東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻
修士論文

近赤外多天体分光カメラSWIMSにおける検出器読み出しシステムの開発と評価

学籍番号 35-136135

藤堂 颯哉

指導教員　本原 顕太郎 准教授

2015年3月

概要

近年の観測的研究により、銀河の物質進化や星形成史など、銀河形成進化の具体的な描像が明らかになりつつある。その中で、近赤外線は遠方銀河の重要な輝線の観測、近傍銀河のダストを見通した観測などの点で重要な波長域であり、近赤外線の観測装置の需要はますます高まっている。近赤外線の広い視野を持ち、撮像、多天体分光、さらには面分光観測を行うことができる近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 (Simultaneous-color Wide-field Multi-object Spectrograph; SWIMS) は、こうした需要に応えて様々な科学目的を達成することのできる装置である。本研究では、この SWIMS の心臓部である検出器を駆動して読み出す、検出器読み出しシステムを開発し、その性能を評価した。

この検出器読み出しシステムの開発にあたって、検出器と読み出し回路はすべて Teledyne Imaging Sensors 社のものを使用した。SWIMS の最大の特長である 2 色同時広視野観測を達成するため、検出器は複数台同時に駆動する必要がある。パッケージ化された検出器と読み出し回路を複数台 SWIMS の中に組み込み、検出器読み出しシステムとして動作させるため、ハードウエア・ソフトウエア両面で開発を行った。その結果、目的としていた、検出器を複数台同時に駆動し、読み出すことのできるようなシステムを初めて構築することができた。

このシステムの性能を評価するために、まず検出器単体の性能を評価し、その上で実験用デュワー内で検出器を複数台同時に駆動しての性能を評価した。検出器単体の性能評価では、まず検出器の性能を最適化するための駆動パラメータの調整手法を確立し、その上で ADU-エレクトロン変換係数、読み出しノイズ、暗電流、線形性を評価した。評価の結果、科学的な目的から求められる検出器への要求性能は十分に達成可能であることが分かった。一方、検出器を複数台同時に駆動しての性能評価では、検出器間の干渉によりノイズが増加することが明らかになった。しかし、駆動パラメータの調整などにより、検出器複数台の読み出しシステムとしてもノイズの要求性能は達成できることを示し、さらに読み出しケーブルの設計変更など、干渉を減らすためのハードウエア面での解決策の案を示した。

本研究により、検出器読み出しシステムを開発し、それを SWIMS に搭載して観測するための基盤を全て整えることができた。また、検出器を SWIMS に搭載して駆動する際に必要になってくると思われる、駆動パラメータの調整手法を確立することができた。本研究に基づいて SWIMS に検出器読み出しシステムを搭載して調整し、性能を評価することで、科学的な目的のための観測を実現することができる。さらに、本研究で得られた知見は、同種の近赤外線検出器を用いる他装置の開発研究にも大いに資すると考えられる。

目 次

第1章　序論

1.1　銀河天文学における近赤外線観測の重要性

1.1.1　近年の観測的研究による科学成果

近年の観測的研究によって、宇宙年齢が 20–60 億年 (赤方偏移 $z = 1$–3) の時代に、宇宙の単位体積あたりの星形成率は現在の 30 倍程度とピークを迎えていることが明らかになってきた (e.g., Hopkins and Beacom, 2006) 。また、現存する星質量の半分以上はこの時代に形成され (e.g., Kajisawa et al., 2009) 、しかもそうした星形成活動の大部分が星形成率 10 $M_{\odot}$/yr 以上の爆発的星形成によって担われていることも明らかになりつつある (e.g., Caputi et al., 2009) 。銀河の星形成活動の歴史はそのまま銀河形成進化の歴史であることを踏まえると、この赤方偏移 $z = 1$–3 の時代は、銀河形成進化のまさに「激動期」であるといえる。こうした「銀河形成進化の激動期」における銀河の物理を明らかにすることは、近年の観測的研究の大きなテーマである。銀河の物理状態を調べるための指標として、ここでは金属量と星形成活動について見ていく。

金属量は、銀河の星形成活動に伴って進化してきた物質量であり、その進化史を調べることは銀河の形成進化史を調べることにつながる。近傍銀河では、銀河の物理量のうち、星質量-星形成率-金属量の間に基本金属量関係 (Fundamental Metallicity Relation; FMR) が成り立っていることが知られている。一方、$z = 2$–3 の遠方銀河では系統的に金属量が減少し、FMR に進化がある可能性が指摘されている。図 1.1 のように、Mannucci et al. (2010) によれば、$z = 0$–2 までは星質量-星形成率-金属量空間中の曲面として FMR を定義することができるが、$z = 2$–3 では FMR に対して系統的に金属量が減少している。FMR が赤方偏移進化するということは、銀河の物理状態が近傍から遠方まで単一の Closed-Box モデルでは表せず、遠方では未知の要因が効き始めることを示唆し、銀河形成進化のモデル構築に大きなインパクトをもつ。

銀河の金属量を算出するためには、静止系可視光の波長にある電離輝線の強度比をとる方法が一般的である。強度比としては、[NII]λ6584 / H$\alpha\lambda$6563 や R_{23} =([OII]λ3727+[OIII] λ4958,5007) / H$\beta\lambda$4861 といった値が用いられてきた。しかしながら近年、[NII]/Hα と [OIII]/Hβ、R_{23} と [OIII]/[OII] など、複数の輝線比を組み合わせた統合的な研究によって、$z > 2$ の高赤方偏移では電離光子数と原子数の密度比 (電離パラメータ) が大きい、またはガス密度が高いなど、近傍と銀河の電離状態が大きく異なるとの指摘がある (e.g., Kewley et al., 2013a,b; Nakajima and Ouchi, 2014; Steidel et al., 2014) 。こうした状況を物理モデルに組み込んでいない場合、遠方銀河の金属量は誤った値を算出してしまう可能性があ

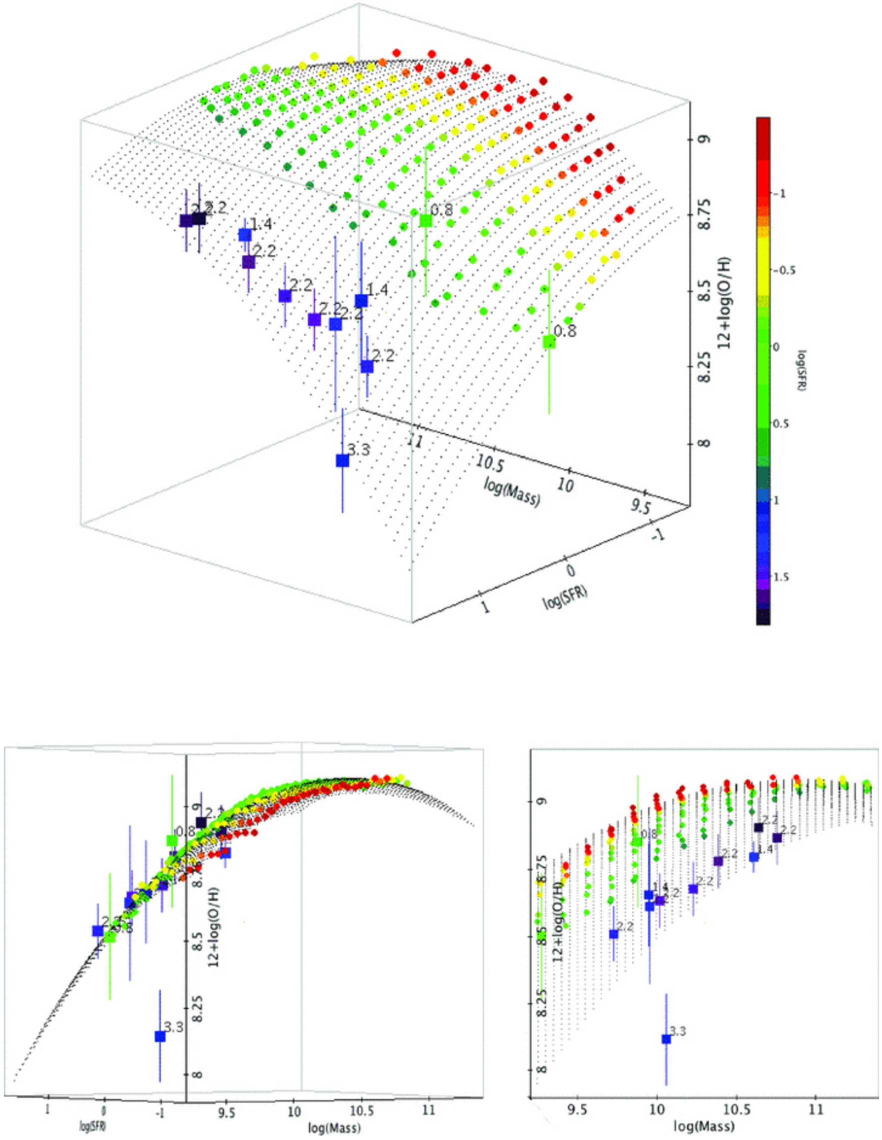


図 1.1: 銀河の FMR とその赤方偏移依存性 (Mannucci et al., 2010) 。グラフ中の各プロット点に付した数字は赤方偏移であり、数字のない点は近傍銀河のデータである。$z = 0$–2 の銀河は FMR 曲面上に存在するが、$z = 3.3$ の銀河のみ FMR と比較して有意に金属量が小さい。

るとされる。さらに、高赤方偏移の銀河では FMR が存在しないとの主張もなされており (Steidel et al., 2014) 、議論は混沌としている。高赤方偏移の銀河については、まだ分光データが不足しているため、こうした議論を決定づけることができていないという現状がある。従って、多くの天体の分光データを取得し、統計的手法によって金属量の算出方法も含めた多面的な研究が求められている。

銀河の星形成史を明らかにすることによって銀河の形成進化史を調べる研究も活発に行われている。特に近年では、銀河を点として捉えるのではなく、銀河を空間分解してその力学構造を明らかにする研究が活発になってきている。Förster Schreiber et al. (2009) では、$z \sim 2$ の星形成銀河の力学構造を統計的に調査し、“rotation-dominated”、“dispersion-dominated”、“interacting / merging system” がそれぞれ 1/3 ずつ存在し、merging が銀河の形態形成に大きな影響を与えていることを明らかにした。また、$z \sim 2$ の遠方銀河でクランプ状の星形成領域が発見される (Genzel et al., 2011) など、多くの発見がなされている。しかしながら、現在の望遠鏡と観測技術では、遠方の銀河を細かく分解して見ることは困難であり、近傍の銀河を細かく空間分解して調べる研究も重要である。

近傍で星形成活動の活発な銀河としては、赤外線で明るく輝く (超) 高光度赤外線銀河が挙げられる。高光度赤外線銀河においては、爆発的星形成が進行中であり、「銀河進化の激動期」において星形成活動の大部分を担っていた爆発的星形成について調べることができる。こうした爆発的星形成は、赤外線で明るく輝く (超) 高光度赤外線銀河がその多くを担っていたことが分かっている (Caputi et al., 2007) が、高い活動性を引き起こす物理機構の詳細は明らかになっていない。近傍の爆発的星形成銀河を空間分解してその力学構造やガス・ダスト分布などを調べていくことで、爆発的星形成の物理機構など、銀河形成進化の物理を解く鍵が得られると考えられる。

1.1.2　近赤外線観測の意義

遠方銀河の研究において、近赤外線による観測はますます重要性を増してきている。前項で述べたような、銀河の金属量を算出するために用いる電離輝線 ([NII]λ6584、H$\alpha\lambda$6563、[OIII]λ4958、5007、H$\beta\lambda$4861、[OII]λ3727 など) は、静止系可視光の波長域にある。こうした電離輝線は、$z = 1$–3 の遠方銀河では 0.9–2.5 μm の近赤外線の波長域に入ってくるため、近赤外線の分光観測装置を用いる観測研究が盛んに行われている。しかも、$z > 2$ の高赤方偏移銀河の分光サンプルはいまだ圧倒的に不足しており、今後より多くの天体を観測する必要がある。

近傍銀河では、近赤外線の波長域にある Pa$\alpha\lambda$18751、Pa$\beta\lambda$12818 といった電離輝線を用いた星形成活動の観測が重要である。星形成活動の指標としては Hα を用いる手法が最も一般的であるが、近赤外線の波長にあるこれらの電離輝線は比較的ダストによる吸収を受けにくいという利点がある。高光度赤外線銀河のように星形成活動の活発な銀河には、星形成活動に伴うガスやダストも多く存在している。ダスト吸収に強いこうした電離輝線の観測によって、星形成活動の空間分布や速度構造を詳しく調べることが可能になる。

1.2　近赤外多天体分光カメラ SWIMS

1.2.1　TAO 望遠鏡

東京大学理学系研究科天文学教育研究センター (天文センター) では、チリ共和国アタカマ高地のチャナントール山頂 (5,640 m) に東京大学アタカマ天文台 (The University of Tokyo Atacama Observatory; TAO) 6.5 m 赤外線望遠鏡を建設中である。TAO 望遠鏡は、良好なシーイング条件 (中央値で Full Width at Half Maximun (FWHM) $< 0''.8$) 、高い晴天率 (80–90%) 、非常に低い水蒸気量 (可降水量 (Precipitable Water Vapor; PWV) 0.5 mm) による赤外線の高い透過率という、赤外線観測に有利な条件を持った望遠鏡であり (Yoshii et al., 2002, 2010) 、2018 年の完成を目指している。

図 1.2 に、高度 5,640 m と 4,200 m、2,600 m での近赤外線域における大気透過率の比較を示す。通常は大気の窓は $\lambda = 1.1$–$1.3\ \mu$m の J バンド、$\lambda = 1.5$–$1.8\ \mu$m の H バンド、$\lambda = 2.0$–$2.3\ \mu$m の Ks バンドに完全に分割されるが、TAO 望遠鏡では無数に存在する水蒸気の吸収線が浅くなっており、連続的に窓が開けている。このような高い透過率により、TAO 望遠鏡では H バンドと Ks バンドの中間に位置する Paα 輝線 ($\lambda = 1.8751\ \mu$m) での観測が可能である (Tateuchi et al., 2014) 。Paα 輝線の観測が可能な地上望遠鏡は他になく、天文台として世界最高の標高に位置する TAO 望遠鏡の特長の 1 つである。

1.2.2　SWIMS の概要

近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 (Simultaneous-color Wide-field Multi-object Spectrograph; SWIMS) は、TAO 望遠鏡の第一期近赤外線観測装置として天文センターが開発中のカメラである (Konishi et al., 2012; Motohara et al., 2014) 。SWIMS は、TAO 望遠鏡の特長を最大限に利用するため、波長 0.9–1.4 μm と波長 1.4–2.5 μm の 2 色を同時に観測する設計となっている。SWIMS の外観と概念図を図 1.3 に示す。光路は短波長側と長波長側それぞれ、ダイクロイックミラーで反射される Blue Arm と、ダイクロイックミラーを透過する Red Arm の 2 つに分割されるよう設計されている。観測モードは、撮像、多天体分光、面分光の 3 モードを備える。観測モードはデュワー上部に取り付けた多天体分光マスク交換ユニット (Multi-Object Spectroscopy Unit; MOSU) によって切り替える。MOSU には多天体分光マスクや面分光ユニット (Integral Field Unit; IFU) が収納されている。IFU の光学系は非常にコンパクトに設計されており (Kitagawa et al., 2014) 、MOSU で他のスリットマスクと同様に扱うことができる。MOSU がマスクと IFU をロボットアームで焦点面に引き出してくることで、観測中も迅速に観測モードの切り替えが可能である (Takahashi et al., 2014) 。光学ベンチ中の各 Arm にフィルターホイールが配置されている。ホイールには、広帯域・中間帯域・狭帯域フィルタとグリズムが配置され、ホイールの回転により撮像モードと分光モードを切り替える。

SWIMS 全体の制御ソフトウエアシステムの構成を図 1.4 に示す。SWIMS の制御ソフトウエアは Instrument Control System (ICS) であり、Observation Control Processor

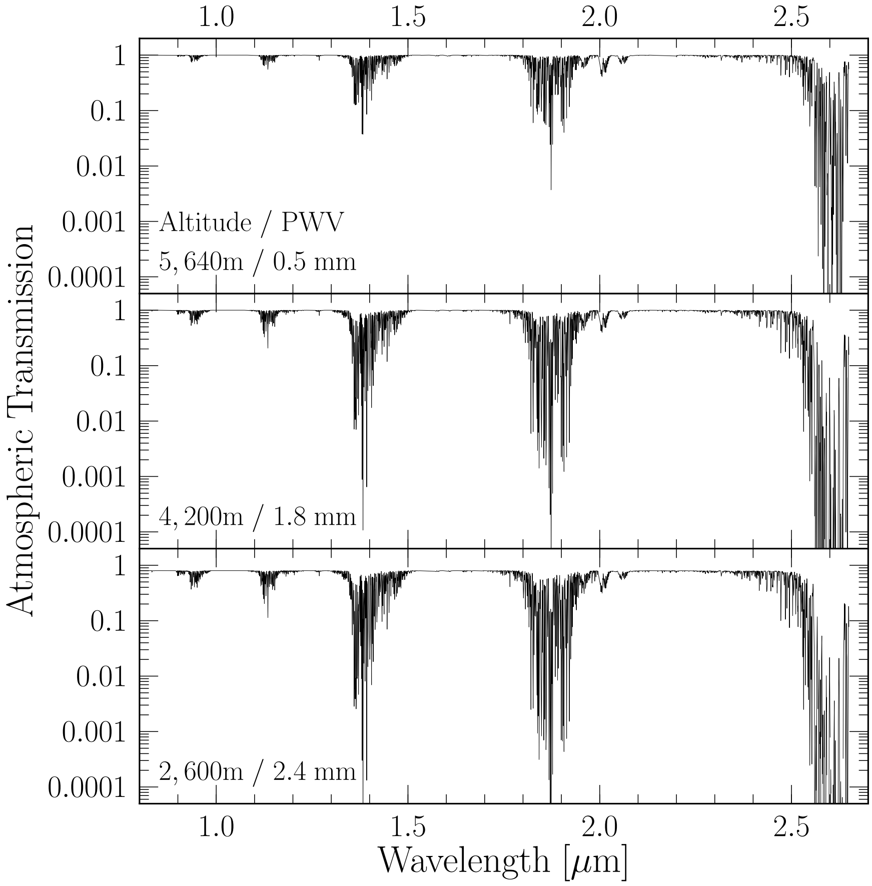


図 1.2: 大気透過率の比較 (Konishi et al., 2015) 。横軸が波長、縦軸が大気透過率であり、上からチャナントール山頂・マウナケア山頂・パラナル山頂に相当する高度と PWV での大気透過率モデル計算結果を示している。

(OBCP) と呼ばれる Linux PC で動作する。ICS はほとんどが Python で記述されており、個々のモジュールを Task Manager で制御する構造をとっている。Task Manager は、観測者が入力したコマンドの実行、ハードウエアとの通信を統括する。モジュールとしては、多天体分光ユニットとの制御を担う MOSU、温度モニタの読み出しを担う TPR、真空ゲージの読み出しを担う VAC などがある。SWIMS の各ハードウエアコンポーネントごとにモジュールが用意されているが、フィルターホイールと検出器の制御に関しては観測時に Blue・Red の各 Arm ごとに互いに連携して動作することが予想できるため、Arm Manager として統合されたモジュールとなっている。これらのモジュールはすべて、OBCP 内に MySQL で実装された関係データベース管理システム (Relational DataBase Management System; RDBMS) へのアクセス権を持ち、最新のステータスや蓄積されたデータを保存する。ハードウエアとの通信は、モジュールからは TCP/IP 通信で実現する。検出器以外のコンポーネントは全てターミナルサーバで集約する RS-232C 通信を採用し、検出器関連

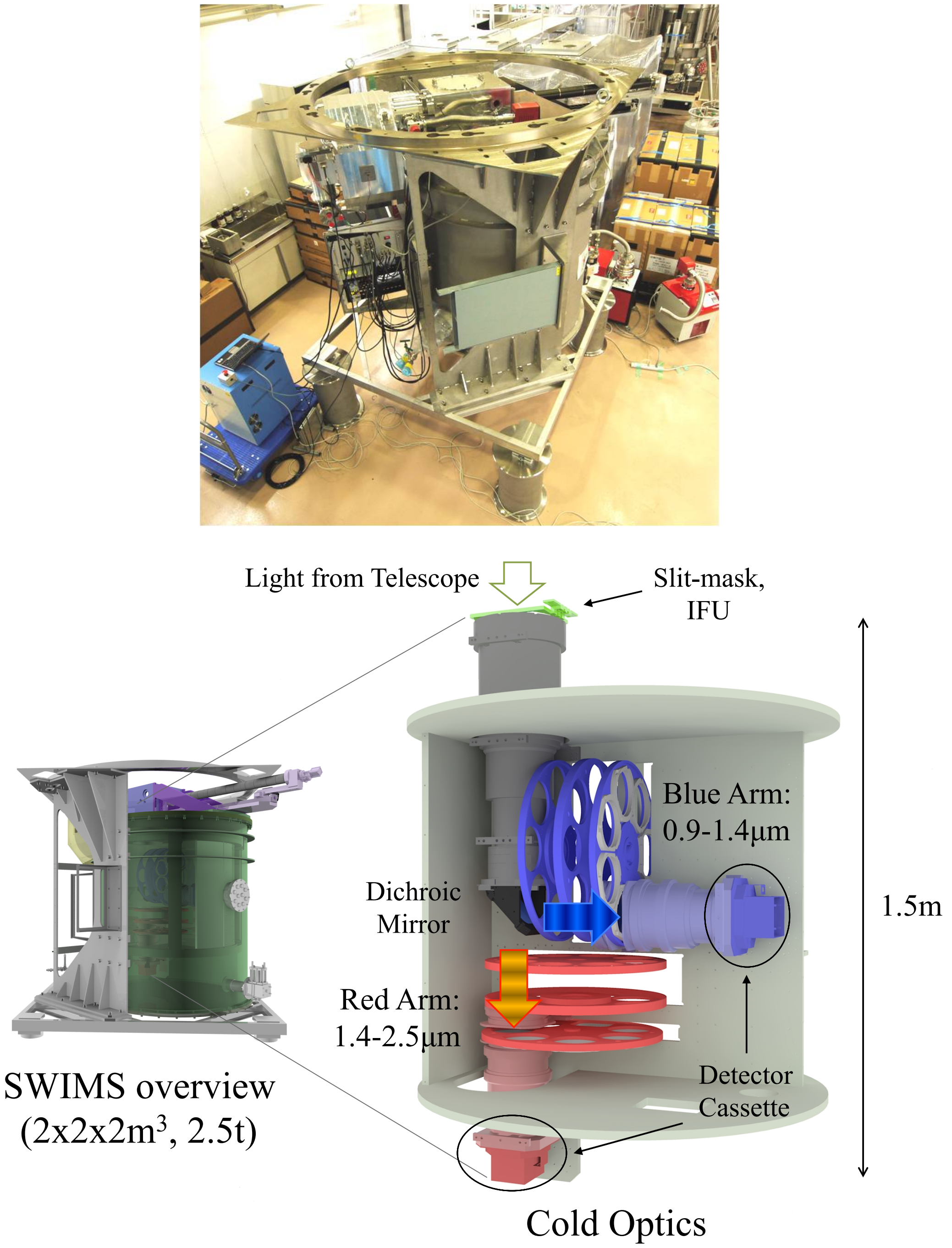


図 1.3: 上: SWIMS の外観。下: SWIMS の概念図 (Todo et al., 2014) 。デュワー中に光学ベンチが入っており、光学ベンチ全体が 80 K に冷却される。望遠鏡から入射した光はクライオスタット上部の MOSU でスリットマスクまたは IFU を通過し、ダイクロイックミラーによって Blue Arm と Red Arm に分割される。それぞれの光はフィルターホイール内の光学フィルターで波長選択されるか、またはグリズムで分散されて検出器に入射する。

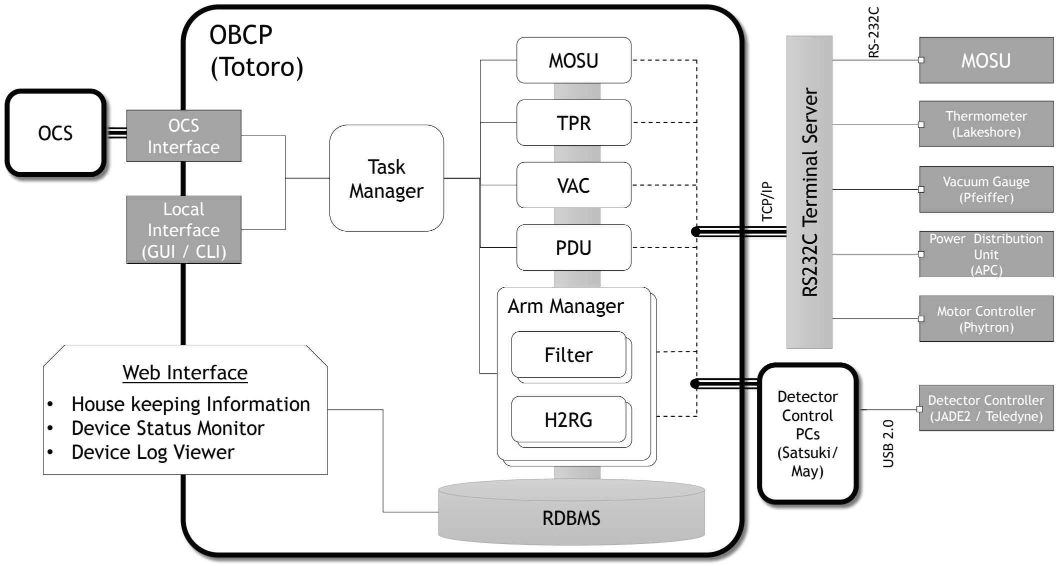


図 1.4: SWIMS 全体の制御ソフトウエアシステムの構成図 (Motohara et al., 2014) 。

のコンポーネントは検出器制御 PC と USB2.0 で通信する。インターフェースデザインは検討中であるが、望遠鏡側の制御ソフトウエアである Observation Control System (OCS) とのインターフェースとして OCS interface、観測者が ICS にアクセスして装置を制御するためのインターフェースとしては Local Interface 中に Command-line Interface (CLI) と Graphical User Interface (GUI) が用意されている。また、主に装置ステータスのモニタリングを実現する目的で、Web Interface も用意されている。

SWIMS の想定スペックを表 1.1 に示す。SWIMS は比較的広い視野 (TAO 搭載時で $\phi 9'.6$) を 2 色同時に観測することで高効率に観測することができる点に優位性があり、しかも撮像と多天体分光、面分光といった多様な観測手法を柔軟に利用することができる。また、地上では TAO サイトでしか観測することのできない Paα 輝線などに特化した様々な狭帯域フィルタや、J バンドを 2 波長、H、Ks バンドそれぞれを 3 波長ずつに分割した中間帯域フィルタといった多様で独創的なフィルタも準備が進められており、特徴的な観測を行うことができる。これらの SWIMS の優位性に加え、TAO 望遠鏡では東京大学が望遠鏡時間の約半分を専有し、大規模プロジェクトに充てることになっており、観測時間を集中的に投資することができるという利点がある。こうした様々な特徴から、SWIMS は近傍銀河の星形成活動や遠方銀河の物質形成過程といった様々な科学目標に迫ることができる大きなポテンシャルを持っていると言える。

表 1.1: SWIMS のスペック表。Motohara et al. (2014) より引用、一部改変。ただし、限界等級の算出条件は 3600 秒積分、5σ、AB 等級、点源の FWHM を 5 ピクセルとした。

	すばる望遠鏡 8.2 m	TAO 望遠鏡 6.5 m
観測モード	撮像、多天体分光、面分光	
観測波長範囲	0.9–1.4 μm (blue) / 1.4–2.5 μm (red)	
視野	$6'.6 \times 3'.3$	$\phi 9'.6$
検出器	HAWAII-2RG 2.5 μm × 4	HAWAII-2RG 2.5 μm × 8
ピクセルスケール	$0''.096$ /pix	$0''.126$ /pix
望遠鏡焦点	カセグレン	ナスミス
焦点面曲率半径	2,400 mm	1,250 mm
大きさ	2 m × 2 m × 2 m	
重量	2.5 ton	
分光分散 $\lambda/\Delta\lambda$	1,950–3,030 (blue) / 1,550–2,760 (red)	
限界等級		
撮像	J = 24.8, H = 24.3, Ks = 24.4	J = 24.5, H = 24.0, Ks = 24.1
分光	J = 22.0, H = 21.3, Ks = 21.2	J = 21.7, H = 21.0, Ks = 20.9

1.2.3　SWIMS の開発と本研究の位置づけ

TAO 望遠鏡ナスミス焦点の最終 F 値は、すばる望遠鏡カセグレン焦点の最終 F 値 12.2 (赤外副鏡時) と合わせて設定されている。そのため、F/12.2 に合わせて設計のなされている SWIMS は、コリメータ光学系を修正するだけですばる望遠鏡のカセグレン焦点に搭載して観測することができる。TAO 望遠鏡の完成は 2018 年ごろと見込まれることから、SWIMS は完成後、TAO 望遠鏡への搭載に先立ってハワイ観測所に移送され、マウナケア山頂のすばる望遠鏡でファーストライト観測を行う予定となっている。

SWIMS は現在、東京都三鷹市の天文センター内大型実験棟で開発が進められている。光学系やデュワーなど、各々の構成部品の製作は全て終了しており、現在は各部の動作試験と組み上げ作業が進行中である。2015 年度中には光学調整を完了して実験棟での開発を完了し、ハワイ観測所への移送を開始する予定である。

本研究では、このような SWIMS 全体の開発の中で特に、検出器を駆動し、読み出すシステムとその周辺を開発した。検出器は言うまでもなく観測装置の心臓部であり、本研究の内容は SWIMS の開発全体の中でも最も重要な開発項目である。本研究の目的は、SWIMS の科学目標を達成するために必要な検出器の読み出しシステムを開発し、その性能を適切に評価することである。SWIMS で用いる検出器は最新の近赤外線観測装置に非常に多く採用されているものであり、本研究で得られる検出器読み出しシステムの開発手法や評価方法は近い将来のあらゆる近赤外線観測装置開発に資する知見となる。

次の第 2 章では、検出器読み出しシステムの開発について述べる。第 3 章と第 4 章では検出器の性能評価について述べる。第 3 章では検出器を 1 台ずつ駆動し、検出器単体での各種性能を評価した上で、第 4 章で検出器の読み出しシステムとしての性能を評価する。第 5 章で本研究で得られた成果を総括し、今後の展望を述べる。

第2章　検出器読み出しシステムの開発

2.1　検出器と読み出しコンポーネント

2.1.1　検出器: HAWAII-2RG

SWIMS で採用した検出器は、Teledyne Imaging Sensors 社[1] (TIS) の HgCdTe ハイブリッドアレイ型検出器、HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager with 2K × 2K resolution, Reference pixels and Guide mode (HAWAII-2RG) である。図 2.1 に HAWAII-2G の外観、表 2.1 にそのスペックを示す。すばる望遠鏡搭載時にはピクセルスケールは $0''.096$ /pix となり、Red Arm と Blue Arm の各焦点面にそれぞれ 2 台ずつ HAWAII-2RG を配置することで視野は長方形型に $6'.6 \times 3'.3$、TAO 望遠鏡搭載時にはピクセルスケール $0''.126$ /pix で各焦点面に 4 台を正方形型に配置し、視野は $\phi 9'.6$ である。焦点面での検出器の配置を図 2.2 に示す。

HAWAII-2RG はハイブリッドアレイ型の検出器であり、近赤外線に感度をもつ HgCdTe 半導体結晶と読み出し回路を組み込んだマルチプレクサ (Multiplexer; MUX) をインジウムバンプで接続するという構造を持つ。検出器回路の概念図を図 2.3 左 に示す。検出素子はフォトダイオードであり、入射した光子のエネルギーで電子正孔対を生成する。電極にバイアス電圧をかけることで電子と正孔が移動して電極の電位を変化させ、光子数に応

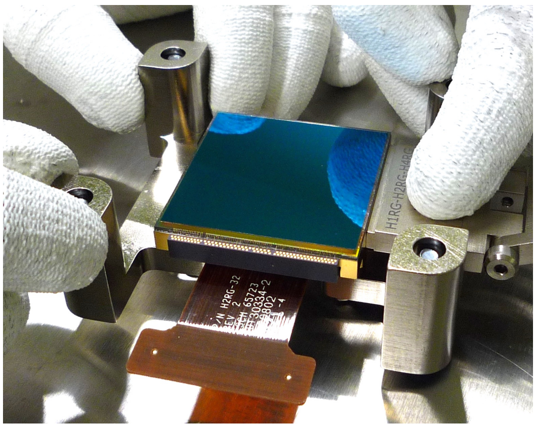


図 2.1: HAWII-2RG の外観。中央の検出器から手前に出ている茶色のパーツは読み出し回路に接続するためのフラットケーブル。

[1] Camarillo, CA 93012 United States; `http://www.teledyne-si.com/imaging/`

表 2.1: SWIMS で採用した HAWAII-2RG のスペック表。

ピクセル数	2048×2048
アレイサイズ	4 cm $\times$ 4 cm
ピクセルサイズ	18 μm
参照ピクセル数	$4 \times 4 \times 2044$
半導体結晶	HgCdTe
カットオフ波長	2.5 μm

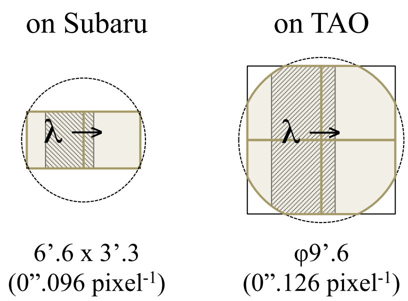


図 2.2: HAWAII-2RG の焦点面での配置 (Konishi et al., 2012) 。左: すばる望遠鏡での検出器 2 台使用時、右: TAO 望遠鏡での検出器 4 台使用時。撮像モードでの視野範囲は薄いグレーで示した。分光モードでの波長の分散方向は矢印で示した方向であり、スリットマスクが斜線部に位置する天体は 0.9–2.5 μm の全ての波長範囲のデータを得ることができる。

じてピクセル出力電圧が変化する。このピクセル出力電圧を、ピクセルソースフォロワを経て出力電圧 V_{out} として出力する。マルチプレクサでは、ピクセルの縦横ラインの選択スイッチによってピクセルソースフォロワを順送りに読み出しバスへ接続し、電圧を出力する。

