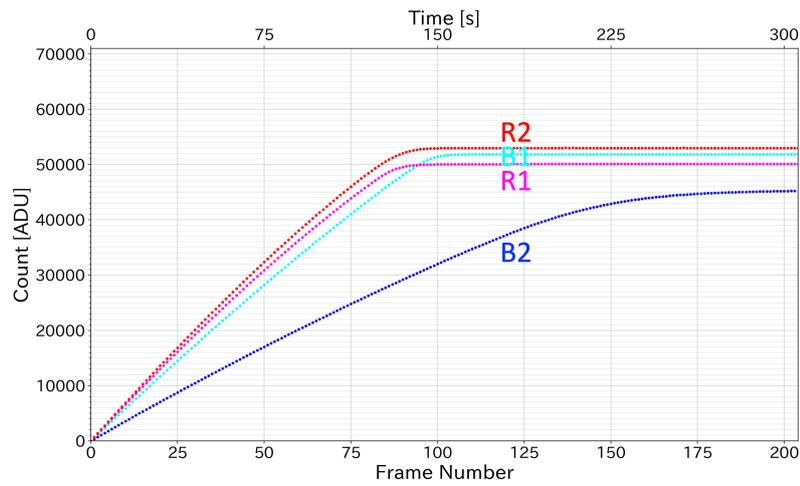


図 6.5: 横軸:フレームナンバー、縦軸:画像の中央値のプロット。カウントで表したフルウェルは B1: 5.2×10^4 [ADU]、B2: 4.5×10^4 [ADU]、R1: 5.0×10^4 [ADU]、R2: 5.3×10^4 [ADU] である。B2 検出器のカウントの伸びが緩やかである理由は §6.3 で述べる。

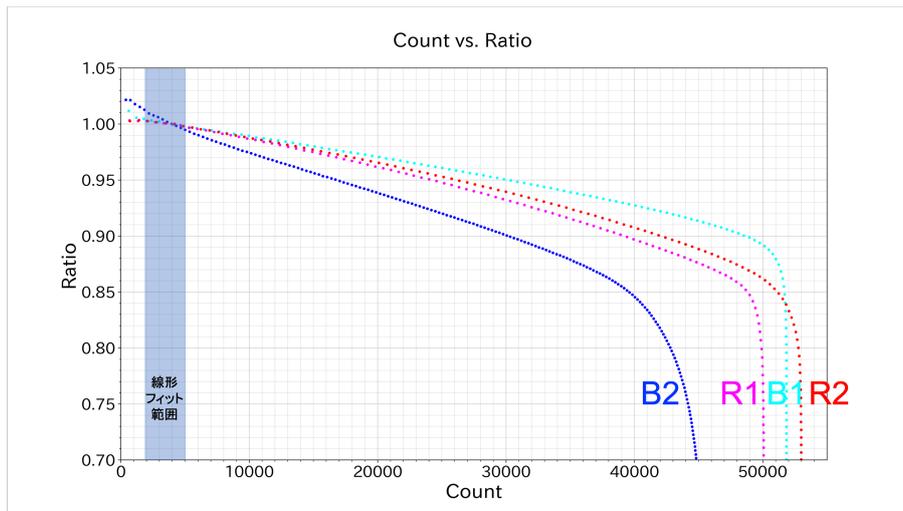


図 6.6: 検出器の非線形性。Ratio は図 6.5 のデータを 2000-5000 で線形フィッティングした直線で画像の中央値カウントを割ったものであり、1 に近いほど線形に近いことを意味する。

表 6.1: 非線形性測定のための各種パラメーター

検出器	B1	B2	R1	R2
線形フィット範囲 (min) [ADU]	2000	2000	2000	2000
線形フィット範囲 (max) [ADU]	5000	5000	5000	5000
非線形性フィット範囲 (min) [ADU]	0	0	0	0
非線形性フィット範囲 (max) [ADU]	47000	40000	45000	48000

各検出器の非線形性は表 6.2 のようであった。カウントで比較すると他の検出器に比べて B2 検出器の非線形性がかなり大きい。電子数で比較するとどの検出器も大きな差がなく、カウントで見た時に B2 検出器の非線形性が大きいのはプリアンプのゲイン設定が他の検出器よりも小さいことによるものである可能性が高い。

表 6.2: 各検出器の非線形性の大きさ。ただし、電子数は非線形性補正後のカウントにコンバージョンファクター g_c を乗じて求めており、 g_c は B1,R1,R2 検出器は表 6.4 の値を、B2 検出器は表 6.6 の値を用いている。

		B1	B2	R1	R2
非線形性 < 1% 範囲	カウント [ADU]	$< 9 \times 10^3$	$< 6 \times 10^3$	$< 9 \times 10^3$	$< 1.0 \times 10^4$
	電子数 [e^-]	$< 1.9 \times 10^4$	$< 1.9 \times 10^4$	$< 2.0 \times 10^4$	$< 2.2 \times 10^4$
非線形性 < 5% 範囲	カウント [ADU]	$< 2.9 \times 10^4$	$< 1.6 \times 10^4$	$< 2.4 \times 10^4$	$< 2.7 \times 10^4$
	電子数 [e^-]	$< 6.3 \times 10^4$	$< 5.3 \times 10^4$	$< 5.9 \times 10^4$	$< 6.3 \times 10^4$
非線形性 < 10% 範囲	カウント [ADU]	$< 4.8 \times 10^4$	$< 3.0 \times 10^4$	$< 3.9 \times 10^4$	$< 4.3 \times 10^4$
	電子数 [e^-]	$< 1.11 \times 10^5$	$< 1.03 \times 10^5$	$< 1.00 \times 10^5$	$< 1.04 \times 10^5$
フルウェル	カウント [ADU]	5.2×10^4	4.5×10^4	5.0×10^4	5.3×10^4
	電子数 [e^-]	1.22×10^5	1.81×10^5	1.33×10^5	1.36×10^5

6.2.2 非線形性の補正

Ratio のプロットにおいてウェルの約 9 割 (表 6.1 の非線形性フィット範囲参照) までで 5 次の多項式フィットを行い、フィッティング曲線で画像のカウントを割ることで非線形性の補正を行なった。その結果の一例を図 6.7 に示す。非線形性の補正により、ウェルのほぼ全域で平均的な非線形性を 1% 以内に抑えることが出来ている。しかし、各ピクセルに注目すると、図 6.8 のように、B2 検出器ではピクセル間で非線形性の大きさのばらつきが大きいため、全てのピクセルを同じフィッティング曲線で非線形性補正を行うと図 6.9 のように、非線形性の補正が十分でないピクセルと、過剰な非線形性の補正がかかったピクセルが出てくるのが分かった。よって、画像のすべてのピクセルに同じ非線形性の補正を適用することは適切でない。

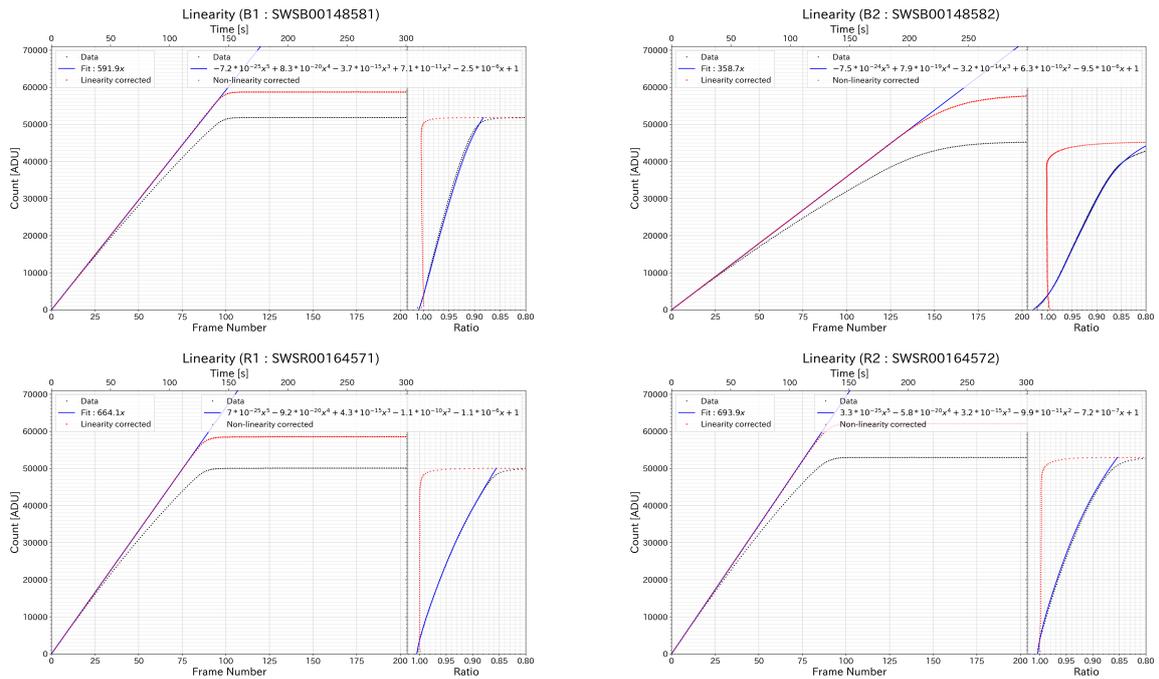


図 6.7: 非線形性補正適用前と適用後の非線形性の比較。ただし、左側のプロットにおいて、黒点線が非線形性補正前の画像の中央値カウント、青実線は黒点線の 2000-5000[ADU] でのフィッティング直線、赤点線は非線形性補正後の画像の中央値カウントである。また、右側のプロットにおいては、黒点線は左側のプロットの黒点線と青実線の比、青実線は Ratio の 5 次の多項式フィッティング曲線、赤点線が左側のプロットの赤点線と黒点線の比である。ただし、非線形性の補正に用いた Ratio のフィッティング曲線 (右図青実線) は 12 個のデータセットを全て用いて算出したフィッティング曲線であり、個々のデータセットのデータ (右図黒点線) にフィッティングを行った結果ではないことに注意。ウェルのほぼ全域において画像の平均的な非線形性を 1% 以内に抑えられていることがわかる。

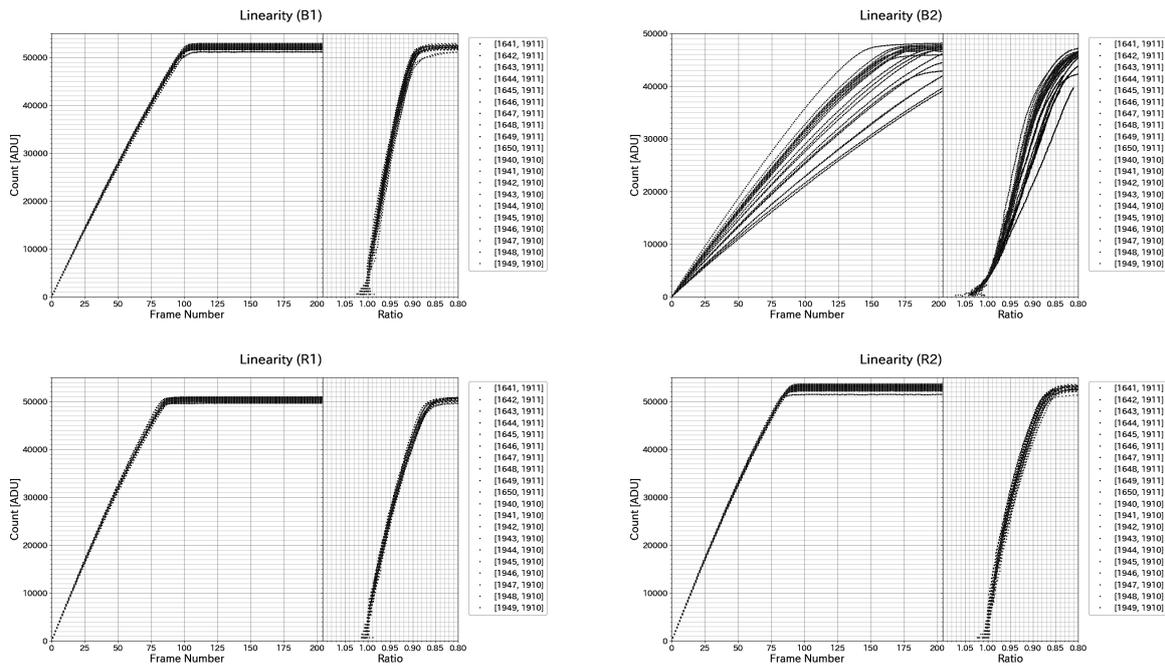


図 6.8: 非線形性補正前のピクセルの非線形性。ただし、ピクセルは crosshatch pattern のカウントの高いピクセルと低いピクセルから均等選ばれている。B2 検出器は他の検出器に比べて非線形性の大きさにばらつきが大きい。

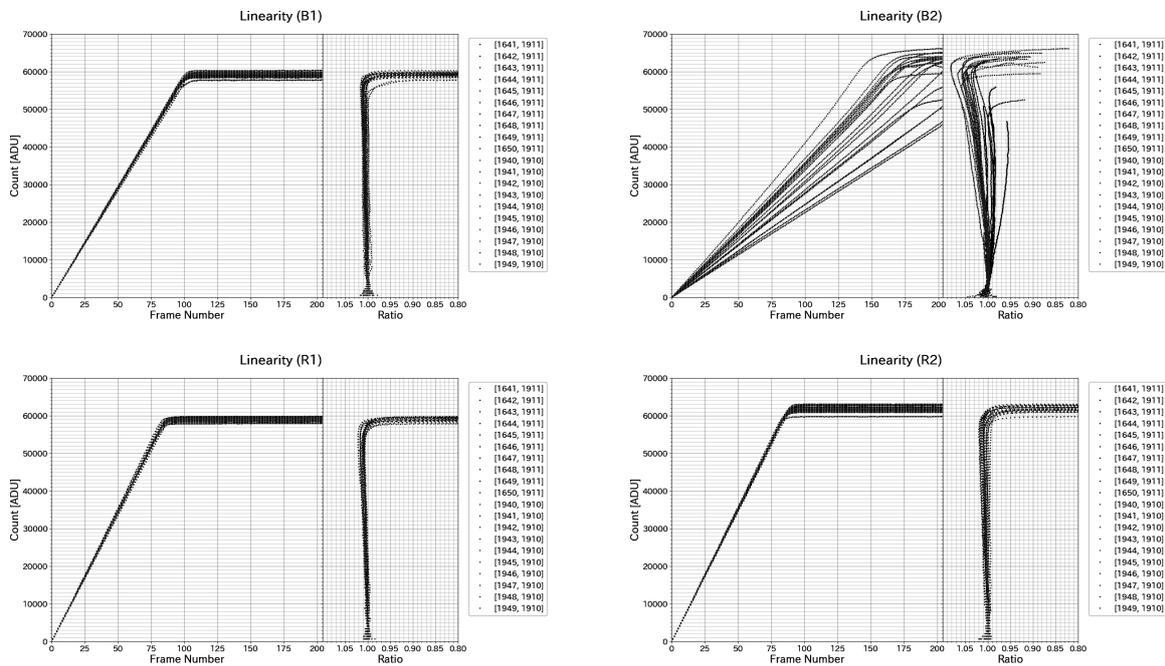


図 6.9: 図 6.8 と同じピクセルに検出器の平均的な非線形性を用いて非線形性の補正を行った時の非線形性。B2 検出器のピクセルには非線形性の補正が十分でないものと過剰にかかっているものが存在する。

6.2.3 ピクセル毎の非線形性

各ピクセルについて §6.2.2、§6.2.1 と同様のフィッティングを行った結果を用いて、ピクセル毎に異なる非線形性の補正を行なった。図 6.9 と図 6.8 と同じピクセルについて補正を行なった結果を図 6.10 に示す。当然ではあるが、検出器の全ピクセルに同じ非線形性の補正を適用した時に比べて非線形性の補正の精度が上がっていることがわかる。

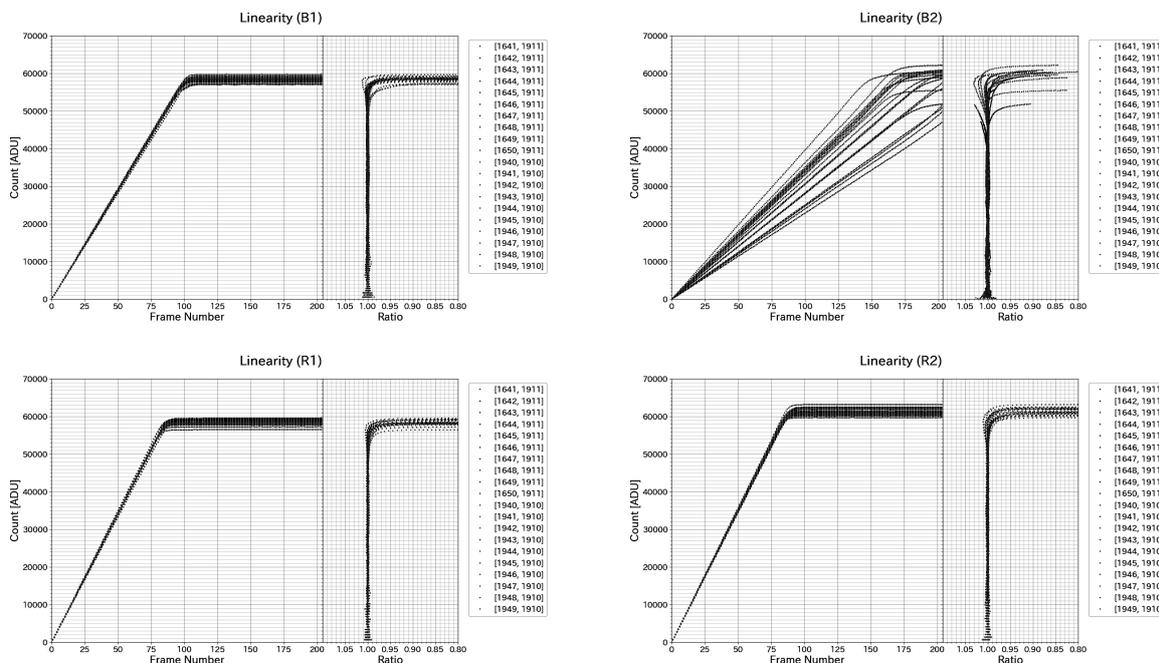


図 6.10: 図 6.8 と同じピクセルにピクセル毎に非線形性のフィッティングを行った結果を用いて非線形性の補正を適用した時の非線形性。図 6.9 と比較すると非線形性補正の精度が向上している。

