# かなた望遠鏡用可視近赤外線同時カメラ HONIRの 光学系・検出器系に関する性能評価

広島大学 理学部 物理科学科

高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室 B092399 大橋佑馬

主查:川端 弘治 副查:大川正典

2013年2月8日

概 要

概要

HONIR は東広島天文台 1.5 m「かなた」望遠鏡の次期主力観測装置として 2006 年から開発されてき た。我々は昨年度行われた試験観測における撮像モードの評価結果を受けて、光学系の調整、近赤外 線検出器の読み出し系の改修等を施した。加えて、分光モードも新たに加えた。本研究では、現状 の HONIR の基本的性能の評価の一部として、近赤外線検出器のゲイン、ダーク、リニアリティを実 験室および望遠鏡装着状態の両方で測定し、改善の度合いを調べた。また、標準星および星団の試験 観測により、装置効率や結像性能についても評価した。その結果、昨年の試験観測に比べノイズレベ ルが望遠鏡に装着した状態でも大幅に改善されており、ダーク(65K下)の値は所期性能とほぼコン システントな値であった。図は実験室において入力に対する出力信号のリニアリティを評価したもの で、15000ADU下のカウントで 1%以内の良好なリニアリティが得られていることがわかる。



図 1: 実験室でのアリニアリティ調査結果

# 目 次

序論	<b>5</b>
かなた望遠鏡と観測装置....................................	5
1.1.1 かなた望遠鏡	5
1.1.2 観測装置	6
1.1.3 東広島天文台で推進されているサイエンス	10
可視近赤外線同時カメラ HONIR	12
1.2.1 HONIR 光学系	12
1.2.2 検出器系	13
本研究の目的	16
	1 🖛
近赤外検山谷の実験全での実験評価	17
	17
bad pixel map 作成....................................	17
ダーク測定	18
リニアリティ測定....................................	19
ゲイン調査	20
	0.4
がなた 招戦後の HONIR の 注意 注意 た に 学師 し	24
	24
ダーク調査	25
リニアリティ調査....................................	26
ゲイン調査	28
標準星観測による装置効率の評価1	30
標準 星観測による 装置効率の 評価 2 	32
標準星観測による装置効率の評価2	32 <b>3</b> 4
標準星観測による装置効率の評価 2 まとめと今後について 結果の summary	32 <b>34</b> 34
	序論         かなた望遠鏡と観測装置         1.1.1       かなた望遠鏡         1.1.2       観測装置         1.1.3       東広島天文台で推進されているサイエンス         可視近赤外線同時カメラ HONIR         可視近赤外線同時カメラ HONIR         1.2.1       HONIR 光学系         1.2.2       検出器系         本研究の目的

# 図目次

1	実験室でのアリニアリティ調査結果	1
1.1	東広島天文台外観....................................	5
1.2	かなた望遠鏡	6
1.3	TRISPEC	7
1.4	HOWPol	8
1.5	高速カメラ	9
1.6	可視近赤外線同時カメラ HONIR	10
1.7	電磁波の大気減光の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
1.8	可視バンド及び近赤外バンドにおける大気透過率	10
1.9	$I_c$ 型超新星 SN2002ap の可視極大期 SED(spectral energy distribution)	11
1.10	blazar の模式図	11
1.11	HONIR 光学系	13
1.12	完全空乏型 CCD	14
1.13	完全空乏型 CCD の量子効率)	14
1.14	Virgo2K	15
1.15	Virgo2K の量子効率 (module49 スペックシートより)	15
1.16	各読み出しポートの定義	15
2.1	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上	
2.1	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上 としたときの map	17
2.1 2.2	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         た図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask	17
2.1 2.2	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像	17 18
<ul><li>2.1</li><li>2.2</li><li>2.3</li></ul>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)	17 18 19
<ul><li>2.1</li><li>2.2</li><li>2.3</li><li>2.4</li></ul>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel	17 18 19 20
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号	17 18 19 20 20
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ	17 18 19 20 20 20
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map	17 18 19 20 20 20 20 21
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図: フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ         Correlated Doubles Sampling         ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図: フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ         Correlated Doubles Sampling         ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel         ゲイン測定結果 (port1)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図: フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ         Correlated Doubles Sampling         ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel         ケイン測定結果 (port1)         カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上         としたときの map         左図: フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         瑞出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ         Correlated Doubles Sampling         ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel         グイン測定結果 (port1)         カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)         ゲイン測定結果 (port2)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上 としたときの mapとしたときの map左図: フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask画像⑤55sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)りニアリティ解析、200*200pixel切出時間-検出器出力信号・検出器出力信号-リニアリティCorrelated Doubles Samplingゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixelグイン測定結果 (port1)カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)グイン測定結果 (port2)カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port2)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> </ol>	左図は bad pixelを 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixelを 10000ADU 以上         としたときの map         左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask         画像         595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)         リニアリティ解析、200*200pixel         露出時間-検出器出力信号         検出器出力信号-リニアリティ         Correlated Doubles Sampling         ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel         カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)         ケイン測定結果 (port2)         ケイン測定結果 (port3)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> <li>2.14</li> </ol>	左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上 としたときの map左図:フラットフレームの bad pixel map、右図: 左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask画像画像595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)リニアリティ解析、200*200pixel調出時間-検出器出力信号検出器出力信号-リニアリティCorrelated Doubles Samplingゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixelガウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)グイン測定結果 (port2)カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port3)グイン測定結果 (port3)	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>23</li> </ol>
<ol> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> <li>2.14</li> <li>2.15</li> </ol>	左図は bad pixelを 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixelを 10000ADU 以上 としたときの map左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask画像	<ol> <li>17</li> <li>18</li> <li>19</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>23</li> </ol>

3.1	かなた望遠鏡装着後の HONIR	24
3.2	積分時間 595sec <b>のダーク画像(</b> ADU 単位)	26
3.3	リニアリティ調査結果 (preamp 設定 3.0)。横軸積分時間で上図は縦 軸検出器出力カウント	
	値、下図はリニアリティ精度を表す。13500ADU 付近までは ±1 パーセント のリニアリティ	
	が保たれている	27
3.4	実験室とかなた搭載後での高いリニアリティが保たれる上限カウントの差異について考察し	
	た図	28
3.5	ゲイン調査用に取得した画像	28
3.6	preamp=3.0 での port1 のゲイン測定結果	29
3.7	preamp=3.0 での port2 のゲイン測定結果	29
3.8	preamp=3.0 での port3 のゲイン測定結果	29
3.9	preamp=3.0 での port4 のゲイン測定結果	29
3.10	m J,H,Ks バンドの大気減光 1, 観測日は 2013 年 $1$ 月 14 日 (主鏡洗浄前)。傾きが減光係数とな	
	రెం	31
3.11	望遠鏡主鏡洗浄後の J,H,Ks バンドの大気減光 2	33