HAWAII-2RG の一つの特徴として、参照ピクセル (Reference Pixel) の存在が挙げられる。参照ピクセルとは、ピクセルのフォトダイオードの替わりに、対応する 40 fF のコンデンサを組み込んだものである。参照ピクセルは通常のピクセルと全く同じように読みだすことができ、光子には反応せず暗電流もないため、理想的には出力電圧は一定になる。読み出し回路は通常のピクセルと共有するため、読み出しノイズについては通常のピクセルと同様に振る舞う。このことから、参照ピクセルは読み出しノイズ測定の重要な指標となる。また、HAWAII-2RG では参照ピクセルは図 2.3 右 のように配置されており、参照ピクセルの読み出しはピクセルアレイに組み込まれて通常のピクセルと同時に行われる。そのため、参照ピクセルはバイアスレベル変動の補正に利用できる。

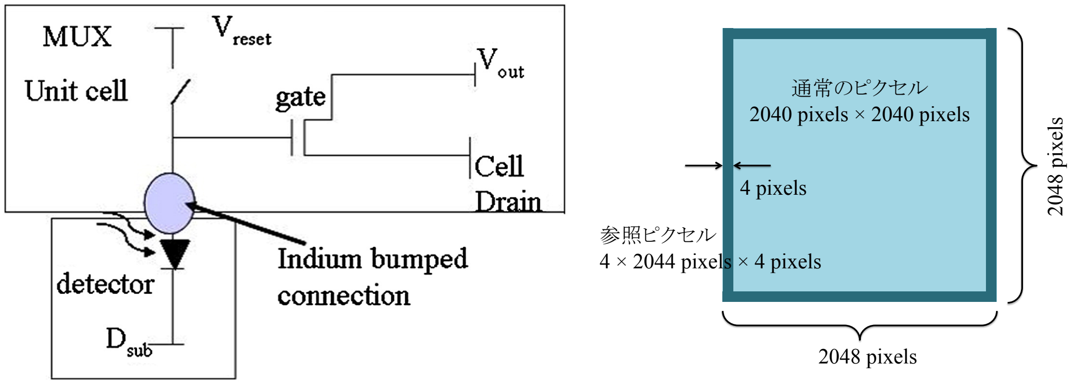


図 2.3: 左: HAWAII-2RG の検出器回路の概念図 (Crouzet, 2009) 。ピクセルフォトダイオードは、インジウムバンプを経てマルチプレクサに接続され、ソースフォロワのゲートに入力する。出力電圧 V_{out} は、ソースフォロワのソースからの出力として生成される。右: 参照ピクセルの配置図。濃い色で示した参照ピクセルはアレイの 4 端それぞれに 4 ピクセルずつ配置され、薄い色で示した通常のピクセルはアレイ中央に配置される。

2.1.2　読み出し回路: SIDECAR ASIC と JADE2 Card

SWIMS では、HAWAII-2RG を専用の読み出し回路 System for Image Digitization Enhancement Control And Retrieval (SIDECAR) Application Specific Integrated Circuit (ASIC) と JWST ASIC Drive Electronics 2 (JADE2) Card を使って駆動、読み出しを行う。これらの読み出し回路は、HAWAII-2RG と同じく、TIS 社で開発・製造されたものを購入した。HAWAII-2RG と SIDECAR はフラットケーブルで接続され、真空冷却 (∼ 80 K) 環境で駆動する。SIDECAR と JADE2 も同様にフラットケーブルで接続されるが、JADE2 は常温環境で駆動する。取得したデータは JADE2 と Windows マシンを USB2.0 ケーブルで接続して読み出す。

SIDECAR では、HAWAII-2RG から出力される V_{out} を Analog-to-Digital Unit (ADU) カウントに変換する。SIDECAR のこの処理経路を図 2.4 に示す。検出器のアナログ出力電圧 V_{out} は、参照電圧 (Reference Voltage) との電位差で測定される。電位差は、まず前置増幅器 (Preamplifier; Preamp) で指定の倍率に増幅され、アナログ-デジタル変換器 (Analog-to-Digital Converter; ADC) で 16bit のカウントに変換される。変換されたピクセルカウントは JADE2 へ伝送される。また、SIDECAR では検出器の駆動クロックの生成も担っている。読み出し速度・読み出しモードなどのパラメータに応じて、SIDECAR 内でクロックをプログラミングし検出器に入力することで、実際に検出器を駆動する。

検出器から読み出されたピクセルカウントは、フラットケーブルを経由して JADE2 に入っていく。JADE2 は、Windows マシン内で動作する TIS 社製の専用ソフトウエアと通信し、USB2.0 ケーブルを通してピクセルカウントを送信する。検出器を駆動する全ての電源は、JADE2 から供給される。検出器の駆動は USB2.0 からの DC 5 V の供給のみでも可能だが、ノイズ軽減の観点から、直流安定化電源を使用して DC 5.5 V を供給するこ

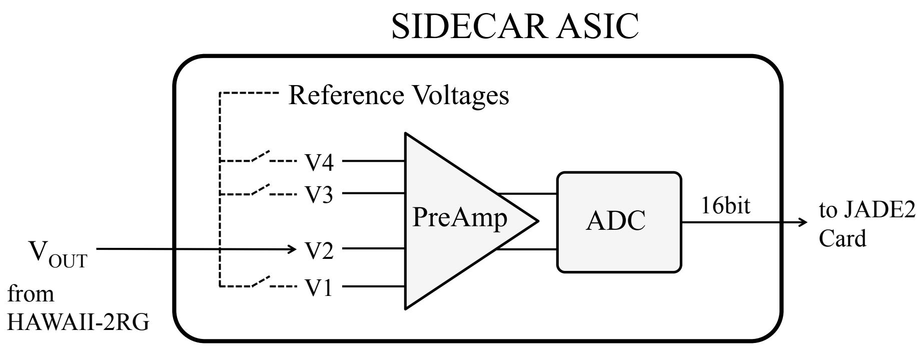


図 2.4: SIDECAR 内での検出器出力処理経路の概略図。

とが TIS 社により推奨されている。

2.1.3　駆動ソフトウエア

検出器駆動用のソフトウエアは、TIS 社から提供されたものを使用する。このソフトウエアは Windows 上で動作し、Hardware Abstraction Layer (HAL) Server・SIDECAR ASIC Integrated Development Environment (IDE) ・HxRG Socket Server の 3 つのコンポーネントからなる。HAL Server は JADE2 インターフェースとコンピュータ間の低レベルコミュニケーションを担う。この通信には USB2.0 と QuickUSB Device Driver を使用する。検出器の読み出し、バイアス電圧の変更などのコマンドは全て SIDECAR ASIC IDE から HAL Server を通じて送信される。SIDECAR ASIC IDE には図 2.5 のような GUI が用意されており、手動でバイアス電圧やタイミングなどの設定を変更することができる。設定された動作は、SIDECAR ASIC IDE がアゼンブリコードやファームウエアをプログラミングすることで実現する。HAWAII-2RG や SIDECAR に電源を投入する *initialization* などの操作ではアゼンブリが用意されており、ボタン一つで実行することができるが、検出器を駆動するためのパラメータ設定の変更など、様々な用途に合わせたクロックを記述し、アゼンブリを実行させることは一般には容易ではない。

本研究の検出器駆動では、SIDECAR ASIC IDE をラッピングしたソフトウエア、Interface Definition Language (IDL) で記述された HxRG Testing Software を使用する。HxRG Testing Software の GUI を図 2.6 に示す。HxRG Testing Software では、検出器の読み出し、駆動パラメータの変更などの操作をより直感的に行うことができ、通常の検出器駆動の目的では十分な機能をもつ。GUI が充実しているため、手動で電圧を設定したりクロックを記述したりする必要がなく、SIDECAR ASIC IDE と比べてより簡易的なインターフェースである。さらに、HxRG Testing Software にリモートホストから接続するために Socket Server が用意されている。Socket Server は、TCP/IP 通信によってリモートホストと Windows マシン間の通信を担う。Socket Server を利用することによって、HxRG

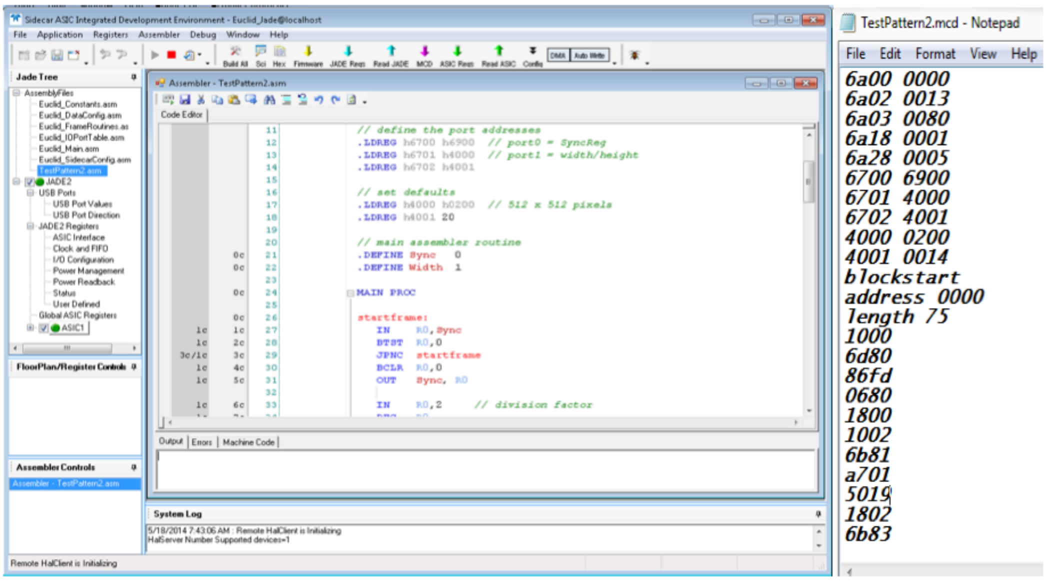


図 2.5: SIDECAR ASIC IDE の GUI (Chen et al., 2014) 。

Testing Software 上で行う全ての操作をリモートホストのコマンドライン上で実現することができる。Socket Server は、HxRG Testing Software と高レベルなコミュニケーションを実現する。検出器の駆動パラメータ設定や読み出し開始、読み出し中断などのコマンドはユーザーに理解できる形で定義されており、GUI を使用しなくても同様に直感的に操作することができる。

2.2　SWIMS における検出器読み出しシステム開発の意義

2.1 節で述べたように、検出器とそれを駆動するための読み出し回路、駆動ソフトウエアは全て TIS 社が開発・製造し、SWIMS チームで購入したものである。これらのコンポーネントはすでに検出器読み出しシステムとしてパッケージ化されており、全てを手順に則ってセットアップしていけば何らかの画像を出力させることは可能である。そういう意味で、本研究は、これまでの可視・赤外線検出器の読み出しシステム開発研究に多く見られるような、読み出し回路を設計し、性能評価を繰り返してシステムを最適化していく研究とは明確に一線を画する。しかしながら、近年は特に近赤外線の波長域で検出器の高性能化、アレイサイズの大型化が進み、そうした傾向から検出器とその読み出し回路はパッケージ化されて開発メーカーから提供される例が多くなってきている。本研究は、こうした近年の傾向に沿うものである。本研究の目的は、すでにパッケージ化された読み出しシステムを SWIMS に組み込んで専用の検出器読み出しシステムとすることである。こうした開発研究の意義は次の 3 点が挙げられる。

一点目に、赤外線検出器と読み出し回路は非常に複雑であり、セットアップして動作さ

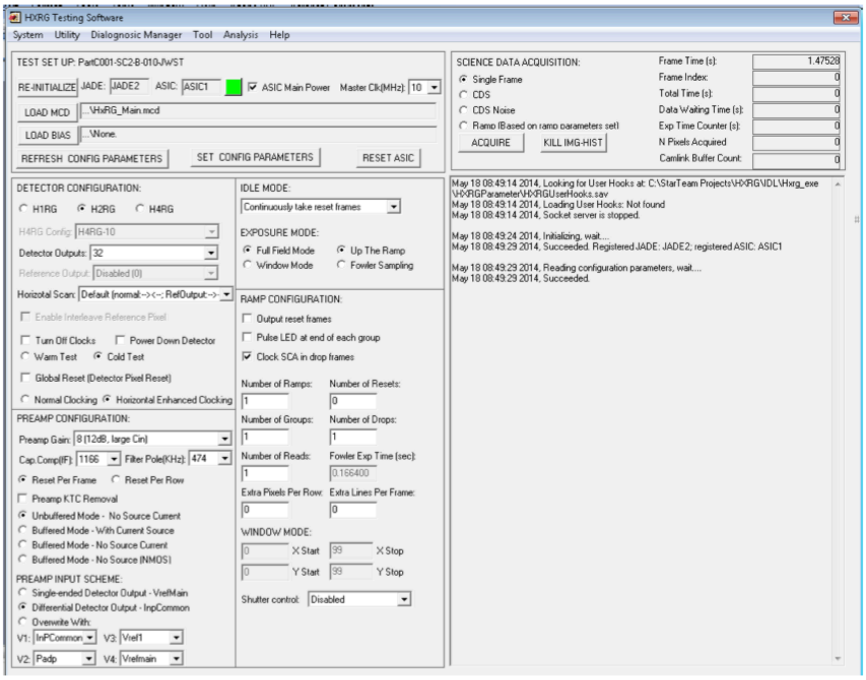


図 2.6: HxRG testing Software の GUI (Chen et al., 2014) 。

せただけでは目標とする性能が必ずしも得られないことが挙げられる。パッケージ化された読み出しシステムとはいえ、それを単体で動かすだけでは観測装置として機能しない。観測装置に組み込んでなお目標の性能を得るためには、検出器と読み出し回路の特性を理解し、目標に応じてパラメータを最適化する必要がある。なお、こうした点は自前の読み出し回路を設計開発する場合も同様であり、期間の限られた観測装置開発においては、回路を一から設計して評価し、パラメータを最適化する一連の開発過程を全てこなすのは時間的に厳しい場合が多い。従って、回路の設計はせずに既存のものを購入し、システムへの組み込みとパラメータの最適化といった開発作業に注力したほうが全体のパフォーマンスとしてプラスに働くことが見込まれる。

二点目に、ある程度時間をかけてシステムを開発評価し、読み出しパッケージの中身について理解を深めることで読み出しシステムの中のブラックボックスを出来る限り残さないようにすることが挙げられる。駆動ソフトウエアまで開発メーカーに依存することになるため、本研究で開発する検出器読み出しシステムには、不可避的にブラックボックスが組み込まれることになる。ブラックボックスの存在に無自覚なままシステムを利用すると、システムに何らかの問題が発生したときに全く対処できないことになる。こうした事態を回避するため、ハード面・ソフト面の開発と性能評価を通じて、開発メーカーから提供された読み出しパッケージの中身の理解を深めるのは非常に重要である。

最後に、SWIMS で採用する検出器 HAWAII-2RG と読み出し回路 SIDECAR・JADE2 は近年非常に多くの観測装置で採用されており、今後も引き続き採用が見込まれることが

挙げられる。天文用途で TIS 社が開発している近赤外線の検出器は、HAWAII-2RG を始め HAWAII-1RG・HAWAII-4RG があり、いずれも高い感度と低い読み出しノイズにより多くの観測装置で採用されている。こうした装置では SWIMS と同じくパッケージ化された読み出し回路を導入しており、本研究と同様の開発は今後も必要であると考えられる。SWIMS のような規模の装置で複数台の HAWAII-2RG を導入した例は日本国内ではまだなく、本研究はコミュニティの中で先駆的な研究である。

2.3　システム設計と開発

2.3.1　システムの要求性能

SWIMS で目標とする最終性能から、SWIMS の検出器読み出しシステムへの要求性能を考える。まず、読み出し速度については、目標とする天体の明るさから検討する。最も多くの光子が検出器に入射するような観測として、明るい点源天体の撮像を考え、J バンドで AB 等級 $m = 15$ mag でも飽和しないような読み出し時間を求める。観測波長 $\lambda = 1.25 \times 10^{-6}$ m、波長幅 $\Delta\lambda = 1.6 \times 10^{-7}$ m、すばる望遠鏡の口径 $D = 8.2$ m、大気透過率から検出器の量子効率まで含めたシステム効率 $\eta = 0.3$ とする。検出器では光子 1 つにつき電子が 1 つ生成されるとして、1 秒あたりの電子数 n_p は、

$$n_p = \eta \times f_\lambda \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \Delta\lambda \times \frac{1}{h\nu} = 1.1 \times 10^{11-0.4m}\ \mathrm{e^-/sec} \tag{2.1}$$

で表される。ここで、f_λ W/m^2/m は、単位面積あたり・単位時間あたり・単位波長あたりに入射する天体からの光子のエネルギー、h はプランク定数である。HAWAII-2RG の飽和電子数は TIS 社のカタログ値から 1×10^5 e$^-$、1 ピクセルに入射する光子数は、シーイングが最小で $0''.2$ のときに全光子数の $\sim 30\%$ が星像の中心ピクセルに集まって最大となる。従って、要求される最短の読み出し時間は、

$$t = \frac{1 \times 10^5}{0.3 \times 1.1 \times 10^{11-0.4\times 15}} \simeq 3\ \mathrm{sec} \tag{2.2}$$

である。よって要求読み出し速度は < 3 sec/frame と決まる。

次に読み出しノイズ性能への要求を検討する。読み出しノイズは、最も背景光のノイズが小さくなる分光観測でも、読み出しノイズリミットにならないような値を要求値とする。すばる望遠鏡での J バンド全体の平均の背景光は 16.3 mag/arcsec^2 であるが、J バンドの背景光には OH 夜光輝線が多数含まれており、背景光は OH 夜光のない波長域で最小となる。Iwamuro et al. (2001) によれば、OH 夜光のない波長域での背景光は平均の値と比べて $< 4\%$ である。したがって、ここでは背景光の大きさの上限値として、19.8 mag/arcsec^2 を与える。典型的なシーイング $0''.5$ として、背景の面積を $A = 0''.5 \times 0''.5 = 0''.25$ と設定する。このとき、空間方向に積分されるピクセル数は $N = 0''.5/0''.096/\mathrm{pix} = 5.2$ pix

表 2.2: SWIMS の検出器読み出しシステムへのハードウエア面での要求性能。

読み出し速度	< 3 sec/frame
読み出しノイズ	$\lesssim 14$ e$^-$
暗電流	$\ll 0.20$ e$^-$/sec/pix
駆動温度	< 80 K

である。ピクセル波長分散は $d = 5$ Å/pix に設定されている。このとき、背景光の単位時間あたり、単位波長あたりの電子数は $n_{bg} = 0.83$ e$^-$/sec/arcsec^2/Å $\times A = 0.21$ e$^-$/sec/Å である。背景光の単位時間あたり、ピクセルあたりの電子数は、$n_{bg}d/N$ e$^-$/sec/pix であるので、積分時間 t sec で背景光のポアソンノイズは、$\sqrt{n_{bg}dt/N}$ e$^-$ である。典型的な積分時間として $t = 1000$ sec で背景光のポアソンノイズが読み出しノイズと等しくなる読み出しノイズ σ_{read} を求めると、

$$\sigma_{read} = \sqrt{\frac{n_{bg}dt}{N}} \sim 14 \text{ e}^- \tag{2.3}$$

となる。この値が読み出しノイズへの要求性能の上限値となる。なお、背景光の大きさを OH 夜光を含めた J バンド全体の平均の値とすると、読み出しノイズへの要求は $14/\sqrt{0.04} \sim 70$ e$^-$ である。

暗電流への要求性能は、最も背景光が小さい観測でも十分無視できるほど小さい値であることである。分光観測で J バンドの OH 夜光がない波長域での背景光より、$n_{bg}d/N = 0.20$ e$^-$/sec/pix が最も小さい背景光なので、暗電流への要求性能は、$\ll 0.20$ e$^-$/sec/pix となる。また、暗電流を十分小さく抑えるために、TIS 社から示された HAWAII-2RG の駆動温度として、< 80 K という要求が与えられる。これらハードウエアへの要求性能を表 2.2 にまとめた。

また、検出器の量子効率は、TIS 社のカタログ値では波長 0.9–2.5 μm で $\gtrsim 60\%$とされている。この値を前提として上ではシステム効率を $\eta = 0.3$ とした。検出器読み出しシステムへの要求性能としては量子効率も重要であるが、本研究での開発範囲を超えているため、ここでは特に要求性能としては示さないこととする。ただし、このカタログ値を測定で実証することは必要である。

SWIMS 全体の制御ソフトウエアは、1.2.2 項で述べたように Python で記述されている。検出器読み出しシステムのソフトウエアもこのソフトウエアに適切に組み込む必要があり、そのため言語は Python とすることが要求される。また、SWIMS 全体の制御 PC である OBCP が Linux (具体的には CentOS 6.4) であるため、検出器の制御 PC もこれに揃える必要がある。

SWIMS の検出器読み出しシステムは、まずすばる望遠鏡搭載時の構成として HAWAII-2RG を各焦点面に 2 台ずつ、計 4 台組み込む構成についてシステムを設計した。ただし、

実際のシステム設計にあたっては、TAO 望遠鏡搭載時の、4 台ずつ計 8 台という構成への拡張性も考慮に入れた。こうした設計は、他装置の実績 (e.g., Klein et al., 2012) を大いに参考にし、検討を進めた。また、SWIMS の巨大なデュワー中に各コンポーネントを適切に配置することも重要である。これを実現するために、新しいシステムコンポーネントの開発も行った。

2.3.2　システムの構成

システムの構成を図 2.7 に示す。HAWAII-2RG と SIDECAR は ∼ 80 K の冷却光学系中にインストールされ、これらの間は TIS 社製の長さ ∼ 3 cm のフラットケーブルで接続される。JADE2 は SWIMS デュワー内の常温真空部にインストールされる。SIDECAR と JADE2 間もフラットケーブルで接続されるが、長さ ∼ 40 cm の TIS 社製のものではデュワー内にインストールするにあたって長さが不足であるため、独自に開発したものを用いる。JADE2 と PC 間は USB2.0 ケーブルで通信する。なお、駆動電源としては USB2.0 の DC 5 V を使用せず、株式会社テクシオ・テクノロジー [2] (旧 KENWOOD) 製の直流安定化電源から 5.5 V・0.400 A を供給する。検出器 4 台の駆動と読み出しは、Linux PC 2 台で制御する。具体的には、それぞれの Linux PC に仮想化ソフトウエア VMware を使って仮想 Windows マシンを 2 台ずつインストールし、仮想マシン 1 台ごとに 1 台の検出器を担当させる。この構成にすることにより、検出器台数が倍増しても実の PC 台数を保ったままシステムを拡張することができ、管理が容易であると考えられる。ただし、実際に 1 台の Linux PC に仮想マシンを 4 台インストールしてもデータの書き込み速度などに影響がないかは未確認である。各焦点面の検出器 2 台ずつを担当する Linux PC 2 台は、SWIMS 全体の制御を担う OBCP によって制御される。前項で述べた要請から、これら全ての Linux には CentOS 6.4 を採用する。

仮想マシンでの検出器の駆動は VMware の機能によりうまく動作させることができる。JADE2 と接続する USB2.0 ケーブルは、VMware の設定により、2 台の仮想マシンそれぞれに所定のポートを配分する。正しく設定していれば、仮想マシンを再起動などしても USB の認識は正しく行われ、読み出す検出器の同一性は保たれる。また、ホストの Linux PC との共有フォルダを設定し、読みだした画像データ、ログファイルの書き込み先として共有フォルダを指定することで Linux と Windows 間で問題なくデータを共有することができる。図 2.8 に、仮想マシンを 2 台動作させ、それぞれで HxRG Testing Software を実行しているディスプレイの例を示した。

上記のようなシステムを実現するために、2.3.3 項、2.3.4 項に示した開発を行い、SWIMS で用いるための検出器読み出しシステムを完成させた。

[2] 神奈川県横浜市港北区、http://www.texio.co.jp/jp/index_texio1.html

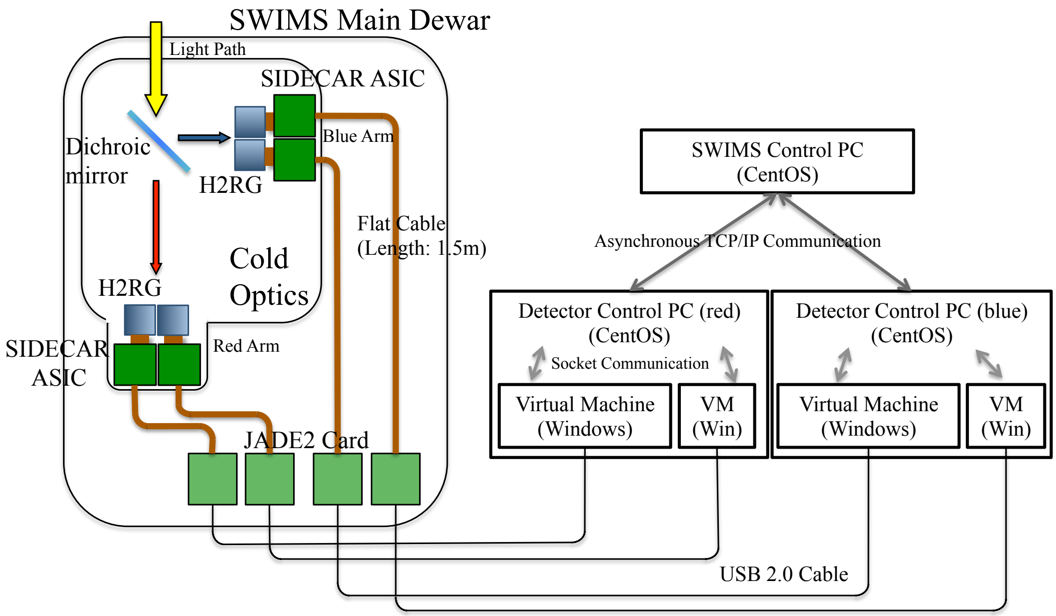


図 2.7: SWIMS の検出器読み出しシステムの構成概念図 (Todo et al., 2014) 。

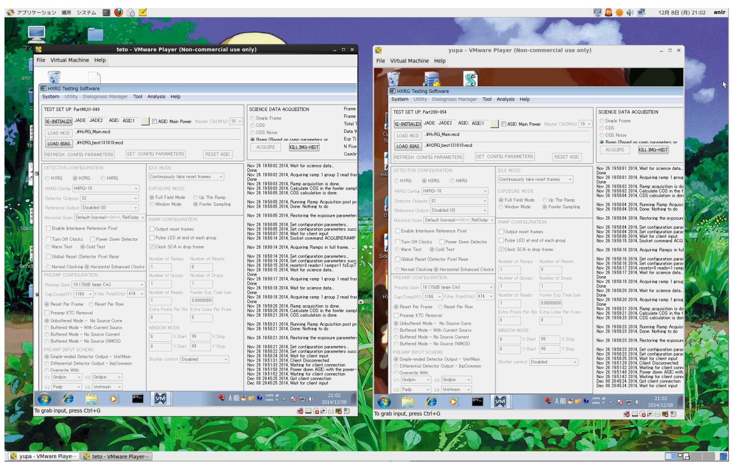


図 2.8: Linux PC 上で仮想 Windows マシンを 2 台動作させ、それぞれ HxRG Testing Software を実行しているディスプレイの例。このようにして Linux PC 1 台で HAWAII-2RG 2 台の駆動を制御する。

2.3.3 ハードウエア開発

この項では、検出器読み出しシステムのために要した開発のうち、ハードウエアに関連するものを挙げる。これらのコンポーネントの開発により、図 2.7 のようなシステムを実際に SWIMS デュワーにインストールすることが可能になった。

検出器カセット

1 つめは検出器を焦点面にインストールするためのコンポーネント、検出器カセットである。検出器カセットの構造は図 2.9 上 のようになっており、設計はオプトクラフト [3] に依頼した。HAWAII-2RG はインターフェースプレートに M2.6 ナット 3 点で固定する。このプレートには、HAWAII-2RG と熱収縮率が近く、熱伝導性のよいモリブデン合金を用いた。なお、カセットの他の部分はアルミニウムに黒アルマイト加工を施した部材で製作した。カセットは、検出器の裏側などからの漏れ光を可能な限り防ぐことを目標として設計した。HAWAII-2RG と SIDECAR 間のフラットケーブルの長さに制約があることから、SIDECAR は焦点面の裏側に垂直に配置した。長方形の視野の短辺側からフラットケーブルが出て SIDECAR に接続し、2 台の SIDECAR は互いに向き合うように配置されている。このカセットを SWIMS のカメラレンズ光学系に取り付けることで、焦点面に検出器をインストールすることができる。

図 2.9 下 に検出器カセット組み上げ試験のようすを示した。この試験により、検出器カセットは問題なく組み上がることが分かった。ただし、インターフェースプレートの設計上、2 台の HAWAII-2RG の間には 0.3 mm 程度の隙間があること、ナット 3 点固定にはアソビがあるために 2 台の HAWAII-2RG の平行度は最大で 0.5° 程度ズレ得ることには注意が必要である。また、この図のように、検出器のハンドリングはクリーンルーム内で静電気に留意しつつ慎重に行う必要がある。

フラットケーブル

2 つめは SIDECAR と JADE2 間のフラットケーブルである。このフラットケーブルは、製作を沖電線株式会社 [4] に依頼した。このケーブルは SWIMS デュワー内で複雑な経路を通す必要があるため、曲げに対する柔軟性も求められるが、沖電線製ケーブルは TIS 社製と比較して非常に柔軟性の高いものになった。開発したケーブルの写真を図 2.10 に示す。ケーブルは、長さ 1.5 m、幅 6 cm で、末端処理には 140 ピンコネクタを用いる。なお、このケーブル内の伝導による熱流入は、SWIMS においては十分に無視できる。

ケーブルの使用にあたっては、冷却環境下での駆動試験に先立って次のような試験を行い、動作を確認した。

(1) 常温常圧駆動試験
図 2.10 のように、室内環境で SIDECAR と JADE2 を接続し、動作チェックと空読

[3] 神奈川県相模原市緑区、`http://www.optcraft.com/index.html`
[4] 神奈川県川崎市中原区、`http://www.okidensen.co.jp/jp/`

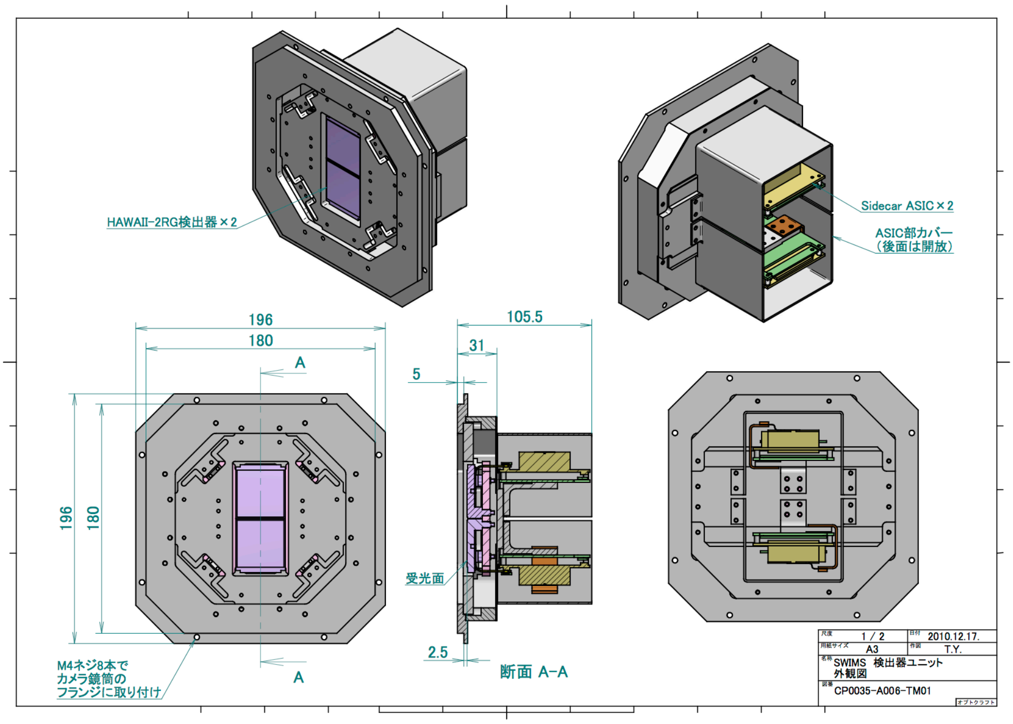


図 2.9: 上: 検出器カセットの設計図面。オプトクラフトによる。HAWAII-2RG 2 台を並列で並べ、裏側に焦点面と垂直な向きで SIDECAR を配置するという構造になっている。下: 検出器カセットの組み上げ試験のようす (Todo et al., 2014) 。カセットの中央にインストールされている検出器は、左側が青く見える HgCdTe のあるサイエンスグレード、右側は読み出し回路基盤のみのマルチプレクサである。

図 2.10: 沖電線製ケーブルを SIDECAR と JADE2 に接続し、動作試験をしているようす (Todo et al., 2014) 。

み出しを行った。特に問題なく駆動できることが確認された。

(2) 真空耐久試験
ケーブル全体を真空デシケータに入れ、0.3 atm で 30 分間放置した後、外観チェックと (1) と同様の動作確認を行った。この真空環境では特に外観に目立った変化はなく、その後の動作も正常であった。

(3) 冷却耐久試験
ケーブル全体を ∼ 77 K の液体窒素に漬け込み、1 分間放置した後、外観チェックと (1) と同様の動作確認を行った。この試験でも特に外観に目立った変化はなく、動作も正常であることが確認された。

これら全ての試験で異常が見つからなかったことから、沖電線製ケーブルは真空冷却下での使用に堪えられると判断した。

ハーネス

3 つめは SWIMS デュワーの内外を接続するハーネスである。ハーネスには、41 ピン丸型コネクタを採用し、製作は株式会社メイワ電子 [5] に依頼した。検出器関連でハーネスに接続するのは、JADE2 と PC 間の USB2.0 が 4 本、JADE2 の直流電源ラインが 4 本である。USB2.0 ケーブルには、各々5 ピンを結線し、V_{bus}、D−、D+、GND、シールドラインを配線する。電線サイズは AWG28 (ϕ0.3211 mm) とする。シールドラインは、ケーブルの外側をアルミ線で覆うシールドとして利用し、USB2.0 コネクタ側ではコネクタハウジングと接続する。また、直流電源ラインには各々2 ピンを結線し、Power+、Power− ラインを配線する。電線サイズは AWG24 (ϕ0.5106 mm) とし、外部電源側の末端は丸型圧