また、各検出器のウェルの 9 割付近での非線形性は図 6.11 のようになった。B2 検出器の中心付近は周辺に比べて非線形性が大きいことが分かった。このパターンは”picture frame”と呼ばれるパターンによく似た形をしている。このパターンは MUX 由来のパターンである (Rauscher et al. 2012) ので、この非線形性も MUX 由来である可能性がある。また、フラット画像で見られたものと同様の crosshatch pattern が見えており、こちらはフォトダイオード層に由来するパターンである可能性が高い。

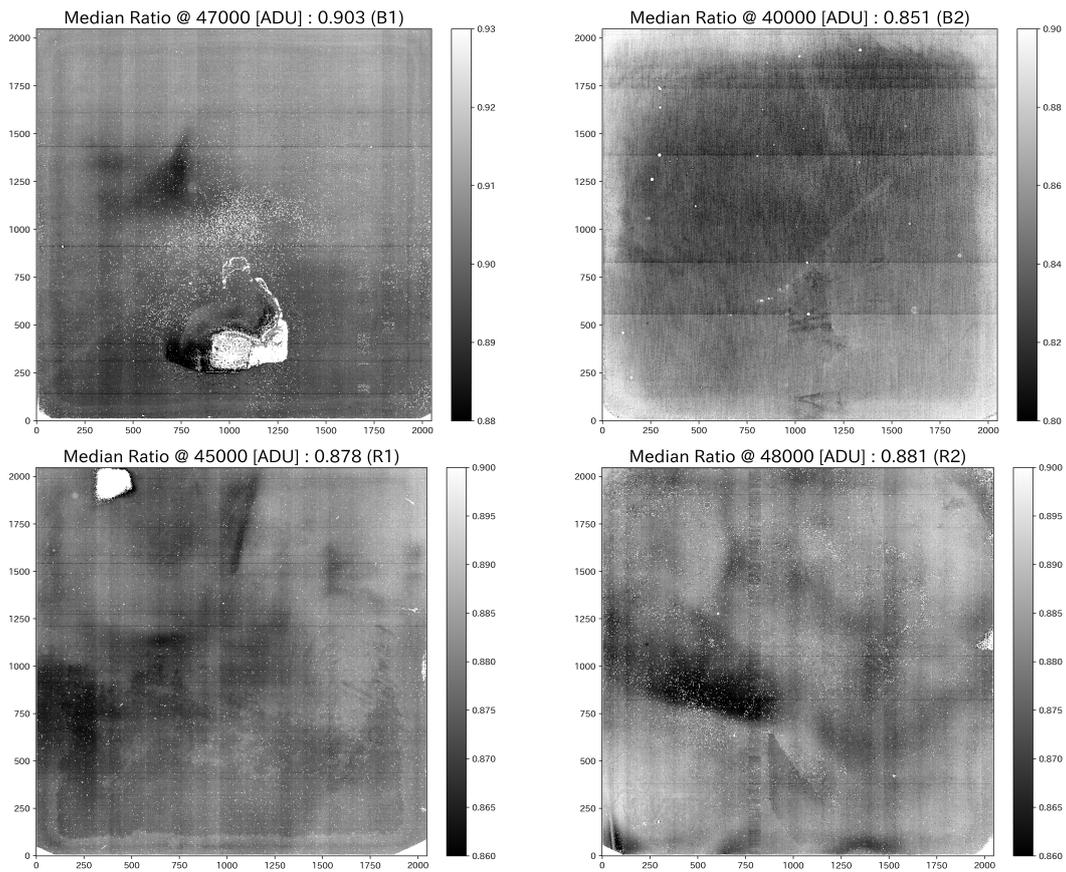


図 6.11: ウェルの約 9 割 (表 6.1 の非線形性フィット範囲 (max) を参照) における非線形性の大きさ。どの検出器でも”picture frame”と呼ばれる、検出器の外縁を縁取るパターンに類似したパターンが見えているが B2 検出器で最も顕著である。また、B2 検出器にはフラット画像でも見えていた crosshatch pattern が確認できる。

6.3 コンバージョンファクター

6.3.1 フォトントランスファー法

解析の際は、1.5[s] 間隔で Up-the-Ramp Sampling で取得した 200 秒積分 (137 枚) のドームフラットのセットを 5 セットを用いた。ただし、ピクセル毎に画像の非線形性の補正を行なっている。

今回は、ピクセル毎にコンバージョンファクターを求めるために十分なデータがないため、差分画像を用いたフォトントランスファー法によりコンバージョンファクターを推定する。解析の手順は §4.4.1 とほぼ同様であるが、今回は画像の分割の際の各領域の大きさは $27 \times 27[\text{pix}^2]$ ではなく、 $64 \times 64[\text{pix}^2]$ となっており、生成される中央値画像と標準偏差画像は図 6.12 のように 32×32 の要素を持つ。

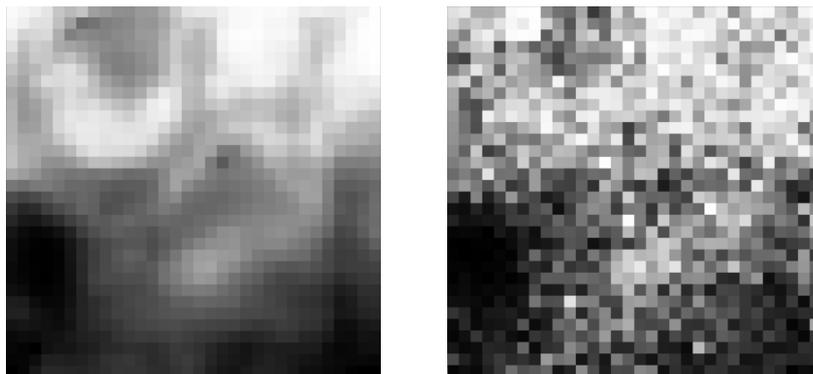


図 6.12: 中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。2048 × 2048[pix^2] の画像を $64 \times 64[pix^2]$ の領域に分割してその領域内の統計値を計算して生成した 32×32 の要素を持つ画像である。これらの画像は R1 検出器のものである。

フォントランスファーカーブを図 6.13 に示す。ただし、白丸はカウントビン内の分散の最頻値、エラーバーは各カウントビンの分散のばらつきを 1σ で示したものであり、フィッティング直線は各カウントビン内の分散の最頻値にそのカウントビンの度数で重みをつけて一次関数でフィッティングしたものである。

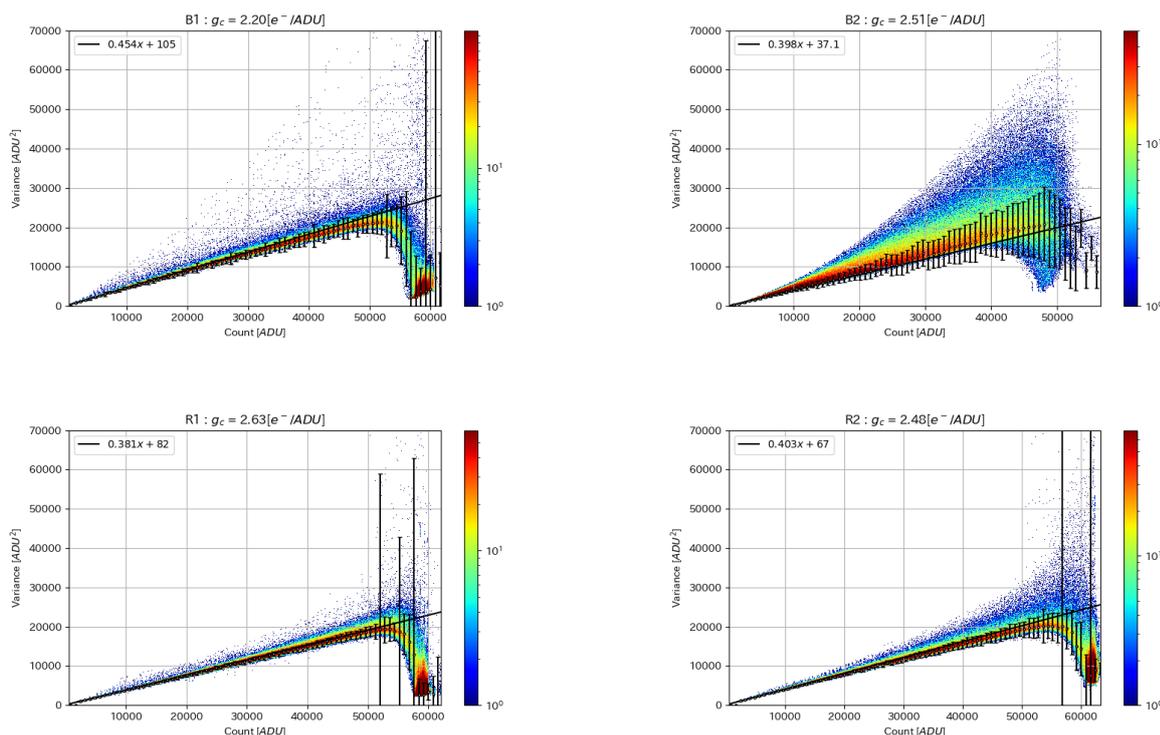


図 6.13: フォントランスファーカーブの 2次元ヒストグラムと、フォントランスファーカーブのフィッティング直線。ただし、フィッティングにはカウントが 2000-5000[ADU] の範囲内のデータを用いた。

また、各チャンネルについて図 6.13 と同様のプロットからコンバージョンファクターを測定した結果を図 6.14 に示す。B2 検出器のコンバージョンファクターの推定値は他の検出器に比べてばらつきが大きく、両端に比べ中央付近の出力ポートではコンバージョンファクターが小さくなっている。図 6.15 に 2 枚の同じ積分時間の画像から作成した中央値画像と標準偏差画像を示す。検出器の中央から右上にかけて中央値画像のカウントは同程度なのに対し、標準偏差が大きくなっているような箇所が見られる。現状、なぜこのようなことが

起きているのかは不明だが、これらの領域の影響で B2 検出器のフォントランスファーカーブが上下に大きく広がった形になってしまっている。

ただし、ここで求めたコンバージョンファクターは §2.2.6 で説明した画素間容量の影響を受けており、実際の値よりも大きくなっているため、補正が必要である。

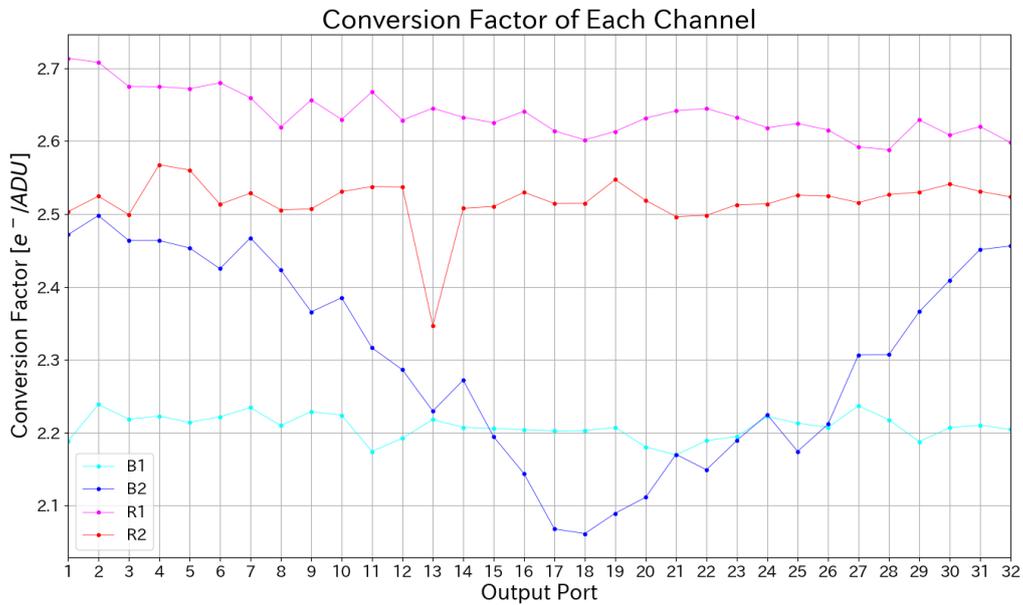


図 6.14: 各検出器のチャンネルごとのコンバージョンファクター。

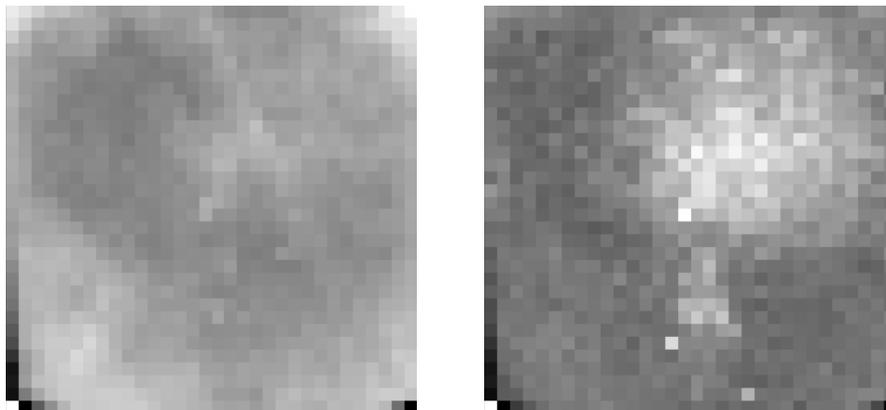


図 6.15: B2 検出器の中央値画像 (左) と標準偏差画像 (右)。検出器の中央から右上にかけて中央値画像のカウントは同程度だが、標準偏差が大きい領域が広がっている。

6.3.2 画素間容量による影響

画素間容量の解析には 1.5[s] 積分のダーク画像を 7 枚を使用した。

解析の手順は §4.4.3 とほぼ同様だが、中央値減算の際は $16 \times 16 [pix^2]$ の領域に分割し、領域内の中央値を減算してある。

表 6.3 に warm pixel の周りの信号のクロストークの様子と、そこから求めたクロストークの割合、コンバージョンファクターの補正係数を示す。ただし、 α は x 方向のクロストークの大きさ、 β は y 方向のクロストークの大きさである。また、補正係数によって画素間容量の影響を補正した後のコンバージョンファクター g_c^{corr} を表 6.4 に示す。

表 6.3: warm pixel の周りの信号のクロストークの様子、割合と、そこから求まるコンバージョンファクターの補正係数。

	B1	B2	R1	R2
クロストーク				
α	0.67%	1.87%	1.36%	1.44%
β	0.63%	3.14%	2.14%	1.53%
R	1.057	1.233	1.156	1.130

表 6.4: 画素間容量の影響を補正した際のコンバージョンファクター。

	B1	B2	R1	R2
g_c^{corr}	2.08 [e^-/ADU]	2.04 [e^-/ADU]	2.28 [e^-/ADU]	2.19 [e^-/ADU]

6.3.3 回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター

検出器のコンバージョンファクターは (2.2) から計算で求めることができる。現在の検出器の回路パラメータを表 6.5 に示す。ただし、ソースフォロワのゲイン A_{MUX} は 1 としている。すると、回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター g_c^{param} は表 6.6 のようになる。表 6.4 と表 6.6 を比較すると、B1,R1,R2 検出器については一貫性のある結果が得られている。一方で B2 検出器に関しては、測定によって得られたコンバージョンファクターが予測されるコンバージョンファクターに比べ、2/3 程度とかなり小さくなってしまい、コンバージョンファクターを正しく測定できていない可能性が高い。コンバージョンファクターの正しい測定値が得られていない理由は B2 検出器に見られる crosshatch pattern が原因である可能性がある。crosshatch pattern があることで画素の均一性の仮定が崩れているので、B2 検出器に関しては異なるピクセルのカウントと同じピクセルの異なる読み出しのカウントを同一視することはできない。しかしながら、crosshatch pattern は固定パターンであるので、差分画像を生成したときにそのパターンは消える (図 6.16 参照)。よって、差分画像を $64 \times 64 [pix^2]$ の領域に分割して、領域内の標準偏差を計算するとき crosshatch pattern による影響は小さく、フォントランスファーから領域内の平均的なコンバージョンファクターが得られることが期待された。今回の手法で求めたコンバージョンファクターがなぜ回路パラメータから予測された値よりも小さくなったのかという詳しい原因は現状判明していない。

表 6.5: 現在の検出器の回路パラメータ

	B1	B2	R1	R2
C_{node}	40 [fF]	40 [fF]	40 [fF]	40 [fF]
A_{MUX}	1	1	1	1
A_{amp}	5.6	4.0	5.6	5.6
μ_{ADC}	50 [$\mu V/ADU$]			

表 6.6: 回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター

	B1	B2	R1	R2
g_c^{param}	2.21 [e^-/ADU]	3.13 [e^-/ADU]	2.21 [e^-/ADU]	2.21 [e^-/ADU]

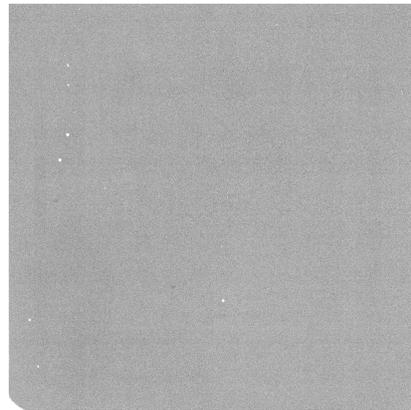


図 6.16: 同じ積分時間 ($\sim 60[s]$) の 2 枚のフラット画像の差分画像。crosshatch pattern は固定パターンであるため、差分を取ることで除去されている。

