

東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻
修士論文

すばる望遠鏡 広帯域分光装置 NINJA
赤外線検出器システム開発と性能評価

学籍番号：35-246116

田中健翔

指導教員：本原顕太郎 教授

2026年2月

Abstract

The origin of heavy elements heavier than iron such as gold and platinum, which are synthesized by r-process, has long remained uncertain. Gravitational-wave observatories such as LIGO and Virgo detected gravitational waves from a binary neutron star merger (NSM) event GW170817 for the first time in 2017, followed by the detection of an electromagnetic counterpart called a kilonova. The optical and infrared spectrum of the kilonova revealed that r-process elements are synthesized by the NSM. However, only one kilonova associated with a gravitational-wave event has been detected so far. To obtain comprehensive information on cosmic r-process nucleosynthesis, it is necessary to conduct high-sensitivity near-infrared spectroscopic follow-up observations of a variety of NSM events.

High spatial resolution observations improve the sensitivity of astronomical observations. To achieve this, Laser Tomography Adaptive Optics (LTAO), which can deliver near-diffraction-limited images from the optical to near-infrared wavelength range, is currently being developed at the Subaru Telescope. NINJA (Near-INfrared and optical Joint spectrograph with Adaptive optics) is an LTAO-optimized optical and infrared spectrograph ($0.35\ \mu\text{m} - 2.5\ \mu\text{m}$) with medium spectral resolution ($R \sim 3000$). Its infrared spectrograph ($0.9\ \mu\text{m} - 2.5\ \mu\text{m}$) adopts a narrow slit ($\sim 0.35''$) adjusted to sharp images achieved by LTAO, which reduces sky background noise. This means the contribution of detector readout noise to sensitivity becomes relatively large. The target sensitivity of $J_{\text{AB}} = 22\ \text{mag}$ ($S/N=10$, 2-hour exposure, $R \sim 3000$) requires the detector readout noise to be $4\ e^-$ rms. In this study, we have investigated the optimal readout parameters of the NINJA infrared detector system to meet these requirements. Furthermore, we have evaluated other detector performances including dark current, glow, linearity and persistence to confirm the overall suitability for NINJA.

NINJA detector system consists of a HAWAII-2RG (H2RG) infrared detector, a SIDECAR ASIC and a MACIE interface board controlled by a Linux PC. The H2RG and SIDECAR are cooled down to 80K in the radiation shield, while the MACIE is installed in the cryostat. The original CLI software `cont_macie` can communicate with the MACIE via USB3.0, which enables both image acquisition and control of detector/ASIC registers. Under this setup, we have investigated how detector readout circuit parameters including preamplifier configuration, gain, reference voltages, bias voltages, and low-pass filter cutoff frequency affect the detector performances. We have adopted the optimal parameter setting that satisfies low readout noise of $\sigma_{\text{CDS}} = 14.2\ e^-$ rms while keeping the detector full well ($\sim 120000\ e^-$) within AD converter output range.

With the optimal parameter sets, we have achieved the readout noise of $4\ e^-$ rms with Fowler-20 sampling, which satisfies the requirement of NINJA. The conversion factor is $2.23\ e^-/\text{ADU}$. The median dark current is $0.013\ e^-/\text{s}/\text{pix}$ at 80K. The detector glow has not been detected over 100 reads. The detector non-linearity is within 5% at 55% of full well, and after calibration the residual non-linearity was reduced to 0.1% up to 91% of full well. Persistence was measured to be $\sim 0.4\%$ of the signal recorded in a preceding 1000 s exposure, as observed in a subsequent 1000 s exposure.

These results demonstrate that the developed detector system meets the readout-noise requirement and provides sufficiently low dark current and well-calibratable linearity, confirming that it delivers adequate performance as the NINJA infrared detector.

目次

Abstract	1
1 序論	3
1.1 マルチメッセンジャー天文学の幕開け	3
1.2 広帯域分光装置 NINJA	3
1.3 検出器システム読み出しノイズ低減の重要性	4
2 NINJA 検出器システム	8
2.1 近赤外線検出器の基礎	8
2.2 NINJA 赤外線検出器システム構成	12
2.3 読み出しソフトウェア	16
2.4 検出器読み出しパラメータ	20
2.5 読み出し回路に与えるパラメータ	21
3 H2RG 検出器性能評価	24
3.1 コンバージョンファクター	24
3.2 検出器 A/D 変換出力レンジ	29
3.3 読み出しノイズ	36
3.4 暗電流	40
3.5 グロー	43
3.6 線形性	44
3.7 パーシステンス	50
4 検出器システムに設定するパラメータセットの議論	60
4.1 読み出しノイズと検出器 A/D 変換出力レンジ性能の両立	60
4.2 暗電流、パーシステンスを鑑みた検出器駆動温度とバイアス電圧の設定	60
5 総括	62
5.1 本研究の成果	62
5.2 今後の展望	62
6 Appendix	68
6.1 H2RG 性能評価の予備試験	68

1 序論

1.1 マルチメッセンジャー天文学の幕開け

金、銀といった鉄より重い元素の起源は、天文学の未解明問題の一つである。これらの重元素は、速い中性子捕獲反応 (r-process) によって生成される。宇宙で r-process が生じる環境として、高温で中性子密度の高い中性子星合体が有力視されていた。そして 2017 年、中性子星合体から生じた重力波 GW170817 を、重力波望遠鏡 LIGO, VIRGO が検出した。その可視赤外線望遠鏡のフォローアップ観測により、重力波の電磁波対応天体であるキロノバが初検出された (Abbott et al. (2017) [1])。キロノバの理論予測スペクトルと、観測スペクトルの比較により、鉄より重い元素の合成現場が初めて観測的に明らかになった (Cowperthwaite et al. 2017 [2])。しかし 2026 年 1 月現在、重力波信号に伴うキロノバの観測例は一例のみである。重力波カタログに基づく局所宇宙の中性子星合体率は $R_{\text{BNS}} = 7.6 - 250 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ と推定され (The LIGO Scientific Collaboration et al. 2025 [3])、発生頻度自体に一桁以上の不確かさが伴う。さらに、一度の中性子星合体によって放出される r-process 元素合成量の典型的な値も、合体条件に依存し理論的に大きく変動し得る (Fujibayashi et al. 2023 [4])。よって、未だ宇宙に存在するすべての r-process 元素が中性子星合体から生じたのかは不明であり、中性子星合体に伴うキロノバの分光観測例を増やすことが要求されているのが現状である。

中性子星合体によって放出される重元素量や組成の情報は、合体後外層が光学的に薄くなるにつれて明らかになっていくため、キロノバの近赤外線スペクトルの時間発展に刻まれる (図 1.1)。よって、元素組成を明らかにするためには、合体後一週間の近赤外線分光観測を要する。しかし現在、口径 8m 級の地上望遠鏡に搭載されている VLT/X-shooter のような中分散分光器では、J バンドの限界等級は AB 等級で約 21 mag ($S/N=10, 1 \text{ hr}$) であり、一週間の分光観測が可能なキロノバは、約 130 Mpc 以内で発生した事象に限られる。よって、現在の近赤外線分光器の性能では観測期待値は年間 1 件未満に留まる。ゆえに、観測可能範囲を広げてキロノバのスペクトルのサンプル数を増やすためには、近赤外線分光器の感度を上げる必要がある。J バンドの分光限界等級 22 mag を達成できれば、約 200 Mpc 以内で発生したキロノバを一週間分光観測することが可能 (図 1.2) になり、全天で年間約 3 件の観測が期待される。

現在すばる望遠鏡で次世代補償光学 LTAO (Laser Tomography Adaptive Optics) が開発されている (Akiyama et al. 2020 [5])。LTAO は四つのレーザーガイド星を用いて大気揺らぎを補正し、極限までシャープな星像を実現する技術である。LTAO が実現するシャープな星像に合わせて、より狭いスリットを用いると地球大気からの背景放射を抑制できる。LTAO を用いれば感度の向上が見込めるが、LTAO に最適化された狭いスリット幅で広い波長帯域をカバーする分光観測装置は存在していなかった。

1.2 広帯域分光装置 NINJA

広帯域分光装置 NINJA (Near INfrared and optical Joint with Adaptive optics) は LTAO に最適化されたエシエル分光器であり、高感度分光観測を可能にする ($J_{AB} = 22 \text{ mag}$ ($S/N=10, 2 \text{ hr}, R \sim 3000$))。NINJA は可視分光器と近赤外分光器から構成され、すばる望遠鏡赤外ナスマス焦点への持ちこみ PI 装置として近赤外線分光器が先行開発されている。表 1.1 に NINJA 赤外線分光器の諸元を示す。観測波長範囲は $0.83 \mu\text{m} - 2.5 \mu\text{m}$ であり、回折格子と二つのクロスディスペーサを用いてエシエルフォーマットを $2048 \times 2048 \text{ pixel}$ の一枚の検出器に投影する (図 1.4) ことで、広帯域分光を実現する。さらに NINJA はスリット交換機能を

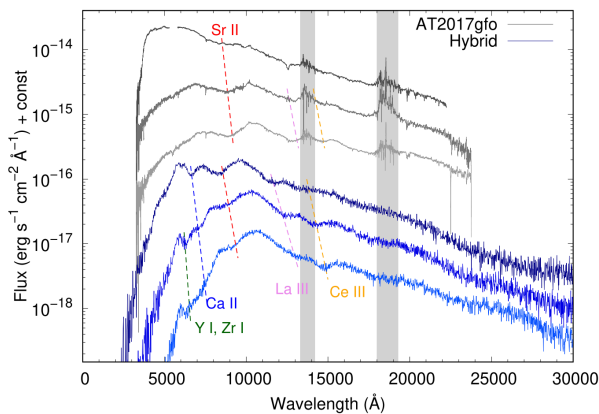


図 1.1 キロノバのスペクトル時間発展。灰色が観測スペクトルで、青がモデルスペクトル。各色は上から順に中性子星合体から 1.5, 2.5, 3.5 日経過後を表している。(Domoto et al. 2022 [6])

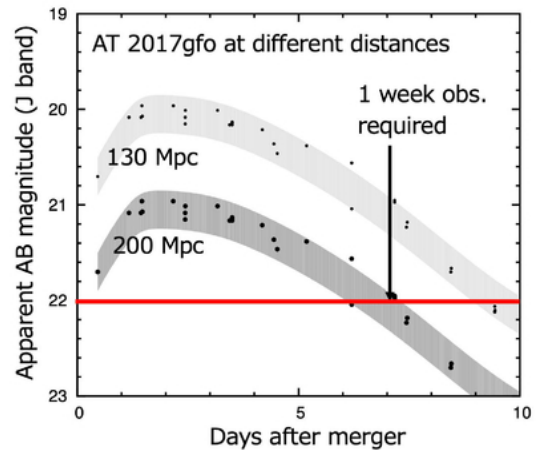


図 1.2 AT 2017gfo が 130 Mpc と 200 Mpc 離れた場所で起きた場合の J バンドにおける予想ライトカーブ。200 Mpc 以内で発生したキロノバを 1 週間観測するには、22 mag の J バンド分光感度の達成が必要である。(Tokoku et al. 2022 [7])

持ち、観測時のシーイングに応じて幅 $0.21''$, $0.35''$, $0.5''$, $0.7''$ の四種類のスリットから選択可能である。デフォルトは $0.35''$ 幅スリットであり、このとき波長分解能は約 3300 である。

図 1.3 に NINJA の光学レイアウトを示した。望遠鏡から到来した光は NINJA の入射窓前で一度焦点を結んだ後、クライオスタット内部へ入射する。NINJA 可視分光器とのインターフェースは 2026 年 1 月現在未定である。入射光は、二枚のプリズムを組み合わせた大気分散補正機構を通り、大気分散の波長依存性が補正される。その後スリットを通り、プリズムと回折格子を通して分光された後検出器に入射する。モータ機構、光学素子と検出器は外部からの熱放射を抑えるためにラジエーションシールド内に格納され、装置自体が発する赤外線ノイズを抑えるために、ラジエーションシールドの光学ベンチが 75 K まで冷凍機で冷却される。ラジエーションシールドは更にクライオスタット内に格納され、冷却前に光学素子と検出器への外部からの熱伝導を低減するためにクライオスタット内部を真空状態にする。ラジエーションシールド内部の写真を図 1.5 に示した。

また、キロノバの分光観測を通じた重元素起源の解明以外の NINJA の主な科学目標として、宇宙誕生直後の銀河や超巨大ブラックホールの観測を通じた初期宇宙の化学進化史や銀河形成史の解明、遠方で発生した超新星の観測を通じた初期宇宙の超新星の元素合成量の解明が挙げられる。

1.3 検出器システム読み出しノイズ低減の重要性

NINJA は、LTAO に最適化された高感度分光観測を可能にする。これは、LTAO によってシャープに結像された星像を幅の細いスリットで分光することで、地球大気からの背景放射ノイズを抑制できるからである。すると、相対的に検出器の読み出しノイズの感度への寄与が大きくなる。よって、高感度観測を実現するためには、検出器システムの低読み出しノイズの実現が不可欠である。図 1.6 に、読み出しノイズが $4 e^- \text{ rms}$ と $8 e^- \text{ rms}$ の場合における、NINJA の予想限界等級を示した。検出器の熱雑音である暗電流ノイズ

表 1.1 NINJA 赤外線分光器諸元

観測波長域	0.83-2.5 μm
入射 F 比	13.9
波長分解能、スリット幅	3300 (0.35'')
	5500 (0.21'')
	2310 (0.5'')
	1650 (0.7'')
スリット長	5''
コリメータ焦点距離	597.7 mm
瞳径	43.0 mm
検出器	HAWAII-2RG
ピクセルフォーマット	2048 \times 2048 pixel
ピクセルサイズ	18 μm /pixel
ピクセルスケール	0.126''/pixel

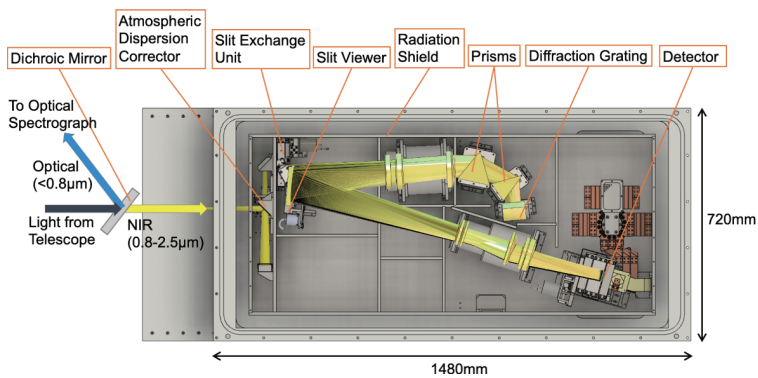


図 1.3 NINJA 赤外線分光器の光学レイアウト

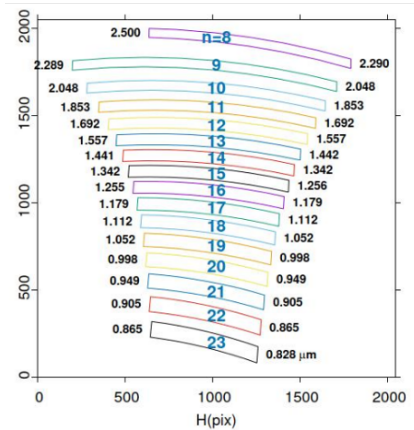


図 1.4 NINJA 赤外線分光器で得られるエッセルフォーマット。各波長オーダーのピークフラックスの 40% の光量に相当する部分を囲んでいる。

は $0.05 \text{ e}^-/\text{s}/\text{pix}$ と仮定した。計算は、早稲田大学の佐藤氏が作成したコード (佐藤 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2025) を基にした。NINJA の感度は読み出しノイズリミットであり、目標感度 $J_{\text{AB}} = 22 \text{ mag}$ ($S/N=10$, 2hr) を達成するためには、読み出しノイズ $4 \text{ e}^- \text{ rms}$ を達成する必要がある。読み出しノイズは、検出器固有の性能や読み出し回路固有の性能に大きく左右される。一方で、検出器読み出し回路に与える電圧や回路の設定値 (以下、回路パラメータと呼称) によって、読み出しノイズを改善できる。また、システムを構成するユニット群の配置方法によっては、冷凍機からの振動やグラウンドループ由来の基準電位の変動や誘導電場といった外的要因によっても読み出しノイズが増大し得る。したがって NINJA の検出器システム開発に際し、グラウンドの取り回しを工夫して外部からの伝播を抑えつつユニット群を配置し、さらに回路

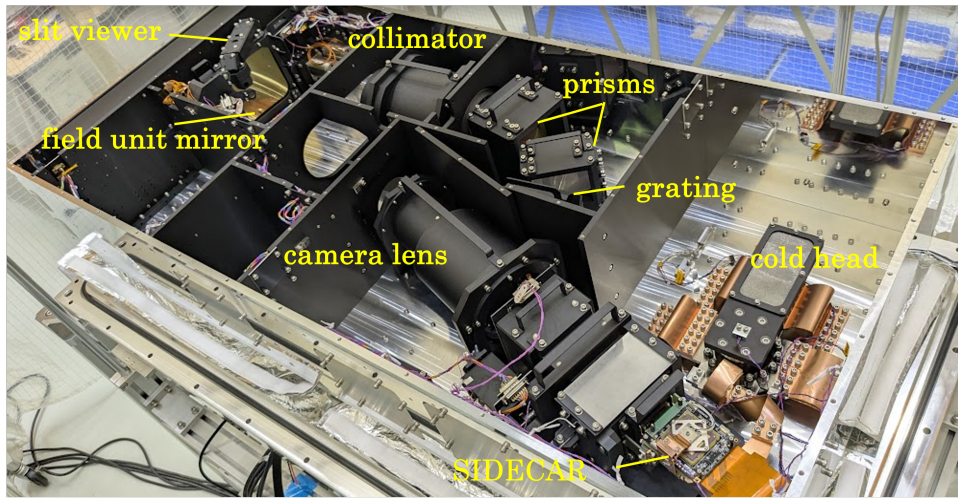


図 1.5 NINJA ラジエーションシールドの上蓋を開けて撮った内部の写真。光学系、検出器ユニット群が格納されている。

パラメータが検出器システムの性能にどのように影響を与えるのか、評価して正確に理解する必要がある。

本研究において、第 2 章では NINJA 検出器システムの概略を述べる。第 3 章では、NINJA 検出器の性能評価方法と結果を提示する。同時に、各種性能の回路パラメータ依存性についても述べる。それを踏まえて第 4 章では、NINJA の検出器システムに与えるべきパラメータについて議論する。第 5 章で本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望を述べる。

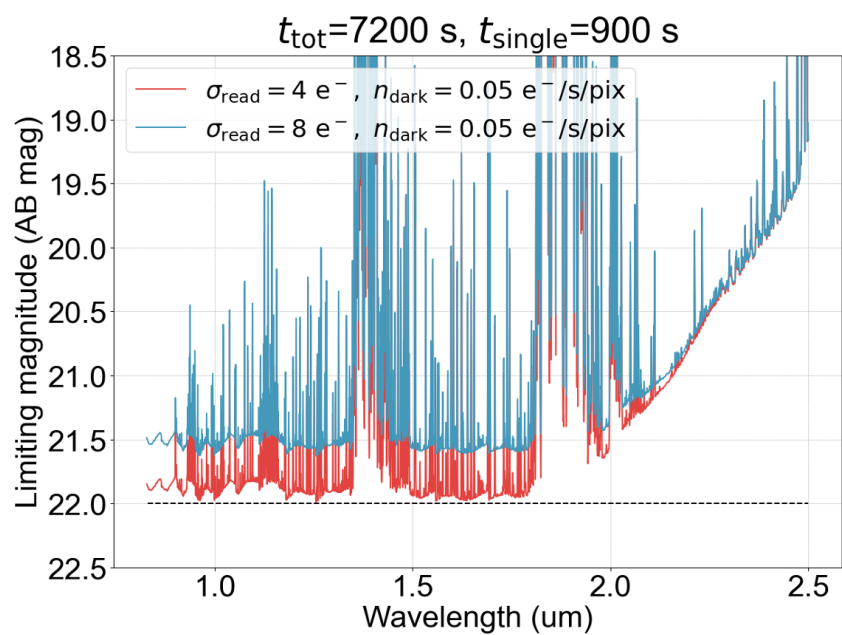


図 1.6 NINJA の予想限界等級; 青が読み出しノイズ $8 \text{ e}^- \text{ rms}$ の場合で、赤が読み出しノイズ $4 \text{ e}^- \text{ rms}$ における計算結果。暗電流ノイズは $0.05 \text{ e}^-/\text{s}/\text{pix}$ である。 $0.35''$ スリットを用いて波長分解能 3300 の仮定の下、900 秒積分を 8 回繰り返して、 $S/N=10$ における限界等級を表している。目標感度である 22 mag を波線で示している。

2 NINJA 検出器システム

本セクションでは、NINJA 検出器システムの全体の構成と検出器システムの構成要素について述べる。付随して、近赤外線検出器の基礎についても説明する。第3章で記す検出器の性能評価実験は、本セクションで示す構成下で実施した。

2.1 近赤外線検出器の基礎

天文観測にて一般的に使用される近赤外線検出器の基礎として、検出器読み出し回路の仕組みとその読み出し方法について述べる。

2.1.1 フォトダイオード

フォトダイオードは、光を電圧変化に変換させる半導体素子である。P型半導体とN型半導体を接合させると、P型半導体に向かってN型半導体の自由電子が、N型半導体に向かってP型半導体のホールが拡散し、接合面付近でキャリア(自由電子とホール)が消滅するため、キャリアが存在しない空乏層が形成される。フォトダイオードのN型側ではキャリアである自由電子が消えるが、イオン化したドナー原子は結晶中に固定されているため、正に帯電する。P型側ではキャリアであるホールは消えるが、負イオン化したアクセプター原子は結晶中に固定されているので、負に帯電している。結果、N型からP型に向かい内蔵電場(built-in electric field)が生じる。内蔵電場により、キャリアの拡散が抑制されるため、最終的に空乏層がある一定の幅 W の状態になった状況でつりあう。このとき、空乏層の両端には内部電位差(内蔵電位, built-in potential) V_{bi} が自然にかかり、PN接合の境界面ではフェルミエネルギーが一致した状態が実現されている。 W が決まると対応する内部容量(接合容量, junction capacitance) $C_j = \epsilon S/W$ が決まる。通常、入射フォトンとの反応率を高めるために、フォトダイオードの端子間に内蔵電場を強化する方向の電圧(逆バイアス)をかけることで空乏層を拡大した状態から積分を開始する。逆バイアスをかけると、フォトダイオードの両端の電位差が上昇し、 W が拡大、 C_j が縮小する。

フォトダイオードの半導体の種類によって、価電子帯と伝導帯の準位の差に相当するバンドギャップエネルギーが異なる。バンドギャップエネルギーに対応する波長よりも長い波長のフォトンでは検出できない。この検出限界に対応する波長をカットオフ波長と呼び、フォトダイオードの性能を決める重要なパラメータである。

空乏層に半導体のバンドギャップエネルギー以上のエネルギーを持ったフォトンが入射すると、内部光電効果により自由電子とホールのペアが生成される。すると、内蔵電場によって自由電子とホールは内蔵電場を打ち消す方向に互いに逆方向に移動(図2.1)し、フォトダイオードの両端の電位差が逆バイアス電圧 V_{bias} から減少する。このとき、一次近似としては空乏層の厚さ W は変化しないため、出力は $\Delta V = q/C_j$ である。このようにして、入射フォトン数と電位差の変化量は比例関係にあるため、フォトン数を電圧信号として読み出すことが可能になる。しかし厳密には、電荷が蓄積されていくとフォトダイオードの電位差が減少していくため、 W が縮小し C_j が増大する。これにより、入射フォトン数に対する出力信号の非線形性を生む。

2.1.2 MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) とは、電界効果トランジスタ(FET)の一種であり、フォトダイオードの電圧変化を読み出すために使われる。n型MOSFETの模式図を図2.2に示

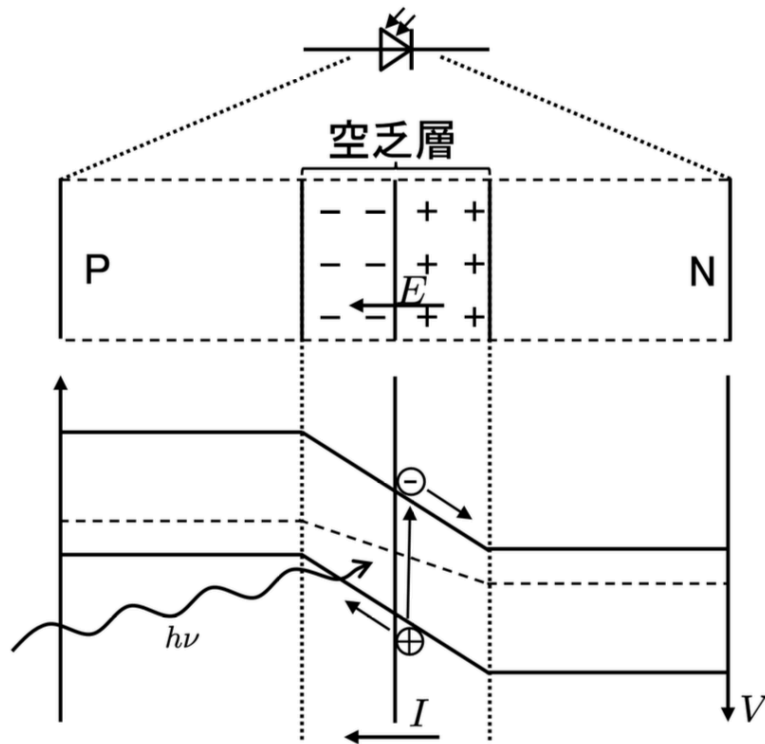


図 2.1 フォトダイオードに光子が入射し、対生成した電子とホールが内蔵電場によって移動する様子。右の縦軸に電圧、左の縦軸に電子のポテンシャルを示している。ホールのポテンシャル方向は上下逆になることに注意 (穂満修論 2023 [8])

した。ソース、ドレイン、ゲートの電極から構成され、赤外線検出器アレイのような大規模回路では通常、ボディは GND 電位に接続されている。ボディに対してゲート電圧を印加しなければ、ソースとドレイン間で電位差を設けても電流は流れない。一方で、ゲート電圧を印加すると、ゲート下の p 型半導体内のホールがボディ側に移動するためキャリアの無い空乏層が現れる。さらにゲート電圧を印加すると、ソースとドレイン側の n 型半導体から自由電子が集まり、n 型半導体に似た領域 (反転層) が形成される。これをチャンネルと呼ぶ。チャンネルが出現した状態で、ソースとドレイン間に電位差を設けると、電流が流れる。

よって、MOSFET はドレインに電源を繋ぎ、ゲートを入力、ソースを出力として使うことで、スイッチやアンプとしての機能を持たせることができる。また、ソースとドレイン間の電流の飽和特性を利用して定電流回路として使うこともできる。

2.1.3 赤外線検出器アレイ

近赤外線検出器アレイは、フォトダイオードと読み出し回路 (マルチプレクサ、または ROIC と呼ぶ) をインジウム bumps で繋ぎ合わせたハイブリッドアレイ型検出器である。その構造を図 2.3 に示した。フォトダイオード層と読み出し回路層はそれぞれ画素構造を持ち、ピクセル毎にフォトダイオードと MOSFET が配置されている。フォトダイオードの出力がインジウム bumps を介して MOSFET のゲートに入力され、各ピクセルに蓄積された光電子による電圧変化を、MOSFET の出力電圧としてピクセル毎に読み出すことができる。

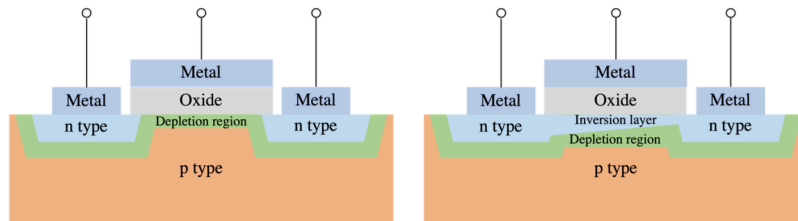


図 2.2 n チャンネル型の MOSFET 構造：ボディ (図では p 型半導体) に対してゲートに電圧を印加すると、ゲート下に空乏層が現れる (左図)。さらにゲート電圧にある閾値を超える電圧を印加すると、ゲート下に反転層が現れ (右図)、ソースドレイン間に電位差を設けると電流が流れるようになる。(穂満修論 2023 [8])

この CMOS 構造と呼ばれる検出器では、電子を直接読み出す CCD 検出器と異なり、同一ピクセルを積分中に複数回読み出すことができる (非破壊読み出し)。赤外線検出器のフォトダイオードとしては、赤外線に感度を持つ HgCdTe や InSb が用いられる。

なお、一度に検出器が蓄積できる光電子の量には許容量が存在する。これをフルウェルと呼び、単位は e^- で表す。一度の積分でフルウェルを超える光電子は蓄積できないため、フルウェルを超えないように積分時間を調節する必要がある。積分を終えるとリセットスイッチがオンになり、各ピクセルのフォトダイオードを元の逆バイアス電圧まで戻すことで、蓄積電荷を 0 にする。

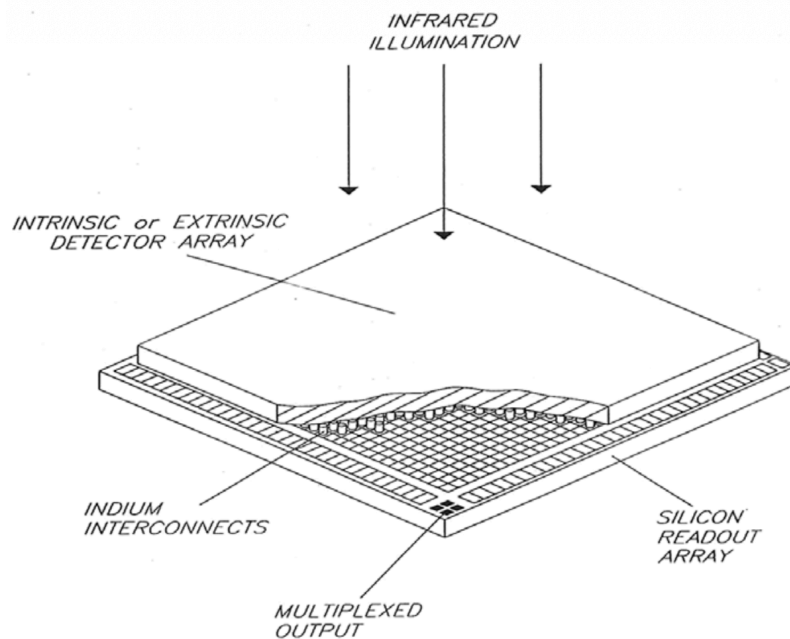


図 2.3 赤外線検出器アレイの構造 (Mclean 2008[9]): フォトダイオードから成る層と、Si から成る読み出し回路である ROIC がインジウムバンプで接続されている。

2.1.4 CDS sampling

CDS(Correlated Double Sampling)は、検出器のリセット直後と積分終了直前で二回読み出す方法である。検出器のフォトダイオードに入力されていたリセットスイッチがオフになった直後、フォトダイオードのノード側電圧のランダムな不確定性であるkTCノイズが発生する。CDSで二回読み出した値の差分値を取ると、kTCノイズを取り除くことができる。CDS samplingの概念図を図2.4に示す。