# 表目次

1.1	かなた望遠鏡の主な諸元	6
1.2	TRISPEC の仕様	7
1.3	HOWPol の仕様	8
1.4	高速カメラの仕様....................................	9
1.5	HONIR のスペックと TRISPEC との比較 1	12
1.6	完全空乏型 CCD スペック 1	14
1.7	Virgo-2 スペック	15
2.1 2.2	Threshold の違いによる bad pixel 個数	18 23
3.1	ゲイン調査結果 (preamp 設定=3.0)	29
3.2	ゲイン調査結果 (preamp 設定=3.0×3.4 = 10.2)	30
3.3	ゲイン比調査結果 (preamp 設定=3.0×3.4 = 10.2)	30
3.4	観測した標準星リスト及びそのフィールド1..............................	31
3.5	各近赤外バンドごとの装置効率設計値と測定値1	32
3.6	観測した標準星リスト及びそのフィールド2..............................	32
3.7	各近赤外バンドごとの装置効率設計値と測定値2	32
4.1	実験室とかなた搭載後の同 preamp 設定でのゲイン値比較........................	34

# 第1章 序論

## 1.1 かなた望遠鏡と観測装置

「かなた」望遠鏡は、宇宙科学センター付属施設である東広島天文台に設置してある 1.5m の望遠鏡である。東広島天文台は東広島駅から車で15分と交通の利便性もよく、シーイングも 1.0'と高い精度での観測が望まれる立地条件のよい場所に位置する。

かなた望遠鏡は天文台元々国立天文台三鷹キャンパスにてハワイに設置されている「すばる」望遠鏡搭載装置の赤外シュミレーターとして運用されていた。その後当時国内2番目の大きさであった口径1.5mの主鏡 を有するこの望遠鏡は、高エネルギー天体観測に赤外シュミレーターを活用するという目的で当時X線・ 線の人工衛星への開発や観測に長けていた広島大学に移管されることになった。

そして 2006 年 5 月には移設が完了し、10 月から本格的な観測を開始した。



図 1.1: 東広島天文台外観

#### 1.1.1 かなた望遠鏡

「かなた」望遠鏡最大の特徴は、方位速度5度/s、高度速度2度/sと同径の望遠鏡の中では世界最大の稼動速度を誇ることである。この稼動速度を活かして、GRBなどといった突発天体の観測に特化したユニークな望遠鏡である。



図 1.2: かなた望遠鏡

表 1.1: かなた望遠鏡の主な諸元

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡有効径	$1500 \mathrm{~mm}$
合成 F 値	F/12.2 f=18,300 mm
視野	直径 15 分角
焦点面スケール	11.271 <b>秒角</b> /mm
架台	経緯台 最大角速度 方位軸 5 度/秒 高度軸 2 度/秒

#### 1.1.2 観測装置

かなた望遠鏡にはカセグレン焦点に TRISPEC、ナスミス焦点に HOWPol および高速カメラの3つの観 測装置が取り付けられている。

#### TRISPEC

TRISPEC は名古屋大学大学院理学研究科のZ研グループが開発した、可視近赤外線同時カメラである。 可視および近赤外線の3つの波長帯での撮像・分光・偏光観測が可能な装置となっている。しかし検出器読 み出し系および駆動系の故障により現在運用を停止している。



☑ 1.3: TRISPEC

	Optical: 0.45-0.9 $\mu$ m
	IR1: 0.9-1.8 $\mu$ m
観測波長域	IR2: 1.85-2.5 $\mu$ m
	CCD: $(512 \times 512)$
検出器 (ピクセル数)	Insb: $(256 \times 256)$
	CCD: 7' × 7'
視野	Insb: 7' $\times$ 7'
	Optical: B,V,R,I
	IR1: J,H
フィルター	IR2: Ks,K,H

#### 表 1.2: TRISPEC の仕様

#### HOWPol

HOWPolは一露出型広視野偏光撮像装置 (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter)の略である。この装置は可視の波長帯で一度の露出で直線偏光のパラメーターを取得できる偏光素子を使用している。つまり同時性の高い偏光情報の取得が行えるのである。これにより 線バーストなどの突発現象に対して即座な対応と情報の取得を実現可能としている。偏光モードには広視野用マスクと狭視野用マスクを用いた2通りのモードが存在するが、現在は広視野偏光モードは稼動させていない。



☑ 1.4: HOWPol

表	1.3:	HOWPol	の仕様
---	------	--------	-----

波長域	$0.45 \sim 1.1 \mu m$
	広視野撮像モード: 15'×15'
	広視野偏光モード: 7′×7′
	狭視野偏光モード $: 15'  imes 1'$
	分光モード: 2.3'×15'
視野	偏光分光モード: 2.3"×1'
フィルター	B,V,R,I,z'
	Wedged double Wollaston Prism
	広視野: six tutile blocks
偏光素子	狭視野: six magnesium flouride blocks, two fused silica wedges
分光素子	低分散グリズム(透過型回折格子と 420g/mm,BK7 プリズム頂角 26.7 °)

高速カメラ

高速読み出しが可能な CCD を用いており、最高で 35.8frame/sec という高速撮像・分光が可能であり、 天体の短時間での時間変動を追うことができる。



図 1.5: 高速カメラ

表 1.4: 高速カメラの仕様

波長域	$0.4 \sim 1.0 \mu m$
ピクセル数	$512 \times 512$
	高速測光: 2.6′×2.6′
視野	高速分光: 2.6′ × 2.2′
Frame/s	$\sim 35.8$
露出時間	$27.1ms \sim 10s$ /frame
分光素子と波長域	グリズム: 430-690nm プリズム: 400-800nm

#### HONIR

HONIR は、TRISPEC の後継機として 2006 年から開発されてきた観測装置である。開発着手から 2009 年のファーストライト、2011 年の 2 回目の試験観測を経て光学シャッターの自作・真空槽のアウトリーク処 理・光学系検出器読み出し系の改修等課題を着々と解決していき、2012 年 1 月 7 日に 3 度目の試験観測を 開始した。