一つわかっているのは今回の測定手法では B2 検出器のコンバージョンファクターが過小評価されているということである。実際、図 6.5 や図 6.7 を見ると、同じ積分時間の時、B1 検出器のカウントは B2 検出器のカウントに比べ 1.65 倍程度大きいことがわかる。B1、B2 検出器に入射するフラックスは同じであるため、B2 検出器のカウントの増加が緩やかであるということはカウントに増やすためにより多くの電子を必要とする、つまり、コンバージョンファクターが大きいということの意味する。ただし、B2 検出器は crosshatch pattern により量子効率も低いということに注意が必要である。もし、回路パラメータから予測されるように B2 検出器のコンバージョンファクターが B1 検出器の 1.4 倍であったとするならば、B2 検出器の平均的な量子効率は B1 検出器の 85% 程度であることが予測される。

また、B2 検出器のコンバージョンファクターが他の検出器のコンバージョンファクターの 1.4 倍ではない可能性もある。積分ノード容量の 40 [fF] という値は設計値であり、実測値ではない。B2 検出器の積分ノード容量が 40 [fF] よりも小さければコンバージョンファクターも 3.13 [e^-/ADU] よりも小さくなる。検出器のバイアス電圧が他の検出器と同じであるにも関わらず、ウェルが他の検出器と比較して 30-50% 深いこともこれを示唆している (表 6.2 参照)。

いずれにせよ、他の手法により B2 検出器の正確なコンバージョンファクターの測定を行うことは今後の課題である。手法の例をいくつか挙げると、

1. ピクセル毎にコンバージョンファクターを求める方法

数十セット以上の Up-the-Ramp Sampling のデータを集めることで、各ピクセルのフォントランスファーカーブを描くことができ、ピクセル毎のコンバージョンファクターを求めることができる。この際、crosshatch pattern は固定パターンであるため、pixel-by-pixel のコンバージョンファクターの推定には影響を及ぼさないはずである。

2. Fe55 から発される特性 X 線によってコンバージョンファクターを求める方法

Fe55 の K_{α} 線や K_{β} 線は、吸収される際に既知の個数の電子を生成するため、カウントの増分からコンバージョンファクターを求めることができる (Finger et al. 2005, 2008)。ただし、この方法は基板除去された検出器でのみ使えることに注意する必要がある (HAWAII-2RG は基板除去されているのでこの方法を使用できる)。基板除去されていない検出器では X 線が基板内で吸収され、生成された電子の多くが空乏層に到達する前に再結合してしまい正確なコンバージョンファクターを推定することができない。

3. 静電容量比較法

検出器に蓄積された電荷のリセットに静電容量が既知のキャパシタを使用し、キャパシタの電圧の変化と積分ノードの電圧の変化を比較することで積分ノードの静電容量、ひいてはコンバージョンファクターを求めることができる (Finger et al. 2005, 2008)。

などがある。

6.4 読み出しノイズ

今回も §4.5 と同様に画像のカウントが 0 に近いダーク画像を用いて読み出しノイズを求めていく。ただし、ここでも読み出しノイズとは CDS 画像の読み出しノイズを意味する。

今回の解析には Fowler-1 Sampling で取得された 1.5 秒積分のダーク画像を 23 枚用いた。解析の手法についてはフォントランスファーカーブの作成までは §6.3.1 と一緒だが、その後、フィッティング直線の y 切片ではなく、分散ピンの最頻値を用いて読み出しノイズを求めている。

解析の結果を図 6.17 に示す。ただし、読み出しノイズの計算の際のコンバージョンファクターの値として、B1,R1,R2 検出器に関しては画素間容量の影響を補正したコンバージョンファクター g_c^{corr} の値 (表 6.4 参照) を、B2 検出器に関しては回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター g_c^{param} の値 (表 6.6 参照) を用いている。B2 検出器のプロットが高カウント側に伸びているのはリセットアノマリーによる影響である。

B1,R1,R2 検出器は概ね同程度の読み出しノイズの大きさであることがわかる。一方で B2 検出器の読み出しノイズは大きい。ただし、この結果はリセットアノマリーによるカウントの勾配の影響は受けていないと考えられる。実際、図 6.18 を見ると、カウントが 0 に近い検出器上部ではカウントの勾配はほぼない。それだけでなく、図 6.19 を見ると、フォントランスファーカーブの傾きがほとんどないことがわかる。これは、読み出しノイズの評価にリセットアノマリーがほとんど影響を及ぼしていないだけでなく、リセットアノマリー自体がノイズレスに近いことを意味する。

また、各チャンネルの読み出しノイズの大きさを図 6.20 に示す。図 6.17 から分かるように、R1,R2 検出器は比較的チャンネル間の読み出しノイズのばらつきが大きいことが判明した。

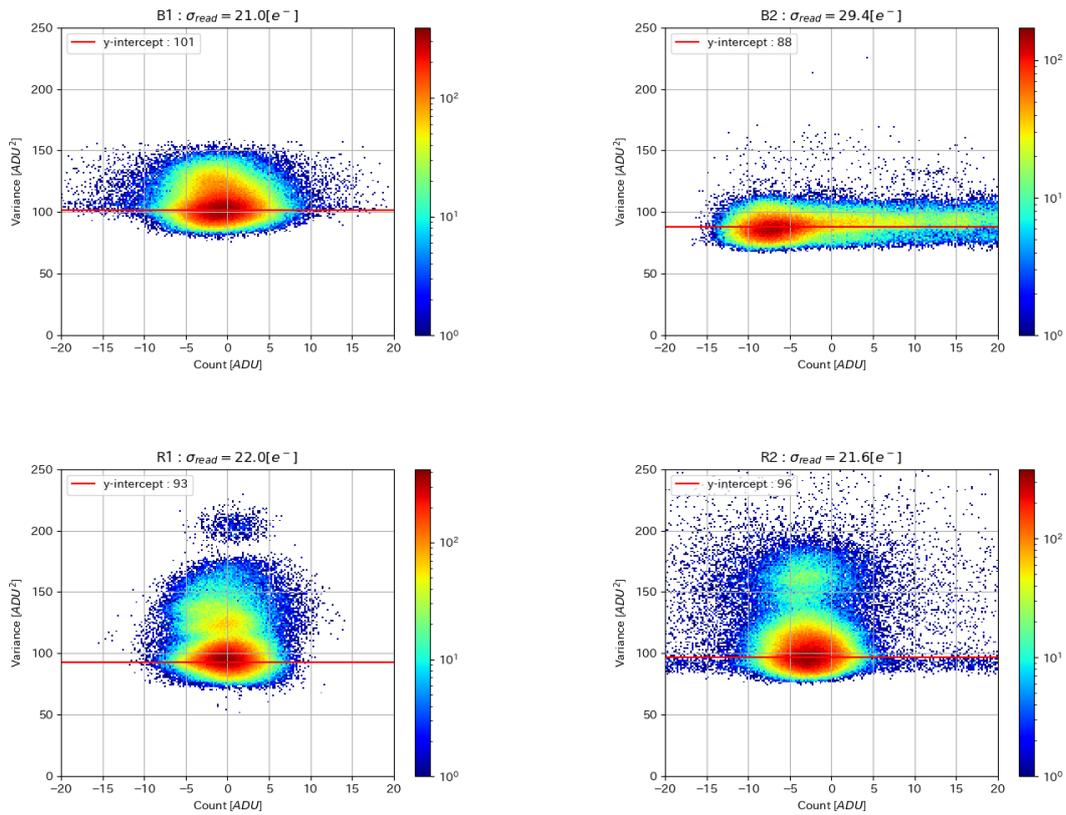


図 6.17: 横軸:中央値画像のカウント、縦軸:標準偏差画像のカウントの二乗とした 2次元ヒストグラム。ただし、赤実線は最も度数の大きい分散ビンを示している。

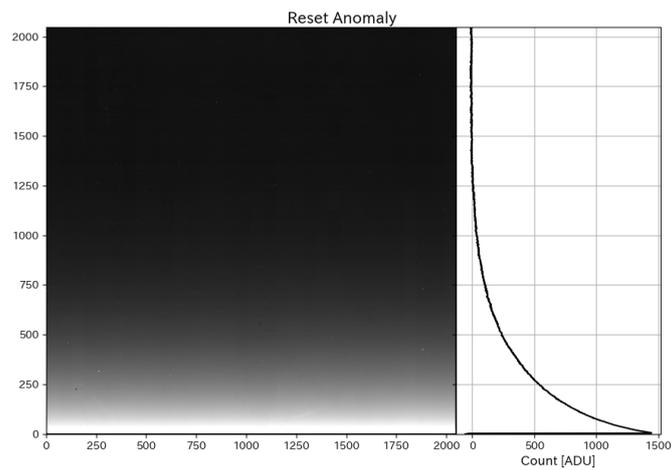


図 6.18: B2 検出器の 1.5[s] 積分のダーク画像 (左) と行ごとのカウントの中央値 (右)。リセットアノマリーは検出器の上部に向かうにつれ指数的に減衰しており、検出器の上側 1/3 程度はリセットアノマリーの影響は見られない。

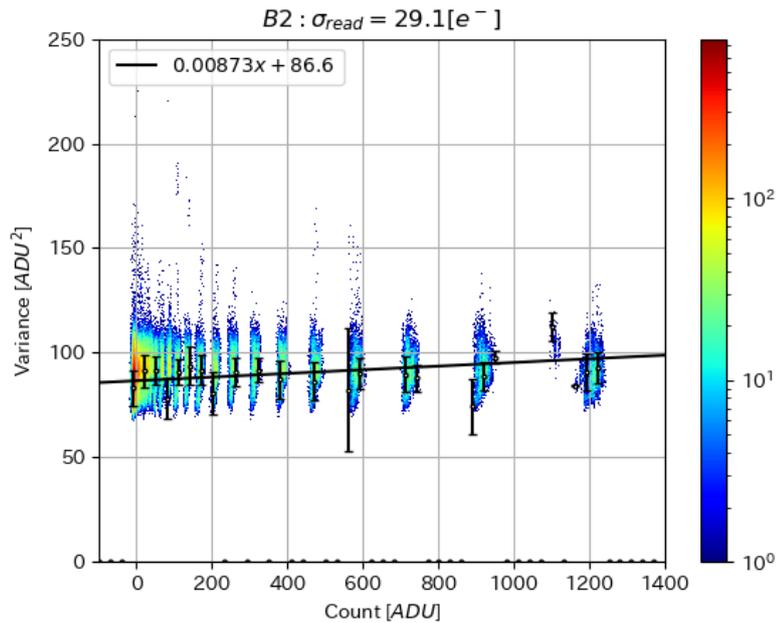


図 6.19: B2 検出器についてフォントランスファーカーブのプロットの表示範囲を $-100 \sim 1400[ADU]$ まで広げたもの。リセットアノマリーによりカウントが大きい場所でも分散はカウントが小さいところと変わらない(コンバージョンファクター換算で $g_c \approx 115[e^-/ADU]$)。このことはリセットアノマリーが読み出しノイズの評価に影響を与えないだけでなく、リセットアノマリーはほぼノイズがないことを意味する。

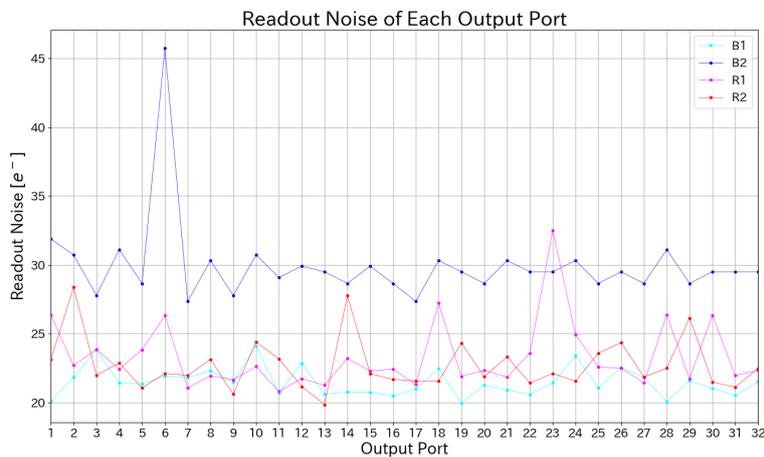


図 6.20: 各検出器のチャンネル毎の読み出しノイズ。ただし、読み出しノイズの電子数への変換の際は、B1,R1,R2 検出器に関しては図 6.14 の対応するチャンネルのコンバージョンファクターを、B2 検出器に関しては回路パラメータから予測されるコンバージョンファクター $g_c^{param} = 3.13[e^-/ADU]$ を用いている。

第7章 総括

7.1 本研究の成果

本研究では TAO6.5m 望遠鏡に搭載される近赤外高分散分光器 TARdYS の検出器システムの開発とその評価、および、近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS の検出器システムの評価を行った。これにより得られた成果を以下にまとめる。

TARdYS

- TARdYS 検出器システムの開発

検出器を駆動するためのハードウェア作成や、国立天文台中屋氏から抵抗された検出器駆動用ソフトウェア (MESSIA6) を Python でラッピングをしたデータ取得システムの開発を行い、TARdYS の検出器を駆動させる検出器システムの開発をおこなった。検出器駆動用ソフトウェアを Python でラッピングを行ったことにより、Python で記述されることが予想される TARdYS 全体の制御システムへの組み込みが容易になる。

- 最終画像生成システム

TARdYS のデータ取得システムにより生成された画像からリセットフレーム引き、参照ピクセル補正、非線形性補正を行い最終画像を生成する画像処理パイプラインを開発した。参照ピクセル補正は MESSIA6 では検出器の 4 辺のうち左右の 2 辺の参照ピクセルのみを用いて行われていたが、4 辺の参照ピクセルを用いて行うように改良をおこなった。また、最終画像は CDS 画像と Ramp 画像の 2 つの中から選択することができ、試験用に最終画像を生成しないモードの実装も行なった。Ramp 画像の生成の際は飽和したピクセルを検知し、飽和する前までのカウントを用いてカウントレートを求めることが可能である。

- TARdYS 検出器システムの性能評価

開発した検出器システムの性能の評価を行った。基本的な性能評価結果を表 7.1 に示す。検出器下部は読み出し回数に比例するグローが発生し、それにより、サンプリング数がある程度以上大きくすると実効的な読み出しノイズが増加していくため、 $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ or 25 の時が最も読み出しノイズが小さくなることが分かった。

以上より、チリ・カトリカ大学へと検出器システムを引き渡す準備はほぼ完了した。また、TARdYS に用いられた InGaAs 検出器は、赤外線カメラ開発の高いハードルとなっている天文観測用近赤外検出器の確保の問題の解決に向けた、近赤外検出器の国産化プロジェクトで開発されたものであり、今後、TARdYS に搭載されているものと同型、もしくはその後継の検出器は天文学界でさらに存在感を増していくと考えられる。そういった意味で、本研究における性能評価の手法および結果は、今後の TARdYS での観測の駆動パラメータの調整の助けになるだけに留まらず、同種の検出器を用いた他の観測装置の開発や評価にも貢献する知見である。

表 7.1: TARdYS 検出器システムの性能評価結果。

コンバージョンファクター [e^-/ADU]		3.88 [e^-/ADU]	
ノード容量		28 [fF]	
画素間容量クロストーク	x 方向	0.46%	
	y 方向	0.29%	
CDS 読み出しノイズ		3.4 [e^-]*	
非線形性	< 1% 範囲	カウント	$< 1.2 \times 10^4$ [ADU]
		電子数	$< 4.7 \times 10^4$ [e^-]
	< 5% 範囲	カウント	$< 3.7 \times 10^4$ [ADU]
		電子数	$< 1.51 \times 10^5$ [e^-]
フルウェル	カウント	$< 5.3 \times 10^4$ [ADU]	
	電子数	$< 2.29 \times 10^5$ [e^-]	
検出器グロー	$x < 50$	> 1.1 [$e^-/read$]	
	$x < 100$	> 0.87 [$e^-/read$]	
	$x < 200$	> 0.43 [$e^-/read$]	
	$x < 400$	> 0.17 [$e^-/read$]	
	中央値	0.12 [$e^-/read$]	
暗電流	120[K]	1.5×10^{-2} [$e^-/s/pix$]	
	140[K]	5.2×10^{-2} [$e^-/s/pix$]	
	160[K]	5.1×10^{-1} [$e^-/s/pix$]	
リセットアノマリー		< 3 [ADU] (リセットパルス長 0.1 [ms])	
量子効率		$\sim 80\%$	

* $n_{sample} = 16, n_{osample} = 16$ とした時のダークショットノイズを除いた実効読み出しノイズ。ただし、検出器グローによるショットノイズは含む。

SWIMS

- SWIMS の検出器性能評価

現在、観測に用いられている検出器設定では初めて、4 台全ての HAWAII-2RG の性能評価を行った。基本的な性能評価結果を表 7.2 に示す。また、crosshatch pattern の存在する B2 検出器は他の検出器に比べ相対的な量子効率が低いことが示唆される結果になった。それに加え、検出器の非線形性の評価結果を用い、CDS 画像についてピクセルごとに非線形性の補正を行うことが可能になった。

以上より、SWIMS の検出器システムの特性を明らかにすることができた。この成果は、SWIMS を用いた観測で得られたデータの解析精度の向上をもたらし、今後の SWIMS の運用の指針を示すものであると考えられる。また、SWIMS に搭載されている HAWAII-2RG やその他の HAWAII-xRG ファミリーは今後も天文学で強い存在感を示し続けることが予想され、今回の性能評価で得られた知見が他の近赤外線観測装置の評価の一助となることが期待される。

表 7.2: SWIMS 検出器システムの性能評価結果。

		B1	B2	R1	R2	
コンバージョンファクター [e^-/ADU]		2.08	3.13*	2.28	2.19	
画素間容量クロストーク	x 方向	0.67%	1.87%	1.36%	1.44%	
	y 方向	0.63%	3.14%	2.14%	1.53%	
CDS 読み出しノイズ [e^-]		21.0	29.3*	22.1	21.6	
非線形性	< 1% 範囲	カウント [ADU]	$< 9 \times 10^3$	$< 6 \times 10^3$	$< 9 \times 10^3$	$< 1.0 \times 10^4$
		電子数 [e^-]	$< 1.9 \times 10^4$	$< 1.9 \times 10^4$	$< 2.0 \times 10^4$	$< 2.2 \times 10^4$
	< 5% 範囲	カウント [ADU]	$< 2.9 \times 10^4$	$< 1.6 \times 10^4$	$< 2.4 \times 10^4$	$< 2.7 \times 10^4$
		電子数 [e^-]	$< 6.3 \times 10^4$	$< 5.3 \times 10^4$	$< 5.8 \times 10^4$	$< 6.3 \times 10^4$
	< 10% 範囲	カウント [ADU]	$< 4.8 \times 10^4$	$< 3.0 \times 10^4$	$< 3.9 \times 10^4$	$< 4.3 \times 10^4$
		電子数 [e^-]	$< 1.10 \times 10^5$	$< 1.03 \times 10^5$	$< 1.00 \times 10^5$	$< 1.05 \times 10^5$
フルウェル	カウント [ADU]	5.2×10^4	4.5×10^4	5.0×10^4	5.3×10^4	
	電子数 [e^-]	1.22×10^5	1.81×10^5	1.34×10^5	1.36×10^5	