2.1.5 Fowler sampling

Fowler samplingは、積分の最初と最後に複数回読み出す方式である。前半に読み出した画像の平均画像と、後半に読み出した画像の平均画像の差分を取ることで、kTCノイズを取り除くだけでなく、読み出しノイズの実効的な低減を可能にする。Fowler samplingの概念図を図2.5に示す。

2.1.6 Ramp sampling

Ramp samplingは、積分中に一定間隔で読み出す方式である。各ピクセル毎に出力レベルを時間の関数として一次関数でフィッティングすることで、そのピクセルに入射したフラックスを計測できる。kTCノイズを取り除けるだけでなく、宇宙線のヒットによってあるピクセルが積分途中で飽和した場合でも、飽和直前までの有効なサンプル点のみを用いて傾きを計算できる。そのため、他のサンプリング方法に比べて、最終画像として利用可能なピクセルが増えるという利点がある。Ramp samplingの概念図を図2.6に示す。

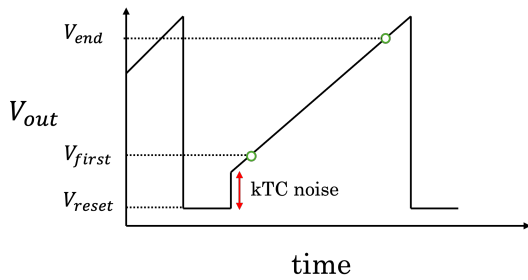


図 2.4 CDS sampling の概念図: リセット終了時に kTC ノイズが発生する。

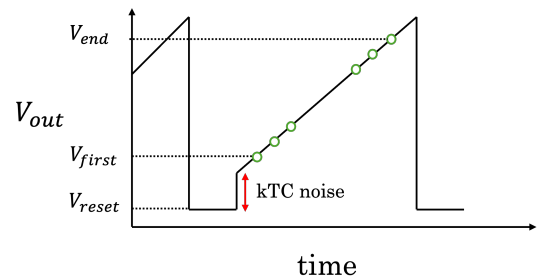


図 2.5 Fowler sampling の概念図

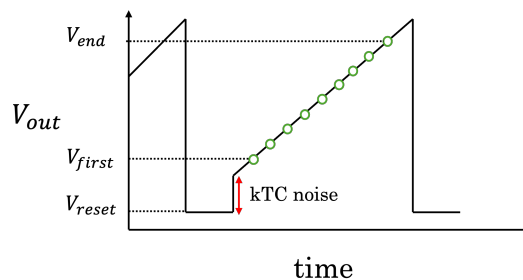


図 2.6 Ramp sampling の概念図

2.2 NINJA 赤外線検出器システム構成

NINJA 赤外線検出器システムの構成を図 2.7 に示す。検出器として一枚の HAWAII-2RG(H2RG) を用い、H2RG は HxRG シリーズを駆動する専用集積回路である SIDECAR によって駆動される。インターフェイスボードである MACIE が、SIDECAR と制御 PC (Linux) を接続し、PC から検出器の制御とデータ取得を可能にする。また、H2RG と SIDECAR は Teledyne 製のフラットケーブルで接続され、ラジエーションシールド内で冷却された状態で駆動される。SIDECAR と MACIE は沖電線株式会社 (<http://www.okidensen.co.jp/jp/>) 製のフラットケーブルで接続され、MACIE はクライオスタット内部に配置される。これにより、SIDECAR-MACIE 間のフィードスルーを通さずシステムを構成できる。各コンポーネントについて、以下に詳しく述べる。

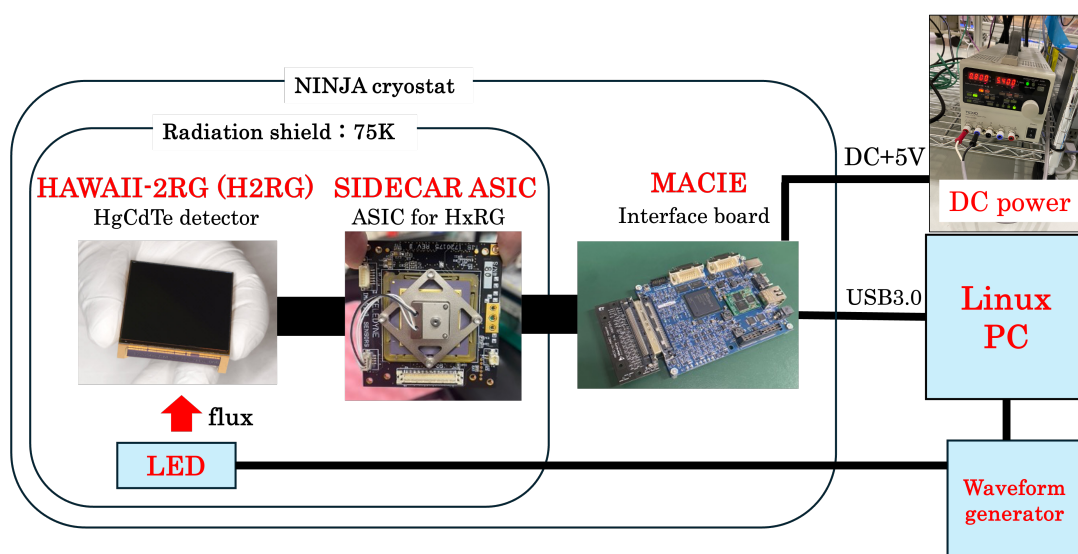


図 2.7 NINJA 赤外線検出器システムの構成図。黒い線が物理的な接続を表し、太い線はフラットケーブルを表す。

2.2.1 H2RG 検出器

NINJA で用いる検出器は、Teledyne Imaging Sensors 社 (TIS) のハイブリッドアレイ型検出器、HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager with $2K \times 2K$ resolution, Reference pixels and Guide mode (HAWAII-2RG) である。HAWAII-2RG は近赤外線に感度を持つ HgCdTe と読み出し回路 (マルチプレクサ) をインジウムバンプで繋ぎ合わせる構造をした高感度大面積赤外線検出器である。感光部のサイズは約 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ で、サイズ $18\text{ }\mu\text{m}$ のピクセルが 2048×2048 の二次元配列上に並んでいる。出力チャンネル数は 1,4,32 から選択可能 (図 2.8) であり、NINJA では、一度の読み出し時間が最も短い 32 チャンネル読み出しを採用する。NINJA では K バンド ($2.0\text{--}2.4\text{ }\mu\text{m}$) までカバーするため、カットオフ波長 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 仕様の H2RG を用いる。また、検出器を録取るように幅 4pixel の参照ピクセルが配置されている (図 2.9)。参照ピクセルは光に感度を持たず、検出器出力電圧のバイアスドリフトを補正する役割と、読み出しチャンネル毎の違いを補正する役割を果たす。

また、NINJA では検出器の駆動温度を調整するために、 50 W のヒーターを検出器ホルダの裏側に取り付

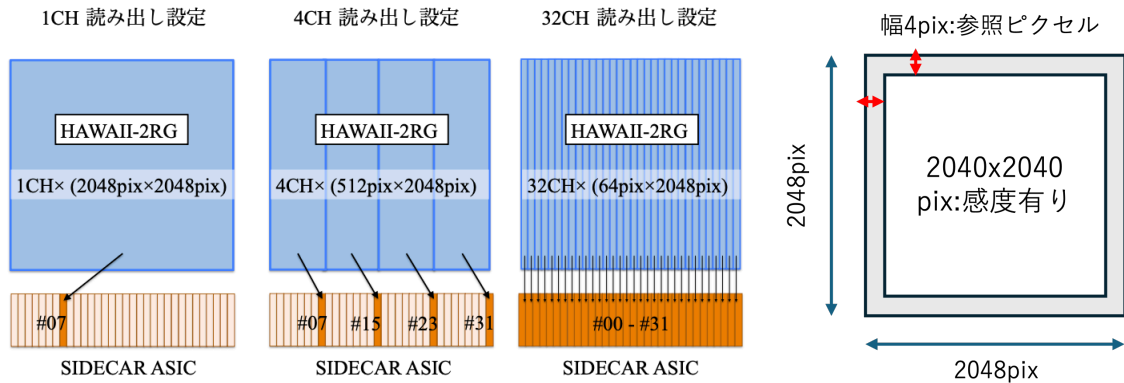


図 2.8 H2RG の読み出しチャンネル毎の読み出し概念図 (藤堂修論 2015 [10])。読み出しチャンネル数に応じて、SIDE CAR の読み出しチャンネルが割り当てられる。以降、H2RG の読み出しチャンネルは左から#0,#1,...,#31 と表記する。

図 2.9 H2RG 検出器の参照ピクセルの配置。検出器を録取るように幅 4pixel の感度を持たない参照ピクセルが配置されている。

表 2.1 H2RG(2.5 μm カットオフ) 諸元 (Blank et al. 2012 [11])

Dimensions	38.89 mm \times 40.46 mm \times 7.62 mm
Mass	80 g
Array Format	2048 \times 2048
Pixel size	18 μm \times 18 μm
Operating temperature	\sim 77 K
Number of outputs	Programmable 1, 4, 32
Frame Rate	3 Hz (slow mode, 32 outputs)
Detector Material	HgCdTe
Detector Substrate	CdZnTe Removed
Cutoff wavelength	2.45–2.65 μm (2.5 μm , @77 K)
Mean Q.E.	\geq 70% (800–2000 nm)
Median Dark current	\leq 0.05 e^- (@ 0.25 V bias, @77 K)
Median Read Noise	\leq 18 e^- (@100 kHz, CDS)
Well Capacity	\geq 80,000 e^- (@ 0.25 V bias)

けた (図 2.10)。ヒータの出力を調節することで、検出器の駆動温度を一定に保つことができる。

2.2.2 SIDE CAR

H2RG を駆動するフロントエンド回路として、SIDE CAR(system image, digitizing, enhancing, controlling, and retrieving) を用いる。これは、HxRG シリーズ検出器を駆動する ASIC (Application Specific Integrated Circuit) であり、低温下で駆動が可能である。図 2.12 に SIDE CAR のブロックダイアグラムを示した。ASIC にクロック生成コントローラ、バイアスジェネレータ、プリアンプ、周波数フィルター、AD コンバータ、メモリといった機能が集約されている。これらが同期して動作することで、SIDE CAR は HxRG

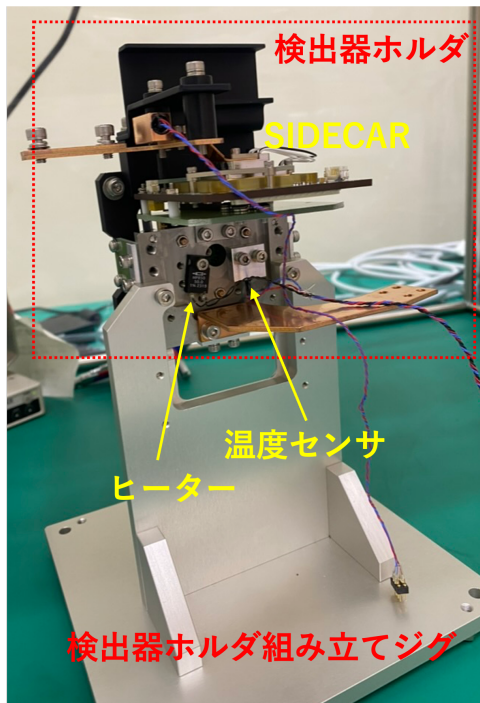


図 2.10 下部の検出器ホルダ組み立てジグに、H2RG と SIDE CAR から構成される検出器ホルダが取り付けられている。黒いブロック状のヒータと温度モニタが、Mo 合金から成る検出器台座に取り付けられている。

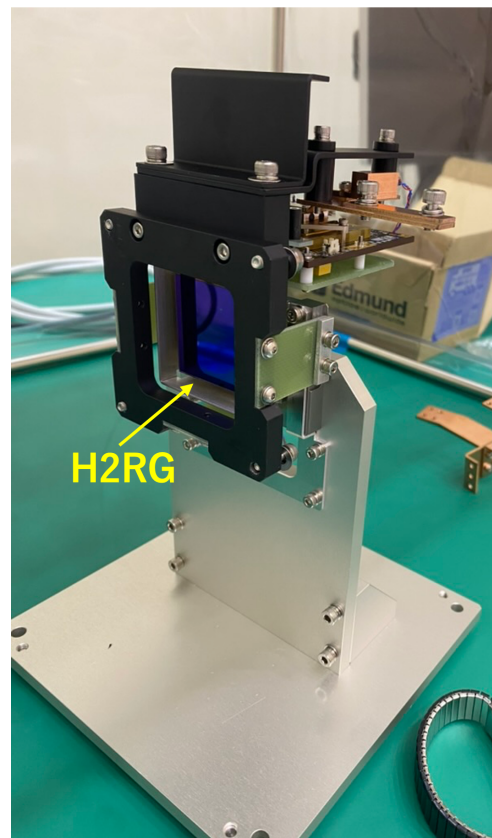


図 2.11 検出器組み立てジグを正面から見た写真。組み立て後に検出器ホルダのみ取り外し、クライオスタットへ格納する

検出器へのバイアス、クロックを送る。また、検出器からのアナログ出力電圧を増幅、AD 変換し、デジタル信号を MACIE へ出力する。クロック速度、バイアス電圧といった検出器の駆動パラメータは、SIDE CAR のレジスタ値を外部から書き換えることでユーザーが設定できる。

2.2.3 MACIE

MACIE (Multi-Purpose ASIC Control & Interface Electronics) は、制御 PC と SIDE CAR の間に位置するバックエンド回路であり、インターフェースの役割を担う。制御 PC からの指示を仲介して H2RG, SIDE CAR のレジスタ設定値を送信する。また、SIDE CAR からのデジタル、ビデオ出力を受け取り制御 PC へ送信する役割も果たす。制御 PC との通信方法は三種類存在し、Camera Link, USB3.0, Gigabit Ethernet の通信が可能である。NINJA では USB3.0 接続を用いる。さらに MACIE は SIDE CAR, H2RG への電源供給も行う。MACIE への電源は USB を介して PC から供給可能だが、ノイズの低減のため外部から直流安定化電源から +5 V を供給する。クライオスタット内部に格納されている MACIE の写真を図 2.13 に示す。

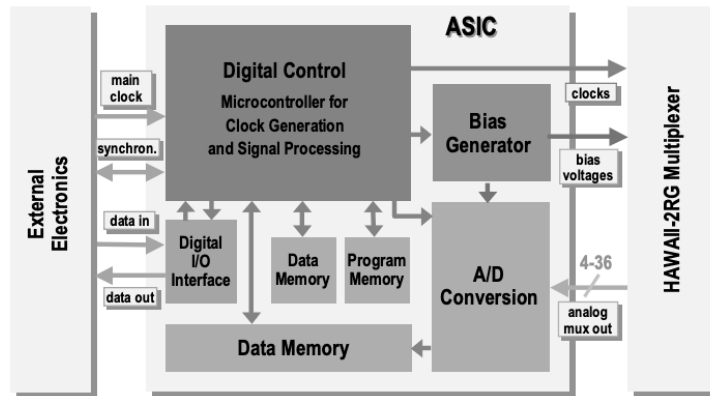


図 2.12 SIDE CAR のブロックダイアグラム (Loose et al. 2003[12]):A/D conversion 部にプリアンプ回路、フィルタ回路、ADC 回路が内蔵されている。

表 2.2 SIDE CAR 諸元 (Loose et al. 2005 [13])

Dimension	22 × 14.5 mm ²
Technology	0.25 μm CMOS
Analog Input	36 independent channels, fully differential
Preamplifiers	Programmable gain (−3 to 27 dB) and bandwidth
16 bit ADCs	Up to 500 kHz sample rate (1 mW / channel at 100 kHz)
12 bit ADCs	Up to 10 MHz sample rate (10 mW / channel at 5 MHz)
Bias Outputs	20 output channels, selectable voltage or current DACs
Digital I/O	32 channels, fully programmable
Micro-controller	16 bit RISC, low power, excellent arithmetic capabilities
Program Memory	16 kwords (16 bit / word)
Data Memory (μC)	8 kwords (16 bit / word)
Data Memory (ADC)	36 kwords (24 bit / word)
Array-processor	Adding & multiplying and DMA control per ADC channel
Digital Interface	LVDS or CMOS, custom serial protocol, up to 32 parallel lines
Operating Temperature range	30 K – 300 K
Radiation	Complete design is single event upset protected

2.2.4 USB3.0 光エクステンダ

MACIE と Linux PC の間は USB3.0 規格で通信する。その際、光エクステンダ (<https://ysol.co.jp/ja/download/icron/usb-3-0-spectra-3022-manual.pdf>) を介して通信を行う。これは Local Extender (LEX) と Remote Extender (REX) の二つのユニットから構成され、LEX が MACIE 側、REX が Linux PC 側に接続される。USB3.0 信号を光信号に変換して伝送することで、PC から MACIE に伝わるノイズをカットする役割を果たす。

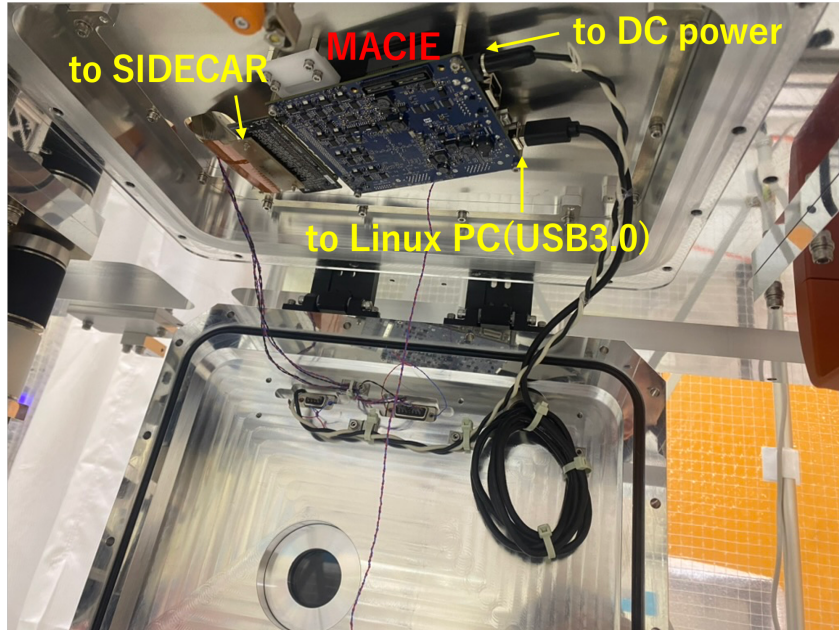


図 2.13 NINJA クライオスタットに取り付けられた MACIE の写真。クライオスタット下蓋を開けて見上げるように写真を撮っている。

2.2.5 LED 機構

フラット光源として、四つの赤外 LED が検出器全面を照射できるようにラジエーションシールド内に格納されている。LED の発光パターンは Waveform Generator で制御され、光量、照射時間を調整できる。LED の設置場所を図 2.14 に、4 つの LED を発光させて検出器で読み出した CDS 画像を図 2.15 に示す。

2.2.6 検出器スライド機構

NINJA で用いる H2RG 検出器は、中央部にバッドピクセルクラスターが存在する。この検出器をかつて用いた SWIMS の開発チームが作成したバッドピクセルマップを図 2.16 に示す。画像中央のごま塩状に広がったバッドピクセルクラスターが分光観測の上で問題となる。これを補正する方法として、検出器を分散方向にスライドさせることでバッドピクセルに相当する箇所を補完する方法を採用した (Yanagisawa et al. 2024 [14])。図 2.17 に、検出器スライド機構の写真を示した。バネの弾性力を用いてスペクトルの分散方向に検出器をスライドさせる仕組みになっている。検出器スライド機構を用いたバッドピクセルの補完効果に関しては、本研究ではスコープ外とする。

2.3 読み出しソフトウェア

インターフェースボードである MACIE と PC が通信することで、H2RG の駆動とデータ取得を実現する。本セクションでは、MACIE と通信するソフトウェアを解説する。

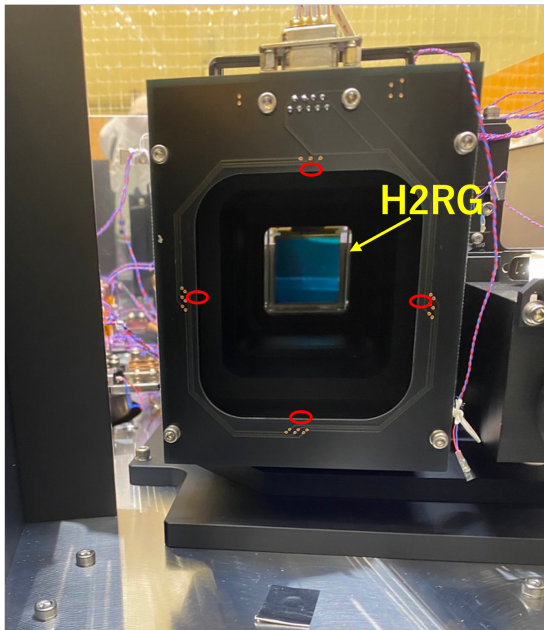


図 2.14 NINJA のサイエンスパスに沿って H2RG を見た写真。赤丸で示した四つの赤外線 LED が手前の基板に取り付けられ、H2RG 全面を照射できる。

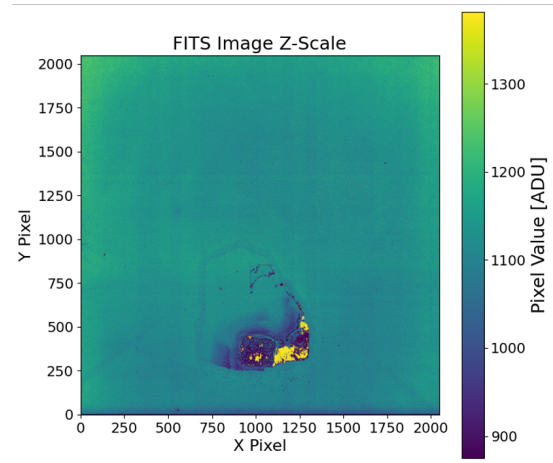


図 2.15 四つの LED を発光させて検出器を読み出したフラット画像

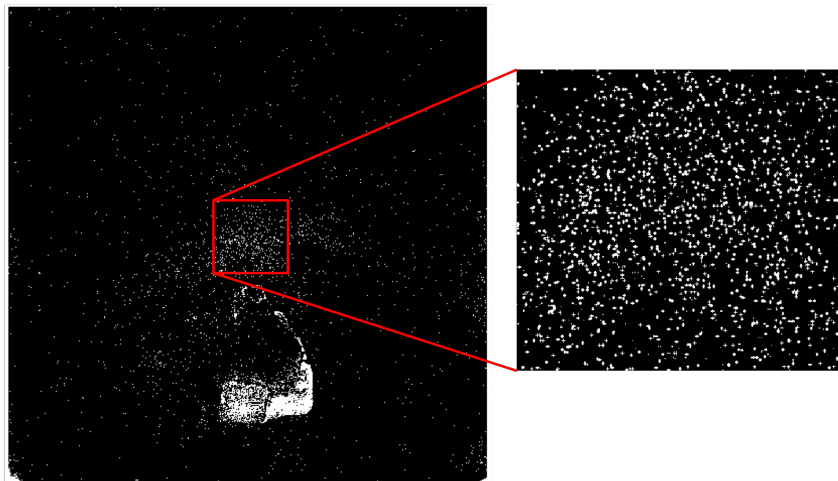


図 2.16 SWIMS チームが作成したバッドピクセルマップ。白いピクセルがバッドピクセルに相当する。画像下部に存在する大きな塊は、検出器を回転することでエシェルフォーマット (図 1.4) に重ならないように回避できるが、画像中央に存在するバッドピクセルクラスターの影響は避けられない。

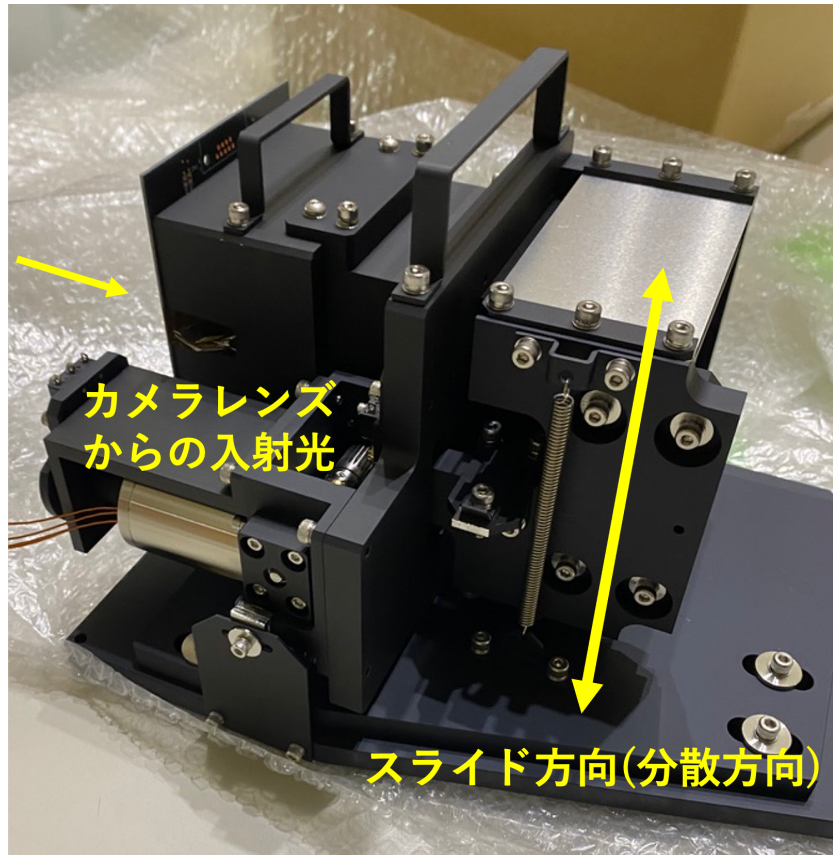


図 2.17 クライオスタット外に置かれた検出器スライド機構の写真。スペクトルの分散方向に、モータでバネを伸縮させて検出器をスライドさせる。写真右方から検出器ホルダ (図 2.10) を取り付ける構造になっている。

2.3.1 MSAC

MACIE に付属の GUI 読み出しソフトウェア MSAC を用いて、検出器を駆動できる。MSAC の起動画面を 2.18 に示す。Initialization, Configuration, Acquisition, Manual Command タブから構成され、Initialization で、MACIE との接続、起動を可能にする。Configuration では、検出器、SIDE CAR に与えるパラメータの設定ができ、Acquisition では、画像読み出しパラメータの設定や、画像の取得コマンドを選択できる。Manual Command では、検出器と SIDE CAR のレジスタ値を手動で読み書きできる。

2.3.2 cont_macie ソフトウェア

MSAC はソケット通信機能を持たないため、NINJA 実機運用には適さない。そこで、NINJA ではソケット通信で制御できる CUI ベースの cont_macie ソフトウェア (柳澤 日本天文学会 2025 春季年会) を用いる。cont_macie ソフトウェアの制御構造を図 2.19 に示した。ソフトウェアはサーバと、各クライアントコマンド、サブスクリバから構成される。C++ 言語から構成される cont_macie サーバは外部からの指令にしたがって SIDE CAR のレジスタを書き換える機能を持つ。Ruby 言語で記述されたクライアントコマンドは、指令を発出する役割を果たす。各クライアントコマンドの機能を表 2.3 に示した。通信には、メッセージング・ミド

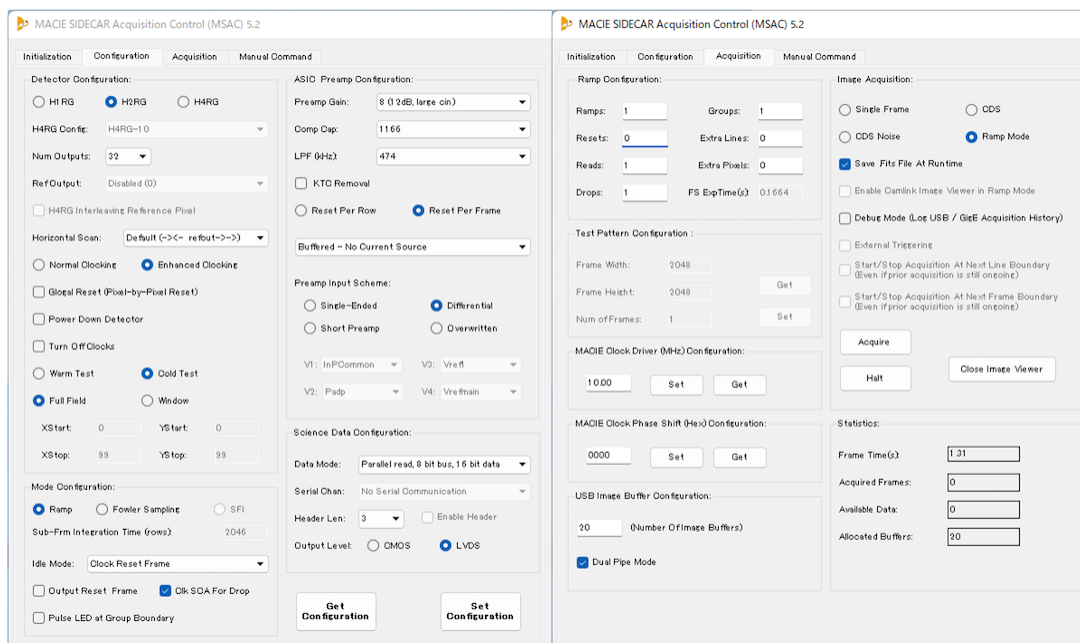


図 2.18 GUI 読み出しソフトウェア MSAC の Configuration タブの画面

ルウェア ZeroMQ を使用し、通信文字列には JSON を採用している。HxRG 検出器を駆動する SIDECAR は、自身の内蔵レジスタを参照しつつ無限ループ処理を行なっている。したがってユーザーは、クライアントコマンドを通じてレジスタ値を書き換えることで、希望する検出器の駆動を実現できる。

また、サーバはコマンド処理した後、サブスクリバに通知を行い、サブスクリバはそれぞれの処理を行う。さらに、Waveform Generator を通じて LED の発光パターンを制御する機能も備えており、光量、照射時間を調整できる。

クライアントコマンド	機能
cfg	ユーザー設定レジスタの書き換え。検出器 (H _{1 2 4} RG)、出力チャンネル数 (H2RG は 1,4,32)、サンプルモード (UTR/Fowler)、露出時間、プリアンプゲインなどの各種駆動パラメータの設定
detbias	検出器、プリアンプ回路に与える電位・電流値の確認と設定
cfg_wvfg	Waveform Generator へ送るパラメータの設定および駆動。LED の入力電圧 (V_{min} , V_{high})、発光回数 (ncyc)、周波数 (freq)、duty cycle を指定できる
get_img	画像取得指令
init	cont_macie (再) 初期化コマンド
quit	cont_macie 終了コマンド

表 2.3 cont_macie ソフトウェアの主なクライアントコマンドと機能。本研究では、LED の入力電圧 $V_{min} = 0V$ 、duty cycle=50%、freq=10000 Hz として実験を行った。