HONIR は可視バンドと近赤外バンドでの同時読み出しを特徴の一つとし、現在撮像・分光モードの立上 げ試験を行っている。スペックについては次章にて TRISPEC との比較を行いながら述べていく。



図 1.6: 可視近赤外線同時カメラ HONIR

#### 東広島天文台で推進されているサイエンス 1.1.3

可視光および近赤外線の一部波長帯は他の波長帯の光と比べて大気による遮断が少ないため、地上での 観測が可能となっている。衛星望遠鏡である赤外線望遠鏡「あかり」や可視望遠鏡「ハッブル」といった衛 星望遠鏡ならば大気による影響を無視できるので、地上観測よりも精度の高い観測が行える。しかし衛星 望遠鏡を打ち上げるにあたっては膨大な年月と費用がかかり、また大型の観測装置を取り付けることが困難 であるというデメリットもある。したがって地上からと大気圏外からの両方での相補的な観測が必要であ る。地上から観測できる近赤外線波長帯には大気の水 ( $H_2O$ ) および二酸化炭素 ( $CO_2$ ) による吸収される 帯域が存在する。このため地上での近赤外線波長域では J バンド (1.25µm)、H バンド (1.65)、Ks バンド (2.15µm) の3つのバンド帯での観測が主用となる。



図 1.7: 電磁波の大気減光の様子

波長[μm]

図 1.8: 可視バンド及び近赤外バンドにおける大気透 過率

電磁波は宇宙空間中に存在する微粒子によって散乱・吸収され減光していく。一般に波長が長いほど散 乱・吸収される量は減っていく。近赤外線は星間物質による減光量が可視光に比べておおよそ10分の1程 度なので、可視光では塵で隠れて見えなかった天体も観測することが可能である。このことから、次のよう な天体の観測が推進されている。

1 超新星

超新星とは、太陽質量以上の星が寿命を迎えたときに大爆発を起こす現象のことで、太陽の1~10億 倍程度まで明くなる。明るさの極大時期は可視と近赤外で異なり、それぞれのフェーズで「見える」 場所が異なったりすることから、可視と近赤外両方のバンド帯で超新星を撮像・分光することで超新 星爆発の仕組みや親星の元素構成についてより詳しく調べることができる。



図 1.9: *I<sub>c</sub>* 型超新星 SN2002ap の可視極大期 SED(spectral energy distribution)

2 Blazars

宇宙に数多ある銀河の中には、銀河の中心が非常に明くまた時間変動の大きなものがある。これらは AGN(活動銀河核)と呼ばれ、その中でもジェットを吹き出しており、且つジェット方向が我々地球 の方向を向いているものを特に blazar と呼ぶ。Blazar は様々な波長帯の電磁波を放射している。電 波 ~ 紫外線はシンクロトロン放射、X線 ~  $\gamma$ 線はシンクロトロン放射を種光子とした自己シンクロ トロンコンプトン放射であると考えられている。シンクロトロン放射された光子を偏光解析すること で blazar 周辺の磁場構造や増光の原因を調べられる。



図 1.10: blazar の模式図

3 遠方宇宙

現在宇宙は遠方ほど加速膨張するといわれており、遠方宇宙の銀河からの光は地球に辿り着くころに はドップラー効果により波長が長くなっている。たとえば可視光は地球に辿り着くころには赤外線領 域まで引き伸ばされている。このため遠方宇宙の銀河の様子を知るためには近赤外線での観測が重要 となる。

4 低温度星

表面温度が 3000K 以下の星であり、赤色巨星・超巨星・褐色巨星などがこれに分類される。低温度星 は銀河の中心付近に多く存在しているが、銀河円盤には星間ダストが多く存在するため、近赤外線領 域での観測に適している。また低温度星のピーク波長が近赤外領域に存在するのも、近赤外線観測で 有利な点となる。

5 T Tau 型星

T Tau 型星は主系列星の前の進化段階である原始星に分類される。質量は3太陽質量以下で、周りの ガスが中心星へと収縮される重力収縮によって生じる熱で輝いている。*H*<sub>α</sub>の輝線が強くみられるの が特徴である。中心の星は分子雲やガスで埋もれているため、吸収されにくい近赤外線での観測が適 しており、惑星の元と考えられているおおきな降着円盤を観測することで惑星の形成について情報が 得られる可能性がある。

## 1.2 可視近赤外線同時カメラ HONIR

HONIR は可視 CCD1 素子と近赤外線検出器 2 素子の計 3 素子による同時撮像・分光・偏光が可能とな る装置である。前進の TRISPEC と比べ、ピクセルフォーマットが細かくなったため 1 画素あたりに落ち込 むスカイバックグランドが軽減される。また視野も 2 倍近く大きくなっている。さらに読み出しシステムも 新規のものに入れ替えたため転送速度が増加して観測効率が増しており、結果としてより限界等級が深く精 度の高い観測が可能となった。下に TRISPEC と比較した場合の HONIR の特徴とスペックを載せておく。

	TRISPEC	HONIR
	可視 CCD: 512 × 512	可視 CCD: 2048 × 4096
検出器ピクセルフォーマット	赤外アレイ: 256 × 256	赤外アレイ: 2048 × 2048
	可視 CCD : 0.82"/pix	可視 CCD: 0.29 "/pix
ピクセルスケール	赤外アレイ: 1.64"/pix	赤外アレイ: 0.29"/pix
視野	7 分角	10 分角
読み出しシステム	MESSIA3	MESSIA5

表 1.5: HONIR のスペックと TRISPEC との比較

#### 1.2.1 HONIR 光学系

HONIR の特徴の一つである可視近赤外同時観測は、ダイクロックミラーを用いることで実現される。ダ イクロックミラーとは、誘電体の多層膜などを鏡面に張ることで特定の波長のみを通過または反射させる 性質をもつ鏡のことである。望遠鏡に集められた光はコリメーターレンズ群を通過し平行光となった後、こ のダイクロックミラーによって入射光は可視波長帯1バンドと近赤外波長帯2バンドに分けられる。可視光 はそのまま可視チャンネルへと進み、近赤外線は2つ目のダイクロックミラーによってJバンドとH,Ksバ ンドにわけられ近赤外線チャンネルへと進む。現在 HONIR は検出器の不足により2つ目のダイクロックミ ラーは用いられておらず、一つの近赤外線検出器でJ、H、Ks バンドを観測している。また望遠鏡焦点面に はスリットホイール、瞳位置には瞳ホイールを設置し、ダイクロックミラー直後には光学素子が置かれてお り、各バンドフィルターに加えて、今回の試験観測では分光モードが立ち上がっており、グリズムを搭載し ている。