* 回路パラメータから予測されるコンバージョンファクターを用いている。

7.2 今後の展望

TARdYS

今後、TARdYS の検出器システムは、チリ・カトリカ大学において光学系との統合を行うために、2023 年度中にチリへと移送と引き継ぎが行われる。検出器システムの引き継ぎの準備と並行して、Ramp 画像の生成の際の宇宙線の影響の除去によるフィッティング精度の向上や、メモリや処理時間の節約のためのソフトウェアの効率化を可能な限り進めていく。

性能評価面に関しては、検出器を 120[K] より低い温度にすることで暗電流をどこまで軽減することができるかを測定することが必要である。また、パーシステンスの測定の妨げとなっている積分間のデッドタイムの短縮のために、部分読み出しを行う等の対策を講じてより正確な評価を行うことを目指す。

SWIMS

SWIMS は 2022 年度にすばる望遠鏡での PI 装置として共同利用運用を終え、2023 年度に一度日本で改修を加えられたのち、2024 年度初頭にチリへ輸送され、TAO6.5m 望遠鏡での試験観測に備える予定である。

今後に行うべき性能評価としては、今回コンバージョンファクターと読み出しノイズの信頼できる測定結果が得られなかった B2 検出器について、

- ピクセルごとにフォントランスファーカーブを描く
- Fe55 から発される特性 X 線を用いる
- 既知の静電容量のキャパシタと積分ノードの静電容量を比較する

などの方法を用いて、コンバージョンファクター測定をおこない、その結果を用いて再度読み出しノイズの算出も行う必要がある。それだけでなく、B2 検出器のプリアンプのゲインを B1 検出器と合わせてフラット画像を取得し、B1,B2 検出器のカウントの増加率を比較することで、量子効率の比較を行うなど、簡易的でも良いので B2 検出器の量子効率の評価を行うことが望ましい。また、B1 検出器は他の観測装置へと引き渡され、他の HAWAII-2RG への交換が行われる。交換された HAWAII-2RG の性能評価を行う際には、本研究で得られた知見が活きると考える。

性能評価以外にも、SWIMS での測光の精度を向上させるため、非線形性の補正を SWIMS の測光パイプラインに組み込むこと検討している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の本原顕太郎教授には多忙なスケジュールのなか、適切な助言と熱心な指導をいただきました。また、議論を行う機会を十分に設けていただき、自身の研究への理解を深めることができました。ここに深く感謝申し上げます。

国立天文台の中屋秀彦氏には、検出器について無知であった私に検出器についてのご教授や、検出器システムの開発に用いるソフトウェア、情報、部品等を提供をしていただいたほか、検出器の性能評価評価結果についてご相談させていただきました。心より感謝いたします。

SWIMS チームの小西真広氏、高橋英則氏、小山舜平氏、加藤夏子氏には本研究のさまざまな場面でお世話になりました。特に、小西氏には TARdYS の DAQ システムの構築の際には親身に協力とアドバイスを、高橋氏には真空関連の知識や技術についての助言を、小山氏には SWIMS の検出器評価の際のデータ取得を、加藤氏には研究生活の支援をしていただきました。ここに感謝申し上げます。

本原研究室の櫛引洗佑氏、陳諾氏、安田彩乃氏には同じ学生として近い立場で議論や実験、世間話に付き合ってくださいました。特に、櫛引氏は大学院生のロールモデルとして色々と参考にさせていただいたほか、学生生活や進路の相談でお世話になりました。ありがとうございました。

国立天文台・先端技術センターの方々には研究に関する広範なサポートをしていただきました。中でも、鎌田由紀子氏には一人ではできない実験や作業の補助していただいたり、実験セットアップについての相談に乗っていただいたりしました。また、久保浩一氏には頻りに液体窒素の液取りを手伝っていただきました。大変お世話になりました。

MIMIZUKU、NICE といった TAO プロジェクトのメンバーをはじめとする天文センターの方々や、JASMINE チームの方々には研究やその他の日々のさまざまな場面でお世話になりました。ここに感謝いたします。

最後に、これまで私の研究生活を支え応援してくれた家族や友人に深く感謝します。

関連図書

- Biesiadzinski, T., Lorenzon, W., Newman, R., et al. 2011a, *PASP*, 123, 179, doi: [10.1086/658282](https://doi.org/10.1086/658282)
- . 2011b, *PASP*, 123, 958, doi: [10.1086/661793](https://doi.org/10.1086/661793)
- Bohlin, R. C., Lindler, D. J., & Riess, A. 2005, Grism Sensitivities and Apparent Non-Linearity, Instrument Science Report NICMOS 2005-002, 20 pages
- Bohlin, R. C., Riess, A., & de Jong, R. 2006, NICMOS Count Rate Dependent Non-Linearity in G096 and G141, Instrument Science Report NICMOS 2006-002, 21 pages
- Brown, M. G. 2007, PhD thesis, University of Michigan
- Doi, M., Miyata, T., Yoshii, Y., et al. 2018, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 10700, Ground-based and Airborne Telescopes VII, ed. H. K. Marshall & J. Spyromilio, 107000W, doi: [10.1117/12.2313099](https://doi.org/10.1117/12.2313099)
- Finger, G., Beletic, J. W., Dorn, R., et al. 2005, *ExA*, 19, 135, doi: [10.1007/s10686-005-9014-1](https://doi.org/10.1007/s10686-005-9014-1)
- Finger, G., Dorn, R., Meyer, M., et al. 2006, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 6276, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. D. A. Dorn & A. D. Holland, 62760F, doi: [10.1117/12.671828](https://doi.org/10.1117/12.671828)
- Finger, G., Dorn, R. J., Eschbaumer, S., et al. 2008, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7021, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III, ed. D. A. Dorn & A. D. Holland, 70210P, doi: [10.1117/12.787971](https://doi.org/10.1117/12.787971)
- Garnett, J. D., & Forrest, W. J. 1993, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 1946, Infrared Detectors and Instrumentation, ed. A. M. Fowler, 395–404, doi: [10.1117/12.158692](https://doi.org/10.1117/12.158692)
- Hall, D. N. B. 2006, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 336, Astrophysics and Space Science Library, ed. J. E. Beletic, J. W. Beletic, & P. Amico, 491, doi: [10.1007/1-4020-4330-9_53](https://doi.org/10.1007/1-4020-4330-9_53)
- Hill, R. J., Malumuth, E., Foltz, R., et al. 2010, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7742, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV, ed. A. D. Holland & D. A. Dorn, 774222, doi: [10.1117/12.857218](https://doi.org/10.1117/12.857218)
- Janesick, J., Klaasen, K., & Elliott, T. 1985, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 570, Solid state imaging arrays, 7–19, doi: [10.1117/12.950297](https://doi.org/10.1117/12.950297)
- Kitagawa, Y., Ozaki, S., Motohara, K., et al. 2014, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9151, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, ed. R. Navarro, C. R. Cunningham, & A. A. Barto, 91514P, doi: [10.1117/12.2054719](https://doi.org/10.1117/12.2054719)

- Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., et al. 2012, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 8446, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, ed. I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami, 84467P, doi: [10.1117/12.924259](https://doi.org/10.1117/12.924259)
- Konishi, M., Motohara, K., Tateuchi, K., et al. 2015, PASJ, 67, 4, doi: [10.1093/pasj/psu148](https://doi.org/10.1093/pasj/psu148)
- Kuroda, R., Teramoto, A., & Sugawa, S. 2018, ITE Transactions on Media Technology and Applications, 6, 171, doi: [10.3169/mta.6.171](https://doi.org/10.3169/mta.6.171)
- Linpeng, C. 2009, Master's thesis, Rochester Institute of Technology
- Loose, M., Beletic, J., Blackwell, J., et al. 2005, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5904, Cryogenic Optical Systems and Instruments XI, ed. J. B. Heaney & L. G. Burriesci, 293–302, doi: [10.1117/12.619638](https://doi.org/10.1117/12.619638)
- Marshall, J. L., Williams, P., Rheault, J.-P., et al. 2014, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, ed. S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami, 91474F, doi: [10.1117/12.2056729](https://doi.org/10.1117/12.2056729)
- McLean, I. 2008, Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation, Springer Praxis Books (Springer Berlin Heidelberg). <https://books.google.co.jp/books?id=FGHhZf-k8SkC>
- Minezaki, T., Morokuma, T., Yoshii, Y., et al. 2020, in Ground-based and Airborne Telescopes VIII, ed. H. K. Marshall, J. Spyromilio, & T. Usuda, Vol. 11445, International Society for Optics and Photonics (SPIE), 114452R, doi: [10.1117/12.2562223](https://doi.org/10.1117/12.2562223)
- Miyata, T., Motohara, K., Sako, S., et al. 2008, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7012, Ground-based and Airborne Telescopes II, ed. L. M. Stepp & R. Gilmozzi, 701243, doi: [10.1117/12.788264](https://doi.org/10.1117/12.788264)
- Miyatake, H., Fujimori, H., Aihara, H., et al. 2012, ITNS, 59, 1767, doi: [10.1109/TNS.2012.2201169](https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2201169)
- Miyatake, H., Uchida, T., Fujimori, H., et al. 2008, in 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 737 – 741, doi: [10.1109/NSSMIC.2008.4774570](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4774570)
- Moore, A. C., Ninkov, Z., & Forrest, W. J. 2004, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5167, Focal Plane Arrays for Space Telescopes, ed. T. J. Grycewicz & C. R. McCreight, 204–215, doi: [10.1117/12.507330](https://doi.org/10.1117/12.507330)
- Moore, A. C., Ninkov, Z., & Forrest, W. J. 2006, OptEn, 45, 076402, doi: [10.1117/1.2219103](https://doi.org/10.1117/1.2219103)
- Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., et al. 2014, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, ed. S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami, 91476K, doi: [10.1117/12.2054861](https://doi.org/10.1117/12.2054861)
- Motohara, K. M., Aoki, T., Asano, K., et al. 2011, in Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, Vol. 41, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 83–86
- Plazas, A. A., Shapiro, C., Smith, R., Rhodes, J., & Huff, E. 2017, JInst, 12, C04009, doi: [10.1088/1748-0221/12/04/C04009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/04/C04009)
- Rauscher, B. J., Arendt, R. G., Fixsen, D. J., et al. 2012, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V, ed. A. D. Holland & J. W. Beletic, 84531F, doi: [10.1117/12.926089](https://doi.org/10.1117/12.926089)

- Reiners, A., Bean, J. L., Huber, K. F., et al. 2010, *ApJ*, 710, 432, doi: [10.1088/0004-637X/710/1/432](https://doi.org/10.1088/0004-637X/710/1/432)
- Rukdee, S., Vanzi, L., Schwab, C., et al. 2019, *ExA*, 48, 145, doi: [10.1007/s10686-019-09642-y](https://doi.org/10.1007/s10686-019-09642-y)
- Schlawin, E., Leisenring, J., McElwain, M. W., et al. 2021, *AJ*, 161, 115, doi: [10.3847/1538-3881/abd8d4](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd8d4)
- Smadja, G., Cerna, C., & Ealet, A. 2009, *NIMPA*, 610, 615, doi: [10.1016/j.nima.2009.08.070](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.08.070)
- Smith, R., Bebek, C., Bonati, M., et al. 2006, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 6276, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. D. A. Dorn & A. D. Holland, 62760R, doi: [10.1117/12.672616](https://doi.org/10.1117/12.672616)
- Smith, R. M., Zavodny, M., Rahmer, G., & Bonati, M. 2008, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 7021, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III*, ed. D. A. Dorn & A. D. Holland, 70210J, doi: [10.1117/12.789372](https://doi.org/10.1117/12.789372)
- Sullivan, P. W., & Simcoe, R. A. 2012, *PASP*, 124, 1336, doi: [10.1086/668849](https://doi.org/10.1086/668849)
- Sze, S., & Ng, K. 2006, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley). <https://books.google.co.jp/books?id=o4unkmHBHb8C>
- Takahashi, H., Konishi, M., Motohara, K., et al. 2014, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 9147, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, ed. S. K. Ramsay, I. S. McLean, & H. Takami, 91476N, doi: [10.1117/12.2055409](https://doi.org/10.1117/12.2055409)
- Terao, Y. 2017, Master's thesis, University of Tokyo
- Todo, S. 2015, Master's thesis, University of Tokyo
- Tulloch, S. 2018, arXiv, arXiv:1807.05217. <https://arxiv.org/abs/1807.05217>
- Tulloch, S., George, E., & ESO Detector Systems Group. 2019, *JATIS*, 5, 036004, doi: [10.1117/1.JATIS.5.3.036004](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.5.3.036004)
- Yoshii, Y., Aoki, T., Doi, M., et al. 2010, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 7733, *Ground-based and Airborne Telescopes III*, ed. L. M. Stepp, R. Gilmozzi, & H. J. Hall, 773308, doi: [10.1117/12.856680](https://doi.org/10.1117/12.856680)
- Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., et al. 2014, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 9145, *Ground-based and Airborne Telescopes V*, ed. L. M. Stepp, R. Gilmozzi, & H. J. Hall, 914507, doi: [10.1117/12.2054371](https://doi.org/10.1117/12.2054371)
- Yoshii, Y., Doi, M., Miyata, T., et al. 2020, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 11445, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 1144514, doi: [10.1117/12.2560238](https://doi.org/10.1117/12.2560238)
- Yu, J. 2010, Master's thesis, San Jose State University

付録 A 第2章の補足

A.1 容量の電圧依存性

$x = 0$ にある階段接合を考える。 $x < 0$ のときのイオン化したアクセプターの濃度を N_A 、 $x > 0$ のときのイオン化したドナーの濃度を N_D とし、空乏領域の p 型領域への深さを l_p 、n 型領域への深さを l_n とする。1次元のポアソン方程式を適用すると、

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \begin{cases} \frac{qN_A}{\epsilon}, & -l_p < x < 0 \\ -\frac{qN_D}{\epsilon}, & 0 < x < l_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

ここで、 $x \leq -l_p$ かつ $x \geq l_n$ で $dV/dx = 0$ という境界条件を課し、 $V(l_n) - V(-l_p) = V_0 + V_b$ とする。ここで、ここで、 V_0 は接触電位、 V_b は印加電位であり、逆バイアスを正としている。接合部での電位を基準とすると、(A.1)の解は、

$$V(x) = \begin{cases} \frac{qN_A}{2\epsilon}(x^2 + 2l_px), & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{2\epsilon}(x^2 - 2l_nx), & (0 < x < l_n) \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

となる。

空乏層での電位

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \begin{cases} \frac{qN_A}{\epsilon}, & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{\epsilon}, & (0 < x < l_n) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を積分すると、

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} \frac{qN_A}{\epsilon}x + C_1, & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{\epsilon}x + C_2, & (0 < x < l_n) \\ C_3, & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を得る。 $x \leq -l_p$ と $x \geq l_n$ で $dV/dx = 0$ であるので、

$$\begin{cases} 0 = \frac{qN_A}{\epsilon}(-l_p) + C_1 \\ 0 = -\frac{qN_D}{\epsilon}l_n + C_2 \\ 0 = C_3 \end{cases}$$

となる。よって、

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} \frac{qN_A}{\epsilon}(x + l_p), & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{\epsilon}(x - l_n), & (0 < x < l_n) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を得る。さらに積分をすると、

$$V = \begin{cases} \frac{qN_A}{2\epsilon}(x^2 + 2l_px) + D_1, & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{2\epsilon}(x^2 - 2l_nx) + D_2, & (0 < x < l_n) \\ D_3, & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

となる。 $V(0) = 0$ とすると、

$$V = \begin{cases} \frac{qN_A}{2\epsilon}(x^2 + 2l_px), & (-l_p < x < 0) \\ -\frac{qN_D}{2\epsilon}(x^2 - 2l_nx), & (0 < x < l_n) \end{cases}$$

を得る。

ダイオード材料の中性領域の電場はゼロなので、接合部の両側の空間電荷は等しくて反対でなければならない。

$$N_A l_p = N_D l_n \tag{A.3}$$

これは電場が接合部で連続である条件にもなっている。(A.2) (およびその直前の考察) から $V_0 + V_b$ を表し、(A.3) を用いると、p 型および n 型材料への空乏領域の長さを次のように解くことができる。

$$\begin{cases} l_p = \left[\frac{2\epsilon N_D (V_0 + V_b)}{q N_A (N_A + N_D)} \right]^{1/2} \\ l_n = \left[\frac{2\epsilon N_A (V_0 + V_b)}{q N_D (N_A + N_D)} \right]^{1/2} \end{cases} \tag{A.4}$$

空乏層の厚さ

(A.2) の直前の議論より、

$$\begin{aligned}
 V_0 + V_b &= V(l_n) - V(-l_p) \\
 &= \frac{qN_D l_n^2}{2\epsilon} + \frac{qN_A l_p^2}{2\epsilon} \\
 &= \frac{qN_D l_n^2}{2\epsilon} + \frac{qN_D^2 l_n^2}{2\epsilon N_A} \quad (\because \text{(A.3)}) \\
 &= \frac{qN_D l_n^2}{2\epsilon} \left[1 + \frac{N_D}{N_A} \right] \\
 &= \frac{qN_D l_n^2}{2\epsilon} \frac{N_A + N_D}{N_A}
 \end{aligned}$$