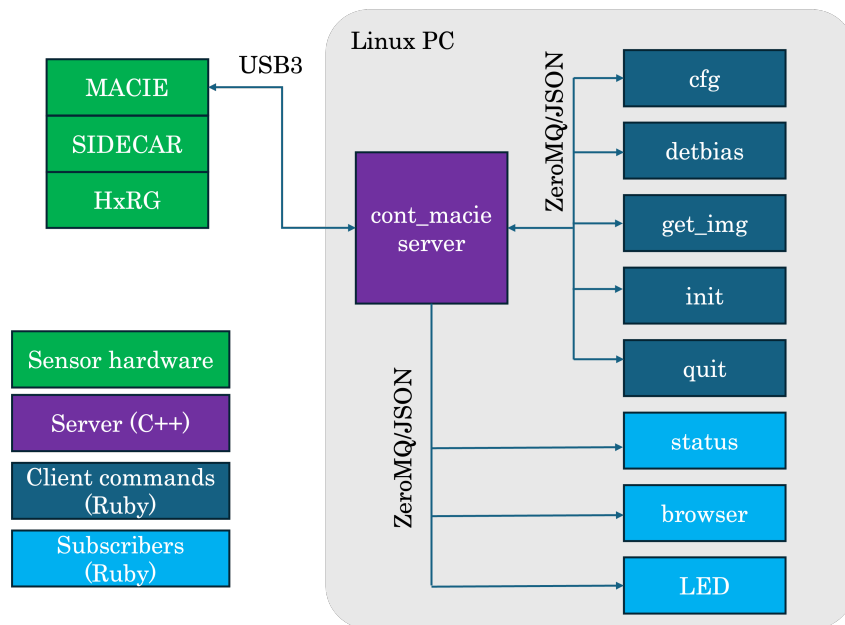


図 2.19 cont_macie ソフトウェアの制御コードの構造 (柳澤 日本天文学会 2025 春季年会)。各クライアントコマンドの機能は表 2.3 に示している。

2.4 検出器読み出しパラメータ

HAWAII 検出器はピクセルに溜まった電荷による電圧変化をサンプルするため、積分中に複数回読み出すことができる (非破壊読み出し)。MACIE の検出器駆動パラメータとして、reset, read, drop, group, ramp が定義されている。それぞれのパラメータの値を変化させることで、希望する読み出し方法を実現する。

reset は、フレーム読み出しを始める前に何回画素のリセットをかけるかを指定する。read はフレームを連続で読み出す回数を表し、drop は read の後に続いてフレームの空読み出し (データを記録しない非破壊読み出し) する回数を表す。そして、read と drop の塊を一つの group と定義し、group を何回繰り返すかを指定できる。そして、reset, read, drop, group で指定された一連の読み出しを ramp とみなし、ramp の回数を指定できる。

サンプリング方法として Ramp sampling と Fowler sampling が実装されている。図 2.20 に Ramp sampling の読み出しシーケンスの一例を示した。読み出し前に reset を 2 回挟み、2 回読み出し (read) + 1 回空読み出し (drop) の流れを 3 回 (group) 繰り返す流れを 2 回 (ramp) 行う。最後の group に属する drop は無視される。また、Fowler sampling の読み出しシーケンスの一例を図 2.21 に示した。Fowler sampling では、自動的に group=2, drop=0 と指定される。さらに、tfowexp にて、group1 の最終フレームの読み終わりから、group=2 の最初のフレームの読み始めまでの時間 (秒) を指定し、この期間に検出器に読み出しに関するクロックは送られず、積分状態が維持される。なお、32 チャンネル読み出しのとき、1 フレームの読み出し時間は 1.475 s である。1 回のリセット、1 回の空読み出しの間に経過する時間も同様である。

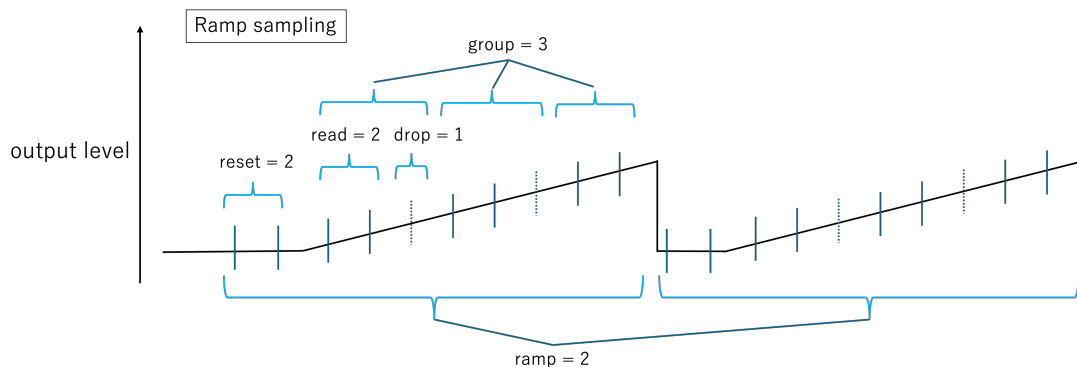


図 2.20 Ramp sampling で reset=2, read=2, drop=1, group=3, ramp=2 の検出器駆動パターン。縦軸がピクセルの出力レベルを表し、横軸が経過時間を表している。各 ramp における最後の group の drop は無視される。

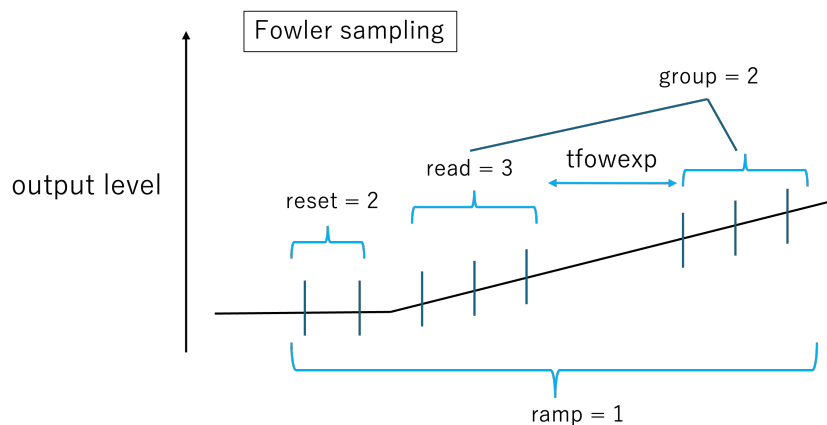


図 2.21 Fowler sampling で reset=2, read=3, drop=0, group=2, ramp=1 の検出器駆動パターン。縦軸がピクセルの出力レベルを表し、横軸が経過時間を表している。drop=0 と group=2 が自動的に設定される。tfowexp は、group1 の最終フレームの読み終わりから、group=2 の最初のフレームの読み始めまでの時間を示している。

2.5 読み出し回路に与えるパラメータ

H2RG と SIDECAR から構成される読み出し回路の中には、参照電圧等、外部から調節が可能な回路パラメータが存在する。レジスタ値をユーザーが変化させることで、パラメータ設定を変更できる。図 2.22 に、読み出し回路の概略図を示した。回路パラメータの代表的なものとして、H2RG のフォトダイオードのリセット電圧 V_{reset} 、フォトダイオードのサブストレート電圧 D_{sub} を含めたバイアス電圧、SIDECAR のプリアンプに与える参照電圧 V_{ref1} , V_{refmain} 、プリアンプゲイン (G) の設定値、プリアンプの構成、が挙げられる。フォトダイオードに入射した光子によって、空乏層の内部光電効果からホールと電子が生成される。ホールと電子が空乏層の内部電場によって移動し、フォトダイオードのサブストレート側に対するノード側の電圧が変化する。これにより、フォトダイオードのノード側に接続された画素ごとの MOSFET 回路の出力電圧

が変化する。結果、フォトダイオードのノード側の電圧変化が H2RG から出力される。また、ピクセル毎の MOSFET 回路のソース源は、共通バスを介して MOSFET から構成される定電流源に接続されている。このゲート電圧を V_{biasgate} と呼び、値が大きいくほど電流値が抑えられる。

プリアンプは V_1, V_2, V_3, V_4 の四つの入力端子を持つ。プリアンプは $V_2 - V_1$ と $V_4 - V_3$ の差分を増幅する完全差動回路になっている。プリアンプの構成 (表 2.4) によって、 V_1, V_3 をグラウンド接続するか、参照電圧を印加するかを選ぶことができる。また、プリアンプのゲインの設定によって、増幅率を変えることができる (表 2.5)。そして増幅された電圧が ADC (アナログ-デジタル変換器) に入力され、16bit のデジタル値として出力される。

また、プリアンプと ADC の間に Low Pass Filter (LPF) が配置されており、信号の高周波成分をカットする役割を果たす。

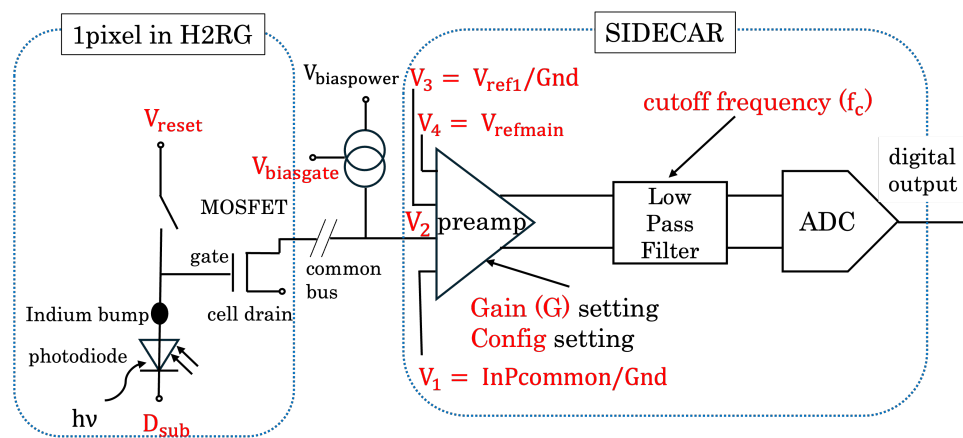


図 2.22 H2RG と SIDE CAR から構成される読み出し回路の概略図。可変パラメータを赤字で示した。

表 2.4 プリアンプ入力電圧設定と入力電圧の対応。Padp は検出器ピクセルの出力電圧、Vref1、VrefMain は SIDE CAR 内で生成される参照電圧。Gnd は SIDE CAR のグラウンドである。InPcommon がどのような電圧であるのか SIDE CAR のマニュアルから読み取れなかったが、後述する実験結果 (図 3.19) から、フォトダイオードのサブストレート側に接続する電圧 D_{sub} であると推察される。

プリアンプの構成モード	V1	V2	V3	V4
InPcommon	InPcommon	Padp	Vref1	VrefMain
VrefMain	Gnd	Padp	Gnd	VrefMain

表 2.5 プリアンプゲイン (G) の設定値と、増幅率の関係

設定値	増幅率	
#0	-3.01 dB	0.70711
#1	0.00 dB	1.00000
#2	3.01 dB	1.41421
#4	6.02 dB	2.00000
#6	9.03 dB	2.82843
#8	12.04 dB	4.00000
#10	15.05 dB	5.65685
#12	18.06 dB	8.00000
#13	21.07 dB	11.31371
#14	24.08 dB	16.00000
#15	27.09 dB	22.62742

3 H2RG 検出器性能評価

2章で述べた NINJA の実機環境下で実施した、H2RG 検出器の性能評価結果について記す。実験は、国立天文台三鷹地区の先端技術センター 3 号館 1 階の実験室で実施した。評価項目は、コンバージョンファクター、読み出しノイズ、検出器 A/D 変換出力レンジ、暗電流、グロー、線形性、パーシステンスである。H2RG と SIDECAR の回路パラメータを変化させることで性能が変化するため、NINJA の要求性能を満たすようなパラメータの探索も行った。以降特に言及がない限り、検出器の駆動温度は 80 K である。また、全ての実験のピクセル読み出しレートは $10 \mu\text{s}/\text{pix}$ (100 kHz) である。

3.1 コンバージョンファクター

コンバージョンファクター g_c は、量子化されたピクセル出力レベル [ADU] と検出した電子数 $[e^-]$ の変換係数であり、検出器の性能評価にあたって必須の値である。コンバージョンファクターの次元は通常 $[\text{ADU}/e^-]$ であるが、天文学ではその逆数である $[e^-/\text{ADU}]$ で表されることが多い。本研究はコンバージョンファクターを $[e^-/\text{ADU}]$ で表すことにする。

コンバージョンファクターはフォントランスファーカーブ (Janesick et al. 1987[15]) を描くことで導出できる。フォントランスファーカーブは、フォトンが入射した状態で得た画像から各出力レベルの平均値と分散を算出し、分散を平均信号に対してプロットすることで、ショットノイズ支配領域の傾きから変換ゲイン、低信号側の切片から読み出しノイズなどを推定する手法である。

以下では、検出器読み出し系の入力換算ノイズを、画素フォトダイオードのノードにおける電子数換算で記述する。検出器読み出し系の入力換算ノイズ $\sigma_{\text{tot}} [e^-]$ は、暗電流の影響を無視できる場合は、読み出しノイズ $\sigma_{\text{read}} [e^-]$ と光電子の生成イベントに起因するポアソンノイズ $\sigma_e [e^-]$ の合成ノイズと記述できる。したがって、

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_e^2 + \sigma_{\text{read}}^2 \quad (1)$$

と表される。暗電流の影響は十分小さいとした。そのピクセルの出力レベルを $M [\text{ADU}]$ とすると、電子のポアソン統計に則って $\sigma_e = \sqrt{g_c M} [e^-]$ と表されるから、総ノイズの出力レベルを $\Sigma [\text{ADU}] = \sigma_{\text{tot}}/g_c$ として、上式は、

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = g_c M + \sigma_{\text{read}}^2 \quad (2)$$

$$\Sigma^2 = \frac{M}{g_c} + \left(\frac{\sigma_{\text{read}}}{g_c}\right)^2 \quad (3)$$

と表される。よって、異なる光量で検出器面を照らし、 (M, Σ^2) をプロットすることにより、切片 b と傾き a から読み出しノイズ σ_{read} とコンバージョンファクター g_c が計測できる。それぞれ

$$g_c = \frac{1}{a} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{read}} = \frac{\sqrt{b}}{a} \quad (5)$$

と表される。コンバージョンファクターは、H2RG の回路特性と、SIDECAR のプリアンプに与える #0, #2 といったプリアンプゲインの設定値 (G) の組み合わせによって決まる。

本研究では、各プリアンプゲインの設定値 ($G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10, \#12, \#13, \#14$) に対してコンバージョンファクターを評価した。さらに、プリアンプの構成 (Vrefmain モード/InPcommon モード) や、バイアス電圧 ($V_{\text{reset}}, D_{\text{sub}}$)、Low Pass Filter のカットオフ周波数によるコンバージョンファクターの違いが現れるかを確かめた。最後に、H2RG の読み出しチャンネル毎のコンバージョンファクターに関する評価結果も示す。

3.1.1 試験方法

フォントランスファーカーブを描くために、様々な光量で検出器面を照射した CDS 画像を取得する必要がある。照射する光量を、Waveform Generator を用いて LED の発光回数 (ncyc) を変化させることで調節した。検出器の読み出しパラメータは、Fowler sampling で ramp=2, reset=30, read=1, drop=0, group=2, tfowexp=5.0 s とし、同じ光量で照らされた CDS 画像を各 2 セット取得する。reset=30 を挟んで約 45 秒間時間を空ける理由は、対象とする読み出しの前の観測由来のパーシステンス (後述:3.7 章) の影響を抑えるためである。LED の発光パターンは、周波数 (freq)=10000 Hz として発光回数 (ncyc) は 100 から 2000 の間を 100 刻みで設定した。LED は、各 Fowler sampling の一回目の read と二回目の read の間に発光するように設定してある。

3.1.2 評価方法

同じ ncyc (同じ明るさ) で発光させた画像セットについて、参照ピクセルを用いてバイアスレベルを補正した CDS 差分画像を 2 組作成する。そして、図 2.16 のパッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ とし、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。その上で、2 枚 CDS 画像の平均、差分画像を生成する。図 3.1 で示した赤い領域 (500×500 pixel) の中で、平均画像のマスクされなかったピクセル集団の平均を M [ADU]、差分画像のマスクされなかったピクセル集団の分散を 2 で割った値を Σ^2 [ADU²] とした。この処理を異なる ncyc (異なる明るさ) の発光について行い、各 ncyc (各明るさ) の発光に対応する (M, Σ^2) の組を得た。(M, Σ^2) をプロットし、平均 M が最も低い 5 点を用いて一次関数でフィッティングした結果を図 3.2 に示した。5 点に留めた理由は、電荷が溜まっていくにつれて空乏層が縮小し、 g_c が増加していくからである。一次関数で得られた傾きの逆数から g_c を求めた。

3.1.3 結果: プリアンプゲインの設定値依存性

プリアンプゲインの設定値 G を、 $\#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10, \#12, \#13, \#14$ に設定した条件にて計測した g_c [e⁻/ADU] の結果を図 3.3 に示す。横軸に、プリアンプゲインの設定値に対応する増幅率 (表 2.5) を、縦軸に計測したコンバージョンファクター g_c [e⁻/ADU] をプロットした。さらに、これらを $y = a/x$ でフィッティングした結果も青い波線で示した。プリアンプゲインの設定値に対応する増幅率が大きくなるにつれて、コンバージョンファクターが小さくなる反比例の傾向が見られた。なお、プリアンプゲインの増大につれて g_c [e⁻/ADU] が小さくなることは、同じ光量 [e⁻] をより細かくサンプリングすることに対応している。なお、 $G = \#15$ の結果は、SIDE CAR のレジスタに設定できなかったため、計測していない。

3.1.4 結果: プリアンプの構成依存性

SIDE CAR のプリアンプの構成を Vrefmain モードと InPcommon モードで変えた際に、コンバージョンファクターを計測した結果を図 3.4 に示す。横軸に、プリアンプゲインの設定値に対応する増幅率 (表 2.5) を、縦軸に計測したコンバージョンファクター g_c [e⁻/ADU] をプロットした。緑、赤のプロットはそれぞれ

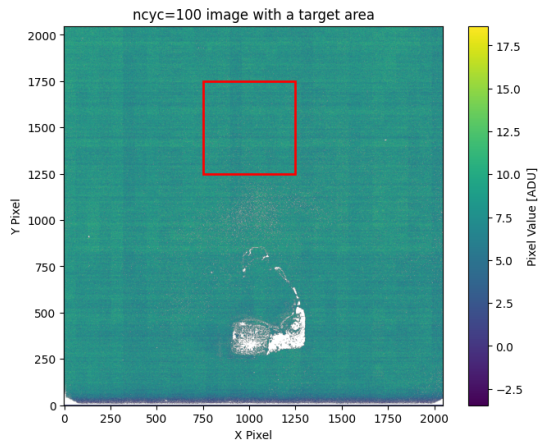


図 3.1 $G = \#0$ 設定下で二枚の CDS 画像の平均画像。赤枠の内側のピクセルを用いて、フォントランスファーカーブを描いた。

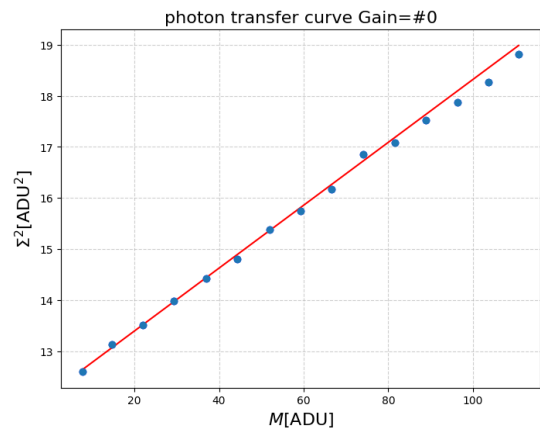


図 3.2 $G = \#0$ 設定下で求めたフォントランスファーカーブ。平均 M が最も低い 5 点を用いて一次関数でフィッティングした結果を赤線で示した。

Vrefmain モードと InPcommon モードにおける結果を表している。両者の結果に有意な差は見られないことを確認した。

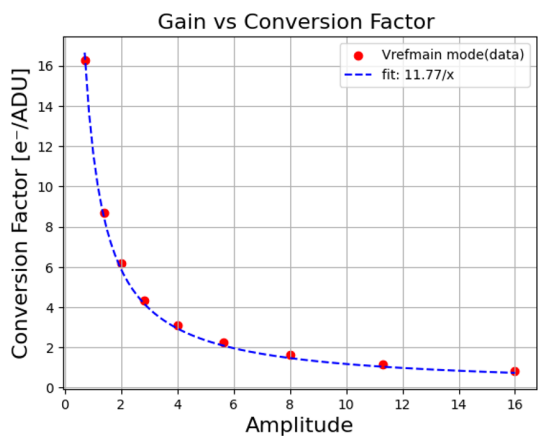


図 3.3 プリアンプゲインの設定値に対応する増幅率 (表 2.5) と、計測したコンバージョンファクター g_c [e^- /ADU] の関係。左から、 $G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10, \#12, \#13, \#14$ の結果を示している。青い波線は、 $y = a/x$ でフィッティングした結果を示す。

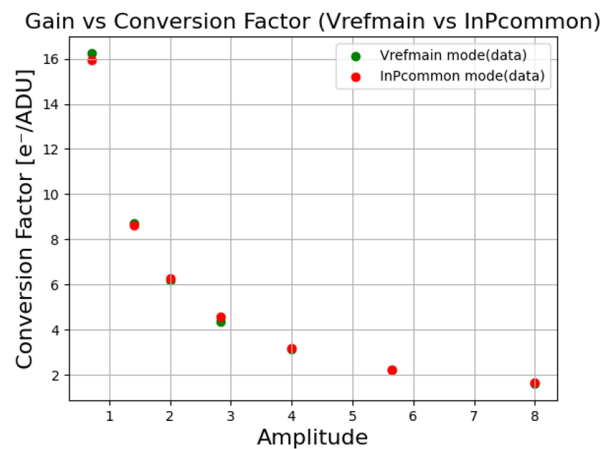


図 3.4 プリアンプゲインの設定値に対応する増幅率 (図 2.5) と、コンバージョンファクター g_c [e^- /ADU] の関係。緑、赤のプロットはそれぞれ Vrefmain モードと InPcommon モードにおける結果を表している。プロットは、左から $G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10, \#12$ の結果である。

3.1.5 結果：バイアス電圧 ($V_{\text{reset}}, D_{\text{sub}}$) 依存性

検出器に与えるバイアス電圧 ($V_{\text{reset}}, D_{\text{sub}}$) がコンバージョンファクターに与える変化を調べた。 $V_{\text{reset}} = 0.2715 \text{ V}, 0.3715 \text{ V}, 0.4715 \text{ V}$ と $D_{\text{sub}} = 0.5215 \text{ V}, 0.6215 \text{ V}, 0.7215 \text{ V}$ の組み合わせにおいて計測した、プリ

アンプゲイン設定値 $G = \#6$ における結果を、図 3.5 に示す。プリアンプの構成は V_{refmain} モードに設定し、横軸に D_{sub} 、縦軸にコンバージョンファクターをプロットしている。各点の色は、 V_{reset} の違いを表している。各点のエラーバーは、最小二乗法による一次フィット $\Sigma^2 = aM + b$ で得られる係数 (a, b) の共分散行列から傾き a の標準偏差 σ_a を求め、コンバージョンファクター $g = 1/a$ へ誤差伝播して $\sigma_g = \sigma_a/a^2$ として算出した。

図 3.5 から、 $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$ が一定値のときには、コンバージョンファクターはほぼ一定値を示している。 $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$ が大きくなると、フォトダイオードが光電子を蓄積する容量が小さくなり、フォトダイオードに蓄積される電子 ΔQ に対するフォトダイオードの電圧変化 $\Delta V = \Delta Q/C$ が増加し、 $g_c [e^-/\text{ADU}]$ が減少していると推察できる。

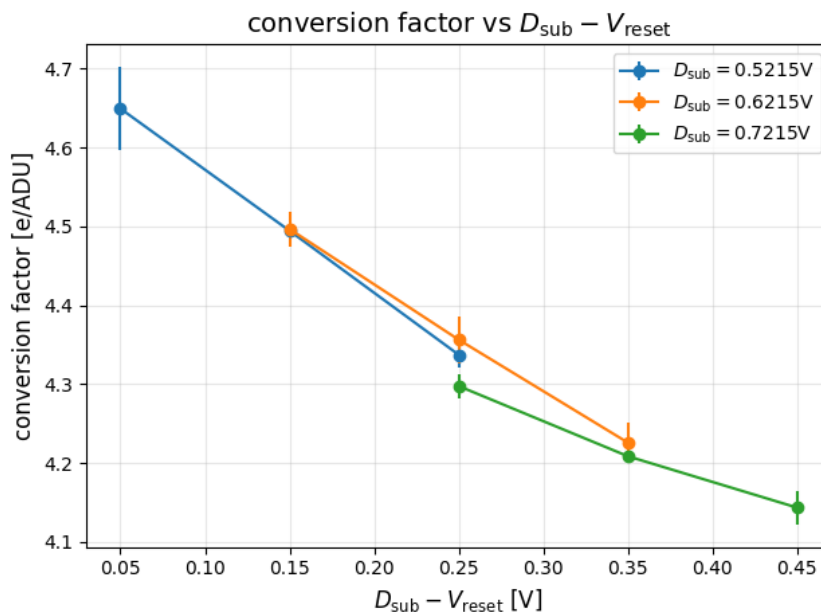


図 3.5 コンバージョンファクターのバイアス電圧 ($V_{\text{reset}}, D_{\text{sub}}$) 依存性。横軸に V_{reset} 、縦軸にコンバージョンファクターを示している。各点の色は、 V_{reset} の違いを表している。

3.1.6 結果：Low Pass Filter のカットオフ周波数依存性

コンバージョンファクター $g_c [e^-/\text{ADU}]$ の Low Pass Filter (LPF) のカットオフ周波数依存性 (f_c) を調べた結果を、図 3.6 に示した。横軸にカットオフ周波数 (f_c)、縦軸に $g_c [e^-/\text{ADU}]$ をプロットしている。右から順に、LPF のカットオフ周波数設定値 $\#2, \#6, \#7, \#8, \#13$ における結果である。 $\#8 (f_c = 0.94 \text{ MHz})$ がデフォルトの LPF のカットオフ周波数の設定値である。

カットオフ周波数設定が $\#2, \#6, \#7, \#8$ の際には $g_c [e^-/\text{ADU}]$ の有意な変化は見られなかった。一方で、LPF の設定値 $\#13 (f_c = 109 \text{ kHz})$ に設定した際に、 $g_c [e^-/\text{ADU}]$ が大きくなる。検出器のピクセルレートは 100 kHz であるため、この値より十分大きなカットオフ周波数を選択する必要があることが確かめられた。

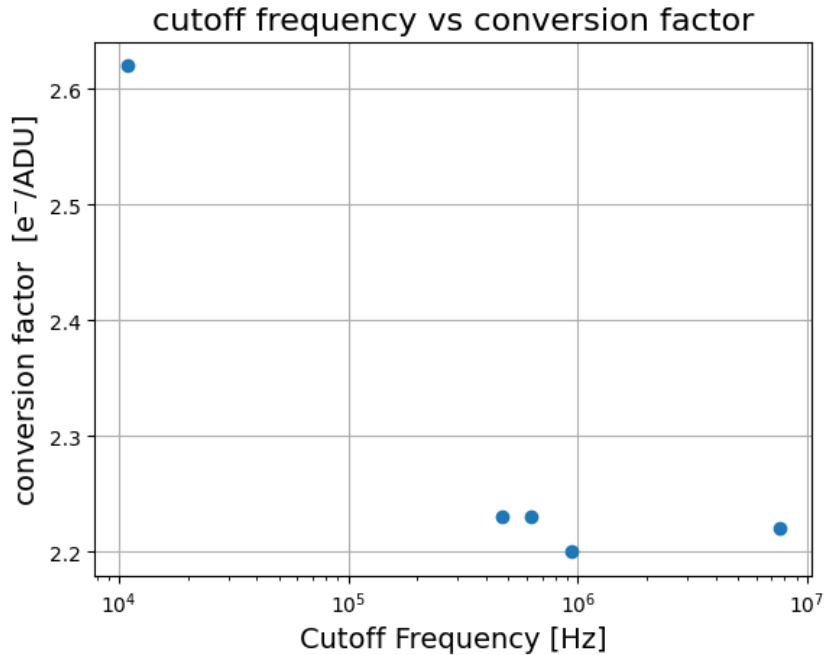


図 3.6 プリアンプゲイン設定値 $G = \#10$ における、Low Pass Filter のカットオフ周波数とコンバージョンファクター g_c [e⁻/ADU] の関係。右から順に、LPF のカットオフ周波数設定値 #2, #6, #7, #8, #13 の結果である。#8 がデフォルトの設定値である。

3.1.7 チャンネル毎のコンバージョンファクター

これまで、代表的な一つのコンバージョンファクター g_c [e⁻/ADU] を示したが、実際には読み出し回路の特性によってピクセル毎に g_c [e⁻/ADU] は異なる。読み出しチャンネル毎に g_c [e⁻/ADU] は同じと仮定して、チャンネル毎の g_c [e⁻/ADU] を求めた。評価方法は以下の通りである。

同じ ncy (同じ明るさ) で発光させた画像セットについて、参照ピクセルを用いてバイアスレベルを補正した CDS 差分画像を 2 組生成する。そして、図 2.16 のバッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ として、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。その上で、2 枚 CDS 画像の平均、差分画像を生成する。そして、 64×2048 ピクセルから構成される読み出しチャンネル (図 2.8) の一つに対し、 32×32 ピクセルの小領域を 128 個切り出した。その上で、各領域について平均画像の平均をとって M [ADU] を、差分画像の分散を 2 で割った値を Σ^2 [ADU²] として、各 ncy に関してプロットした。6 つの小領域を選んで一次関数でフィッティングした結果も同時に図 3.7, 図 3.8 に示す。灰色のプロットは残りの 122 の小領域における結果である。チャンネル番号は図 2.8 で示した通りであり、ch=#10 と ch=#25 に対して評価した結果を示している。

同じ色のプロットを見ると、どちらのチャンネルの結果に関しても図 3.2 と比べて、フィットの精度が悪いことが確かめられる。また、灰色のプロットも合わせてプロット全体を見てみても、図 3.2 のように、ある一次関数上に全てのプロットが載っているようには見えない。ゆえに、チャンネル毎のコンバージョンファクターを、高い精度で調べるには、同じ光量で照射した CDS 画像を 2 枚よりも更に増やす必要がある。

したがって、以降コンバージョンファクターは、図 3.2 で求めた方法で、各パラメータに対して代表的な一

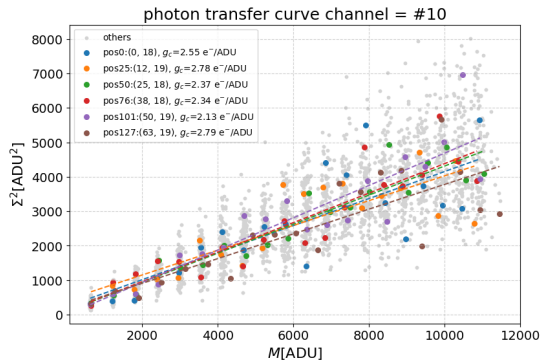


図 3.7 Gain=#10における、ch=#10の領域を用いたフォントランスファーカーブの例。6つの領域を選んで一次関数でフィッティングした直線を波線で示している。

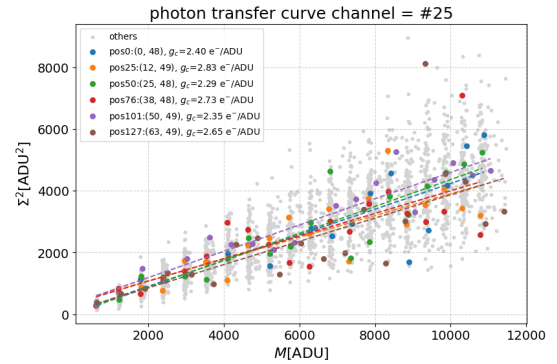


図 3.8 Gain=#10における、ch=#25の領域を用いたフォントランスファーカーブの例。6つの領域を選んで一次関数でフィッティングした直線を波線で示している。

