東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 修士論文

# 近赤外線2色同時多天体分光撮像装置 SWIMSの検出器システム開発

**学籍番号** 35-156126

寺尾恭範

指導教員 本原顕太郎 准教授

2017年1月

# Abstract

様々な時代における銀河の星形成の活発さやフィードバックの影響度合いを明らかにす るには、銀河の星質量関数を測定してその時間進化を追うことが重要である。遠方銀河の赤 方偏移は一般に複数のフィルターの撮像データを用いて決定される(測光赤方偏移)。測光 赤方偏移を精度よく決定するためにはスペクトルのブレークを捉えることが重要であるが、 従来の広帯域フィルターを用いた観測では不定性が大きい。近赤外線2色同時多天体分光 撮像装置 SWIMS (Simultaneously-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) はJ、H、Kバンドを分割した中間帯域フィルターを搭載することで遠方銀河のバルマーブ レークを捉え、測光赤方偏移を精度よく決定することが可能である。本研究ではSWIMS の検出器システムを開発し、その性能を評価した。

SWIMS は計4台のHAWAII-2RG 検出器を搭載しており、広視野を実現するためにこ れらの検出器を同時に駆動する必要がある。ソケット通信とマルチスレッドを用いて、複 数の検出器ソフトウェアに同時にコマンドを送るシステムを開発した。これにより、装置 全体を制御する1台のリモートホストから複数の検出器にコマンドを送り、同時に制御す ることが可能となった。

複数台の検出器を同時に駆動すると、単独駆動時よりもノイズが増加することが判明した。この原因は読み出し回路の接続に使用するケーブル間の干渉であり、ケーブルにシールド加工を施すことで改善した。読み出し回数を4回以上にしたマルチサンプリングを行うことで、SWIMSの読み出しノイズへの要求性能である14.5 e<sup>-</sup> r.m.s. を達成できることを確認した。その他暗電流、ADU-エレクトロン変換係数の評価を行い、光入射後画像に見られる残像についてその振る舞いを調査した。

また、HAWAII-2RG 検出器の主なサンプリング手法である Fowler サンプリングと Ramp サンプリングについて、出力された画像から解析用の画像を生成するソフトウェアを開発 した。Fowler サンプリングの場合は差分画像、Ramp サンプリングの場合は単位時間当た りのカウントを値に持つ画像が生成される。Fowler サンプリングの場合のみ検出器ソフト ウェアが自動で解析用画像を生成するが、これと比較することでどちらの場合も妥当な画 像が生成できていることを確認した。

本研究により、複数台の検出器を同時に駆動することが可能となり、さらにそれを装置 全体のシステムに統合して十分低い読み出しノイズを達成することができた。また、解析 用画像を生成するソフトウェアを開発したことにより Ramp サンプリングによる観測とい う選択肢を追加することができ、2018年の試験観測に向けたおおよその準備を完了する ことができた。本研究で得られた知見は、同種の検出器を用いる他の近赤外線観測装置の 開発にも役立ち得る。

# 目 次

Abstra	$\mathbf{ct}$	i
第1章	序論	1
1.1	銀河の観測的研究の現状	1
	1.1.1 遠方銀河の星質量関数	1
	1.1.2 撮像観測による赤方偏移測定と近赤外線観測の重要性	1
1.2	SWIMSの概要	2
	1.2.1 TAO 6.5 m 望遠鏡	2
	1.2.2 SWIMS	3
	1.2.3 SWIMS-18 サーベイ	4
1.3	SWIMS の開発と本研究の位置付け	6
第2章	検出器システムの概要	7
2.1	検出器と読み出しコンポーネント	7
	2.1.1 HAWAII-2RG 検出器	7
	2.1.2 SIDECAR ASIC $\succeq$ JADE2 Card	8
	2.1.3 駆動用ソフトウェア	10
2.2	SWIMS 全体の制御システムとの統合	11
2.3	要求性能	12
	2.3.1 読み出し速度	12
	2.3.2 読み出しノイズ	14
	2.3.3 暗電流	15
2.4	SWIMS 検出器システムの要求仕様	15
第3章	検出器システムの開発	17
3.1	HAWAII-2RG 駆動パラメータの最適化	17
	3.1.1 読み出し速度	17
	3.1.2 Preamp <b>ゲイン設定</b>	18
3.2	新型フラットケーブルの製作............................	19
3.3	HAWAII-2RG 複数台同時駆動の実現	20
	3.3.1 検出器制御用 PC と Windows 仮想マシン	20
	3.3.2 HxRG Testing Software とのソケット通信	20
	3.3.3 検出器コントロールシステム	21
3.4	取得画像処理	22
	3.4.1 Fowler サンプリング	22

	3.4.2 Ramp サンプリング	23
3.5	処理の流れ	25
第4章	システム性能評価	30
4.1	試験用デュワーでの試験	30
	4.1.1 試験環境	30
	4.1.2 読み出しノイズ測定方法	31
	4.1.3 HAWAII-2RG 同時駆動時のノイズ増加	32
	4.1.4 フラットケーブルのシールド加工による改善	32
4.2	SWIMS メインデュワーでの試験	33
	4.2.1 試験環境	33
	4.2.2 サンプリング中に生じるエラー	33
	4.2.3 ADU-エレクトロン変換係数(コンバージョンファクター)	35
	4.2.4 読み出しノイズ	37
	4.2.5 暗電流	42
	4.2.6 検出器発熱	43
	4.2.7 <b>残像 (</b> Image Persistence <b>)</b>	44
第5章	総括	48
5.1	本研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	48
5.2	今後の展望・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
謝辞		50
参考文南	犬	51

# 第1章 序論

# 1.1 銀河の観測的研究の現状

### 1.1.1 遠方銀河の星質量関数

銀河がどのように進化して現在の姿になったのかを解明することは、天文学の究極の目 標のひとつである。多波長による観測の結果、銀河の星形成は赤方偏移 z = 1-3 の時代に ピークを迎え、現在よりも 30 倍以上活発であったことが明らかになった(Hopkins et al. 2006)。そのような時代には現存する星質量のうち半分以上が形成され、銀河の形成と進 化を理解する上で重要な時代となっている(e.g. Muzzin et al. 2013)。一方で近年の観測 により、z > 3 の時代において既に星形成が抑制された大質量銀河(quiescent 銀河)が高 い割合で存在することが確認された(Straatman et al. 2014)。quiescent 銀河のスペクト ルには、静止系波長 4000 Å 付近の金属吸収(4000 Å ブレーク)や静止系波長 3646 Å 付 近の水素の吸収(バルマーブレーク)が顕著に見られる。これらの銀河はz > 5 の時代に 大部分の星形成を終えたと考えられており、いかにして急速な星形成とその抑制が生じた のかを明らかにすることが、多種多様な銀河の進化を真に理解するために重要である。

銀河の星形成活動が抑制される要因として考えられるものに、超新星爆発やAGN が星 形成の材料となるガスを吹き飛ばすプロセス(フィードバック)がある。フィードバック を考慮しないシミュレーションでは観測されるよりも多くの星が形成されてしまうという 問題(e.g. Cole et al., 2000))や、遠方のクェーサーの観測(Maiolino et al. 2012)な どから、宇宙初期における星形成抑制は大部分がフィードバックによるものだと考えられ ている。銀河の星形成活動の様子を知るには、様々な時代において銀河の質量ごとのの数 密度、すなわち星質量関数(Stellar Mass Function; SMF)を調べることが有効である。 SMFの時間進化を追うことで、各時代における星形成の活発さやフィードバックの影響 度合いを明らかにすることができる。

#### 1.1.2 撮像観測による赤方偏移測定と近赤外線観測の重要性

SMFの時間進化を調べるためには銀河の赤方偏移を正確に測定することが必須である が、遠方銀河の分光観測は一般に困難である。このような状況では、異なる波長帯での撮 像データを用いて赤方偏移を推定し、遠方銀河を検出する。具体的には、複数の波長帯で 測定されたフラックスを連続スペクトルのモデルでフィッティングして赤方偏移を決める。 このようにして得られる赤方偏移を測光赤方偏移(Photometric Redshift; photo-z)と呼 び、photo-zを精度よく決定するには2つの波長帯間でのフラックスのギャップ(ブレー ク)を捉えることが重要である。従来の遠方銀河研究においては主に静止系波長912 Åの ライマンブレークが用いられてきたが、波長が短いためダストの少ない星形成銀河に偏っ た検出をしてしまうという欠点があった。遠方銀河をより無バイアスに精度よく検出する には、より長波長側の 4000 Å ブレークやバルマーブレークを捉えることが重要である。 遠方銀河ではこれらのブレークが近赤外域に移るため、SMF の時間進化の測定には近赤 外線での観測が必要不可欠である。

これまで遠方銀河の photo-z を測定するために様々な撮像観測が行われたが、その多く は J、H、K バンドの広帯域フィルターを用いている。広帯域フィルターを用いた観測で は、幅広い赤方偏移のプレークが同じフィルターの波長域に含まれてしまうため photo-z の不定性が大きくなってしまう。したがって、精度よく photo-z を決定するためにはより 透過波長域の狭いフィルターでプレークを捉えなければならない。このような観測を行っ たものに ZFOURGE サーベイ (Straatman et al. 2016)がある。ZFOURGE は FourStar Infrared Camera (Persson et al., 2013)をマゼラン望遠鏡に搭載して行ったサーベイで あり、11'×11'の視野で CDFS、COSMOS、UDS の3つのフィールドを観測した。Ks バ ンドでの 5 $\sigma$  限界等級はそれぞれのフィールドで 26.3 mag、25.5 mag、25.7 mag となって いる。ZFOUGE の特徴として、Jバンドを3つ、Hバンドを2つに分割した中間帯域フィ ルターが挙げられる。これらのフィルターにより 1 < z < 4 の範囲で従来よりも高い精度 で photo-z を決定した。一方で、より遠方の銀河の photo-z に関しては長波長側で Ks バ ンド広帯域フィルターを使用しているため不定性が大きい。z > 4 の photo-z を精度良く 決定して宇宙初期の SMF を調べるためには、長波長側での中間帯域フィルターを用いた 撮像観測が必要である。

### 1.2 SWIMSの概要

#### 1.2.1 TAO 6.5 m 望遠鏡

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター(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 望遠鏡を建設中である。TAO サイトは良好なシーイング条件(FWHM < 0".8)と高い晴天率(80–90%)を持ち、さら に水蒸気量が低いために赤外線の波長帯で高い透過率が得られる。図1.1 に TAO サイト と他の望遠鏡サイトの近赤外線域における大気透過率を示す。他の望遠鏡サイトにおける 大気の窓は波長1.1–1.3  $\mu$ mのJバンド、1.5–1.8  $\mu$ mのHバンド、2.0 2.3  $\mu$ mのKs バン ドに完全に分割されるが、TAO サイトでは水蒸気の吸収戦が浅くなり連続的な大気の窓 が得られる。これにより、TAO サイトでは H バンドと Ks バンドの中間に位置する Paa 輝線(静止系波長1.8751  $\mu$ m)の観測が可能となる。TAO 6.5 m 望遠鏡の完成に先駆け、 同サイトではすでに miniTAO 1 m 望遠鏡が稼働しており、実際に Paa 輝線の観測によ る研究成果が得られている(Tateuchi et al. 2015)。TAO 6.5 m 望遠鏡の完成は 2018 年 を予定しており、サイトの特長や高い望遠鏡占有時間を活かした様々な研究が計画されて いる。 第1章 序論



図 1.1: 標高ごとの近赤外域における大気透過率(Konishi et al. 2015)。上から順にチャナントー ル山頂、マウナケア山頂、パラナル山頂に相当する標高と可降水量(PMW)での大気透過率モデ ル計算結果を示している。

#### 1.2.2 SWIMS

近赤外線2色同時多天体分光撮像装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph)は、TAO 6.5 m 望遠鏡の第一期近赤外線観測装置として開発中の装置である。SWIMS の特長のひとつは、0.9–1.4 µm と 1.4–2.5 µm の 2 色同時観測である。図 1.2 に SWIMS の外観と概念図を示す。デュワー内部は真空に保たれ、光学系は光学ベンチに収納されて ~ 80 K まで冷却される。入射光はダイクロイックミラーによって短波長側と長波長側に分割され、短波長側の Blue Arm と長波長側の Red Arm それぞれの焦点面に搭載された検出器上で結像する。

観測モードは撮像、多天体分光、面分光の3つを搭載する。各モードはデュワー上部に 設置された多天体分光マスク交換ユニット(Multi-Object Spectrograph Unit; MOSU)に よって切り替える。MOSUには多天体分光用のスリットマスクを最大で21枚収納するこ とができ、ロボットアームによって焦点面への設置と収納を行う。SWIMSの面分光ユニッ ト(Integral Field Unit; IFU)は非常にコンパクトに設計されており、他のスリットマス クと同様に MOSU に収納することができる。光学ベンチ内部には短波長側と長波長側そ れぞれのフィルターホイールが配置されており、ホイールには広帯域、中間帯域、狭帯域 フィルターとグリズムが収納されている。ホイールの回転により、撮像と分光の切り替え を行う。以上のようにして、観測中であっても迅速に3つのモードを切り替えることが可



図 1.2: 上:SWIMS の外観。下:SWIMS の概念図。望遠鏡からの光はコリメータレンズを通過 した後ダイクロイックミラーによって短波長側(Blue Arm)と長波長側(Red Arm)に分割され る。分割された光はホイールの回転によって選択されたフィルターやグリズムを通過し、それぞれ の焦点面に取り付けられた検出器上に結像する。これらの光学系は真空に引かれたデュワー内部の 光学ベンチに収納され、~80 K まで冷却される。