よって、

$$l_n = \left[\frac{2\epsilon N_A (V_0 + V_b)}{qN_D (N_A + N_D)} \right]^{1/2}$$

である。これに (A.3) を用いると、

$$l_p = \left[\frac{2\epsilon N_D (V_0 + V_b)}{qN_A (N_A + N_D)} \right]^{1/2}$$

を得る。

よって空乏層の厚さは、

$$w = l_p + l_n = \frac{\sqrt{2\epsilon(V_0 + V_b)}(N_D + N_A)}{\sqrt{qN_A N_D (N_A + N_D)}} = \left[\frac{2\epsilon(N_A + N_D)(V_0 + V_b)}{qN_A N_D} \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

であり、接合部の静電容量は、

$$\begin{aligned}
 C_J &= \kappa_0 \epsilon_0 \frac{A}{w} = \epsilon \frac{A}{w} \\
 &= \epsilon A \left[\frac{qN_A N_D}{2\epsilon(N_A + N_D)(V_0 + V_b)} \right]^{1/2} \\
 &= A \underbrace{\left[\frac{q\epsilon}{2V_0 \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)} \right]^{1/2}}_{=C'} \left(1 + \frac{V_0}{V_b} \right)^{-1/2} \\
 &= C' \left(1 + \frac{V_b}{V_0} \right)^{-1/2} \quad (\text{A.6})
 \end{aligned}$$

となる。ここで、 C' は大きな逆バイアスをかけた時の静電容量であり、 ϵ_0 は自由空間の誘電率、 A は接合部の面積である。

付録B 第3章の補足

B.1 検出器冷却システムの概要

検出器冷却システムは大きく分けて温度コントロールシステム、真空システム、DAQシステムに分けることができる。検出器冷却システムの概念図を図 B.1 に示す。温度コントロールシステムでは検出器の温度コントロールとクライオスタット内部の温度のモニタリングを、真空システムでは冷却の際に必須の真空引きと真空度のモニタリングを、DAQシステムでは得られた温度と真空度のデータを収集と可視化を行う。

以下では各コンポーネントについて詳しく見ていく。

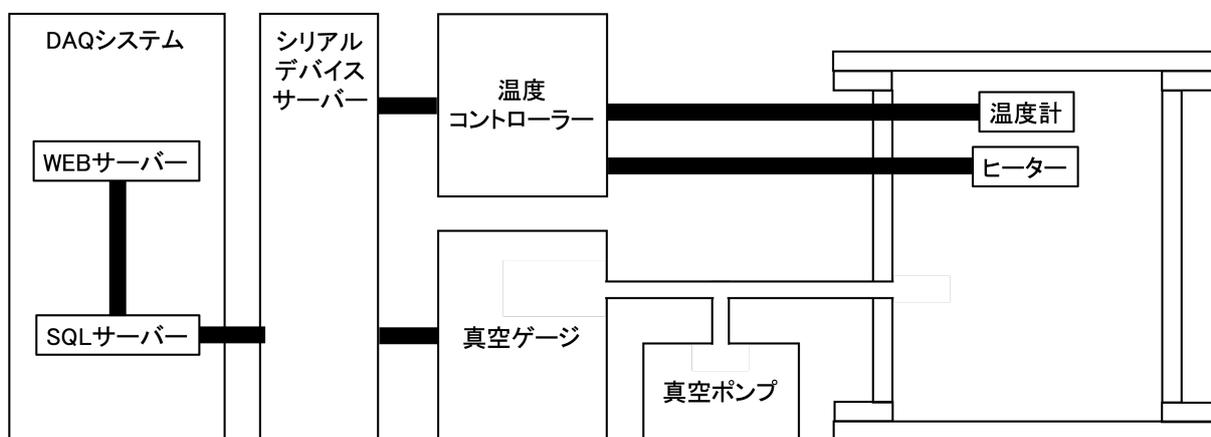


図 B.1: 検出器冷却システムの概念図

B.1.1 温度コントロールシステム

- クライオスタット

クライオスタットは Infrared Laboratories(IR Labs) 製のものを採用している。クライオスタットの外観と内部の写真を図 B.2 に示す。



図 B.2: TARdYS のデュワーの外観 (左) と内部 (右)。

このクライオスタットは液体窒素を用いて冷却を行い、2重の Radiation shield により輻射による熱伝導を熱伝導を低減している。デュワーのウィンドウは $\phi 50[mm]$ で厚さ $3[mm]$ の AR コートが施された石英ガラス製のものが用いられている。cold work surface(cold plate とも呼ぶ)の中央には、光学部品を固定用のネジ穴が $0.5[inch]$ 間隔、 6×25 で並んでいるほか、輸送用の固定具をマウントするためのネジ穴や、残留ガスを除去し真空度を維持向上させるためのゲッターを固定するためのネジ穴もついている。これらのネジ穴は全て M3 のネジ穴であり、ゲッター用のネジ穴には活性炭ゲッターがマウントされている。また、ハーメチックコネクタは 18 ピンと 27 ピンのものが 1 つずつついており、18 ピンの方にはシリコンダイオード製の温度計が 3 つはんだ付けされている。このクライオスタットの仕様を表 B.1 示す。

寸法	45[cm] × 45[cm] × 37[cm]	
ウィンドウ	直径	$\phi 50[mm]$
	材質	石英ガラス
温度計	DT-670B-SD×3	
ゲッター	活性炭ゲッター ×2	
ハーメチック	MS3116F14-18S×1, MS3116F16-26S×1	

表 B.1: クライオスタットの仕様。

● 温度コントローラー

Lake shore Model 325 Cryogenic Temperature Controller を用いている。この温度コントローラーは 2つの入力チャンネルを持ち、シリコンダイオード、抵抗センサ、熱電対によって温度を計測することができる。また、2つの独立した PID 制御系を持ち、最大 25[W] と 2[W] のヒーター出力を持つ。25[W] 出力のチャンネルではヒーターの抵抗を 25[Ω] と 50[Ω] から選ぶことができる。PID 制御の目標温度は最終目標温度へ向かってゆっくり変化させることができ、その勾配は $0[K/min]$ から $100[K/min]$ まで $0.1[K/min]$ 刻みで設定することができる。データ転送は GPIB によるパラレル通信と、RS-232C によるシリアル通信をサポートしている。

B.1.2 真空システム

真空システムは全て Pfeiffer Vacuum 社製の製品を用いており、現在は、真空ポンプは HiCube 80 Eco、真空ゲージは PKR 360、コントロールユニットは TPG 261 を使用している。ただし、これらは SWIMS チームや国立天文台先端技術センターからのお借りしているものであり、今後交換される予定のため、詳しい説明は割愛する。

B.1.3 シリアルデバイスサーバー

シリアルデバイスサーバーには今回 Moxa Nport 5410 を用いている。このシリアルデバイスサーバーは最大 4port の RS-232 によるシリアル入力に対応し、イーサネットネットワークを介してホストコンピュータに接続できるようにすることができる。

B.1.4 DAQ システム

DAQ システムは SWIMS のために SWIMS チームの小西真広氏によって開発されたソフトウェアを TARdYS 用に改変したものをを用いた。Moxa との通信は Python3 で書かれたソフトウェアが、cron によって 15 秒に一回実行されることによって行われ、Moxa から入力は SQL データベースに格納される。また、SQL データベースのデータは grafana というオープンソースのデータ可視化ツールによって Web ブラウザ上から確認することができる。

B.2 低温、低圧にすることの意義

近赤外カメラシステムでは、赤外検出器を最適な動作温度で動作させ、熱背景放射を抑えるためにシステムを低温に保つ必要があり、そのためには熱流入を抑える必要がある。

熱流入の経路は大きく分けて 3 つ存在する。

- クライオスタット外壁からの放射
クライオスタットの外壁は室温であり、クライオスタット内部は液体窒素温度程度になっているため、外壁からの放射の方が内部からの放射よりも強くなり、放射によってクライオスタット内部に熱が流入する。
- 構造部からの熱伝導
クライオスタット内部は液体窒素温度近くまで冷却されるのに対し、クライオスタット外壁は室温のままであるため、熱伝導による熱の流入は避けられない。
- 気体による熱伝導
クライオスタット内に気体分子が存在すると、構造部からの熱伝導と同じようにクライオスタット内部に熱が流入する。

このうち上二つはクライオスタットの構造によって決定されてしまう。今回用いるクライオスタットでは、放射による熱流入を抑えるために放射シールドを二重にしているだけでなく、構造部からの熱伝導を抑えるために、クライオスタットの内外を接続する部品は熱伝導度の低いものが用いられ、部品の個数自体も抑えられている。

気体による熱伝導に関しては、クライオスタットの内部を真空状態にすることで低減することができる。また、真空にすることで、氷やドライアイスがクライオスタット内部に付着して、内部の部品に悪影響を与えることを防ぐことができる。

B.3 真空到達度

真空到達度は、シール不良によるリーク、微小な穴からのリーク、アウトガスの 3 つによって決定される。

- シール不良によるリーク
フランジやハーメチック、その他内部アクセスのための開口からガスが流入することがある。今回用いるクライオスタットではゴム製の O リング、低温になる箇所ではインジウムシールを用いてガス流入を最小限に抑えている。
- 微小な穴からのリーク
溶接やロウ付けの欠陥などによる微小な穴からのリークによっても外部から内部へガスが流入する可能性がある。その際は溶接やロウ付けをやり直して修理する必要がある。
- アウトガス
クライオスタットを排気すると、内壁や部品の内部もしくは表面からガスが放出される。よって、クライオスタットの内部で使用する部品は必ずアウトガスが少ないものを選定する必要がある。また、表面に分子が付着している場合はクライオスタットの真空引きを行いながらクライオスタットを高温にするベーキングを行うことでアウトガスを減らすことができる。

リークとアウトガスによるガス流入と真空ポンプによるガス排出が釣り合った時に最終的な真空到達度となる。

B.4 開封当初の状況

クライオスタットの開封後、常温で真空を引いてみたところ最高到達真空度は $\sim 2 \times 10^{-5} [Torr]$ であった。次に冷却試験を行ったところ、図 B.3 のように液体窒素で冷却すると真空度が悪化し、液体窒素が切れると真空度が改善するという現象が見られた。

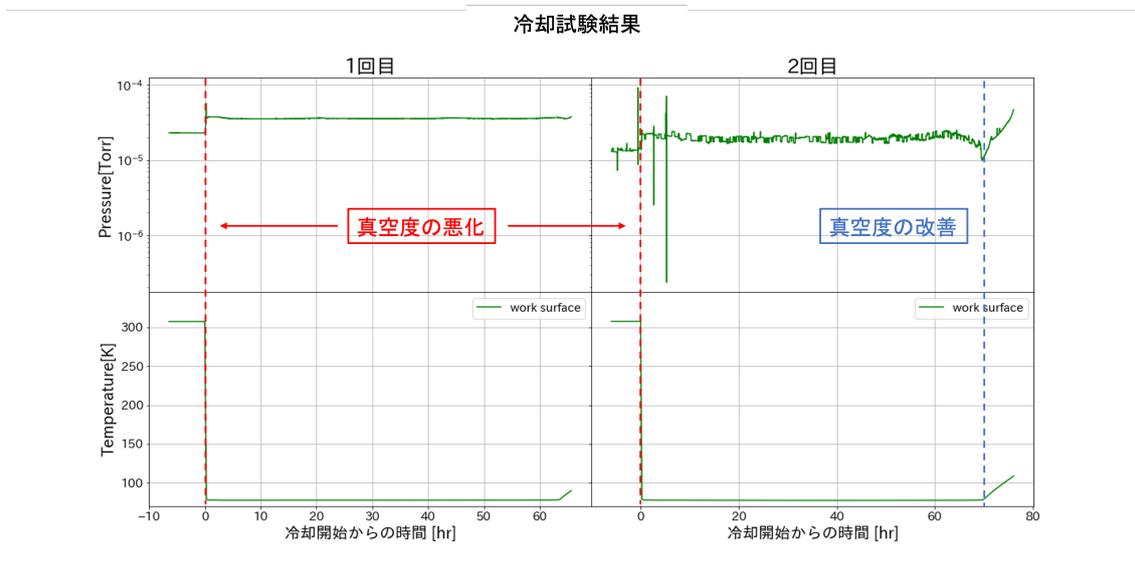


図 B.3: 2 回分の冷却試験中の圧力と work surface の温度。液体窒素を入れると真空度が悪化し、液体窒素が切れると真空度が改善する様子が見られた。

通常、クライオスタットを冷却すると気体分子が壁面に吸着することで圧力が下がるはずであるため、リークが疑われた。特に液体窒素タンクに液体窒素が存在するときに真空度が悪化したことから、タンクからのリークであるという可能性が高いと考え、リーク試験を行った。

B.5 リーク試験

B.5.1 エタノールを用いたリーク試験

リークは液体窒素タンクからである可能性が高かったが、その他の可能性を除外するために、エタノールを用いてシール不全がないか確認を行った。

エタノールを用いたリーク試験では、エタノールをリークしていると思われる箇所に吹きかける。すると、リーク箇所を液体が塞いだ瞬間は圧力が下がるが、すぐにクライオスタットの内部にエタノールが入り込み、瞬間的に蒸発し真空度計で計測される圧力が上昇する。

この試験では、エタノールをハーメチックコネクタ、フランジ、底板等に吹きかけたが、真空度の変化は見られなかった。

B.5.2 小型ダイアフラムポンプを用いたリーク試験

液体窒素タンクからのリークであるならば、タンクの真空引きを行えばクライオスタット内の真空度も改善するはずである。そこで、小型のダイアフラムポンプを用いて図 B.4 液体窒素タンクの真空引きを行った。すると、図 B.5 のように、真空度の大幅な改善が見られた。この結果より、リークが液体窒素タンクからであるという可能性が高まった。

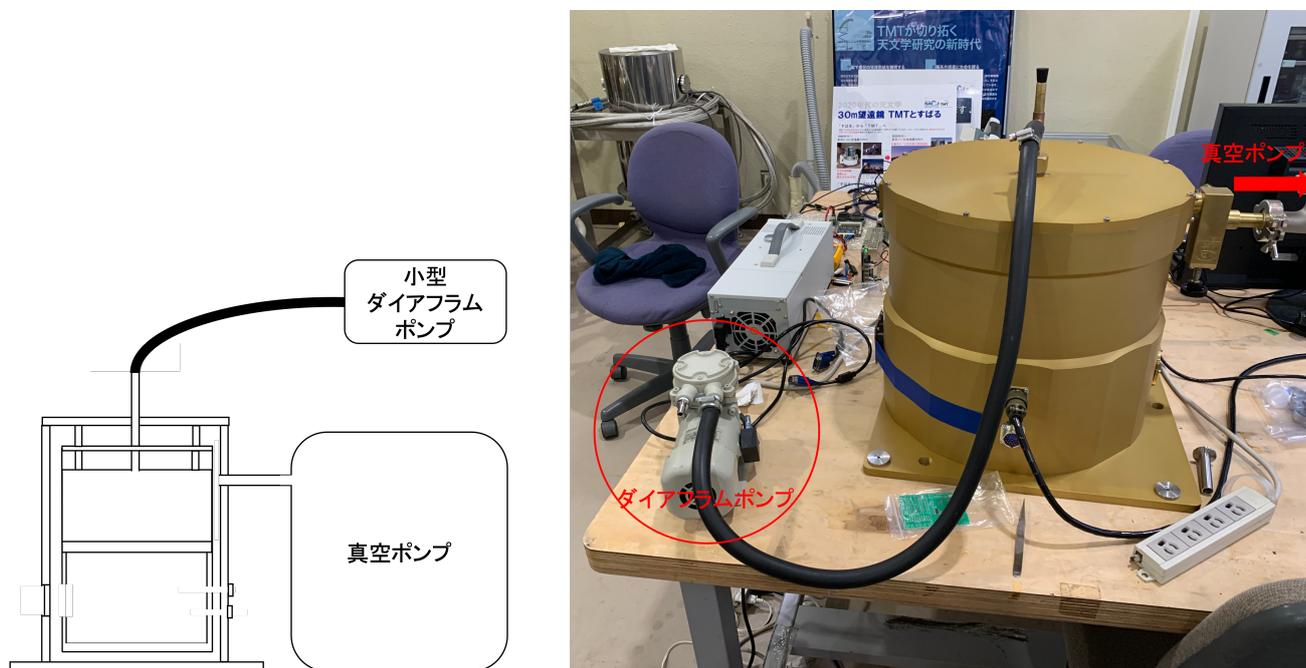


図 B.4: 実験の概念図 (左) と実際のセットアップ (右)

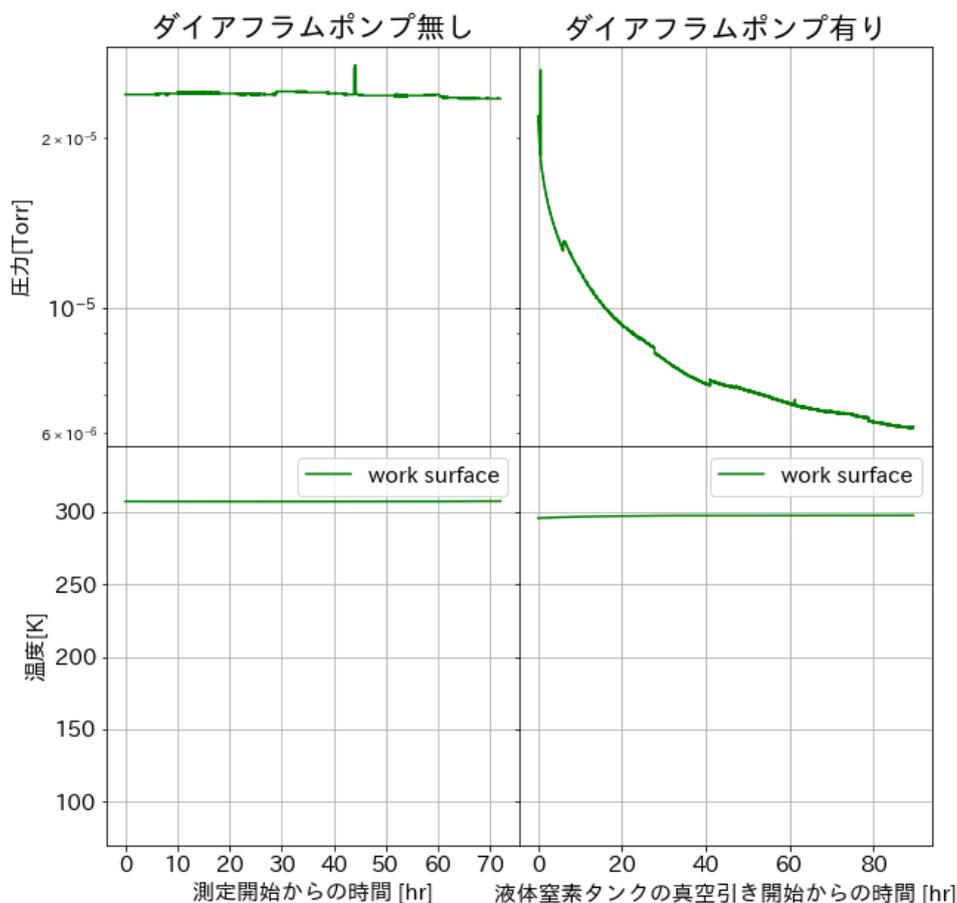


図 B.5: 液体窒素タンクを真空引きした時とそうでない時の比較。液体窒素タンクを真空引きした際に、真空度の大幅に改善が見られた。

B.5.3 ヘリウムリークテスト

リーク箇所が液体窒素タンクであることを確定させるためにヘリウムリークテストを行った。

ヘリウムリークテストでは、まず、リークを検査する対象にヘリウムリークディテクタを接続し、対象物内部をディテクタに搭載された真空ポンプで真空引きを行う。その状態で検査対象の外部からヘリウムを微量吹き付ける。すると、吹き付けた箇所近辺に漏れの原因となる欠陥がある場合はその欠陥を通じて検査対象内部に漏れてきたヘリウムが真空ポンプによって排気され、排気ラインに設置されたヘリウム検出器（質量分析管）で検出される事で、リークの存在を感知できる。ここで、ヘリウムを用いる理由は