つの値を採用する。

3.2 検出器 A/D 変換出力レンジ

入射光子 0 の状態で読み出した検出器 A/D 変換出力レベルをバイアスレベル [ADU]、フォトダイオードの飽和領域まで光電子を蓄積した際の検出器 A/D 変換出力レベルを飽和レベル [ADU] と定義する。これら二つのレベルの組をここでは検出器 A/D 変換出力レンジと呼ぶことにする。プリアンプの構成 ($V_{refmain}/InPcommon$)、プリアンプゲイン (G)、参照電圧 ($V_{refmain}, V_{ref1}$)、バイアス電圧 (V_{reset}, D_{sub})、ゲート電圧 $V_{biasgate}$ を変えることで、バイアスレベルと飽和レベルが変化する。各パラメータを変化させながら検出器 A/D 変換出力レンジを計測した。

3.2.1 試験方法

フォトダイオードに飽和領域まで光電子を蓄積する条件で画像を取得した。Fowler sampling で、 $ramp=2$, $reset=30$, $read=1$, $drop=0$, $group=1$, $tfowexp=5.0$ s の読み出しパターンを用いた。LED は、各 Fowler sampling の一回目の read と二回目の read の間に発光するように設定してある。 $V_{high} = 2.1$ V、 $freq=10000$ Hz、 $ncyc=30000$ で発光させた。

3.2.2 評価方法

各条件で得られた一枚目に読み出した画像 (バイアス画像) と二枚目に読み出した画像 (飽和画像) に対してそれぞれ、以下の処理を施す。まず、図 2.16 のバッドピクセルマップを用いてマスクするピクセルを選ぶ。そして、参照ピクセルを除いた領域で、マスクされていないピクセル集団の標準偏差 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。その上で、マスクされなかったピクセル集団に関して、バイアス画像の出力レベルの中央値をバイアスレベル [ADU]、飽和画像の出力レベルの中央値を飽和レベル [ADU] とした。

3.2.3 結果：プリアンプゲイン設定値 G と参照電圧 $V_{refmain}, V_{ref1}$ の依存性

プリアンプの構成によって検出器 A/D 変換出力レンジの変遷が異なるため、それぞれの場合について示す。

プリアンプの構成：Vrefmain モードの場合

Vrefmain モードでは、プリアンプは、検出器から出力される電圧 V_2 と参照電圧の一つ $V_{\text{refmain}} = V_4$ の差を、プリアンプゲインの設定値に応じて増幅して出力する (表 2.4)。 V_{ref1} は使わない。まず、プリアンプゲイン設定値を $G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10$ で変えた際の検出器 A/D 変換出力レンジを図 3.9 に示す。プリアンプゲインの設定値が大きくなるにつれて、バイアスレベルが減少し、飽和レベルが増加する傾向が見られ、ゲインが拡大しているのが確かめられる。また、 $G = \#8, \#10$ の飽和レベルは 65535 ADU で一定になっている。これは、ADC の出力レベルの 16bit の上限である 65535 ADU に達しているためである。

次に、図 3.10 に参照電圧 V_{refmain} を変えた際の検出器 A/D 変換出力レンジを示す。 V_{refmain} を増加させると、バイアスレベル、飽和レベルが共に減少する傾向が見られた。二つの結果から、Vrefmain モードではプリアンプは、検出器の出力電圧と参照電圧の差分を増幅していることが実験的に確かめられた。

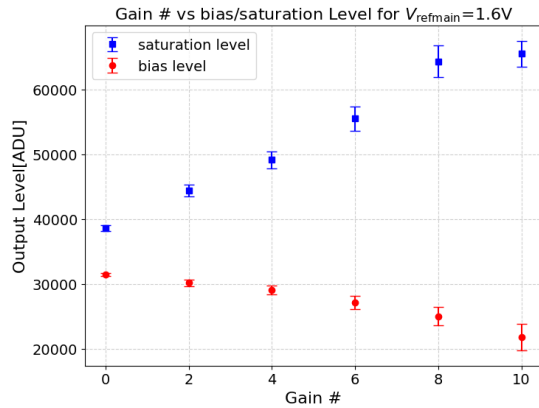


図 3.9 Vrefmain モードにおけるプリアンプゲインの設定値 (G) と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

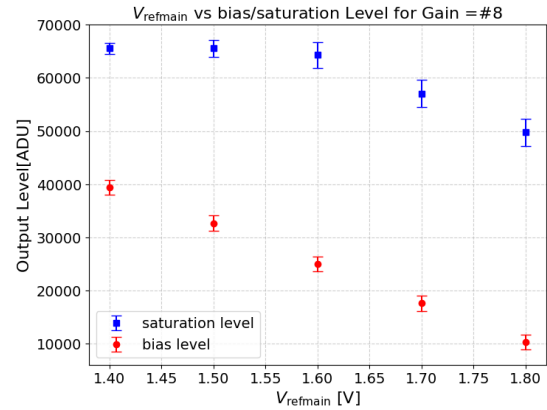


図 3.10 Vrefmain モードにおける参照電圧 V_{refmain} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

プリアンプの構成：InPcommon モードの場合

プリアンプの構成が InPcommon モードの場合において、プリアンプは検出器から出力される電圧 V_2 と、参照電圧の一つ $V_3 = V_{\text{ref1}}$ 、もう一つの参照電圧 $V_4 = V_{\text{refmain}}$ と、 $V_1 = \text{InPcommon}$ の四つを入力として持つ。そして $(V_2 - V_1)$ と $(V_4 - V_3)$ の差分がプリアンプゲインの設定値 G に応じて増幅されて出力される (表 2.4)。 $V_1 = \text{InPcommon}$ は、明示的に変更できるレジスタ値が見つからず、後述する実験結果 (図 3.19) から D_{sub} であると推察される。プリアンプゲイン設定値 G と $V_{\text{refmain}}, V_{\text{ref1}}$ を変えた際の検出器 A/D 変換出力レンジの変化を調べた。

プリアンプゲイン設定値 $G = \#6, \#8, \#10$ における検出器 A/D 変換出力レンジの変遷を図 3.11 に示す。Vrefmain モードと同じく、プリアンプゲインの設定値が大きくなるにつれて、バイアスレベルが減少し飽和レベルが増加する傾向が見られ、ゲインが拡大しているのが確かめられる。次に、図 3.12 に参照電圧 V_{refmain} を変えた際の検出器 A/D 変換出力レンジを示す。こちらもプリアンプの構成が Vrefmain モードの場合と同じく、 V_{refmain} を増加させると、バイアスレベル、飽和レベルが共に減少する傾向が見られた。一方、 V_{ref1} を増加させると、バイアスレベルと飽和レベルが共に増加する傾向が見られた (図 3.13)。

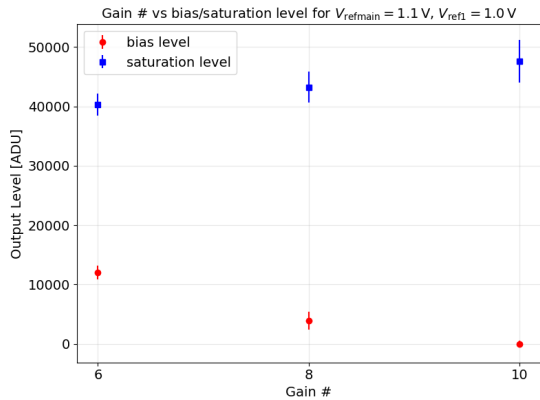


図 3.11 InPcommon モードにおけるプリアンプゲインの設定値と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

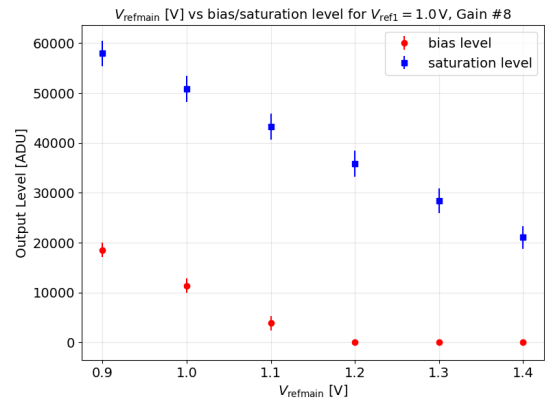


図 3.12 InPcommon モードにおける参照電圧 $V_{refmain}$ と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

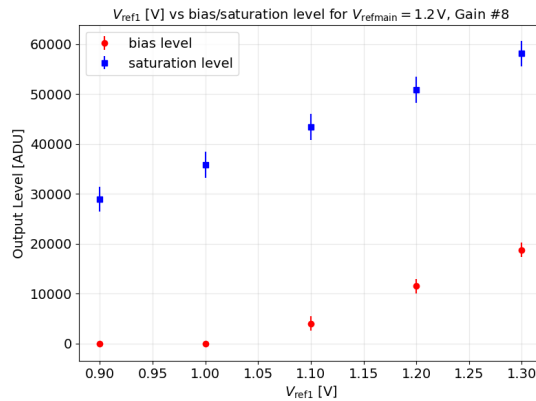


図 3.13 InPcommon モードにおける参照電圧 V_{ref1} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

3.2.4 結果：検出器バイアス電圧 V_{reset} , D_{sub} 依存性

検出器のバイアス電圧 V_{reset} , D_{sub} を変えた際の検出器 A/D 変換出力レンジを調べた。プリアンプの構成による違いが見られたため、それぞれについて記す。

プリアンプの構成：Vrefmain モードの場合

D_{sub} を固定し、 $V_{reset} = 0.2715 \text{ V}, 0.3715 \text{ V}, 0.4715 \text{ V}$ で変化させて検出器 A/D 変換出力レンジを評価した結果を図 3.14 に示す。 V_{reset} を増加させると、バイアスレベルが増加し、飽和レベルは一定を保ったまま、検出器のフルウェルが浅くなることが確かめられた。

また、 V_{reset} を固定し、 $D_{sub} = 0.5215 \text{ V}, 0.6215 \text{ V}, 0.7215 \text{ V}$ で変化させて検出器 A/D 変換出力レンジを評価した結果を図 3.15 に示す。 D_{sub} を増加させると、バイアスレベルは一定を保ちながら飽和レベルが上昇して、検出器のフルウェルが深くなることが確かめられた。

これらをまとめて立体的に表示すると、図 3.16 のようになる。 D_{sub} は飽和レベルにのみ、 V_{reset} はバイアスレベルにのみ影響を与えていることが確かめられた。

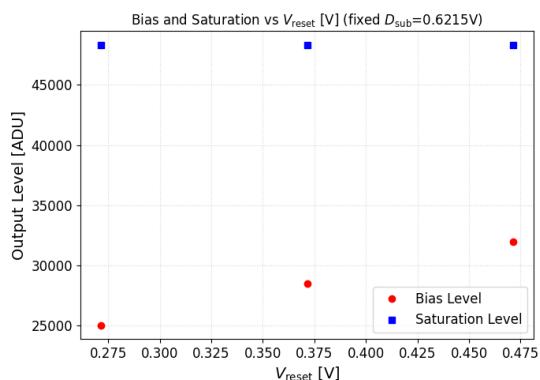


図 3.14 Vrefmain モードにおける V_{reset} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

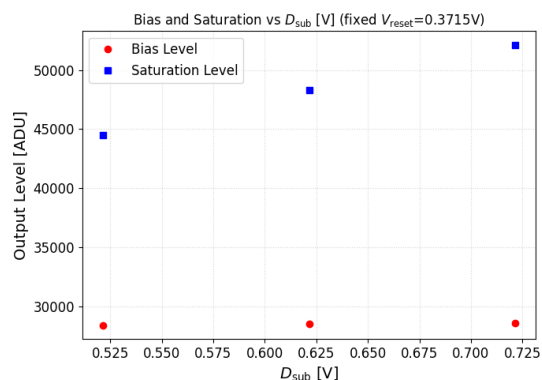


図 3.15 Vrefmain モードにおける D_{sub} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

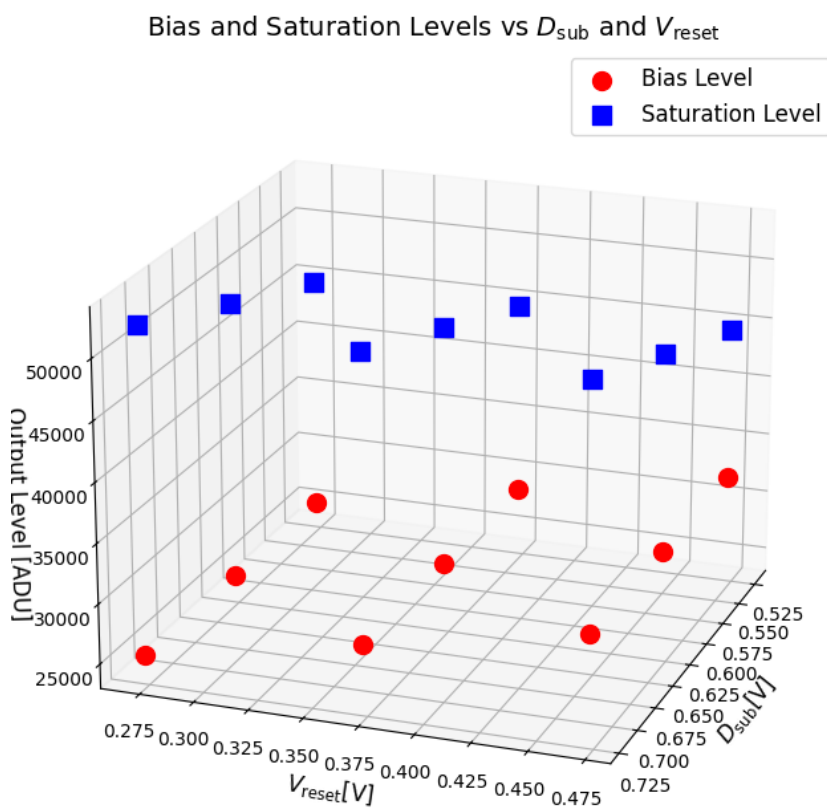


図 3.16 Vrefmain モードにおける、検出器バイアス電圧 (V_{reset} , D_{sub}) と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

プリアンプの構成：InPcommon モードの場合

D_{sub} を固定し、 $V_{\text{reset}} = 0.2715 \text{ V}, 0.3715 \text{ V}, 0.4715 \text{ V}$ で変化させて検出器 A/D 変換出力レンジを評価した結果を図 3.17 に示す。 V_{reset} を増加させると、バイアスレベルが増加し、飽和レベルは一定を保ったまま、検出器のフルウェルが浅くなることが確かめられた。

一方で、 V_{reset} を固定し、 $D_{\text{sub}} = 0.5215 \text{ V}, 0.6215 \text{ V}, 0.7215 \text{ V}$ で変化させて検出器 A/D 変換出力レンジを評価した結果を図 3.15 に示す。Vrefmain モードとは異なり、 D_{sub} を増加させると、飽和レベルが一定を保ちながらバイアスレベルが減少して検出器のフルウェルが深くなることが確かめられた。 D_{sub} の変化に関わらず飽和レベルが一定であることから、「 $V_1 = \text{InPcommon} = D_{\text{sub}}$ であり、飽和レベルでは $V_2 - V_1 = 0\text{V}$ となって、 $V_{\text{ref1}} - V_{\text{refmain}}$ の一定値がそのままプリアンプで増幅されて AD 変換されて出力されている」と推察される。

これらをまとめて立体的に表示すると、図 3.19 のようになる。飽和レベルは常に一定で、 D_{sub} と V_{reset} は共にバイアスレベルにのみ影響を与えていることが確かめられる。

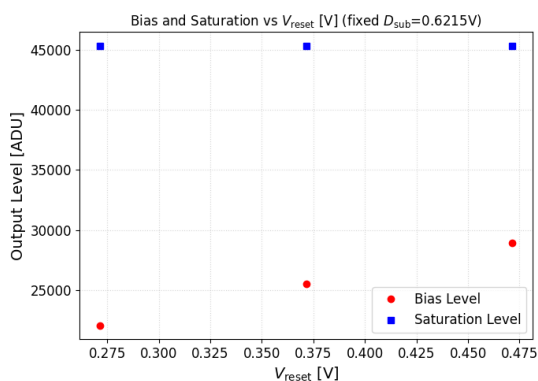


図 3.17 InPcommon モードにおける V_{reset} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

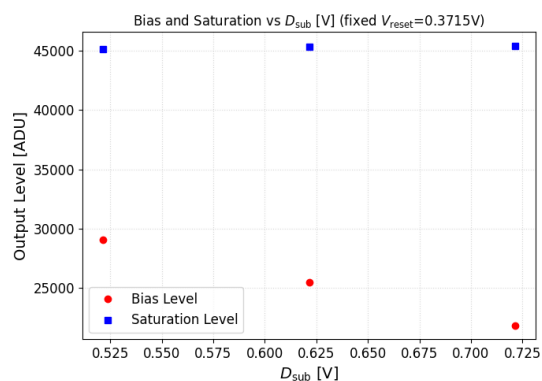


図 3.18 InPcommon モードにおける D_{sub} と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

3.2.5 結果：ゲート電圧 V_{biasgate} 依存性

ここでは、小型試験デューワーに H2RG を入れて V_{biasgate} を変化させて検出器 A/D 変換出力レンジを評価した結果を参考として提示する。小型試験デューワーの試験の詳細については、Appendix 6.1 を参照のこと。小型試験デューワーで用いた SIDECAR は、NINJA のものと異なるが、藤堂修論 (2015) [10] に拠ると、SIDECAR 毎の個性というもののはほぼ見られないため、NINJA クライオスタット下での評価結果も同様になると考えられる。 $V_{\text{biasgate}} = 1.65 \text{ V} - 2.25 \text{ V}$ を、 0.1 V 刻みで変化させながら検出器 A/D 変換出力レンジを評価した。仕様値は $V_{\text{biasgate}} = 2.05 \text{ V}$ である。

プリアンプの構成：Vrefmain モードの場合

V_{biasgate} が増加していくと、バイアス/飽和レベルは減少していく傾向が見られた (図 3.20)。ただし、その挙動は V_{refmain} を変えたときとは異なる。 $V_{\text{biasgate}} = 1.65 \text{ V} - 1.95 \text{ V}$ までは傾きがほぼ一定で両者レベルが減少しているが、 $V_{\text{biasgate}} = 1.95 \text{ V}$ と、 $V_{\text{biasgate}} = 2.05 \text{ V}$ で両者レベルはほぼ同じ値を保った後、 $V_{\text{biasgate}} = 2.15 \text{ V} - 2.25 \text{ V}$ で再び両者レベルの傾きが大きく減少している。

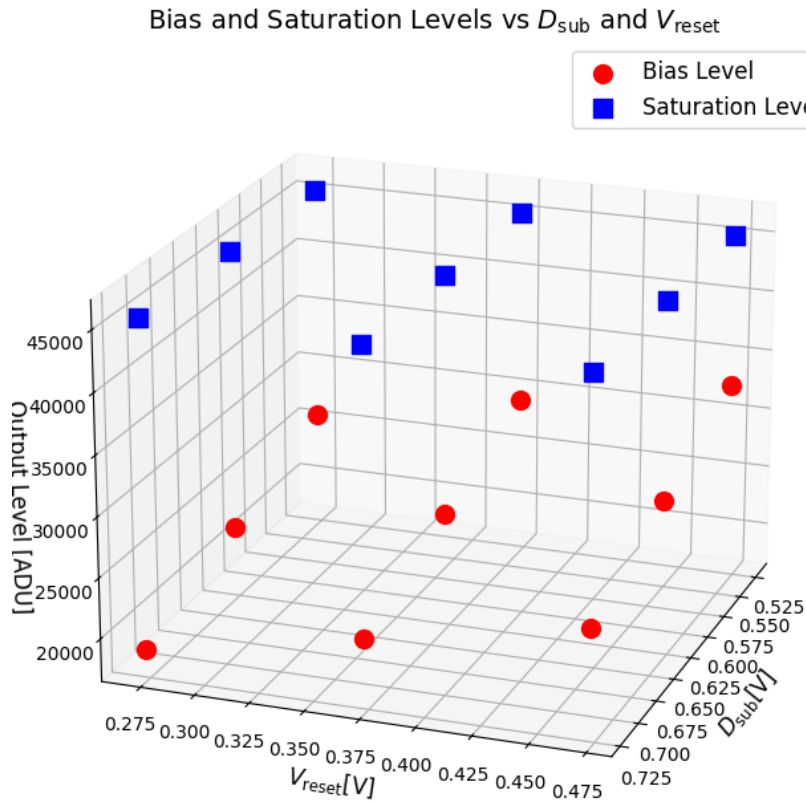


図 3.19 InPcommon モードにおける、検出器バイアス電圧 (V_{reset} , D_{sub}) と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

プリアンプの構成：InPcommon モードの場合

図 3.21 に結果を示した。 $V_{\text{biasgate}} = 1.65 \text{ V} - 1.95 \text{ V}$ までは両者のレベルは共に上昇しているが、 $V_{\text{biasgate}} = 1.95 \text{ V}, 2.05 \text{ V}, 2.15 \text{ V}$ で両者レベルはほぼ同じ値を保った後、 $V_{\text{biasgate}} = 2.25 \text{ V}$ で再び両者レベルが減少している。 V_{refmain} モードと挙動が異なるが、その理由に関しては不明である。

どちらのプリアンプの構成の場合も、 V_{refmain} を変化させた場合の検出器 A/D 変換出力レンジの変遷とは異なることが確かめられたが、 V_{biasgate} の変化による回路の挙動の理解には、より詳細な実験が必要である。以降の実験は仕様値の $V_{\text{biasgate}} = 2.05 \text{ V}$ で評価を進める。

3.2.6 フルウェルの逆バイアス電圧 ($D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$) 依存性

フルウェルの逆バイアス電圧 ($D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$) 依存性を調べた。フルウェルは、飽和レベルからバイアスレベルを引いた値にコンバージョンファクターをかけることで求められる。図 3.15 のデータを用いて、フルウェルの逆バイアス電圧 ($D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$) 依存性を図 3.22 に提示した。なお、プリアンプゲインの設定値 $G = \#4$ におけるコンバージョンファクターのバイアス電圧依存性は調べていなかったため、図 3.5 で求められた比率を元に、 $D_{\text{sub}} = 0.6215 \text{ V}$, $V_{\text{reset}} = 0.3715 \text{ V}$ におけるコンバージョンファクター $g_c = 6.19 \text{ e}^-/\text{ADU}$ を基準にして補正したコンバージョンファクターを用いた。結果を、図 3.22 に示す。

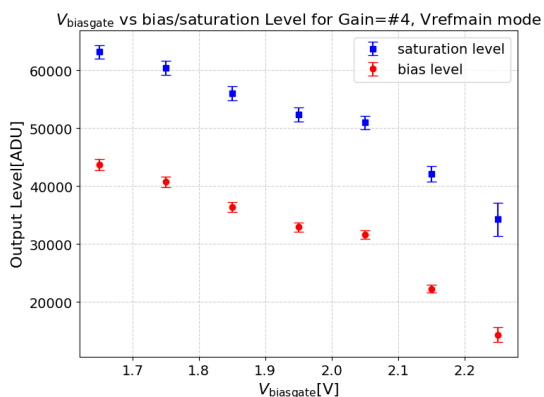


図 3.20 Vrefmain モードにおける $V_{biasgate}$ と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

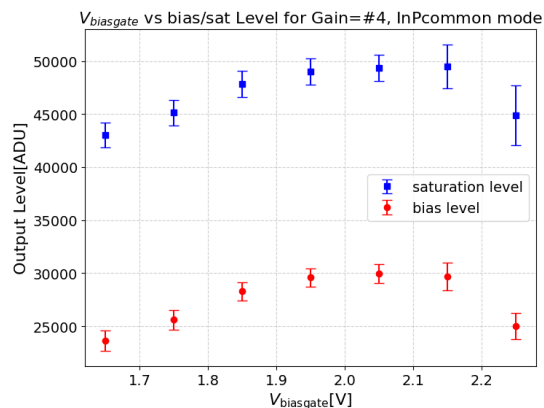


図 3.21 InPcommon モードにおける $V_{biasgate}$ と検出器 A/D 変換出力レンジの関係

図 3.22 に拠ると、リセット時の逆バイアス電圧を増加させるにつれてフルウェルが深くなる傾向が見られた。 $D_{sub} = 0.6215 \text{ V}$, $V_{reset} = 0.3715 \text{ V}$ におけるフルウェルは $\sim 123000 e^-$ であった。

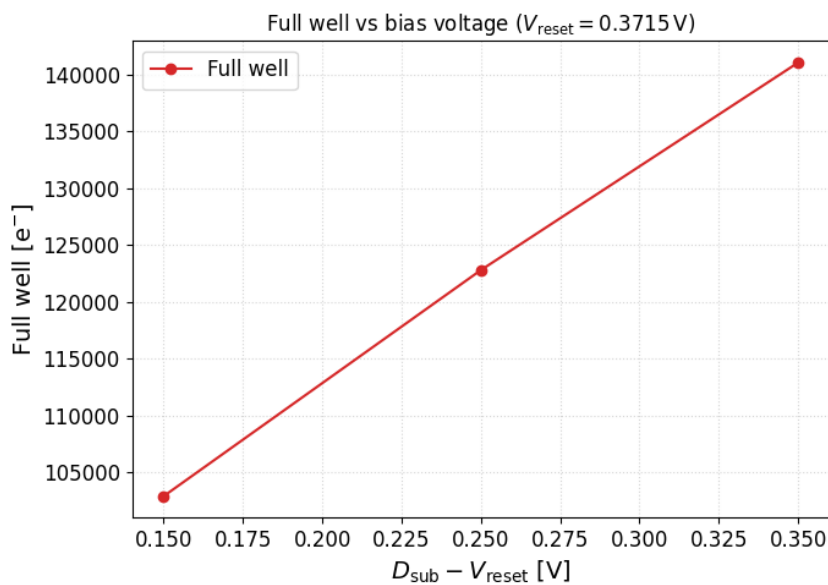


図 3.22 フルウェルの逆バイアス電圧依存性

3.2.7 検出器 A/D 変換出力レンジの変化のまとめ

ここまで、検出器 A/D 変換出力レンジの各回路パラメータ依存性を調べた。その結果を表 3.1 にまとめた。なお、プリアンプゲインを拡大したとき参照電圧 $V_{refmain}$, V_{refl} の値によって、バイアスレベルの変動は変わるため、飽和レベルとバイアスレベルの差が拡大すると記した。また、プリアンプの構成が Vrefmain モードの際に、 V_{refl} は参照されないため、—と表現した。

これらのパラメータを適切な設定にすることで、バイアスレベルと飽和レベルを ADC 出力範囲の 0 ADU

表 3.1 回路パラメータの変化に対する検出器 A/D 変換出力レンジの変化

プリアンプの構成	Vrefmain モード		InPcommon モード	
	bias level	saturation level	bias level	saturation level
V_{refmain} 増加	減少	減少	減少	減少
V_{refl} 増加	—	—	増加	増加
V_{biasgate} 増加	減少	減少	$V_{\text{biasgate}} \sim 2.15 \text{ V}$ まで増加、以降減少	$V_{\text{biasgate}} \sim 2.15 \text{ V}$ まで増加、以降減少
V_{reset} 増加	増加	一定	増加	一定
D_{sub} 増加	一定	増加	減少	一定
Gain 拡大	saturation level – bias level が拡大		saturation level – bias level が拡大	

- 65535 ADU に収める必要がある。次のセクション以降、これらの変化を念頭に置きながら検出器の別の性能を評価する。

3.3 読み出しノイズ

読み出しノイズとは検出器を読み出す際に発生する電気的なランダムノイズであり、原理的に取り除くことが出来ない。1.3 章で述べたとおり、NINJA の目標感度達成には読み出しノイズの低減が鍵となり、目標は $4e^- \text{ rms}$ である。本研究では、プリアンプゲインの設定値 G 、参照電圧 V_{refmain} と Low Pass Filter のカットオフ周波数 f_c を変えながら読み出しノイズを評価した。

検出器に与えるバイアス電圧は $V_{\text{reset}} = 0.3715 \text{ V}$, $D_{\text{sub}} = 0.6215 \text{ V}$ とした。また、プリアンプの構成は Vrefmain モードに設定した。InPcommon モードでは、CDS 画像の読み出しチャンネル間の出力レベルが高くなる場合があることと、パラメータを絞って評価するためである。本セクション以降の実験は全て、プリアンプの構成を Vrefmain モードにして試験した。

3.3.1 試験方法

ダーク環境下で 2 枚の CDS 画像を読み出す。Fowler sampling で reset=1, read=1, drop=0, group=2, ramp=2, tfowexp=0 s に設定して、LED は発光しないようにした。なお、3.1 章で示したように、フォトントランスファーカーブから読み出しノイズは計算できるが、フィッティングの外挿による計測では精度が劣るため、ダーク環境下で個別に評価した。

3.3.2 評価方法

同じ回路パラメータの条件で評価した CDS 差分画像を二枚用意する。そして、二枚の CDS 差分画像の差分画像を一枚生成して図 2.16 のパッドピクセルマップでマスクするピクセルを選ぶ。マスクされずに残ったピクセルのうち、標準偏差 3σ を超えたピクセルもマスクする。最終的にマスクされずに残ったピクセルの標準偏差を $\sqrt{2}$ で割った値に、そのプリアンプゲイン設定値のコンバージョンファクター g_c をかけたものを CDS 読み出しノイズ σ_{CDS} とした。検出器を一回読み出した際に発生する読み出しノイズ σ_{read} を比べると、

CDS 読み出しノイズは二枚の画像の差分画像のノイズなので $\sigma_{\text{CDS}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{read}}$ と表される。しかし、先述の通り赤外線検出器は kTC ノイズを抑えるために、基本的に CDS 画像を用いる。したがって、以降特に断りがない限り σ_{CDS} を読み出しノイズと呼ぶ。

3.3.3 結果：プリアンプゲイン設定値 G と参照電圧 V_{refmain} 依存性

図 3.23 に、プリアンプゲイン設定値 G と参照電圧 V_{refmain} を変えた際の CDS 読み出しノイズの測定結果を示す。横軸にプリアンプゲインの設定値に対応するコンバージョンファクター g_c を、縦軸に CDS 読み出しノイズ σ_{CDS} をプロットした。色の違いは、それぞれ異なる参照電圧 V_{refmain} の結果を表している。まず、横軸左に向かうにつれてゲインが大きくなっていることに対応し、読み出しノイズが抑えられている傾向が確かめられる。さらに、同じプリアンプゲイン設定値でも参照電圧 V_{refmain} の違いで読み出しノイズが変化していることが分かり、 $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}$ で最小となっている。

次に、図 3.24 に、プリアンプゲイン設定値 $G = \#10$ における CDS 読み出しノイズと検出器 A/D 変換出力レンジの関係を示す。横軸に V_{refmain} 、左の縦軸にその参照電圧設定におけるバイアス/飽和レベルを示し、右の横軸に読み出しノイズを示している。 $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}$ の時にバイアスレベルが ADC の上限の半分付近 ($\sim 32758 \text{ ADU}$) の時に読み出しノイズが最小になる傾向が見られた。