[5] 神奈川県横浜市瀬谷区、http://www.meiwadenshi.co.jp

着端子処理とする。また、電源ラインは 4 本それぞれをアルミ線シールドし、ノイズ対策とした。

2.3.4　ソフトウエア設計と開発

この項では、検出器読み出しシステムのために要した開発のうち、ソフトウエアに関連するものを挙げる。まずソフトウエア設計の思想と実際のソフトウエア構成について述べる。次に、開発したソフトウエアと、その動作の詳細について述べる。

ソフトウエア設計

2.3.1 項でも述べたように、ICS とのアクセスを簡単にするため SWIMS の検出器読み出しソフトウエアは全て Python で記述する。Arm Manager を通じて ICS から検出器へアクセスするインターフェースは、各 Arm ごとに一つに統合する。TIS 社製の HAWAII-2RG 駆動ソフトウエアである HxRG Testing Software は Windows マシン上での GUI 操作を前提としているが、ICS から CLI でのアクセスを可能にするため、すべての操作はコマンドラインで実現できるように整備する。また、Arm 内の 2 台の検出器は同期して全く同じ動作をするように設計する。

このような思想のもと設計したソフトウエアの構成を図 2.11 に示す。ソフトウェアシステムは全体で 3 つの Python スクリプトから成り、OBCP でコマンドの送信を担うクライアント、各 Arm の検出器制御 PC でコマンドを処理するサーバー、直接 Socket Server と通信するスクリプトから構成される。サーバーとクライアントスクリプト間の通信は非同期型 TCP/IP 通信を採用し、Python の asncore モジュールで実装する。非同期通信とすることによって、クライアントスクリプトはコマンド処理中もブロックされないため、検出器の長時間積分中に積分を停止するコマンドを送信することができるようになる。サーバースクリプト内での検出器 2 台の処理については、Python の threading モジュールにより同期処理を実現し、Socket Server との通信は、socket モジュールを採用する。OBCP 内に用意された MySQL データベース、RDBMS へは検出器制御 PC から直接アクセスし、検出器のステータス情報の保存や Frame ID の発行などを行う。この機能も Python の MySQLdb モジュールで実装されている。観測者の実際の作業は ICS のインターフェース上で行われ、コマンドは各種スクリプトを通じて Socket Server に送信される。よって、Socket Server でコマンドが用意されている操作ならば、観測者が仮想 Windows マシン内の HxRG Testing Software を GUI から操作する必要はない。

ソフトウエア開発

まず、Socket Server の動作について述べる。TIS 社製の Socket Server では、HxRG Testing Software で Server 機能がアクティブになっている限りコマンドの入力を受け付ける。コマンドは文字列で定義されており、設定パラメータ n がある場合は「*example(n)*」のように指定する。表 2.3 にその一部を示す。ポートはコマンドの実行中でも開いており、

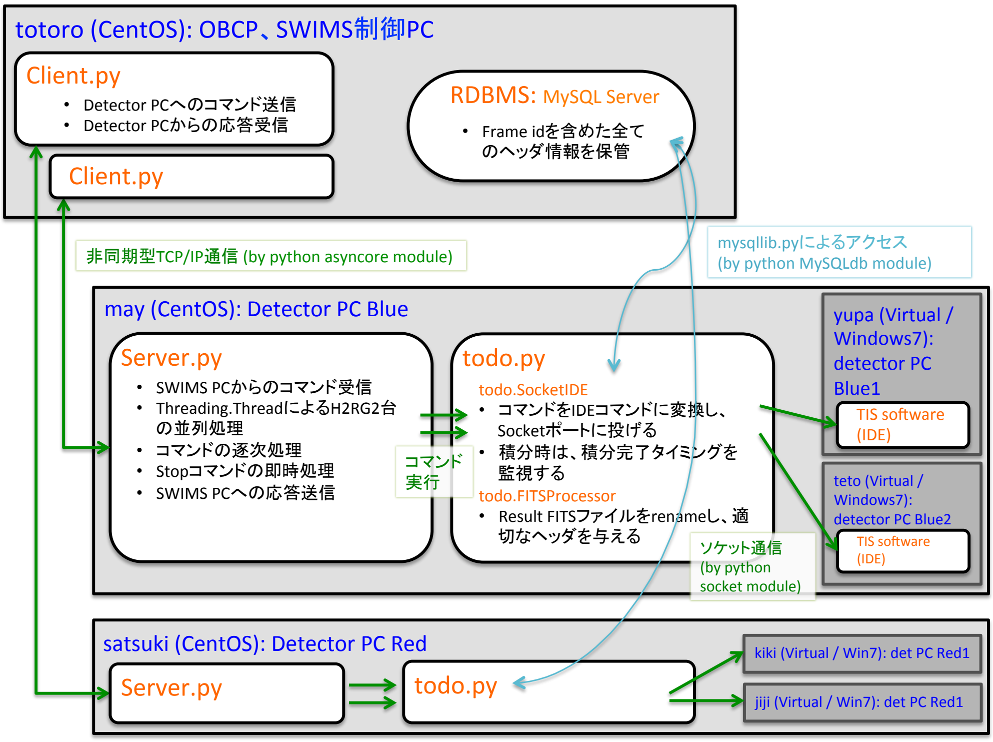


図 2.11: 検出器読み出しソフトウエアの構成図。

連続して入力することはできるが、通常の駆動パラメータ変更などのコマンドは逐次実行される仕様となっている。ただし、検出器の積分実行中に「*stopacquisition*」コマンドを受信した場合は、積分終了を待たずに積分は即時停止される。また、コマンドを受信してから実行するまでに最大で 1 秒程度のタイムラグがあることがある。この原因はソフトウエアがブラックボックスのため完全には理解できていないが、Socket Server の内部処理にループが仕込まれており、コマンドの受け付けは約 1 秒ごとに 1 回しか行われないためであると推測している。この挙動のため、1 秒以下の時間間隔でコマンドを送信すると、前後に送信したコマンドと連結して受信されることがある (例: 「*example(1)*」コマンドと「*hoge*」コマンドを連続で送信すると、「*example(1)hoge*」コマンドと解釈されてエラーとなる) 。

　このような Socket Server の動作特性を踏まえつつ、図 2.11 のソフトウエア設計を実現するためのソフトウエアを開発した。図 2.12・2.13 に、開発した検出器読み出しソフトウエアでのコマンド処理動作のフローチャートを示した。クライアントスクリプトから送信されたコマンドの種類によって処理経路は変化する。

- 駆動パラメータの変更、ステータス取得などのコマンドの場合

  Socket Server でコマンドを実行中の Thread がなくなってから、検出器 2 台に対応

表 2.3: Socket Server コマンドの例。

コマンド	機能
initialize3	SIDECAR ASIC IDE の起動、SIDECAR への電源投入
setgain(g)	Preamp ゲインを設定する
acquireramp	Ramp サンプリングを開始する
stopacuisition	積分を停止する
getconfig	設定パラメータを文字列で返す

するコマンド実行 Thread を 2 つ生成し、実行する。Thread では、コマンドを表 2.3 のような形式に整形し、Socket Server に送信して応答を待機する。必要な場合には、応答からステータス情報を抜き出し、データベース RDBMS に登録する。

- 積分開始コマンド「*acquireramp*」の場合

  Socket Server でコマンドを実行中の Thread がなくなってから、検出器 2 台に対応するコマンド実行 Thread を 2 つ生成し、実行する。それぞれの Thread でさらに、「*acquireramp*」コマンドを Socket Server に送信する Thread (T-A とする) とログファイルを監視する Thread (T-B とする) を生成して実行する。HxRG Testing Software では、積分が完了してデータ取得が終わったあと、さらに約 1 秒間かけて差分画像の生成などの処理を行う。T-B はデータの取得完了タイミングを検出し、ICS に通知する。この機能により、T-A が終了するまで待機するより約 1 秒間早くディザリングなどの望遠鏡関連操作に移ることができ、観測時間の効率を上げることができる。T-A が正常に終了してから、必要なヘッダ情報登録と画像の名称変更を行い、RDBMS に情報を登録する。

- 積分停止コマンド「*stopacquisition*」の場合

  Socket Server でコマンドを実行中の Thread の有無にかかわらず、検出器 2 台に対応するコマンド実行 Thread を 2 つ生成し、実行する。一つ前のコマンドと送信タイミングが近い場合、上述のようにコマンドが連結されてエラーになる場合があるが、いずれにせよ積分を停止する目的は果たされるので問題は起こらない。

これらのソフトウェアシステムにより、各 Arm の検出器 2 台に対して同時に全く同じコマンドを送信し、同じコマンドを実行させせることが可能になった。ただし、Socket Server での最大 1 秒程度の応答遅延により、実際の駆動において検出器 2 台の駆動タイミングは最大で 1 秒程度のズレがあることが分かっている。また、Red Arm と Blue Arm 間での駆動タイミングの同時性については、ICS の開発が完了していないため調査していない。ソフトウエアの動作確認は Blue Arm を想定した検出器 2 台の駆動試験で行っており、特に問題なく順調に動作することが分かっている。

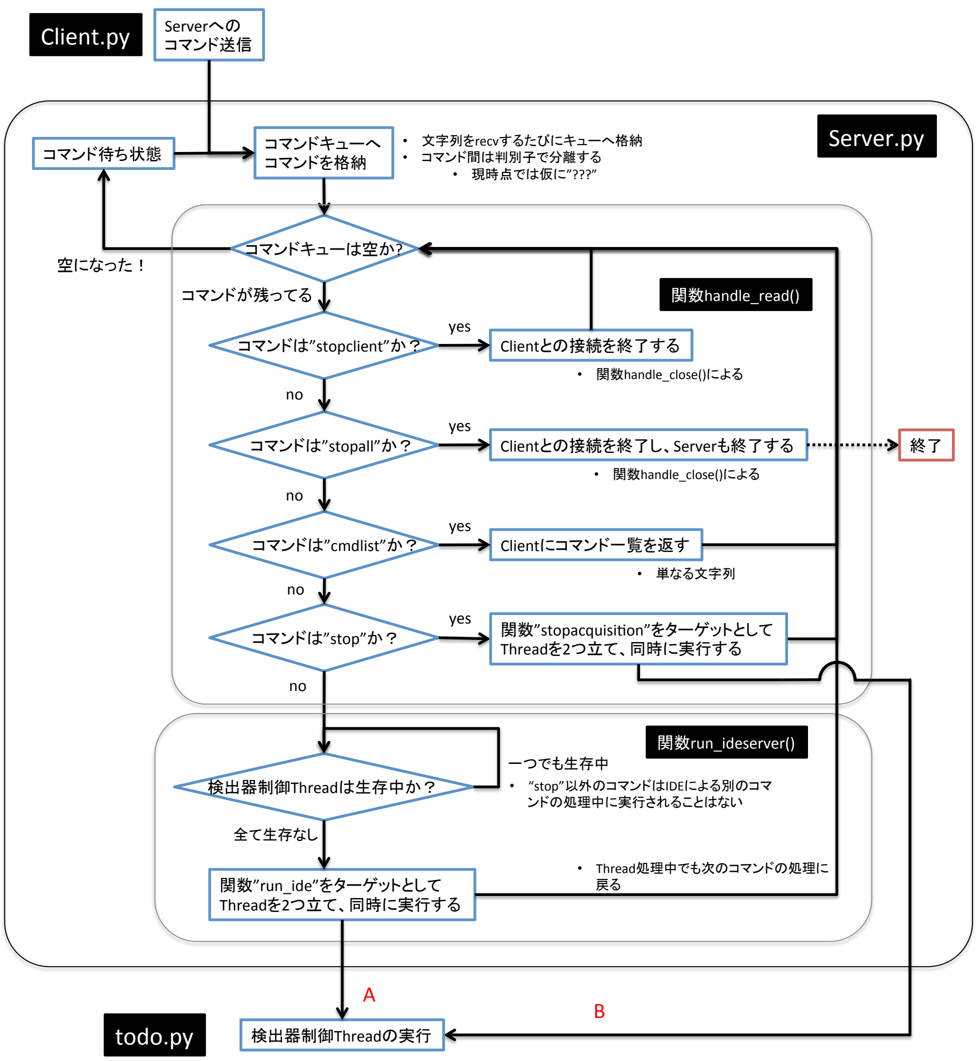


図 2.12: サーバースクリプトによるコマンド処理の動作フロー。

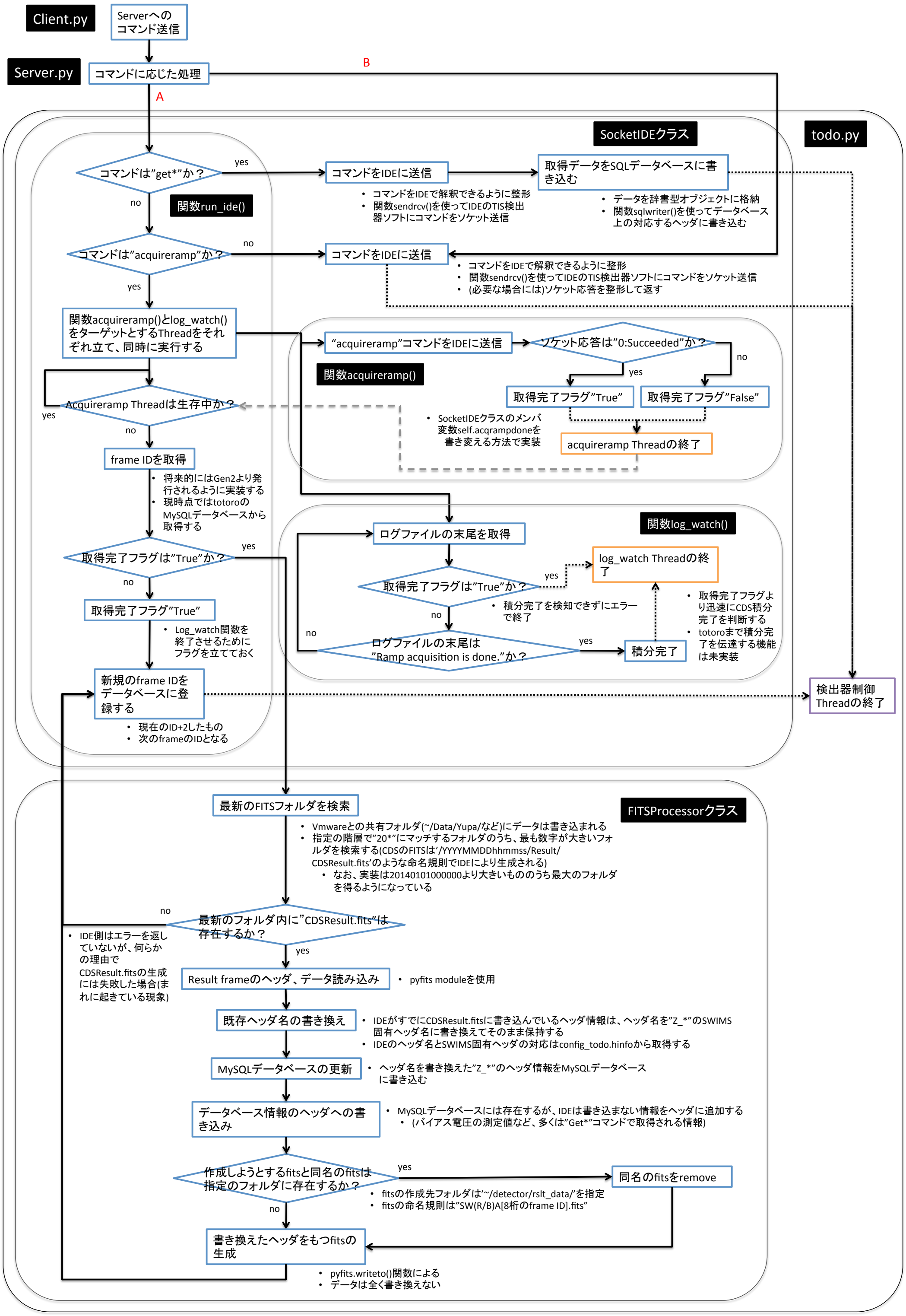


図 2.13: Socket Server との通信と画像データの処理の動作フロー。

第3章　検出器単体の性能評価

検出器を読み出しシステムに組み込む前に、単純な環境で HAWAII-2RG を駆動して性能評価し、HAWAII-2RG 単体での性能を調査した。

3.1　試験環境

検出器単体の駆動試験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所より借用してきたデュワー (以下、GINSAN と呼ぶ) で行った。このデュワーは内容積が高さ約 20 cm、直径約 20 cm の円柱型であり、液体窒素で冷却する。デュワー内部のアルコール清掃、紙やすりと研磨剤を使用しての O リング面研磨を行った結果、真空冷却性能は、液体窒素タンク底面のコールドプレートで到達温度 78 K、窒素冷却時の到達真空度 2×10^{-6} Torr となった。

GINSAN 内部の、HAWAII-2RG と SIDECAR のセットアップを図 3.1 上左に示す。デュワーが小さいため、最低限必要なコンポーネントだけを内部に配置する。HAWAII-2RG と SIDECAR 間のケーブルは第 2 章で述べたように TIS 社製のケーブルを採用するが、SIDECAR と JADE2 間のケーブルには SWIMS での条件と異なり TIS 社製のものを採用する。デュワー内に十分な常温真空のスペースがないため、JADE2 はデュワー外に設置する。そのためにはフラットケーブルがデュワー外壁を貫通する必要があり、専用のハーネスを製作した。製作したハーネスを図 3.1 下左に示す。ハーネスは、半月形のアルミパーツ 2 つでケーブルを挟み込み、隙間にエポキシ樹脂を流し込んで接着、O リング面を切削研磨して製作した。図 3.1 下右のように、ケーブルはハーネスからデュワー外へ約 10 cm 飛び出しており、JADE2 はここに接続する。JADE2 はデュワー筐体には直接固定せず、電気的には筐体から浮いた配置をとった。

GINSAN では光導入試験と暗環境試験の 2 種類の試験を行った。暗環境試験では、検出器の四方をラジエーションシールドで完全に覆い、シールドの隙間もアルミテープで塞いだが、柔軟性のあるフラットケーブルで SIDECAR と接続する都合上、完全に隙間をなくすのは不可能であった。光導入試験では、図 3.1 上左のように Paβ の光学フィルタ (λ =1.292 μm) をラジエーションシールド上部に取り付け、デュワー底面中央に ϕ2 cm の BK7 製窓材を採用する。HAWAII-2RG はデュワー中央に配置されていないため、入射窓と HAWAII-2RG 位置を揃えることはできなかった。窓から直接光を入射したときは検出器のごく一部にしか光が当たらなかったため、窓をパルプ紙で塞ぎ、散乱光を入射させた。光源としては株式会社アイ・アール・システム [1] で購入した黒体炉 (SR-2-33-SP) を

[1] 東京都八王子市堀之内、http://www.irsystem.com

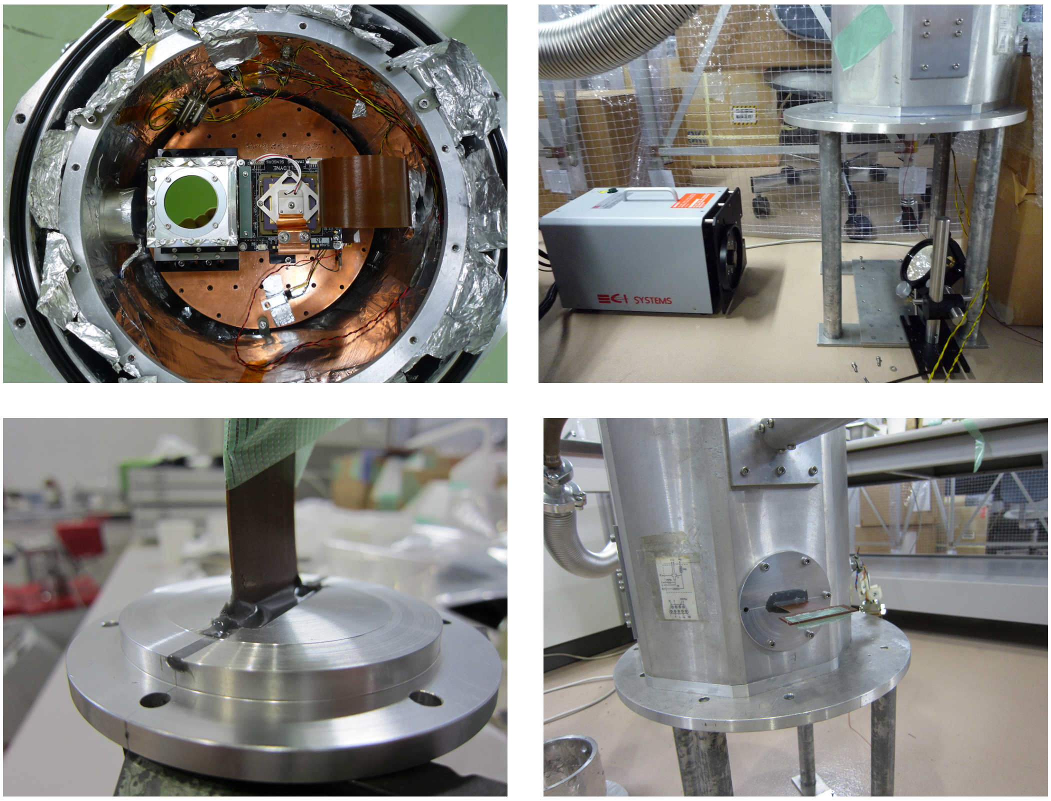


図 3.1: 上左: 光導入試験における、GINSAN 内部のセットアップ (Todo et al., 2014) 。左から、HAWAII-2RG を収納するラジエーションシールド冶具と SIDECAR、デュワー外の JADE2 と接続する TIS 社製フラットケーブル。ラジエーションシールド冶具の上部には Paβ フィルタ (λ =1.292 μm) が取り付けられている。GINSAN は 2 層構造となっており、O リング面のあるデュワー外壁とラジエーションシールド壁がある。上右: 光導入試験の GINSAN 外部のセットアップ。黒体炉から出た光はデュワー直下の鏡で反射し、GINSAN 底面にある窓に入射する。下左: フラットケーブルを通すために製作したハーネス。真空側から見ている。下右: ハーネスを GINSAN に固定したようす。ハーネスから飛び出しているコネクタに JADE2 を接続する。

用いる。図 3.1 上右のように、黒体炉の光は GINSAN 直下の鏡で反射させ、デュワー窓に導く。黒体炉では、温度設定 (100–1200°C、温度安定度 ±0.25°C (カタログ値)) と口径 (ϕ0.8–ϕ22.2 mm) の 2 つのパラメータで入射フラックスを調整する。光導入試験で得られる相関二重積分 (Correlated Double Sampling; CDS、詳細は 3.4.3 項) 画像の例を図 3.2 に示す。本試験では、セットアップの都合上画像全面で均一なフラックスを入射することはできていない。また、散乱光を入射したため、理論的なフラックスの大きさを求めることができず、本研究では量子効率の測定を行っていない。

光導入試験では、入射フラックスの安定性が問題となる。ここでは HAWAII-2RG で取得した CDS 画像中心部の中心部の 35 ピクセル × 35 ピクセル正方形領域の統計量で安定性を評価した。積分時間 3.5 秒の CDS フレームを、約 3 分おきで連続的にデータを取得した結果、 「設定温度を 500°C 以上とする」、「温度設定後 2 時間以上の時間を空ける」

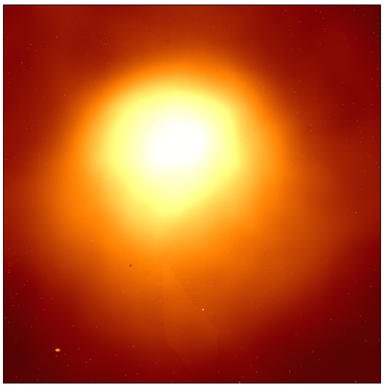


図 3.2: 光導入試験で得られる画像の例。画像の中心付近のカウントが高く、端は低くなっており、均一にはなっていない。

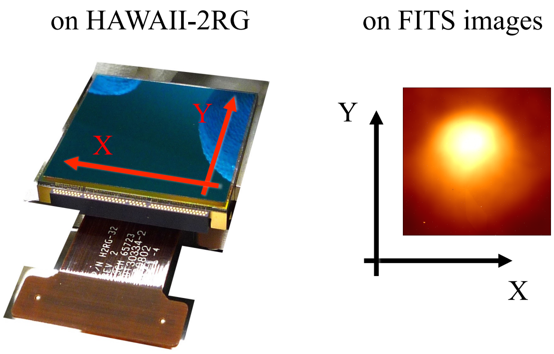


図 3.3: HAWAII-2RG 上と FITS 画像での XY 座標の対応関係。

の 2 つの条件を満たせば、少なくとも 30 分間に渡って、光のポアソンノイズと読み出しノイズで決定されるフラックスの測定精度より大きい有意なフラックスの変動は検出されなかった。この結果から、以降ではこれら 2 つの条件の下で測定を行い、少なくとも CDS 画像中心部ではフラックスの変動は無視できると仮定して議論する。

HAWAII-2RG で取得した Flexible Image Transport System (FITS) 画像は、図 3.3 に示したように、アレイ上で読み出しワイヤのある辺を下向きにおいて正対して見たときに右から左が X 座標正の向き、下から上が Y 座標正の向きとされている 。今後の議論は、この FITS 画像での X 座標、Y 座標に従う。取得した画像などを示す場合、特に記載なき場合は左から右に X 座標正の向き、下から上に Y 座標正の向きとする。また、本研究では、HAWAII-2RG と SIDECAR、JADE2 をそれぞれ 4 台購入し、試験した。今後の議論において、HAWAII-2RG はシリアルナンバー (#191・#196・#206・#208) 、SIDECAR は基板番号 (#046・#048・#052・#054) で識別する。

表 3.1: slow モードの各ピクセル読み出しレート設定における、読み出し速度と CDS 読み出しノイズ。

ピクセル読み出しレート	読み出し速度	CDS 読み出しノイズ
100 kHz	≥ 1.48 sec/frame	$\sim 2 \times 10^1$ e$^-$
200 kHz	≥ 0.74 sec/frame	$\sim 6 \times 10^1$ e$^-$
300 kHz	≥ 0.49 sec/frame	$\sim 9 \times 10^2$ e$^-$
400 kHz	≥ 0.37 sec/frame	$\sim 1 \times 10^3$ e$^-$
500 kHz	≥ 0.30 sec/frame	$\sim 2 \times 10^3$ e$^-$

3.2　駆動パラメータの最適化

3.2.1　読み出し速度

読み出し速度に影響するパラメータとしては、ピクセル読み出しレートと読み出しチャンネル数設定の 2 つがある。ピクセル読み出しレートには fast モードと slow モードの 2 種類があり、それぞれ最大 10 MHz の 12 ビット変換、最大 500 kHz の 16 ビット変換である。fast モードを使用すると、アレイ全体を最短約 0.013 秒で読み出しできるという利点があるものの、12 ビットの ADC ではカウントの分解能は 4,096 しかないことと、60–70 e$^-$ 程度と CDS 読み出しノイズが高くなる (Blank et al., 2012) ことから SWIMS での用途には合わないため、本研究では使用しなかった。slow モードのピクセル読み出しレートは、100 kHz から 500 kHz まで 100 kHz ごとに設定することができる。設定速度ごとの簡易的なノイズ計測結果を表 3.1 に示す。このノイズ測定値は、光導入環境で CDS 画像を 20 枚連続で取得し、ピクセルごとに平均値と不偏分散を求め、平均値より概算したポアソンノイズを不偏分散から引いたものを CDS 読み出しノイズと仮定して算出した簡易的なものである。ピクセル読み出しレートが大きいほど読み出しノイズも大きくなり、特に 300 kHz 以上では顕著に高ノイズであることが分かる。2.3.1 項で与えたシステムの要求性能 (読み出し速度 3 秒以下、読み出しノイズ 14 e$^-$ 以下) を考えると、100 kHz が妥当な選択肢である。ただし、この要求性能は暗い天体の観測を想定して算出したものであるため、ごく短時間でピクセルウェルが飽和するような明るい天体を観測する場合には、200 kHz が最適となる可能性もある。

もう一つのパラメータは、読み出しチャンネル設定である。読み出しチャンネル設定とは、アレイの並列読み出しに使用する、SIDECAR の Preamp と ADC の数の設定のことである。HAWAII-2RG では、読み出しチャンネル数を 1・4・32 の 3 通りに設定できる。図 3.4 に示したように、SIDECAR の 1 つの読み出しチャンネルが受け持つ領域は、設定に応じてアレイ上で短冊状に割り振られる。個々のチャンネルの処理速度は同一なので、読み出しチャンネル数が多いほど読み出し速度は速くなる。表 3.2 にピクセル読み出しレートを 100 kHz に設定したときの読み出しチャンネル設定と読み出し速度の関係を示す。

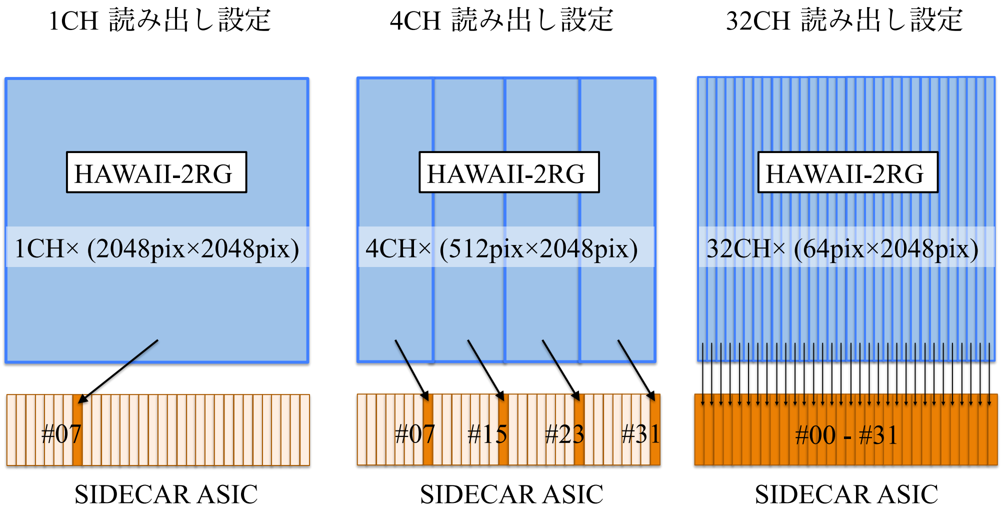


図 3.4: 読み出しチャンネル設定の概念図。図 2.4 に示した SIDECAR 内のデータ処理を並列処理するチャンネルの数を設定する。

表 3.2: ピクセル読み出しレート 100 kHz のときの読み出しチャンネル設定と読み出し速度の関係。

読み出しチャンネル設定	読み出し速度
1 CH	47.4 sec/frame
4 CH	11.8 sec/frame
32 CH	1.48 sec/frame

多くのチャンネルで読み出すことの欠点としては、同時に読み出すピクセルが多いためにクロストークの影響が考えられる。しかし、TIS 社のレポートによればクロストークは非常に小さい ($< 0.1\%$) と考えられるため、ほとんど無視できる。一方で、読み出しチャンネル設定を変更しても読み出しノイズに直接影響を与えることはなく、読み出し速度が小さくなるぶんだけ観測の効率は良くなっていくと考えられる。これらの理由から、2.3.1 で示したシステムへの要求性能を考え、32 CH 読み出し設定を採用する。この設定のとき、ピクセルの読み出し順は図 3.5 のようになっており、アレイ上の一つの横列で同時に 32 ピクセルが読み出される。X 方向の読み出し順序は読み出しチャンネル番号の偶奇によって異なり、偶数チャンネルでは X 軸正の向き、奇数チャンネルでは X 軸負の向きに読み出される。Y 方向については全てのチャンネルで正の向きに読み出される。

3.2.2　ダイナミックレンジ

ダイナミックレンジに影響する設定パラメータとしては、主に Preamp 入力信号設定、Preamp ゲイン設定、バイアス・参照電圧値設定の 3 つがある。Preamp 入力電圧設定に

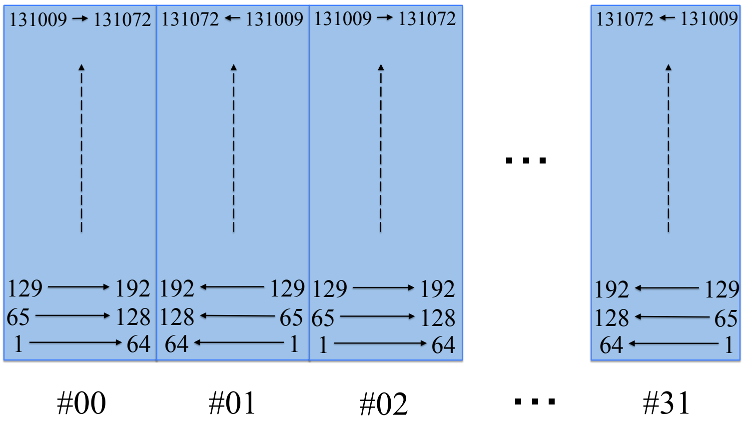


図 3.5: 32 CH 読み出しのとき、ピクセルの読み出し順。

表 3.3: Preamp 入力電圧設定と入力電圧の対応。InPCommon は SIDECAR 内で生成され、全読み出しチャンネル共通のバスから出力する電圧、Padp は検出器ピクセルの出力電圧、Vref1、VrefMain は SIDECAR 内で生成される参照電圧、Gnd は SIDECAR のグラウンドである。

モード設定	V1	V2	V3	V4
InPCommon	InPCommon	Padp	Vref1	VrefMain
VrefMain	Gnd	Padp	Gnd	VrefMain

は、VrefMain モードと InPCommon モードの 2 種類がある。Preamp は、図 2.4 に示したように、4 つの電圧 (V1 · V2 · V3 · V4) を入力し、電位差 V2 − V1 と V4 − V3 の差分を増幅する回路になっている。それぞれのモード設定での入力電圧を表 3.3 に示した。このように、V2 − V1 には検出器の出力電圧、V4 − V3 には参照電圧を入力する仕様になっており、ADC では増幅された差分を AD 変換する。16bit ADC は、(V2 − V1) = (V4 − V3) のときに $2^{15} - 1 = 32767 = \mathrm{0x7FFF}$ を出力する設定となっている。したがって、いずれの設定にせよ、検出器のウェル深さを十分に利用するためには、ウェルが半分付近のときに検出器出力電圧 V2 − V1 が参照電圧 V4 − V3 とほぼ同程度になるように調整すればよい。