能である。

SWIMS の想定スペックを表 1.1 に示す。SWIMS は広い視野(TAO 6.5 m 望遠鏡搭載 時で  $\phi$ 9 '6) と 2 色同時観測により高効率の近赤外線観測を実現する。高い近赤外線透過 率や大きな望遠鏡占有時間といった優位性を持つ TAO 6.5 m 望遠鏡と SWIMS を組み合 わせることにより独創的な観測が可能となり、様々な科学目標に迫ることが可能となる。

#### 1.2.3 SWIMS-18 サーベイ

SWIMS を用いた観測研究のひとつとして、SWIMS-18 サーベイが計画されている。 SWIMS-18 サーベイは SWIMS に 4 枚の広帯域フィルター、8 枚の中間帯域フィルター、6 枚の狭帯域フィルターの計 18 枚を搭載して行う撮像サーベイであり、遠方銀河の photo-z を精度良く決定して銀河形成史についての理解を進めることを目的とする。特に、中間帯 域フィルターを用いることで SMF の時間進化を精度良く測定することができる。図 1.3 に SWIMS-18 の中間帯域フィルターの波長と透過率を示す。H バンド、K バンドを 3 分割す ることで、これらの波長域に入るブレークを ZFOURGE よりも精度よく捉えることがで き、より高精度の photo-z を得ることができる。また、長波長側をカバーした K3 フィル ターにより ZFOURGE では不可能だった z > 4 のバルマーブレークを捉えることが可能と なり、特定の銀河種族に偏らない遠方銀河の検出ができる。これを他波長で取得したデー タや先行研究のデータと組み合わせることで、従来よりも高赤方偏移の SMF が求められ る。このようにして、宇宙初期における急速な星形成とその時代におけるフィードバック の寄与が明らかとなり、銀河形成進化のモデルに制限が加わることが期待される。



図 1.3: SWIMS-18 の中間帯域フィルターの波長と大気透過率

表 1.1: SWIMS のスペック表。限界等級は点源天体についてのものであり、計算の際はシーイン グを 0".5、積分時間を 1 時間とした。

	すばる望遠鏡	TAO 6.5 m <b>望遠鏡</b>				
観測モード	撮像、多天体分光、面分光					
観測波長	0.9–1.4 $\mu m$ (blue	) / 1.4–2.4 $\mu m (red)$				
視野	6'.6 imes 3'.3	$\phi 9'.6$				
検出器(各アーム)	HAWAII-2RG $\times 2$	HAWAII-2RG $\times 4$				
ピクセルスケール	0".096 /pix	0''.126 / pix				
望遠鏡焦点	カセグレン	ナスミス				
焦点面曲率半径	$2400~\mathrm{mm}$	$1250 \mathrm{~mm}$				
寸法	$2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$					
重量	$2.4  ext{ ton}$					
波長分解能	900–1400 (blue) / 700–1200 (red)					
$5\sigma$ 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				

第1章 序論

# 1.3 SWIMSの開発と本研究の位置付け

TAO 6.5 m 望遠鏡ナスミス焦点の最終 F 値(焦点距離/口径)は12.2 であり、すばる 望遠鏡カセグレン焦点の最終 F 値(赤外副鏡時)と等しくなるように設計されている。そ のため、F/12.2 に合わせて設計されている SWIMS は、コリメータ光学系を修正すること によりすばる望遠鏡のカセグレン焦点に搭載することが可能である。SWIMS の開発は現 在最終段階にあり、2017 年初頭には TAO 6.5 m 望遠鏡の完成(2018 年予定)に先立って ハワイ観測所に輸送し、マウナケア山頂のすばる望遠鏡に搭載して試験観測を行う予定で ある。

本研究では、SWIMS における検出器駆動、読み出し、出力画像の処理などを行うシ ステムを開発した。検出器システムは観測装置において非常に重要な箇所であり、本研 究は SWIMS 全体の開発の中でも大きな位置を占める開発項目である。本研究の目的は、 SWIMS の検出器システムを完成させて装置全体の制御システムに組み込める形にし、実 際の観測に向けた準備を完了させることである。SWIMS で用いる検出器は最新の近赤外 線観測装置で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システムの 開発手法や検出器動作に関する知見は今後の近赤外線観測装置開発においても有用となる。

続く第2章では、SWIMSのハードウェア、ソフトウェアの構成とそこから導かれる検 出器システムへの要求仕様について述べ、第3章では実際に開発したシステムについて説 明する。第4章では、実際に検出器システムを駆動した際に得られる性能を評価する。第 5章で本研究を総括し、今後の展望について述べる。

# 第2章 検出器システムの概要

# 2.1 検出器と読み出しコンポーネント

# 2.1.1 HAWAII-2RG 検出器

SWIMS の検出器には、Teledyne Imaging Sensors (TIS) 社製の HgCdTe Astronomy Wide Area Infrared Imager with  $2K \times 2K$  resolution, Reference pixels and Guide mode (HAWAII-2RG)を採用する。HAWAII-2RG は近赤外線に感度を持つ水銀カドミウムテ ルル(HgCdTe)を読み出し回路であるマルチプレクサ(Multiplexer; MUX)にインジウ ムバンプで接続した構造のハイブリッドアレイ型検出器である。図 2.1 に HAWAII-2RG の外観と、検出器回路の概念図を示す。検出素子はフォトダイオードであり、電極に逆バ イアスをかけることにより広がった空乏層に光子が入射すると電子正孔対が生成される。 生じた電子と正孔は拡散電位により移動して電極の電位を変化させ、これによりピクセル 出力電圧が変化する(図 2.2)。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。MUX は縦横ラインのスイッチによってピクセルを選択 し、ソースフォロワを読み出しバスに接続することで各ピクセルの電圧を順に出力する。



図 2.1: 左: HAWAII-2RG をふたつ並べたときの外観。右: HAWAII-2RG 検出器回路の概念図 (Crouzet, 2009)。

表 2.1 に HAWAII-2RG のスペックを示す。すばる望遠鏡搭載時のピクセルスケールは 0".096 /pix であり、短波長側と長波長側それぞれの焦点面に HAWAII-2RG を 2 台ずつ配 置することで 6  $(6 \times 3)$  3 の長方形型の視野が得られる。TAO 6.5 m 望遠鏡搭載時にはピ クセルスケールは 0".126 /pix となり、各焦点面に HAWAII-2RG を 4 台ずつ正方形型に 配置することで  $\phi$ 9 (6 の視野を実現する予定である(図 2.3)。したがって、SWIMS では 複数台の HAWAII-2RG を同時に駆動することが求められる。



図 2.2: 光子の入射によって出力電圧が変わる様子の概念図。PN 接合のフォトダイオードに逆バ イアス電圧 V<sub>bias</sub> をかけると、多数キャリアが移動して空乏層が生じる。ここに価電子帯と伝導帯 のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光子が入射すると、電子と正孔の組が生成される。空乏 層では固定電荷により拡散電位 V<sub>buit.in</sub> が生じており、P型半導体から N型半導体の方向の電場が 存在している。したがって、生成された電子は N型半導体、正孔は P型半導体の多数キャリア領 域へ移動し、両極間の電位差は V<sub>bias</sub> から減少する。この減少分が検出器出力となる。

HAWAII-2RG の特長のひとつは参照ピクセル(Reference Pixel)の存在である。これ らは幅4 pix で検出器の外側を囲むように配置されている(図2.4)。参照ピクセルの読み 出し回路は通常のピクセルと同じ MUX であるが、フォトダイオードは接続されておらず、 代わりに 40 fF のコンデンサが組み込まれている。そのため光に対する感度を持たず暗電 流も生じないので、参照ピクセルの出力は理想的にはバイアス電圧の値に対応した一定値 になることが期待される。実際に同じ条件で複数回読み出しを行った時の参照ピクセルの カウント変動はバイアス電圧の変動であると考えることができるので、これらを用いて通 常のピクセルに対するバイアス電圧変動補正を行うことができる。

#### 2.1.2 SIDECAR ASIC & JADE2 Card

HAWAII-2RG の駆動と読み出しには同じく TIS 社製の専用回路である System for Image Digitization Enhancement Control And Retrieval (SIDECAR) Application Specific Integrated Circuit (ASIC)とJWST ASIC Driver Electronics 2 (JADE2) Card を用い る。HAWAII-2RG とSIDECAR ASIC、SIDECAR ASIC とJADE2 Card はそれぞれフ ラットケーブルで接続され、JADE2 Card はUSB2.0 ケーブルにより PC と接続される。

半導体結晶	HgCdTe
寸法	$4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$
ピクセルフォーマット	2048 pix $\times$ 2048 pix
ピクセルサイズ	$18 \ \mu { m m}$
カットオフ波長	$2.5~\mu{ m m}$

表 2.1: SWIMS に搭載している HAWAII-2RG のスペック表

#### すばる望遠鏡搭載時

TAO 6.5 m 望遠鏡搭載時



図 2.3: すばる望遠鏡、TAO 6.5 m 望遠鏡それぞれに搭載したときの SWIMS の視野。矢印は波長 分散の方向を示しており、スリットが斜線領域に含まれる天体については 0.9-2.5 µm 全域に渡っ てスペクトルを取得できる。

SIDECAR ASIC は HAWAII-2RG 駆動のためのクロック生成や出力の AD 変換を行う。 内部でクロックパターンをプログラミングして HAWAII-2RG に入力することで、複数 の読み出し速度、読み出しモードでの駆動が可能である。検出器からのアナログ出力電  $E V_{out}$  は参照電圧 (Reference Voltage) との差分を測定され、その電位差が前置増幅器 (Preamplifier; Preamp)によって指定の倍率に増幅される。増幅された電位差は、続くア ナログ-デジタル変換器 (Analog-to-Digital Converter; ADC) によって 12 bit または 16 bit の Analog-to-Digital Unit (ADU) に変換され、ピクセルカウントとして送信される。 (図 2.5)。

JADE2 Card は HAWAII-2RG 駆動用ソフトウェアとの通信を担う。SIDECAR ASIC で 生成されたピクセルカウントはフラットケーブルを通して JADE2 Card に送られ、HAWAII-2RG 駆動用ソフトウェアへ送信される。また、JADE2 Card は内部で検出器駆動のため の電源を生成し、SIDECAR ASIC へ供給する役割も担っている。JADE2 Card 自身への 電源供給手段としては、USB2.0 からの DC 5 V 供給または外部電源からの供給が選択で



図 2.4: HWAII-2RG のピクセル配置図。参照ピクセルが通常のピクセルを取り囲むように幅 4 pix で配置されている。

きる。SWIMS では、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。

SWIMS では、HAWAII-2RG と SIDECAR ASIC は低温真空環境の光学ベンチ内に搭載し、JADE2 Card はデュワー壁面に取り付けて常温真空環境で駆動する。装置の設計上 SIDECAR ASIC と JADE2 Card の間の距離が ~ 1.7m と大きいため、TIS 社製のフラットケーブルに代わる新たなケーブルを設計・製作する必要がある。

#### 2.1.3 駆動用ソフトウェア

HAWAII-2RG の駆動用ソフトウェアは、TIS 社により提供されたものを用いる。ソフ トウェアは、JADE2 Card とコンピュータの間の通信を担う 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構成されており、HAL Server はコンピュータ と JADE2 Card の通信に用いられる。SIDECAR ASIC IDE は検出器の読み出しやバイ アス電圧変更を担う部分であり、各種コマンドが SIDECAR ASIC IDE から HAL Server を通じて USB2.0 で接続された JADE2 Card へと送信される。SIDECAR ASIC IDE に は図 2.6 のような Graphical User Interface (GUI)が用意されており、手動で各種設定を 変更することができる。また、SIDECAR ASIC IDE をラッピングしたソフトウェアであ る HxRG Testing Software が使用可能であり、本研究ではこれを用いる。

HxRG Testing Software は Interface Definition Language (IDL) で記述されており、より直感的に駆動パラメータの変更を行うことができる。GUI は図 2.7 のようになっており、 非常に簡単に読み出しの開始や中断、読み出しモードや積分時間などの変更が可能である。 また、HxRG Testing Software は Socket Server を用いることで、リモートホストのコマ



図 2.5: SIDECAR ASIC 内部での検出器出力処理の概念図。電位差 V2 – V1 と V4 – V3 の差分を 増幅して AD 変換を行う。V2 には検出器出力電圧が入力され、その他には参照電圧が入力される。

ンドライン上から同様の操作を行うことができるようになっている。主な読み出しモード は Fowler サンプリングと Ramp サンプリングの2種類がある。それぞれの読み出し方法 の詳細については次章で述べるが、どちらも観測精度の向上のために複数回の読み出しを 行い、複数枚の生画像を生成する。解析に用いるための最終画像を作成するには、取得し た複数枚の生画像に対してバイアス電圧の変動補正などの処理を行う必要がある。HxRG Testing Software では、Fowler サンプリングの場合のみ自動で最終画像が生成される。し たがって、Ramp サンプリングでの観測を実現するためには取得した生画像を処理して最 終画像を生成するパイプラインを開発する必要がある。

これらのソフトウェアはすべて Windows 上で動作し、1 台の HAWAII-2RG につきひと つの HxRG Testing Software が必要である。したがって、SWIMS で要求される HAWAII-2RG の複数台同時駆動を実現するためには、複数の HxRG Testing Software を同時に制 御可能なシステムが必要である。