- 分子が小さく微小な穴からでも漏れ出しやすい
- 大気中にごく微量しか存在しないため、誤反応する可能性が低い

等の理由がある。

今回の試験では、図 B.6 のように、液体窒素タンクの内部に少量のガスを吹きつけ、タンクから漏れ出したヘリウムガスをヘリウムリークディテクタで検知をしたところ、リーク量は $1.63 \times 10^{-6} [mbar \cdot L/s]$ まで上

昇した。ここで、ヘリウムをタンク内に吹き付ける前はリークディテクタは $1 \times 10^{-12} [\text{Torr} \cdot \text{L}/\text{s}]$ という値を示していたため、液体窒素タンクからのリークが起きていることが分かった。

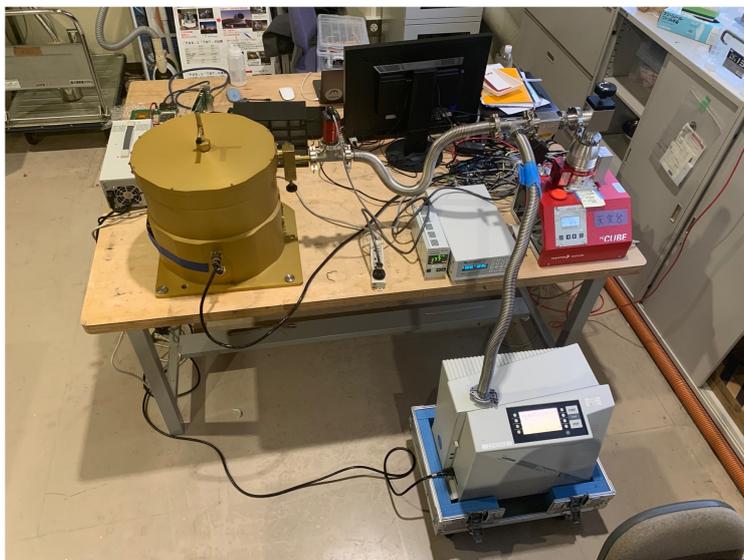
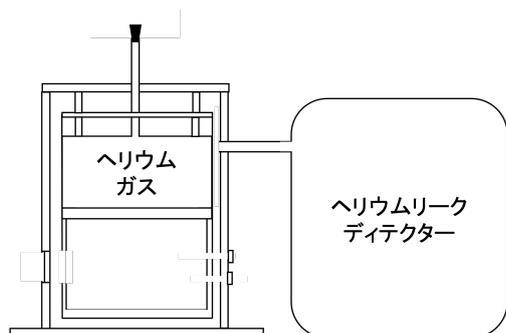


図 B.6: ヘリウムリークテストのセットアップの概念図 (左) と実際のセットアップ (右)。リークテストは、ヘリウムガスを液体窒素タンクに留めるために液体窒素の注ぎ口はゴム栓で塞ぎ、普段用いている真空ポンプ側のバルブは閉じた状態で行った。

B.6 クライオスタットの修理

B.6.1 ネジの増し締め

まず、我々はインジウムシールの不良による液体窒素注入のためのチューブとタンクの間からのリークを疑い、ネジの増し締めを行った (図 B.7 参照)。ネジは少し緩んでおり、増し締めにより半回転以上回すことができた。

その後、再度ヘリウムリークテストを行ったところ、リーク量は $1.63 \times 10^{-6} [\text{mbar} \cdot \text{L}/\text{s}]$ から $1.80 \times 10^{-10} [\text{mbar} \cdot \text{L}/\text{s}]$ まで改善した。しかし、その後にデュワーを $360 - 365 \text{K}$ でベーキングを行ったところ、常温での真空度が $\sim 2 \times 10^{-4} [\text{Torr}]$ (以前は $\sim 2 \times 10^{-5} [\text{Torr}]$) まで悪化してしまったため、IR Labs へ返送し、修理を行うこととした。

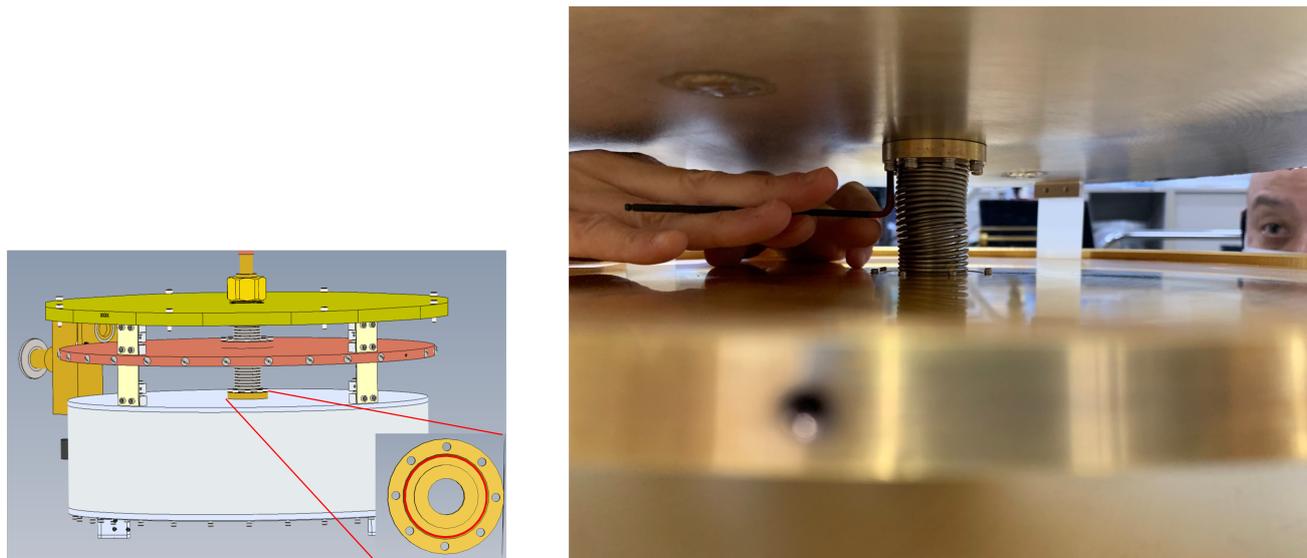


図 B.7: 液体窒素ポートと液体窒素タンクの接続部の模式図 (左) とネジの増し締めの様子 (右)。

B.7 IR Labs における修理

IR Labs におけるリーク試験の結果、work surface の開口部の溶接箇所 (図 B.8 参照) からリークしていることが判明した。今回用いているデュワーは液体窒素タンクの底面を work surface とろう付けによって接合させている。接合の際には、これら二つの母材は溶融されたフラックスの塩浴のなかにつけられ、その熱により母材の間のろう材を溶かし、浸透させることで接合をするというディップろう付けの方法が用いられている。この開口部はディップろう付けの際に余分な溶融フラックスを抜くための穴になっている。

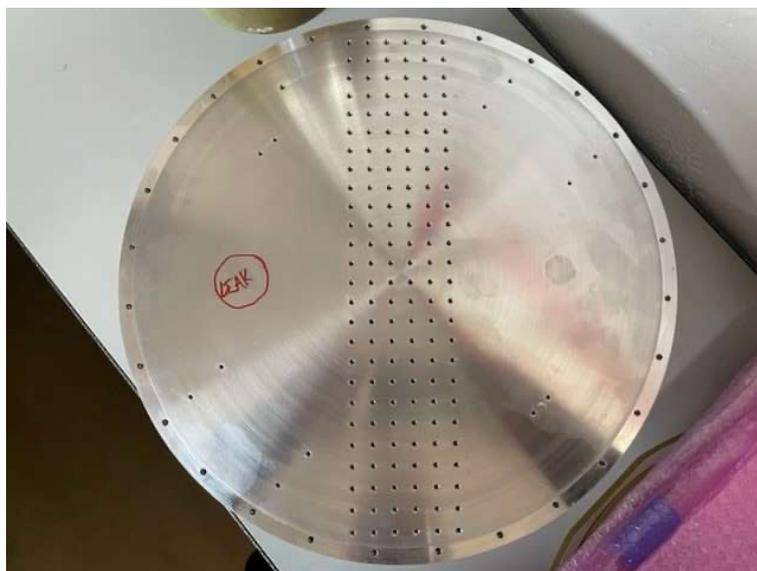


図 B.8: 特定されたリーク箇所。リークはディップろう付けの際にフラックスを抜くための開口部を溶接した場所からであった。

修理はリーク箇所周辺をくり抜き、再溶接することで行われた。修理後のコールドプレートの様子を図 B.9 に示す。修理後の真空度は冷却下で $\sim 1 \times 10^{-6}$ [Torr] まで到達した。

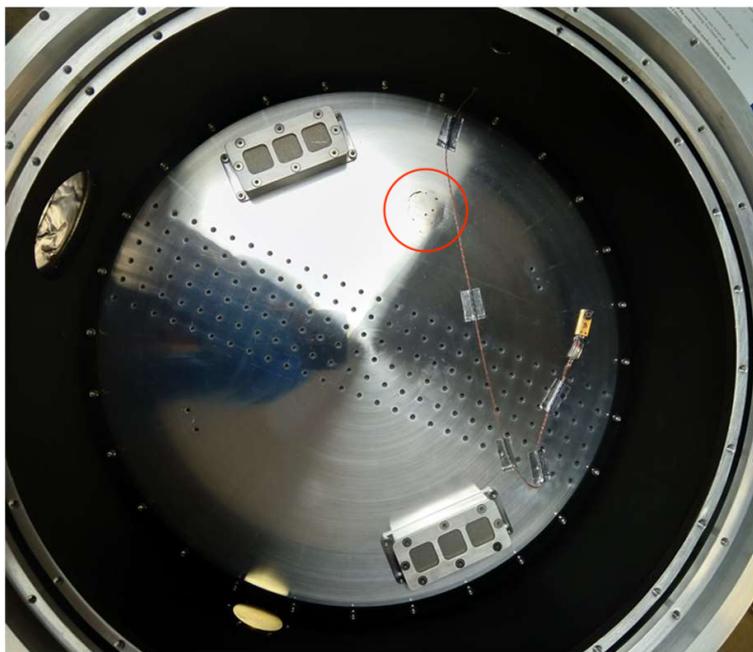


図 B.9: 修理後の cold plate の様子。赤丸で囲まれた部分が再溶接箇所。

付録C 第4章、第6章の補足

C.1 中央値補正

Up-the-Ramp Sampling で取得された複数のデータセットの同じ露出時間の画像を用いて画像演算を行うとき、その中央値を合わせることが必要になる。今回はショットノイズが支配的なノイズ源とし、画像を補正する。その流れを以下に示す。

1. 画像を正方形 (たとえば $64 \times 64[\text{pix}^2]$) の領域に分割し、各領域の中央値を求め、各領域がその中央値を持つような新たな画像 (中央値モザイク画像と呼ぶ) を生成する。
2. 下の画像から中央値モザイク画像を減算する。こうすることで各領域の中央値が0となる新たな画像 (中央値減算画像と呼ぶ) が生成される。
3. モザイク画像の各領域の値を、複数の画像の該当領域の値の中央値になるように定数倍する。
4. 中央値減算画像の各領域は中央値を合わせる際の係数の平方根倍される (ここでポアソンノイズの仮定を用いた)。
5. 3,4 で生成された画像の足し算を行う

C.2 各パラメータ値での読み出しノイズ

§4.5.1 で読み出しノイズの算出に用いたプロットを以下に示す。ただし、図 C.1 は $n_{\text{osample}} = 1$ 、図 C.2 は $n_{\text{osample}} = 2$ 、図 C.3 は $n_{\text{osample}} = 16$ の時のプロットである。