バイアスレベルが ADC の上限出力レベルの半分で最小となる理由としては、以下のように考えられる。SIDE CAR の設定で、ユーザーは 4 つの入力をすべてグラウンド接続できる。その際に一枚読み出して得られる画像の出力レベル [ADU] は、ADC の上限出力の半分付近であることを確認した。つまり、H2RG からの出力がある際に、ADC の上限出力レベルの半分付近にバイアスレベルが位置しているとき、Vrefmain モードでは SIDE CAR の入力 $V_2 - V_4(V_{\text{refmain}}) \approx 0 \text{ V}$ となっている。したがって、バイアスレベルが ADC の上限出力の半分付近から離れているとき、入力電圧 $V_2 - V_4$ の絶対値が大きくなっていることを意味する。 $V_2 - V_4(V_{\text{refmain}})$ が 0 V に近い際にはノイズが抑えられるが、絶対値が大きくなるにつれてノイズが大きくなっていると推察できる。

3.3.4 結果：Low Pass Filter のカットオフ周波数依存性

Low Pass Filter のカットオフ周波数 f_c を変えた際の読み出しノイズの変化を図 3.25 と、図 3.26 に示す。図 3.25 では、プリアンプゲイン設定値 $G = \#10$ での LPF のカットオフ周波数の設定値 $\#2, \#6, \#7, \#8, \#13$ の場合における読み出しノイズを示した。図 3.26 では、LPF の設定値 $\#13$ を除いて、各参照電圧 $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}, 1.6 \text{ V}, 1.7 \text{ V}$ の場合で読み出しノイズを示した。

まず、図 3.25 を見ると、Low Pass Filter (LPF) のカットオフ周波数設定値 $\#13$ ($f_c \sim 109 \text{ kHz}$) の場合において、他の設定値に比べてノイズが大きい。検出器の読み出しピクセルレート 100 kHz よりも十分大きいカットオフ周波数を用いる必要があることが確かめられた。

また、一般に LPF のカットオフ周波数を上げると、LPF の入力信号の高周波成分をより拾うようになるため、ノイズが大きくなることが予測される。図 3.26 を見ると、 $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}$ の際には高周波に向かうにつれて僅かにノイズの増加傾向が見える。しかし、 $V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}$ の場合カットオフ周波数設定 $\#6, \#7, \#8$ において、カットオフ周波数が増加するにつれて、一時的にノイズが減少する傾向は説明できない。

したがって、Low Pass Filter のカットオフ周波数がノイズに与える影響は二種類あることが読み取れる。

1. f_c が高い範囲では、高周波ノイズ成分を拾うことでノイズが増加する傾向
2. f_c が低い範囲では、増加に伴い、原因不明だがノイズが抑えられる傾向

原因に関して、次のセクション 3.3.5 で考察する。

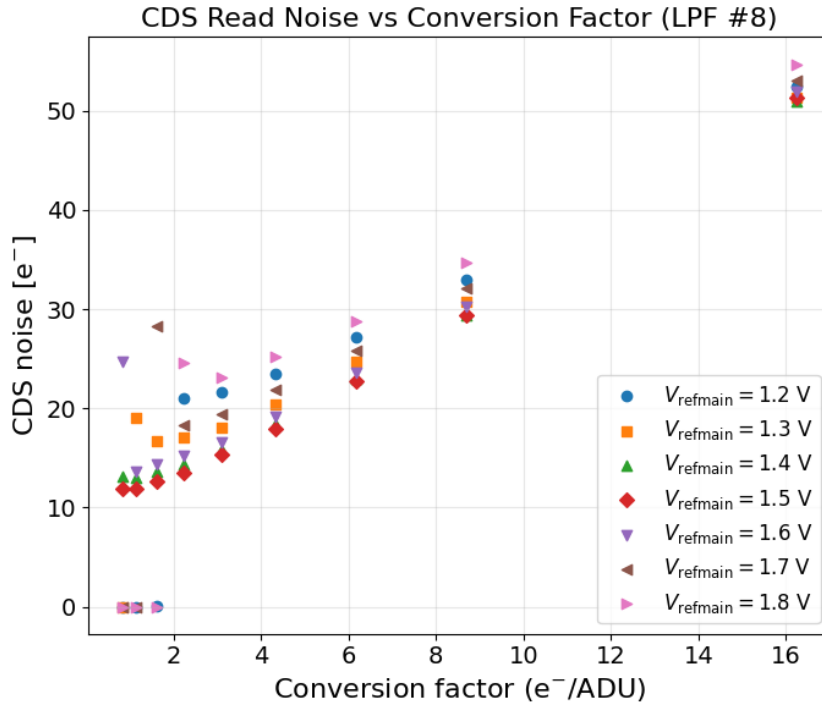


図 3.23 CDS 読み出しノイズのプリアンプゲイン設定値と参照電圧 V_{refmain} 依存性。Low Pass Filter の周波数設定はデフォルト (#8) である。右からプリアンプゲイン設定値 $G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10, \#12, \#13, \#14$ である。異なる色のプロットは、異なる参照電圧における結果を示している。なお、グラフの左側でノイズが跳ね上がっているように見えるプロットは、バイアスレベルが ADC の上限/下限付近で、ピクセルによっては 0 ADU や 65535 ADU にリミットされて、正確に読み出しノイズが評価できていないために起こっている。同じ理由で高ゲインでプロットされていないものは、計算上読み出しノイズが $0e^-$ rms になってしまうため省いてある。

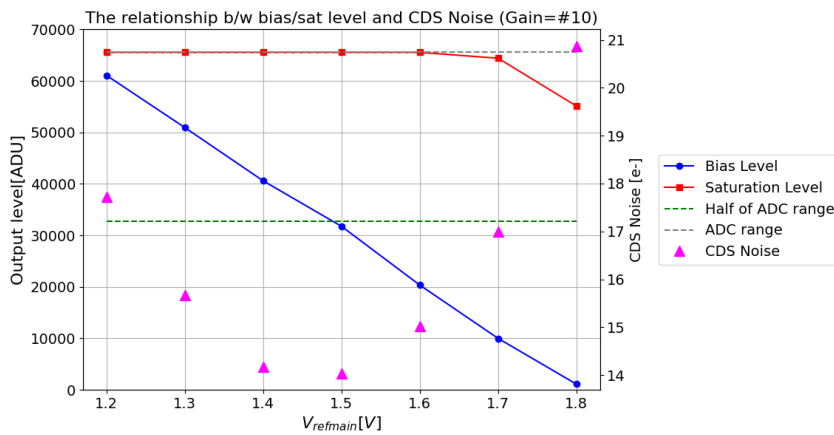


図 3.24 $G = \#10$ 設定値における、 V_{refmain} を変化させた際の CDS 読み出しノイズと検出器 A/D 変換出力レンジの変化

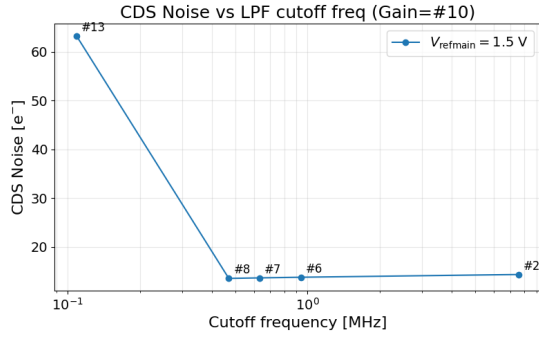


図 3.25 $G = \#10$ 設定値における、CDS 読み出しノイズの LPF カットオフ周波数依存性

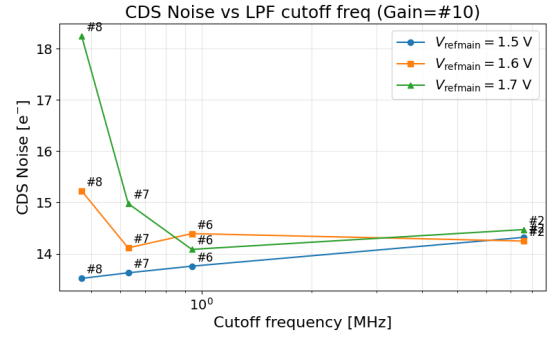


図 3.26 $G = \#10$ 設定値における、 V_{refmain} 毎の CDS 読み出しノイズの LPF カットオフ周波数依存性。LPF の設定値 #13 は除いてある。

3.3.5 読み出しノイズの成分解析

読み出しノイズの発生源はいくつか考えられる。H2RG 内部のフォトダイオードと読み出し回路、SIDECAR 内部のプリアンプ回路、そして ADC が挙げられる。ADC 以前で生じる入力換算読み出しノイズを $\sigma_e [e^-]$ と表し、ADC で発生するノイズ $\Sigma_{\text{ADC}} [\text{ADU}]$ が二乗和で伝播するモデルを仮定すると、読み出しノイズ $\sigma_{\text{CDS}} [e^-]$ は以下の式で表される (Todo et al. 2014)[16]。

$$\sigma_{\text{CDS}} = \sqrt{\sigma_e^2 + (g_c \Sigma_{\text{ADC}})^2} \quad (6)$$

LPF の設定 #8 の場合において図 3.23 のプロット点のうち、式 (6) で $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}$ と $V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}$ の場合において、 $G = \#0, \#2, \#4, \#6, \#8, \#10$ のプロットを用いてフィッティングした結果を図 3.27 に示した。 $V_{\text{refmain}} = 1.5 \text{ V}$ の際 $\sigma_e = 11.9 e^- \text{ rms}$ 、 $V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}$ の際に $\sigma_e = 17.0 e^- \text{ rms}$ となり、 V_{refmain} の違いで σ_e が大きく変化していることが確かめられる。対して、ADC の固定ノイズはともに $\Sigma_{\text{ADC}} = 3.1 \text{ ADU}$ で有意な差は見られない。

LPF の設定 #6 の場合において式 (6) で同様にフィッティングした図を、図 3.28 に示した。すると、 V_{refmain} に依らず $\sigma_e, \Sigma_{\text{ADC}}$ はほぼ一定である。したがって、 $V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}$ の際には、LPF のカットオフ周波数を上げる ($f_c = 0.47 \text{ MHz}$ から $f_c = 0.94 \text{ MHz}$) ことで、ADC 以前で発生するノイズ成分 σ_e が抑えられていることが確かめられた。これは、前セクション 3.3.4 で述べた LPF の読み出しノイズに与える二つ目の効果は、ADC 以前の回路に起因していることを意味している。

一方で、具体的なメカニズムの理解には、より詳細な SIDECAR の構造の理解が必要である。しかし、最適な回路パラメータを見つける本研究の目的に則り、これ以上の考察は行わない。

3.3.6 マルチサンプリング

一般に n 枚の画像を重ね合わせて平均画像を出力すると、元の読み出しノイズ σ_{CDS} に対して、実効的な読み出しノイズ σ_{eff} は以下のように表される。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{n\sigma_{\text{CDS}}^2}}{n} = \frac{\sigma_{\text{CDS}}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

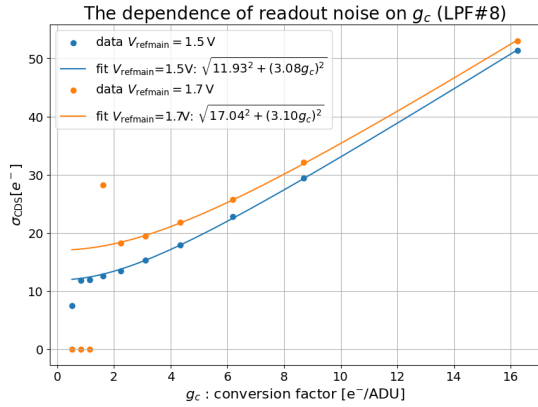


図 3.27 LPF 設定値 #8(デフォルト ; $f_c \sim 0.47$ MHz) における読み出しノイズのフィッティング結果

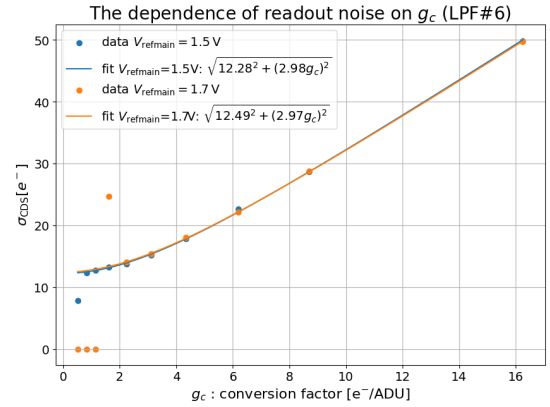


図 3.28 LPF 設定値 #6($f_c \sim 0.94$ MHz) における読み出しノイズのフィッティング結果

n 枚全ての画像が独立であるとして、重ね合わせるとノイズの二乗伝播 $\sqrt{\sum_1^n \sigma_{\text{CDS}}^2}$ で伝播する。そして、重ね合わせた画像を n で割って平均画像を出力したことに相当する。今回、上記で設定したパラメータ下で Fowler sampling における実効的な読み出しノイズを評価した。

画像のサンプリングパラメータ自体は Ramp sampling を用いて、256 枚の画像を 1.475 s 毎に連続で読み出す。reset=1, read=256, drop=0, group=1, ramp=2 に設定した。そして、 n 回読み出し Fowler sampling における読み出しノイズは以下のように評価した。

まず、256 枚の ramp セットにおいて、最初から数えて $2n$ 回読み出した画像を選ぶ。そして、前半の n 枚と後半の n 枚に分けて、それぞれの平均画像を生成する。次に、参照ピクセル処理を施しながら差分画像を生成する。得られた差分画像に対して、図 2.16 のパッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ として、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。同じ処理を二つの ramp セットに対して実施する。得られた二つの差分画像の差分画像を一枚生成し、マスクされずに残ったピクセルの標準偏差を $\sqrt{2}$ で割った値に、コンバージョンファクターをかけたものを、 n 回 Fowler sampling における実効的な読み出しノイズとした。

マルチサンプリングによる読み出しノイズの評価結果を図 3.29 に示した。横軸が n 回読み出しに相当し、 $n=1, 2, 4, 8, 16, 20, 32, 64, 128$ に対して評価した結果を青点でプロットした。縦軸が実効的な読み出しノイズである。黒の波線は、理論的に予測される $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{CDS}}/\sqrt{n}$ の関係を示している。 $n=8$ あたりまでは理論値と一致しているが、それ以降で減衰曲線は緩やかになっている。理由として、読み出しノイズに $1/f$ ノイズ成分が含まれていること。そして読み出し回数の増加に伴う積分時間の増加により、暗電流の影響をより強く受けるようになることが挙げられる。

一方で、NINJA の目標感度を達成するための読み出しノイズの要求値 ($4 e^- \text{ rms}$) を赤線で示したが、 $n=20$ 回読み出しで要求値を満たすことが確かめられた。

3.4 暗電流

フォトダイオード内のキャリアが熱運動により、入射フォトンが 0 でも電荷が蓄積されてしまい、これを暗電流と呼ぶ。NINJA の目標感度を達成するためには、暗電流が $0.05 e^-/\text{s}/\text{pix}$ 以下である必要がある。

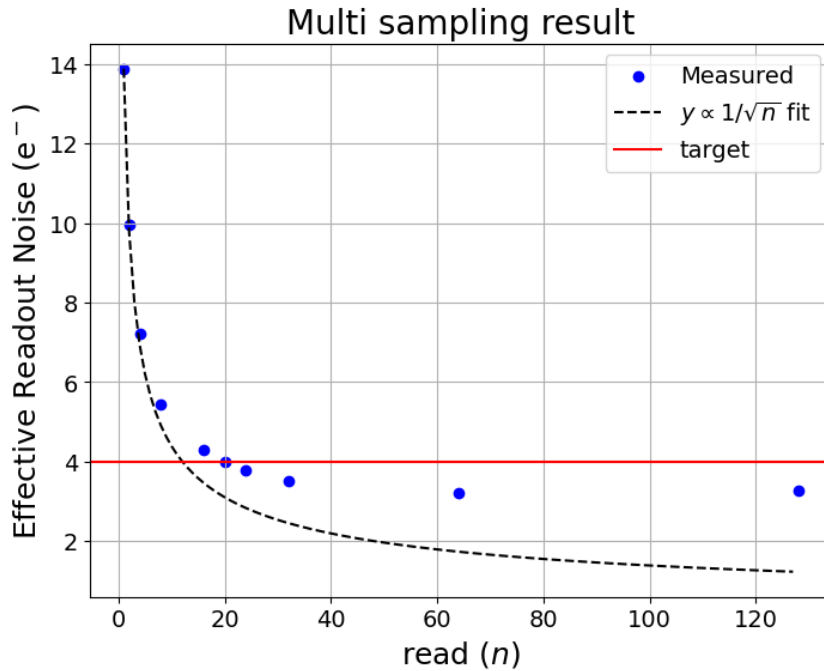


図 3.29 最適化パラメータセット (5.1) 下での、Fowler sampling における実効的な読み出しノイズの評価結果

NINJA で用いる H2RG に関して暗電流を評価した。

3.4.1 試験方法

赤外線が入射しない環境下（ダーク環境下）にて 1 分毎に 29 分間の積分を行った。読み出しパターンとして、Ramp sampling で、reset=1, read=1, drop=39, group=30, ramp=1 とした。LED の発光は無いように設定した。また、検出器に与えるバイアス電圧は $V_{\text{reset}} = 0.3715 \text{ V}$, $D_{\text{sub}} = 0.6215 \text{ V}$ とした。検出器の駆動温度は 80K である。

3.4.2 評価方法

二つの方法で暗電流の評価を試みた。一つ目の方法は以下の通りである。最初に読み出した画像と、残りの 29 枚の画像の参照ピクセル処理済みの差分 CDS 画像を 29 枚生成する。そして、29 枚の差分 CDS 画像に対して図 2.16 のバッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ とし、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。マスクされずに残ったピクセルの出力レベルの中央値を求める。時間経過に伴う出力レベルの中央値の変化を一次関数でフィッティングし、その傾きを暗電流とする方法である。

二つ目は、ピクセル毎の暗電流を求める方法である。まず一つ目の方法と同様に 29 枚の差分 CDS 画像を生成する。そして各ピクセルについて、29 分間の時間経過に伴う出力レベルの変化を線形フィッティングで傾きを求める方法である。

3.4.3 結果

一つ目の方法で求めた暗電流のプロットは図 3.30 の通りである。横軸はフレームナンバーで、縦軸が CDS 画像の中央値である。1 フレームは 59.2 秒に対応する。これを線形フィットした結果、 $g_c = 2.23 e^-/ADU$ を用いて求めた傾きから求めた暗電流の値は $0.028 e^-/s/pix$ である。

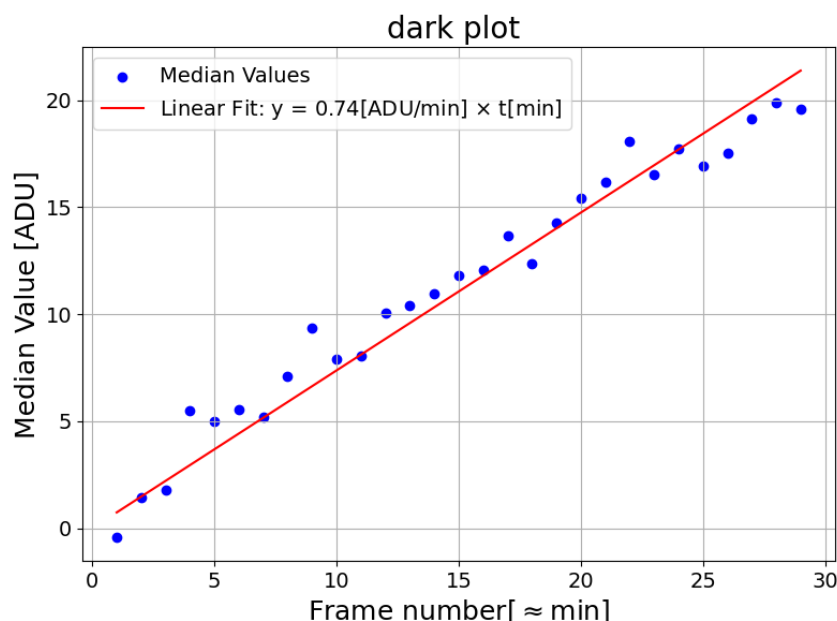


図 3.30 29 枚の CDS 画像の中央値を時系列にプロットしたグラフ

一方で、二つ目の方法で求めたピクセル毎の暗電流マップを、図 3.31 に示した。ピクセル毎ではなく、一つのコンバージョンファクターを用いてエレクトロン換算しているため、チャンネル間の境界が見えている。さらに、これをヒストグラムにしたものを図 3.32 に示した。ヒストグラムの中央値は $0.013 e^-/s/pix$ であり、H2RG のカタログ値の $0.05 e^-/s/pix$ よりも大部分は低い値を示していることが確かめられた。一方で、一つ目の方法で求めた値よりも小さな値となった理由は不明である。しかし、いずれの方法でも要求値の $0.05 e^-/s/pix$ を下回っていることが確認できた。したがって、暗電流が NINJA の感度をリミットすることはない。

3.4.4 参考：暗電流の検出器駆動温度依存性

検出器の駆動温度を、80 K, 75 K, 70 K, 65 K の 4 段階に変えて暗電流の評価を試みた。しかし、結論として、本測定範囲内において暗電流の明確な温度依存性は確認できなかった。

図 3.33 に、各温度における 28 分間積分の CDS 画像を示した。実験は 80 K から 65 K に向けて 5 K ずつ温度を下げて、それぞれの画像は温度が一定になって 55 分待ってから読み出したものである。80K の場合における暗電流画像は、図 3.31 の場合と比べて、K バンド側のエシェルフォーマット、画像左上の霞状のパターン、中央を横切る横線が見える。図 3.33 の左上の画像は、直前の実験で 900 秒間読み出しを行ってから十分時間を空けずに読み出しを始めて得たものであり、75 K 以降の実験でエシェルフォーマットが徐々に薄く

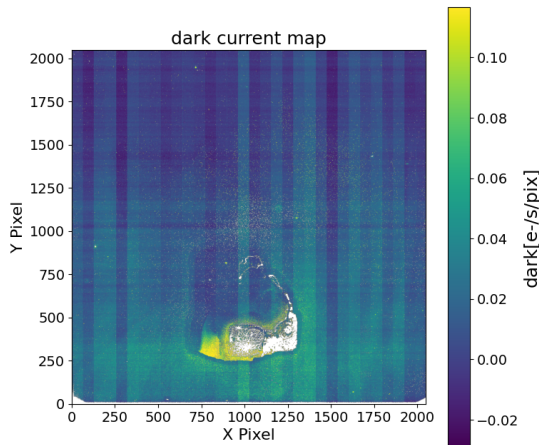


図 3.31 ピクセル毎の暗電流を求めた画像

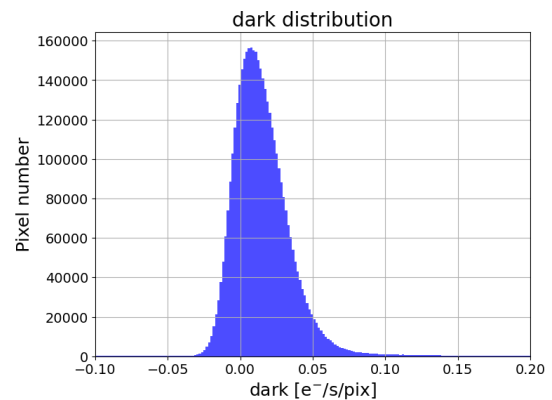


図 3.32 ピクセル毎の暗電流のヒストグラム

なっているため、パーステンスの影響(後述:3.7章)を受けていたことが確認できる。したがって、図 3.31 と大幅に異なる画像になっている。一方で、75 K 以降の画像に関して見られる画像中央から左上に見られる不明瞭なパターン(以降、霞状パターンと呼称)は負の値を示している。よって、霞状パターンは NINJA 内部での迷光が原因ではなく検出器固有の現象である。原因については不明であり、霞状パターンの再現性を今後詳しく調べる必要がある。

今後の検証においては、パーステンスの影響を排除するため、暗電流測定前に 1 時間以上の待機時間を設ける。さらに、温度変更後の待ち時間を 55 分よりも長く設定した上で、異なる温度環境下での暗電流画像の取得を行い、霞状パターンの再現性を確認する必要がある。

3.5 グロー

検出器を読み出す毎にマルチプレクサが発光する現象をグローと呼ぶ。穂満修論(2023)[8]で評価された、InGaAs から構成される赤外線検出器の典型的な値は、 $0.1 e^-/\text{read}$ である。検出器毎に個性があるため、NINJA で用いる H2RG に関してグローを評価した。

3.5.1 試験方法

ダーク環境下で、積分時間を揃えて読み出した二つのデータセットからグローの成分を抽出する。一つ目は、Fowler sampling で $\text{reset}=1, \text{read}=1, \text{drop}=0, \text{group}=2, \text{ramp}=1, \text{tfowexp}=148 \text{ s}$ の読み出しパターンで読み出す。二つ目は、Ramp sampling で $\text{reset}=1, \text{read}=102, \text{drop}=0, \text{group}=1, \text{ramp}=1$ の読み出しパターンを用いる。LED の発光は無しに設定した。

3.5.2 評価方法

評価方法の概略図を図 3.34 に示した。積分時間を揃えた Fowler/Ramp それぞれのサンプリングの最後と最初の画像から CDS 差分画像をそれぞれ生成する。すると、Fowler sampling から得られた CDS 画像は、グロー 2 回と 150 s の暗電流が含まれているのに対し、Ramp sampling から得られた CDS 画像にはグロー 102 回と 150 s の暗電流が含まれている。これらの差分画像を生成し、100 で割った値をコンバージョンファクターをかけて電子換算したグロー画像を生成した。そして、図 2.16 のバッドピクセルマップを用

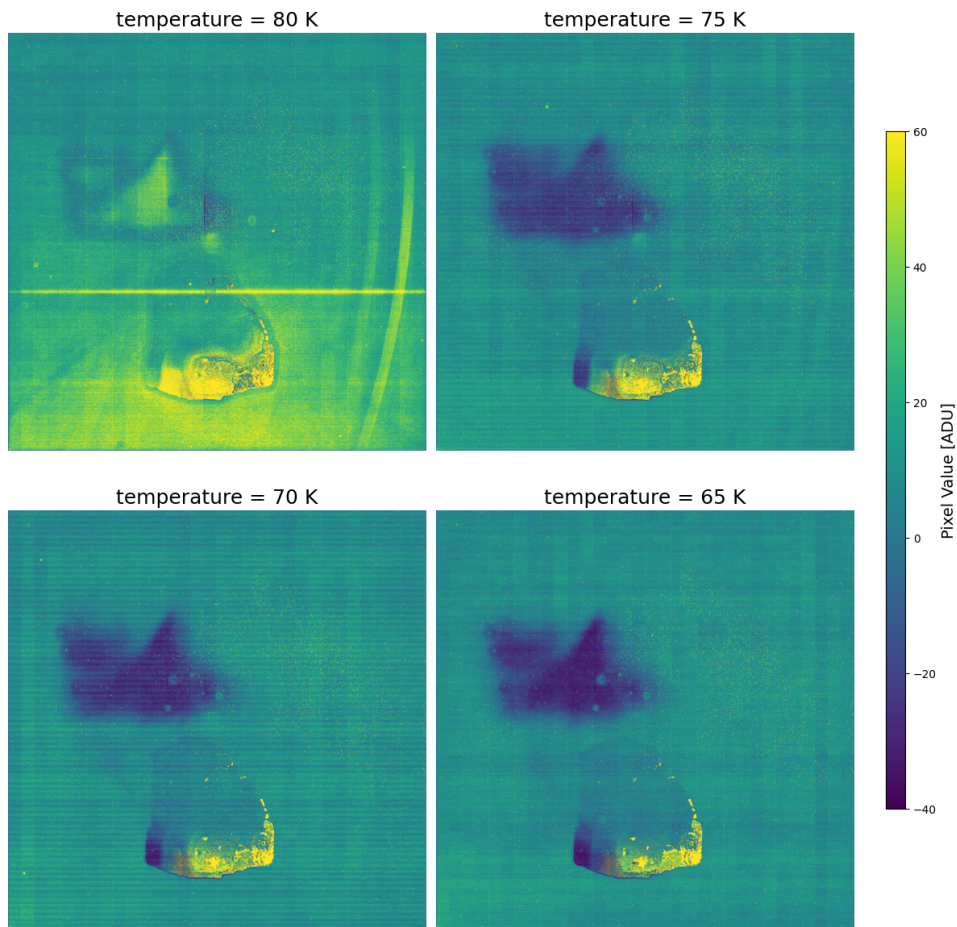


図 3.33 検出器駆動温度毎の 28 分の CDS 画像

いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ として、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。

3.5.3 結果

結果は図 3.35 のようになった。マスクされたピクセルは白く表示されている。抽出されたグローの画像は、ほぼ読み出しノイズ画像と同等である。さらに、ピクセルの出力レベルのヒストグラム (図 3.36) を見ても、正の方向にシフトしていない。したがって、100 回読み出しでは NINJA の H2RG ではグローは見られないことが確かめられた。

3.6 線形性

検出器にフォトンが入射し続け、空乏層が狭くなって飽和状態に近づくにつれて、逆バイアス電圧が減少し PD の内蔵容量が変化することでコンバージョンファクター [e^-/ADU] が増加していき、入射フォトン数と生成する電子の数との間に成り立っていた線形関係が崩れる。線形性が成り立つ範囲を調べ、非線形領域において補正を試みた。

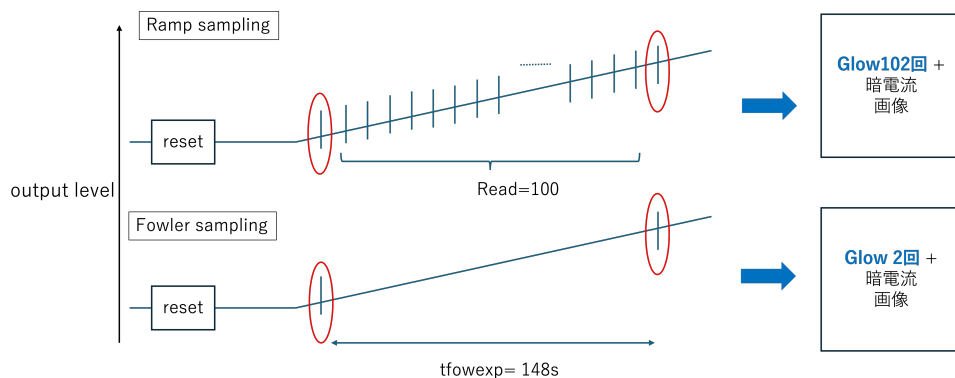


図 3.34 グロー評価方法の概略図。赤で示した読み出しのタイミングを揃えることで、Fowler sampling と Ramp sampling それぞれで得られた CDS 画像の差分からグロー成分が抽出できる。