# 2.2 SWIMS 全体の制御システムとの統合

検出器システムは、SWIMS 全体のシステムの一部として統合できる形で開発しなけれ ばならない。SWIMS 全体の制御ソフトウェア(Instrument Control System)はほとんど がPython で記述されており、Observation Control Processor(OBCP)と呼ばれる Linux (CentOS 6.5) PC上で動作する。図 2.8 は ICS の概念図である。個々のハードウェアを 制御するモジュールを、Instrument Management Server(IMS)により制御する。IMS にはすばる望遠鏡の観測制御システム(Observation Control System; OCS)に SWIMS の ICS を統合するためのインターフェースも含まれている。観測と密接に関係するハード ウェア(MOSU、フィルターホイール、検出器)にはデバイスマネージャを用意する。入 力されたコマンドは IMS から非同期のソケット通信によって対応するデバイスマネージャ に送信される。それぞれのデバイスマネージャでは Executor と Interrputer というふたつ のスレッドを立ち上げ、緊急時には Interrupter にコマンドを送ることにより Executor で

File Application Registers /	Lovernik ler – Deloug	Windo	ov Help			a company
n#80,22,	► ■ @*,	R	pr 👔 斗	A T A T T T T T T T T T T T T T T T T T	File Edit Format Vi	ew Hel
Jode Trees 0	Autorities -	Terreto	and a set		6a00 0000	
8-AsserbijFiles	Long Ch. M. C.		an		6-02 0013	
- Euclid, Caratanta ann	107 14 6 4			7 V B -	0402 0015	
- Euclid, D-staConfig.erm	Cardo Ecitar				6a03 0080	
Sudid Preveficulines or			11	// define the port addresses	C 10 0001	
Euclid_ICPorTable.acm			1.3	.10883 h6700 h6900 // parts - Synafter	0a18 0001	
Ducing M an. and			1.1	.10080 bi901 bi000 // possid - udabh/hedglab	6-78 0005	
Parado and a corregion			14	_100000 he702 h4001	0420 0003	
100010161			1.0		. 6700 6900	
D-158 Pate			1.6	// set defaults	6701 4000	
- U SR Post Webers			12	10985 bi000 b0200 // 512 x 512 p(xels	0/01 4000	
USS Fork Direction			10	10086 M001 20	6702 4001	
D-UADE2R waters			10	Laborary Herona av	0/02 4001	
- ASIC I stellage			1.9	17 main anomation much for	4000 0200	
<ul> <li>Clock and FIRD</li> </ul>			20	// Hain appendict rowerse	4001 0014	
<ul> <li>I/D Configuration</li> </ul>		0.6	OL.	OBCARD SYNC U	4001 0014	
<ul> <li>Power Management</li> </ul>		0.6	2.2	DEFINE WIGTH 1	hlockstant	
- Pores Bradesch			2.0		DIOCKSCALL	
- Slatur		0.0	24	DINYIA DUCC	addross 0000	1
- Uner Defined			2.5		100/033 0000	
Slobal ASIC Registers		0.0	2.5	startframe:	lenath /5	
🐑 💽 🜰 ASICI	17	1.0	27	IN RO, dyno	1000	
	10	21	28	BIBE POLD	1000	
	3e/1o	3 a	2.9	JENG startframe	6d80	
ReadPlan/RegisterCaritols 9	1=	14.4	30	acta NI, D	0000	
	10		31.	0077 20000, 8.0	80fd	
			72		0590	
	30	60	22	TN DLE // division factor	0080	
				555 55	- 1800	
	4				1000	
	Outsit Press	Marking	Tests		1002	
	Cabo 0.84	1400.440	12400		EL 01	
Amerida Controls 12					0001	
All Carlos Condition 0					a701	
constant - TextPather& ann					5040	
					5019	
	Castern Loop				1 1 207	
	ayound Log				1802	
	5/19/2014 7 42 86	AM : Fires	cos HalCliws is to	lasing .	* 6b83	
	PERSONAL PROPERTY.	oticeed	CRAMMENT .		- 0000	

☑ 2.6: SIDECAR ASIC IDE O GUI (Chen et al., 2014)

実行中の処理を中断できるようにする。デバイスマネージャを持たないハードウェアに関 しては、IMS から制御するモジュールとして動かすこともでき、対話的にも使用できる コマンドラインインターフェースを用意する。これらのモジュールはすべて、OBCP 内 に MySQL で実装された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、取得したステータス情報などを保存する。

以上より、検出器システムはSWIMS ICSの検出器モジュールとして組み込める形で開発する必要がある。すなわち、非同期のソケット通信によるOBCPからのコマンド受け取り、マルチスレッドによる処理の中断、RDBMSとのやりとりといった機能が要求される。

#### 2.3 要求性能

SWIMS をすばる望遠鏡に搭載して観測する場合を想定したときに、検出器システムに 要求される性能を考える。具体的には読み出し速度、読み出しノイズ、暗電流について達 成すべき値を計算する。

#### 2.3.1 読み出し速度

読み出し速度については、観測対象とする天体の明るさから計算する。ここでは、最も多くの光子が検出器のピクセルに入射する観測として、JバンドでのAB等級が m<sub>AB</sub> = 15 mag の点源天体の撮像を考える。読み出しにかかる時間は、ピクセルが飽和するまでの時間よりも短くなければならない。検出器では光子ひとつにつき電子がひとつ生成されるとする と、天体からの光子によって単位時間あたりに生成する電子数 n<sub>e</sub> は以下の式で表される。



 $\boxtimes$  2.7: HxRG Testing Software  $\mathcal{O}$  GUI ( Chen et al., 2014 )

$$n_e = \eta \times f_\nu \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \Delta \nu \times \frac{1}{h\nu} \text{ e}^-/\text{sec}$$
(2.1)

ここでは、観測波長  $\lambda = 1.25 \times 10^{-6}$  m、波長幅  $\Delta \lambda = 1.6 \times 10^{-7}$  m、口径 D = 8.2 m (すばる望遠鏡)、大気透過率から検出器の漁師効率までを含めたシステム効率  $\eta = 0.3$  と する。また、 $f_{\nu}$  は天体からの単位周波数あたりのフラックス、h はプランク定数である。 光速度と波長、周波数の間の関係から周波数幅  $\Delta \nu = 3.1 \times 10^{13}$  Hz と計算できる。以上 より、式 2.1 は単位周波数あたりのフラックスと AB 等級の間の関係を用いて以下のよう に表すことができる。

$$n_e = 1.12 \times 10^{11 - 0.4m_{\rm AB}} \,\mathrm{e}^{-/\mathrm{sec}}$$
 (2.2)

HAWAII-2RG の飽和電子数は TIS 社のカタログ値である  $1 \times 10^5 e^-$  を用いる。1 ピクセ ルに入射する光子数が最大となるのはシーイングが最小のときであり、そのときのシーイ ングを 0''.2とすると全光子数の  $\sim 30\%$ が星像の中心ピクセルに集まる。したがって、ピク セルが飽和するまでの最短時間は次のように計算される。

$$t = \frac{1 \times 10^5}{0.3 \times 1.12 \times 10^{11 - 0.4 \times 15}} \simeq 3 \text{ sec}$$
(2.3)



図 2.8: SWIMS ICS の概念図 (Motohara et al. 2016)

よって、達成すべき読み出し速度は < 3 sec/frame となる。

### 2.3.2 読み出しノイズ

積分時間 t [s] の観測におけるノイズ N は、以下の式で表すことができる。

$$N = \sqrt{n_i t + n_{sky} t + n_{dark} t + \sigma_{read}^2} \tag{2.4}$$

ここで、 $n_i, n_{sky}, n_{dark}$  [e<sup>-</sup>/s] はそれぞれ天体、背景光、暗電流に由来する単位時間当た りの光子数であり、 $\sigma_{read}$  [e<sup>-</sup> r.m.s.] は読み出しノイズである。すなわち、全体のノイズ は光子のポアソンノイズと読み出しノイズに起因するものであると考える。

読み出しノイズについては、最も背景光のノイズが小さくなる場合でも読み出しノイ ズリミットにならないような値を要求値とする。すなわち、読み出しノイズが背景光の ポアソンノイズよりも小さくなることを要求するここでは、背景光が最小となる観測と してJバンドでの分光観測を想定する。すばる望遠鏡でのJバンド全体の平均の背景光 は15.5 mag/arcsec<sup>2</sup>(仮注: MOIRCSのwebより)であるが、Jバンドの背景光にはOH 夜光の輝線が多数含まれている。そのため背景光はOH 夜光のない波長域で最小となり、 Iwamuro et al. (2001)によればこのときの背景光は平均値の4%以下である。したがっ て、ここでは背景光の大きさの上限値として19.0 mag/arcsec<sup>2</sup>を用いる。このとき、1 ピ クセルあたりで生成される背景光由来の電子数を考える。シーイングを0″.5とし、背景光 の面積を A = 0".5 × 0".5 = 0".25 とする。この領域から入射する背景光由来の単位時間 あたり、単位波長あたりの電子数は、式 2.2 と波長幅  $\Delta \lambda = 1.6 \times 10^{-7}$  m = 1600 Å から

$$n_{sky} = 1.12 \times 10^{11 - 0.4 \times 19.0} \times A \times \frac{1}{\Delta \lambda} = 0.439 \text{ e}^{-}/\text{sec}/\text{\AA}$$
 (2.5)

と計算できる。ピクセルスケールは 0".096 /pix であるから、検出器上で空間方向に積分 されるピクセル数は  $N_{\text{pix}} = 0$ ".5/0".096 /pix = 5.2 pix である。また、SWIMS の J バン ドでのピクセル波長分散は d = 2.49 Å/pix となっているので、背景光由来の単位時間あた りの電子数は  $n_{sky}d/N_{\text{pix}}$  e<sup>-</sup>/sec/pix と表される。典型的な積分時間として t = 1000 sec とすると、1 ピクセルあたりでの背景光由来の電子のポアソンノイズは

$$\sqrt{\frac{n_{sky}dt}{N_{\text{pix}}}} \simeq 14.5 \text{ e}^- \tag{2.6}$$

となる。したがって、達成すべき読み出しノイズ性能は

$$\sigma_{read} < 14.5 \text{ e}^{-} \text{ r.m.s.}$$
 (2.7)

である。

#### 2.3.3 暗電流

暗電流への要求性能は、最も背景光の小さい観測においても無視できるほど小さいことである。すなわち、暗電流由来の電子数が背景光由来の電子数に比べて十分小さいことが要求される。読み出しノイズの場合と同様の分光観測を考えると、背景光が最も小さいときの電子数は $n_{sky}d/N_{\rm pix} = 0.21$  e<sup>-</sup>/sec/pix である。したがって、暗電流の要求性能は

$$n_{dark} \ll 0.21 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}$$
 (2.8)

となる。

# 2.4 SWIMS 検出器システムの要求仕様

前節までの内容から、SWIMS 検出器システムの開発において要求される項目を以下に まとめる。

- リモートホストから複数の HAWAII-2RG Testing Software を制御し、複数台の HAWAII-2RG を同時に駆動
- TIS 社製のケーブルに代わる SIDECAR ASIC と JADE2 Card 接続用フラットケー ブルの製作

- OBCP との非同期のソケット通信、マルチスレッドでの処理、RDBMS との通信機 能を持ち、SWIMS ICS への組み込みが可能
- 取得した生画像を処理して最終画像を生成するパイプライン
- 十分な速度の読み出しと、十分低い読み出しノイズ、暗電流

次章では、このような要求のもとで実際に開発したシステムを紹介する。

# 第3章 検出器システムの開発

ここでは、実際に開発した検出器システムについて各コンポーネントごとに詳述する。

# 3.1 HAWAII-2RG 駆動パラメータの最適化

#### 3.1.1 読み出し速度

1回の読み出しに要する時間が3秒以下となるように駆動パラメータを設定する。読み 出し速度に影響するパラメータは、ピクセル読み出しレートと出力チャンネル数のふたつ である。ピクセル読み出しレートにはfast モードと slow モードがあり、それぞれ最大10 MHz の12 bit 変換と最大500 kHz の16 bit 変換でカウントを生成する。fast モードでは 最速で0.013 sec/frameの読み出し速度を達成できるものの、読み出しノイズが大きくな ることが知られている。また、12 bit 変換ではカウントの分解能が4096 しかない(16 bit 変換は65536)ため、本研究では用いないこととした。slow モードではピクセル読み出し レートを100 kHz から500 kHz まで100 kHz ごとに変更できる。

表 3.1 に各読み出しレートでの読み出し時間を示す。slow モードにおいても読み出し速 度が大きいほど読み出しノイズが大きくなることが判明しているので、本研究ではピクセ ル読み出しレートとして 100 kHz を採用することとした。ただし、より短時間でピクセル が飽和するような明るい天体を観測する場合には、より高いピクセルレートが最適となる ことも考えられる。

ピクセル読み出しレート	読み出し時間
100  kHz	$\geq 1.48~{\rm sec}/{\rm frame}$
200  kHz	$\geq 0.74~{\rm sec}/{\rm frame}$
300  kHz	$\geq 0.49~{\rm sec}/{\rm frame}$
400  kHz	$\geq 0.37~{\rm sec}/{\rm frame}$
500  kHz	$\geq 0.30~{\rm sec}/{\rm frame}$