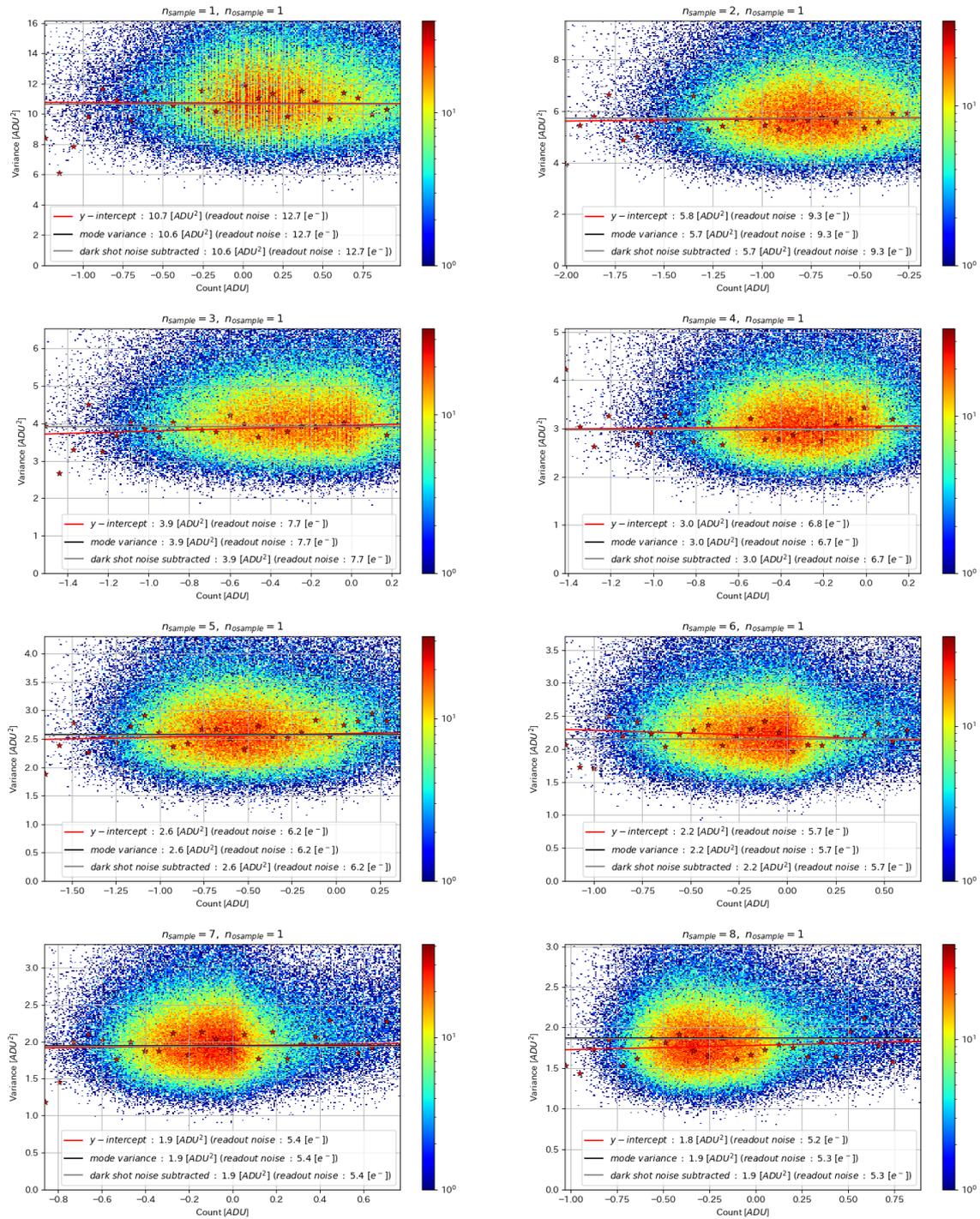


図 C.1: $n_{\text{sample}} = 1$ の時のフォントランスファーカーブ。

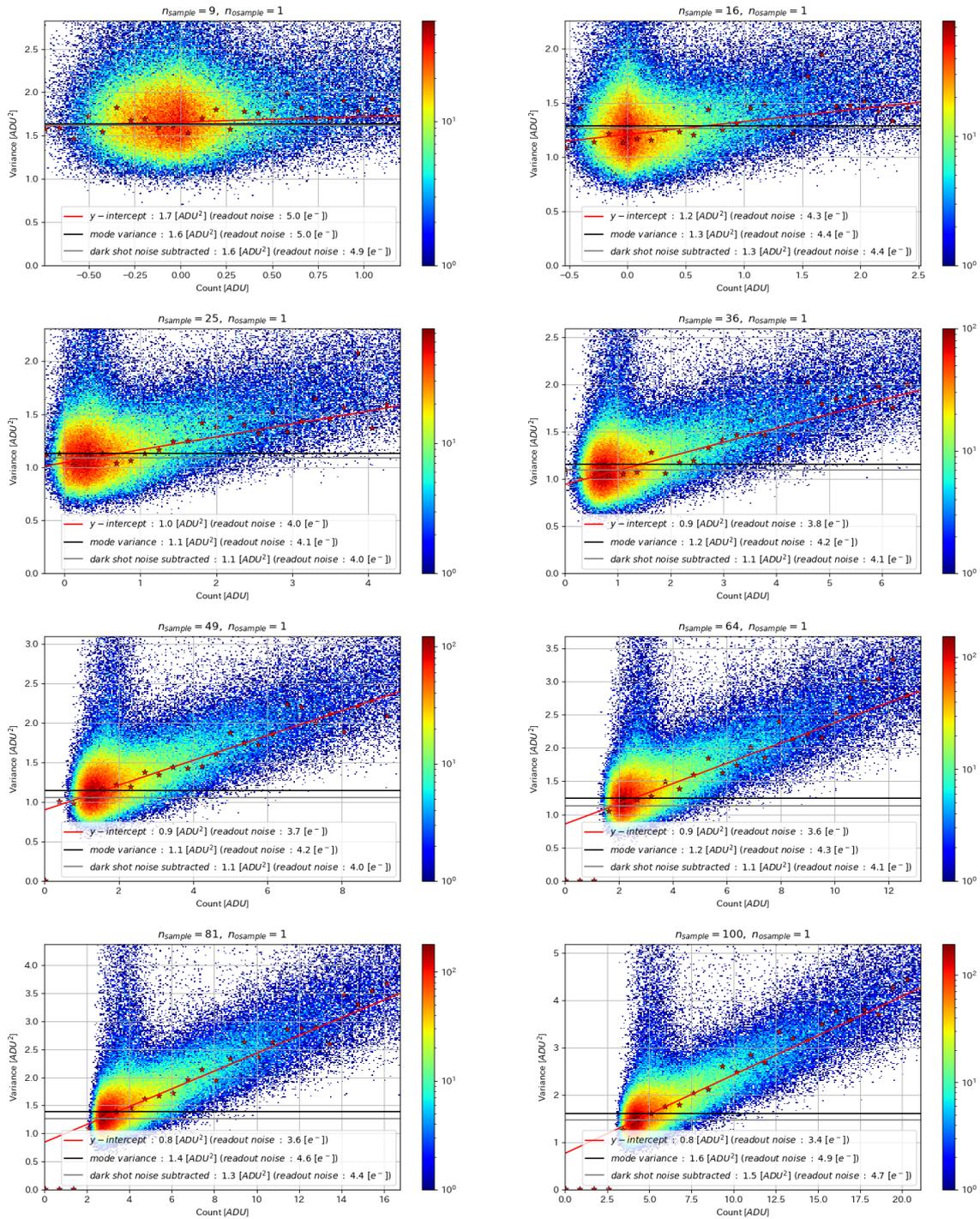


図 C.1: $n_{\text{sample}} = 1$ の時のフォントランスファーカーブ (続き)。

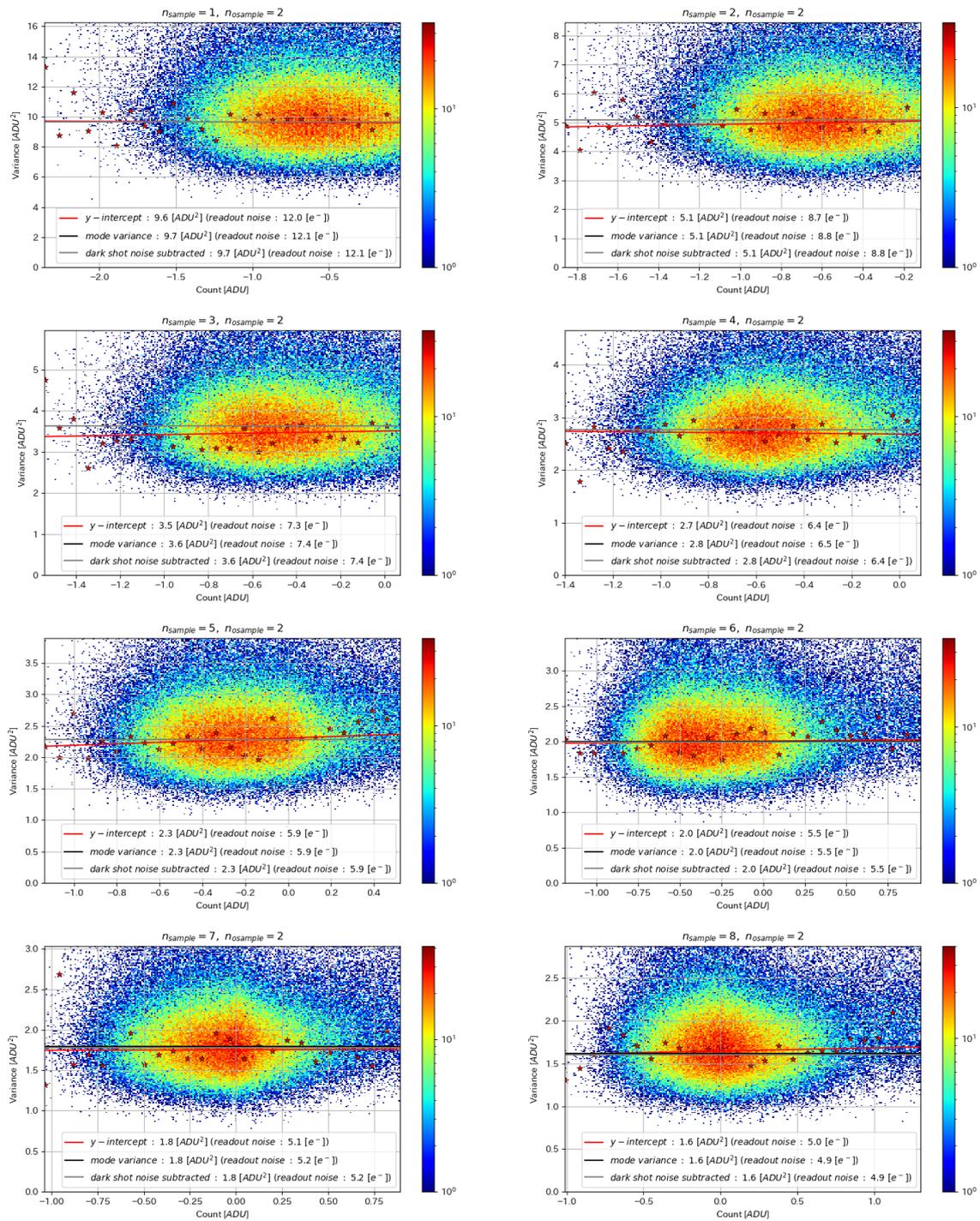


図 C.2: $n_{\text{sample}} = 2$ の時のフォントランスファーカーブ。

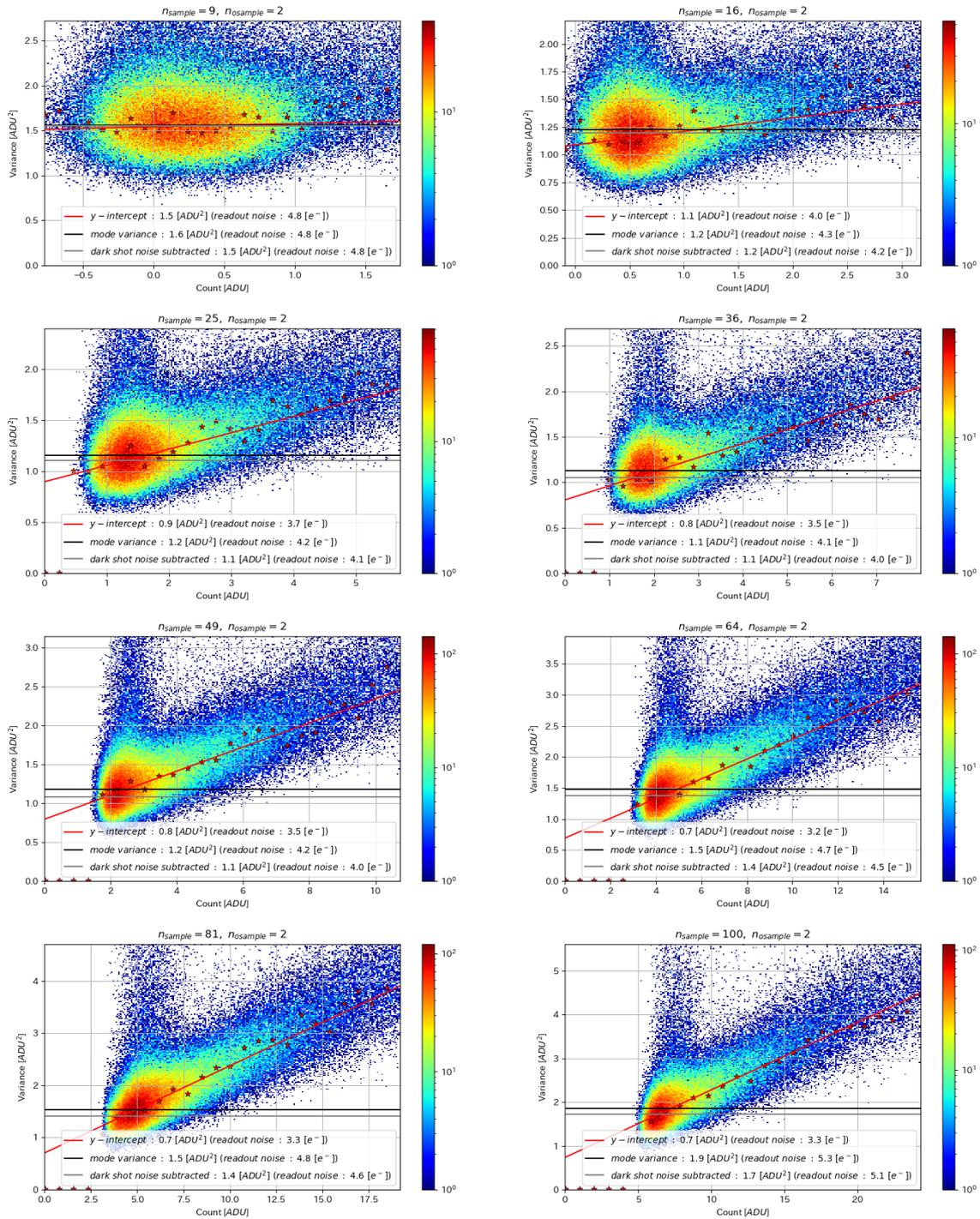


図 C.2: $n_{\text{sample}} = 2$ の時のフォントランスファーカーブ (続き)。

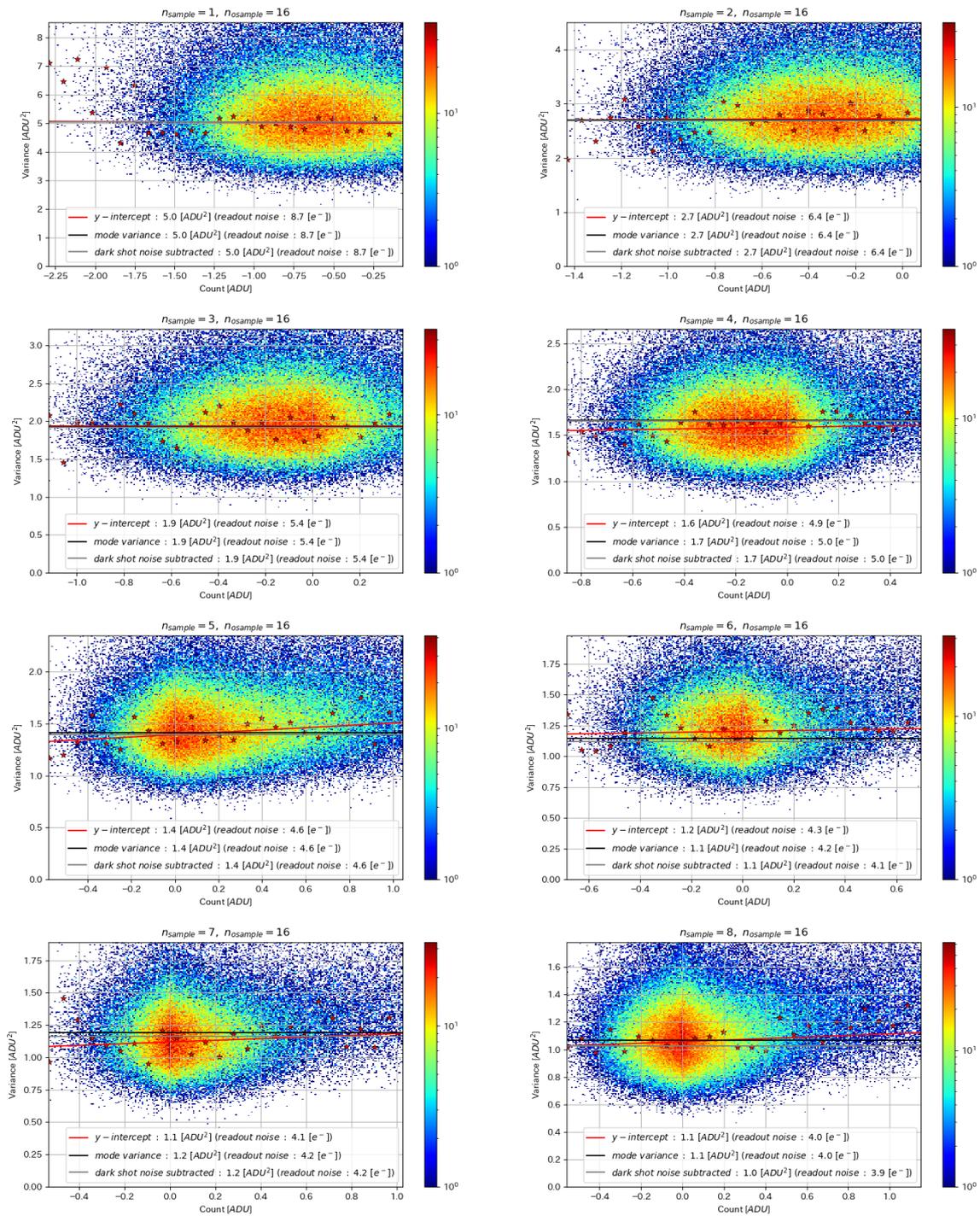


図 C.3: $n_{\text{sample}} = 16$ の時のフォントランスファーカーブ。

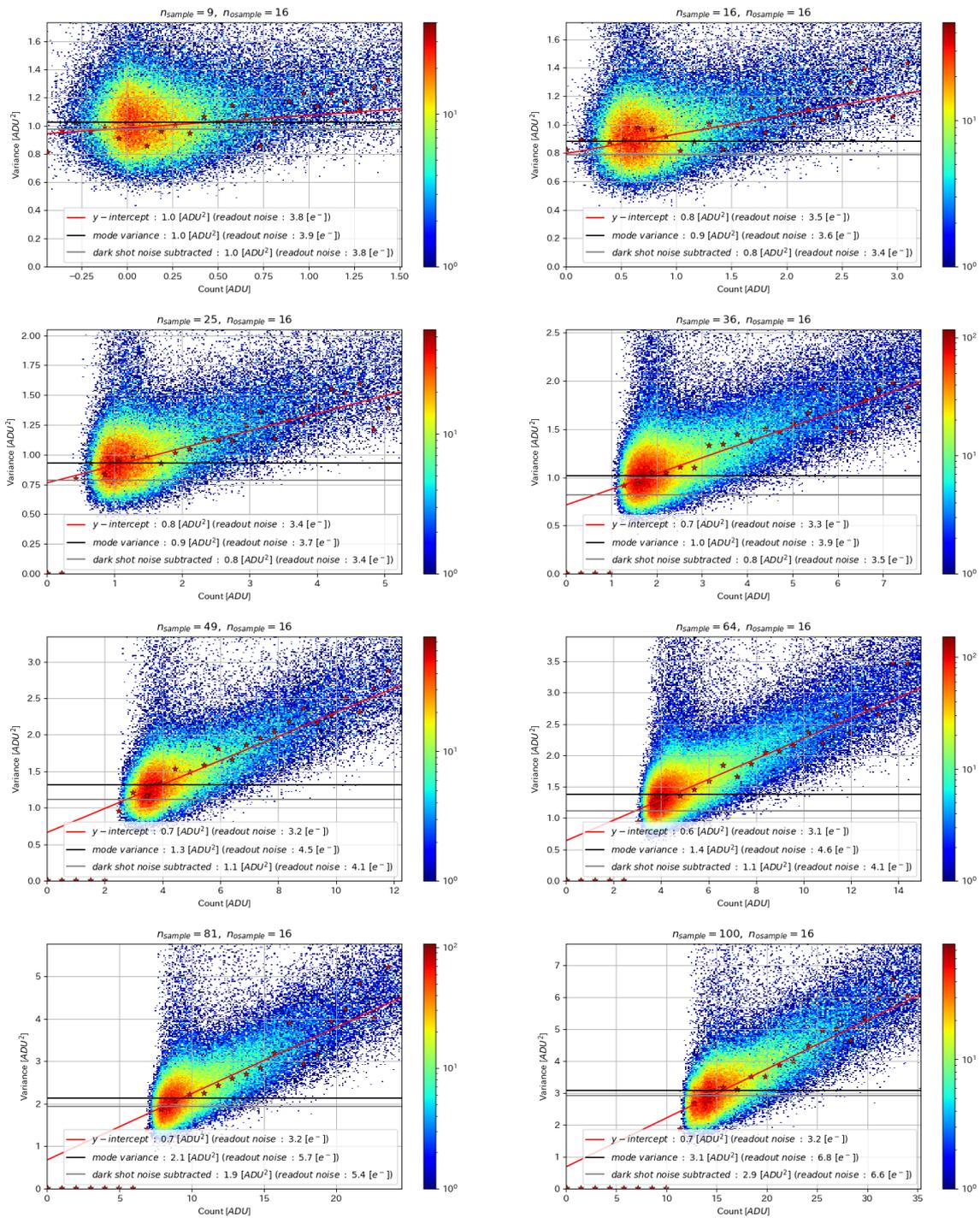


図 C.4: $n_{\text{sample}} = 16$ の時のフォントランスファーカーク (続き)。

C.3 バッドピクセル

現在の TARdYS の検出器のバッドピクセルマップ作成手順を以下に示す。

C.3.1 cold/warm pixel の選定

cold/warm pixel の選定には 64 枚の 46.2[s] 積分の黒体炉フラットをメジアンスタックした画像を用いている。メジアンスタック画像とそのヒストグラムを図 C.5 に示す。