Preamp ゲイン設定によって、Preamp での増幅率 (ゲイン) を変えることができる。Preamp ゲイン G は、−3 dB から +27 dB まで、3 dB ごとに 11 段階で設定する。表 3.4 に、Preamp ゲインの設定値と増幅率の関係を示した。増幅率を変化させると、1 ADU のカウント差に対応する検出器出力電圧の差 (コンバージョンゲインと呼ぶ) が変化する。増幅率とコンバージョンゲイン C_G V/ADU は反比例の関係にある。Preamp に様々な参照電圧を入力して測定した結果、C_G と G の関係は、

$$C_G \sim 6 \times 10^1/G \quad \mu\mathrm{V/ADU} \tag{3.1}$$

表 3.4: Preamp ゲインの設定値と増幅率 G 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

となることが分かった。この結果は、Crouzet et al. (2012) で示されている値と矛盾しない。

ダイナミックレンジを最適化するために、ADC の出力範囲に検出器のウェルが完全に収まっていること、つまり、検出器のウェル深さ (カタログ値によれば $\sim 1{\times}10^5$ e^-) は 65,636 ADU より少ないカウントでサンプリングされることを要請する。式 3.1 より、Preamp ゲインと検出器出力のサンプリングカウント数は比例する。光導入環境での簡易的な試験より、Preamp ゲインの設定 $G = 1.0$ のとき、検出器のウェル (飽和カウント − バイアスカウント) は約 10,000 ADU に対応する。従って、G への要請は、$10000G \lesssim 65536$ より $G \lesssim 6.6$ となり、設定値では#10 より小さくする必要がある。

ダイナミックレンジを最適化するためのもう一つのパラメータであるバイアス・参照電圧を見ていく。ダイナミックレンジに効く主要なバイアス・参照電圧は、VrefMain と Dsub、Vreset がある。図 2.3 に示したように、Dsub は検出器ピクセルのフォトダイオードに入力するバイアス電圧、Vreset はピクセルをリセットする際にフォトダイオードに接続するバイアス電圧である。SIDECAR ASIC IDE の既定値では、Dsub=0.55 V、Vreset=0.30 V となっている。Dsub−Vreset の値が大きいほど、フォトダイオードへのバイアスが大きくなるため、検出器のウェルは大きくなる。カタログ値の 1×10^5 e^- は既定値設定のときの値であり、より広いダイナミックレンジでの観測を要する場合には調整することができるが、本研究ではバイアスは Dsub−Vreset=0.25 V に固定して考える。Dsub と Vreset を変化させると、Preamp へ入力する Padp の値も同じだけ変化する。これらのバイアス・参照電圧と出力カウントの変化を模式的に示したのが、図 3.6 である。図から読み取れるように、VrefMain を固定して Vreset と Dsub の設定値を大きくすると検出器の出力範囲が右にシフトして出力カウントは大きくなり、Vreset と Dsub を固定して VrefMain の設

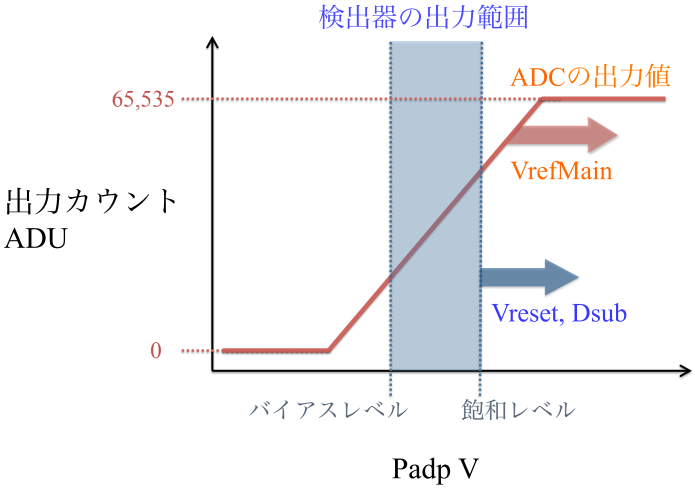


図 3.6: VrefMain モードにおける、バイアス・参照電圧の設定による出力カウントの変化の概念図。赤色の矢印は VrefMain、青色の矢印は Vreset と Dsub の設定値をそれぞれ大きくしたときの変化の方向を表す。

定値を大きくすると ADC の出力値が右にシフトして出力カウントは小さくなる。なお、この図においてゲイン G を大きくすることは ADC の出力値の傾きを大きくすることに相当する。このような関係の中で、検出器の出力範囲に対応する出力カウントがオーバーフローしないように調整しながらバイアス・参照電圧の最適化をしていく。

3.2.3　ノイズ性能

まず、Preamp 入力電圧設定について述べる。VrefMain モードと InPCommon モードのどちらが適しているかは実験的に決定する。後述するように、各種のバイアス・参照電圧の調整によってノイズ特性は変化するが、GINSAN デュワーの試験環境では、VrefMain モードと InPCommon モードで有意なノイズの差は見出すことができなかった。そのため本章では、調整のしやすさを重視し、2 種類のモードを比較してより単純な電圧を入力する VrefMain モードを選択する。

検出器読み出しシステムのノイズ性能を調整できるパラメータとして、Preamp ゲイン設定がある。Preamp ゲインは、前項で示したようにダイナミックレンジに関わる制限から#10 より小さくする必要がある。この中でノイズ性能を最適化したい。ADU-エレクトロン変換係数 g_c e$^-$/ADU は、出力値 1 カウントに相当する検出器上での電子数を表す値であり、コンバージョンゲインに定数をかけたものである。Preamp ゲイン G の設定値により ADU-エレクトロン変換係数 g_c e$^-$/ADU も変化し、式 3.1 から分かるように $g_c \propto G^{-1}$ の関係になる。CDS 読み出しノイズ σ_{CDS} e$^-$ は、ADC 以前で発生するノイズ σ_e e$^-$ と

表 3.5: Vreset・Dsub を既定値で固定して VrefMain を変化させたとき、バイアスカウントとノイズの測定結果。読み出しノイズは VrefMain の既定値に対する比で示した。

VrefMain 設定値	バイアスカウント	読み出しノイズ
1.6520 V	6×10^3 ADU	1.1
1.6031 V	1×10^4 ADU	-
1.2512 V	4×10^4 ADU	0.78
0.9013 V	6×10^4ADU	1.0

ADC で発生するノイズ Σ_{ADU} ADU に分けることができ、

$$\sigma_{CDS} = \sqrt{\sigma_e^2 + (g_c \Sigma_{ADU})^2} \tag{3.2}$$

で表される。σ_e と Σ_{ADU} は定数であるから、σ_{CDS} は G の減少関数であることが分かる。したがって、Preamp ゲインは可能な範囲で大きくすることで読み出しノイズを最小化することができる。以上から、Preamp ゲインの設定値は#10 とし、$G = 5.66$ を採用する。

VrefMain モード、$G = 5.66$ の設定において、ノイズ特性の観点からバイアス電圧 Vreset・Dsub、参照電圧 VrefMain (既定値はそれぞれ 0.3011 V・0.5513 V・1.6031 V) を調整する。Vreset・Dsub を固定して VrefMain の設定値を動かすとき、前項で示したように VrefMain を大きくするとカウントの範囲は小さくなり、VrefMain を小さくするとカウントの範囲は大きくなる。式 3.1 より、入射光がゼロのときのカウントであるバイアスカウントは、VrefMain の変化幅に対応して 9×10^4 ADU/V の変化率で動いていく。表 3.5 に VrefMain の既定値に対する相対的なノイズ値を示す。VrefMain 設定値を小さくするのに伴い、読み出しノイズは 1.2512 V のときを最小として減少から増加に転じており、またバイアスカウントは想定通り大きくなっていることが分かる。さらに、VrefMain を固定して Vreset と Dsub の設定値を動かす。このとき、Vreset と Dsub を大きくするとカウント範囲は同じく 9×10^4 ADU/V の変化率で大きくなる。表 3.6 に Vreset と Dsub の既定値に対する相対的なノイズ値を示す。Vreset と Dsub を大きくするのに伴い、読み出しノイズは次第に小さくなっており、バイアスカウントは想定通り大きくなっていることが分かる。

表 3.5 と 3.6 を比較すると、バイアスカウントが同程度のとき、2 つの実験とも読み出しノイズは同程度の値となっている。この結果から、読み出しノイズはバイアスカウントに依存することが分かった。この依存性について、すばる望遠鏡/MOIRCS の開発チームに所属する天文センターの橋場が行ったさらに詳細な実験によれば、読み出しノイズはバイアスカウントが 32,767 ADU 周辺で最小になるという報告がある。つまり、読み出しノイズは入射光ゼロのときに VrefMain=Padp となるような設定が最小であることになる。このことは、表 3.5・3.6 の結果と矛盾しない。従って、既定値周辺では VrefMain を小さく、または Vreset と Dsub を大きくしてバイアスカウントを大きくするほど、読み出しノイズは低くなる。ただし、ピクセルのフルウェルは $10000G \sim 57000$ ADU に相当するため、バ

表 3.6: VrefMain を既定値で固定して Vreset・Dsub を変化させたとき、バイアスカウントとノイズの測定結果。読み出しノイズは Vreset・Dsub の既定値に対する比で示した。

Vreset・Dsub 設定値	バイアスカウント	読み出しノイズ
0.2502 V・0.5005 V	6×10^3 ADU	1.1
0.3011 V・0.5513 V	1×10^4 ADU	-
0.4516 V・0.7019 V	2×10^4 ADU	0.85
0.6002 V・0.8504 V	3×10^4 ADU	0.78
0.7507 V・1.0010 V	4×10^4 ADU	0.77

イアスカウントを $\gtrsim$10000 ADU とするとカウントの上限が $65535 = 2^{16} - 1$ ADU でリミットされてしまうことになる。フルウェルを全て使えるような設定とするため、ここではバイアスカウントが 10,000ADU となるような設定として、Vreset・Dsub・VrefMain=0.3715 V・0.6217 V・1.6031 V を採用することとする。

読み出しノイズ性能に影響するバイアス電圧には、他に Vbiasgate があることが分かっている。Vbiasgate は、図 2.3 左には示されていないが、ピクセルソースフォロワのドレインに入力し、電流源とする電圧である。一般には、電圧値を大きくするほどソースフォロワの電流量が小さくなる。Vbiasgate に対するバイアスカウント (カウント範囲) や読み出しノイズの依存性は明瞭ではなく、試験環境ごとに最適な設定を調査する必要がある。GINSAN の試験環境では、既定値 Vbiasgate=2.0507 V に対して 2.00–2.20 V まで変化させたところ、有意なノイズ変動やバイアスカウントの変動は見出すことができなかった。そのため、ここでは既定値通り 2.0507 V を採用する。

HxRG Testing Software で設定可能な駆動パラメータとして、読み出しクロックモードが挙げられる。読み出しクロックモードには Normal Clocking モードと Enhanced Clocking モードがあり、読み出し列のシフトレジスタなどのクロックパターンが異なる。読み出しクロックモードによるノイズ性能への依存性は明瞭ではなく、試験環境ごとに最適な設定を調査する必要があると考えられる。GINSAN の試験環境では、Normal Clocking モードと Enhanced Clocking モードで有意なノイズ変動はなかったため、より単純な設定である Normal Clocking モードを採用する。

本節で得られた駆動パラメータを表 3.7 に示す。以下本章では、特に記述なきときはこのパラメータに従う。

3.3　ADU-エレクトロン変換係数

3.3.1　フォトントランスファー法

実際の観測において天体の明るさは標準星の明るさから相対的に求めるが、検出器と読み出しシステムの性能を絶対的な値で得るには、出力カウント (ADU) を物理的な値に変

表 3.7: GINSAN 試験での設定一覧。

パラメータ	設定値
ピクセル読み出しレート	100 kHz
読み出しチャンネル設定	32 CH
読み出しクロック	Normal Clocking モード
Preamp 入力電圧	VrefMain モード
Preamp ゲイン	#10、$G = 5.66$
Vreset	0.3715 V
Dsub	0.6217 V
VrefMain	1.6031 V
Vbiasgate	2.0507 V

換する係数を精度よく求めることが必要である。そのために、本研究ではフォトントランスファー法 (Janesick et al., 1987) を用いて ADU-エレクトロン変換係数 g_c を測定した。フォトントランスファー法では、光を入射して CDS 画像で得られるカウントが M ADU、その分散が Σ^2 ADU^2 のとき、カウントの分散 $g_c^2\Sigma^2$ e^{-2} は光のポアソンノイズ $\sqrt{g_c M}$ e$^-$ と読み出しノイズ σ_{CDS} e$^-$ の二乗和であると考える。従って、M と Σ^2 の関係式は次のようになる。

$$\Sigma^2 = \frac{M}{g_c} + \left(\frac{\sigma_{CDS}}{g_c}\right)^2 \tag{3.3}$$

この式から、M と Σ^2 を測定すれば g_c と σ_{CDS} が得られることが分かる。

具体的には、光導入環境を用いてアレイに図 3.2 のような非一様な光を入射し、平均と分散カウントを測定する。Preamp と ADC は SIDECAR の読み出しチャンネルごとに異なるため、g_c は読み出しチャンネルごとに異なると想定する。各ピクセルのフォトダイオードやソースフォロワの特性によってチャンネル内にも g_c のバラつきはあると思われるが、ここでは各チャンネルの特性にのみ注目し、ピクセルごとのバラつきは無視する。手順としては、まず積分時間を読み出し時間と同じ 1.48 秒と最短にして CDS 画像を 20 枚連続で取得し、各ピクセルごとに 20 枚の平均と不偏分散を求める。この平均と不偏分散について、各チャンネル内を 32 ピクセル × 32 ピクセルの領域に分けて領域ごとに平均値を求める。

分散の求め方には、複数 CDS 画像で各ピクセルカウントの時間方向の分散を求めるか、1 枚の CDS 画像でピクセルごとのカウントの空間方向での分散を求めるかの 2 通りが考えられる。前者では入射光の安定性の影響、後者ではピクセルごとの感度ムラの影響が考えられるが、前者は十分に無視できる一方で後者はどれくらいの影響があるか分からないため、本研究では前者を採用した。また、入射光は一様ではないため、32 ピクセル × 32

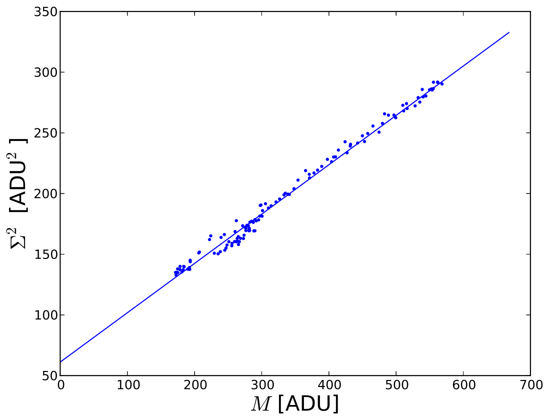


図 3.7: フォトントランスファー法による測定値の例。HAWAII-2RG #191 で、読み出し CH#15 の測定値と最小二乗フィッティングの結果を示した。プロット点一つが 32 ピクセル × 32 ピクセル領域の平均値を表す。

ピクセルの領域内でフラックスが異なる影響が考えられる。しかし、このような小さな領域内ではほとんどフラックスの違いは無視でき、平均をとる操作によってフラックスの違いは相殺されるため、このような影響は効かないとしてよい。

図 3.7 に測定値の例を示した。式 3.3 を見れば分かるように、平均カウント M と分散 Σ^2 は線形関係となる。最小二乗法でフィッティングパラメータを a、b として $\Sigma^2 = aM + b$ の直線をフィッティングし、$g_c = 1/a$、$\sigma_{CDS} = \sqrt{b}/a$ から ADU-エレクトロン変換係数と CDS 読み出しノイズを求めればよいが、次項に述べる効果により修正が必要である。

3.3.2　ピクセル間寄生容量による影響

フォトントランスファー法だけでは検出器の絶対的な性能を求めるには不十分である (e.g., Moore et al., 2004; Finger et al., 2006; Fox et al., 2008) 。その理由は、式 3.3 では各ピクセルの値は他のピクセルと完全に無相関であることが暗に仮定されているが、現実には HAWAII-2RG のようなアレイ型検出器においては隣接するピクセル間に寄生容量が存在し、カウントが相関することが分かっているからである。このような寄生容量をピクセル間寄生容量 (Inter-Pixel Capacitance; IPC) という。

Fox et al. (2009) の方法に従い、IPC によるフォトントランスファー法への影響を考える。IPC が存在する場合、ある 1 ピクセルに光を入射すると、ピクセルの電位が変化し、寄生容量を通じて隣接するピクセルの電位も変化する。このとき、点像分布関数 (Point Spread Function; PSF) を、図 3.8 のように中心のピクセルが $1 - 2(\alpha + \beta)$、アレイ上で X 方向の隣接ピクセルが α、Y 方向の隣接ピクセルが β とし、さらにそれ以外のピクセルへの影響はないと仮定する。また、PSF によるカウントへの影響を考えるために、カウントの行列記法を与える。いま、考察対象の中心ピクセルで得られるカウントを s_4、その分

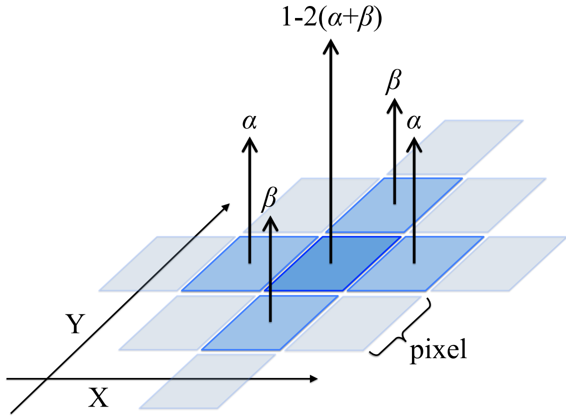


図 3.8: IPC による PSF のモデル。

散を $\sigma_{s_4}^2$ とし、隣接するピクセルのカウントを s_i $(i = 0\text{–}8)$ で表す。このようにして、得られるピクセルカウント行列 S を、

$$S = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 & s_2 \\ s_3 & s_4 & s_5 \\ s_6 & s_7 & s_8 \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

で定義する。行列の行はピクセルアレイの X 軸、列は Y 軸に対応させる。ここでは、この範囲内で入射光は均一であるとして $s_i = s$、$\sigma_{s_i} = \sigma$、またカウントの分散はポアソンノイズだけを考慮し、読み出しノイズは考えないとする。α、β は十分に小さいと仮定し、その 3 次以上の項は計算では無視する。

PSF 行列は、

$$PSF = \begin{pmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & p_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \beta & 0 \\ \alpha & 1 - 2(\alpha + \beta) & \alpha \\ 0 & \beta & 0 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

と表現できる。ここで、S に対して、真の入射カウント行列 $\tilde{S} = \tilde{s_i}$ を考える。s_4 を $\tilde{s_4}$ と PSF で表現すると、

$$s_4 = p_4\tilde{s_4} + p_7\tilde{s_1} + p_5\tilde{s_3} + p_3\tilde{s_5} + p_1\tilde{s_7} \tag{3.6}$$

である。このような演算を畳み込み演算子 $*$ で表し、

$$S = \tilde{S} * PSF \tag{3.7}$$

と書くことにする。畳み込み演算子の性質として、一般に結合法則

$$(A * B) * C = A * (B * C) \tag{3.8}$$

が成り立つ (簡単な計算により確かめることができる) 。

PSF の畳み込み演算子に対する反作用行列として $\overline{PSF}$ を考える。$\overline{PSF}$ は、

$$\tilde{S} = S * \overline{PSF} \tag{3.9}$$

を満たす行列として定義する。式 3.7 に右から $\overline{PSF}$ を畳み込み、右辺に結合法則を適用すると、

$$S * \overline{PSF} = \tilde{S} * (PSF * \overline{PSF}) \tag{3.10}$$

となることから、

$$PSF * \overline{PSF} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

が要請される。右辺は畳み込み演算子に対して右からは作用しない単位行列である。

式 3.9 を用いて、$\tilde{s_4}$ を s_i・α・β で表したい。$\overline{PSF}$ を式 3.11 から計算で求めると、

$$\begin{aligned} \overline{PSF} &= \begin{pmatrix} \overline{p_0} & \overline{p_1} & \overline{p_2} \\ \overline{p_3} & \overline{p_4} & \overline{p_5} \\ \overline{p_6} & \overline{p_7} & \overline{p_8} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1-2c)(F_0-F_1) & -cF_0+(\alpha-\beta)F_1 & \frac{1}{2}(1-2c)(F_0-F_1) \\ -cF_0-(\alpha-\beta)F_1 & (1-2c)(F_0+F_1) & -cF_0-(\alpha-\beta)F_1 \\ \frac{1}{2}(1-2c)(F_0-F_1) & -cF_0+(\alpha-\beta)F_1 & \frac{1}{2}(1-2c)(F_0-F_1) \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{3.12}$$

である。ここで、表記の簡単のため、

$$c = \alpha + \beta \tag{3.13}$$

$$F_0 = \frac{1}{2(1-4c+2c^2)} \tag{3.14}$$

$$F_1 = \frac{1}{2((1-2c)^2 - 2(\alpha-\beta)^2)} = \frac{1}{2(1-4c+2c^2+8\alpha\beta)} \tag{3.15}$$

とした。式 3.9 と式 3.12 より、中心ピクセルの真の値 $\tilde{s_4}$ を s_i と $\overline{p_i}$ で表すと、

$$\tilde{s_4} = \overline{p_4}s_4 + \overline{p_3}(s_3+s_5) + \overline{p_1}(s_1+s_7) + \overline{p_0}(s_0+s_2+s_6+s_8) \tag{3.16}$$

となる。

式 3.16 により、中心ピクセル $(i=4)$ でのカウントの分散の真の値 $\sigma_{\tilde{s_4}}$ を誤差の伝播則から求めることができて、

$$\sigma_{\tilde{s_4}}^2 = \sum_{j=0}^{8}\sum_{i=0}^{8} \frac{\partial \tilde{s_4}}{\partial s_i}\frac{\partial \tilde{s_4}}{\partial s_j} C_{ij} \tag{3.17}$$

となる。ここで、C_{ij} は測定されるカウントの分散共分散行列の ij 成分である。各ピクセルの共分散は、中心ピクセルからの漏れカウントのポアソンノイズぶんだけであると仮定して、

$$C = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 & 0 & \frac{\beta\sigma^2}{1-2c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2 & \frac{\alpha\sigma^2}{1-2c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta\sigma^2}{1-2c} & 0 & \frac{\alpha\sigma^2}{1-2c} & \sigma^2 & \frac{\alpha\sigma^2}{1-2c} & 0 & \frac{\beta\sigma^2}{1-2c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\alpha\sigma^2}{1-2c} & \sigma^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta\sigma^2}{1-2c} & 0 & 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2 \end{pmatrix} \tag{3.18}$$

である。式 3.16 と式 3.18 を式 3.17 に代入して計算する。

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{s_4}}^2 &= R(\alpha,\beta)\sigma^2 \\ &= \sigma^2 \left[(\overline{p_4}^2 + 2\overline{p_3}^2 + 2\overline{p_1}^2 + 4\overline{p_0}^2) + \frac{4\alpha}{1-2c}\overline{p_3}\ \overline{p_4} + \frac{4\beta}{1-2c}\overline{p_1}\ \overline{p_4} \right] \\ &\simeq \sigma^2 \left[1 + 4(\alpha+\beta) + 14(\alpha+\beta)^2 - 4\alpha\beta \right] \end{aligned} \tag{3.19}$$

ここで、IPC による分散の補正係数を $R(\alpha,\beta)$ と表した。式 3.19 から分かるように、IPC の影響でカウントが広がりを持つことで、測定されるポアソンノイズ $\sigma_{s_4}^2$ は真の値 $\sigma_{\tilde{s_4}}^2$ より小さくなる。

3.3.3　ピクセル間寄生容量の測定

フォトントランスファー法における IPC の効果を補正するために、α と β を測定して $R(\alpha,\beta)$ を求める。本項では独立な 2 つの手法で HAWAII-2RG #206 について測定し、結果を比較する。第一の手法は、ホットピクセルと隣接するピクセルのカウント比から求める方法 (以降、ホットピクセル法と呼ぶ) であり、第二の手法は、ピクセル間の相関係数をもとめ、そこから逆算する方法 (Moore et al. (2006) 、以降、共分散法と呼ぶ) である。

ホットピクセル法では、画像を 10 ピクセル ×10 ピクセルの領域ごとに走査し、領域内の平均値より 10σ 以上大きいカウントが 1 ピクセルだけ存在する領域を抽出、このピクセル

をホットピクセルとしてこれに対する隣接ピクセルのカウント比 r を求めた。実際のホットピクセルと周辺ピクセルの FITS 画像を図 3.9 左に、積分時間 1.5 秒の CDS 画像 200 枚に対して r を求めた結果を図 3.9 右に示す。測定値はホットピクセルカウントの大きさによって異なり、測定の不確かさ以上のバラつきが見られる。ホットピクセルに対する相対位置によるカウント比の違いについても、系統的な結果を見出すことはできない。そのため、ここでは $\alpha = \beta$ として、測定値 $r = 0.015 \pm 0.002$ より、α の測定値は

$$\alpha = \frac{r}{1+4r} = 0.014 \pm 0.002 \tag{3.20}$$

とする。

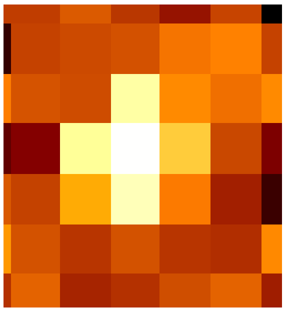
ある程度の精度の値は得られたものの、ホットピクセル法には手法そのものに起因する問題点がある。ホットピクセルは、ピクセルの半導体などでの異常により、入射光量に関わらず一定の暗電流がカウントにのることにより現れる。通常のピクセルでなく異常なピクセルで統計量を算出するため、全てのピクセルで等しいことを前提としている線形性や IPC による PSF の形状そのものも通常のピクセルとは異なっている可能性が否定できない。実際、3.5.1 項で述べるように、ある種のホットピクセルは通常のピクセルとは全く異なる線形性をもつことが分かっている。しかしながら、こうした問題点はあるものの、評価方法が比較的単純であり、直感的であるという利点も無視できない。そのため、次に述べる共分散法の結果を確認するための目安としてホットピクセル法の測定値を利用していく。

共分散法では、アレイを 5 ピクセル $\times$ 5 ピクセルの領域に分け、ピクセル間の共分散を求めてカウント値の相関係数を求める。具体的には、領域内位置の Y 座標を $i = 0$–4、X 座標を $j = 0$–4 として CDS 画像でのカウント s_{ij}^n (n はカウンター変数) に対し、差分 $\delta s_{ij}^{2n} = s_{ij}^{2n} - s_{ij}^{2n-1}$ をとる。s_{ij}^n が標準偏差 $\sigma_{s_{ij}^n}$ の正規分布に従うとき、δs_{ij}^{2n} は理想的には平均 0、標準偏差 $\sqrt{2}\sigma_{s_{ij}^n}$ の正規分布に従うが、実際には様々な影響により平均は 0 にならないため、$\hat{\delta s_{ij}^{2n}} = \delta s_{ij}^{2n} - \delta s_{ij}$ と補正する。ただし、δs_{ij} は δs_{ij}^{2n} の全ての $2n$ に対する平均値である。この値と領域の中心ピクセルの値との積を、$d_{ij}^{2n} = \hat{\delta s_{ij}^{2n}}\hat{\delta s_{22}^{2n}}$ とする。ここで、$\hat{\delta s_{ij}^{2n}}$ の平均値が 0 であるので、d_{ij}^{2n} の平均値 d_{ij} は、領域の中心ピクセル $(i, j = 2, 2)$ に対する共分散を与える。このようにして、共分散行列

$$D = \begin{pmatrix} d_{00} & d_{01} & d_{02} & d_{03} & d_{04} \\ d_{10} & d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{20} & d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{30} & d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{40} & d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

を得る。なお、d_{22} は 2 枚の CDS 画像のカウント差の 2 乗平均であるので、$2\sigma_{s_{22}}^2$ である。相関係数は、$r_{ij} = d_{ij}/d_{22}$ として求める。

相関係数と IPC による効果 α、β の関係を考えたい。式 3.7 より、中心ピクセルのカウ



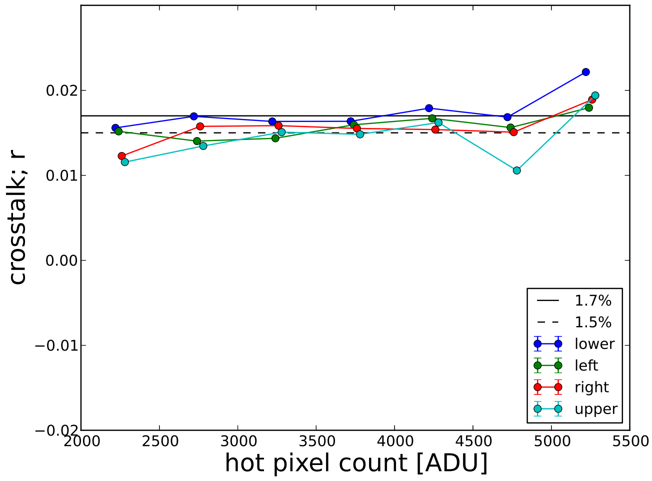


図 3.9: 上: FITS 画像上でのホットピクセルとその周辺ピクセル。IPC による PSF の広がりが確認できる。この画像では、ホットピクセルのカウントは ∼ 2,000 ADU、隣接ピクセルのカウントは ∼ 20 ADU、その他のピクセルのカウントは ∼ 0 ADU である。下: ホットピクセルのカウントと隣接ピクセルのカウント比 r を、ホットピクセルカウントの大きさごとにプロットしたもの。プロット点は、ホットピクセルに対して Y−1、X−1、X+1、Y+1 の順に青、緑、赤、シアンである。各測定点のサンプル数は $>$ 10,000、各測定値の不確かさは全てプロット点より小さい。

ント s_{22} は、一次近似的には真のカウント $\tilde{s_{ij}}$ を用いて、

$$s_{22} \simeq (1-2(\alpha+\beta))\tilde{s_{22}} + \alpha(\tilde{s_{21}}+\tilde{s_{23}}) + \beta(\tilde{s_{12}}+\tilde{s_{13}}) \tag{3.22}$$

と書ける。したがって、中心ピクセルの分散は、

$$\sigma_{s_{22}} \simeq \left[(1-2(\alpha+\beta))^2 + 2(\alpha^2+\beta^2)\right]\tilde{\sigma}^2 \tag{3.23}$$

である。また、s_{23} についても式 3.22 と同様に考えることで、

$$Cov(s_{22}, s_{23}) \simeq 2\alpha(1-2(\alpha+\beta))\tilde{\sigma}^2 \tag{3.24}$$

であることが分かるから、

$$r_{23} = r_{21} = \frac{Cov(s_{22}, s_{23})}{\sigma_{s_{22}}\sigma_{s_{23}}} \simeq \frac{2\alpha(1-2(\alpha+\beta))}{(1-2(\alpha+\beta))^2+2(\alpha^2+\beta^2)} \tag{3.25}$$

また、同様にして

$$r_{12} = r_{32} = \frac{Cov(s_{12}, s_{32})}{\sigma_{s_{22}}\sigma_{s_{23}}} \simeq \frac{2\beta(1-2(\alpha+\beta))}{(1-2(\alpha+\beta))^2+2(\alpha^2+\beta^2)} \tag{3.26}$$

である。これらの関係式を使って、測定した相関係数から α と β を求めることができる。

光導入環境で CDS 画像を 200 枚連続で取得し、d_{ij} を求めた。d_{ij} はカウントの大きさによって異なるから、十分なサンプル数 ($> 1\times10^6$) の得られているカウント範囲ごとに d_{ij} を平均してそれぞれ r_{ij} を求め、全てのカウント範囲を平均する手法を用いた。HAWAII-2RG #206 での、カウント範囲ごとの d_{ij} の測定値を図 3.10 に示した。図から分かるように、生の測定値では、十分に共分散が小さいとみなせる距離 3 ピクセル以上のピクセル間であっても、有意な相関が残っている。無相関であるはずのピクセル間に相関が残っていることは、2 フレームの差分 δs_{ij}^{2n} に系統的な変動がわずかにあることを示唆する。この共分散は全ての d_{ij} に一律にオフセットとしてのっていると考えられるので、r_{ij} を求めるときには距離 3 ピクセル以上の d_{ij} の平均値を全ての d_{ij} から引いて計算する。

このようにして求めた r_{ij} の値を表 3.8 に示す。ただし、X 方向と Y 方向それぞれに対称性を仮定し、それぞれの値を平均した。この結果から分かるように、相関係数は Y 方向よりも X 方向に大きくなった。式 3.26、式 3.25 を使って、相関係数 α と β を求めると、

$$\alpha = 1.44 \pm 0.06\% \tag{3.27}$$

$$\beta = 1.40 \pm 0.04\% \tag{3.28}$$

である。これらの値は、ホットピクセル法で求めた式 3.20 の値と矛盾しない。式 3.19 に値を代入すると、$R(\alpha,\beta) = 1.124$、つまり、$\sigma_{\tilde{s_4}}^2 \simeq 1.124\sigma^2$ となり、カウントの真の分散は測定される値より 12%程度大きい値となる。

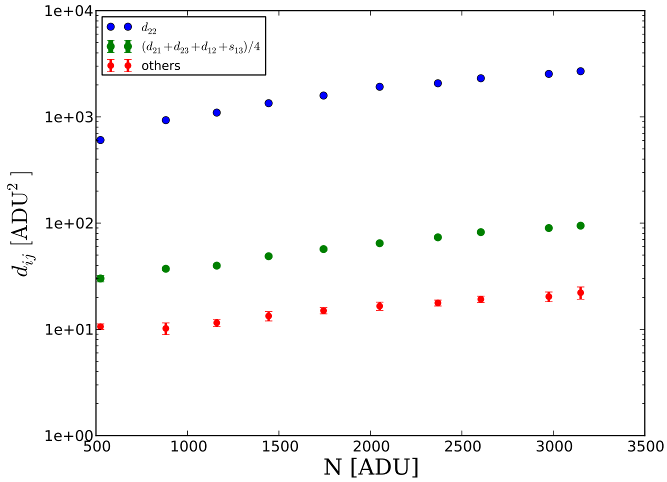


図 3.10: d_{ij} の測定値。横軸が 5 ピクセル ×5 ピクセル領域の s_{ij} 平均値であり、300 ADU ごとにビニングしてプロットした。青い点は全てのサンプルに渡る d_{22} の平均値、緑の点は中心ピクセルから距離 1 ピクセルの 4 つのピクセル (d_{21}、d_{23}、d_{12}、d_{13}) の全てのサンプルに渡る平均値と 4 点の標準偏差、赤い点は中心ピクセルから距離 3 ピクセル以上の 12 ピクセル (d_{00}、d_{01}、d_{03}、d_{04}、d_{10}、d_{14}、d_{30}、d_{34}、d_{40}、d_{41}、d_{43}、d_{44}) の全てのサンプルに渡る平均値と 12 点の標準偏差を示す。