図 1.11: HONIR 光学系

#### 1.2.2 検出器系

HONIR では可視光検出器には静岡の浜松ホトニクスと国立天文台が共同開発を行った完全空乏型 CCD を、近赤外線検出器にはアメリカの Raytheon 社の Virgo-2K をそれぞれ採用している。

#### 完全空乏型 CCD

完全空乏型 CCD は検出素子の p 半導体型と n 型半導体をウェハース状に重ねたもので、逆バイアスを 加えることで電荷が移動し、電荷や正孔の存在しない領域つまり空乏層を形成する。空乏層に可視光が入 射すると半導体の価電子帯の電子が伝導帯に励起されて電流が流れ電圧が生じる。この電圧値を読み取る ことで可視光を検知する。画素数は 2048 × 4096 となっているが、フォーマットを Virgo-2K とあわせるた め、実際に使用するのは 2048 × 2048 の領域となる。



図 1.12: 完全空乏型 CCD

図 1.13: 完全空乏型 CCD の量子効率)

表 1.6: 完全空乏型 CCD スペック

ピクセルサイズ	$15 \mu m \times 15 \mu m$
ピクセルスケール	$0.29^{\prime\prime}$ /pix
画素数	$2048\times4096$
適正温度	170K
読み出しノイズ	$\geq 5e^-rms$
転送効率	$\leq 0.999995$
飽和電荷量	$\leq 10^5 e^-$
暗電流	$\geq 5e^-/pixel/hour$

近赤外線検出器 Virgo-2K

Virgo-2K は、HgCdTe 素子を用いた波長およそ 2.5 $\mu$ m までの検出を実現する検出器である。可視光検 出器である CCD と同様、逆バイアスを加えることで形成される空乏層に近赤外線帯の光子が入射すると、 半導体の価電子帯の電子が伝導帯に励起される(内部光電効果)。この効果を利用して赤外線を検知する。 半導体検出素子は熱による電子の励起が生じる。この熱励起のため電流が流れてしまい、結果ノイズの原 因となってしまう。この電流のことを暗電流といい、価電帯の電子が伝導帯に励起するのに必要な最低エネ ルギー(エネルギーギャップ) $E_q$ とボルツマン定数  $K_B$  と温度 T で

$$I_d \propto exp(\frac{-E_g}{K_BT})$$

であらわされる。赤外線検出器ではエネルギーギャップが小さいために温度による暗電流の変化が大きくなるため、CCDよりも設定温度は低くしなければならない。

また近赤外検出器を含めた赤外線観測装置を作る際は、冷却に慎重にならなければならない。なぜなら 常温の物体からは黒体輻射により赤外線が放出されているので、装置内部からの熱輻射が無視できる程度 まで冷却する必要があるからだ。このため近赤外検出装置自体も大型で冷却性能に優れたものにしなけれ ばならない。

また Virgo-2K は現在4つのポートで読み出しを行っており、各ポートごとに特性が異なる。私が行った 解析もポートごとに結果を示しており、以下下図のように各ポートを定義する。



図 1.15: Virgo2K の量子効率 (module49 スペックシー トより)

4.0

☑ 1.14: Virgo2K

表 1.7: Virgo-2 スペック

ピクセルサイズ	$20\mu m \times 20\mu m$
画素数	$2048 \times 2048 [pixels]$
有感度波長域	$0.9-2.5\mu m$
量子効率	$\geq \mathbf{70\%}(1-2.4\mu m)$
適正温度	80K
飽和電荷量	$\leq 1 \times 10^5 electrons$
暗電流	$\geq 1e^{-}/sec$



図 1.16: 各読み出しポートの定義

## 1.3 本研究の目的

前回の試験観測を終えた後、近赤外の読み出しノイズを軽減するために検出器のハードウェアおよび読み出し系を改修した。本研究の目的は、修繕した近赤外線検出器の性能が所期性能を満しているか、また前回試験観測と比べて改善されたかを調査するためにその基本性能について評価をおこなうことである。

# 第2章 近赤外検出器の実験室での実験評価

## 2.1 はじめに

近赤外線検出器 Virgo-2K の出力信号やダークが実際にマニュアル通りの値をとるかを調べ、またどの程度の誤差が生じているかを調査する必要がある。今回は第4章での実際のデータ調査の練習の意味も含めて実験室における Virgo-2K のダーク・ゲイン・リニアリティを評価した。

#### 2.2 bad pixel map 作成

検出器のピクセルには感度の悪いものや逆にダークのみで大きく感光してしまうものがある。これらの 性能の悪いピクセルのことを bad pixel と呼ぶ。測定する際これらのピクセルを用いると正確なデータが得 られないため補正する必要がある。そのために、bad pixel の分布を調べ得られたデータから分布図(マス ク画像という)を作成する。今回、その調査に光を当てずに長時間露出して得たダークフレームと実験室で なるべく光を一様に照射した疑似フラットフレームを用いた。ダークフレームは露出時間 600sec のものか ら 5sec のものを差し引いた。こうすることでダークにのっているノイズを除去することができ、差引後は 純粋な 595sec のダーク画像となる。このダークにおいて

(i) カウントが 5000ADU を越えるもの

(ii) " が 10000 ADU を越えるもの

をそれぞれ hot pixel と指定したときの pixel map を作成した。これらの検出器出力信号値は、検出器にサ チレーションが生じる値(2.4章参照)の1/3または2/3—である。全体図だと真っ黒になってしまい bad pixel の様子が見えなかったので、以下 bad pixel の多く見られた *X*:1320 – 2020, *Y*:112 – 540 のおよそ 30万ピクセルの領域を切り出した。画像横軸が X、縦軸を Y とする。

図 2.1: 左図は bad pixel を 5000ADU 以上としたときの mapbad、右図は pixel を 10000ADU 以上とした ときの map

表 2.1: Threshold の違いによる bad pixel 個数

Threshold	bap pixel <b>数</b>	bad pixel の占める割合 (%)
5000ADU	3131	0.0737
10000ADU	1382	0.0325

それぞれ hot pixel が占める割合は次の通りである。当然であるが図 2.1 の右図のほうが bad pixel の割 合は少くなっている。

フラットフレームに関してはカウント値が平均レベルの20%に満たないものをbad pixel として扱った。 左図と図 を組合せて作ったのが以下マスク画像である。このマスク画像を用いて観測で得られた天体画像 などに埋め合わせ、bad pixelの部分は隣あうピクセルで線形となるような値に置き換えて人工的なピクセ ルに修正することで解析への影響を少くする。