表 3.1: slow モードでのピクセル読み出しレートと読み出し速度(藤堂, 2015)。出力チャンネル数 が最大のとき読み出し時間は最短となる。

出力チャンネル数は1 CH、4 CH、32 CH のいずれかを選択する。図 3.1 に示すように、 選択したチャンネル数に応じてアレイが短冊状に分割され、並列に読み出しが行われる。 各チャンネルの処理速度は等しいので、出力チャンネル数が多いほど読み出しは速くなる。 出力チャンネル数を増やしたときに考えられるデメリットは多数のピクセルを同時に読み 出すことによるクロストークの影響であるが、TIS 社のレポートによればクロストークは 0.1%以下でありほとんど無視できる。一方で、SIDECAR ASIC 内の回路の性能が一様で あれば出力チャンネル数が読み出しノイズに直接影響を与えることは無く、読み出し速度 が大きくなることで観測効率が向上すると考えられる。したがって本研究では 32 CH 出 力を採用し、このときの読み出し時間は 1.48 sec/frame である。



図 3.1: 読み出しチャンネル設定の概念図。チャンネル数に応じて SIDECAR ASIC 内で使用する Preamp と ADC の数が決まり、並列に処理が行われる。

#### 3.1.2 Preamp ゲイン設定

HxRG Testing Software の設定により、SIDECAR ASIC 内部の Preamp での増幅率(ゲイン)を変更することができる。表 3.2 に、ソフトウェア上での設定値と対応する増幅率 を示す。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)が変化する。増幅率が大きいほど、わずかな検出器出力電圧の差が 増幅されてカウントに差が生じる。すなわちコンバージョンゲイン C<sub>G</sub> は Preamp での増 幅率 G に反比例し、藤堂(2015)の実験により

$$C_G \sim 6 \times 10^1 / G \left[ \mu \text{V} / \text{ADU} \right] \tag{3.1}$$

という関係が得られている。

本研究で用いる Preamp ゲインを決定する際には、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を要請する。つまり、16 bit ADC の出力範囲は 0 ~ 65535 ADU なので、HAWAII-2RG の飽和電子数 (~ 1 × 10<sup>5</sup> e<sup>-</sup>) が 65535 ADU 以下でサンプリン グされる必要がある。G = 1.0 のとき HAWAII-2RG の飽和電子数のカウント(飽和カウ ントからバイアスカウントを引いたもの)は約 10000 ADU となる。式 3.1 から Preamp での増幅率とカウント数は比例するので、増幅率への要請は 10000 $G \leq 65535$  すなわち

	増幅率
#0	0.70711 (-3.01 dB)
#1	1.00000 (0.00 dB)
#2	$1.41412 \ (3.01 \ \mathrm{dB})$
#4	$2.00000 \ (6.02 \ dB)$
#6	$2.82843 \ (9.03 \ dB)$
#8	4.00000 (12.04  dB)
#10	$5.65685 \ (15.05 \ dB)$
#12	8.00000 (18.06  dB)
#13	11.31371 (21.07 dB)
#14	16.00000 (24.08  dB)
#15	$22.62742 \ (27.09 \ \mathrm{dB})$

表 3.2: HxRG Testing Software での設定値と増幅率の関係。3 dB ごとに 11 段階の設定が可能。

 $G \lesssim 6.55$ となる。したがって、ソフトウェア上の設定値としては#10以下にする必要がある。

次に、増幅率と読み出しノイズの関係について考える。読み出しノイズ  $\sigma_{read}$  [e<sup>-</sup>] は、 ADC 以前で生じるノイズ  $\sigma_{e}$  [e<sup>-</sup>] と ADC で生じるノイズ  $\Sigma_{ADU}$  [ADU] に分けることがで きる。1 ADU のカウント差に対応する電子数を ADU-エレクトロン変換係数(コンバー ジョンファクター)と呼び、 $g_c$  [e<sup>-</sup>/ADU] と表す。このとき、読み出しノイズは

$$\sigma_{\rm read} = \sqrt{\sigma_{\rm e}^2 + (g_c \Sigma_{\rm ADU})^2 \ [e^-]}$$
(3.2)

と表される。 $\sigma_e \ge \Sigma_{ADU}$ が回路により一定であるとすれば、式 3.2 はコンバージョンファ クターが小さいほど全体の読み出しノイズが小さくなることを示している。電子数は検出 器出力電圧に比例するので、コンバージョンファクターはコンバージョンゲインに比例し、 式 3.1 から増幅率には反比例する。したがって、Preamp での増幅率 *G* が大きいほどコン バージョンファクター  $g_c$  は小さくなり、読み出しノイズが小さくなる。

以上の理由から、本研究では Preamp ゲインの設定値として#10 を使用することとする。このとき HAWAII-2RG の飽和電子数は約 57000 ADU に対応する。

# 3.2 新型フラットケーブルの製作

SIDECAR ASIC と JADE2 Card の接続に用いるフラットケーブルは新規に製作した<sup>1</sup>。 写真を図 3.2 に示す。長さは 1.7 m、幅は 5.5 cm であり、140 ピンを通している。ケーブル に通っているラインは大きく分けて電源線と Low Voltage Differential Signaling (LVDS) 信号線の 2 種類がある。信号に外的なノイズが混入することを防ぐために、アナログとデ ジタルの電源線をそれぞれのグラウンド (GND)で挟み込んでシールドしている。FPC

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>沖電線株式会社、神奈川県川崎市中原区、http://www.okidensen.co.jp/jp/

構造のため柔軟であり、複雑な経路を通るSWIMSでの使用にも耐えうる。真空冷却環境でこのケーブルの動作試験を行い、問題なく動作することを確認した。



図 3.2: 新たに製作したフラットケーブル

# 3.3 HAWAII-2RG 複数台同時駆動の実現

### **3.3.1** 検出器制御用 PC と Windows 仮想マシン

検出器制御用の PC は 2 台あり、Red Arm と Blue Arm の HAWAII-2RG をそれぞれ 1 台の PC で制御する。OBCP が Linux であるため、検出器制御用 PC もこれに揃えて Linux (CentOS 6.7)を使用する。それぞれの PC が複数台の HAWAII-2RG を制御することに なり、また HxRG Testing Software は Windows 上でしか動作しないので、VMware<sup>2</sup>を 用いて Linux PC 上に Windows 仮想マシンをインストールする。1 台の HAWAII-2RG に つき 1 台の仮想マシンを対応させ、Windows 上で HxRG Testing Software を立ち上げて 制御する。この方式を採用することで、今後検出器の数を増やした場合にも、仮想マシン の数を増やすことで実際の制御用 PC 台数を保ったまま対応できると考えられる。

仮想マシンを用いて検出器の駆動を行う際には、VMwareの設定により検出器制御用 PC の USB ポートをそれぞれの Windows に配分し、JADE2 Card と HxRG Testing Software の対応付けを行う。この設定は仮想マシンをシャットダウンした際などにも基本的には 保存され、それぞれの仮想マシンが担当する HAWAII-2RG の同一性は保たれる。また、 VMware ではホストである検出器制御用 PC との共有フォルダを設定することができる。 HxRG Testing Software で読み出した画像データや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、検出器制御用 PC と仮想マシンの間でデータを共有すること ができる。

### 3.3.2 HxRG Testing Software とのソケット通信

複数の HAWAII-2RG を同時に駆動するためには、HxRG Testing Software を GUI で はなくコマンドライン上で制御しなければならない。ここで、HxRG Testing Software の ソケット通信を用いた制御について説明する。

2.1.3 で述べた Socket Server は、HxRG Testing Software 上の設定で有効にすることで コマンド入力の受付が可能な状態となる。コマンドは文字列で定義されており、設定パラ

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>http://www.vmware.com/jp.html

メータがある場合は「example(n)」のように指定する。表 3.3 に実際のコマンドの一部を 示す。コマンドの入力は別のコマンドの実行中にも行うことができるが、基本的には逐次 実行される。ただし、サンプリングの実行中に「StopAcquisition」コマンドを入力した場 合には、サンプリングの終了を待たずにただちに積分が停止される。

以上より、複数台のHAWAII-2RGを同時に駆動するには複数のHxRG Testing Software とソケット通信を行い、同時にコマンドを入力できるようにすることが求められる。

コマンド	機能			
Initialize3	SIDECAR ASIC への電源投入、IDE の起動			
SetGain(n)	Preamp <b>ゲインの指定</b>			
SetFSMode(n)	サンプリングモードの指定			
A cquire Ramp	サンプリングの開始			
StopAcquisition	積分の停止			

表 3.3: HxRG Testing Software の Sockt Server に入力するコマンドの例

### 3.3.3 検出器コントロールシステム

複数の HAWAII-2RG を同時に駆動するために我々が開発したシステムの概念図を図 3.3 に示す。このシステムは OBCP 上のクライアント、検出器制御用 PC 上のデバイスマネー ジャ、HxRG Testing Software の 3 つの要素で構成されている。また、デバイスマネージャ はクライアントからのコマンドを受け付けるサーバーと、HxRG Testing Software との ソケット通信を担うスクリプトから成る。クライアントに入力されたコマンドはソケット 通信によりデバイスマネージャのサーバーへ送られ、形を整えられてから HxRG Testing Software に伝えられる。例えば、クライアントに「*set\_fs\_mode(n)*」というコマンドを入 力すると、デバイスマネージャによって HxRG Testing Software に「*SetFSMode(n)*」と いうコマンドが送信され、サンプリングモードの選択が行われる。また、マルチスレッド により複数の処理を並列して行うことができる。

OBCP とデバイスマネージャ間の通信は非同期であり、別のコマンドの処理中であって も新たなコマンドを入力することが可能である。積分を中断するコマンドが入力されると Interruptor スレッドによる割り込みが起こり、積分が停止される。また、デバイスマネー ジャは OBCP 上の RDBMS との通信も担っており、データベースからの情報取得や、デー タベース上の情報の更新などを行うことができる。

これらのソフトウェアは SWIMS ICS への組み込みを可能にするため、HxRG Testing Software 以外は全て Python で記述されている。socket モジュール、threading モジュー ル、MySQLdb モジュールなどを用いて上記の機能を実現している。



図 3.3: SWIMS の検出器コントロールシステムの概念図

### 3.4 取得画像処理

HAWAII-2RG は CMOS センサと同様に非破壊読み出しが可能である。つまり、読み出 しの際に蓄積された電荷がリセットされず、積分を続けながら複数回のサンプリングを行 うことができる。このようなサンプリング手法はマルチサンプリングと呼ばれ、Fowler サ ンプリングと Ramp サンプリングに大別される。ここでは、HxRG Testing Software にお ける Fowler サンプリングと Ramp サンプリングの挙動について説明し、それぞれの場合 における SWIMS 検出器システムでの画像処理方法について述べる。

#### 3.4.1 Fowler サンプリング

図 3.4 は Fowler サンプリング (Fowler and Gatley, 1990)の概念図であり、HxRG Testing Software 上で設定可能なパラメータは  $n_{reset}$ ,  $n_{read}$ ,  $t_{exp}$ ,  $n_{ramp}$  の4種である。 $n_{reset}$  は 積分開始前のリセット回数を決める。積分を開始してまず初めに  $n_{read}$ 回の読み出しを 行い、その後  $t_{exp}$  秒時間をおいて再度  $n_{read}$ 回の読み出しを行う。したがって、積分の 前半と後半でそれぞれ  $n_{read}$  枚の画像が生成される。 $n_{ramp}$ は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を決定する。HxRG Testing Software では、特に  $n_{reset} = 1$ ,  $n_{read} = 1$ ,  $t_{exp} = 0$ ,  $n_{ramp} = 1$ の場合を Correlated Double Sampling (CDS) として定義している。

HxRG Testing Software は前半と後半それぞれ *n*<sub>read</sub> 枚の画像を平均してから、参照ピクセルを用いてバイアス電圧の変動を補正した上で差分画像を作成し、CDSResult.fits という名前を付けて最終画像を出力する。*n*<sub>ramp</sub>の値に関わらず、生成される最終画像は1枚である。

我々は今後の拡張性などを考慮し、HxRG Testing Software と同様の処理を行うシステムを Python で実装した。図 3.5 に、HxRG Testing Software により生成された最終画像と、我々のシステムが生成した最終画像の例を示す。両者のカウントの差は最大でも

 $\sim 10^{-6}$  ADU 程度であり、HxRG Testing Software の処理を良く再現できていることが確かめられた。



図 3.4: Fowler サンプリングの概念図



図 3.5: 左: HxRG Testing Software により生成された最終画像。右: 我々のシステムにより生成 された最終画像。サンプリング時のパラメータは  $n_{\text{reset}} = 1, n_{\text{read}} = 1, t_{\text{exp}} = 0, n_{\text{ramp}} = 1$ に設定。

# 3.4.2 Ramp サンプリング

Ramp サンプリングの概念図を図 3.6 に示す。HxRG Testing Software 上で設定可能な パラメータは  $n_{\text{reset}}, n_{\text{read}}, n_{\text{drop}}, n_{\text{group}}, n_{\text{ramp}}$  の 5 種で、 $n_{\text{reset}} \ge n_{\text{ramp}}$  は Fowler サンプ リングと同様である。Ramp サンプリングでは読み出しを前半と後半に分割せず、 $n_{\text{read}}$  回 の読み出しと n<sub>drop</sub> 回の空読み出しを 1 グループとし、これを n<sub>group</sub> 回行う。ただし、現 状では n<sub>drop</sub> に関してソフトウェア上で値を変更しても挙動の変化が確認できていない。