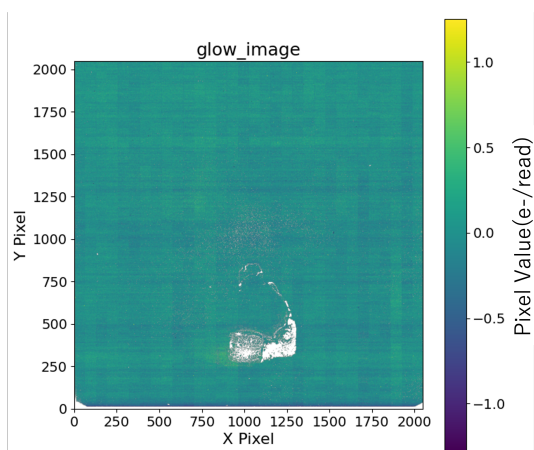


図 3.35 グロー成分を抽出した画像

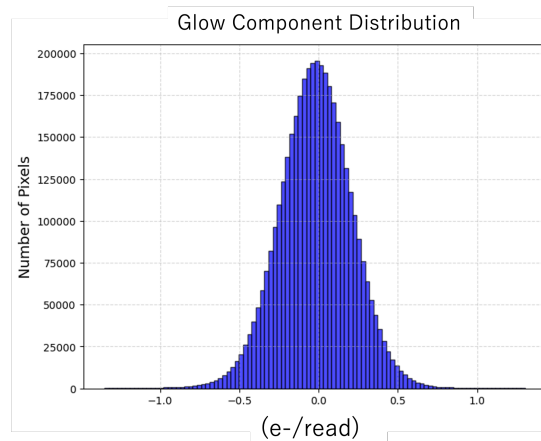


図 3.36 グロー画像のピクセル毎のヒストグラム

3.6.1 試験方法

LED の発光回数 $ncyc$ を制御して、様々な明るさの光で照射した CDS 画像を取得した。読み出しパターンは、 $reset=30$, $read=1$, $drop=0$, $group=2$, $ramp=1$, $tfowexp=5.0$ s の Fowler sampling を用いた。LED の発光パラメータは $V_{high} = 2.1$ V, $freq=10000$ Hz, $ncyc=500 - 25000$ (500 刻み) として CDS 画像を取得した。

3.6.2 評価方法

二つの方法で評価した。一つ目は次の通りである、各 $ncyc$ で得られた差分 CDS 画像を生成し、図 2.16 のバッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ として、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。そして、マスクされずに残ったピクセルの出力レベルの平均値を求める方法である。これを各 $ncyc$ に対して行い、出力レベルの変化をプロットする。最後に、プロットに対して三次式でフルウェルの 95% 以内に収まったプロットを用いてフィッティングする。

二つ目の方法は、ピクセル毎に線形性を求める方法である。同じデータセットを用いて、各ピクセルについ

て出力レベルの変化を三次式でフィッティングする。そして、得られた $4 \times 2048 \times 2048$ 個のフィッティングパラメータを用いて、各ピクセルの線形補正式の取得を試みた。

3.6.3 結果：平均値による線形性の評価

図 3.37 に、画像の平均値を用いた線形性の評価結果を示す。横軸に LED の発光回数 (ncyc)、縦軸に出力レベルの平均値をプロットした。フルウェルの 91% 範囲に相当する ncyc=500 - 20000 までの点を用いて三次式でフィッティングした結果を赤線で示している。フィッティングで得られた係数を表 3.2 に示した。図 3.37 の緑の波線は、三次式フィッティングのうち 1 次の項まで取り出した直線である。そして、緑と青のプロットの比を非線形性として評価したグラフを図 3.38 に示した。フルウェルの 55% に相当する 30000 ADU 付近で約 5% の線形性からのズレが見られることが確かめられた。

三次式フィッティングで補正後の値と実データとの比の残差を図 3.39 に示した。フルウェルの 91% に相当する 50000 ADU 付近までは残差は 0.1% 以内に抑えられていることが確認できた。

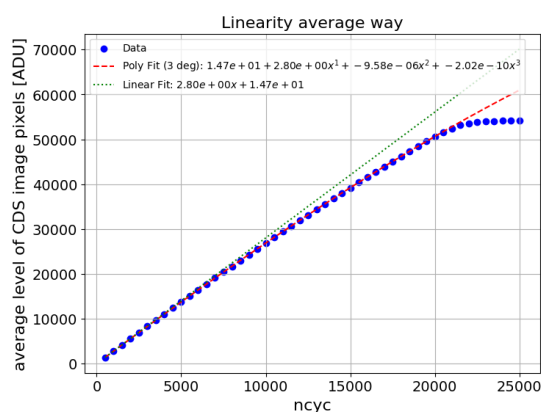


図 3.37 線形性プロット

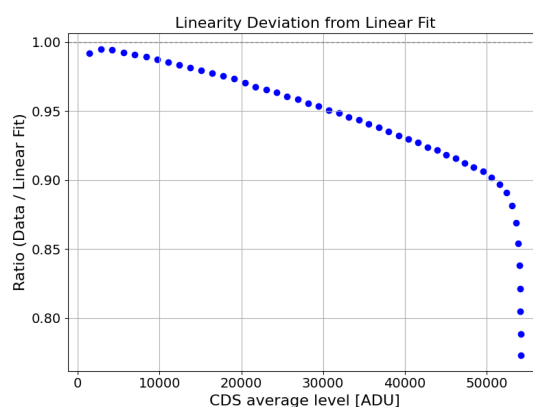


図 3.38 非線形性

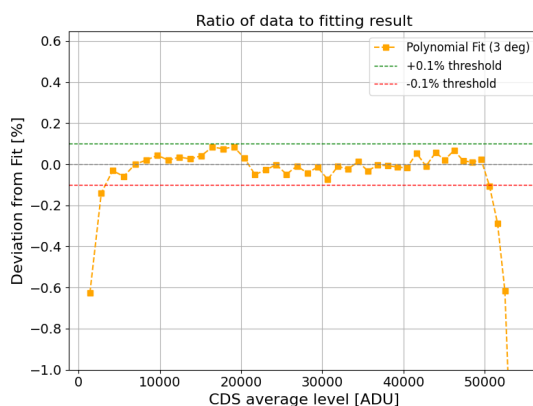


図 3.39 三次式補正後のフィットと実データの差の比

3.6.4 結果：ピクセル毎の線形性の評価

ピクセル毎に線形性の特性は異なる。画像の平均値を用いた方法と同様に、各ピクセルについて線形性の補正式を求めた結果を示す。三次式のフィッティングに成功したものと、バッドピクセルマスクをされていない

表 3.2 出力の平均値に基づく線形補正式の係数

0th order	14.7 ADU
1st order	2.80 ADU/ncyc
2nd order	-9.58e-6 ADU/ncyc
3rd order	-2.02e-10 ADU/ncyc

ピクセルに関して、0,1,2,3 次項の係数マップを図 3.40、図 3.41、図 3.42、図 3.43 に示した。ピクセル毎に違いが見られ、各画像の上部に縦筋のようなパターンが見られる。さらに、” 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 (Rauscher et al. 2012 [17]) が見えている。

また、係数のヒストグラムを図 3.44 に示した。ピクセル毎に非線形性の補正に用いる係数が異なることが確かめられる。ここで得られた $4 \times 2048 \times 2048$ の非線形補正式の係数のデータキューブを用いると、(各ピクセルで得られた CDS 画像の出力 = ncyc についての三次式) を解き、対応する ncyc が得られる。得られた ncyc を一次までの項に代入することで、ピクセル毎の非線形性を補正できる。

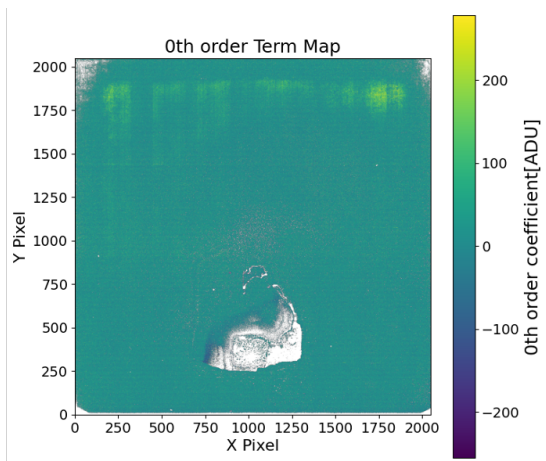


図 3.40 三次関数フィッティングにおける 0 次
の項の係数マップ

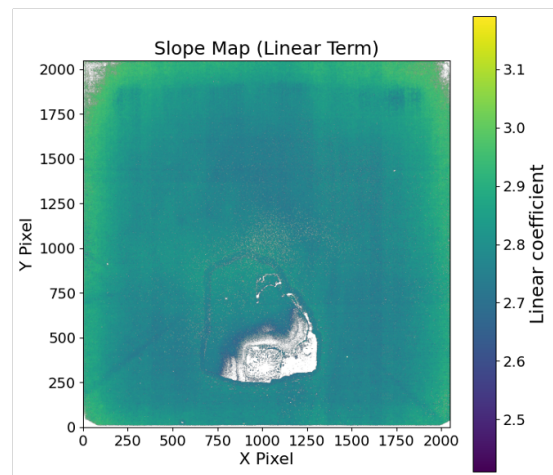


図 3.41 三次関数フィッティングにおける 1 次
の項の係数マップ

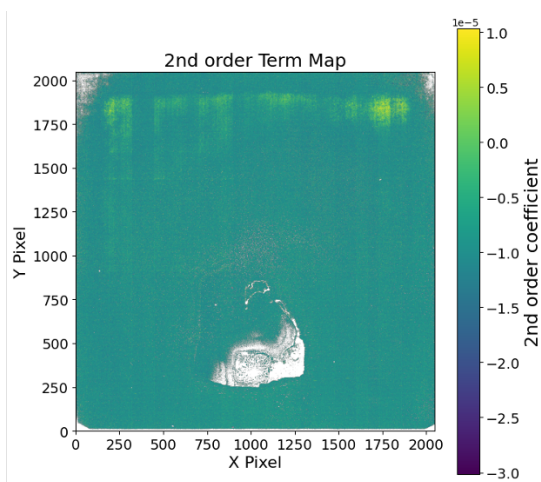


図 3.42 三次関数フィッティングにおける 2 次
の項の係数マップ

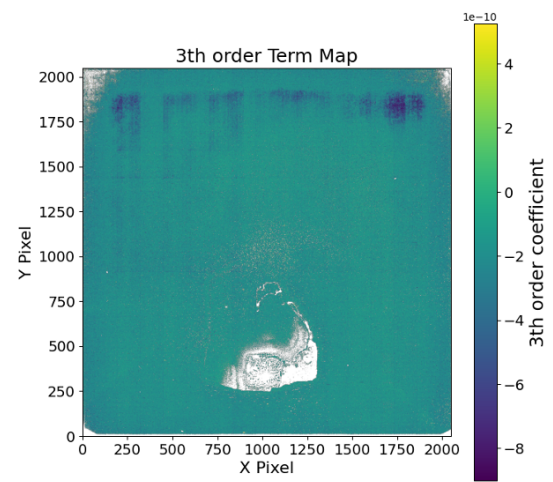


図 3.43 三次関数フィッティングにおける 3 次
の項の係数マップ

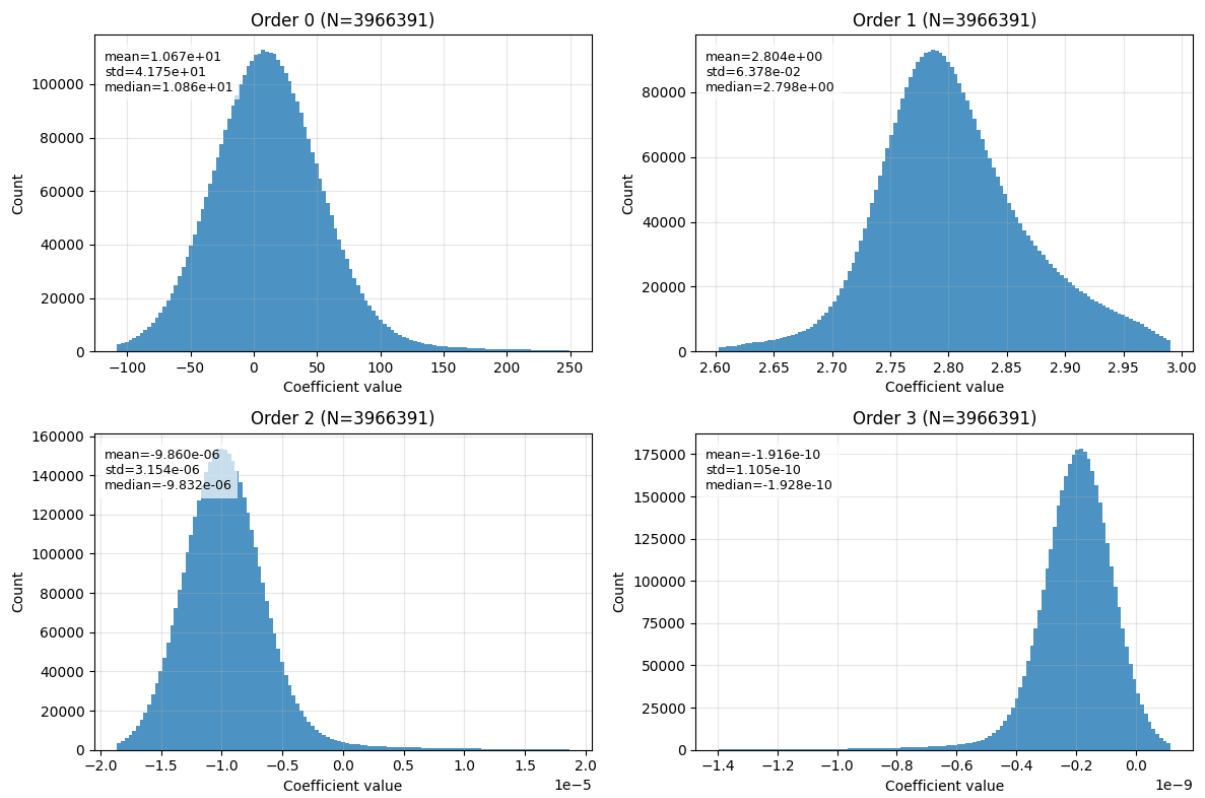


図 3.44 三次関数フィッティングにおける 0,1,2,3 次の係数のヒストグラム

3.7 パーシステンス

一般に赤外線検出器は、パーシステンスと呼ばれる残像特性を持つ。先行する観測での入射によって生成された電荷が検出器内に残留し、後続の観測画像に偽信号として現れてノイズ源となる。図 3.45 に、JWST の NIRCam で観測されたパーシステンスの例を示す [18]。一番左の画像には、ERS-1373 による観測で一枚の H2RG 検出器に木星が映っている。すると、ERS-1373 観測から 40.5 分経過後に取得した画像に、木星の残像が浮かび上がっている。時間経過と共に木星の残像は徐々に薄くなるが、3 時間経過後も残存している。

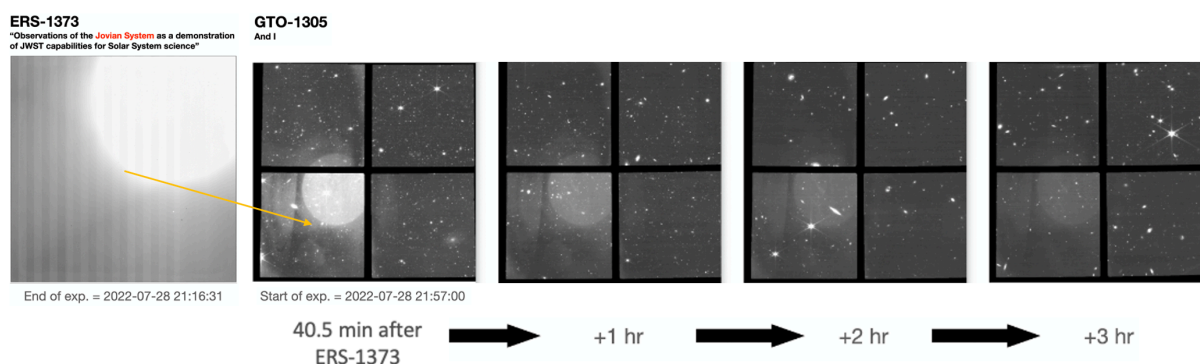


図 3.45 JWST の NIRCam で見られたパーシステンスの例。(JWST User Documentation[18])

パーシステンスの発生原理のモデルを図 3.46 に示す。検出器の PN 接続部を模したモデルであり、P 型半導体に比べて N 型半導体側に外から高電圧が印加されている。観測時の状態によって 4 つのフェーズに分けられている。

フェーズ I では、一定時間毎に検出器にリセットがかけ続けられている状態であり、空乏層にフォトンが入射して電子とホールが生成しても、空乏層の内部電場によって両者は非空乏層領域 (図 3.46 には undepleted と表示) に移動するが、空乏層の厚さは変わらない。フェーズ II の積分中では、検出器にリセットがかからないため、生成された電子とホールが非空乏層領域に移動した際、内部電場の大きさが減少しながら空乏層が狭まっていく。そして積分が終わってリセットがかかるフェーズ III では、N 型半導体と P 型半導体の電位差がリセット電圧 (本実験では $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$ に相当) に戻り、空乏層が元の幅に戻る。この際、積分中に非空乏層領域に位置していた電子とホールの一部は空乏層にトラップされる。すると、次の積分が始まるフェーズ IV では、トラップされた電子とホールが時間をかけて放出される。放出された電子とホールが次の観測における残像として観測される。

本実験では、入射フォトン総数 (n_{cyc})、積分時間 (t_{fowexp})、検出器駆動温度、バイアス電圧 ($V_{\text{reset}}, D_{\text{sub}}$) の 4 つのパラメータを変化させてパーシステンスを評価した。

3.7.1 試験方法

4 つのフェーズを再現するような読み出しシーケンスを設定した。図 3.47 にその概略図を示す。横軸が時間経過に伴う観測フェーズを表し、各フェーズでの読み出しとリセットのタイミングを示している。フェーズ I では検出器に 1.475 s 毎にリセットがかけ続けられており、既存のパーシステンス成分の影響を低減するため 1 時間を置く。フェーズ II では、Fowler sampling の最初の読み出しから 1 s 以内に LED を短時間発

A depletion layer in a detector

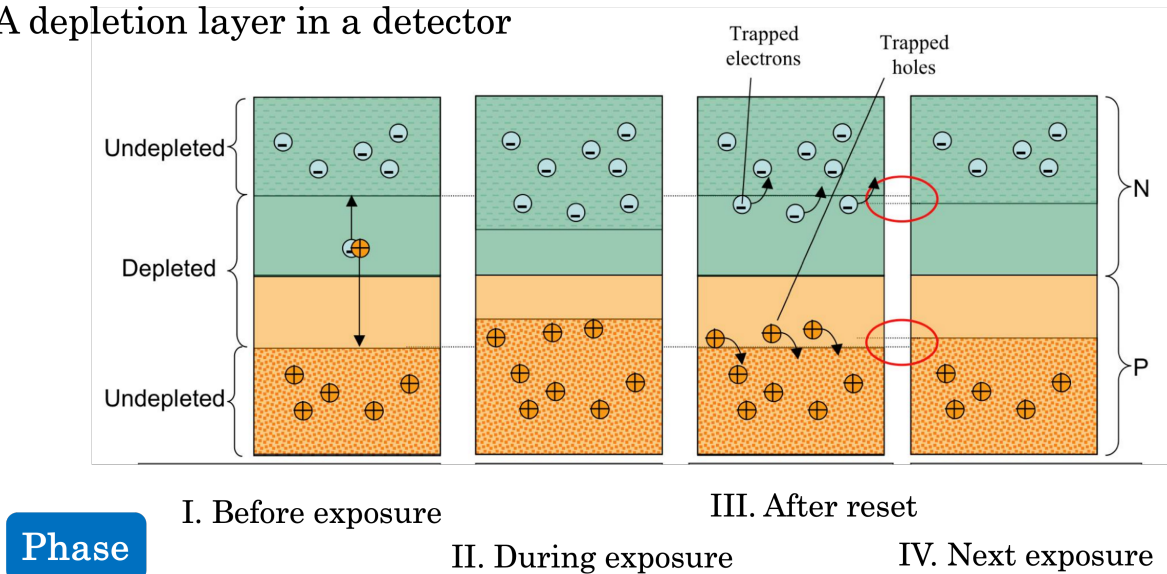


図 3.46 パーシステンスの発生モデル (Smith et al. 2008 [19])

光させる。LED の発光後にリセットをかけずに時間をおくことで、一部の電荷が空乏層にトラップされる。読み出しパラメータは $\text{reset}=1, \text{read}=1, \text{drop}=0, \text{group}=2, \text{ramp}=1$ の Fowler sampling に設定した。フェーズ III および IV では、トラップされた電荷の放出に伴う残像成分を時系列で追跡するため、一度のリセット操作 (フェーズ III) の後に一定間隔で画像を読み出した (フェーズ IV)。まず、一度のリセット後に 3 s 毎に 100 回読み出すように $\text{reset}=1, \text{read}=1, \text{drop}=1, \text{group}=100, \text{ramp}=1$ の Ramp sampling に設定した。次に、パラメータ変更に伴う約 10 s のオーバーヘッドの後、10.5 s 毎に 200 回読み出すように、Ramp sampling で $\text{reset}=0, \text{read}=1, \text{drop}=6, \text{group}=100, \text{ramp}=2$ に設定した。なお、プリアンプゲイン設定値は $G = \#6$ であり、コンバージョンファクター g_c は $4.35 e^-/\text{ADU}$ で設定した。

3.7.2 評価方法

フェーズ II で得られた Fowler sampling の差分 CDS 画像を生成し、バッドピクセルマスクおよびシグマクリップを施した上で、残ったピクセルの出力レベルの中央値を求めた。そして、フェーズ IV で得られた 300 枚の画像のうち、最初に読み出した画像との差分 CDS 画像を 299 枚生成する。次に各差分 CDS 画像に対して図 2.16 のバッドピクセルマップを用いて、マスクするピクセルを選択する。マスクされなかったピクセル集団の標準偏差を σ として、 3σ よりも外れたピクセルもマスクする。そして残ったピクセルの出力レベルの中央値を求めた。これを時系列にプロットし、フェーズ II で求めた中央値で割った値をパーシステンスの強度として評価した。なお、最初の 100 回と後半の 200 回の読み出しの間には、読み出しパラメータの変更に伴う約 10 s の時間差があるため、この時間差だけシフトしてプロットした。

なお、後半の 200 回の読み出しの最初の画像の出力レベルは高くなった (図 3.48, 図 3.49) ため、このフレームの値は除外してプロットした。原因は不明だが、読み出しパラメータの変更の間に検出器にリセットがかかっていない中、最初に読み出すと SIDECAR のレベルが安定しない可能性が考えられる。

さらに、穂満修論 (2023)[8] の方法を踏襲して、プロットした点に関して以下の指数関数と線形項でフィッ

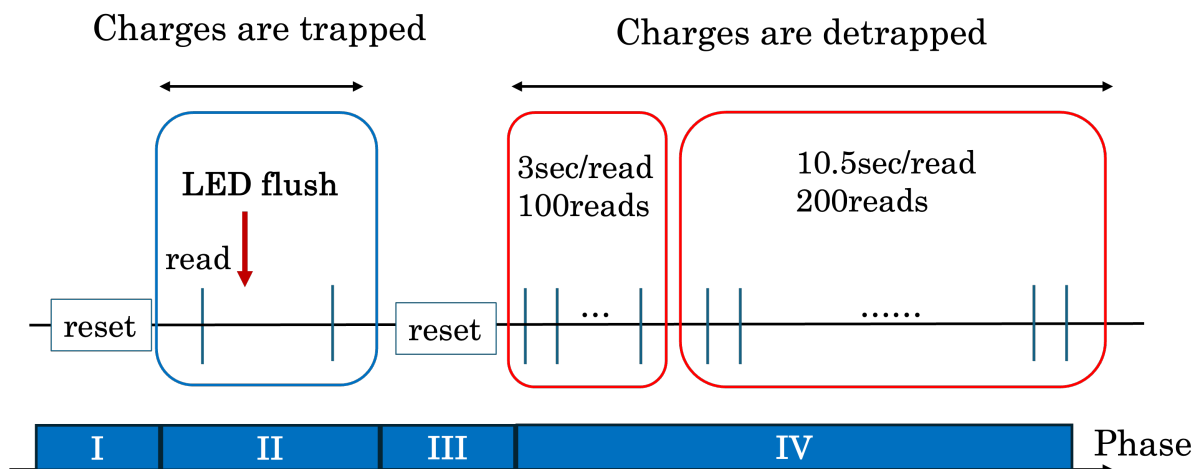


図 3.47 パーシステンス測定に用いた読み出しシーケンスの概略図

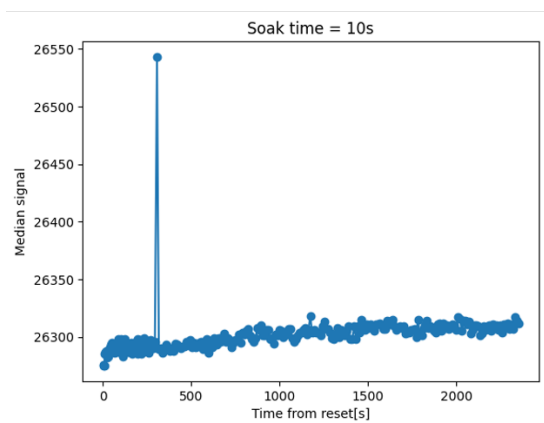


図 3.48 $t_{\text{fowexp}}=10\text{s}$ の場合の検出器画像の中央値の時系列プロット

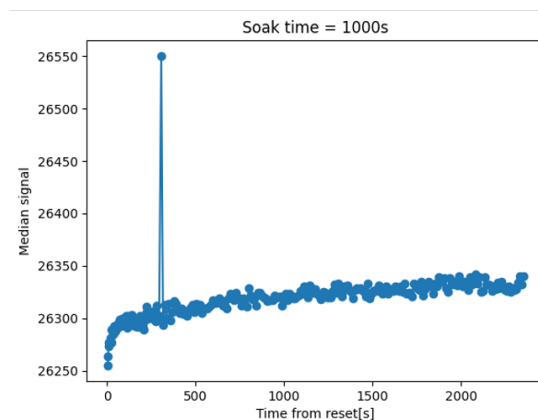


図 3.49 $t_{\text{fowexp}}=1000\text{s}$ の場合の検出器画像の中央値の時系列プロット

フィッティングを試みた。

$$N(t) = \sum_{\tau} N_{\tau}(1 - \exp(-t/\tau)) + ct \quad (8)$$

$N(t)$ が空乏層から放出された電荷に対応するパーシステンスの項であり、ADU 単位で表す。そして τ は、トラップした電荷の放出時間の時定数である。時定数の異なる電荷が複数存在するモデルを考え、これらの線型結合と暗電流項 ct でフィッティングする。

3.7.3 結果：入射光子総数 (ncyc) 依存性

パーシステンスの入射光子総数依存性を評価した。そのため、入射光子総数に比例する LED の発光回数 $ncyc$ を 10000, 20000, 30000 に設定して、それぞれの場合でパーシステンスを評価した。 $ncyc=10000$ の光量はフルウェルの約 14% に相当する。 $t_{\text{fowexp}}=1000\text{ s}$ として積分時間は一定とした。各 $ncyc$ 毎に信号の時間変化をプロットした結果を図 3.50 に示した。横軸がリセットからの経過時間で、縦軸が CDS 画像の出

カレベルの中央値を ADU 単位で表している。

まず、どの ncyk の場合でも時間が経つにつれて出力レベルが上昇していることが確かめられる。さらに、時間の経過に伴って出力レベルの増加率は緩やかになっていく。そして、ncyk が大きくなるにつれて、出力レベルが大きいことも確認できる。

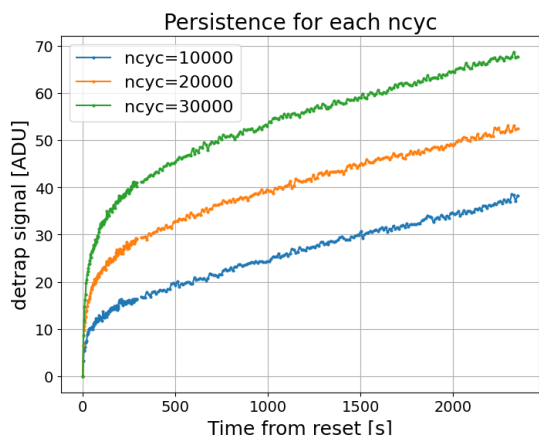


図 3.50 ncyk 毎の出力レベルの時間発展

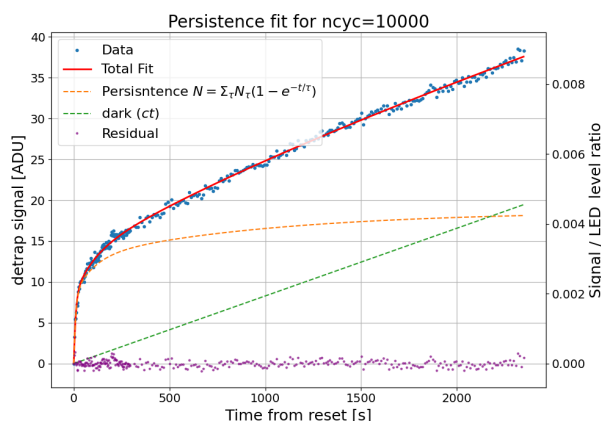


図 3.51 ncyk=10000 におけるパーシステンスのフィッティング結果

表 3.3 各 ncyk に対するフィッティング結果

ncyk	N_{10} [ADU]	N_{100} [ADU]	N_{1000} [ADU]	c [ADU/s]
10000	8.21	4.66	5.81	0.0083
20000	14.02	9.89	13.33	0.0070
30000	19.40	15.84	17.51	0.0071

$\tau = 10\text{s}, 100\text{s}, 1000\text{s}$ を用いて式 (8) でフィッティングした結果を、表 3.3 に示した。ncyk が大きくなるに従って、 N_{10} , N_{100} , N_{1000} は大きくなっている。また、暗電流項 c が後述する表 3.4 や表 3.5 の結果と比較して大きい値になっているのは、この実験を行う際に NINJA のスリットを誤って開けたままにしており、背景光が入射していたからである。しかし、その成分は線形項 c に吸収されるため、パーシステンス成分の抽出には影響しない。

ncyk=10000 の場合でフィッティングしたグラフを図 3.51 に示した。横軸と左の縦軸は図 3.50 と同じで、右の横軸は、フェーズ II で得られた LED を照射した CDS 画像の中央値出力レベルで、出力信号を規格化したものである。青いプロットがデータ点で、赤線が全体のフィッティング曲線である。黄色の波線は、 $\sum_{\tau} N_{\tau}(1 - \exp(-t/\tau))$ のプロットを示しており、暗電流項 ct を緑の波線で示している。残差を紫の点で示しており、フィッティングは良好である。

黄色の波線が抽出したパーシステンス成分に対応し、時間の経過に伴って放出される電荷の数は減っている。1000 s 以降からはほとんど変化しないことが確認できる。ncyk=20000, 30000 の場合においても同様にフィッティングし、抽出したパーシステンス成分を同時にプロットした結果を、図 3.52 に示した。縦軸は各 ncyk の入射フォトン総数で規格化してある。比較結果を見ると、ncyk に関わらず入射フォトン総数に対するパーシステンスの比はほぼ一定であることが確認できた。したがって、パーシステンスは入射フォトン総数に