図 2.2: 左図:フラットフレームの bad pixel map、右図:左図と図 2.1 左図を組合せて作った mask 画像

## 2.3 ダーク測定

ダークとは暗電流のことであり、信号とは関係なく検出器に蓄積されてしまう信号のことである。ダークは露光時間と温度に左右される。特に赤外アレイは温度によって暗電流が大きく変化するため、観測への影響が大きくなる。600秒のダークから5秒のダークを差し引いて595秒の純粋なダーク画像を作成し、200×200pixelの領域を図2.3の範囲でカウント数を割出した。



図 2.3: 595sec ダークの各領域平均値 (ADU 単位)

## 2.4 リニアリティ測定

検出器に入射する光子は検出器のキャパシタンスに電荷として蓄積される。入射光子量とキャパシタン スの蓄積電荷量にはある程度まで線形性(リニアリティ)が保たれるが、パケツに入る水の量は決まってい るように一画素あたりに蓄積される電荷量には限界がある。そのため徐々に線形性を外れていき、最終的に 飽和電荷量に達する。したがって線形性が保たれる検出器出力信号の値を把握しておくことが精度良い観測 を行うため必要となる。リニアリティの測定には 0.42*A*, 0.64*V* のハロゲン光源を用い、露出時間 5-140sec で計21枚の画像を取得した。途中、光源の安定性を調べるため 20sec の画像を数枚取得した。ダーク引き を行った後、図 3. の領域で平均カウントを導出してリニアリティを評価した。

図 3. は露出時間と検出器出力信号の関係をプロットしたものと、露出時間 5-80sec で一次式フィットを 行ったものを各ポートごとに表したものである。また図 3. は図 3. で導いたフィッティング結果(理論値)と 検出器出力信号の実測値がどれだけずれているかをパーセンンテージで表したものである。リニアリティは

$$linearity(%) = (\frac{実測値}{7ィット直線値} - 1) * 100$$

で計算した。結果よりおよそ15000ADUまでは±1%の精度でリニアリティが保たれていることがわかる。



図 2.4: リニアリティ解析、200\*200pixel



図 2.5: 露出時間-検出器出力信号

図 2.6: 検出器出力信号-リニアリティ

## 2.5 ゲイン調査

ゲインはコンンバージョンファクタとも呼ばれる。検出器の A/D 変換後の出力信号 1ADU あたりの電荷 量を表す値で、単位は *electron/ADU* である。この値は A/D 変換前の検出器からのアナログ信号を知る上 で重要なパラメーターであり、ノイズ等の評価には欠かせない。

Virgo-2K では、画像取得の方法が可視光検出器 CCD とは異なる。virgo-2K の撮像モードでは次図で示す CDS 法を用いて画像を取得している。CDS 法はリセット直後の画像と積分時間後の読み出し画像を差し引 く方法であり、この方法を用いることでノイズを軽減する。



☑ 2.7: Correlated Doubles Sampling

ゲインを  $g[e^{-}/ADU]$ 、red 画像でのカウントを  $C_{red}[ADU]$ 、rst 画像でのカウントを  $C_{rst}[ADU]$ 、その 差分画像でのカウントを  $C_{diff}[ADU]$ 、あらかじめのっているノイズを  $N_{noise}$  とすると、

$$C_{red} = F \times g \times (\Delta t_{rst} + \Delta t_{red}) + N_{noise}$$

$$\tag{2.1}$$

$$C_{rst} = F \times g \times \Delta t_{rst} + N_{noise} \tag{2.2}$$

$$C_{diff} = C_{red} - C_{rst} = F \times g \times N_{noise}$$

$$(2.3)$$

と書ける。ちなみにここで  $F = \frac{C_{diff}}{g\Delta t_{red}}$  である。 これと、電子数とその分散にポアソン分布を仮定することで、カウントと分散の関係は次のようにかける

$$\sigma_{C_{red}}^{2} = \sigma_{C_{red}}^{2} + \sigma_{C_{rst}}^{2}$$

$$(2.4)$$

$$= [g^2 F(\Delta t_{rst} + \delta t_{red}) + \sigma_{N_{noise}}] + g^2 F(\Delta t_{rst}) + \sigma_{N_{noise}}$$
(2.5)

$$= g^2 F(2\Delta_{t_{rst}} + \Delta_{t_{red}}) + 2\sigma_{N_{noise}}^2$$

$$(2.6)$$

$$L \supset \mathcal{T} \sigma_{C_{diff}}^{2} = g C_{diff} \left( a + \frac{2\Delta t_{rst}}{\Delta t_{red}} \right) + 2\sigma_{N_{noise}}^{2}$$

$$(2.7)$$

従ってカウントとカウントの分散の線形性からゲイン値 gを求めることができる。

ゲイン調査のための画像は、露出時間 30sec 固定で6枚1セットをハロゲン光源の強さを変えて3回(計 18枚)取得した。ダーク引きをした後緑色で囲った部分のカウントおよびその分散値を求め各ポートごと にプロットした。左から順に port1-port4 である。その結果を下に載せる。

実験結果より、カウントが上昇するにつれ線形性がずれて分散が二次関数的に大きくなり、上述したような 直線的なものとは異なる結果となった。これは光源がまだ安定せずカウントが上昇傾向にあったためだと考 えられる。この状況で線形フィッティングすると切片がマイナス値をとってしまった。このため、18枚の 画像全てを用いるのではなく、カウント数を見比べて比較的光源が安定していそうな画像を選定し、フィッ ティングを行うことにした。結果としてカウント6000以下が安定しており、その部分でフィッティング を行うことにした。フィット結果と導き出されたゲイン値を表 2.1 にのせておく。



図 2.8: ゲイン測定に用いた領域。10 × 2000 pixel



図 2.9: ゲイン測定結果 (port1)



図 2.11: ゲイン測定結果 (port2)



図 2.10: カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port1)



図 2.12: カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port2)



図 2.13: ゲイン測定結果 (port3)

図 2.14: カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port3)



図 2.15: ゲイン測定結果 (port4)

図 2.16: カウント 0-6000 で線形フィットした結果 (port4)