図 3.6: Ramp サンプリングの概念図。最終グループでは ndrop 回の空読み出しは行われない。

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 サンプリングである(Garnett and Forrest, 1993)。しかし、HxRG Testing Software で は Ramp サンプリングを実行した際に最終画像が生成されない。そのため、実際に Ramp サンプリングでの観測を可能にするために、取得した画像を処理して最終画像を生成する 機能を実装する必要がある。Ramp サンプリングの最終画像は Fowler サンプリングのよう な差分画像ではなく、各ピクセルが自身の単位時間当たりのカウント増加量(ADU/sec) を値として持つ画像である。

我々のシステムでは、全てのピクセルについてカウントの時間変化をフィッティングし、 その傾きをカウントとして持つ最終画像を生成する。このとき、Fowler サンプリングでの 参照ピクセルの使い方を参考にして、1回目の読み出しで取得した画像を基準としたバイ アス電圧変動の補正を行う。補正後のカウントを最小二乗法でフィッティングし、傾きを 算出して最終画像を生成する。

このようにして生成された最終画像の妥当性を検証するために、同一の画像群から Fowler サンプリングと Ramp サンプリングそれぞれの手法で最終画像を生成して比較した。具体 的にはまず、 $n_{reset} = 1$ ,  $n_{read} = 64$ ,  $n_{drop} = 0$ ,  $n_{group} = 2$ ,  $n_{ramp1} = 1$  として光を入射せず に画像を取得した。これは、 $n_{read} = 64$ ,  $t_{exp} = 0$  とした Fowler サンプリングと全く同じ であり、合計 128 枚の画像が生成される。Fowler サンプリングの手法では前半後半それぞ れ 64 枚を平均して差分画像を作るため、最終画像の正味の積分時間は 1.48 × 64 = 94.72 秒である。ただし、1.48 秒とは我々の用いている設定で HAWAII-2RG を駆動したときに 1 回の読み出しに要する時間である。Ramp サンプリングの最終画像は、全 128 枚の画像 を用いてピクセルごとにカウントをフィッティングしたときの傾きを値に持つので、この 値を 94.72 倍すると Fowler サンプリングの手法で作られた最終画像と理想的には一致す るはずである。これらの画像を図 3.7 に示す。Fowler サンプリングの手法で作られた最終 画像の平均カウント 30.1 ADU に対して、差は平均で ~ 10<sup>-2</sup> ADU 程度であり、Ramp サ ンプリングの最終画像として妥当なものが生成できていることを確認した。ただし、現時 点ではピクセルカウントの線形性の変化を考慮していない。フィッティングの際に線形性 補正を加えることにより、より信頼性の高い最終画像を生成することができる。



図 3.7: 左: Ramp サンプリングで取得した 128 枚の画像を使用して、Fowler サンプリングの手法 で生成された最終画像。正味の積分時間は 94.72 秒。右:同じ画像を用いて Ramp サンプリングの 手法で生成された最終画像に 94.72 をかけたもの。

すべての画像を用いてフィッティングする際には、宇宙線の衝突などによる外れ値に注 意する必要がある。我々のシステムは飽和したピクセルのみを除外してフィッティングす るようになっているが、本来はロバスト線形回帰などを用いてより高精度のフィッティン グを行うことが望ましい。Python では theilslopes というロバスト線形回帰モジュールが 使用可能であるが、1 ピクセルあたりの処理に 0.488 ms と時間がかかりすぎるため使用を 断念した。フィッティング精度の向上に関しては、C 言語の使用による高速化の検討など も含め今後の課題である。

# 3.5 処理の流れ

最後に、今回開発したシステムを用いたすばる望遠鏡での観測時に行われる処理の流れ について説明する。Blue Arm に搭載された HAWAII-2RG のうち1台を駆動して画像取 得する際のシーケンス図を図3.8 に示す。2台同時に駆動する場合はもう1台についても 同様の処理が実行される。ここでは処理開始時の状態として、「*Initialize3*」コマンドによ る HAWAII-2RG の初期化と「*GetConfig*」コマンドによる開始時のパラメータ取得を終 えていることを仮定する。

まず、OBCP に「SET\_H2RG(n)」コマンドを入力し、観測者の希望するサンプリング 手法や読み出し回数、積分時間といったパラメータを設定する。デバイスマネージャは指 定されたパラメータの値をデータベースに保存されている情報と照らし合わせ、値が異な る場合はHxRG Testing Software に「SetDetector(n)」コマンドを送ってパラメータを変 更し、データベースの情報も更新する。 その後データベースと通信してその時点でのサンプリングモードの設定を取得し、設定 に合わせて総観測時間と適当なパラメータを計算してデータベースの情報を更新する。具 体的には以下の通りである。

• Fowler サンプリング ( $n_{ramp} = 1$ )の場合 観測者が指定する1ピクセルあたりの積分時間を $t_{pix}$  [s] とする。Fowler サンプリン グのパラメータで積分時間に関係するのは、前半後半のインターバルの長さ $t_{exp}$  [s] と読み出し回数  $n_{read}$  である。したがって、指定された $t_{pix}$  に対して

$$t_{\rm pix} = t_{\rm exp} + t_{\rm read} \times n_{\rm read} \tag{3.3}$$

となるように  $t_{exp}$  と  $n_{read}$  を決定する。ただし、 $t_{read}$  [s] は 1 回の読み出しに要する時間であり、駆動時の設定により変化する。また、積分時間以外に費やす時間 (オーバーヘッド)  $t_{overhead}$  [s] はサンプリング開始前のパラメータ設定に要する時間、指定した回数 ( $n_{reset}$ )のリセットに要する時間 ( $\sim 2.5$  s) 他のピクセルの読み出しに要する時間、最終画像生成に要する時間 ( $\sim 1.5$  s)の合計である。したがって、

$$t_{\text{overhead}} \approx t_{\text{read}} \times n_{\text{reset}} + t_{\text{read}} \times n_{\text{read}} + 2.5 + 1.5 \tag{3.4}$$

となり、 $t_{\text{pix}} \ge t_{\text{overhead}}$ の合計が総観測時間となる。

• Ramp サンプリング ( $n_{drop} = 1, n_{group} = 1, n_{ramp} = 1$ )の場合 積分時間に関係するパラメータは $n_{read}$ のみなので、

$$t_{\rm pix} = t_{\rm read} \times n_{\rm read} \tag{3.5}$$

となるように n<sub>read</sub> を決定すればよい。オーバーヘッドに関しては Fowler サンプリ ングの場合と同様に考えるので、

$$t_{\text{overhead}} \approx t_{\text{read}} \times n_{\text{reset}} + t_{\text{read}} + 2.5 + t_{\text{ramp}}$$
 (3.6)

となる。ただし、 $t_{ramp}$  [s] は Ramp サンプリングの最終画像生成に要する時間であ り、現時点では  $n_{read}$  によって異なる。

このようにして計算した総観測時間は、すばる望遠鏡 OCS のデータベースに記録される。 続いて、OBCP に積分開始のコマンド「*ACQ\_H2RG(n)*」が入力される。このコマン ドは最終画像に与えられるフレーム ID を引数に持つ。コマンドを受け取ったデバイスマ ネージャはまず HxRG Testing Software に「*PING*」コマンドを送り、積分開始が可能か どうかを確認する。その後、その時点で保持しているヘッダ情報を削除し、データベース からデフォルトの値を取得して初期化する。

この処理が終わるとHxRG Testing Software に「*AcquireRamp*」コマンドが送られ、設定したパラメータでのサンプリングが開始される。このとき、積分開始前と積分開始直後、半分終了時、終了時に適宜データベースと通信して各種情報を更新する。また、Rampサンプリングの際には、別のスレッドを立ち上げることで読み出しと出力画像の処理を並行して行えるようにする。具体的には、出力された画像に対して順次バイアス電圧変動の補正

を施し、積分終了後ただちに最終画像の生成を始められるようにする。積分途中で OBCP に中断命令が届いた場合は Interruptor スレッドを立ち上げて HxRG Testing Software に 「*StopAcquisition*」コマンドを送り、積分を停止する。

積分が無事に終了しデータベース更新が完了したあとは、全てのヘッダ情報をデータ ベースから取得して保存する。最後に、新たなスレッドを立ち上げて「*create\_FITS*」コ マンドを実行し、最終画像を生成する。新たなスレッドで最終画像生成が始まった時点で デバイスマネージャは OBCP に返答し、次のコマンドが入力可能となる。最終画像が保 存されるディレクトリは OBCP によって監視されており、生成が完了するとフレーム ID が与えられ、アーカイブが実行されてすばる望遠鏡 OCS の FITS Viewer に表示される。 その後、観測を終了する場合は SIDECAR ASIC の電源を落とすコマンドを送る。



### 第3章 検出器システムの開発



# 第4章 システム性能評価

ここでは、開発したシステムを用いて実際に HAWAII-2RG を駆動したときに得られ る性能について述べる。以下では、試験用デュワーと SWIMS メインデュワーそれぞれ に HAWAII-2RG を搭載して行った性能評価試験の結果について述べる。なお、4 台の HAWAII-2RG のうち2 台については検出器の劣化が著しく別の HAWAII-2RG との交換が 予定されているため、結果は省略した。以下では、CDS 画像という言葉は 3.4.1 の Fowler サンプリングで  $n_{\text{reset}} = 1, n_{\text{read}} = 1, n_{\text{ramp}} = 1$  として取得した画像を指すこととする。

# 4.1 試験用デュワーでの試験

#### 4.1.1 試験環境

SWIMS メインデュワーでの試験に先駆け、検出器駆動試験のために製作したデュワー<sup>1</sup> (図 4.1)を用いて読み出しノイズ測定試験を行った。このデュワーには HAWAII-2RG、 SIDECAR ASIC、JADE2 Card を複数台搭載可能であり、液体窒素により ~ 80 K まで 冷却することにより SWIMS メインデュワーに近い環境で HAWAII-2RG を駆動すること ができる。この試験における HAWAII-2RG 駆動パラメータは表 4.1 の通りである。



図 4.1: 試験用デュワーに検出器カセットと JADE2 Card を取り付けたときの様子。検出器カセットには HAWAII-2RG と SIDECAR ASIC のペアが 2 組搭載されており、低温真空下で駆動する。 JADE2 Card は常温真空に保たれる。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>鈴木商館、東京都板橋区舟渡、http://www.suzukishokan.co.jp

表 4.1: 試験用デュワーでの HAWAII-2RG 駆動パラメータ。読み出しクロックモード、Preamp 参 照電圧入力モードに関しては 4.2.4 参照。

パラメータ	設定値
ピクセル読み出しレート	100  kHz
出力チャンネル数	32  CH
読み出しクロックモード	Normal Clocking
Preamp 参照電圧入力モード	InPCommon
Preamp ゲイン	#10, G = 5.66
コンバージョンファクター	$2.28~{\rm e^-/ADU}$

#### 4.1.2 読み出しノイズ測定方法

本研究で用いる読み出しノイズ測定方法について説明する。読み出しノイズは原理的に はフォトントランスファー法(4.2.3 参照)により決定されるが、CDS 画像のカウント分 布から簡単に見積もることができる。具体的にはまず、 $t_{exp} = 0$ とした CDS 画像を 2 枚 取得する。理想的には、それぞれの画像でカウントの標準偏差  $\Sigma$  [ADU] は ADU 単位で の読み出しノイズになっているはずなので

$$\Sigma = \frac{\sigma_{\text{read}}}{g_c} \tag{4.1}$$

と表せる。ここで、 $\sigma_{read}$  [e<sup>-</sup>] は読み出しノイズであり、 $g_c$  [e<sup>-</sup>/ADU] はコンバージョンファクターである。これら 2 枚の CDS 画像の差分画像を作ると、差分画像のカウントの標準偏差  $\Sigma'$  [ADU] は誤差伝播の法則から

$$\Sigma' = \sqrt{\Sigma^2 + \Sigma^2} = \sqrt{2}\Sigma \tag{4.2}$$

となる。ここで差分画像を考えるのは、実際の検出器で存在し得るノイズの固定パターン などの影響を除くためである。式 4.2 から、実際に取得した CDS 画像から作成した差分 画像のカウント標準偏差  $\Sigma'_{real}$  [ADU] を測定することにより、

$$\frac{\Sigma_{\rm real}'}{\sqrt{2}} \simeq \Sigma \tag{4.3}$$

として ADU 単位での読み出しノイズを見積もることができる。これにコンバージョンファ クターをかけることで、

$$\sigma_{\rm read} = \frac{g_c \Sigma'_{\rm real}}{\sqrt{2}} \tag{4.4}$$

として読み出しノイズが計算できる。今回の試験では $t_{exp} = 0$ の CDS 画像を 5 枚取得し て合計 10 枚の差分画像を作成し、それぞれの標準偏差を 1.41 で割ったものの平均を読み 出しノイズとして測定する。

#### 4.1.3 HAWAII-2RG 同時駆動時のノイズ増加

試験用デュワーを用いて HAWAII-2RG の単独駆動および 2 台同時駆動を行った。ただ し、単独駆動とはデュワーに搭載された 2 台の HAWAII-2RG のうち 1 台のみに電源を投入 して駆動することを意味する。図 4.2 はそれぞれで取得した CDS 画像である。2 台同時に 駆動して取得した CDS 画像には、単独駆動時の画像には見られなかった短周期 (~5 Hz) のノイズパターンと縦方向の引っかき傷のようなパターンが現れており、読み出しノイズ は単独駆動時に 24 [e<sup>-</sup>] r.m.s. だったものが 92 [e<sup>-</sup>] r.m.s. と 4 倍に増加した。この現象は 以前から確認されており、3.2 で述べたシールド付きケーブルにより改善すると予想され ていた。