比例することが確かめられた。

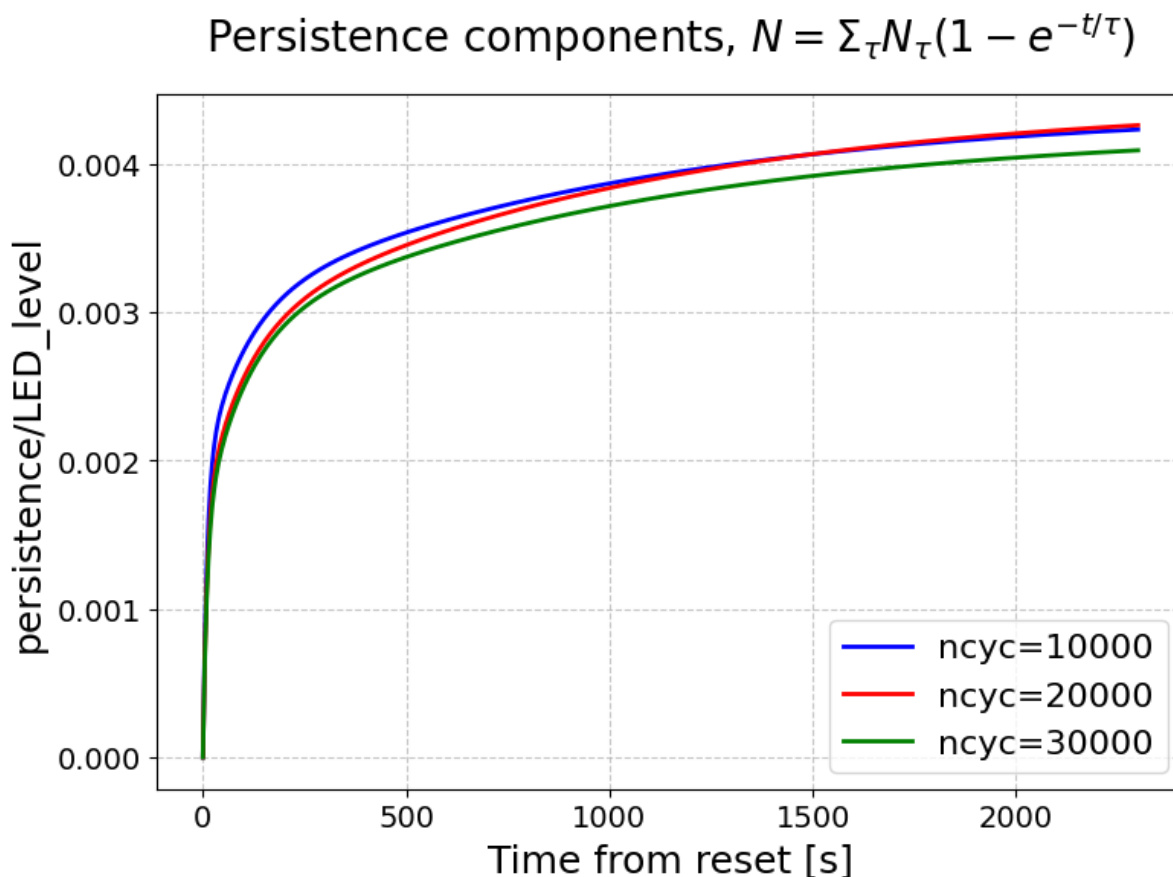


図 3.52 ncy=10000,20000,30000 における抽出したパーシステンスの比較

3.7.4 結果：積分時間 (tfowexp) 依存性

同等の光子総数が検出器に入射した際でも、フェーズ II の時間を変えることによって、空乏層にトラップされる電荷の量が変わるかどうかを調べた。今回、ncy=25000 で固定して入射光子総数を一定にした上で、tfowexp=10 s, 100 s, 1000 s の場合においてそれぞれパーシステンスを評価した。注意する点としては、LED を 2.5 s 間発光後に電荷が空乏層に晒され続ける時間は、tfowexp と厳密には一致しない点である。理由としては三つある。LED が有限の幅を持った時間発光し続けているため、対生成される電荷のタイミングがズレること。Fowler sampling 終了後から次の reset がかかるまで、読み出しパラメータの変更の間に overhead が 10 s ほど存在すること。最後に、Fowler sampling の最初の読み出しから何秒後に LED が発光するかは、1 s 以内の不定性があるからである。しかし、tfowexp は 10 s から 10 倍ずつ変化させていることから、積分時間がパーシステンスに与える影響を評価するには十分であると判断した。

図 3.53 に、tfowexp=10 s, 100 s, 1000 s の場合で評価したパーシステンスのプロットを示した。横軸がリセットからの経過時間で、縦軸が CDS 画像の出力レベルの中央値を ADU 単位で表している。次に、各 tfowexp の場合で前セクションと同様に式 (8) を用いてフィッティングを試みた結果を、tfowexp=1000 s の

場合で図 3.54 に示した。横軸と左の縦軸は図 3.53 と同じで、右の横軸は Fowler sampling で得られた CDS 画像の中央値出力レベルで規格化したものである。青いプロットがデータ点で、赤線が全体のフィッティング曲線である。黄色の波線は、 $\sum_{\tau} N_{\tau}(1 - \exp(-t/\tau))$ のプロットを示しており、暗電流項 ct を緑の波線で示している。残差を紫の点で示しており、フィッティングは良好である。

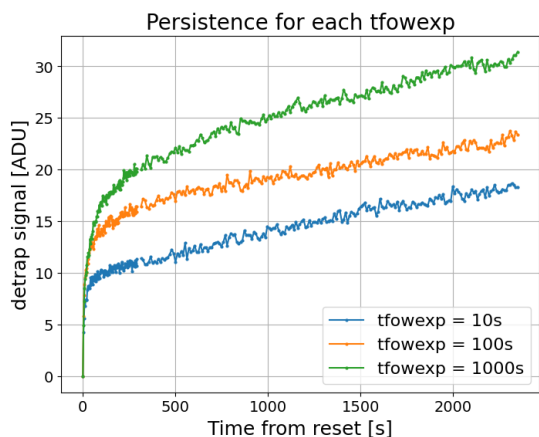


図 3.53 tfowexp 毎の出力レベルの時間発展

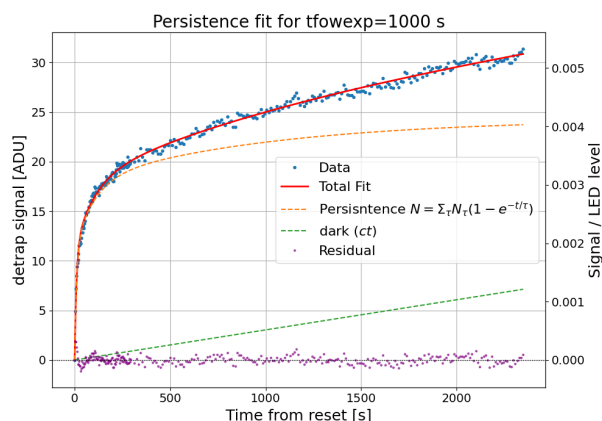


図 3.54 tfowexp=1000s におけるパーシステンスのフィッティング結果

表 3.4 各 tfowexp 毎のフィッティングから得られた係数

tfowexp[s]	N_{10} [ADU]	N_{100} [ADU]	N_{1000} [ADU]	c [ADU/s]
10	9.1906	0.2057	2.9321	0.0027
100	11.4376	3.5402	3.1362	0.0022
1000	11.1043	6.7849	6.4587	0.0030

フィッティングの結果のうち、各 tfowexp で得られたパーシステンスの項のフィッティングパラメータを表 3.4 に示した。tfowexp が長くなるにつれて、特により長い時定数に対応する係数 N_{τ} が大きくなっていることが確認できる。対して、 N_{10} は、tfowexp が 100 s と 1000 s の場合には差はほとんど見られない。

これらのフィッティングによって抽出したパーシステンスの時間発展 $\sum_{\tau} N_{\tau}(1 - \exp(-t/\tau))$ を、tfowexp 毎に比較した結果を図 3.55 に示した。tfowexp が長くなるほど、放出される電荷の量が多くなることが確かめられた。これは、フェーズ II の電荷が空乏層に晒され続けている期間が長いほど、トラップされる電荷の量が多くなることを示している。したがって、同じ光量の場合でも積分時間が長くなるほど、パーシステンスは強くなると言える。したがって実際の観測においてパーシステンスを抑えるためには、短い積分時間で区切って積分を繰り返すことが有効であることを示している。これは、Tulloch (2018)[20] でも言及されている。一方で、短い積分時間を繰り返すと読み出しノイズの感度への寄与が大きくなるため、最適な観測手順を検討する必要がある。

3.7.5 結果：検出器駆動温度依存性

検出器の駆動温度がパーシステンスに影響を与え得る。Mace et al. (2016)[21] は、二枚の H2RG 検出器のパーシステンスの温度依存性を調べている。一枚の検出器は検出器の駆動温度を 75K から 65K まで下げるこ

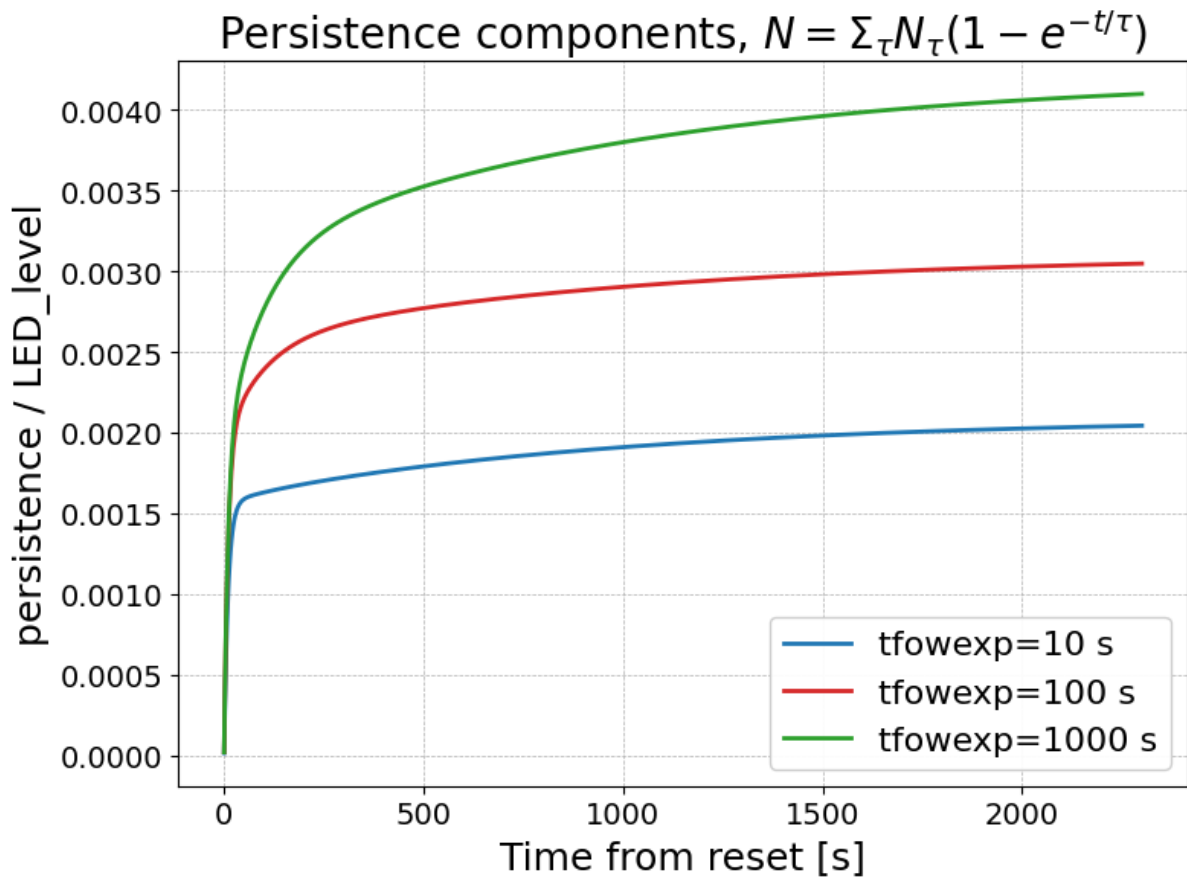


図 3.55 t_fowexp 毎に抽出したパーシステンスの比較

とでパーシステンスが大きく抑えられたが、もう一枚の検出器では温度依存性は見られなかったと報告している。今回、NINJA の H2RG 検出器において、検出器の駆動温度を 80 K, 75 K, 70 K, 65 K と変えながらパーシステンスの温度依存性を調べた。

図 3.56 に検出器の駆動温度毎に見られた出力レベルの時間発展を示した。図 3.57 に 70 K の場合において式 (8) を用いてフィッティングを試みた結果を示した。横軸と左の縦軸は図 3.56 と同じで、右の横軸は Fowler sampling で得られた CDS 画像の中央値出力レベルで規格化したものである。青いプロットがデータ点で、赤線が全体のフィッティング曲線である。黄色の波線は、 $\sum_{\tau} N_{\tau} (1 - \exp(-t/\tau))$ のプロットを示しており、暗電流項 ct を緑の波線で示している。残差を紫の点で示しており、フィッティングは良好である。

表 3.5 各検出器駆動温度毎のフィッティングから得られた係数

Temperature [K]	N_{10} [ADU]	N_{100} [ADU]	N_{1000} [ADU]	c [ADU/s]
80	11.02	8.63	6.55	0.0034
75	10.92	8.98	7.35	0.0024
70	9.84	10.31	3.36	0.0031
65	9.56	9.02	4.22	0.0032

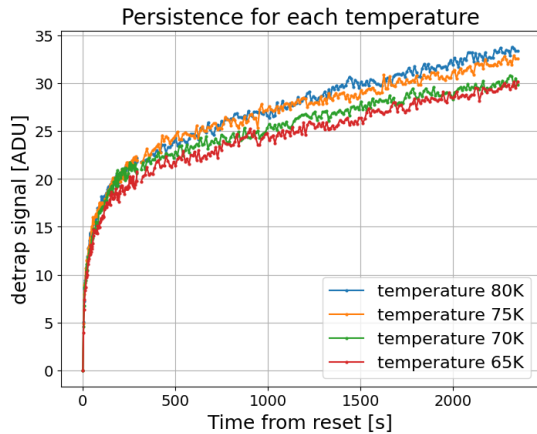


図 3.56 検出器駆動温度毎の出力レベルの時間発展

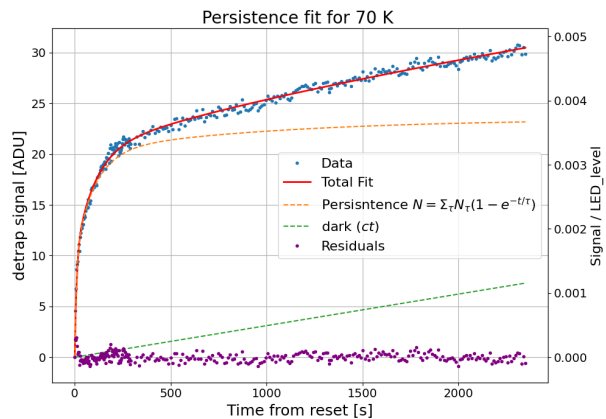


図 3.57 70K におけるフィッティング結果

全ての検出器駆動温度についてフィッティングして得られた係数の結果を表 3.5 に示した。そして、抽出したパーシステンスの時間発展を図 3.58 に示した。グラフを見ると、パーシステンスは 75 K, 80 K, 70 K, 65 K の順に抑えられていく。しかし表 3.5 によると、駆動温度が 70 K と 65 K の場合に比べて、75 K の場合の暗電流成分 c が小さくなっていることが確認できる。しかし、一般的に暗電流は駆動温度を下げるほど抑えられる傾向がある。したがって、フィッティングに採用するモデルによってパーシステンスの温度依存性の結果が変わり得る。本研究において、NINJA の H2RG の駆動温度を下げればパーシステンスが抑えられるとは一概に言い切れない。

3.7.6 結果：バイアス電圧 (D_{sub}) 依存性

検出器の空乏層に与えるバイアス電圧を変化させると、空乏層の厚みが変わりパーシステンス特性が変化する。 $V_{\text{reset}} = 0.3715 \text{ V}$ に固定したまま、 $D_{\text{sub}} = 0.4215 \text{ V}, 0.5215 \text{ V}, 0.6215 \text{ V}, 0.7215 \text{ V}$ と変化させながらパーシステンスを評価した。それぞれ、逆バイアス電圧 $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}} = 0.05 \text{ V}, 0.15 \text{ V}, 0.25 \text{ V}, 0.35 \text{ V}$ に対応する。

図 3.59 に各バイアス電圧における出力レベルの時間発展を示した。逆バイアス電圧を下げるほど、出力レベルは全体的に下がっていることが確認できる。さらに、図 3.60 に逆バイアス 0.15V におけるフィッティング結果を示した。

全ての逆バイアス電圧の場合におけるフィッティングで得られた係数の結果も表 3.6 に示す。すると、逆バイアス電圧を小さくするにつれて、暗電流成分が特に抑えられていることが確認できる。また、この結果を用いて抽出したパーシステンスの成分の時間発展を図 3.61 に示す。デフォルト設定である逆バイアス電圧 0.25 V に比べて、0.35 V の場合には、パーシステンスは大きくなっていることが確かめられる。一方で、逆バイアス電圧を下げるにつれてパーシステンスは、僅かに抑えられる傾向にあることが確かめられた。

Persistence components, $N = \sum_{\tau} N_{\tau} (1 - e^{-t/\tau})$

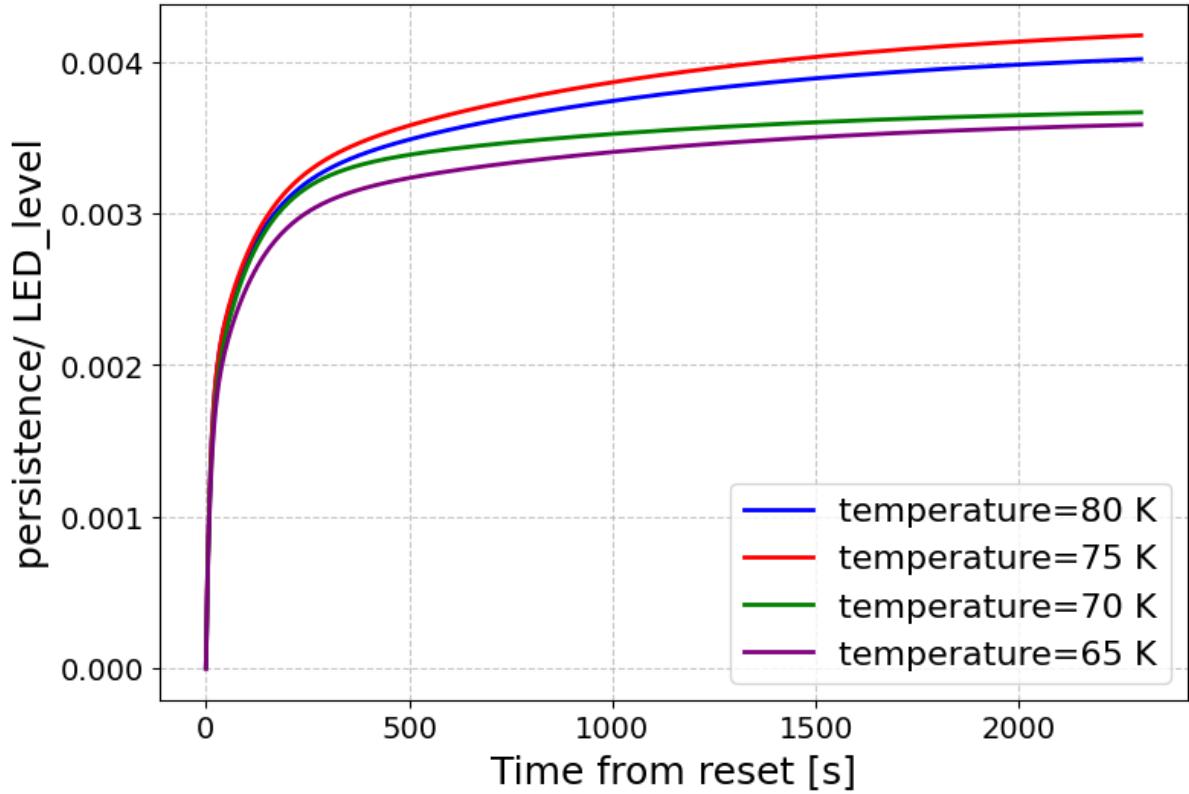


図 3.58 温度毎に抽出したパーシステンスの比較

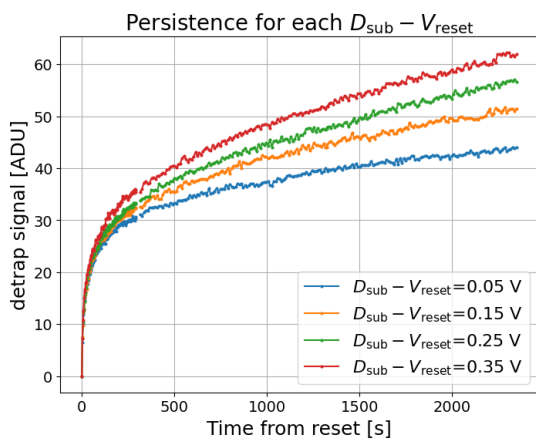


図 3.59 各バイアス電圧毎の出力レベルの時間発展

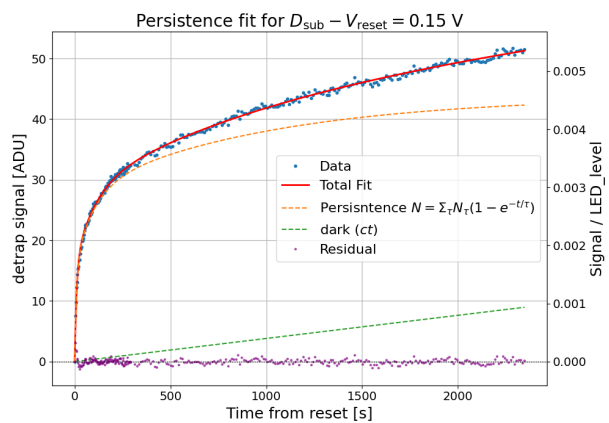


図 3.60 $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}} = 0.15 \text{ V}$ におけるフィッティング結果

表 3.6 各バイアス電圧毎のフィッティングから得られた係数

$D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}}$ [V]	N_{10} [ADU]	N_{100} [ADU]	N_{1000} [ADU]	c [ADU/s]
0.05	15.80	11.85	12.46	0.0021
0.15	15.80	12.25	15.79	0.0038
0.25	16.31	11.96	16.68	0.0057
0.35	17.27	12.50	19.78	0.0060

Persistence components, $N = \sum_{\tau} N_{\tau} (1 - e^{-t/\tau})$

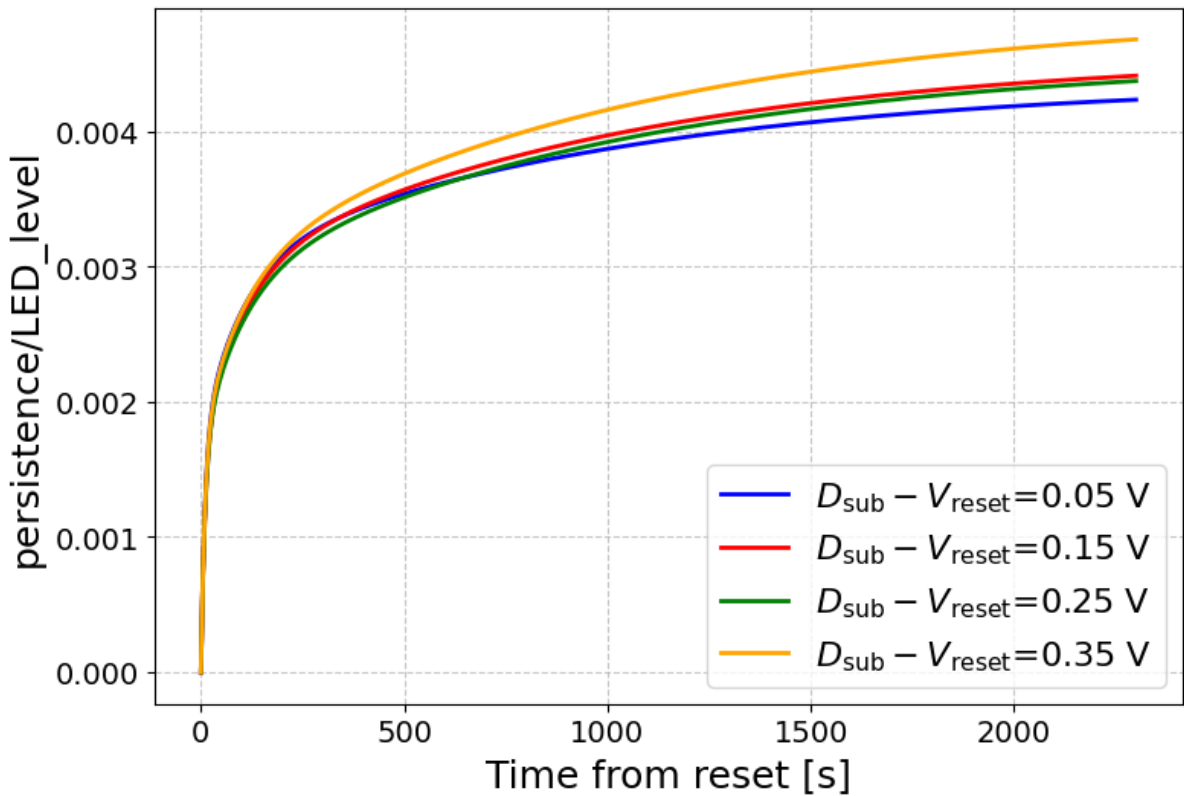


図 3.61 各バイアス電圧毎に抽出したパーシステンスの比較

4 検出器システムに設定するパラメータセットの議論

前章で、検出器読み出し回路に与えるパラメータが、検出器システムの性能にどのように影響を及ぼすかを評価した。これらの結果を踏まえ、NINJA の H2RG 検出器システムに与えるべきパラメータセットを指定する。

4.1 読み出しノイズと検出器 A/D 変換出力レンジ性能の両立

NINJA の目標感度を達成するために、読み出しノイズを極小まで抑えつつ、さらにフルウェルが ADC の出力範囲に収まるように設定する必要がある。読み出しノイズは、プリアンプゲイン、参照電圧、LPF の設定値によって変化する。そこで、図 4.1 に、プリアンプゲイン設定値 $G = \#10$ における CDS 読み出しノイズと検出器 A/D 変換出力レンジの関係を、各 LPF 設定 $\#2(f_c = 7.58 \text{ MHz})$, $\#6(f_c = 0.94 \text{ MHz})$, $\#7(f_c = 0.63 \text{ MHz})$, $\#8(f_c = 0.47 \text{ MHz})$ 毎に示す。横軸に V_{refmain} 、左の縦軸にその参照電圧設定におけるバイアス/飽和レベルを示し、右の横軸に読み出しノイズを示している。なお、各 LPF 設定 $\#2, \#6, \#7, \#8$ においてバイアスレベルと飽和レベルに違いは見られなかったため、LPF の設定 $\#8$ のレベルを示している。

図 4.1 を見ると、CDS 読み出しノイズが極小付近 ($\sim 14 e^- \text{ rms}$) に存在するプロットが幾つか存在する。その中で、最も検出器 A/D 変換出力レンジを広く取れる設定値は、 $V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}$, LPF 設定 $\#6$ であることが分かる。この設定値では、CDS 読み出しノイズ $\sigma_{\text{CDS}} = 14.2 e^- \text{ rms}$ まで抑えつつ、ADC の出力範囲内に収まっている電子数は、 $\sim 2.2 e^-/\text{ADU} \times 55000 \text{ ADU} \sim 120000 e^-$ となり、フルウェル $\sim 123000 e^-$ の 97% が ADC の範囲内に収まっている。そして、図 3.29 に示すように、このパラメータセットで Fowler sampling で 20 回以上読み出せば、NINJA の目標感度である $< 4 e^- \text{ rms}$ を達成できる。したがって、プリアンプゲインの設定値、参照電圧、バイアス電圧、LPF の設定値をそれぞれ $G = \#10, V_{\text{refmain}} = 1.7 \text{ V}, D_{\text{sub}} = 0.6215 \text{ V}, V_{\text{reset}} = 0.3715 \text{ V}$, LPF 設定 $\#6 (f_c = 0.94 \text{ MHz})$ とすることが最適であると結論づけられる。

なお、図 3.23 を見ると、よりプリアンプゲインを高くすると読み出しノイズが抑えられることが確認できる。一方で、プリアンプゲインを大きくしてコンバージョンファクターが小さくなるにつれて、ADC の範囲内に収まる電子数は少なくなっていくことから、上記設定値が最適であると判断した。

4.2 暗電流、パーシステンスを鑑みた検出器駆動温度とバイアス電圧の設定

図 4.1 を評価した際には、検出器駆動温度は 80 K で、検出器に与える逆バイアス電圧は $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}} = 0.25 \text{ V}$ であった。一方で、暗電流、パーシステンスの面でこれらのパラメータを最適化できる余地があるかを議論する。

前提として、4.1 章で設定したパラメータセットでは、暗電流の観点では要求値である $< 0.05 e^-/\text{s}/\text{pix}$ より小さい (図 3.32)。実験から、逆バイアス電圧を小さくすると暗電流が抑えられることが確かめられている (表 3.6)。しかし、逆バイアス電圧を下げると検出器のフルウェルが浅くなるため、暗電流の要求を満たしているにも関わらず下げる必要性は低い。したがって、暗電流の要求を満たしている $D_{\text{sub}} - V_{\text{reset}} = 0.25 \text{ V}$ の設定が現状では妥当である。また、検出器駆動温度を下げるほど暗電流が僅かに抑えられることも分かっているため、検出器の出力画像と他の検出器性能 (コンバージョンファクター、読み出しノイズ等) を確認した上で、80 K よりも下げる余地はある。その場合、図 3.33 で見られたような霞状パターンの再現性を確認する必

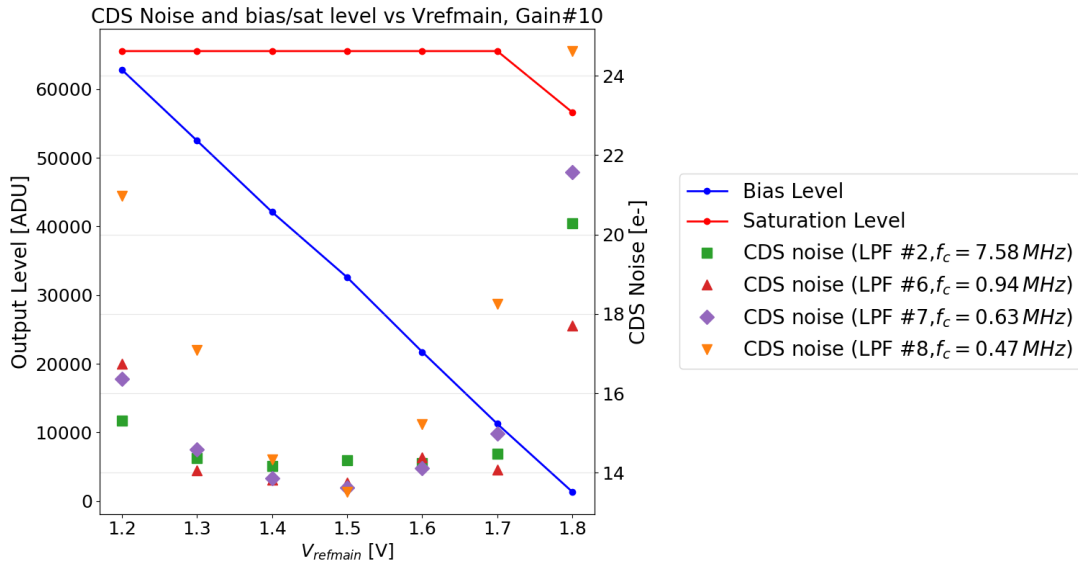


図 4.1 各 LPF 設定 #2, #6, #7, #8 における、 $V_{refmain}$ 毎の読み出しノイズの関係に、検出器 A/D 変換出力レンジを追加したグラフ。左の縦軸がバイアス/飽和レベルに対応し、右の縦軸が CDS 読み出しノイズに対応する。横軸が参照電圧 $V_{refmain}$ である。