表 3.8: HAWAII-2RG #206 でのピクセル間相関係数の測定値 (単位は%) 。ただし、X 方向、Y 方向それぞれに対称性を仮定した。

r_{ij}	$j=2$	$j=1$	$j=0$
$i=2$	100	3.06 ± 0.12	0.38 ± 0.14
$i=1$	2.96 ± 0.08	0.31 ± 0.05	0.06 ± 0.05
$i=0$	0.13 ± 0.05	-0.06 ± 0.05	-0.00 ± 0.04

同様にして全ての HAWAII-2RG について IPC を測定した結果を表 3.9 に示す。この結果から分かるように、IPC による影響の大きさには個体差がある。Finger et al. (2006) の測定では α、β は 1.45–1.75%という値が得られており、おおむね矛盾しない結果が得られた。また、HAWAII-2RG #191 と#196 については α と β に有意差があり、系統的に $\alpha > \beta$ となる傾向があることが分かる。バイアス設定などによって変わりうるとは考えられるが、今回の設定では X 方向への隣接ピクセル間の寄生容量のほうが Y 方向に比べて大きいということができる。

表 3.9: 測定したすべての HAWAII-2RG について得られた IPC の値。単位は%。

	α	β	$R(\alpha, \beta)$
#191	1.31 ± 0.03	1.23 ± 0.04	1.110
#196	1.38 ± 0.03	1.30 ± 0.03	1.117
#206	1.44 ± 0.06	1.40 ± 0.04	1.124

3.3.4　結果

式 3.19 の補正はポアソンノイズにのみかかることに注意して、式 3.3 は次のように修正される。

$$\Sigma^2 = \frac{1}{g_c R(\alpha, \beta)} M + \left(\frac{\sigma_{CDS}}{g_c} \right)^2 \tag{3.29}$$

したがって、平均カウント M と分散 Σ^2 をパラメータ a と b で $\Sigma^2 = aM + b$ で最小二乗フィッティングしたとき、$g_c = (aR)^{-1}$、$\sigma_{CDS} = b^{0.5}(aR)^{-1}$ で ADU-エレクトロン変換係数と CDS 読み出しノイズが求まる。

表 3.10 に ADU-エレクトロン変換係数の測定結果を示す。g_c の値は全ての組合せでほぼ一様であり、2.3 e^-/ADU 程度であることが分かった。なお、最小二乗フィッティングによる測定値の不確かさは、読み出しチャンネルごとに典型的に 0.02 e^-/ADU 程度である。測定した全ての HAWAII-2RG と SIDECAR の組み合わせで、読み出しチャンネルによる g_c の大きさの違いは peak-to-valley で 15%以下となった。このことから、Preamp と ADC は読み出しチャンネルごとに異なるが、その特性はおおむねアレイ全体で一様となっていると言うことができる。実際の観測においては、読み出しチャンネル間の変換係数の差は、感度ムラとして見えてくることになる。感度ムラはフラット画像を使って比較的精度よく補正することができるので、g_c の差はそれほど問題にはならないと考えられる。また、測定は次の 2 種類を行った。

(1)　HAWAII-2RG を#206 で固定して SIDECAR を 4 種類交換した測定

(2)　SIDECAR を#048 で固定して HAWAII-2RG を 3 種類交換した測定

表 3.10 から分かるように、 (1) では高い精度 ($\sim 1\%$) で g_c が一様となったのに対し、 (2) では g_c のバラつきが比較的大きい ($\sim 20\%$) 結果となった。このことから、SIDECAR 内の Preamp と ADC の g_c に関わる特性は全ての SIDECAR でおおむね一様となっている一方で、各 HAWAII-2RG のフォトダイオードやソースフォロワとそれに加わるバイアス電圧の特性は HAWAII-2RG ごとにばらついていることが分かる。

g_c は、いくつかのパラメータ設定で変化するが、Preamp のゲイン G の設定による変化が最も大きい。g_c e^-/ADU は、3.2.2 で定義したコンバージョンゲイン C_g μV/ADU と比

表 3.10: 測定した全ての HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せについて得られた g_c の値。単位は e^-/ADU。

HAWAII-2RG	#191	#196	#206			
SIDECAR	#048			#046	#052	#054
32CH の平均値	2.15	2.49	2.34	2.36	2.33	2.34
32CH の標準偏差	0.03	0.08	0.06	0.05	0.07	0.06
32CH 中最大値	2.41	2.67	2.53	2.45	2.51	2.55
32CH 中最小値	2.09	2.33	2.26	2.29	2.22	2.26

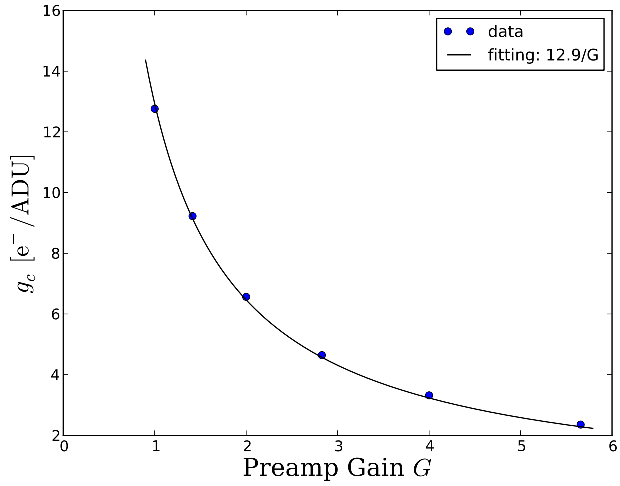


図 3.11: g_c と G の関係。HAWAII-2RG#206、SIDECAR#046 で各 Preamp Gain 設定における g_c の測定値を青点でプロットした。黒線が最小二乗フィッティング結果で、$g_c = 12.9/G$ である。

例関係にあるから、式 3.1 から明らかなように $g_c \propto G^{-1}$ である。このことを確かめた実験結果を図 3.11 に示した。G =1–5.66 の範囲では、フィッティング誤差は 3% 以下であり、確かに g_c と G は反比例関係となった。従って、Preamp のゲインはおおむね設定値通りの増幅率を実現できていると言える。

3.4　読み出しノイズ

3.4.1　結果

ノイズの測定結果

ここでは、「読み出しノイズ」は全て CDS 読み出しノイズ σ_{CDS} の意で用いる。読み出しノイズは、ADU-エレクトロン変換係数を求めたフォトントランスファー法で同時に測定し

表 3.11: 測定した全ての HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せについて得られた σ_{CDS} の値。単位は e$^-$。

HAWAII-2RG	#191	#196	#206			
SIDECAR	#048			#046	#052	#054
32CH の r.m.s.	15.1	16.6	15.9	17.1	16.0	16.2
32CH の標準偏差	0.7	1.4	1.1	1.1	1.2	0.9
32CH 中最大値	18.6	18.9	18.4	18.9	19.5	18.9
32CH 中最小値	14.2	13.8	13.7	14.9	14.1	14.7

た。表 3.11 に測定結果の一覧を示す。読み出しノイズは、HAWAII-2RG と SIDECAR の組み合わせによって、15–17 e$^-$ という結果になった。この値は、2.3.1 項で示した SWIMS の検出器読み出しシステムへの要求性能 (読み出しノイズ 14 e$^-$) を満たすことができていないが、それにかなり近い値となっており、OH 夜光輝線の効く波長域では十分に背景光ノイズリミットな分光観測が可能であると言える。なお、最小二乗フィッティングによる測定値の不確かさは、読み出しチャンネルごとに典型的に 0.1 e$^-$ 程度である。読み出しチャンネルによる読み出しノイズの差は、peak-to-valley で 30%程度と、ADU-エレクトロン変換係数と比較して大きくなった。このようなアレイ内での読み出しノイズの差が効いてくるのは、背景光が少ない条件である。仮に読み出しノイズリミットでの観測を考えると、同じ積分時間で観測したとき、到達 S/N がアレイ内でチャンネルにより最大で 30%異なることになる。図 2.2 と図 3.4、検出器カセットの設計から考えると、SWIMS の多天体分光観測では同一の読み出しチャンネル内で波長が分散する設計となっている。従って、多天体分光をしたときに天体によって読み出しノイズが異なることになるため、背景光の少ない波長域では天体ごとに到達 S/N が変わりうることに解析の際は注意が必要である。

ADU-エレクトロン変換係数と同じく、 (1) ・ (2) 2 種類の測定を行い、表 3.11 にはそれぞれの測定結果を示した。(1) ・ (2) それぞれの結果を各チャンネルで比較したプロットを図 3.12 に示した。図から分かるように、 (1) は全ての測定でチャンネルごとの読み出しノイズの傾向に比較的よい相関が見られるのに対し、 (2) ではあまり相関は見られない。このことから、チャンネルごとの読み出しノイズの大きさは SIDECAR ではなく HAWAII-2RG で規定されている成分がより大きいと言うことができる。この性質については、次項でより詳細に議論する。

読み出しノイズを測定する手法としては、フォトントランスファー法以外に参照ピクセルを使う方法がある。参照ピクセルは光に感度を持たないため、カウントのノイズは読み出しノイズそのものであると考えることができる。図 3.13 に 2 つの手法のノイズ測定値を比較したプロットを示す。2 つの値には明らかな相関があり、互いに独立した手法であってもそれぞれある程度は正しく読み出しノイズを測定できていることが分かる。ただし、図からは読み出しノイズが小さいチャンネルであるほど参照ピクセルで測定したノイズの

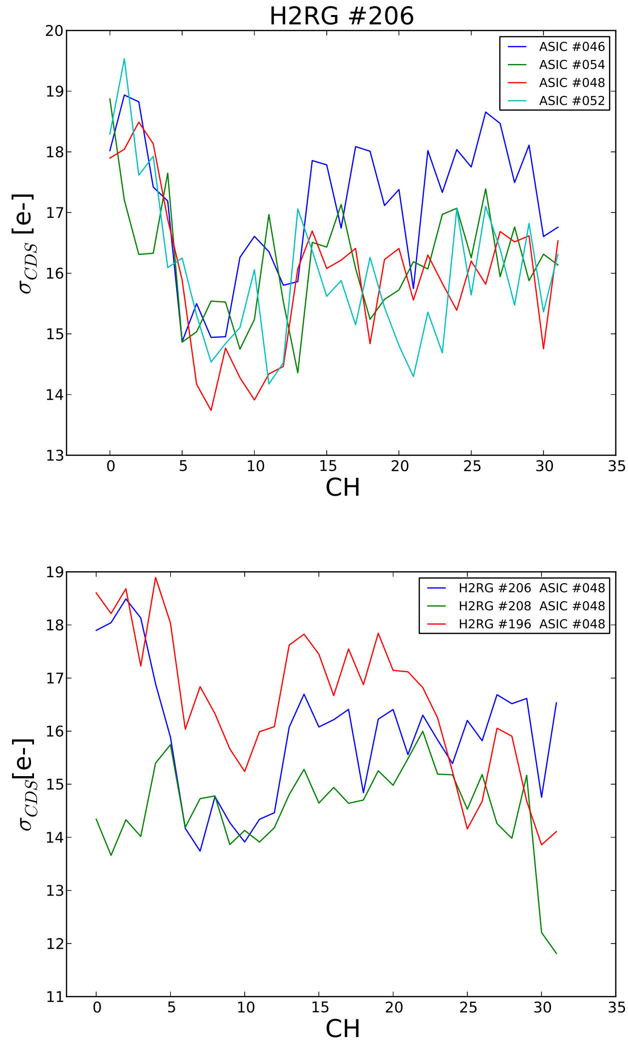


図 3.12: 横軸が読み出しチャンネルの番号 (#00–31) 、縦軸が読み出しノイズの測定値。上: (1) HAWAII-2RG を#206 で固定して SIDECAR を 4 種類交換した測定、下: (2) SIDECAR を#048 で固定して HAWAII-2RG を 3 種類交換した測定。(1) は (2) に比べて読み出しノイズの傾向に相関が大きい。

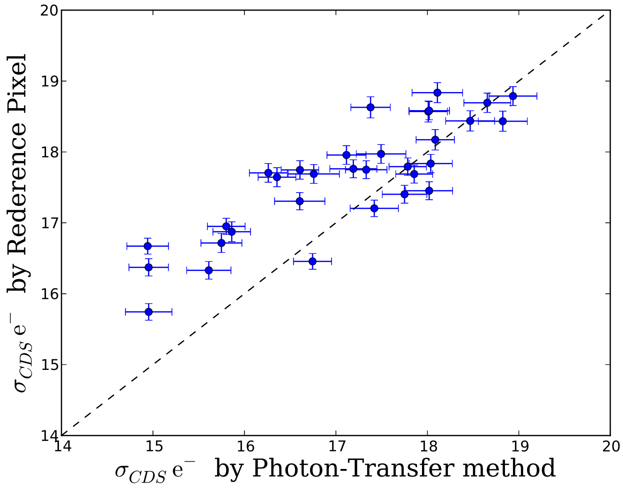


図 3.13: HAWAII-2RG #206、SIDECAR #046 の組み合わせにおいて 2 つの測定手法による読み出しノイズの比較。横軸がフォトントランスファー法、縦軸が参照ピクセルを用いた方法による値で、32CH ごとにプロットした。横軸の誤差棒は最小二乗フィッティングによる不確かさ、縦軸の誤差棒はチャンネル内の全参照ピクセルで平均をとったときの統計的な不確かさを表す。横軸と縦軸の値が等しい線を点線でプロットした。

値が大きく見積もられることが読み取れる。この原因は不明だが、参照ピクセルは通常のピクセルと回路構造が異なるため、ノイズも若干異なることは十分に考えられる。そのため、ここでは結果を記すのみにとどめ、深く追求はしないことにする。

USB アイソレータの効果

この試験における電源環境を図 3.14 に示す。HAWAII-2RG と SIDECAR の各基板グラウンドはコールドプレートを介してデュワー筐体と導通している。内部回路では、各々の基板グラウンドは信号線のグラウンドとは独立になるように設計されている。また、JADE2 についても基板グラウンドと電源グラウンドは独立となっている。よって、このシステムにおいては JADE2 から HAWAII-2RG 間では明らかなグラウンドループはできていないが、電源–JADE2–PC–交流タップでグラウンドループができている。一般に電気回路の設計においては、グラウンドループは予期しないノイズ源となりうるため可能な限り除くことが推奨されている (岡村, 1990) 。

このグラウンドループを除くため、Dorn et al. (2008) では、JADE2 と PC 間の USB ケーブルを光ファイバリンクを介して絶縁する方法が提案されている。本研究では、有限会社ヒューマンデータ社 [2] 製の USB アイソレータ、USB-029 を購入し、使用を試みた。このアイソレータは、USB ケーブル中に接続し、AC 5 V で駆動して内部回路で USB 信号を光信号に変換することで絶縁を実現する。アイソレータを導入して読み出しノイズを測定

[2] 大阪府茨木市穂積、`http://www.hdl.co.jp/sogo/index.html`

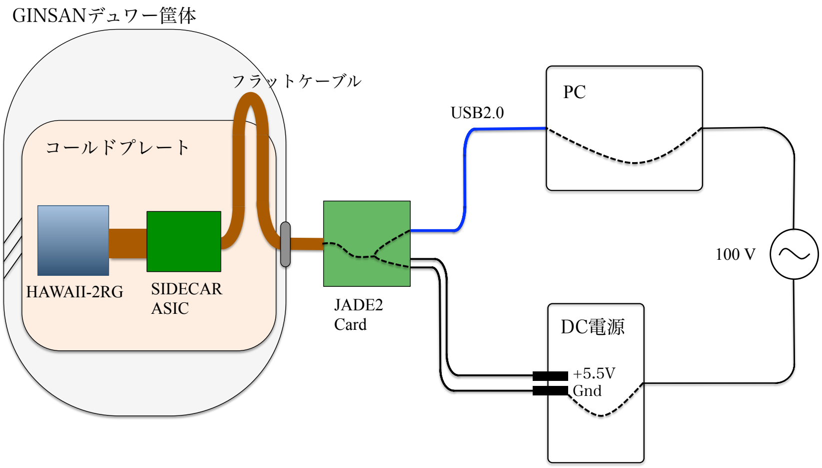


図 3.14: GINSAN を使用した、検出器単体評価試験の電源環境。JADE2 はデュワーの外部に設置されているため、デュワー筐体とは電気的に分離されており、ケーブルを介してデュワー内の SIDECAR に接続される。PC と直流電源は同一の交流 100 V タップから給電する。JADE2 内部では DC 電源線のグラウンドと USB 線のグラウンドは導通しており、さらにフラットケーブルから SIDECAR へ入っていくグラウンド線とも導通している。

した結果、少なくとも GINSAN を使用した試験では有意なノイズ軽減効果を確認することはできなかった。しかし、第 4 章で述べるように、駆動環境によって読み出しノイズの性質は変わるため、別の環境ではアイソレータが効くことは十分に考えられる。ただし、このアイソレータは通信規格が USB2.0 Full Speed (12 Mbps) であることが問題となる。その理由は、1 フレームのデータ量は 16 bit $\times$ (2048 $\times$ 2048 pixels) = 64 Mbit なので、32 チャンネル読み出し設定では 64 Mbit / 1.48 sec $\simeq$ 43 Mbps の速さでデータが転送され、12 Mbps では遅延が生じるためである。アイソレータを導入する際は、データ転送の遅延があまり効かないような長時間積分を利用する必要があると思われる。

3.4.2　ノイズの成分分離解析

SWIMS では、HAWAII-2RG と SIDECAR をそれぞれ 4 台駆動する。これらをどのように組み合わせればノイズ性能が最適化できるかを考えることは重要である。前項で述べたように、読み出しノイズを決定する主要なファクターは HAWAII-2RG にあるように思われるが、SIDECAR との組み合わせによってより良いノイズ性能を実現する可能性を探る。ここでは、読み出しノイズの起源を分離して解析することで HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せを最適化することを考える。

基本的な発想は、式 3.2 を利用することである。Preamp ゲイン G を変えて読み出しノイズを測定することで、ADC 以前で発生するノイズ σ_e e$^-$ と ADC で発生するノイズ Σ_{ADU} ADU を求めることができる。さらに、HxRG Testing Software 上の設定により、Preamp

への入力電圧 V1・V2・V3・V4 (3.2.2 項参照) を全て Gnd とすることで SIDECAR の内部回路だけで読み出しを完結させせることができる。このような読み出し方法で同様に G を変えて読み出しノイズ (σ_{ASIC} e$^-$ とする) を測定することで、SIDECAR 内の Preamp で発生するノイズ σ_{amp} e$^-$ と Σ_{ADU} ADU を求めることができる。図 3.15 にこのような測定の例を示す。σ_{CDS} と σ_{ASIC} を G の関数としてのフィッティングは精度よくできており、この手法によってノイズ成分の大きさを求めることができていることが分かる。

表 3.12 に全ての測定結果を示す。この結果を概観すると、読み出しノイズのうち少なくとも 70%程度は σ_e 起因であり、残りが ADC 起因であることが分かる。σ_e のうち SIDECAR 内で発生している σ_{amp} の成分は 10%程度とわずかであり、読み出しノイズの大部分は HAWAII-2RG 内部で発生していることが分かる。このような結果は前項の結果と矛盾しない。読み出しノイズの発生源について各成分の典型的な寄与を模式的に示したものを図 3.16 に示す。また、HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せによる各成分の大きさの違いを見ていくと、Σ_{ADC} は全ての組合せでほぼ同一であることが分かる。ADC で発生するノイズはどの SIDECAR でも同程度で、どの HAWAII-2RG と接続しても常に一定であるというこの結果は非常に直感的である。σ_{amp} については、 (2) の測定で SIDECAR #048 は HAWAII-2RG との組み合わせによらずおおむね一定となった一方で、σ_e については (1) の測定で HAWAII-2RG #206 は SIDECAR との組み合わせによって最大 1.5 e$^-$ のノイズ差があった。とはいえ、この差は σ_{CDS} にして 1 e$^-$ 程度の差でしかなく、全ての組合せについて試験をして最適な組合せを見つけることができたとしても、必要な労力に比してごく僅かな成果しか挙げられないことが見込まれる。従って、本研究では 4! 通り全ての組合せについては測定せず、ここに挙げた 6 通りの測定にとどめた。結論としては、HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せについてはおおむねどのような組合せとしてもノイズ性能に大きな影響はないと言える。

3.4.3　マルチサンプリングの効果

HAWAII-2RG のような赤外線検出器では、CMOS センサと同じく非破壊読み出しをすることができるため、リセットをかけずに積分を続けながら複数回のサンプリングをすることができる。これは、読み出すときに電荷をピクセルから転送していく CCD とは異なる特徴である。このようなサンプリング法には、大別して 2 種類の方法があり、1 つが Fowler サンプリング、もう一つが Ramp サンプリングである。図 3.17 にそれぞれのサンプリング法の概念図を示す。

Ramp サンプリングは、積分中に複数回読み出す方法である。単純な差分画像ではなく、各ピクセルの傾き (ADU/sec) をフィッティングして入射フラックスの大きさを得るという特徴がある。HxRG Testing Software では、5 つのパラメータを設定できる。パラメータは、積分開始前のリセット回数 Nreset、読み出し回数 Nread、空読み出し回数 Ndrop、読み出しと空読み出しを合わせた group の繰り返し回数 Ngroup、リセットから group の Ngroup 回の繰り返しまでの一連のシークエンスの繰り返し回数 Nramp である。最終画像

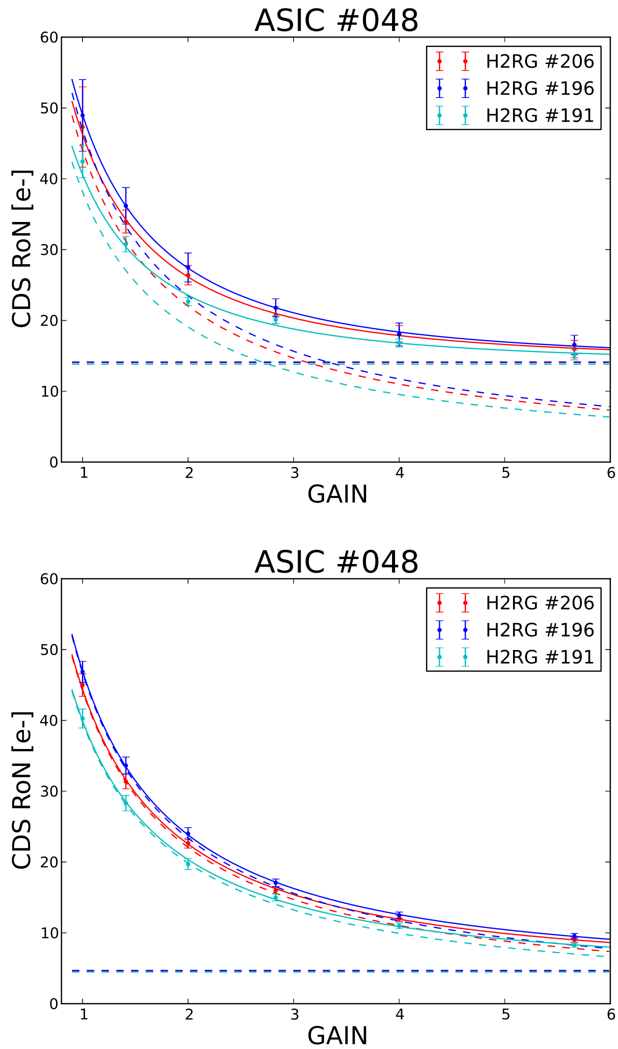


図 3.15: Preamp ゲインによる CDS 読み出しノイズの変化のプロット。SIDECAR #048 と HAWAII-2RG #206 (赤) 、#196 (青)、#191 (水色) それぞれの組合せについて 32CH の r.m.s. を丸点、標準偏差をエラーバーで示した。上: 横軸が G、縦軸が σ_{CDS}。各色について実線がフィッティング結果、曲線の点線は Σ_{ADU}、直線の点線は σ_e に対応する。下: 横軸は G、縦軸は σ_{ASIC}。各色について実線がフィッティング結果、曲線の点線は Σ_{ADU}、直線の点線は σ_{amp} に対応する。

表 3.12: 測定した全ての HAWAII-2RG と SIDECAR の組合せについて得られた各コンポーネントのノイズの値。全て 32CH の r.m.s. と標準偏差を示す。上段は (2) SIDECAR を#048 で固定して HAWAII-2RG を 3 種類交換した測定、下段は (1) HAWAII-2RG を#206 で固定して SIDECAR を 4 種類交換した測定。

HAWAII-2RG	#191	#196	#206
SIDECAR	#048		
σ_{CDS} e$^-$	15.1 ± 0.7	16.6 ± 1.4	15.9 ± 1.1
σ_e e$^-$	13.8 ± 0.6	14.1 ± 1.4	14.1 ± 1.1
σ_{amp} e$^-$	4.5 ± 0.6	4.7 ± 0.8	4.5 ± 0.7
Σ_{ADC} ADU	3.3 ± 0.1	3.4 ± 0.2	3.4 ± 0.1

HAWAII-2RG	#206			
SIDECAR	#048	#046	#052	#054
σ_{CDS} e$^-$	15.9 ± 1.1	17.1 ± 1.1	16.0 ± 1.2	16.2 ± 0.9
σ_e e$^-$	14.1 ± 1.1	15.6 ± 0.9	14.3 ± 1.1	14.2 ± 0.9
σ_{amp} e$^-$	4.5 ± 0.7	4.6 ± 0.6	5.2 ± 1.0	4.3 ± 0.8
Σ_{ADC} ADU	3.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1

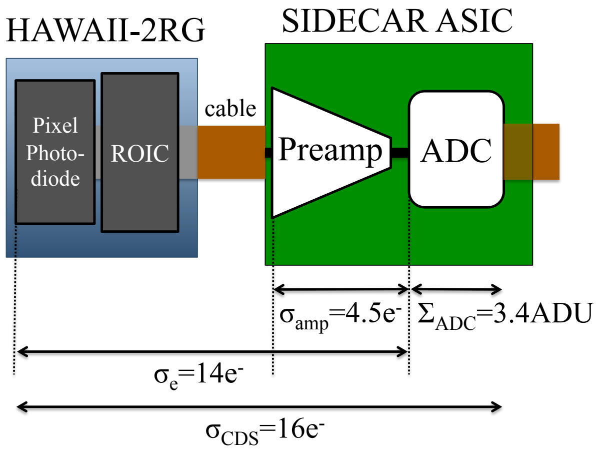


図 3.16: 各ノイズコンポーネントの典型的な大きさ。Todo et al. (2014) より引用、一部改変 。

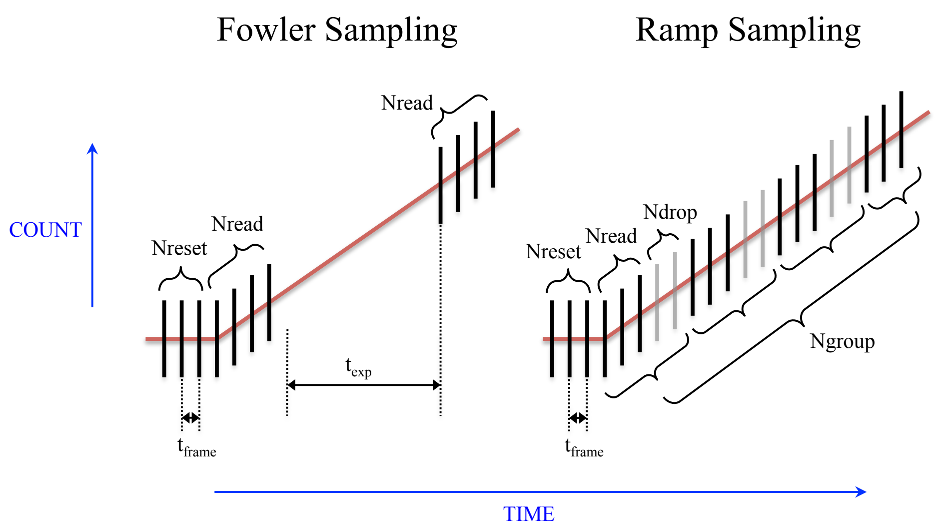


図 3.17: Fowler サンプリングと Ramp サンプリングの概念図。

は HxRG Testing Software では生成されないため、ソフトウエア的に改めて生成する必要があり、本研究で開発した SWIMS の検出器読み出しシステムでは実装していない。理論的には、読み出しノイズリミットな観測において最もノイズが小さくなるのは Ramp サンプリングであり (Garnett and Forrest, 1993) 、JWST/NIRSPEC では Ramp サンプリングを採用している (Rauscher et al., 2007; Smith et al., 2009) 。Ramp サンプリングの採用は今後の検討課題である。

Fowler サンプリングは、積分の最初と最後に N 回読み出し、N 枚それぞれを平均してから差分をとって最終画像を得る方法である (Fowler and Gatley, 1990) 。HxRG Testing Software では、4 つのパラメータを設定できる。パラメータは、積分開始前のリセット回数 Nreset、読み出し回数 Nread、最初と最後の読み出し間の露出時間 t_{exp}、リセットから読み出しまでの一連のシークエンスの繰り返し回数 Nramp である (ソフトウエア上は Ngroup というパラメータも設定可能であるが、実際の動作には影響しない) 。CDS を実現するには様々な方法がある (McLean, 2008) が、HxRG Testing Software では、Fowler サンプリングの特別な場合 (Nreset=1、Nread=1、t_{exp}=0、Nramp=1) として CDS が定義されている。HxRG Testing Software では、ソフトウエア的に平均、差分操作した最終画像を CDSResult.fits として出力する。なお、差分操作の際に参照ピクセルを用いてバイアス・参照電圧変動を補正しており、この補正スクリプトは HxRG Testing Software に組み込まれている。

ここでは、Nread≥1 とした Fowler サンプリングでのノイズ性能を評価する。GINSAN の暗環境試験を用い、読み出しノイズは各読み出しチャンネル内領域のカウント標準偏差から求める。領域の標準偏差からノイズを求める手法はフォトントランスファー法とは異

なるが、Nread=1 のときノイズの大きさは 2 つの手法で 32 読み出しチャンネルの平均値では数%程度の差しかないことが確認されており、問題はないと考えられる。また、評価に用いた領域においては漏れ光のポアソンノイズは十分に無視できる。評価領域は、通常のピクセルについて各読み出しチャンネルの 56 ピクセル × 145 ピクセル領域、参照ピクセルについて各読み出しチャンネルの 56 ピクセル × 4 ピクセル領域である。

HAWAII-2RG #208 について得た結果を図 3.18 に示す。読み出しノイズは Nread=32 または Nread=64 で最小であり、4.3 e^- 程度となった。このように、マルチサンプリングによって読み出しノイズを最大 70%程度削減でき、読み出しノイズの要求性能 (14 e^-) を満たすことができることが分かった。背景光の小さい分光モードなどの観測を行うときはマルチサンプリングによって背景光ノイズリミットの観測を実現することができる。1000 sec などの長時間積分においてはマルチサンプリングによるオーバーヘッドはそれほど効かないため、マルチサンプリングは非常に有用である。

理論的には各読み出しは独立であるので、読み出しノイズは $\sigma_{read} \propto \mathrm{Nread}^{-0.5}$ となるが、通常のピクセルのノイズはこの理論曲線にはのらず、Nread≤32 では $a\mathrm{Nread}^{-0.5} + b$ の「軽減可能な読み出しノイズ+固定ノイズ」の線で比較的よくフィッティングできている。同様の結果は赤外線検出器によるデータで Vacca et al. (2004) でも示されており、マルチサンプリングにおいて普遍的な現象であると考えられる。また、Nread=128 では一転してノイズが増加していることにも注意が必要で、長時間の積分になるほど効いてくるような性質を持つ因子がノイズに影響していると言える。このような因子を一意に特定することはできないが、長時間の積分による検出器内外の温度変化や、バイアス電圧の変動、また 1/f ノイズによる影響が考えられる。参照ピクセルの読み出しノイズは、全ての Nread で通常のピクセルを下回っており Nread=64 で最小 2.5 e^- となっている。参照ピクセルのほうがより $\sigma_{read} \propto \mathrm{Nread}^{-0.5}$ の理論線に近づいているが、やはり Nread≥64 では頭打ちとなっている。

3.5　暗電流

3.5.1　検出器のデグラデーション

HAWAII-2RG #208 について、暗電流の高いピクセル (ホットピクセル) が異常に増加する現象 (ここではデグラデーションと呼ぶ) が確認された。#208 を GINSAN の暗環境試験で t_{exp}=1000 sec の Fowler サンプリングをし、背景光を引いた画像と画像のヒストグラムを図 3.19 に示す。アレイの中央付近と右下に、暗電流が 1 e^-/sec/pix を超えるピクセルが固まって存在していることが分かる。ヒストグラムによれば、暗電流が 1–12 e^-/sec/pix まで、一定数のピクセルが分布している。この実験を行った 2014 年 3 月の段階で、暗電流 > 1 e^-/sec/pix のピクセルが通常ピクセルに占める割合は 4.96%であった。TIS 社の出荷レポート (2011 年) によれば「暗電流 > 1 e^-/sec/pix または量子効率 < 35% または読み出しノイズ > 50 e^-」の条件を満たすピクセルが全体の 0.79%であり、明らかにホット