表 2.2: ゲイン調査結果

ポート	傾き [ADU/e <sup>-</sup> ]	切片	ゲイン値 $[e^-/ADU]$
port1	$0.321 \pm 0.006$	$340.81 \pm 18032$	$3.847 {\pm} 0.0734$
port2	$0.318 {\pm}~0.005$	$88.47 \pm 19.54$	$3.8833a{\pm}0.062$
port3	$0.329 \pm 0.005$	$77.51 \pm 21.45$	$3.7535a{\pm}0.058$
port4	$0.3165 \pm 0.0057$	$224.47 \pm 21.19$	$3.902{\pm}0.072$

# 第3章 かなた搭載後のHONIRの性能評価

2013年1月7日に、HONIR は試験観測の為再びかなた望遠鏡へ取り付けられた。今回は従来の撮像モードに加えて、分光モードの立ち上げも行われた。



図 3.1: かなた望遠鏡装着後の HONIR

## 3.1 はじめに

現在の開発の達成状況および改善点調査のため、望遠鏡装着後に行った全ての試験項目を列挙しておく。

- 1 検出器性能評価に関する試験項目
  - ゲイン測定
  - linearity **測定**
  - ノイズ評価
  - ノイズ削減対応

ゲイン測定 bad pixels mapping dark 測定

2 光学系性能評価に関する試験項目撮像モード 星像分布 (星団) 装置効率測定(標準星) 限界等級 バックグラウンド強度 大気分散測定 pixel scale、distortion 測定 ピンホールマスク撮像・瞳ハルトマン板撮像 瞳像の撮像 デフォーカス像撮像・微動 デフォーカス像撮像・粗動 フィルター透過率測定 分光モードスリット結像性能評価 波長同定 装置効率測定 二次光強度評価 大気分散測定 フラット画像 3 装置基本パラメター カセグレンローテータ回転中心測定 4 駆動系に関する試験項目 ホイール駆動試験 ホイール挿入安定試験 5 その他性能評価 ドーム内温度-best focus 位置関係 HOWPol との効率比較 真空・冷却性能 (到達温度・圧力の) 評価

以上の中で、測定の大部分に私も関与したが、データリダクションまで担当したのは Virgo-2K のダーク 調査・リニアリティ調査・ゲイン調査・装置効率となる。

# 3.2 ダーク調査

ダーク画像は K に冷却された黒板を検出器の前に置き、熱輻射と光の入射を遮断した状態で取得した。 実験室での調査同様 600sec のダーク画像から 5sec のダーク画像を差し引いた 595sec のダーク画像の図の 緑色の領域の平均カウント値を求めた。

23.35	24.56	24.56	27.55
23.91	12.98	12.92	22.14
25.64	17.26	17.27	19.79
53.47	45.16	46.53	42.47

図 3.2: 積分時間 595sec のダーク画像(ADU 単位)

各ポートの最下領域ではカウントが他の領域よりも異常に高かった。これは検出器の増幅回路における プリアンプが発光しているためであるが、実験室では光らず今回光った。その原因は現在調査中である。下 4箇所以外の各領域でのカウント値をダーク値として採用することとし、そして最大で 27.55ADU のダー クがあるという結果になった。

## 3.3 リニアリティ調査

リニアリティ調査は、ドーム天井にあるフラット板に、安定化電源を介して光源を照射して積分時間を 変えながら画像を取得して解析した。



図 3.3: リニアリティ調査結果 (preamp 設定 3.0)。横軸積分時間で上図は縦 軸検出器出力カウント値、下 図はリニアリティ精度を表す。13500ADU 付近までは ±1 パーセント のリニアリティが保たれている

preamp 設定は実験室と同じ 3.0 である。結果 ~ 13500ADU までは高いリニアリティを示した。実験室 では ~ 15000ADU という値が出ており、およそ 1500ADU、光子数にして 16500e<sup>--</sup> の差が生じた。この理 由として、つぎのことが考えられる。近赤外線の画像はリセット直後の1回目読み出し画像(rst 画像)と 2回目読み出し画像(red 画像)の差分画像を取得することでノイズ成分を小くする方法がとられている。 red 画像を見比べると、実験室とかなた望遠鏡搭載後で高いリニアリティが保たれる上限カウントは一緒で あった。つまり、red 画像上ではリニアリティが保たれるカウント上限に差異はなかった。このような差分 画像で差が生じてしまった理由として、rst 画像を比較してみると、実験室では ~ 8500ADU、かなた搭載 後では ~ 10000ADU となっていた。このことから実験室とかなた搭載後でバイアス値が変化したか或いは rst 時間の設定が異なっている可能性がある。



図 3.4: 実験室とかなた搭載後での高いリニアリティが保たれる上限カウントの差異について考察した図

# 3.4 ゲイン調査

ゲインは、リニアリティ調査同様フラット板に安定光源を照射したものを画像取得した。様々なカウント値が必要であったため、光学素子を入れる等の処理を施してカウント値にムラができるように画像を取得した。



図 3.5: ゲイン調査用に取得した画像

検出器からの信号を増幅する preamp 設定を 10.2 と 3.0 の両方でゲイン測定用の画像を取得した。解析 領域は実験室と同様の範囲である。今回は 500[ADU] ごとにカウントの平均値とカウントの分散値の平均



図 3.6: preamp=3.0 での port1 のゲイン測定結果

図 3.7: preamp=3.0 での port2 のゲイン測定結果



図 3.8: preamp=3.0 での port3 のゲイン測定結果

図 3.9: preamp=3.0 での port4 のゲイン測定結果

フィッティングはリニアリティが十分保たれる 0 – 10000[*ADU*] の範囲で行った。傾きとゲイン値は以下のようになった。

ポート	傾き [ADU/e <sup>-</sup>	切片	<b>ゲイン値</b> [e <sup>-</sup> /ADU]
port1	$0.1056 {\pm} 0.0029$	$4.524{\pm}16.82$	$10.780 {\pm} 0.260$
port2	$0.1004{\pm}0.0018$	$3.209{\pm}11.84$	$11.191{\pm}0.178$
port3	$0.0974{\pm}0.0013$	$9.0187 {\pm} 7.15$	$10.437{\pm}0.138$
port4	$0.1019{\pm}0.0032$	$2.248{\pm}18.44$	$11.177 {\pm} 0.308$

表 3.1: ゲイン調査結果 (preamp 設定=3.0)