図 4.2: 単独駆動と2台同時駆動それぞれで取得した CDS 画像。左が単独駆動、右が2台同時駆動のもの。

#### 4.1.4 フラットケーブルのシールド加工による改善

藤堂氏の実験によれば、2台同時駆動時のノイズ増加はSIDECAR ASIC とJADE2 Card を接続するフラットケーブル間の干渉であり、ケーブルをアルミ箔で覆うことで改善する。 そこで我々は3.2のフラットケーブルの片面をアルミテープで覆い、もう一方の面を削っ て GND 線を露出させ銅板を半田付けし、アルミテープと GND 線を接続した。さらに、 銅線を用いてアルミテープをデュワーのグラウンドと接続した(図4.4)。

上記のシールド加工を施したケーブルを用いて取得した同時駆動時の CDS 画像が図 4.4 である。短周期のノイズパターンは消え、読み出しノイズも 33 [e<sup>-</sup>] r.m.s. と大幅に改善した。一方で、縦方向のパターンは依然として見えている。このパターンの原因に関しては 4.2.4 で考察する。



図 4.3: アルミテープによるシールド加工を施したフラットケーブル。銅板は裏面の露出した GND 線(アナログ、デジタル)と半田付けされており、銅線を用いてデュワーのグラウンドと接続される。



図 4.4: シールド加工を施したケーブルを用いて取得した2台同時駆動時の CDS 画像

# 4.2 SWIMS メインデュワーでの試験

### 4.2.1 試験環境

SWIMS メインデュワーに 4 台の HAWAII-2RG を搭載して各種性能評価試験を行った。 駆動パラメータに関しては基本的に 4.1 と同じであるが、一部の試験ではこれらのパラメー タを変更してその影響を調べる。また、SIDECAR ASIC と JADE2 Card を接続するフ ラットケーブルに関しては 4.1.4 のシールド加工を施したもののみを使用する。

### 4.2.2 サンプリング中に生じるエラー

HAWAII-2RGを駆動している際、特に Fowler サンプリングと Ramp サンプリングにおいて読み出し回数が多い場合に、いくつかのエラーが生じることが判明した。これらのエ

ラーの内容と対処法について述べる。

#### HxRG Testing Software のフリーズ

連続して複数回の読み出しを行う際に、途中で HxRG Testing Software がフリーズす ることがあった。ソフトウェアがフリーズしてしまうとサンプリングの中止や検出器への 電源供給停止も行えなくなるため、Windows 仮想マシン自体を再起動してソフトウェア を立ち上げ直す必要がある。このフリーズは、検出器 PC において JADE2 Card との接 続に使用している USB2.0 ケーブルの差込口を変更する、Windows 仮想マシンと USB2.0 ケーブルの対応を変更するといった対処により解決する。理由は不明だが、機器同士の間 に相性のようなものが存在すると考えられる。表 4.2 に、SWIMS 検出器システムの現時 点でのハードウェアとソフトウェアの対応を示す。

HxRG Testing Software がフリーズして Windows 仮想マシンを再起動した直後は Windows が USB2.0 を認識できていないので、一度検出器 PC 側で USB2.0 ケーブルを抜いて から挿し直す必要がある。Windows と USB2.0 の対応変更は、Windows デスクトップ画 面上のアイコンをクリックすることで行うことができる。

表 4.2: SWIMS 検出器システムのハードウェア・ソフトウェア対応表。satsuki と may は検出器制 御用 PC の名前。

機器/PC	satsuki	(Blue)	may (	Red)
HAWAII-2RG	#191	#196	#206	#208
SIDECAR ASIC	#46	#54	#52	#48
JADE2 Card	#178	#164	#186	#181
Windows の名前	jiji	kiki	teto	yupa
USB2.0 <b>の番号</b>	3	4	1	2
電源番号	C(15)	D(20)	A(5)	B(10)

#### タイムアウトエラー

複数回の読み出しを行っている途中で、"Science data acquisition - FIFO counter time out "と表示されてサンプリングが中止されることがある。これは、我々が設定したサンプ リング1回あたりの制限時間を超えたときに起きるエラーである。制限時間は、パラメー タから想定される必要時間に数秒加えたものである。同じ条件でのサンプリングに要する 時間はほぼ同じだと考えられるが、実際には時折上記のエラーが発生する。この原因は、 稀(100回に1回以下)にHxRG Testing Software が指定されたよりも長い積分時間を設 定するためであると考えられる。そのため、制限時間を数秒延長することによりエラーが 発生する頻度は減少した。しかし、実際にソフトウェアによって何秒程度積分時間が改変 されるのかは不明である。また、ヘッダ情報にはこちらの指定した積分時間が保存される ため、改変された画像を簡単に判別することも困難である。このように、現時点ではこの 減少に対する根本的な解決には至っていない。 4.2.3 ADU-エレクトロン変換係数(コンバージョンファクター)

フォトントランスファー法

コンバージョンファクター g<sub>c</sub> [e<sup>-</sup>/ADU] は、フォトントランスファー法 (Janesick et al., 1987)を用いて測定する。フォトントランスファー法では、光を入射して取得した CDS 画像のカウントの分散は光子のポアソンノイズと読み出しノイズの二乗和であると考える。 すなわち、

$$g_c^2 \Sigma^2 = \left(\sqrt{g_c M}\right)^2 + \sigma_{\text{read}}^2$$
  
$$\Sigma^2 = \frac{M}{g_c} + \left(\frac{\sigma_{\text{read}}}{g_c}\right)^2$$
(4.5)

という式が成り立つ。ここで、 $\Sigma^2$  [ADU<sup>2</sup>] は CDS 画像のカウントの分散、M [ADU] は カウント、 $\sigma_{read}$  [e<sup>-</sup>] は読み出しノイズである。ただし、検出器では1個の光子につき1個 の電子が生じると仮定している。 $\Sigma^2$  とM の値は取得した CDS 画像から測定可能なので、 a, b をパラメータとして

$$\Sigma^2 = aM + b \tag{4.6}$$

という形でフィッティングすることができる。フィッティングによって決められたa, bと式4.5から、

$$g_c = \frac{1}{a} , \ \sigma_{\text{read}} = \frac{\sqrt{b}}{a}$$
 (4.7)

としてコンバージョンファクターと読み出しノイズが求められる。

測定方法

今回の測定で使用する画像は Red Arm に搭載された HAWAII-2RG #206 を単独で駆動して取得した。他の3台については、電源が投入されていない状態にしておく。

手順としてはまず、K1、K2バンドの中間帯域フィルターとKsバンド広帯域フィルター の CDS 画像( $t_{exp} = 0$ )を複数枚取得する。次に、取得した画像のカウントが十分高い領 域(図 4.5)を  $16 \times 16(= 256)$  mathrmpix の小領域に分割する。これは、入射光の場所ご との非一様性を無視できるようにするためである。その後、入射光の時間変動の影響を取 り除くため、小領域ごとに領域内の全ピクセルの平均値が同じバンドで取得した画像全て で等しくなるようにスケーリングする。最後に各ピクセルごとに平均カウントと不偏分散 を計算し、式 4.6 の形でフィッティングしてコンバージョンファクターを決定する。今回 の試験では光源として特別なものを用意せず、照明の点いた実験室の背景光を利用した。

当初は 20 枚の画像を取得して測定を行ったが、ピクセルカウント分散の測定精度が十分でなかった。そのため今回の試験では各バンドで 400 枚ずつ画像を取得して測定を行う こととした。図 4.6 に、使用する画像の枚数によるピクセル標準偏差の分布の違いを示す。



図 4.5: Ks バンド広帯域フィルターで取得した画像。試験用のスリットマスクが搭載された状態で 取得したため、測定にはカウントが一様に高い赤枠内の領域(2048 × 224 pix)のみを使用する。 バンドごとに異なるのはカウントのみであり、領域内のカウントの平均値は Ks が ~ 6000 ADU、 K1、K2、K3 がそれぞれ ~ 1000 ADU、~ 3000 ADU、~ 9000 ADU となっている。

#### 結果

32 チャンネルのうちひとつについて、横軸にカウント、縦軸に不偏分散をプロットして フィッティングしたものを図 4.7 に示す。フィッティングにより得られたコンバージョン ファクターは  $g_c \sim 2.37$  (32 チャンネルの平均)である。この結果は、藤堂(2015)で得ら れた  $g_c \sim 2.28$  という結果と矛盾しない。一方で図 4.7 ではピクセルごとの分散にばらつ きが見られる。各チャンネルごとに読み出し回路は共通であるから、コンバージョンファ クターに大きなばらつきが存在するとは考えづらい。このばらつきの原因には分散の測定 誤差が考えられ、さらに多くの画像を用いることで改善する可能性があるが、読み出しノ イズ(数十 ADU)の影響によりある程度のばらつきは必ず存在する。

藤堂(2015)の測定ではフィッティング時のばらつきは見られない(図4.8)。藤堂(2015) と今回の測定は3つの点で異なり、それらがフィッティング結果に差異を生じさせている 可能性がある。まず、我々が複数のフィルターを用いてカウントの異なる画像を取得した のに対し、藤堂(2015)では検出器全体に非一様な光を入射して領域ごとのカウントに差 をつけた。また、我々が各チャンネルを16×16 pixの小領域に分割したのに対して、藤堂 (2015)では32×32 pixの領域に分割している。さらに、フィッティングは我々がチャン ネル内の全ピクセルを用いて行ったのに対して領域内の平均値を用いている。このうち、 小領域の定義の差異に関してはほとんど影響が無いことを確かめた。フィッティングの手 法に関しては、藤堂(2015)では領域内を平均しているためにピクセルごとのばらつきを 見落としてしまっていて、それが結果に影響を及ぼしている可能性がある。ピクセルのカ ウント範囲を広げる方法として、異なるフィルターで画像を取得することと非一様な光を 入射することの間に本質的な違いがあるかどうかは確認できていない。

このように測定方法は多少異なるが、いずれの場合でも各チャンネルで $g_c \sim 2.2$ 2.4 [e<sup>-</sup>/ADU] という値が得られた。したがって、本研究では結果を比較しやすいよう にこれまでの試験で用いてきた $g_c = 2.28$  [e<sup>-</sup>/ADU] という値を使用することとした。



図 4.6: Ks バンドの画像を用いて測定した各ピクセルの標準偏差の分布。左は 20 枚、右は 400 枚の画像を用いて測定。軸のスケールが異なることに注意。

4.2.4 読み出しノイズ

測定方法

読み出しノイズの測定方法は、基本的には 4.1.2 と同様である。ただし、Fowler サンプリングの読み出し回数 *n*<sub>read</sub> を変更した際には、最終画像を CDS 画像と同じように処理して読み出しノイズを算出する。

#### 駆動モードの最適化

HxRG Testing Software で設定可能な Preamp 参照電圧入力モードを、読み出しノイズ が小さくなるように選択する。Preamp 参照電圧入力モードには InPCommon と VrefMain の 2 種類があり、SIDECAR ASIC の Preamp (図 2.5) へ入力する参照電圧が異なる(表 4.3)。

表 4.3: Preamp 参照電圧入力モードと入力電圧の対応表。InPCommon、Vref1、VrefMain は SIDE-CAR ASIC 内で生成される参照電圧であり、Gnd は SIDECAR ASIC のグラウンド、Padp は検 出器出力電圧である。

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

ソフトウェア上では読み出しクロックの生成モードも変更可能あり、Normal Clocking と Horizontal Enhanced Clocking のどちらかを選択する。これらのモードでは読み出し の際に SIDECAR ASIC から HAWAII-2RG に送られるクロックパターンが異なる。

Preamp 参照電圧入力モードと読み出しクロック生成モードの組み合わせによる読み出 しノイズの変動は図 4.9 の通りである。HAWAII-2RG #196 と#206 どちらについても、



図 4.7: ひとつのチャンネル内のピクセルについて、横軸に各バンドで取得した画像のピクセルカ ウント、縦軸に不偏分散をプロットして直線フィッティングしたもの。分布が集中しているカウン トは各バンドでの平均カウントに対応する。

VrefMain モードで駆動したときよりも InPCommon モードで駆動したときのほうが読み 出しノイズは小さく、チャンネル間でのばらつきも小さい。したがって、Preamp 参照電 圧入力モードは InPCommon を使用する。読み出しクロック生成モードによる違いはわず かだが、#196 の結果から Normal Clocking モードを選択する。

#### マルチサンプリングによる読み出しノイズ低減

Fowler サンプリングで  $n_{read}$  を増加させると、理想的には読み出しノイズは  $\sigma_{read} \propto n_{read}^{-0.5}$ にしたがって減少すると考えられることを説明する。Fowler サンプリングの読み出し回数 が  $n_{read}$  のとき、前半と後半それぞれ  $n_{read}$  枚の画像を平均して差分画像を作成し、最終画像を生成する。このとき最終画像は、 $n_{read}$  枚の CDS 画像を平均した画像であると考える ことができる。4.1.2 と同様、同条件で取得した CDS 画像のカウントの標準偏差は式 4.1 で表すことができるので、それらを平均した画像の標準偏差  $\Sigma'_{mean}$  [ADU] は

$$\Sigma_{\rm mean}' = \frac{\sqrt{n_{\rm read}\Sigma^2}}{n_{\rm read}} = \frac{\Sigma}{\sqrt{n_{\rm read}}}$$
(4.8)