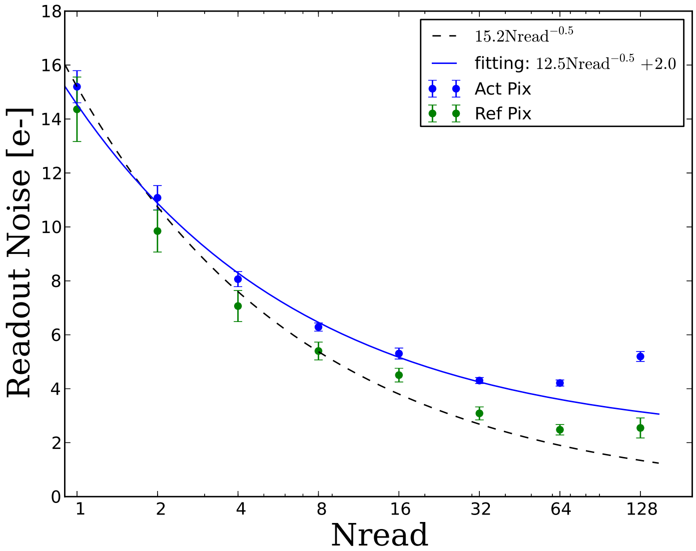


図 3.18: Fowler サンプリングにおける、マルチサンプリングと読み出しノイズの関係 (Todo et al., 2014) 。青点が通常のピクセル、緑点が参照ピクセルについて、それぞれ 32 チャンネルの平均値をプロットした。エラーバーは 32 チャンネルの標準偏差を表す。点線は Nread=1 の通常ピクセルの値で規格化した理論線であり、$\sigma_{read} = 15.2\mathrm{Nread}^{-0.5}$、青実線は Nread≤32 で $a\mathrm{Nread}^{-0.5} + b$ を最小二乗フィッティングした曲線であり、$a = 12.5$、$b = 2.0$ である。

ピクセルが増加していることが確認された。なお、このような現象は他の 3 つのアレイでは確認されていない。

このような HAWAII-2RG のデグラデーションは JWST のチームにより発見され、報告されている。Rauscher et al. (2012) によれば、

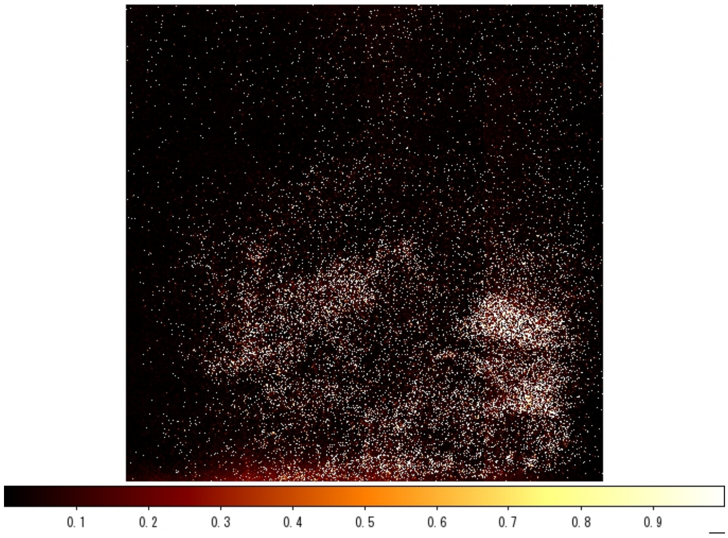
(1) 2.5 μm カットオフと 5 μm カットオフの HAWAII-2RG 両方にデグラデーションが確認された

(2) 2.5μm カットオフ HAWAII-2RG については 13 台中 2 台にデグラデーションが確認された

(3) デグラデーションにより生じたホットピクセルでは、カウントレート (ADU/sec) が一定でなく、カウントの増加関数は指数関数的な挙動となった。

(4) 図 3.20 に示したように、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) による解析から、デグラデーションの原因はピクセル構造内の金とインジウムバンプが反応して $AuIn_2$ が生じたことであると推測された

とされている。(4) に示されたように、デグラデーションは Au と In が近接しており、何らかの要因でクラックが入ると混合物が生じてしまうという HAWAII-2RG の構造的な欠



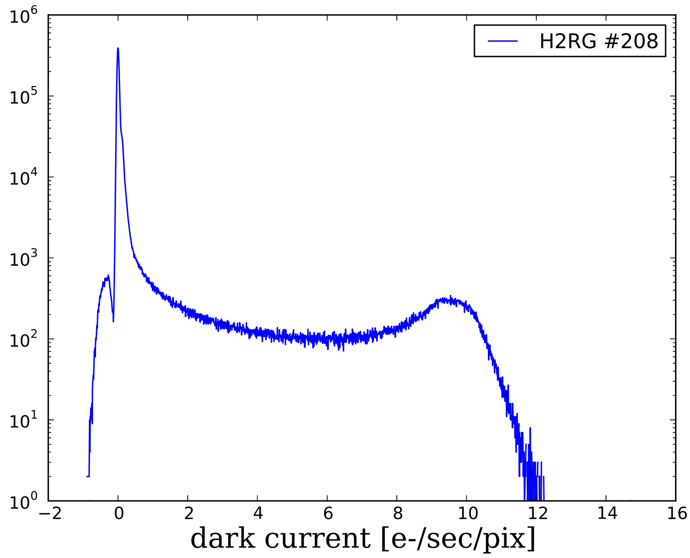


図 3.19: 上: #208 の 1000 秒積分画像 (実験日は 2014 年 3 月 15 日) 。カウントの単位は e^-/sec/pix、ただし背景光の減算処理を行った。下: カウントのヒストグラム。

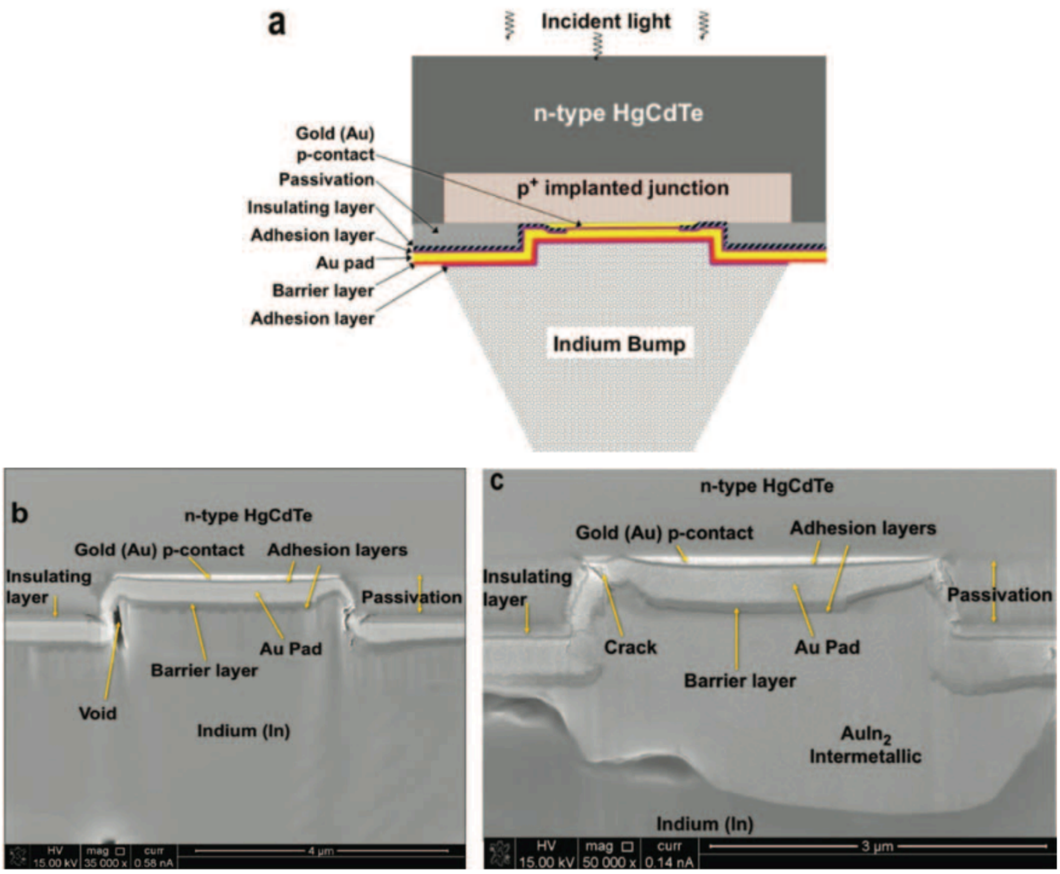


図 3.20: デグラデーションが発生したピクセルの SEM による解析結果 (Rauscher et al., 2012) 。上: ピクセル接点構造断面の模式図。下左: デグラデーションが生じていないピクセルの SEM 画像。下右: デグラデーションが生じているピクセルの SEM 画像。

陥によって起きる現象である。これは全ての HAWAII-2RG に起きる現象ではなく、製造プロセスでのわずかな欠陥によって確率的に生じる。また、図 3.21 に#208 におけるホットピクセルのカウント増加曲線を示す。この図から、アレイ上の一部分に存在するホットピクセルについて見ると、ホットピクセルは積分につれて次第にカウントレートが小さくなり、飽和カウントより小さいカウントで飽和しているような挙動を示していることがわかる。これは上記 (3) の性質と共通であり、このことから、Rauscher et al. (2012) で報告されている現象と#208 に生じた現象が同一であることが確認された。

#208 のデグラデーションは 2014 年 3 月に始めて発見されたが、その後さらにホットピクセルが増加していることが確認された。図 3.22 に 7ヶ月時期をずらして取得した同様のデータでのヒストグラム比較を示す。積分時間が短いデータを使用しているため正確性には欠けるが、明らかにホットピクセルが増加していることが分かる。参考値として、表 3.13 に基準値ごとのホットピクセルの割合を示す。このような明らかなホットピクセルの増加の原因としては、この期間に 3 度の冷却試験を行い、300–80 K の熱サイクルをかけ

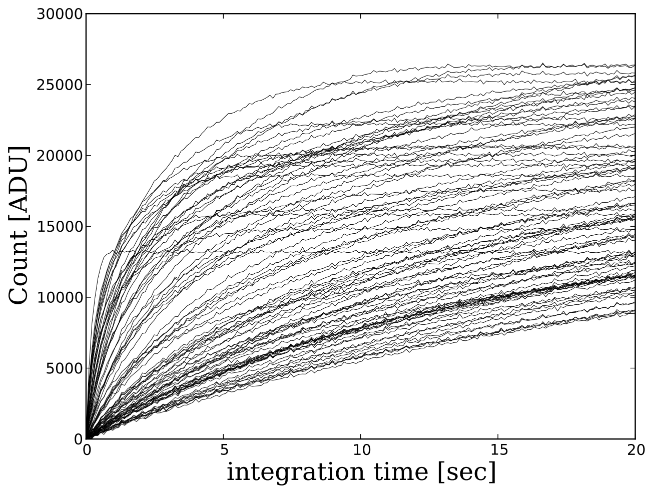


図 3.21: #208 における、ホットピクセルのカウント増加曲線。横軸は積分時間、縦軸は 1 枚目からのカウントの増加量。window モードを用いて、特にデグラデーションが多い領域の 100 ピクセル × 100 ピクセルをフレームレート 0.108 sec/frame で Nread=200 の Ramp サンプリングをした (実験日は 2014 年 8 月 20 日) 。10,000 ピクセルのうち、200 フレームでのカウント増加量が 1,000 e^-/sec/pix を超えているホットピクセルのみプロットした。

表 3.13: #208 における、7ヶ月間のホットピクセルの割合の変化。データは図 3.22 と同じものを用いた。積分時間が短いため、参考値程度であることに注意。

	> 10 e^-/sec/pix	> 50 e^-/sec/pix	> 100 e^-/sec/pix
2014 年 3 月 15 日	$\sim 5\%$	$\sim 2\%$	$\sim 1\%$
2014 年 10 月 20 日	$\sim 30\%$	$\sim 20\%$	$\sim 10\%$

ていることが考えられるが、特定はできていない。暗電流への要求性能は 2.3.1 項で示したように $\ll 0.20$ e^-/sec/pix であり、#208 では多くのピクセルが全く要求性能を満たせていない。

3.5.2　暗電流の測定結果

検出器の暗電流は GINSAN の暗環境試験での測定結果から求めた。データは図 3.19 で用いているものを使用し、ホットピクセルの評価の際に減算した背景光をデグラデーションの影響を受けていないカウントとして利用する。図 3.23 に背景光の大きさを示す。背景光の大きさはアレイ内で平均値 0.22 e^-/sec/pix、最大値 0.49 e^-/sec/pix、最小値 0.13 e^-/sec/pix となった。アレイ上で系統的に下部のカウントが高くなっているが、これは真に下部で暗電流が大きくなっているのではなく、漏れ光があるためと考えられる。実際、

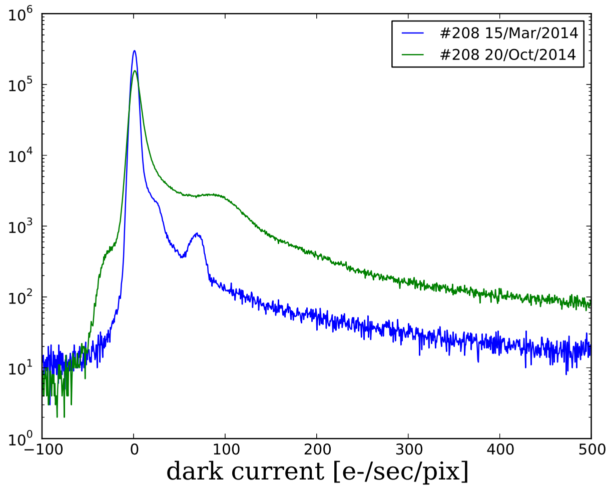


図 3.22: #208 における、7ヶ月間のピクセル暗電流のヒストグラム変化。青が 2014 年 3 月 15 日、緑が 2014 年 10 月 20 日に取得したデータ。ともに積分時間 1.5 秒の CDS 画像を 20 枚平均したものから暗電流の大きさを求めた。青線については、図 3.19 下とは積分時間が異なるため、ヒストグラムが異なることに注意。

アレイ下部には SIDECAR と接続するフラットケーブルがある関係上、アルミテープで塞ぎきれなかった隙間があることが確認されている。

アレイの全体で背景光の大きさにこの漏れ光が影響していると考えられるため、暗電流の測定値は上限値しか与えることができない。以上から本研究では、HAWAII-2RG のデグラデーションを除いた暗電流の上限値の測定結果として、~ 0.1 e$^-$/sec/pix を得た。この測定値だけでは $\ll 0.20$ e$^-$/sec/pix の要求値を満たせているかは判断できない。しかしながら、GINSAN の試験環境では < 80 K の駆動環境は実現できていると判断でき、デグラデーションの影響を除けば、要求は十分達成されると考えられる。

3.6　線形性

3.6.1　評価手法

ここで言う線形性とは、ピクセルに入射した光子数に対する出力カウントの線形性である。この線形性は 2 つの要素に分割することができて、1 つは ADC における入力電圧と出力カウントの線形性、もう一つはピクセルに入射した光子数に対する出力電圧の線形性である。前者の性質については Crouzet et al. (2012) で詳しく調べられており、Preamp ゲイン設定とバイアス電圧、参照電圧設定によって変化することが分かっている。適切に設定した範囲内では、この線形性はおおむね完全な線形に近い挙動をしており、顕著に悪いことはない (Crouzet et al., 2012) 。後者はピクセルのフォトダイオードの性質とバイ

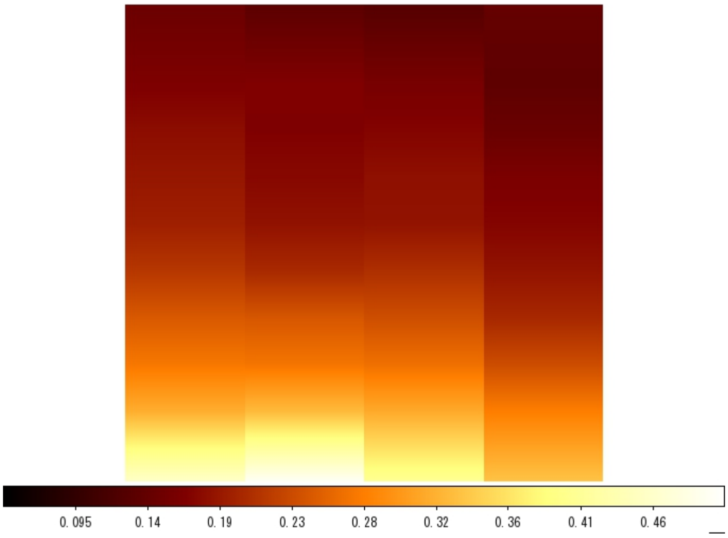


図 3.23: 図 3.19 データで推定した背景光。カウントの単位は e^-/sec である。4 チャンネル読み出しを採用したため、チャンネルごとにカウントの最頻値から推定した。

アス電圧、参照電圧設定によると考えられる。前者は完全な線形に近いため、線形性の性質は後者依存が大きいと考えられるが、ここではこれら 2 つの線形性を区別せず、光子数に対する出力カウントの線形性を調べる。

HAWAII-2RG の線形性については、比較的多くの研究がなされている。これらの研究では、線形性を評価するにあたって「線形フィットからの乖離率」を調査していることが多い。図 3.24 にこのような評価手法の例を示す。ここで引用した Jeong et al. (2014) では、線形フィット直線からの残差はフレーム番号が増加するに従ってマイナス、プラス、マイナス、と系統的な変化をしている。この残差のプロットから、線形直線が HAWAII-2RG の線形性を評価するフィッティング関数としてふさわしくないのは明瞭である。また、その結果としてフィッティング残差も -3.04–$+1.41\%$ と大きくなってしまっている。このように、これまでになされた HAWAII-2RG の線形性評価研究では、線形直線をフィッティング関数とし、そこからの残差を評価するという手法を用いており、本質的な線形性の評価をすることができていないと思われる。

本研究では、一次直線ではなく、三次曲線をフィッティング関数として用いるという手法を採用する。具体的な手法を以下に述べる。Ramp サンプリングでデータを取得し、出力カウント y ADU を、積分時間 x sec の関数としてフィッティングパラメータ a、b、c、d で

$$y = ax + bx^2 + cx^3 + d \tag{3.30}$$

と 3 次関数で最小二乗フィッティングをする。この式 3.30 には、積分時間 $x = 0$ sec でのカウントであるバイアスカウント d ADU が含まれ、また a、b、c は光量の大きさに依存

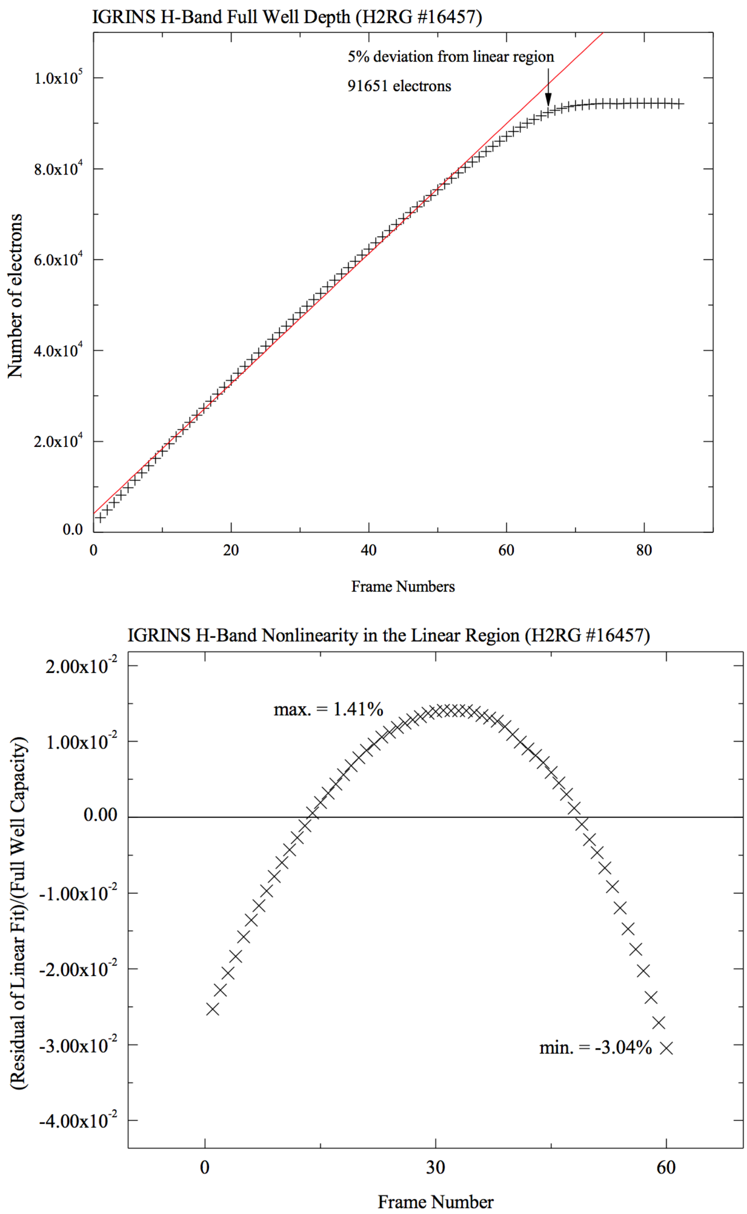


図 3.24: HAWAII-2RG の線形性の研究例。Jeong et al. (2014) より引用。上: 横軸がフレーム番号、縦軸が電子数で、H バンドでの Ramp サンプリングの測定値をプロットしている。赤線は線形フィット直線。下: 横軸がフレーム番号、縦軸はフルウェル電子数に対する、線形フィットからの残差の比率。

するパラメータである。普遍的な線形性の式を得るため、ここで変数変換 $Y = y - d$ と $X = ax$ を導入し、

$$Y = X + \frac{b}{a^2}X^2 + \frac{c}{a^3}X^3 = X + b'X^2 + c'X^3 \tag{3.31}$$

とする。ただし、$b' = b/a^2$、$c' = c/a^3$ である。式 3.31 において、Y ADU はバイアスカウントを補正した、光子数のみによる出力カウント、X ADU はもとの 3 次曲線の 1 次の項から求めた、線形性が完全な直線であるときの理想的なカウントとなる。Y ADU が出力されるとき、完全な線形性をもつ検出器で想定される出力カウントは X ADU である。

3.6.2　結果

本研究では、GINSAN デュワーの光導入環境を用いて、HAWAII-2RG #206 で取得したデータで線形性を評価する。Ramp サンプリングのパラメータは、Nreset=3、Nread=130 とした。3.1 節で述べたように、アレイ中心部においては黒体炉からの入射フラックスの変動は十分に無視できるため、アレイ中心部で同一の読み出しチャンネル内の 31 ピクセル × 31 ピクセル領域でカウントを平均して式 3.31 の形の線形性の式を求める。この範囲では入射フラックスは一様であると仮定してよい。得られた線形性の式は、

$$Y = F(X) = X - 1.83 \times 10^{-6}X^2 - 1.17 \times 10^{-11}X^3 \tag{3.32}$$

である。図 3.25 に取得したデータとフィッティングの結果を示す。フルウェルは 5.47×10^4 ADU $= 1.29 \times 10^5$ e^- であり、上記のフィッティングはフルウェルの 80%までで求めた。中図から分かるように、このアレイでは $X = 0$ ADU からおおむね直線的に線形関係からずれていき、ウェルの $\sim 40\%$ ($\sim 23,000$ ADU) でズレは 5%を超える。また、下図から分かるように、このフィッティグの残差はおおむね $\pm 0.1\%$ 以下と非常に小さく、系統的な残差はなくすことができていると考えられる。

ピクセルごとに有意に線形性が異なるとすると実際の観測において補正は非常に難しくなるため、個々のピクセルで線形性を評価して式 3.32 のフィッティングを個々のピクセルに適用できるかを考えることは重要である。ただし、線形性の評価において変数変換によって消去した a とバイアスカウント d についてはピクセルごとに異なることが見込まれる。実際の観測において、前者の効果についてはフラット補正、後者の効果についてはバイアス補正または CDS 操作によって除くことができる。評価に用いた領域内の 961 ピクセルについて、バイアスカウントを最初の 5 フレームでの 3 次関数フィットから求めると、その分布はおおむね平均値 1.03×10^4 ADU、標準偏差 6×10^2 ADU の正規分布に近くなった。このピクセルごとのバイアスカウントを適用した上で、式 3.32 と有意な残差がないような a の値が存在すれば、全てのピクセルで同じフィッティングを適用できるといえる。このような操作をした 1 ピクセルごとのフィッティング残差を図 3.26 に示す。読み出しノイズが効いてくるため、残差の絶対値は図 3.25 下よりも大きくなってはいるが、系統的な

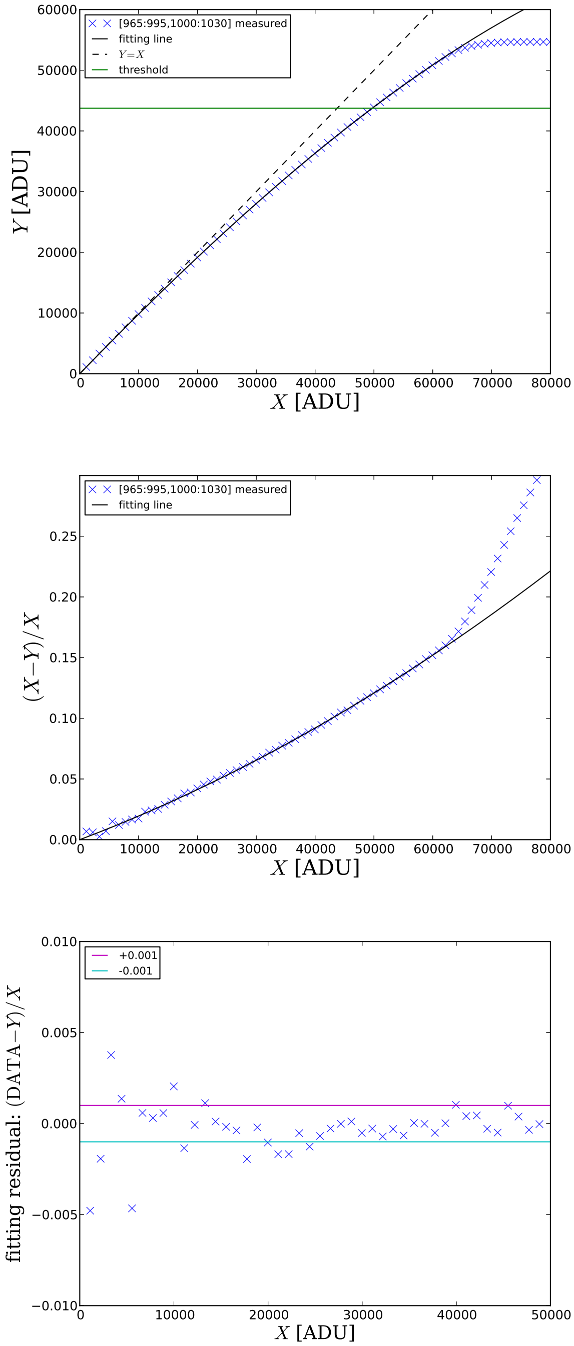


図 3.25: 31 ピクセル × 31 ピクセル領域で平均した場合の線形性評価結果。上: 横軸 X ADU、縦軸 Y ADU。青点が取得したデータ、黒実線がフィッティングした 3 次曲線 (式 3.32) 、黒点線が $Y = X$ を示す。フィッティングにはフルウェル 80%以下の緑線より下にあるデータを使用した。中: 横軸 X ADU、縦軸は $(X - Y)/X$ で、完全に線形である場合 ($Y = X$) からの距離と X の比を示した。下: 横軸 X ADU、縦軸はフィッティング残差と X との比を示した。マゼンタ実線は +0.001、シアン実線は -0.001 を示す。

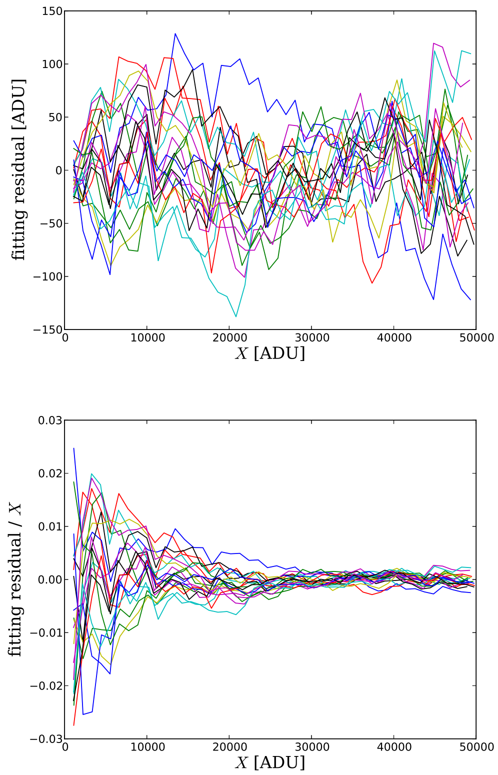


図 3.26: 式 3.32 を適用したとき、1 ピクセルごとのフィッティング残差。961 ピクセルから抽出した 19 ピクセルのみプロットしている。横軸は X ADU、縦軸は上: フィッティング残差 (単位は ADU) 、下: フィッティング残差と X との比。

残差はなく、おおむね ±0.5% 以下に抑えることができていることが分かる。従って、少なくともこの領域内では領域内で平均して求めた線形性にすべてのピクセルが従うと考えてよいと言える。

3.6.3　考察

式 3.32 の値を参考値として、実際の観測への影響を考える。まず、CDS 処理や Ramp サンプリングの処理による効果を一切考慮しない場合に撮像観測における星像のカウントにはどのような影響があるかを見る。SWIMS をすばる望遠鏡に搭載した場合を考える。条件として、すばる望遠鏡の典型的なシーイング FWHM$= 0''.5$ の星像を 5 ピクセル × 5 ピクセルの正方形領域で測光するとする。ただし、IPC による効果はここでは無視する。星像のカウントごとに、出力されるカウントへの線形性の影響を表 3.14 に示す。本来のカウント X が大きいほど X と出力されるカウント Y の差は大きくなっていくため、星像中心のカウントが大きいほど線形性による影響は大きくなる。表から分かるように、線形性が星像の測光に与える影響は非常に大きく、無視できない。しかし、線形性のふるまい

表 3.14: 星像中心のカウントに対する、線形性による影響。本来のカウントに対して、線形性の影響で小さく見積もられるカウントの割合を示した。星像中心がピクセルの中心になるか、端になるかによって影響量は違うため、値には幅がある。

星像中心のカウント	線形性による影響
10000 ADU	1.0–1.1%
20000 ADU	2.0–2.4%
50000 ADU	5.8–6.8%

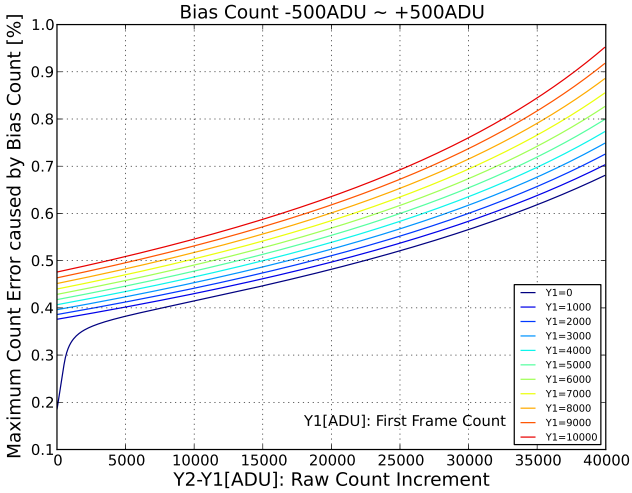
自体は式 3.32 のような形で残差 0.1%以下と精度よく求めることができると期待されるため、この式に基づいて補正すれば正しく測光することは可能になる。

Fowler サンプリングのように差分画像を用いる場合、線形性の補正は差分データについてではなく取得した生のデータについて行う必要がある。HxRG Testing Software では、CDS 画像の算出処理は通常ソフトウエア的に自動でなされるため、この点には注意が必要である。このような補正処理をするにあたって、バイアスカウントについてはピクセルごとに事前に求めておく必要がある。このバイアスカウントに求められる決定精度について考える。Fowler サンプリングの Nread=1 を想定し、$y1$ ADU、$y2$ ADU をそれぞれ 1 フレーム目、2 フレーム目の生の出力カウントとする。ピクセルのバイアスカウントが d ADU のとき、$Y1 = y1 - d$、$Y2 = y2 - d$ として、線形性補正後の差分カウント ΔX ADU は、

$$\Delta X = F^{-1}(Y2) - F^{-1}(Y1) \tag{3.33}$$

である。$F^{-1}(Y)$ は Y について増加関数であり、その 1 次導関数と 2 次導関数は常に正であることから、ΔX は d について減少関数となる。$Y1$ と $Y2$ をパラメータとして、d の値をある範囲で変化させたとき、ΔX の変動の大きさを図 3.27 に示す。生の出力カウントの増加量 $Y2 - Y1$ が大きいほど、また $Y1$ が大きいほどバイアスカウントによって生じる誤差は大きくなる。前項でバイアスカウントはおおむね ±600 ADU のバラつきを持つことが示されたが、バイアスカウントの決定精度が ±500 ADU のとき、上図のように最大で 1%程度の差分カウント補正誤差が生じる。一方で、バイアスカウントの決定精度が ±100 ADU であるとすれば、下図のように最大でも 0.2%程度の補正誤差に抑えることができることが分かる。線形性のフィッティング誤差が 0.1%程度あったことを考えると、バイアスカウントの決定精度としては ±100 ADU で十分であることが分かる。バイアスカウントは積分ごとに変動することが考えられるが、本研究で得たデータの範囲ではこの ±100 ADU を超えるような有意なバイアスカウントの変動は確認されていない。従って、実際の観測においては、バイアスカウントの測定は積分ごとに行う必要まではなく、観測夜ごとに取得する程度でよいと思われる。

ここまでの結果はアレイ内の一つの読み出しチャンネル内の一部の領域について求めた



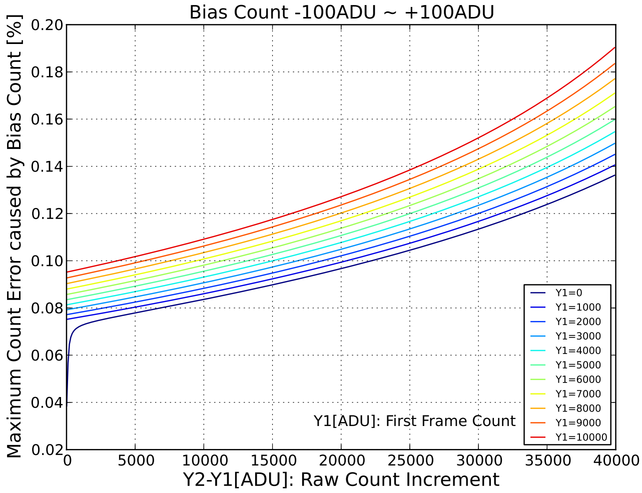


図 3.27: バイアスカウント d の決定精度によって生じる線形性補正後の差分カウント ΔX の最大誤差。上: d が ± 500 ADU の誤差を持つ場合。下: d が ± 100 ADU の誤差を持つ場合。横軸は $Y2 - Y1$ ADU、つまり補正前のカウント増加量である。縦軸は、線形性補正後の真のカウント増加量について、バイアスカウントの誤差によって生じうる誤差 (%) を示す。それぞれ、$Y1$ を 0 ADU から 10000ADU まで色分けしてプロットした。