ポート	傾き	切片	ゲイン値 $[e^-/ADU]$
port1	$0.334{\pm}0.003$	$74.450{\pm}16.830$	$3.410{\pm}0.027$
port2	$0.338 {\pm} 0.002$	$38.451{\pm}12.510$	$3.375 {\pm} 0.017$
port3	$0.333 {\pm} 0.004$	$11.190{\pm}24.630$	$3.419{\pm}0.036$
port4	$0.332{\pm}0.004$	$92.555{\pm}25.360$	$3.438 {\pm} 0.036$

表 3.2: ゲイン調査結果 (preamp 設定=3.0×3.4 = 10.2)

preamp 設定 10.2 と 3.0 でのゲインの値の比を計算すると、

表 3.3: ゲイン比調査結果 (preamp 設定=3.0×3.4 = 10.2)

port1: $3.161\pm0.092$ port2: $3.315\pm0.064$ port3: $3.057\pm0.060$ port4: $3.251\pm0.110$ 

同じ光子数でも増幅率の高いほうが ADU 値は大きくなる。よって  $e^-/ADU$  で定義されるゲイン値は、 preamp を 10.2 から 3.0 へ変更した場合、 $\frac{1}{34}$  倍になるはずれである。

表の結果と予想値を比べると、おおよそ 3.4 に近い値をとったが、系統的に小さいとも見える。基本的 には検出器読み出し回路の増幅回路はほぼ正常に作動しているようであるが、用いた抵抗体の誤差が影響 している可能性もある。

#### **3.5** 標準星観測による装置効率の評価1

観測天体からやってきた光は、望遠鏡の主鏡および副鏡で反射した後、コリメーターレンス郡を通過し、 ダイクロックミラー・バンドフィルターなどの光学素子を通過して検出器に入射された後、検出器の量子効 率に基いて電圧へと変換される。検出までの一連の流れの中で光は段々と減光していくため、実際に天体か ら望遠鏡にやってくる光子数と観測される光子数には差異がある。天体からやってくる光子数が最終的にど の程度検出されるかが装置効率であり、望遠鏡と観測装置の重要なパラメーターとなる。装置効率を求める ために、予め等級が判明している Landlto 標準星を数天体、様々な高度で撮像し測光した。まずは地球大 気による減光を補正するために、減光係数と呼ばれる値を求めた。減光係数は次の式で定義される。

$$m_{obs} = M_{cat} + A * X$$

 $m_{obs}$  と  $M_{cat}$  はそれぞれ測光で得られた等級とカタログ等級、 X が airmass とよばれる大気の厚さを表したパラメーターであり、 A が減光係数となる。式より標準星を測光した際の airmass を横軸に、 $m_{obs}$  と $M_{cat}$  の差分を縦軸にプロットしたものから減光係数を求めた。また今回観測した標準星のリストを載せておく。

landolt 標準星	RA	dec
SA99-438	07h55m54s	-00d16m51s
SA98-650	06h52m05s	-00d19m40s
SA97-249	$05\mathrm{h}57\mathrm{m}07\mathrm{s}$	+00d01m12s
SA96-83	04h52m59s	-00d14m44s

表 3.4: 観測した標準星リスト及びそのフィールド1



図 3.10: J,H,Ks バンドの大気減光 1, 観測日は 2013 年 1 月 14 日 (主鏡洗浄前)。傾きが減光係数となる。

フィッティング結果より、減光係数はそれぞれ J-band:,H-band:,Ks-band:となった。この値を用いること で大気による減光を補正することになるが、これらの値は過去のデータに比べると異常に大きいため、観 測当時の大気の状態が不安定でうまく測光できていない可能性が高い。そこで、1年前の観測試験での快 晴夜に得られた傾き(減光係数) = 0.1[mag/airmass] でフィットした場合で装置効率を求めることにした。

装置効率は、実際に観測された光子数と望遠鏡にやってくると期待される光子数の比をとることでもと められる。M 等の天体から波長  $\lambda$ [Å] の光がかなた望遠鏡の主鏡 1.5m (ここから直径 0.323m 副鏡が覆って いる面積 0.36m を差し引く)にやってくると期待される 1[Å] あたりの光子数  $N_{\lambda}$  は

$$N_{\lambda} = \frac{4.5 \times 10^{10}}{\lambda} \times 10^{-\frac{M}{2.5}} \times (1.5^2 - 0.323^2)$$

で表せられる。各バンドの有効波長および波長幅は

バンド	J	Η	Ks
<b>有効波長</b> [nm]	1248.5	1638.0	2145.5
<b>波長幅</b> [nm]	159.3	286.2	319.5

となっており、これらを $N_{\lambda}$ の式に代入することで各バンドにおける期待光子数が求められる。以上より求めた装置効率および設計値を下の図に載せる。HONIRの装置効率の設計値は、望遠鏡の主鏡・副鏡の反射

率、コリメーターレンズ郡の透過率、各光学素子の透過率および検出器の量子効率の積で表される。値は 2011年原尾修論のものを用いた。

表 3.5: 各近赤外バンドごとの装置効率設計値と測定値1

バンド	J	Н	К
装置効率:設計値	約 14%	約 20%	15%
装置効率: フィットで求めた減光係数	28-30%	33-38%	24-27%
装置効率:減光係数=0.1 固定	16-25%	23-30%	13-20%

となっている。設計値と今回出した、大気減光率を用いた装置効率では、設計値を大きく上回る非常に 高い装置効率が導き出された。これらの値の信頼性は低いと考えられる。一方参考値として減光係数を 0.1 で固定した場合、J、H バンドでの装置効率は依然設計値を上回る振舞いを見せたが、より現実的な値を示 した。

今回の標準星測定時の天候は見た目には快晴であったが湿度が高く、地球大気の吸収帯の制限を受ける近赤 外バンドはその不安定な影響を受けた可能性があるので、今回の値は参考値にとどめ、再測定を行う必要 があろう。

### 3.6 標準星観測による装置効率の評価2

前章で示した観測から後日、望遠鏡の主鏡の洗浄を行った。それにともない 2013 年 2 月 21 日再び装置 効率の導出のための観測を行った。今回観測した標準星のリストを載せておく。

#### 表 3.6: 観測した標準星リスト及びそのフィールド 2

landolt 標準星	RA	dec
SA102-1081	10h57m04s	-00d13m10s
SA101-316	09h54m52s	-00d18m32s
SA100-269	08h53m19s	-00d41m10s
SA98-650	$06\mathrm{h}52\mathrm{m}05\mathrm{s}$	-00d19m40s
SA99-438	07h55m54s	-00d16m51s