となる。式 4.8 から、Fowler サンプリングの読み出し回数を増やすほど、 $\sigma_{\rm read} \propto n_{\rm read}^{-0.5}$ にしたがって読み出しノイズは減少すると期待される。

#### 結果

n<sub>read</sub>を1から64まで増加させて読み出しノイズを測定した結果を表4.4に示す。図4.10 は、単独駆動、2台同時駆動、4台同時駆動時のn<sub>read</sub>と読み出し回数の関係をプロット したものである。いずれの場合でも読み出し回数を増やすにつれ読み出しノイズは減少



図 4.8: あるチャンネルについてカウントと分散をフィッティングした図(藤堂, 2015)。 プロット 点ひとつは 32 × 32 pix 領域の平均値。



図 4.9: HAWAII-2RG #196 と#206 について、モードを変更して読み出しノイズを測定した結果。 横軸がチャンネル番号、縦軸が ADU 単位での読み出しノイズとなっている。

し、ほとんどは  $n_{\text{read}} = 32$  のときに極小となる。徐々に理想曲線からのずれが大きくなり  $n_{\text{read}} > 32$  で読み出しノイズが上昇に転じる要因としては、積分時間が長くなることによる暗電流の影響などが考えられる。また、複数台同時駆動時に単独駆動時よりもノイズが大きくなる原因は、4.1.4 で述べた縦方向のパターンであると思われる。

SWIMSの読み出しノイズに対する要求性能は $\sigma_{read} > 14.5$  [e<sup>-</sup>] r.m.s. であり、 $n_{read} > 4$ とすることで複数台同時駆動時にも十分小さな読み出しノイズを達成できることが示された。

#### 同時駆動のタイミングのずれ

4.1.4 で述べた同時駆動時の画像に現れる縦方向のパターンについて、原因究明のため 設定を様々に変えて HAWAII-2RG を駆動した。その結果、このパターンは読み出し中に



図 4.10: HAWAII-2RG #196 と#206 の  $n_{\text{read}}$  と読み出しノイズの関係。青、緑、赤の曲線がそれ ぞれ単独駆動、2 台同時駆動、4 台同時駆動に対応。点線は単独駆動の  $n_{\text{read}} = 1$  での読み出しノ イズを初期値として  $\sigma_{\text{read}} \propto n_{\text{read}}^{-0.5}$  にしたがって減少する理想的な曲線。

他の HAWAII-2RG がリセットをかけると生じることが判明した。

HxRG Testing Software には IDLE MODE という設定項目があり、電源を投入された HAWAII-2RG の読み出しを行っていないときの駆動法を選択できる。具体的には、全く 駆動しないモードと蓄積された電荷を放出するために常時リセットをかけ続けるモード が存在する。1 台の HAWAII-2RG だけが読み出しを実行しても、他の HAWAII-2RG が リセットをかけ続けるモードに設定されている場合、取得した画像にはパターンが生じる (図 4.11。またこのことから、2 台同軸同時にパターンが現れる理由は、Fowler サンプリ ングの読み出し開始前のリセット(図 3.4 参照)であると推測される。すなわち、リセッ トのタイミング、つまりは同時駆動のタイミングにずれが存在すると考えられる。



図 4.11: 左:他の HAWAII-2RG がリセットをかけない状態で1台だけ駆動して取得した画像。中央:他の HAWAII-2RG がリセットをかけ続けている状態で1台だけ駆動して取得した画像。右:2台同時に駆動して取得した画像。

実際に2台同時駆動で取得したCDS画像2枚の組についてヘッダ時刻の差を調べた。図 4.12はその分布を示している。ヘッダ時刻は積分開始時に取得されるものであり、ふたつのHxRG Testing Software ヘソケット通信によりコマンドを送ってから積分開始される

HAWAII-2RG		#196			#206		
SIDECAR ASIC		#54			#52		
同時駆動台数	1	2	4	1	2	4	
	1	19.6	22.5	23.2	20.4	22.5	22.1
	2	13.6	17.6	17.0	14.7	17.5	17.5
$n_{ m read}$ を変えたときの	4	9.9	13.7	13.9	11.2	14.1	14.2
読み出しノイズ	8	7.7	10.1	10.4	9.2	11.4	11.0
$(e^{-} r.m.s.)$	16	6.4	9.1	8.5	8.2	10.1	9.5
	32	6.2	7.4	7.5	8.2	9.9	9.2
	64	7.3	7.6	8.1	9.1	9.6	9.9

表 4.4: n<sub>read</sub> を 1 から 64 まで変化させて測定した読み出しノイズ

までの時間には~1秒のずれが生じることが判明した。コマンドの送信自体はともに10 ms以内に完了するので、HxRG Testing Software 側でコマンドを受け取る際にラグが生 じていると思われる。また、コマンド受け取り時にソフトウェア上にログが表示される順 番は固定されていない。これらの現象はHxRG Testing Software の内部処理に起因すると 考えられるが、ソフトウェアの構造はTIS 社によって明らかにされていないため不明であ る。なお、ここではヘッダ時刻情報は正しいと仮定した。また、HxRG Testing Software を立ち上げる2台の Windws 仮想マシンの間の時刻さは無視できるほど小さいことを確認 した。



図 4.12:2 台同時駆動で取得した2枚の CDS のヘッダ時刻の差の分布

同時駆動のタイミングのずれを解消するために、我々は Sidecar Acquisition Module (SAM) Card の導入を検討している。SAM Card は JADE2 Card の機能に加えて Linux ドライバを持ち、今後 Windows 上の HxRG Testing Software を介さずに HAWAII-2RG の駆動が可能になることが期待されている。今回の試験で確認された同時駆動時のずれは HxRG Testing Software の構造に起因するものだと思われるので、このソフトウェアから 脱却することで同時駆動時のずれが解消する可能性がある。また、現時点で JADE2 Card の生産は終了しており、今後は SAM Card が主流となる。今後の拡張性のためにも SAM Card 導入の検討は重要であり、真空下での駆動試験を準備中である。

#### 4.2.5 暗電流

#### 測定方法

暗電流の測定には Ramp サンプリングで  $n_{reset} = 1$ ,  $n_{read} = 676$ ,  $n_{group} = 1$ ,  $n_{ramp} = 1$ として取得した 676 枚の画像を使用する。1 枚の読み出しにかかる時間は 1.48 秒なので画 像の取得番号に 1.48 秒をかけることで積分時間となり、676 枚目に取得した画像の積分時 間は約 1000 秒である。取得した画像の積分時間を横軸、カウントを縦軸にしてプロット し、直線でフィッティングする (図 4.13)。フィッティングで決まった直線の傾きは単位 時間当たりのカウント増加、すなわち ADU 単位での暗電流であるから、これにコンバー ジョンファクターを掛けることにより暗電流が求められる。このとき 676 枚の画像に対し て、3.4.2 と同様に参照ピクセルを用いて 1 枚目を基準にしたバイアス電圧変動の補正を 施した。また、ホットピクセルはあらかじめ除外した。



図 4.13: Ramp 画像のフィッティングの例。切片はバイアスカウントである。

#### 結果

暗電流の測定結果を表 4.5 に示す。図 4.14 は横軸に検出器温度、縦軸に暗電流をとり、 測定結果に加えて TIS 社のレポートから得た 77 K でのデータをプロットしたものである。 #196 と#206 ともに、今回の試験時には到達温度が高く SWIMS の暗電流への要求性能 ( $\ll 0.21 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}$ )を達成できていない。データを一度しか取得していないため測定誤 差は決定できず、~98 K での#196 と#206 の値が大きく異なる理由も不明である。しか し、特に#206 において暗電流の温度依存性は大きく見えることことから、検出器温度をさ らに下げることにより暗電流が小さくなることが予想される。実際に、検出器カセットを カメラ光学系に取り付ける際にガラスエポキシ樹脂製のプレートを挟むことにより検出器 温度が~10 K 低下することを確認した。暗電流の温度依存性は今後より詳細に評価する。

HAWAII-2RG	温度	暗電流
#196	(77.0  K)	$(0.001 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix})$
	$98.75~\mathrm{K}$	$0.590~{\rm e^-/sec/pix}$
	$106.3~{\rm K}$	$0.712~{\rm e^-/sec/pix}$
#206	(77.0  K)	$(0.005 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix})$
	$97.64~\mathrm{K}$	$0.295~{\rm e^-/sec/pix}$
	$111.2~{\rm K}$	$1.33 \text{ e}^-/\text{sec}/\text{pix}$

表 4.5: HAWAII-2RG #196 と#206 の暗電流



図 4.14: 暗電流の温度依存性。77 K での値は TIS 社のレポートから引用。

# 4.2.6 検出器発熱

JADE2 Card への電源供給には直流安定化電源<sup>2</sup>を使用する。5.5 V/0.4 A の設定で SIDECAR ASIC への電源投入を行うと、HAWAII-2RG #196 側には 0.231 A、#206 側

<sup>2</sup>テクシオ・テクノロジー、神奈川県横浜市港区、http://www.texio.co.jp

には 0.252 A の電流が流れ始めた。このときの消費電力はそれぞれ 1.270 W、1.386 W で ある。電源が投入されている状態で読み出しは行わずに丸一日放置したところ、検出器温 度は電源投入前(#196:約93 K、#206:約90 K)よりも5 K 以上上昇した。このとき、 HAWAII-2RG は読み出しを行っていないときは常にリセットをかけ続けるように設定さ れていた。待機中に何もしない設定に変更したところ、電流量は約 0.01 A 減少するのみ であり消費電力にほとんど変化はなかった。したがって、読み出しを行っていないときの 動作に関わらず SIDECAR ASIC に電源が投入されている間は発熱により検出器温度が上 昇してしまうため、検出器を駆動しないときには SIDECAR ASIC への電源供給を停止し ておくことが望ましい。

また、読み出し中の電流量に関しては Fowler サンプリングで  $t_{exp} = 150$  としたときの 積分開始前と積分中で変化は見られず、消費電力は一定であった。

### 4.2.7 残像 (Image Persistence)

HAWAII-2RG #206 に関して、光を入射して画像を取得した後にフィルターをクローズ に変更して光を入れずに画像を取得すると、残像のようなものが現れることが判明した。 図 4.15 に、光を入射して取得した画像と、その後にフィルターをクローズにして取得した 積分時間 100 秒の CDS 画像を示す。フィルターをクローズにして取得した画像には焦点 面上に設置したマスクの残像が現れている。一方で、この残像は積分時間 0 秒の画像では 見えない。また、HAWAII-2RG #196 に関しても同様の現象が確認された。



図 4.15: 光入射画像(左)と、その後にフィルターをクローズにして取得した積分時間 100 秒の画 像(右)

画像取得とともに残像がどのように解消するのかを調べるために、光入射画像のあとに 10 枚連続で100 秒積分のフィルタークローズ画像を取得した。このときの残像カウント減 少の様子を示したのが図 4.16 である。ここで、図 4.15 の 2 枚の画像において下部の白く 見える領域を高カウント領域、それ以外を低カウント領域として分割した。光入射画像の カウントは高カウント領域で~20000 [ADU]、低カウント領域で~300 [ADU] である。残 像カウントはフィルタークローズ画像を取得するたびに減少しており、高カウント領域で は1枚目のカウントが光入射画像の2%程度であったのに対し、10枚目では0.1%程度にまで減少している。



図 4.16: 図 4.15 の高カウント領域と低カウント領域それぞれの残像カウントと読み出し枚数の関係

当初、残像カウントが画像取得とともに減少していくのは読み出し前のリセットが要因 であると考えた。この考えが正しければ、画像取得間のリセット回数が多いほど残像カウ ントは早く減少するはずである。そこで、光入射画像を取得した後のフィルタークローズ 画像(積分時間100秒)を取得する際に、1枚読み出してすぐに次の積分を開始する方法 と、1枚読み出し後60秒間待機してから次の積分を開始する方法の2通りを試して結果 を比較することにした。このとき、HAWAII-2RGは読み出しを行っていないときは常時 リセットをかけておく設定(reset-readモード)にしておく。したがって、画像取得の合 間に60秒間待機する方法ではより多くのリセットが実行される。この結果を図4.17に示 す。画像取得間にインターバルを挟む方がわずかに残像カウントが小さくなっているもの の、一回のリセットに要する時間は約1.5秒であり画像取得間のリセット回数に20回程度 も差があることを考慮すると、リセットは残像カウントの現象にあまり効いていないと思 われる。

HAWAII-2RG の残像現象については過去にいくつか報告があり、Image Persistence と 呼ばれている。Smith et al. (2008)はこの現象を説明するモデルを考案した。具体的には まず、空乏層に入射した光子により電子と正孔が生じ、多数キャリア領域へ移動する(図 2.2)。これによりフォトダイオードの両極間の電位差は現象し、空乏層が狭まって多数キャ リア領域が広がる。このとき多数キャリアの一部はもともと空乏層だった領域を占めるこ ととなる。リセットをかけると両極間の電位差は初期値となり、空乏層の幅も元に戻る。 しかし、もともと空乏層だった領域を占めていた多数キャリアの一部は、格子欠陥などに よる準位に束縛されて元の多数キャリア領域に戻ることができない。これらのトラップ電 荷は時間とともに徐々に放出され、空乏層内の拡散電位によって多数キャリア領域へ移動 する。そうするとフォトダイオードの両極間の電位差は減少し、偽の信号、すなわち残像 として出力されてしまう(図 4.18)。