ものであり、アレイ全体にこの結果が単純に適用できるとすることはできない。GINSAN デュワーでの光導入試験環境ではアレイ全体にフラットな光を入射することができないため、本研究ではこれ以上の範囲について調査はできないが、今後の研究が必要である。また、フラックスの大きさの違いや波長による線形性の変化についても研究する必要がある。なお、Jeong et al. (2014) では H バンドと K バンドでの線形性をそれぞれ調査しており、有意な線形性の差があるとしている。式 3.32 の値は J バンド中の Paβ フィルタ ($\lambda =$1.292 μm) での測定による参考値であることに注意が必要である。さらに、バイアス電圧などの設定によっても線形性が変化することが想定される。従って、いずれにせよ線形性については SWIMS への検出器読み出しシステムのインストールと初期調整作業が完了した段階で再測定が必要である。

第4章　検出器読み出しシステムの性能評価

専用のデュワーを用意し、検出器を複数台駆動する読み出しシステムとしての性能を、特に読み出しノイズ性能について評価した。

4.1　試験環境

SWIMS で使用する検出器カセットなどの読み出しシステムコンポーネントをそのまま利用した HAWAII-2RG 2 台 (最大で 4 台) の冷却駆動試験を実現するため、専用のデュワーを開発した。デュワーの製作は株式会社鈴木商館[1]に依頼した。このデュワー (以下、SUZUKI デュワーと呼ぶ) は液体窒素で冷却する。外観を図 4.1 に示す。冷却プレート面の作業性と液体窒素冷却の耐久性をともに確保するため、SUZUKI デュワーには回転機構が用意されている。ウインチボックスが付属しており、手動でハンドルを回すことでデュワーを 90° 回転させせることができる。冷却部については高さが 300 mm、冷却プレートは銅製で 400 mm × 400 mm であり、検出器カセットを 1 組収容するだけのスペースが十分に確保されている。図 4.1 でも確認できるように、デュワー外部からの光導入試験を想定し、デュワー上部には ϕ181 mm の窓があり、白板ガラスが取り付けられている。ただし、本研究では光導入試験は実施せず、全てデュワー外の入射光を遮断して暗環境で試験を行った。また、SWIMS と同じ環境とするために JADE2 を常温真空部へ設置することを想定し、アルミニウム製 150 mm × 400 mm の常温プレートが用意されている。

冷却部はアルミ製のラディエーションシールドで全面を囲う構造となっているが、液体窒素による冷却を長時間持続させるにあたって、このラディエーションシールドへの放射による熱流入が問題となる。天文センターの館内の試算によれば、300 K のデュワー外壁からラディエーションシールドへの熱放射量から、SUZUKI デュワーのタンク (110 mm × 420 mm × 420 mm) に満杯の液体窒素が全て気化する時間は約 40 時間である。これは実験系の安定のためには不足であるため、熱放射を軽減する対策が必要となる。天文学の装置では、このような熱放射を軽減するために多層断熱材 (Multi Layer Insulator; MLI) が広く導入されている。MLI とは、図 4.2 上に示したようにアルミ層と断熱層を何層にも重ねたものであり、SWIMS デュワー本体にも導入されている (Konishi et al., 2012) 。N 層の MLI でラディエーションシールドを囲うことによって、放射を $1/N$ にする効果が期待できる。図 4.2 下に示したように、9 層の MLI を家庭用ミシンを用いて製作、ラディエーションシールドに施工した。その結果、液体窒素が全て気化するまでの時間は 57 時間と

[1] 東京都板橋区舟渡、`http://www.suzukishokan.co.jp`

図 4.1: SUZUKI デュワーの外観。左: 常温作業用の横倒し状態。右側は真空ポンプ。右: 冷却試験用の縦向き状態。手前のハンドルが付いている物体は回転機構のウインチボックス。

なり、十分に長い時間実験系を安定させることが可能になった。SUZUKI デュワーでの到達温度は冷却プレート中央部で 78 K、到達真空度はデュワー側で 1×10^{-6} torr である。

SUZUKI デュワー内部の検出器駆動試験のセットアップを図 4.3 に示す。SWIMS デュワーでの片方のアームのセットアップをそのまま再現することが目的であるため、検出器カセット、SIDECAR–JADE2 間ケーブル、JADE2 固定ボックスは全て SWIMS デュワーで用いるものと共通である。これにより、GINSAN デュワーと異なり、沖電線製のケーブ

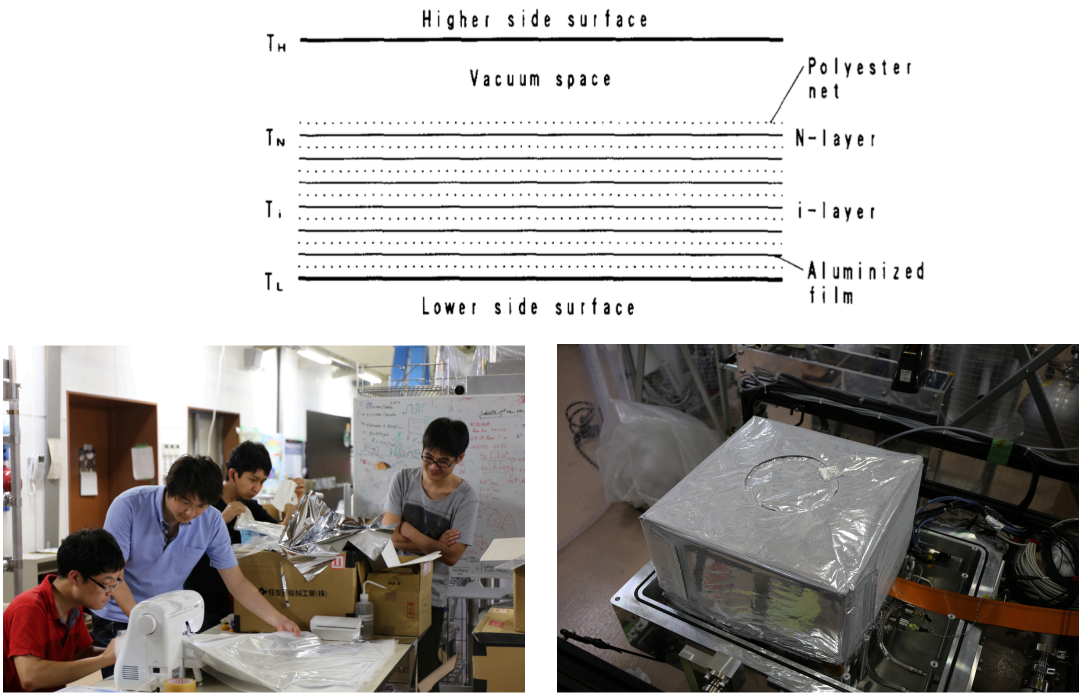


図 4.2: 上: MLI の構造模式図 (天野, 1993) 。下左: 家庭用ミシンを用いた MLI の製作のようす。下右: ラディエーションシールドに MLI をかぶせたようす。

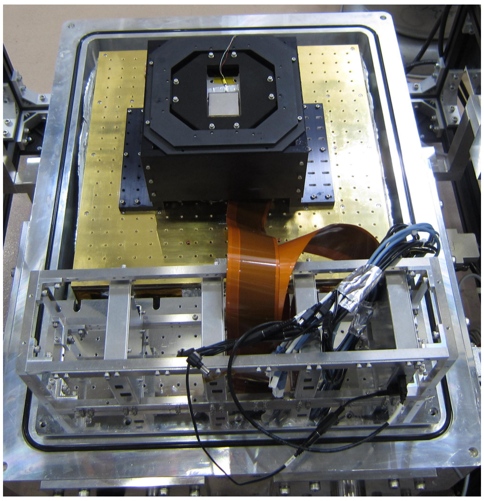


図 4.3: SUZUKI デュワー内部のセットアップ。金色の板が銅製の冷却プレート、その中央に冶具で固定されているのが検出器カセットであり、この図では試験用にマルチプレクサ 1 台のみを搭載している。デュワー内手前の銀色の板が常温真空部プレート、そこに固定されているアルミ製の枠が JADE2 固定ボックスである。右端のボックスに JADE2 が収納されており、検出器側から沖電線製フラットケーブル、デュワー外から USB2.0 ケーブルと DC 電源ケーブルが接続されている。

ルを完全に真空中で使用することが可能であり、また JADE2 はデュワー内の真空中での駆動となる。検出器カセットは、SWIMS デュワーの場合と同じくアルミ製の冶具とネジで 8 点どめとした。検出器本体の到達温度は計測できていないが、検出器カセットで <80 K に到達していることを確認している。なお、冷却デュワー内に固定した構造体を十分に冷却するには、冷媒からの十分な熱パスを確保することが非常に重要であり、特に接触面へのグリスの塗布と可能な限り多くのネジを用いて冶具を固定することが重要である。

この試験環境により、検出器 1 台の単独駆動または 2 台の同時駆動試験が可能である。本研究の範囲では、使用した検出器はデグラデーションが確認された HAWAII-2RG #208 とマルチプレクサであり、他のサイエンスグレードアレイについては SUZUKI デュワーでの駆動試験は行っていない。次の 4.2 節では検出器 1 台を駆動した場合のノイズ性能、4.3 節では検出器 2 台を同時に駆動した場合のノイズ性能について述べる。

4.2　検出器単独駆動でのノイズ性能

4.2.1　電源環境による影響の除去

SUZUKI デュワーを用いた試験での電源環境は図 3.14 に示した GINSAN 試験でのものとは異なる。ここでは、読み出しノイズ性能を最適化するための SUZUKI デュワー周りの電源環境の整備について述べる。SUZUKI デュワーでは、デュワー筐体と冷却プレート、常温真空プレートは構造上全て電気的に導通している。JADE2 ボックスも導体で構成しているため、HAWAII-2RG と SIDECAR、JADE2 の基板グラウンドは全てデュワーを通

じて導通していることになる。ただし、3.4.1 項で述べたようにそれぞれの電源グラウンドは基板グラウンドとは独立した設計となっている。DC ケーブルと USB2.0 ケーブルは、D-subminiatute (D-sub) 25pin コネクタを介してデュワー内外を接続する。JADE2 に電源を供給する DC ケーブルには、シールドケーブルを採用した。具体的な仕様は、AWG-16 (ϕ1.290 mm) 、4 芯、錫めっき銅編組遮蔽、長さ $\sim$ 1.5 m であり、検出器 2 台ぶんの DC ケーブルを単一の遮蔽内で通す構造となっている。

電源環境については、SUZUKI デュワーと SWIMS デュワーでは状況が異なり、全く同じ環境とすることはできないが、SWIMS デュワーでの環境構築の参考として、実験的に得られた電源環境の最適化について述べる。まず、真空ポンプは真空配管を通じて筐体と導通しており、ノイズを悪化させる原因となったため、真空バルブを閉じて真空配管は取り外し、実験中は真空ポンプを停止させる措置をとった。真空計・温度計などの配線も予期しないグラウンドループの要因となりうるため、念のため全て実験中は取り外した。SUZUKI デュワーの筐体については、次の 3 種類の取り扱い方で試験を行った。

(1) 交流 100 V 電源のタップを通して実験室全体のグラウンドと筐体を電気的に接続する

(2) 特に何もせず、筐体と実験室床面との接触抵抗に任せる

(3) DC ケーブルのシールドを介して直流安定化電源のグラウンドと筐体を電気的に接続する

その結果、アレイ全体の読み出しノイズ r.m.s. で (3) に対して (1) が約 5 倍、 (2) が約 4 倍の悪化を示したため、 (3) を採用することとした。以上の設定による電源環境を図 4.4 に示す。また、読み出しノイズへの影響に関して、エアコンの風圧などによる SUZUKI デュワー本体の回転機構の振動も読み出しノイズの悪化に非常に強く効くことも確認された。そのため、実験はデュワーに物理的な外力をかけないように慎重に行う必要があった。検出器の駆動パラメータなどにもより、電源環境の最適解は一意には決定できないように思われるが、ここでは図 4.4 の設定を暫定的に最適解とみなし、本章での試験全体で適用する。

4.2.2　結果と考察

SUZUKI デュワーと GINSAN デュワーでの比較

沖電線製ケーブル (OKI ケーブルと呼ぶ) を始めて用いた SUZUKI デュワーでの試験では、バイアスカウントが低下する現象が見られた。GINSAN デュワーで TIS 社製ケーブル (TIS ケーブルと呼ぶ) を用いた環境でバイアスカウントが 10,000 ADU 程度となるようにした表 3.7 の設定を適用すると、バイアスカウントは 1,000 ADU 程度となった。SUZUKI デュワーで TIS ケーブルを用いるとこのようなバイアスカウントの低下は見られなかったことから、OKI ケーブルの内部インピーダンスによる電圧降下が起こっていると考えられ

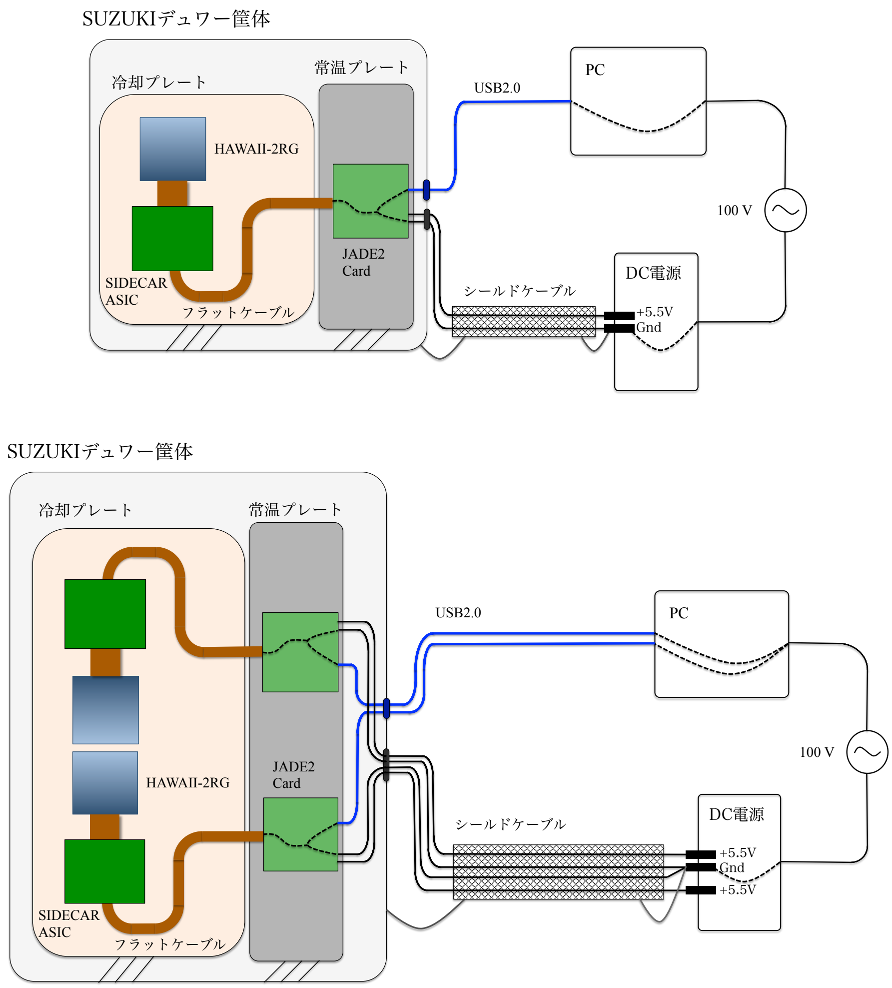


図 4.4: SUZUKI デュワーでの電源環境。上: 検出器単独駆動試験の場合、下: 検出器 2 台同時駆動試験の場合。

る。OKI ケーブルと TIS ケーブルは、長さだけでなく内部配線などにも大きな違いがある。こうした違いによる影響については、次節でさらに詳しく議論する。

ノイズの測定・比較手法について述べる。3.2.3 項で述べたように、バイアスカウントの値と読み出しノイズの値には非常に強い相関関係がある。GISAN デュワーと SUZUKI デュワーの試験環境のノイズ性能を直接比較するため、表 3.7 の設定のうち、VrefMain の設定のみバイアスカウントが 10,000 ADU 程度となるように調整し、VrefMain=1.5543 V とする。比較にあたって、HAWAII-2RG は #208、SIDECAR は SUZUKI デュワーでは#054、GINSAN デュワーでは#048 とする。ここでは、読み出しノイズは暗環境試験で CDS フレームを 20 枚連続で取得し、各ピクセルの不偏分散の平方根をとった標準偏差フレームから $g_c = 2.4\ \mathrm{e}^-/\mathrm{ADU}$ を仮定して求める。HAWAII-2RG #208 のデグラデーションの影響を除くため、デグラデーションによるホットピクセルの数が少ない Y 座標が $1200 \leq \mathrm{Y} \leq 2044$ のアレイ上部についてのみ評価し、r.m.s. を求めるにあたって 3σ 以上の外れ値は除外する。

比較結果を図 4.5 に示す。全チャンネルの r.m.s. で比較すると読み出しノイズの測定値は SUZUKI デュワーで GINSAN デュワーの約 1.24 倍となり、悪化した。チャンネルごとに比較すると、上図から分かるように、GINSAN でもノイズの低いチャンネルは SUZUKI でも比較的低く、ノイズの高いチャンネルは比較的高くなっている。しかし、読み出しノイズのチャンネル内の分布は大きく変化している。下図は、それぞれ読み出しチャンネルを#00–03CH までの範囲で標準偏差フレームを切り取って示したものである。下左の GINSAN では 1 チャンネルごとにノイズの高低が繰り返されている傾向があることが分かる。一方で、下右の SUZUKI ではノイズの高低の繰り返しパターンはあるものの、規則性は異なっている。詳しく見てみると、読み出しチャンネルの幅 64 ピクセルのうち、偶奇チャンネルともに読み出し始めの 36 ピクセルはノイズが高く、後の 28 ピクセルはノイズが低いことが分かった (読み出し方向については図 3.5 を参照) 。この傾向は奇数チャンネルで特に顕著であったため、結果的に奇数チャンネルでノイズが高く、偶数チャンネルでノイズが低い GINSAN の傾向は再現されているものの、その内訳は大きく異なることになる。SUZUKI デュワーでは、各読み出しチャンネルにつき 2 領域、フレーム全体では 64 領域ごとにノイズの性質が異なり、偶奇チャンネルそれぞれについて 36 ピクセル領域と 28 ピクセル領域で合計 4 種類の領域が存在する。また、参照ピクセルを用いてノイズを Fourier 分解し、周波数解析をしたところ、下図のように SUZUKI では GINSAN に見られる 2 つの強いピークがない一方で、高周波数のホワイトノイズ成分が若干強い傾向が見られた。

Suzuki デュワーにおける駆動パラメータの最適化

図 4.5 から分かるように、GINSAN デュワーで最適化した表 3.7 のパラメータ設定では、チャンネルによって読み出しノイズが 30 e^- 近いものもあり、システムの要求性能を満たすことが全くできていない。そのため、表 3.7 の設定にこだわらず、SUZUKI デュワーの試験環境で最も良い性能を示す設定を探した。また、上述のように GINSAN デュ

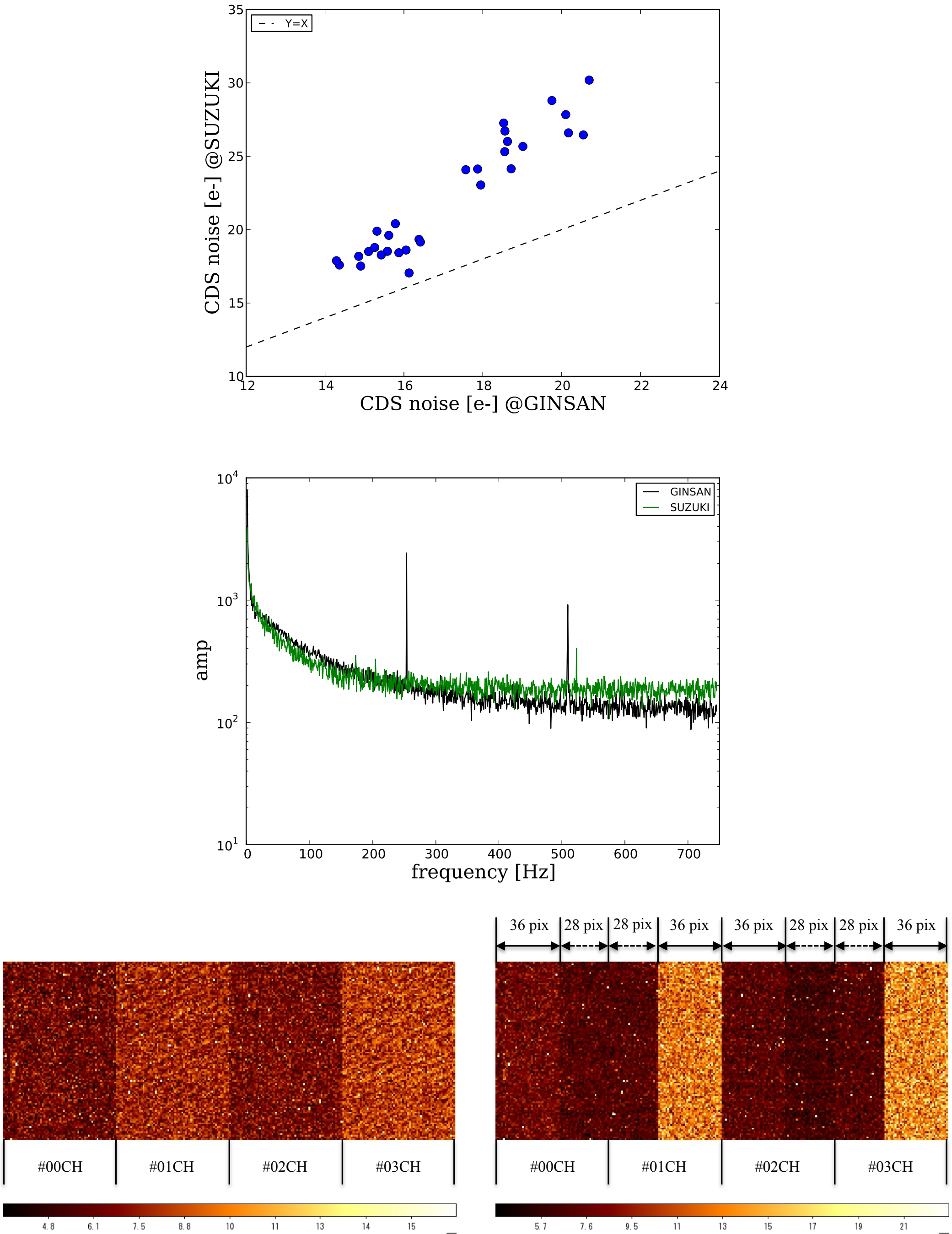


図 4.5: 2 つのデュワーでのノイズ比較。上: 読み出しチャンネルごとの読み出しノイズ比較。横軸が GINSAN デュワー、縦軸が SUZUKI デュワーでの測定データ。斜め破線は横軸=縦軸を表す。中: ノイズの周波数解析。横軸が周波数、縦軸がノイズ強度。黒線が GINSAN デュワー、緑線が SUZUKI デュワーでのデータによるもの。下: 標準偏差フレームの一部。$1 \leq X \leq 256$、$1900 \leq y \leq 2000$、単位は ADU。左が GINSAN デュワー、右が SUZUKI デュワーでの測定データ。

ワーと SUZUKI デュワーとでは明らかにノイズの性質が異なるため、調整の目標として、GINSAN デュワーの性能を再現することにはこだわらないこととした。調整したパラメータは、読み出しクロックモード設定 (Normal Clocking モード・Enhanced Clocking モード) 、Preamp 入力電圧設定 (VrefMain モード・InPCommon モード) ・Vreset・Dsub・Vbiasgate 電圧設定の 5 つである。なお、以降特に記述のないパラメータについては表 3.7 の通りである。

Preamp 入力電圧と読み出しクロックモードを比較する。VrefMain モードでは上記のように VrefMain=1.5543 V とした。InPCommon モードは、SIDECAR 内の参照電圧である Vref1 を既定値の 1.2512 V で固定し、VrefMain をバイアスカウントが 10,000 ADU 程度となるように調整して 1.2004 V とした。これら 2 つの設定それぞれについて、Normal クロックと Enhanced クロックモードでノイズを測定し、比較したものを図 4.6 に示す。まず、Preamp 入力電圧について見ると、VrefMain モードでは上述のように奇数チャンネルで読み出し始めの 36 ピクセル領域が異常に高ノイズとなっている一方で、InPCommon モードではそのように顕著な悪化はない。4 つのプロット中 3 つで VrefMain のほうが低ノイズではあるが、この違いによりアレイ全体の r.m.s. では InPCommon モードのほうが 1 e^- 程度低ノイズとなる。アレイ全体がノイズ的に均一であるほうが望ましいため、これらの結果から SUZUKI デュワーでは InPCommon モードを採用する。また、読み出しクロックモードについて見ると、InPCommon モードでは Enhanced クロックモードのほうが全てのプロットで 1 e^- 程度低ノイズである。よって、Enhanced クロックモードを採用する。

Enhanced クロック・InPCommon モード、とした上で、Vreset と Dsub の電圧設定パラメータを振った。Vreset と Dsub の差分 (0.25 V) は固定とし、値を表 3.7 の Vreset=0.3715 V、Dsub=0.6217 V に対して −0.2 V から +0.3 V まで変化させた。InPCommon モードでは、これらのパラメータ変化ではバイアスカウントは変化しない。なお、Vref1=1.2512 V、VrefMain=1.2004 V で固定とした。このような測定では、とくに有意なノイズ変化はないことが分かった。また、Vbiasgate についても電圧設定パラメータを振ってノイズを測定した。Vbiasgate の設定値に対するバイアスカウントの挙動は単純ではないため、表 4.1 のようなパラメータ設定でノイズを測定した。結果をバイアスカウントに対する依存性の形で図 4.7 に示す。全ての Vbiasgate の設定値、全てのプロットでおおむね一様な傾きでバイアスカウントが大きいほど低ノイズとなっている。バイアスカウントに対するノイズの依存性は Vbiasgate の設定値によらないことが分かる。同じバイアスカウントで見ると、Vbiasgate=1.8513 V の設定が最も読み出しノイズが低くなっており、これは全てのプロットに渡って系統的な結果である。従って、Vbiasgate は 1.8513 V とする設定を採用する。以上から得られた、SUZUKI デュワーで読み出しノイズを最適化する設定を表 4.2 にまとめる。

ノイズの測定結果と考察

表 4.2 設定における SUZUKI デュワーの検出器単独駆動でのノイズ測定値を表 4.3 に示

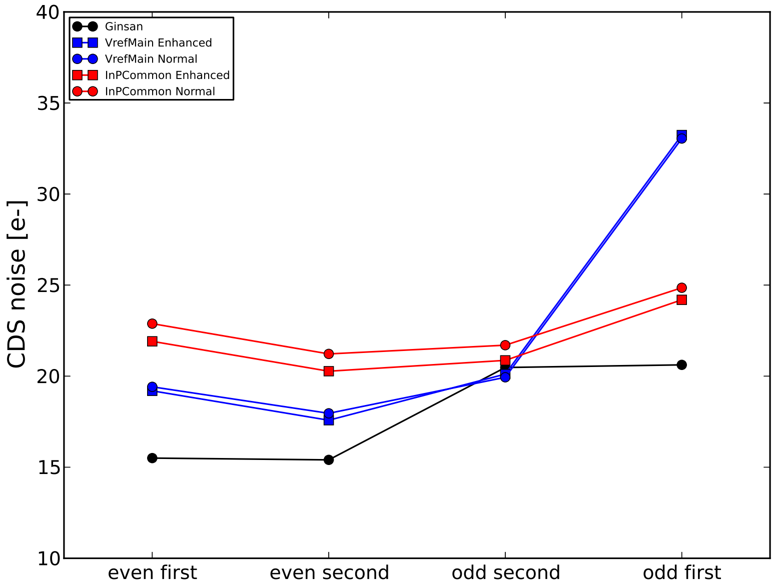


図 4.6: Preamp 入力電圧と読み出しクロックモードの比較。縦軸が CDS 読み出しノイズ、横軸は左から全偶数チャンネルの読み出し始め 36 ピクセルと後の 28 ピクセル、右から全奇数チャンネルの読み出し始め 36 ピクセル、後の 28 ピクセル。各データについて条件に該当する全ピクセルの r.m.s. をプロットした。赤が InPCommon モード、青が VrefMain モードであり、それぞれについて丸点は Normal クロック、四角点は Enhanced クロックである。なお、黒は参考として示した GINSAN デュワーの測定値である。

表 4.1: Vbiasgate･VrefMain のパラメータ設定とバイアスカウントの測定値。ただし、Vref1=1.2512 V で固定とした。

Vbiasgate V	VrefMain V	バイアスカウント ADU
2.0507	1.2004	8.9×10^3
	1.1496	1.4×10^4
	1.1007	1.9×10^4
1.8513	1.2004	4.8×10^3
	1.1593	9.2×10^3
	1.1007	1.5×10^4
1.6519	1.1007	1.4×10^3
	1.0499	6.6×10^3
	1.0010	1.2×10^4

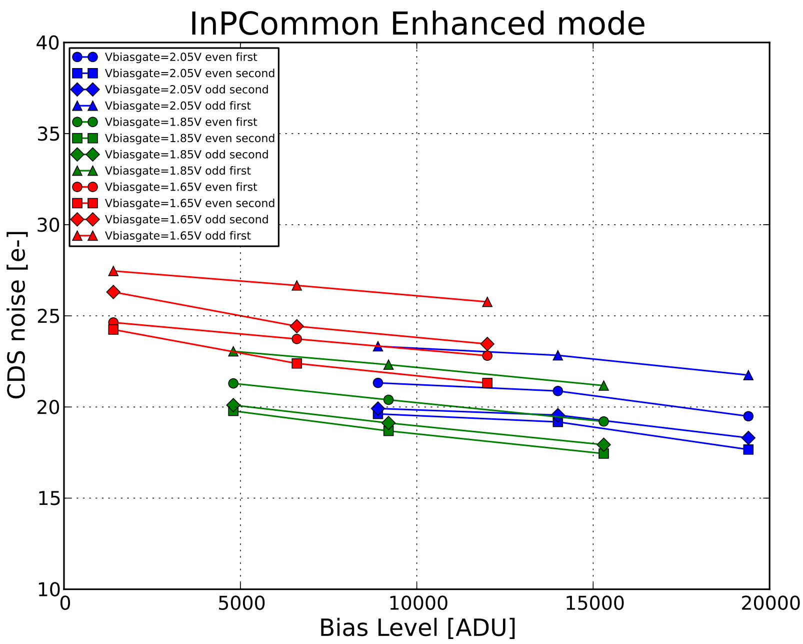


図 4.7: Vbiasgate 設定値ごとの、バイアスカウントに対するノイズの比較。横軸はバイアスカウント、縦軸は読み出しノイズ。青・緑・赤の順に Vbiasgate=2.0507 V・1.8513 V・1.6519 V であり、丸点、横四角点はそれぞれ偶数チャンネルの読み出し初め 36 ピクセルと後の 28 ピクセル。三角点、斜め四角点はそれぞれ奇数チャンネルの読み出し初め 36 ピクセルと後の 28 ピクセル。

表 4.2: 実験的に得られた、SUZUKI デュワーの環境で読み出しノイズを最適化する設定。

パラメータ	設定値
読み出しクロック	Enhanced Clocking モード
Preamp 入力電圧	InPCommon モード
Vreset	0.3715 V
Dsub	0.6217 V
Vref1	1.2512 V
VrefMain	1.1593 V
Vbiasgate	1.8513 V

表 4.3: 表 4.2 設定での読み出しノイズ測定値。単位は e^-。

64 領域の r.m.s.	20.2
偶数チャンネル 36 ピクセル領域の r.m.s.	20.4
偶数チャンネル 28 ピクセル領域の r.m.s.	18.7
奇数チャンネル 28 ピクセル領域の r.m.s.	19.1
奇数チャンネル 36 ピクセル領域の r.m.s.	22.4
64 領域の標準偏差	1.9
64 領域中最大値	26.2
64 領域中最小値	17.0

す。アレイ全体で 20.2 e^- r.m.s. であり、結果的には GINSAN デュワーでのノイズ測定値よりも高い値となっている。この値は 2.3.1 項で示したシステムへの要求性能を満たすことはできていないが、64 領域のうち最大でも 26.2 e^- とアレイ全体でおおむね一様な値となっている。

図 4.8 に、この設定におけるマルチサンプリングでのノイズ測定値を示す。この測定は、アレイ上で $700 \leq X \leq 840$ の、ホットピクセルが少ない一部の領域について、3.4.3 項と同様に領域内カウントの標準偏差から求めた。読み出しノイズは、Nread=16 のときに最小で 8.9 e^- となっている。この結果から、Suzuki デュワーの測定環境でもマルチサンプリングによってノイズを軽減することができ、マルチサンプリングを用いれば 2.3.1 項の読み出しノイズへの要求性能を満たすことができることが分かる。図 3.18 と比較すると、参照ピクセルのほうが全ての Nread でノイズが小さいことは共通であるが、通常ピクセルでは Nread が大きいときにノイズが逆に大きくなる傾向は図 4.8 の結果のほうが顕著になっている。

本節で示したように、デュワーなど、検出器の駆動環境によって最適な駆動パラメータは大きく異なる。SUZUKI デュワーの駆動環境は SWIMS 本体を模したものではあるが、SWIMS では冷凍機やフィルターホイール、MOSU などのコンポーネントがあり、完全に同じ駆動環境は再現できない。そのため、検出器システムを SWIMS デュワーに搭載しての駆動に際しても、本節のようなパラメータ調整は必要となってくると考えられる。本節では、調整するパラメータの選択、調整方針などに関して参考とすべき結果を示すことができたと言える。