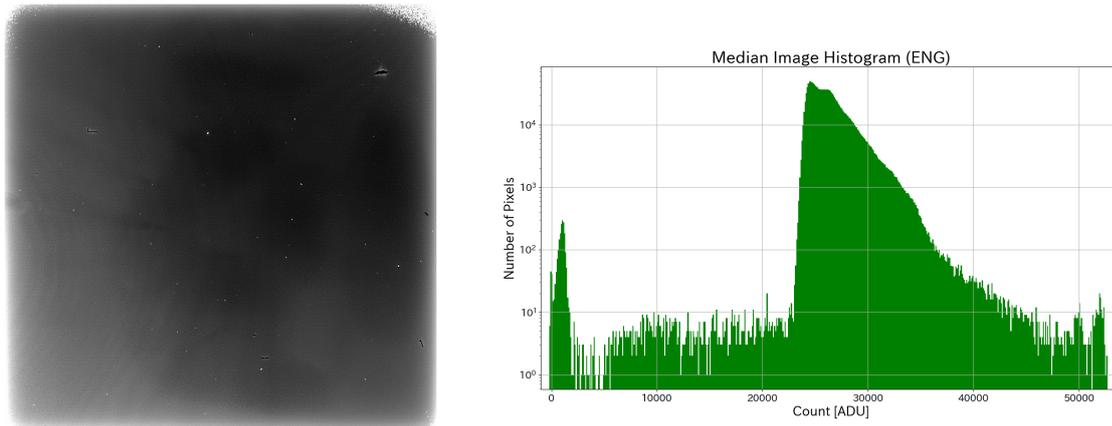


図 C.5: 解析に用いるメジアンスタック画像とそのカウントのヒストグラム。メジアンスタック画像の周辺部は迷光の影響で明るくなってしまっている。

図 C.5(左) から分かるようにフラット画像は迷光の影響を受けて周りが明るくなってしまっている。よって、画像を小さな領域に分割してからクリッピングを行わないとグローバルな光量変動に釣られてうまく warm/cold pixel を選び出すことができない。一方で、あまり小さな領域に分割すると四隅のバッドピクセルクラスターでは領域の標準偏差が大きくなり、warm/cold pixel を選び出すことができなくなる。よって、まず、図 C.6 の青い領域 (クラスター領域と呼ぶ) で大まかに warm/cold pixel を選び出してから、画像全体を $27 \times 27 [pix^2]$ の領域に分割し、再度 warm/cold pixel のスキャンを行う。具体的な手順は以下のようである。

1. クラスター領域のスキャン

画像の

- (a) 右上の一辺 2ch の幅 ($324 [pix]$) の正方形領域
- (b) 左上の一辺 1ch の幅 ($162 [pix]$) の正方形領域
- (c) 左上の一辺 0.5ch の幅 ($81 [pix]$) の正方形領域

をクラスター領域とする。ただし、領域の大きさはバッドピクセルクラスターの大きさに合わせて選ばれた。各クラスター領域で

- 中央値から 3σ 以上大きいものを warm pixel
- 中央値から 3σ 以上小さいものを cold pixel

とする。

2. 画像全体のスキャン

画像の四隅を含む画像全体を $27 \times 27 [pix^2]$ の領域に分割し、各領域で

- 中央値から 5σ 以上大きいものを warm pixel
- 中央値から 5σ 以上小さいものを cold pixel

とする。

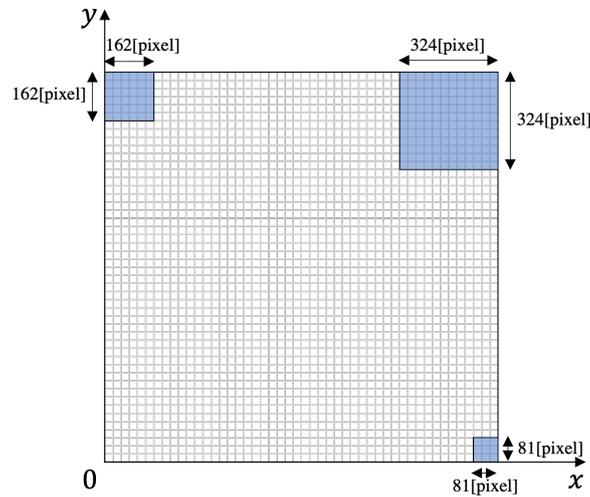


図 C.6: warm/cold pixel の選定の際の画像の分割方法。青色の領域がバッドピクセルが集中しているクラスター領域である。また、方眼は $27 \times 27[\text{pix}^2]$ の領域を示している。

このようにして得られた warm pixel map と cold pixel map を図 C.7 に示す。また、warm/cold pixel をマスクした際のヒストグラムを図 C.8 に示す。目視での確認により、図 C.8 で $< 10000[\text{ADU}]$ のピクセルは画像左上のバッドピクセルクラスターに存在する cold pixel、 $> 41000[\text{ADU}]$ のピクセルは画像左下の warm pixel であることが判明したため、それらについてもバッドピクセルマップに入れることとした。

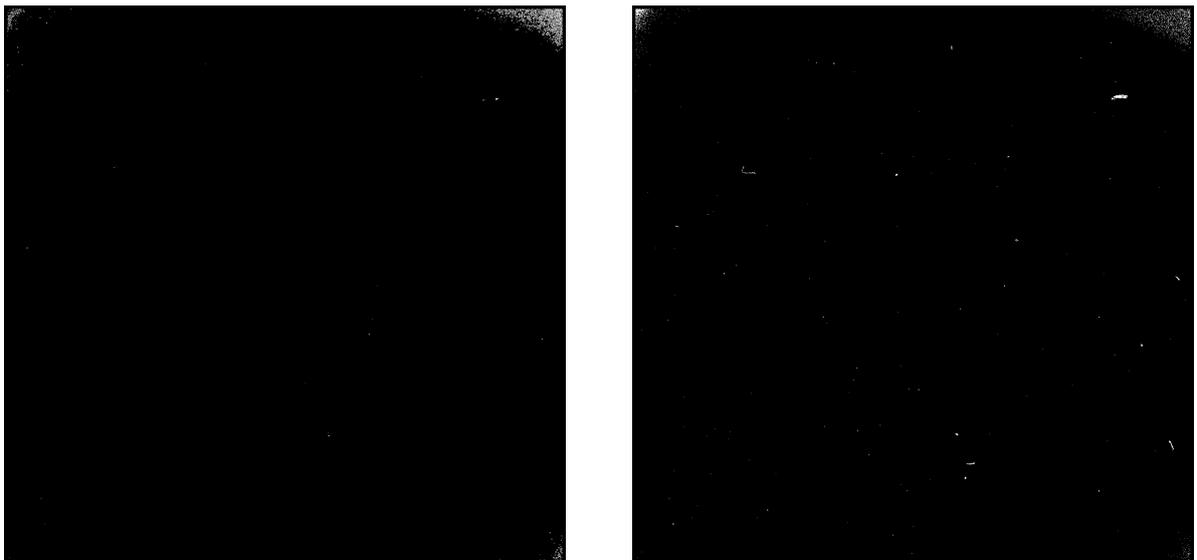


図 C.7: warm pixel map(左) と cold pixel map(右)。warm pixel と cold pixel は白で表されている。

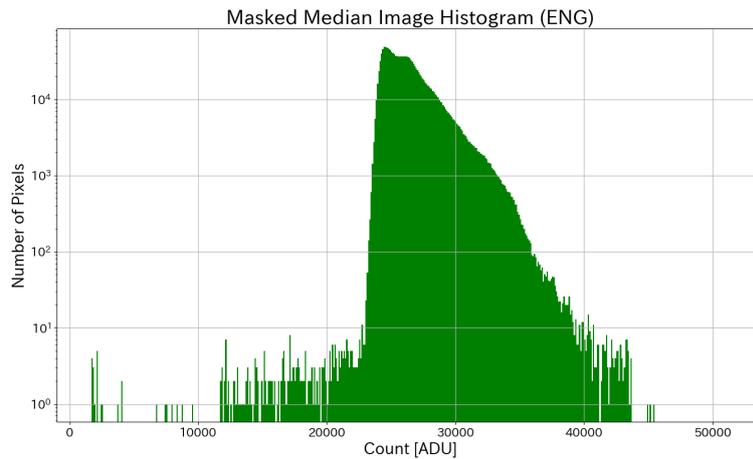


図 C.8: warm/cold pixel をマスクした際の画像のヒストグラム。

その後、検出器のほこりによるアーティファクトを手動で取り除いた。除去前後の warm/cold pixel map を図 C.9 に示す。

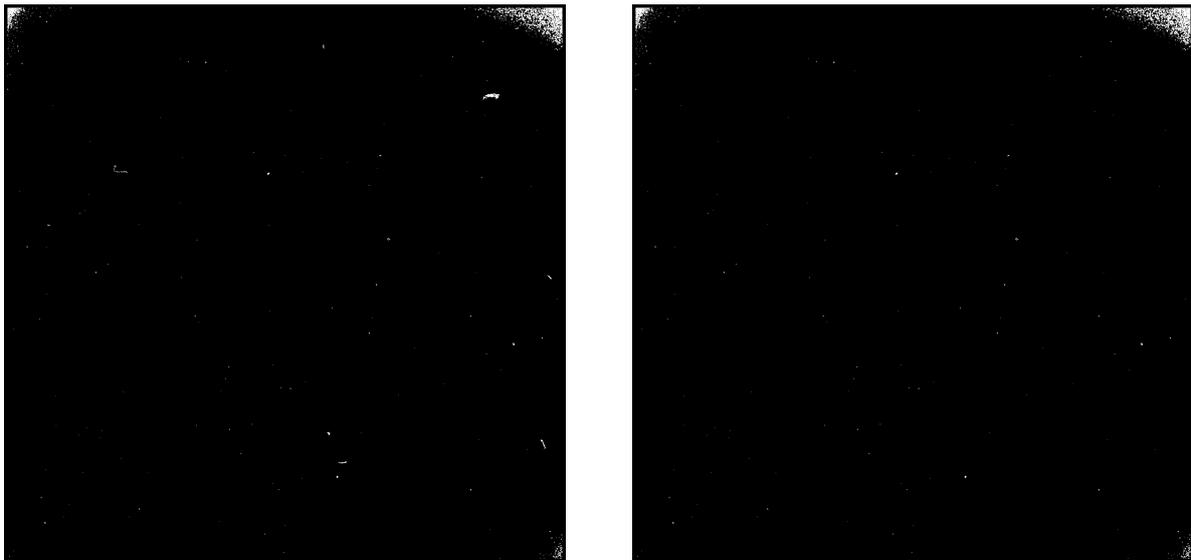


図 C.9: ほこりによるアーティファクトを取り除く前 (左) と後 (右) の warm/cold pixel map。

C.3.2 hot pixel の選定

hot pixel の選定には 5 枚のリセットフレームを最大値でスタックした画像 (図 C.10 参照) を用いた。ただし、どのリセットフレームにも宇宙線イベントはみられなかった。

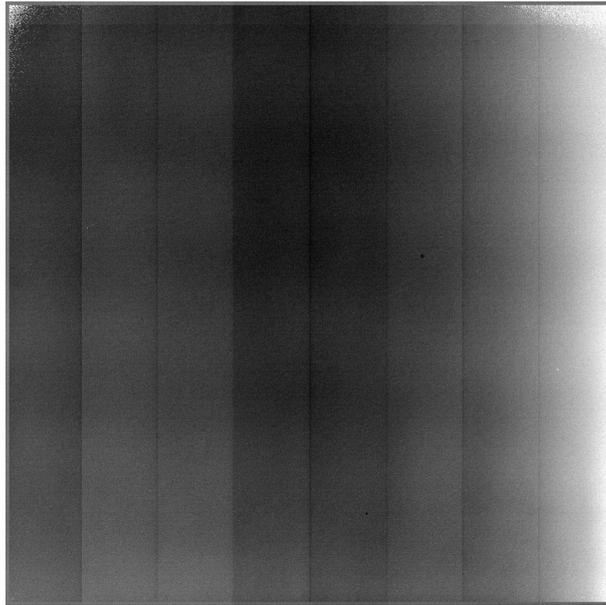


図 C.10: 5 枚のリセットフレームを最大値でスタックした画像。宇宙線イベントは見られない。

図 C.10 から分かる通り、リセットフレームではチャンネル毎のバイアスレベルのばらつきが見られる。よって、リセットフレームを一辺 1ch の幅 ($162[px]$) の正方形領域に分割し、その領域の値を全てその領域の中央値で置き換えた画像 (中央値モザイク画像と呼ぶ) をリセットフレームから引き算した画像 (中央値減算画像と呼ぶ) を生成した。中央値モザイク画像と中央値減算画像を図 C.11 に示す。

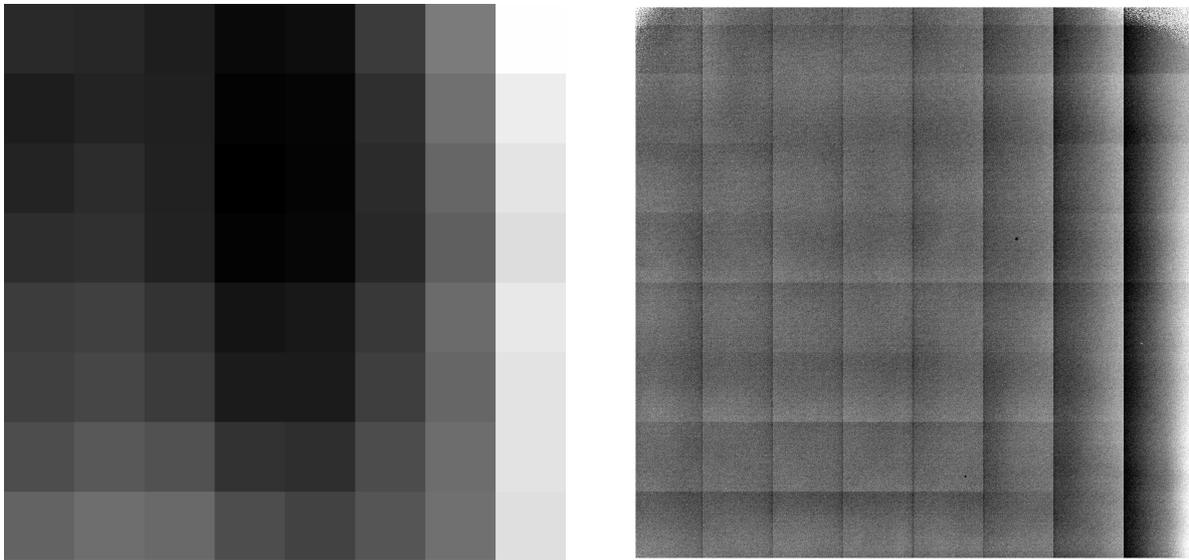


図 C.11: 中央値モザイク画像と中央値減算画像。

hot pixel の基準は中央値減算画像で $> 1800[ADU]$ の値を持つピクセルとする。このようにして得られた hot pixel map を図 C.12 に示す。

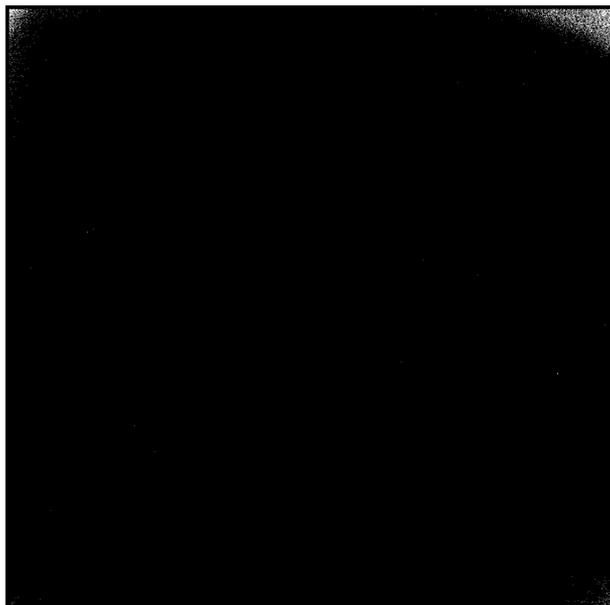


図 C.12: hot pixel map。hot pixel も warm/cold pixel と同様に四隅に集中している。

C.3.3 bad pixel map

warm/cold pixel map と hot pixel map をマージした bad pixel map は図 C.13 のようになった。また、bad pixel の数は 7551[*pix*]、bad pixel rate は $\sim 0.45\%$ であった。

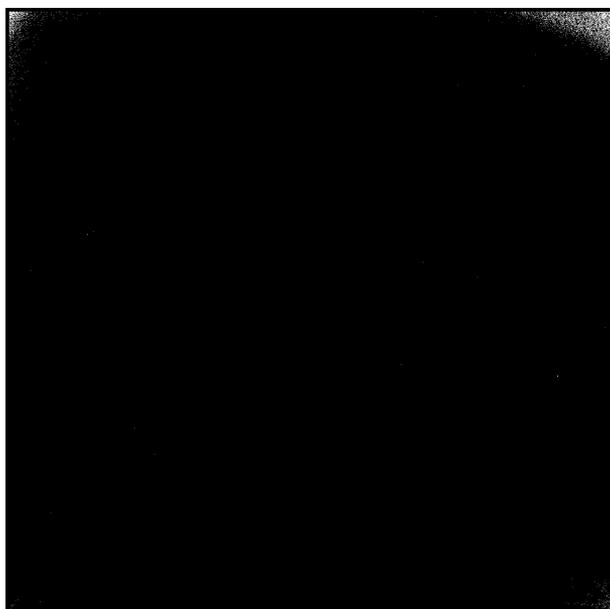


図 C.13: warm/cold pixel map と hot pixel map をマージして作成した bad pixel map。