Smith et al. (2008) によれば、トラップされた電荷の放出に関する時定数はリセットを



図 4.17: 光入射画像取得後に 100 秒積分を 10 回連続で行った場合のカウント減少と、1 回の積分 ごとに 60 間のインターバルを設定した場合のカウント減少の比較。読み出しをしていないときは 常にリセットをかけ続けるモードを選択。

行ってから1枚目の画像を読み出すまでの時間よりも大きい。このため、リセットを行っ ても残像を完全に取り除くことはできない。トラップ電荷放出の時定数が大きいことは、 積分時間100秒の画像では残像が見えたが積分時間0秒の画像では見えなかったこととも 矛盾しない。また、Fowlerサンプリングのように1枚目を基準とした差分画像を作成する 場合には、1枚目を取得した後に放出されるトラップ電荷は暗電流として以降の画像に現 れる。

Smith et al. (2008)では Image Persistence の対処法として、リセットをかけ続けなが ら光を入射することを提案している。リセットをかけ続けることは空乏層の幅を一定に保 つことに相当し、ここに十分なエネルギーの光子を入射することで空乏層内のトラップ準 位に束縛された電荷を伝導帯に励起して、多数キャリア領域へ移動させるというものであ る。このような方法による残像の改善に関しては、残像が実際の観測にどの程度影響し得 るのかといった検討とともに今後の課題である。



図 4.18: Smith et al. (2008) で考案された Image Persistence モデルの概念図。トラップ電荷に よって変化した電位差が信号として出力されてしまう。

# 第5章 総括

# 5.1 本研究の成果

本研究では TAO 6.5 m 望遠鏡の近赤外線装置 SWIMS の検出器システムを開発し、その性能評価を行った。これにより得られた成果を以下にまとめる。

• HAWAII-2RG 複数台同時駆動システム

Windows 仮想マシン上で HxRG Testing Software を起動し、ソケット通信を用いて リモートホストから制御するシステムを開発した。これにより複数の HxRG Testing Software に同時にコマンドを送ることが可能となり、SWIMS の広視野を実現する ために必要不可欠な HAWAII-2RG の複数台同時駆動を実現した。ソフトウェアの ほとんどは Python で記述されているため、SWIMS 全体の制御システムへの組み込 みも問題なく行える。

- Ramp サンプリングでの画像処理システム HxRG Testing Software により出力された Ramp サンプリングの画像から、実際の 解析に使用する最終画像を生成するパイプラインを開発した。HAWAII-2RG の参照 ピクセルを用いてバイアス電圧の変動を補正した上でカウントをフィッティングし、 各ピクセルが単位時間当たりのカウント増加量を値に持つ最終画像を生成する。こ れにより、Ramp サンプリングでの観測が選択可能となった。
- 低い読み出しノイズの実現

HAWAII-2RG の複数台同軸同時にはフラットケーブルの干渉により読み出しノイズ が増加することが判明したが、ケーブルにシールド加工を施すことでこれを改善し た。また、読み出し回数を増やすことで読み出しノイズは減少し、Fowler サンプリ ングで  $n_{read} > 4$ とすることで SWIMS の要求性能 ( $\sigma_{read} > 14.5$  [e<sup>-</sup>] r.m.s.])を達 成できることを示した。

以上により、2018年に予定されているすばる望遠鏡での試験観測に向けた SWIMS 検出 器システムの準備をほぼ完了させることができた。また、HAWAII-2RG の駆動パラメー タが変化したときのノイズ性能への影響や HAWAII-2RG 自体の特性など、本研究で得ら れた知見は HAWAII-2RG を使用する他観測装置の開発においても役に立つことが期待さ れる。

#### 第5章 総括

# 5.2 今後の展望

SWIMS は 2017 年中にはハワイへ輸送され、すばる望遠鏡での試験観測に備える予定で ある。実際の観測までに行うべきこととしてはまず、劣化が激しい HAWAII-2RG #191 と#208 の交換作業である。新たな HAWAII-2RG に交換した際にはそれらの性能評価を 行う必要があり、本研究で得られた知見が活きると思われる。また、状態が良好な 2 台の HAWAII-2RG については、検出器カセットの熱絶縁強化とそれにより期待される暗電流 低減の評価を行う必要がある。

SAM Cardの導入により同時駆動時のわずかなタイミングのずれが解消し、読み出しノ イズ性能が向上する可能性がある。今後の拡張性という点でも SAM Card 導入の検討は 重要であり、まずは常温真空下での駆動試験などを実施する予定である。

ソフトウェアに関しては、Ramp サンプリング最終画像生成でのフィッティング精度をよ り向上させる必要がある。限られた観測時間を有効に利用するためには処理速度も重要と なるため、可能な限りの高速化を目指す。また、現時点で実装できていない Window モー ドによる観測も、他の項目との優先順位を考慮しながら検討する。

# 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システムの開発から原稿作 成に至るまで様々な面で助言や提案をいただき、進むべき方向を指し示していただきまし た。また、日々の研究指導のみならず、様々な研究会に参加する機会を作っていただいた ことで見識を深めることができました。厚く御礼申し上げます。

SWIMS開発チームの小西真広特任助教には、特にソフトウェア関連でお世話になりま した。プログラミングについて何も知らなかった私に根気強く親身に指導していただきあ りがとうございました。高橋英則特任研究員には、装置開発において重要な知識や技術に ついて教えていただきました。また、私にはできないような加工をお願いすることもあり、 色々と助けていただきました。加藤夏子技術職員には、日々の研究生活や技術的な面で支 えていただきました。ここに感謝申し上げます。

本原研究室の先輩である北川祐太朗氏には、研究に対する姿勢や心構えという点で教わ ることがたくさんありました。来年からは私も徐々に研究者として自立できるように頑張 ります。後輩の大橋宗史氏には、近い立場で様々な議論や世間話に付き合っていただきま した。これからもよろしくお願いします。

研究室 OB の舘内謙氏、藤堂颯哉氏、小早川大氏は後輩である私を気遣ってくださり、 研究生活を送る上でのアドバイスや励ましをいただきました。また、藤堂氏には検出器に 関する知識をやコツを伝授していただきました。本研究を進める上でも、藤堂氏が残して くださった過去の実験データは非常に有用な資料となりました。

MIMIZUKU チームをはじめとする天文センターの方々には、日々の様々な場面でお世話になりました。おかげさまで楽しみながら研究生活を送ることができました。

最後に、私の研究生活を支え応援してくれている家族、友人に深く感謝します。

# 参考文献

- Beletic, J. W., Blank, R., Gulbransen, D., Lee, D., Loose, M., Piquette, E. C., Sprafke, T., Tennant, W. E., Zandian, M., & Zino, J. 2008, in Proc. SPIE, Vol. 7021, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III, 70210H
- Chen, J., Loose, M., Ricardo, R., Beletic, J., Farris, M., Xu, M., Wong, A., & Cabelli, C. 2014, in Proc. SPIE, Vol. 9154, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI, 915426
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 319, 168
- Crouzet, P. E. 2009, in Proceedings of the Fifth International Conference on New Developments in Photodetection, Vol. 610, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 135
- Crouzet, P.-E., ter Haar, J., de Wit, F., Beaufort, T., Butler, B., Smit, H., van der Luijt, C., & Martin, D. 2012, in Proc. SPIE, Vol. 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V, 84531R
- Fowler, A. M. & Gatley, I. 1990, The Astrophysical Journal Letters, 353, L33
- Garnett, D. J. & Forrest, J. W. 1993, in Proc. SPIE, Vol. 1946, Infrared Detectors and Instrumentation, 395
- Iwamuro, F., Motohara, K., Maihara, R., Hata, R., & Harashima, T. 2001, Publications of the Astronomical Society of Japan, 53, 355
- Janesick, J. R., Klaasen, K. P., & Elliott, T. 1987, Optical Engineering, 26, 972
- Kitagawa, Y., Yamagata, Y., Morita, S., Motohara, K., Ozaki, S., Takahashi, H., Konishi, M., Kato, N. M., Kobayakawa, Y., Terao, Y., & Ohashi, H. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9912, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, 991225
- Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., Kato, N., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kamizuka, T., Kawara, K., Kohno, K., Koshida, S., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., & Yoshii, Y. 2012, in Proc. SPIE, Vol. 8446, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 84467P

- Konishi, M., Motohara, K., Tateuchi, K., Takahashi, H., Kitagawa, Y., Kato, N., Sako, S., Uchimoto, Y. K., Toshikawa, K., Ohsawa, R., Yamamuro, T., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Matsunaga, N., Minezaki, T., Morokuma, T., Nakashima, A., Takagi, T., Tanabe, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kato, D., Kawara, K., Kohno, K., Miyata, T., Nakamura, T., Okada, K., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K., & Yoshii, Y. 2015, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, 4
- Maiolino, R., Gallerani, S., Neri, R., Cicone, C., Ferrara, A., Genzel, R., Lutz, D., Sturm, E., Tacconi, L. J., Walter, F., Feruglio, C., Fiore, F., & Piconcelli, E. 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 425, L66
- Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, M. N., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., Aoki, T., Doi, M., Kamizuka, T., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Mori, K., Ohsawa, R., Okada, K., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Uchiyama, S. M., Koshida, S., Asano, K., Tateuchi, K., Uchiyama, M., Todo, S., & Yoshii, Y. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9908, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, 99083U
- Muzzin, A., Marchesini, D., Stefanon, M., Franx, M., McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J. S., Fynbo, J. P. U., Brammer, G., Labbé, I., & van Dokkum, P. G. 2013, The Astrophysical Journal, 777, 18
- Persson, S. E., Murphy, D. C., Smee, S., Birk, C., Monson, A. J., Uomoto, A., Koch, E., Shectman, S., Barkhouser, R., Orndorff, J., Hammond, R., Harding, A., Scharfstein, G., Kelson, D., Marshall, J., & McCarthy, P. J. 2013, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125, 654
- Smith, M. R., Zavodny, M., Rahmer, G., & Bonati, M. 2008, in Proc. SPIE, Vol. 7021, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III, 70210J
- Spitler, L. R., Straatman, C. M. S., Labbé, I., Glazebrook, K., Tran, K.-V. H., Kacprzak, G. G., Quadri, R. F., Papovich, C., Persson, S. E., van Dokkum, P., Allen, R., Kawinwanichakij, L., Kelson, D. D., McCarthy, P. J., Mehrtens, N., Monson, A. J., Nanayakkara, T., Rees, G., Tilvi, V., & Tomczak, A. R. 2014, The Astrophysical Journal Letters, 787, L36
- Straatman, C. M. S., Labbé, I., Spitler, L. R., Allen, R., Altieri, B., Brammer, G. B., Dickinson, M., van Dokkum, P., Inami, H., Glazebrook, K., Kacprzak, G. G., Kawinwanichakij, L., Kelson, D. D., McCarthy, P. J., Mehrtens, N., Monson, A., Murphy, D., Papovich, C., Persson, S. E., Quadri, R., Rees, G., Tomczak, A., Tran, K.-V. H., & Tilvi, V. 2014, The Astrophysical Journal Letters, 783, L14
- Straatman, C. M. S., Spitler, L. R., Quadri, R. F., Labbé, I., Glazebrook, K., Persson, S. E., Papovich, C., Tran, K.-V. H., Brammer, G. B., Cowley, M., Tomczak, A.,

Nanayakkara, T., Alcorn, L., Allen, R., Broussard, A., van Dokkum, P., Forrest, B., van Houdt, J., Kacprzak, G. G., Kawinwanichakij, L., Kelson, D. D., Lee, J., McCarthy, P. J., Mehrtens, N., Monson, A., Murphy, D., Rees, G., Tilvi, V., & Whitaker, K. E. 2016, The Astrophysical Journal, 830, 51

- Takahashi, H., Konishi, M., Motohara, K., Kato, N. M., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., & Todo, S. 2014, in Proc. SPIE, Vol. 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V, 91476N
- Tateuchi, K., Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Todo, S., Toshikawa, K., Sako, S., Uchimoto, Y. K., Ohsawa, R., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Nakamura, T., Nakashima, A., Okada, K., Takagi, T., Tanabé, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kawara, K., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K., & Yoshii, Y. 2015, The Astrophysical Journal Supplement Series, 217, 1
- Terao, Y., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., & Ohashi, H. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9915, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII, 99151W
- Todo, S., Tateuchi, K., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kitagawa, Y., & Kato, N. M. 2014, in Proc. SPIE, Vol. 9154, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI, 91541L
- Tomczak, A. R., Quadri, R. F., Tran, K.-V. H., Labbé, I., Straatman, C. M. S., Papovich, C., Glazebrook, K., Allen, R., Brammer, G. B., Kacprzak, G. G., Kawinwanichakij, L., Kelson, D. D., McCarthy, P. J., Mehrtens, N., Monson, A. J., Persson, S. E., Spitler, L. R., Tilvi, V., & van Dokkum, P. 2014, The Astrophysical Journal, 783, 85
- Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Kawara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Takahashi, H., Konishi, M., Kamizuka, T., Kato, N., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Handa, T., Koshida, S., Bronfman, L., Ruiz, M. T., Hamuy, M., Mendez, R., & Garay, G. 2016, in Proc. SPIE, Vol. 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 99060R
- Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Kawara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Takahashi, H., Konishi, M., Kamizuka, T., Koshida, S., Kato, N., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Handa, T., Koshida, S., Bronfman, L., Ruiz, M. T., Hamuy, M., & Mendez, R. 2014, in Proc. SPIE, Vol. 9145, Ground-based and Airborne Telescopes V, 914507

藤堂颯哉. 2015, 修士論文, 東京大学