要がある。

パーシステンスは、逆バイアス電圧を 0.25 V よりも小さくしてもそれほど大きく変わらなかった (図 3.61)。一方で、0.35 V にするとパーシステンスが大きくなった。したがって、パーシステンスの面では、逆バイアス電圧は 0.25 V を維持することが妥当である。また、検出器駆動温度を下げることでパーシステンスが僅かに抑えられる傾向が見られた (図 3.58) ため、80 K よりも下げることは有効である可能性がある。一方で、パーシステンスが感度にどれだけ影響を与えるかは、観測手順に依存することもあり、明確に要求値が設定できていない。

以上の議論により、現状は、コンバージョンファクターや読み出しノイズの性能、画像の安定性が担保されているパラメータを用いることが妥当である。つまり、検出器の駆動温度は 80 K とし、逆バイアス電圧は $D_{sub} - V_{reset} = 0.25$ V とすることが妥当であり、検出器 A/D 変換出力レンジの観点から $D_{sub} = 0.6215$ V, $V_{reset} = 0.3715$ V を採用する。

5 総括

5.1 本研究の成果

本研究では、すばる望遠鏡に搭載する広帯域分光装置 NINJA の H2RG 検出器システムの開発とパラメータの最適化を通じた性能評価を行った。ここで得られた成果について報告する。

- NINJA 赤外線検出器システムの開発 (第 2 章)

赤外線検出器の一般的な基礎知識について記した上で、HAWAII-2RG, SIDECAR, MACIE を用いた NINJA 赤外線検出器システムの構成と、読み出しソフトウェアについて説明した。その上で、回路に与えるパラメータと、サンプリング方法について解説した。

- H2RG 検出器性能評価 (第 3 章)

H2RG 検出器に与えるパラメータ (V_{reset} , D_{sub} , V_{biasgate}) と、SIDECAR に与えるパラメータ (プリアンプの構成、プリアンプゲイン G 、参照電圧 V_{refmain} 、Low Pass Filter のカットオフ周波数設定) を変えながら、検出器の性能評価を実施した。評価事項は、コンバージョンファクター、検出器 A/D 変換出力レンジ、読み出しノイズ、暗電流、グロー、線形性、パーシステンスである。

- パラメータ最適化 (第 4 章)

第 3 章で明らかになった、検出器性能のパラメータ依存性を鑑みてパラメータの最適化を行った。要求として、読み出しノイズを低減させつつ、検出器 A/D 変換出力レンジ (一度の積分でサンプリングできる電子数) を広くとること。そして暗電流、パーシステンスの評価結果も鑑みて、表 5.1 に示したパラメータセットで NINJA の検出器システムを駆動させることが最適であるとの結論に至った。

これらの成果により、インターフェースボード MACIE を介した通信により、SIDECAR を用いて H2RG 検出器を駆動できた。さらに、詳細な性能評価により、目標感度を達成できるパラメータセットを確立した。この成果は、H2RG を用いた他の天文観測装置の開発やアップデートに役立つものである。

5.2 今後の展望

NINJA は 2026 年 1 月下旬に輸送され、同年にすばる望遠鏡に搭載された上でファーストライトを迎える予定である。ファーストライトを迎えるまでに、検出器のピクセル毎の性能 (コンバージョンファクター、読み出しノイズ、パーシステンス、霞状パターンの再現性) を評価する必要がある。それを基に、検出器のバッドピクセルマップを再作成することを検討している。さらに、パーシステンスが観測に与える影響を評価し、補正手法を確立する必要がある。それらの知見を揃えた上で、2D スペクトルを 1D スペクトルに変換するためのパイプラインソフトウェアの開発を進める。

最終的に、試験観測で得られたデータを用いて、すばる望遠鏡に搭載した NINJA が達成できた性能を評価することを目指す。

表 5.1 NINJA H2RG 検出器システムに与える最適化パラメータセットとその性能

Preamp configuration	Vrefmain mode
Preamp gain (G)	#10 ($2.23 e^- / \text{ADU}$)
V_{refmain}	1.7 V
D_{sub}	0.6215 V
V_{reset}	0.3715 V
V_{biasgate}	2.05 V
Low pass filter setting	#6 ($f_c \sim 0.94 \text{ MHz}$)
Detector temperature	80 K
$\sigma_{\text{CDS}} (\sigma_{\text{eff}}, \text{Fowler-64})$	$14.2 e^- (3.2 e^-)$
dark current median	$0.013 e^- / \text{s/pix}$
glow	undetected for 100 reads
full well	$\sim 123000 e^-$
Sampling range	97% of the full well
non-linearity	$\sim 5\%$ at 55% of the full well
persistence	$\sim 0.4\%$ of the signal recorded in a preceding 1000 s exposure, as observed in a subsequent 1000 s exposure

謝辞

本研究を進めるのにあたり、様々な方々にご協力、ご指導いただきました。指導教員の本原顕太郎教授には、私が研究を始めて右も左も分からないところから丁寧にご指導いただきました。夜遅い時間に部屋に伺っても、多くの議論を交わしてくださいました。また、本研究は JSPS 科研費 21H04997 「高感度広帯域近赤外線分光で読み解く重力波源における元素合成」の助成を受けたものであり、NINJA 開発チームの吉田道利 席教授、東谷千比呂氏、尾崎忍夫氏、柳澤顕史氏に多大なるご協力をいただきました。特に柳澤顕史氏には、検出器システム開発の現場の作業に関して数えきれないほどのご指導をいただきました。さらに NINJA 開発研究は、国立天文台先端技術センターの共同開発研究「すばる望遠鏡広帯域 分光器 NINJA の開発」に採択され、組み立ておよび性能評価試験において、同センターの設備を利用させていただきました。それにあたり、先端技術センター技師の鎌田由紀子氏には実験スペースの提供や、試験デューワーを始めとした実験器具の貸与をいただきました。先端技術センター工作室の岡田則夫氏、福田武夫氏、岩下光氏には、ジグの製作、加工に多大なるご協力をいただきました。さらに、国立天文台太陽観測研究グループの勝川行雄教授には H2RG 検出器エンジニアリンググレードおよび SIDE CAR の貸与をいただき、予備試験の実施にあたり多大なるご支援をいただきました。

早稲田大学の佐藤理究氏と、同研究室の Jeung Yun 氏、幸野友哉氏、安田彩乃氏、藤井扇里氏、菊地泰輝氏は、同じ学生の立場から様々な議論と世間話で私の研究生活を豊かにしてくれました。同研究室 OB の Nuo Chen 氏は、同じ趣味の自転車で三浦半島一周を共に走ってくださり、籠りがちな研究生活の中でリフレッシュできる時間を過ごせました。同研究室 OB の櫛引洸佑氏には、本研究に関する私の初の海外研究発表に同行してくださり、大変お世話になりました。研究と研究生活の中で関わった全ての方々に、心よりお礼申し上げます。

そして、私が修士課程に進学することに理解を示してくれた上で、研究に打ち込める環境を提供してくれた両親に、最大限の感謝を表します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, V. B. Adya, C. Affeldt, M. Afrough, B. Agarwal, M. Agathos, K. Agatsuma, N. Aggarwal, O. D. Aguiar, L. Aiello, A. Ain, P. Ajith, B. Allen, G. Allen, A. Allocca, P. A. Altin, A. Amato, A. Ananyeva, S. B. Anderson, W. G. Anderson, S. V. Angelova, S. Antier, S. Appert, K. Arai, M. C. Araya, J. S. Areeda, N. Arnaud, K. G. Arun, S. Ascenzi, G. Ashton, M. Ast, S. M. Aston, P. Astone, D. V. Atallah, P. Aufmuth, C. Aulbert, K. AultONeal, C. Austin, A. Avila-Alvarez, S. Babak, P. Bacon, M. K. M. Bader, S. Bae, P. T. Baker, F. Baldaccini, G. Ballardin, S. W. Ballmer, S. Banagiri, J. C. Barayoga, S. E. Barclay, B. C. Barish, D. Barker, K. Barkett, F. Barone, B. Barr, L. Barsotti, M. Barsuglia, D. Barta, S. D. Barthelmy, J. Bartlett, I. Bartos, R. Bassiri, A. Basti, J. C. Batch, M. Bawaj, J. C. Bayley, M. Bazzan, B. Bécsy, C. Beer, M. Bejger, I. Belahcene, A. S. Bell, B. K. Berger, G. Bergmann, J. J. Bero, C. P. L. Berry, D. Bersanetti, A. Bertolini, J. Betzwieser, S. Bhagwat, R. Bhandare, I. A. Bilenko, G. Billingsley, C. R. Billman, J. Birch, R. Birney, O. Birnholtz, S. Biscans, S. Biscoveanu, A. Bisht, M. Bitossi, C. Biwer, M. A. Bizouard, J. K. Blackburn, J. Blackman, C. D. Blair, D. G. Blair, R. M. Blair, S. Bloemen, O. Bock, N. Bode, M. Boer, G. Bogaert, A. Bohe, F. Bondu, E. Bonilla, R. Bonnand, B. A. Boom, R. Bork, V. Boschi, S. Bose, K. Bossie, Y. Bouffanais, A. Bozzi, C. Bradaschia, P. R. Brady, M. Branchesi, J. E. Brau, T. Briant, A. Brillet, M. Brinkmann, V. Brisson, P. Brockill, J. E. Broida, A. F. Brooks, D. A. Brown, D. D. Brown, S. Brunett, C. C. Buchanan, A. Buikema, T. Bulik, H. J. Bulten, A. Buonanno, D. Buskulic, C. Buy, R. L. Byer, M. Cabero, L. Cadonati, G. Cagnoli, C. Cahillane, J. Calderón Bustillo, T. A. Callister, E. Calloni, J. B. Camp, M. Canepa, P. Canizares, K. C. Cannon, H. Cao, J. Cao, C. D. Capano, E. Capocasa, F. Carbognani, S. Caride, M. F. Carney, J. Casanueva Diaz, C. Casentini, S. Caudill, M. Cavaglià, F. Cavalier, R. Cavalieri, G. Cella, C. B. Cepeda, P. Cerdá-Durán, G. Cerretani, E. Cesarini, S. J. Chamberlin, M. Chan, S. Chao, P. Charlton, E. Chase, E. Chassande-Mottin, D. Chatterjee, K. Chatziioannou, B. D. Cheeseboro, H. Y. Chen, X. Chen, Y. Chen, H.-P. Cheng, H. Chia, A. Chincarini, A. Chiummo, T. Chmiel, H. S. Cho, M. Cho, J. H. Chow, N. Christensen, Q. Chu, A. J. K. Chua, S. Chua, A. K. W. Chung, S. Chung, and G. Ciani. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *ApJ*, Vol. 848, No. 2, p. L12, October 2017.
- [2] P. S. Cowperthwaite, E. Berger, V. A. Villar, B. D. Metzger, M. Nicholl, R. Chornock, P. K. Blanchard, W. Fong, R. Margutti, M. Soares-Santos, K. D. Alexander, S. Allam, J. Annis, D. Brout, D. A. Brown, R. E. Butler, H.-Y. Chen, H. T. Diehl, Z. Doctor, M. R. Drout, T. Eftekhari, B. Farr, D. A. Finley, R. J. Foley, J. A. Frieman, C. L. Fryer, J. García-Bellido, M. S. S. Gill, J. Guillochon, K. Herner, D. E. Holz, D. Kasen, R. Kessler, J. Marriner, T. Matheson, E. H. Neilsen, Jr., E. Quataert, A. Palmese, A. Rest, M. Sako, D. M. Scolnic, N. Smith, D. L. Tucker, P. K. G. Williams, E. Balbinot, J. L. Carlin, E. R. Cook, F. Durret, T. S. Li, P. A. A. Lopes, A. C. C. Lourenço, J. L. Marshall, G. E. Medina, J. Muir, R. R. Muñoz, M. Sauseda, D. J. Schlegel, L. F. Secco, A. K. Vivas, W. Wester, A. Zenteno, Y. Zhang, T. M. C. Abbott, M. Banerji, K. Bechtol,

- A. Benoit-Lévy, E. Bertin, E. Buckley-Geer, D. L. Burke, D. Capozzi, A. Carnero Rosell, M. Carrasco Kind, F. J. Castander, M. Crocce, C. E. Cunha, C. B. D’Andrea, L. N. da Costa, C. Davis, D. L. DePoy, S. Desai, J. P. Dietrich, A. Drlica-Wagner, T. F. Eifler, A. E. Evrard, E. Fernandez, B. Flaugher, P. Fosalba, E. Gaztanaga, D. W. Gerdes, T. Giannantonio, D. A. Goldstein, D. Gruen, R. A. Gruendl, G. Gutierrez, K. Honscheid, B. Jain, D. J. James, T. Jeltema, M. W. G. Johnson, M. D. Johnson, S. Kent, E. Krause, R. Kron, K. Kuehn, N. Nuropatkin, O. Lahav, M. Lima, H. Lin, M. A. G. Maia, M. March, P. Martini, R. G. McMahon, F. Menanteau, C. J. Miller, R. Miquel, J. J. Mohr, E. Neilsen, R. C. Nichol, R. L. C. Ogando, A. A. Plazas, N. Roe, A. K. Romer, A. Roodman, E. S. Rykoff, E. Sanchez, V. Scarpine, R. Schindler, M. Schubnell, I. Sevilla-Noarbe, M. Smith, R. C. Smith, F. Sobreira, E. Suchyta, M. E. C. Swanson, G. Tarle, D. Thomas, R. C. Thomas, M. A. Troxel, V. Vikram, A. R. Walker, R. H. Wechsler, J. Weller, B. Yanny, and J. Zuntz. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/Virgo GW170817. II. UV, Optical, and Near-infrared Light Curves and Comparison to Kilonova Models. *ApJ*, Vol. 848, No. 2, p. L17, October 2017.
- [3] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, et al. Gwtc-4.0: Population properties of merging compact binaries, 2025.
- [4] Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi, Shinya Wanajo, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata. Comprehensive study of mass ejection and nucleosynthesis in binary neutron star mergers leaving short-lived massive neutron stars. *The Astrophysical Journal*, Vol. 942, No. 1, p. 39, jan 2023.
- [5] Masayuki Akiyama, Yosuke Minowa, Yoshito Ono, Koki Terao, Hajime Ogane, Kaoru Oomoto, Yuta Iizuka, Shin Oya, Etsuko Mieda, and Tomoyasu Yamamuro. ULTIMATE-START: Subaru tomography adaptive optics research experiment project overview. In Laura Schreiber, Dirk Schmidt, and Elise Vernet, editors, *Adaptive Optics Systems VII*, Vol. 11448, p. 114481O. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020.
- [6] Nanae Domoto, Masaomi Tanaka, Daiji Kato, Kyohei Kawaguchi, Kenta Hotokezaka, and Shinya Wanajo. Lanthanide Features in Near-infrared Spectra of Kilonovae. *ApJ*, Vol. 939, No. 1, p. 8, November 2022.
- [7] Chihiro Tokoku, Shinobu Ozaki, Takashi Moriya, Kenshi Yanagisawa, Kentaro Motohara, Masami Ouchi, Nozomu Tominaga, Masaomi Tanaka, Yoshito Ono, Yosuke Minowa, Yutaka Hayano, Yusei Koyama, Sadman Ali, Masayuki Tanaka, Masayuki Akiyama, Tohru Nagao, Yoshiki Matsuoka, Kosuke Kushibiki, Shogo Homan, Akino Yasuda, and Michitoshi Yoshida. NINJA: an LTAO assisted optical and near-infrared spectrograph of Subaru Telescope. In Christopher J. Evans, Julia J. Bryant, and Kentaro Motohara, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*, Vol. 12184, p. 121847R. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [8] 穂満修論. 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.
- [9] I.S. McLean. *Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation*. Springer Praxis Books. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] 藤堂修論. 近赤外多天体分光カメラ swims における検出器読み出しシステムの開発と評価.
- [11] Richard Blank, Selmer Anglin, James W. Beletic, Sid Bhargava, Ryan Bradley, Craig A. Cabelli, Jing

- Chen, Don Cooper, Rick Demers, Michael Eads, Mark Farris, William Lavelle, Gerard Luppino, Eric Moore, Eric Piquette, Raphael Ricardo, Min Xu, and Majid Zandian. H2RG focal plane array and camera performance update. In Andrew D. Holland and James W. Beletic, editors, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*, Vol. 8453, p. 845310. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.
- [12] Markus Loose, L. Lewyn, Hakan Durmus, James D. Garnett, Donald N. B. Hall, Atul B. Joshi, Lester J. Kozlowski, and Ilia Ovsianikov. SIDECAR low-power control ASIC for focal plane arrays including A/D conversion and bias generation. In Masanori Iye and Alan F. M. Moorwood, editors, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, Vol. 4841, pp. 782 – 794. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2003.
- [13] Markus Loose, James Beletic, John Blackwell, James Garnett, Selmer Wong, Don Hall, Shane Jacobson, Marcia Rieke, and Greg Winters. The SIDECAR ASIC: focal plane electronics on a single chip. In James B. Heaney and Lawrence G. Burriesci, editors, *Cryogenic Optical Systems and Instruments XI*, Vol. 5904, p. 59040V. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005.
- [14] Kenshi Yanagisawa, Chihiro Tokoku, Kentaro Motohara, Shinobu Ozaki, Yoshito Ono, Yosuke Minowa, Takashi Moriya, Masami Ouchi, Nozomu Tominaga, Masayuki Tanaka, Yutaka Hayano, Yusei Koyama, Sadman Ali, Masaomi Tanaka, Masayuki Akiyama, Tohru Nagao, Yoshiki Matsuoka, Kosuke Kushibiki, Shogo Homan, Akino Yasuda, Tomoya Yukino, Riku Sato, Kensho Tanaka, Tomoyasu Yamamuro, and Michitoshi Yoshida. Compensation of defective pixels by mechanical shift of an NIR array detector used in the NINJA echelle spectrograph. In Julia J. Bryant, Kentaro Motohara, and Joël R. D. Vernet, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X*, Vol. 13096, p. 130966R. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2024.
- [15] James R. Janesick, Kenneth P. Klaasen, and Tom Elliott. Charge-Coupled-Device Charge-Collection Efficiency And The Photon-Transfer Technique. *Optical Engineering*, Vol. 26, No. 10, p. 261072, 1987.
- [16] Soya Todo, Ken Tateuchi, Kentaro Motohara, Masahiro Konishi, Hidenori Takahashi, Yutaro Kitagawa, and Natsuko M Kato. Optimization and performance of h2rg detectors and sidecar asics for swms. In *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI*, Vol. 9154, pp. 509–519. SPIE, 2014.
- [17] Bernard J. Rauscher, Richard G. Arendt, D. J. Fixsen, Matthew Lander, Don Lindler, Markus Loose, S. H. Moseley, Donna V. Wilson, and Christos Xenophontos. Reducing the read noise of HAWAII-2RG detector systems with improved reference sampling and subtraction (IRS2). In Andrew D. Holland and James W. Beletic, editors, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*, Vol. 8453, p. 84531F. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.
- [18] *JWST User Documentation*.
- [19] Roger M. Smith, Maximilian Zavodny, Gustavo Rahmer, and Marco Bonati. Calibration of image persistence in HgCdTe photodiodes. In David A. Dorn and Andrew D. Holland, editors, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III*, Vol. 7021, p. 70210K. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2008.
- [20] Simon Tulloch. Persistence characterisation of teledyne h2rg detectors, 2018.

- [21] Gregory Mace, Hwihyun Kim, Daniel T. Jaffe, Chan Park, Jae-Joon Lee, Kyle Kaplan, Young Sam Yu, In-Soo Yuk, Moo-Young Chun, Soojong Pak, Kang-Min Kim, Jeong-Eun Lee, Christopher A. Sneden, Melike Afsar, Michael D. Pavel, Hanshin Lee, Heeyoung Oh, Ueejeong Jeong, Sunkyung Park, Benjamin Kidder, Hye-In Lee, Huynh Anh Nguyen Le, Jacob McLane, Michael Gully-Santiago, Jae Sok Oh, Sungho Lee, Narae Hwang, and Byeong-Gon Park. 300 nights of science with IGRINS at McDonald Observatory. In Christopher J. Evans, Luc Simard, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, Vol. 9908, p. 99080C. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.

6 Appendix

6.1 H2RG 性能評価の予備試験

NINJA クライオスタット環境下での性能評価試験の前に、小型試験デュワーで評価試験を行った。NINJA クライオスタットに検出器ユニット群を組み込む準備ができる前に、読み出しノイズや線形性といった検出器性能を評価する方法を一通り経験し、最適な評価方法を確立しておくためである。小型試験デュワーでの評価環境を記す。

6.1.1 評価環境

予備試験にあたり、国立天文台技師の鎌田氏所有の小型試験デュワー (図 6.1) 及び、その ATC2 号館の鎌田氏の実験スペースをお借りした。更に、国立天文台太陽グループの勝川教授所有の SIDECAR と、フラットケーブルをお借りした。デュワーの中身の写真を図 6.2 に示した。当初、勝川氏所有の H2RG エンジニアリンググレード ($1.7 \mu\text{m}$ cutoff) と SIDECAR が接続された状態でデュワーに内蔵されており、SIDECAR から伸びたケーブルがフィードスルーを通過して、デュワー外にケーブルの端が飛び出ている。このケーブルのコネクタに NINJA チーム所有の MACIE を接続し、PC と MACIE を USB ケーブルで接続することで、検出器システムの駆動および読み出しが可能になる。勝川氏所有の H2RG ($1.7 \mu\text{m}$ cutoff) で性能評価を経験した後、NINJA 所有の H2RG サイエンスグレード ($2.5 \mu\text{m}$ cutoff) に交換して再び実験を行った。本研究における実験はすべて、NINJA 所有の H2RG で行ったものである。

また、初期の実験のセットアップでは、無光/調光状態が両立しなかった。そのため、検出器システムに与えるパラメータを変えながら、暗電流、コンバージョンファクター、検出器 A/D 変換出力レンジ、読み出しノイズを、デュワーの真空を破ることなく同じセットアップで評価することができなかった。そこで、デュワーの中に赤外 LED 光源を導入した (図 6.3)。照射パターンを変化させることで、光量の調節が可能となる。発光させなければダーク環境が成立する。

ゲインや線形性の測定データを取得するためには、検出器面を一様に照らす必要があったが、上記セットアップ (図 6.2) では、検出器面からデュワーのフランジまでの距離が 13 mm と短く、検出器を一様に照らすことは困難であった。そこで、空洞付きのハット型のフランジ (6.5) と、LED を検出器面から離して設置するジグ (蓋柱) (図 6.4) を配置することで、LED と検出器面の間を約 60 mm 離すことができる環境を構築した (図 6.6)。このセットアップで LED の照射パターンを変えることで、コンバージョンファクターや検出器 A/D 変換出力レンジの取得が可能になり、ダーク環境から、読み出しノイズ、暗電流の評価が可能となる。

一方で当初のセットアップ (図 6.2) は、 $1.7 \mu\text{m}$ cutoff の H2RG 検出器用であり、 $2.5 \mu\text{m}$ cutoff の H2RG

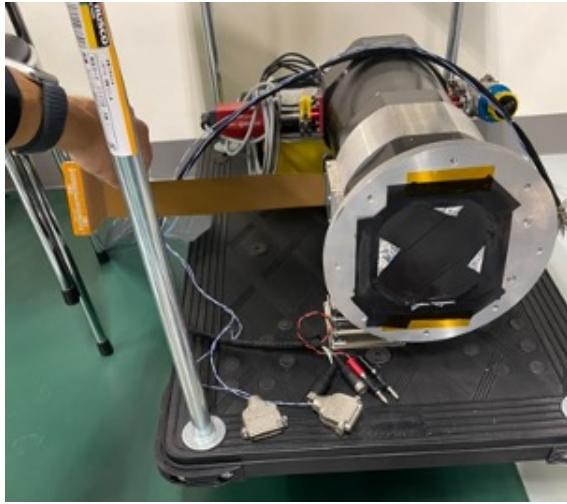


図 6.1 貸与デューワー外観：窓がアルミとビニールテープで閉じられている。SIDE CAR と接続されたケーブルの片端がフィードスルーを介してデューワー横から出ている

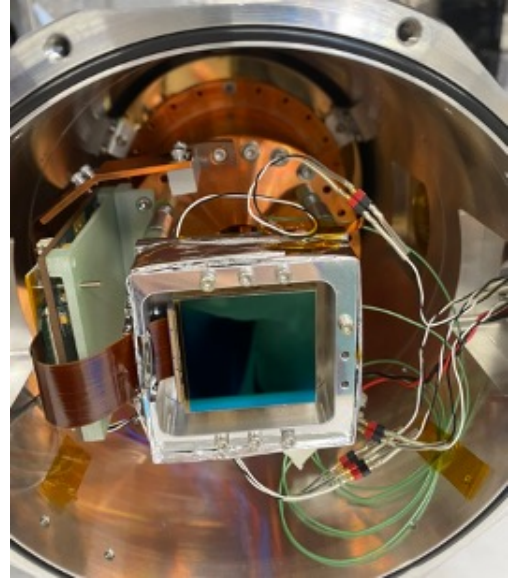


図 6.2 貸与デューワー中身：H2RG エンジニアリンググレード (1.7 μm cutoff) の受光面が向いている。H2RG はケーブルを介して SIDE CAR と接続されている。

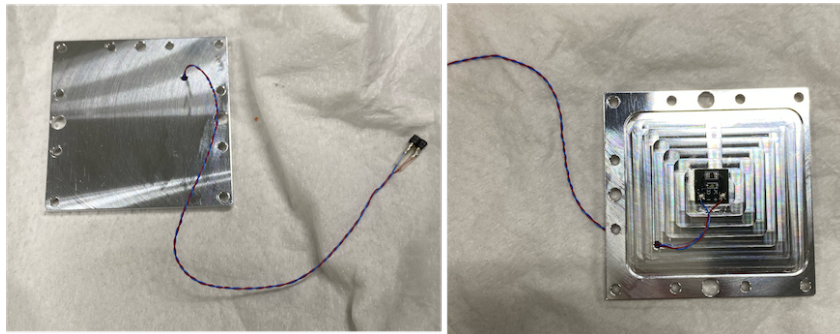


図 6.3 LED が取り付けられた蓋。LED は 10mm \times 10mm のサイズ

で実験した際には長波長側の熱放射を検出してしまい、ダーク環境が実現できていなかった。そこで、蓋と蓋柱をステンレス板、アルミホイル、MLI を用いて遮光し、熱放射を抑える工夫を行った。遮光対策前後の写真を図 6.7 と図 6.8 に示す。実験構成図と写真を図 6.9 と図 6.10 に示す。

実験の際には鎌田氏所有の真空ポンプで真空引き後、液体窒素を用いてデューワーを冷却した。検出器の到達最低温度は 83K 程度であった。



図 6.4 蓋柱の写真：壁面の反射を抑えるために、内壁をサンドブラスト後、黒塗、ベーキングした



図 6.5 新フランジの写真：ハット型の構造で、蓋柱が当たらないように空洞がある

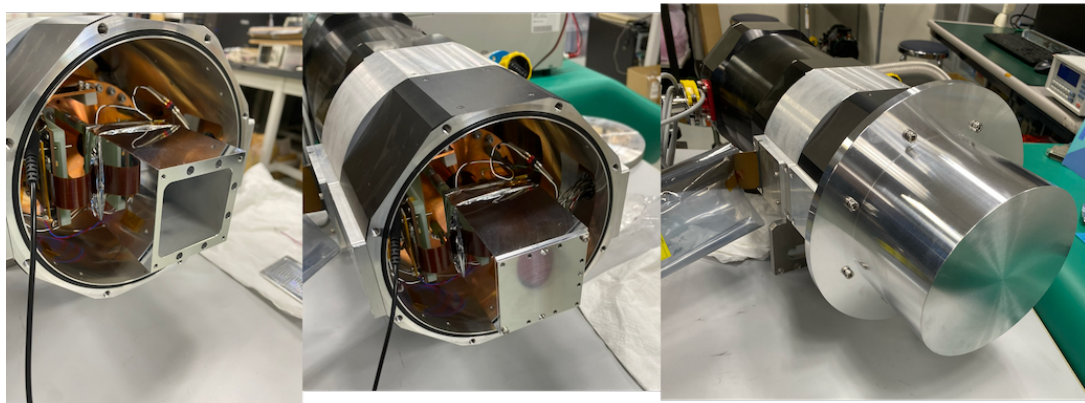


図 6.6 蓋柱をつけ(左)、蓋を上から被せ(中)、新フランジを嵌める(右)

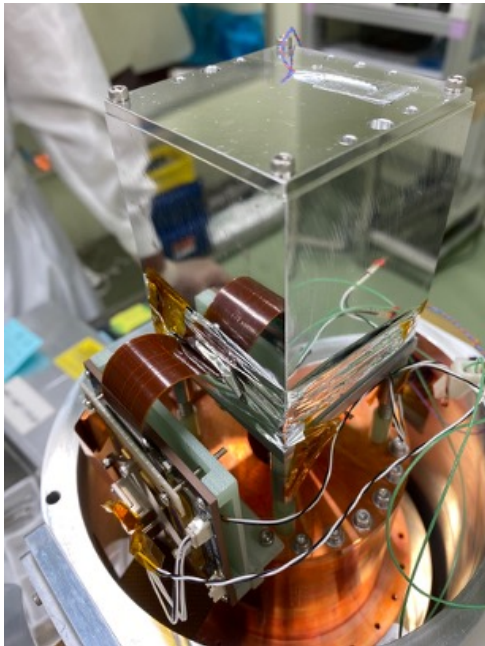


図 6.7 遮光対策前の写真



図 6.8 遮光対策後の写真

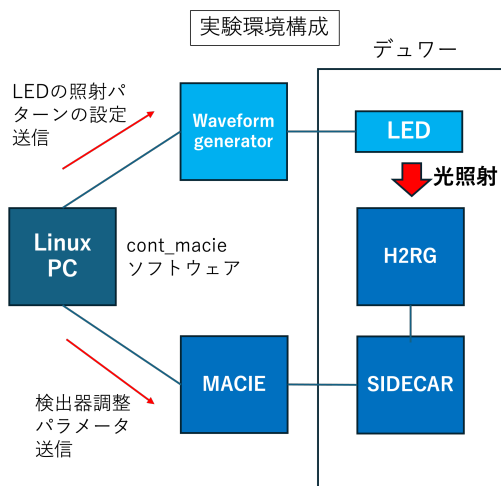


図 6.9 実験セットアップ構成図：DC 電源と温度コントローラは省略している

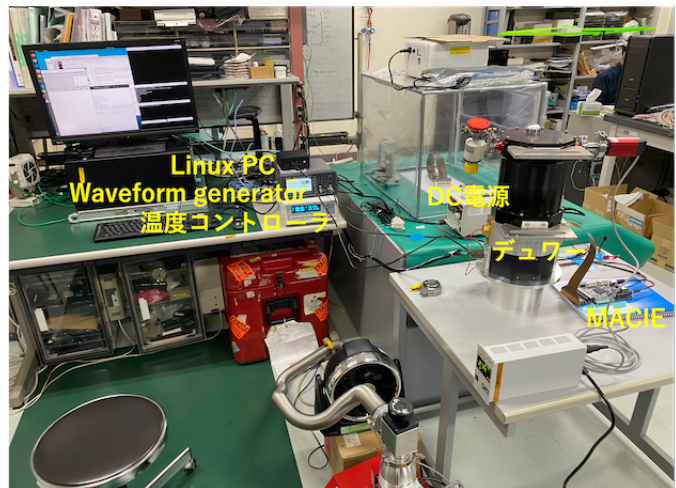


図 6.10 実験セットアップ外観