まずは大気補正の為の減光係数を求めた。

快晴であったのに加え湿度も低かったためか、前回と比べてきれいに直線でフィッティングが行えた。これを基に測光で得られた標準星の等級を補正し得られた装置効率の結果はつぎのようになった。

表 3.7: 各近赤外バンド	*ごとの装置効率設計値と測定値2
----------------	------------------

バンド	J	Н	K
装置効率:設計値	約 14%	約 20%	15%
装置効率: 今回結果	25.3-26.5%	29.3-32.0%	18.4-20.4%



図 3.11: 望遠鏡主鏡洗浄後の J,H,Ks バンドの大気減光 2

今回は大気減光の airmass 依存性が素状よく得られており、前回と比べて相対的に信頼性の高い結果に なっていると考えらえる。結論として、J, H バンドの推定装置効率はそれぞれ  $J \sim 25\%, H \sim 30\%$ 、(誤差 0.5-1%)、Ks バンドについては  $Ks \sim 21\%$ (誤差 1-2 %) となった。

# 第4章 まとめと今後について

## 4.1 結果の summary

今回私は実験室における HONIR の近赤外検出器 Virgo-2K の性能評価とかなた搭載後の性能評価および装置効率の調査を行った。

・ダーク

実験室、かなた搭載後でのダークのカウント数を、ゲイン値を掛け積分時間で割ることで一秒あたりの 暗電流値とした。

結果、実験室での暗電流値は ~  $0.38[e^-/sec]$  かなた搭載後での暗電流値は ~  $0.46[e^-/sec]$  であった。よっ てかなた搭載後暗電流値は増加していることとなった。しかし仕様値は ~  $1.0[e^-/sec]$  であるため観測には 大きな影響がないといえる。

・リニアリティ

高いリニアリティ精度 (~1%) が保たれる上限カウント値は

実験室:~15000[ADU]

望遠鏡装着後:~13500[ADU]

であった。しかし、差分前の画像のカウント値はどちらも ~ 23500ADU と差異ない値が見られた。差し引きする画像 (rst 画像) のカウント値に差があることからバイアス値又は積分設定時間が実験室と異なっていると考えられる。

・ゲイン

HONIR をかなた望遠鏡に装着する際、検出器系と電源をつなぐケーブルを、ノイズが軽減されるもの に変更した。実験室と preamp が同設定 (preamp=10.2) での比較を次の表にのせた。

	port1	port2	port3	port4
<b>実験室</b> [e <sup>-</sup> /ADU]	$3.847 \pm 0.073$	$3.883 \pm 0.062$	$3.753 \pm 0.058$	$3.902 \pm 0.072$
かなた搭載後 $[e^-/ADU]$	$3.410\pm0.031$	$3.374\pm0.020$	$3.419\pm0.041$	$3.437 \pm 0.041$

・装置効率

主鏡洗浄後の調査の結果、それぞれ  $J \sim 25\%$ ,  $H \sim 30\%$ 、(誤差 0.5-1%)、 $Ks \sim 21\%$ (誤差 1-2 %) となった。 これは設計値 ( $J \sim 14 \ verb$ )を大きく上回る結果となった。その理由の一つとして原尾修論での設計値の見 積りが厳し目であったことが考えられる。

### 4.2 HONIR 搭載後のかなた

今試験観測でかなた装着は3回目となる。運用に支障をきたすような大きな問題はなく、2月下旬まで試 験観測が続けられる予定となっている。一方で今回新たにあがった課題・未解決の課題もあり、次の点があ げられる。

・瞳のケラレ解消

瞳像を確認したところ、ケラレが生じていることがわかった。瞳の位置がズレている可能性が指摘されているため、観測終了後レンズ群の調査が必要となる。

・駆動系の作動障害

観測中光学素子の交換の際、フィルターや分光グリズムが原点回帰せずに途中で停止するエラーが見られた。これは現在も続いており、一旦望遠鏡自体を原点回帰させてから光学素子を交換したり原点補正をこまめに行うことで HONIR を運用している。試験観測終了後は原因調査とともに光学素子ホイールの再調整を行う必要がある。

・分光モードの性能評価

今試験観測のメインである分光モードの性能評価が追い付いていないので、早急に、可能な限り試験観 測中に性能評価を行っていく。

また、観測試験終了後の HONIR に施す作業としては現在次の点があげられている。

・偏光モードの立上げ

半波長板の開発の遅れなどあり、今回偏光モードを導入することはできなかったが、次回試験観測では 偏光モードを立上げての試験観測となる。偏光モードが立ち上がれば近赤外での blazar や GRB 等の偏光 観測が可能になり、サイエンスも多くなる。

・Virgo-2K の新読み出しボード取付け

今回の試験観測には間に合わなかったが、M2 宇井氏が国立天文台にて開発を続けていた新読み出しボードが完成したとの報告を受けた。地上実験を行い順調に結果が出れば、より早い近赤外画像の読み出しが可能となり、観測効率が向上する。

謝辞

途中教育実習で不在になったり、ガラスを食べてしまう等研究室の皆様にはご迷惑をおかけしつつ、新観 測装置の性能評価に携らせていただきました。要領も悪く物分りも悪い私に対して丁寧に解析方法や HONIR についての知識をくださった川端先生、連晩での観測疲れで観測中に居眠りしてしまったにも拘わらず優し くフォローしてくださった秋田谷先生、ありがとうございました。また、無知な私が尋ねても嫌な顔ひとつ せずに質問や疑問にこたえてくれたり、ときには悪ふざけもしてくださった先輩、そしてセミナーからはじ まり卒論提出直前まで一緒にがんばってきた4年生のみんな。研究室に入ってもうすぐ1年が経ちますが、 ここまで楽しくやれてこれたのはこの研究室が真面目で楽しい雰囲気だったからです。高エネルギー宇宙・ 可視赤外線天文学研究室の皆様には感謝しております。本当にありがとうございました。これからまた2年 はお世話になるとおもいますが、食べ物には気を付けてこの研究室で過していきたいと思います。

# 参考文献

- [1] 原尾 達也 広島大学 修士論文 2012
- [2] 宮本 久嗣 広島大学 修士論文 2008
- [3] 先本 清志 広島大学 修士論文 2010
- [4] 浦野 剛志 広島大学 修士論文 2012
- [5] Massey et al.1998, Apj, 328, 315
- [6] 先本 清志 2012 年春季天文会発表資料
- [7] Landolt et al. 1992, AJ, 104, 340
- $[8]\,$ akimoto et al. 2012, Proc.SPIE,8446,844673