4.3　検出器同時駆動でのノイズ性能

SWIMS の検出器読み出しシステムとしては、検出器を複数台同時に駆動したときのノイズ性能も重要である。本研究では、SUZUKI デュワーを用いて、すばる望遠鏡搭載時の Red Arm または Blue Arm いずれか片方ぶんに当たる HAWAII-2RG 2 台の同時駆動試験

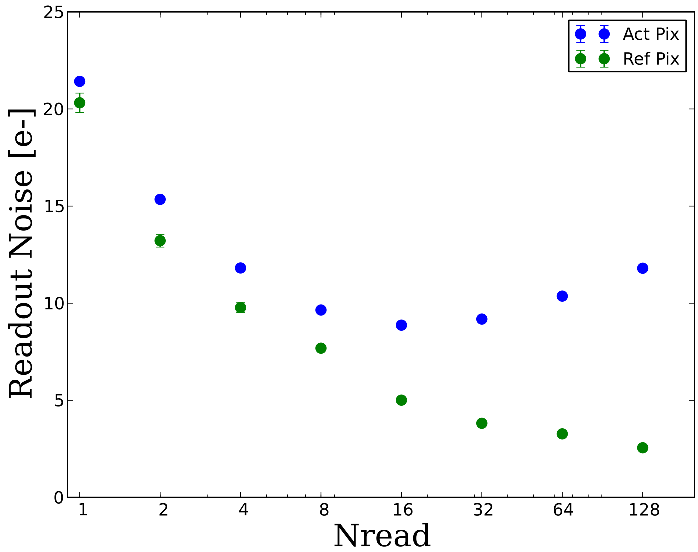


図 4.8: Suzuki デュワーでの Fowler サンプリングにおける、マルチサンプリングと読み出しノイズの関係。青点は通常のピクセル、緑点は参照ピクセルについてプロットした。エラーバーは測定値の統計的不確かさを表す。

を行った。

測定結果

図 4.9 に、OKI ケーブルを使用した場合の CDS 画像と、比較として TIS ケーブルを使用した場合の CDS 画像を示す。OKI ケーブルを使用した場合、明らかに短周期 (1 フレームで ~ 5.5 周期なので、~ 4 Hz 相当) のノイズがフレーム全体に卓越しており、非常に高ノイズとなっていることが分かる。一方、TIS ケーブルを使用した場合も、フレーム全体ではないものの、読み出しチャンネルごとに同様の短周期ノイズ成分が確認できる。このように、SIDECAR と JADE2 間のケーブルによってノイズの挙動が大きく異なることから、同時駆動の場合は 2 台の検出器間にフラットケーブルを通じて何らかの干渉が起きていることが示唆される。これを確認するため、OKI ケーブルをアルミ箔で電磁遮蔽したケーブルを用意し、同じく同時駆動試験を行った。図 4.10 上にケーブルの遮蔽加工のようすを示す。なお、試験にあたってはケーブルの遮蔽アルミはデュワー筐体に導通させた。その結果、遮蔽加工をした OKI ケーブルではフレームの一部にのみ短周期ノイズ成分が現れ、TIS ケーブルとほぼ同じ結果となった。図 4.10 下に 3 種類のケーブルによる同時駆動試験のノイズ周波数解析を示す。この図からも、遮蔽加工をした OKI ケーブルと TIS ケーブルはおおむね同じ成分をもつ一方で、OKI ケーブルでは 0 – 100 Hz の周波数成分に明らかな卓越があることが確認できる。これらの結果から、OKI ケーブルではケーブル間に何らかの干渉が起きていることが確認された。

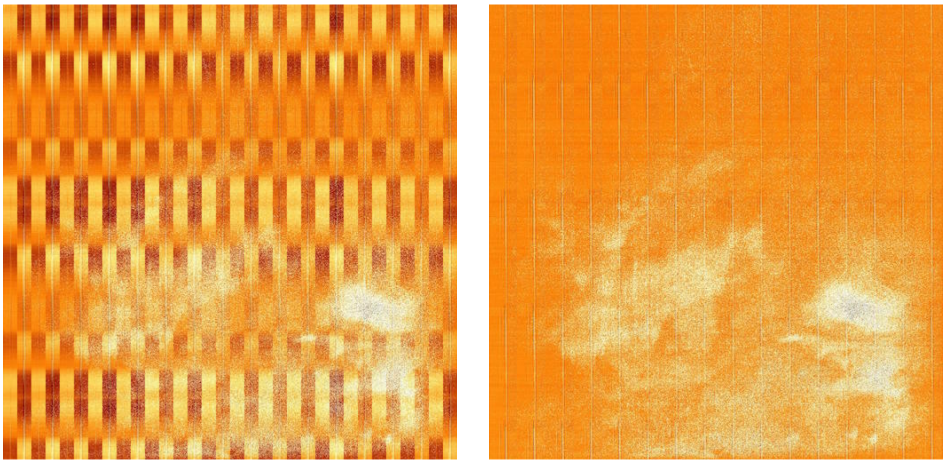
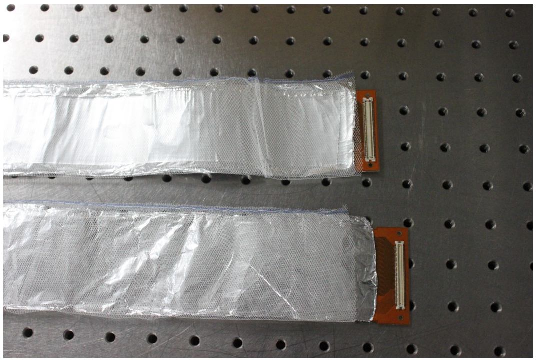


図 4.9: 同時駆動試験で得られた CDS 画像の比較。左: OKI ケーブルを用いたもの。右: TIS ケーブルを用いたもの。

OKI ケーブルでの結果とは異なりアレイ全体には現れていないが、TIS ケーブル、遮蔽加工をした OKI ケーブルともにチャンネルごとに短周期のノイズ成分は残っている。このノイズ成分は、各読み出しチャンネルで読み出しタイミングの同じ縦列に現れ、また CDS 画像ごとにパターンは異なるという特徴がある。CDS 画像ごとにパターンが異なることは、読み出しごとに別の検出器との相対的な読み出しタイミングが異なることに由来すると考えられる。表 4.4 に単独駆動と同様に CDS 画像 20 枚の標準偏差フレームから評価した読み出しノイズの測定値を示す。この測定値は、干渉パターンの乗っているピクセルも含めて各領域全体の r.m.s. から求めた。表 4.3 と比較してアレイ全体の r.m.s. では 4 e^- 程度の悪化となっているが、干渉パターンのある縦列ではより高ノイズとなることに注意が必要である。ただし、マルチサンプリングを利用すれば平均化によりパターンの影響は小さくなっていき、図 4.8 と同様にノイズは軽減されて Nread=32 で 10 e^- となることが確認できている。従って、マルチサンプリングを利用すれば、検出器 2 台同時駆動の場合でも 2.3.1 項の読み出しノイズ要求性能を満たすことができる。

考察

使用する SIDECAR と JADE2 間のケーブルによって干渉の程度が大きく異なる原因は、ケーブルの設計にあると考えられる。いずれのケーブルもピンアサインは同一で、140 ピンを通している。ケーブルに通っているラインには大きく分けて 2 種類あり、電源線と信号線である。OKI ケーブルでは、2 層構造とし、さらに、ラインの断面積を電源線は信号線の 2 倍程度とした。この構造ではケーブル間に干渉が生じ、遮蔽によって改善したことから、少なくとも電源線には何らかの干渉対策が必要であると考えられる。対策としては、アナログ電源はアナロググラウンドで挟み込み、デジタル電源はデジタルグラウンドで挟み込む設計が有効であると思われる。ラインの断面積についても、ケーブル長が 1.5 m と長いこともあり再考の余地があり、電源の大きさに応じて出来る限り大きい断面積を確保



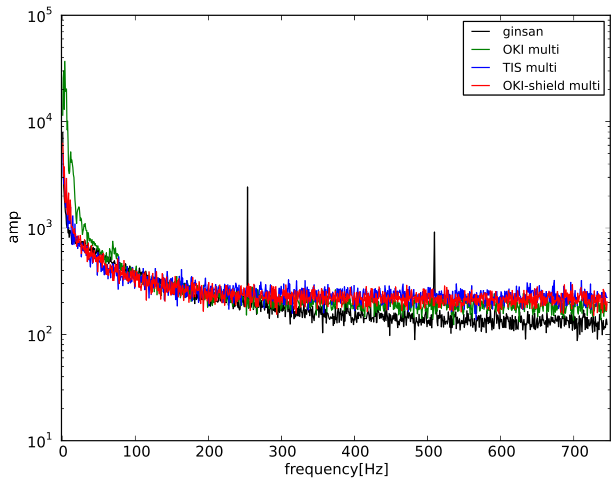


図 4.10: 上: OKI ケーブルに遮蔽を施したもの。アルミ箔を 4 重に巻き、断熱層で覆う構造となっている。下: 3 種類のケーブルによる同時駆動試験のノイズ周波数解析。横軸が周波数、縦軸がノイズ強度。緑線が OKI ケーブル、青線が TIS ケーブル、赤線が遮蔽加工をした OKI ケーブル。黒線は参考として GINSAN 試験での検出器単独駆動データである。

表 4.4: 表 4.2 設定、検出器 2 台同時駆動試験での読み出しノイズ測定値。遮蔽加工を施したケーブルを使用した場合。単位は e^-。

64 領域の r.m.s.	24.4
偶数チャンネル 36 ピクセル領域の r.m.s.	28.0
偶数チャンネル 28 ピクセル領域の r.m.s.	23.1
奇数チャンネル 28 ピクセル領域の r.m.s.	21.4
奇数チャンネル 36 ピクセル領域の r.m.s.	25.0
64 領域の標準偏差	2.8
64 領域中最大値	29.8
64 領域中最小値	20.5

する必要があると思われる。

遮蔽加工を施したケーブルでも干渉パターンが残っており、完全には除けていない。干渉パターンは実際の観測にも大きく影響すると考えられるため、読み出しシステムとしては対策が必要である。まず、ケーブルでの干渉が遮蔽だけでは完全に除けていない可能性が残っているため、上述のような干渉対策をした新しいケーブルを早急に設計・製作して試験する必要がある。他にも、ケーブル以外で干渉が生じうる箇所については試験を行って干渉の有無を確かめる必要がある。本研究で行った試験は、次の 2 通りである。

- 検出器ごとに別の直流安定化電源を使用した実験
  直流安定化電源でのノイズ混入を疑って実施したが、干渉のようすに変化はなかったため、電源由来の干渉ではないことが分かった。
- JADE2 をデュワー筐体から電気的に絶縁した試験
  干渉のようすに変化は見られず、JADE2 の基盤グラウンドが筐体に導通していることによる干渉はないことが分かった。

他に干渉の原因として考えられるのは、SIDECAR、HAWAII-2RG の基板グラウンドがデュワー筐体や検出器カセットを通じて導通していることと、SIDECAR 間の電磁的な干渉である。前者については、各電気回路の設計はブラックボックスであるため詳細は不明であるが、基板グラウンドが導通していることで干渉を受ける可能性は否定できない。後者については、SIDECAR ではデジタル信号の処理をしており、同時駆動のタイミングがズレていることから、互いに電磁的な影響を与えている可能性が考えられる。対策としては、SIDECAR を完全に遮蔽してしまう方法が考えられる。これらの要因についても試験を行い、干渉パターンの対策法を探る予定である。

第5章　総括

5.1　本研究の成果

本研究は、天文センターで開発中の近赤外多天体分光カメラ SWIMS の検出器周辺のシステムを開発し、その性能を評価することを目的として行われた。その成果は次の通りである。

- 検出器読み出しシステムの開発 (第 2 章)
HAWAII-2RG と専用の読み出し回路を統合し、SWIMS に組み込んで駆動するための検出器読み出しシステムを開発した。開発したシステムを利用して、HAWAII-2RG 複数台の同時駆動に成功した。

- 検出器単体の性能評価 (第 3 章)
HAWAII-2RG を 1 台ずつ駆動し、駆動パラメータの最適化を行った上でその基本的な性能を評価した。ADU-エレクトロン変換係数、読み出しノイズ、暗電流、線形性の評価に成功した。これらの評価結果の概略は表 5.1 に示す。検出器単体としては、読み出しシステムに求められる要求性能を十分に達成できることが分かった。

- 検出器読み出しシステムの性能評価 (第 4 章)
専用の実験用デュワーを開発し、SWIMS での駆動を模した環境で検出器読み出しシステムとしての性能を評価した。HAWAII-2RG の駆動パラメータは駆動環境に応じて最適化すべきであること、その結果得られた読み出しノイズ性能を示した。また、HAWAII-2RG 2 台の同時駆動でのノイズ性能を示した。これらのノイズ性能評価結果の概略は表 5.2 に示す。検出器読み出しシステムに求められるノイズ性能は、マルチサンプリングを利用すれば十分に達成可能であることが分かったが、検出器 2 台の同時駆動では干渉パターンが現れることが明らかになった。

これらの成果により、SWIMS の心臓部である検出器をシステムとして駆動し、読み出すことが可能になった。開発した検出器読み出しシステムは、科学的な目的から求められる性能を満たすことができることを示した。また、検出器単体としての性能と検出器システムとしての性能を明らかにしたことで、今後の検出器読み出しシステムの SWIMS への組み込み作業時に向けての指針を示し、その際の駆動パラメータ調整の必要性とその具体的な内容を示すことができた。さらに、これらの知見は、HAWAII-2RG を用いる光赤外天文学の他観測装置の今後の開発研究にも大いに資するものである。

表 5.1: 検出器単体の性能評価結果の概略。

読み出し速度	1.48 sec/frame
ADU-エレクトロン変換係数	~ 2.3 e$^-$/ADU
Inter-Pixel Capacitance によるクロストーク	$\sim 1.3\%$
CDS 読み出しノイズ	~ 16 e$^-$
マルチサンプリングでの読み出しノイズ	~ 4 e$^-$ (Nread=32)
暗電流	$\lesssim 0.1$ e$^-$/sec/pix
線形性 (線形応答からのズレ)	ウェルの $\sim 40\%$ で $\sim 5\%$

表 5.2: 検出器読み出しシステムのノイズ性能評価結果の概略。単位は e$^-$。

		単独駆動	同時駆動
CDS 読み出しノイズ	r.m.s.	20.2	24.4
	最大値	26.2	29.8
	最小値	17.0	20.5
マルチサンプリングでの読み出しノイズ		8.9 (Nread=16)	10 (Nread=32)

5.2　今後の展望

SWIMS は 2015 年度中には光学調整などを完了して東京都三鷹市の天文センターでの開発を終了し、すばる望遠鏡へ持ち込むために移送を開始する予定である。検出器読み出しシステムとしては、HAWAII-2RG と周辺回路など、各システムコンポーネントを SWIMS デュワーへ組み込む作業の必要がある。システムを組み込んでの駆動試験では、動作確認だけでなく、読み出しノイズなどの性能を評価しつつ HAWAII-2RG の駆動パラメータの調整を行う必要がある。調整においては、パラメータの選択、調整方針など本研究で得られた知見が参考になると思われる。こうした中で、本研究中で示された検出器読み出しシステムの問題点を解消していく必要がある。特に、検出器システムとしての検出器同時駆動時に見られた干渉パターンについては今後の対策が必要である。

すばる望遠鏡での観測に向けては、ソフトウエアの統合作業が必要である。検出器読み出しシステムのソフトウエアを完全に SWIMS 全体のソフトウェアシステム ICS に組み込み、すばる望遠鏡のソフトウェアシステム OCS とのインターフェースマッチングをしていく。これらの作業により、SWIMS の検出器読み出しシステムは完成し、科学的な目的のための観測が可能となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の本原顕太郎准教授には、非常に適切な助言と丁寧かつ熱心な指導をいただきました。ここに深く感謝します。検出器の読み出し回路については、酒向重行助教に有用な助言をいただきました。ありがとうございました。

SWIMS 開発チームの小西真広氏、高橋英則氏、加藤夏子氏には本研究における様々な場面で助力いただきました。小西氏には特に検出器の扱いとソフトウエアについて多くの助言をいただき、高橋氏には特に実験上必要な様々な製品を製作いただきました。ここに感謝いたします。

本原研究室の舘内謙氏、北川祐太朗氏、小早川大氏には同じ学生として近い立場から様々な助言をいただき、多くの議論をさせていただきました。特に館内氏には多くの開発項目だけでなく、評価試験についても非常に多くの場面で助力いただきました。大変感謝しています。ありがとうございました。

天文センターの橋場康人氏には、すばる望遠鏡/MOIRCS の検出器アップグレード作業での経験から、検出器評価について大変有用な助言をいただきました。ありがとうございました。

本研究は、国立天文台・先端技術センターとの共同開発研究としてなされたものであり、先端技術センターからは冷却実験に必要な液体窒素を提供いただいたほか、各種の加工機械を使用させていただきました。ここに感謝いたします。

本研究の拠点となった天文センターの大型実験棟では、MIMIZUKU 開発チーム、Tomo-e 開発チームのみなさまに日常的に大変お世話になりました。ここに感謝いたします。また、天文センターの教職員・大学院生のみなさまにも様々な場面でお世話になりました。ありがとうございました。

私がこの 2 年間安定した環境で研究に専念し、本論文を書き上げることができたのは、ひとえに妻の理解と支援のおかげです。私の研究生活を全面的に支え、励ましてくれた妻に心から感謝します。

参考文献

Blank, R., S. Anglin, J. W. Beletic, S. Bhargava, R. Bradley, C. A. Cabelli, J. Chen, D. Cooper, R. Demers, M. Eads, M. Farris, W. Lavelle, G. Luppino, E. Moore, E. Piquette, R. Ricardo, M. Xu and M. Zandian (2012) 'H2RG focal plane array and camera performance update.' In 'Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series,' vol. 8453 of *SPIE Conference Series* p. 10

Caputi, K. I., G. Lagache, L. Yan, H. Dole, N. Bavouzet, E. Le Floc'h, P. I. Choi, G. Helou and N. Reddy (2007) 'The Infrared Luminosity Function of Galaxies at Redshifts $z = 1$ and $z \sim 2$ in the GOODS Fields.' *ApJ* 660, 97–116

Caputi, K. I., K. Kovač, M. Bolzonella, S. J. Lilly, G. Zamorani, H. Aussel, D. Sanders, S. Bardelli, A. Bongiorno, T. Contini, G. Coppa, O. Cucciati, S. de la Torre, L. de Ravel, P. Franzetti, D. Frayer, B. Garilli, A. Iovino, P. Kampczyk, J.-P. Kneib, C. Knobel, F. Lamareille, J. F. Le Borgne, V. Le Brun, O. Le Fèvre, E. Le Floc'h, A. Leauthaud, C. Maier, V. Mainieri, M. Mignoli, R. Pellò, Y. Peng, E. Pérez-Montero, E. Ricciardelli, M. Salvato, M. Scodeggio, N. Scoville, J. Silverman, J. Surace, M. Tanaka, L. Tasca, L. Tresse, D. Vergani, E. Zucca, U. Abbas, D. Bottini, P. Capak, A. Cappi, C. M. Carollo, P. Cassata, A. Cimatti, M. Fumana, O. Ilbert, J. Kartaltepe, D. Maccagni, C. Marinoni, H. McCracken, P. Memeo, B. Meneux, P. Oesch, C. Porciani, L. Pozzetti, A. Renzini, R. Scaramella and C. Scarlata (2009) 'The Close Environment of 24 μm Galaxies at $0.6 < z < 1.0$ in the Cosmos Field.' *ApJ* 691, 91–97

Chen, J., M. Loose, R. Ricardo, J. Beletic, M. Farris, M. Xu, A. Wong and C. Cabelli (2014) 'SIDECAR ASIC firmware for astronomy applications.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9154 of *SPIE Conference Series* p. 26

Crouzet, P. E. (2009) 'The new Teledyne NIR detectors for the SNAP/JDEM mission spectrograph.' *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 610, 135–137

Crouzet, P.-E., J. ter Haar, F. de Wit, T. Beaufort, B. Butler, H. Smit, C. van der Luijt and D. Martin (2012) 'Characterization of HAWAII-2RG detector and SIDECAR ASIC for the Euclid mission at ESA.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 8453 of *SPIE Conference Series* p. 1

Dorn, R. J., S. Eschbaumer, D. N. B. Hall, G. Finger, L. Mehrgan, M. Meyer and J. Stegmeier (2008) 'Evaluation of the Teledyne SIDECAR ASIC at cryogenic temperature using a visible hybrid H2RG focal plane array in 32 channel readout mode.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 7021 of *SPIE Conference Series* p. 0

Finger, G., J. Garnett, N. Bezawada, R. Dorn, L. Mehrgan, M. Meyer, A. Moorwood, J. Stegmeier and G. Woodhouse (2006) 'Performance evaluation and calibration issues of large format infrared hybrid active pixel sensors used for ground- and space-based astronomy.' *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 565, 241–250

Förster Schreiber, N. M., R. Genzel, N. Bouché, G. Cresci, R. Davies, P. Buschkamp, K. Shapiro, L. J. Tacconi, E. K. S. Hicks, S. Genel, A. E. Shapley, D. K. Erb, C. C. Steidel, D. Lutz, F. Eisenhauer, S. Gillessen, A. Sternberg, A. Renzini, A. Cimatti, E. Daddi, J. Kurk, S. Lilly, X. Kong, M. D. Lehnert, N. Nesvadba, A. Verma, H. McCracken, N. Arimoto, M. Mignoli and M. Onodera (2009) 'The SINS Survey: SINFONI Integral Field Spectroscopy of $z \sim 2$ Star-forming Galaxies.' *ApJ* 706, 1364–1428

Fowler, A. M. and I. Gatley (1990) 'Demonstration of an algorithm for read-noise reduction in infrared arrays.' *ApJL* 353, L33

Fox, O., A. Waczynski, Y. Wen, R. D. Foltz, R. J. Hill, R. A. Kimble, E. Malumuth and B. J. Rauscher (2008) 'The ^{55}Fe x-ray energy response of mercury cadmium telluride near-infrared detector arrays.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 7021 of *SPIE Conference Series* p. 23

— (2009) 'The Fe 55 X-Ray Energy Response of Mercury Cadmium Telluride Near-Infrared Detector Arrays.' *PASP* 121, 743–754

Garnett, J. D. and W. J. Forrest (1993) 'Multiply sampled read-limited and background-limited noise performance.' In *Infrared Detectors and Instrumentation,* ed. A. M. Fowler, vol. 1946 of *SPIE Conference Series* pp. 395–404

Genzel, R., S. Newman, T. Jones, N. M. Förster Schreiber, K. Shapiro, S. Genel, S. J. Lilly, A. Renzini, L. J. Tacconi, N. Bouché, A. Burkert, G. Cresci, P. Buschkamp, C. M. Carollo, D. Ceverino, R. Davies, A. Dekel, F. Eisenhauer, E. Hicks, J. Kurk, D. Lutz, C. Mancini, T. Naab, Y. Peng, A. Sternberg, D. Vergani and G. Zamorani (2011) 'The Sins Survey of $z \sim 2$ Galaxy Kinematics: Properties of the Giant Star-forming Clumps.' *ApJ* 733, 101

Hopkins, A. M. and J. F. Beacom (2006) 'On the Normalization of the Cosmic Star Formation History.' *ApJ* 651, 142–154

Iwamuro, F., K. Motohara, T. Maihara, R. Hata and T. Harashima (2001) 'OHS: OH-Airglow Suppressor for the Subaru Telescope.' *PASJ* 53, 355–360

Janesick, J. R., K. P. Klaasen and T. Elliott (1987) 'Charge-Coupled-Device Charge-Collection Efficiency And The Photon-Transfer Technique.' *Optical Engineering* 26, 972

Jeong, U., M.-Y. Chun, J. S. Oh, C. Park, I.-S. Yuk, H. Oh, K.-M. Kim, K. Y. Ko, M. D. Pavel, Y. S. Yu and D. T. Jaffe (2014) 'Characterization and optimization for detector systems of IGRINS.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9154 of *SPIE Conference Series* p. 1

Kajisawa, M., T. Ichikawa, I. Tanaka, M. Konishi, T. Yamada, M. Akiyama, R. Suzuki, C. Tokoku, Y. K. Uchimoto, T. Yoshikawa, M. Ouchi, I. Iwata, T. Hamana and M. Onodera (2009) 'MOIRCS Deep Survey. IV. Evolution of Galaxy Stellar Mass Function Back to $z \sim 3$.' *ApJ* 702, 1393–1412

Kewley, L. J., C. Maier, K. Yabe, K. Ohta, M. Akiyama, M. A. Dopita and T. Yuan (2013a) 'The Cosmic BPT Diagram: Confronting Theory with Observations.' *ApJL* 774, L10

Kewley, L. J., M. A. Dopita, C. Leitherer, R. Davé, T. Yuan, M. Allen, B. Groves and R. Sutherland (2013b) 'Theoretical Evolution of Optical Strong Lines across Cosmic Time.' *ApJ* 774, 100

Kitagawa, Y., S. Ozaki, K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, K. Tateuchi, S. Todo, N. Kato and T. Yoshikawa (2014) 'Concept and optical design of the near-infrared integral field unit for SWIMS.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9151 of *SPIE Conference Series* p. 4

Klein, C. R., P. Kubánek, N. R. Butler, O. D. Fox, A. S. Kutyrev, D. A. Rapchun, J. S. Bloom, A. Farah, N. Gehrels, L. Georgiev, J. J. González, W. H. Lee, G. N. Lotkin, S. H. Moseley, J. X. Prochaska, E. Ramirez-Ruiz, M. G. Richer, F. D. Robinson, C. Román-Zúñiga, M. V. Samuel, L. M. Sparr, C. Tucker and A. M. Watson (2012) 'Software solution for autonomous observations with H2RG detectors and SIDECAR ASICs for the RATIR camera.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 8453 of *SPIE Conference Series* p. 2

Konishi, M., K. Motohara, H. Takahashi, K. Tateuchi, Y. Kitagawa, N. Kato, T. Aoki, M. Doi, T. Handa, T. Kamizuka, K. Kawara, K. Kohno, S. Koshida, T. Minezaki, T. Miyata, T. Morokuma, S. Sako, T. Soyano, Y. Tamura, T. Tanabe, M. Tanaka, K. Tarusawa and Y. Yoshii (2012) 'Design and development of SWIMS: a near-infrared multi-object spectrograph for the University of Tokyo Atacama Observatory.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 8446 of *SPIE Conference Series* p. 7

Konishi, M., K. Motohara, K. Tateuchi, H. Takahashi, Y. Kitagawa, N. Kato, S. Sako, Y. K. Uchimoto, K. Toshikawa, R. Ohsawa, T. Yamamuro, K. Asano, Y. Ita, T. Kamizuka, S. Komugi, S. Koshida, S. Manabe, N. Matsunaga, T. Minezaki, T. Morokuma, A. Nakashima, T. Takagi, T. Tanabe, M. Uchiyama, T. Aoki, M. Doi, T. Handa, D. Kato, K. Kawara, K. Kohno, T. Miyata, T. Nakamura, K. Okadda, T. Soyano, Y. Tamura, M. Tanaka, K. Tarusawa and Y. Yoshii (2015) 'ANIR : Atacama Near-Infrared Camera for the 1.0-m miniTAO Telescope.' (in press)

Mannucci, F., G. Cresci, R. Maiolino, A. Marconi and A. Gnerucci (2010) 'A fundamental relation between mass, star formation rate and metallicity in local and high-redshift galaxies.' *MNRAS* 408, 2115–2127

McLean, I. S. (2008) *Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation (Second Edition)* (Praxis Publishing)

Moore, A. C., Z. Ninkov and W. J. Forrest (2004) 'Interpixel capacitance in nondestructive focal plane arrays.' In *Focal Plane Arrays for Space Telescopes,* ed. T. J. Grycewicz and C. R. McCreight, vol. 5167 of *SPIE Conference Series* pp. 204–215

_ (2006) 'Quantum efficiency overestimation and deterministic cross talk resulting from interpixel capacitance.' *Optical Engineering* 45(7), 076402

Motohara, K., M. Konishi, H. Takahashi, K. Tateuchi, Y. Kitagawa, S. Todo, N. M. Kato, R. Ohsawa, T. Aoki, K. Asano, M. Doi, T. Kamizuka, K. Kawara, K. Kohno, S. Koshida, T. Minezaki, T. Miyata, T. Morokuma, K. Okada, S. Sako, T. Soyano, Y. Tamura, T. Tanabe, M. Tanaka, K. Tarusawa, M. Uchiyama and Y. Yoshii (2014) 'Development of a simultaneous two-color near-infrared multi-object spectrograph SWIMS for the TAO 6.5-m telescope.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9147 of *SPIE Conference Series* p. 6

Nakajima, K. and M. Ouchi (2014) 'Ionization state of inter-stellar medium in galaxies: evolution, SFR-M_*-Z dependence, and ionizing photon escape.' *MNRAS* 442, 900–916

Rauscher, B. J., C. Stahle, R. J. Hill, M. Greenhouse, J. Beletic, S. Babu, P. Blake, K. Cleveland, E. Cofie, B. Eegholm, C. W. Engelbracht, D. N. B. Hall, A. Hoffman, B. Jeffers, C. Jhabvala, R. A. Kimble, S. Kohn, R. Kopp, D. Lee, H. Leidecker, D. Lindler, R. E. McMurray, K. Misselt, D. B. Mott, R. Ohl, J. L. Pipher, E. Piquette, D. Polis, J. Pontius, M. Rieke, R. Smith, W. E. Tennant, L. Wang, Y. Wen,

C. N. A. Willmer and M. Zandian (2012) 'Commentary: JWST near-infrared detector degradation— finding the problem, fixing the problem, and moving forward.' *AIP Advances* 2(2), 021901

Rauscher, B. J., O. Fox, P. Ferruit, R. J. Hill, A. Waczynski, Y. Wen, W. Xia-Serafino, B. Mott, D. Alexander, C. K. Brambora, R. Derro, C. Engler, M. B. Garrison, T. Johnson, S. S. Manthripragada, J. M. Marsh, C. Marshall, R. J. Martineau, K. B. Shakoorzadeh, D. Wilson, W. D. Roher, M. Smith, C. Cabelli, J. Garnett, M. Loose, S. Wong-Anglin, M. Zandian, E. Cheng, T. Ellis, B. Howe, M. Jurado, G. Lee, J. Nieznanski, P. Wallis, J. York, M. W. Regan, D. N. B. Hall, K. W. Hodapp, T. Böker, G. De Marchi, P. Jakobsen and P. Strada (2007) 'Detectors for the James Webb Space Telescope Near-Infrared Spectrograph. I. Readout Mode, Noise Model, and Calibration Considerations.' *PASP* 119, 768–786

Smith, E. C., B. J. Rauscher, D. Alexander, B. L. Clemons, C. Engler, M. B. Garrison, R. J. Hill, T. Johnson, D. J. Lindler, S. s. Manthripragada, C. Marshall, B. Mott, T. M. Parr, W. D. Roher, K. B. Shakoorzadeh, R. Schnurr, A. Waczynski, Y. Wen, D. Wilson, M. Loose, G. Bagnasco, T. Böker, G. De Marchi, P. Ferruit, P. Jakobsen and P. Strada (2009) 'JWST near infrared detectors: latest test results.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 7419 of *SPIE Conference Series* p. 7

Steidel, C. C., G. C. Rudie, A. L. Strom, M. Pettini, N. A. Reddy, A. E. Shapley, R. F. Trainor, D. K. Erb, M. L. Turner, N. P. Konidaris, K. R. Kulas, G. Mace, K. Matthews and I. S. McLean (2014) 'Strong Nebular Line Ratios in the Spectra of $z \sim 2$–3 Star Forming Galaxies: First Results from KBSS-MOSFIRE.' *ApJ* 795, 165

Takahashi, H., M. Konishi, K. Motohara, N. M. Kato, K. Tateuchi, Y. Kitagawa and S. Todo (2014) 'Development of multi-object spectroscopy unit for simultaneous-color wide-field infrared multi-object spectrograph.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9147 of *SPIE Conference Series* p. 6

Tateuchi, K., M. Konishi, K. Motohara, H. Takahashi, N. Mitani Kato, Y. Kitagawa, S. Todo, K. Toshikawa, S. Sako, Y. K. Uchimoto, R. Ohsawa, K. Asano, Y. Ita, T. Kamizuka, S. Komugi, S. Koshida, S. Manabe, T. Nakamura, A. Nakashima, K. Okada, T. Takagi, T. Tanabé, M. Uchiyama, T. Aoki, M. Doi, T. Handa, K. Kawara, K. Kohno, T. Minezaki, T. Miyata, T. Morokuma, T. Soyano, Y. Tamura, M. Tanaka, K. Tarusawa and Y. Yoshii (2014) 'Ground-based Paα Narrow-band Imaging of Local Luminous Infrared Galaxies I: Star Formation Rates and Surface Densities.' *ArXiv e-prints*

Todo, S., K. Tateuchi, K. Motohara, M. Konishi, H. Takahashi, Y. Kitagawa and N. M. Kato (2014) 'Optimization and performance of H2RG detectors and SIDECAR ASICs for SWIMS.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 9154 of *SPIE Conference Series* p. 1

Vacca, W. D., M. C. Cushing and J. T. Rayner (2004) 'Nonlinearity Corrections and Statistical Uncertainties Associated with Near-Infrared Arrays.' *PASP* 116, 352–361

Yoshii, Y., M. Doi, T. Handa, K. Kawara, K. Kohno, T. Minezaki, K. Mitsuda, T. Miyata, K. Motohara and M. Tanaka (2002) 'Tokyo Atacama Observatory Project.' In *8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II,* ed. S. Ikeuchi, J. Hearnshaw and T. Hanawa pp. 35–36

Yoshii, Y., T. Aoki, M. Doi, T. Handa, K. Kawara, D. Kato, K. Kohno, M. Konishi, S. Koshida, T. Minezaki, N. Mitani, T. Miyata, K. Motohara, S. Sako, T. Soyano, T. Tanabe, M. Tanaka, K. Tarusawa, L. Bronfman, M. T. Ruiz and M. Hamuy (2010) 'The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m telescope project.' In 'SPIE Conference Series,' vol. 7733 of *SPIE Conference Series* p. 8

岡村, 廸夫 (1990) 解析 *ノイズ・メカニズム,* 4th ed. (CQ 出版社)

天野, 俊之 (1993) 'Thermal Performance of Multilayer Insulation. 1st Report. Derivation of a Prediction-Based Heat-Flux Equation.' 日本機械学会論文集 *B* 編 59(563), 2142–2149