

突発天体の広視野多バンド探索に向けた
国産大面積近赤外線検出器の性能評価

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M165567

森裕樹

主査：川端弘治 副査：杉立徹

平成30年3月21日

概要

急激な増減光を示す突発天体には、 10^{20} eV まで達する高エネルギー宇宙線や重力波の起源など、宇宙の謎を紐解くための重要なメッセンジャーとなっているものがある。このような天体は、いつどの方向に現れるのか、どのような光り方をするのが事前には判断し得ないものも多く、また観測機会も限られることから観測の成功のためには広い観測範囲から当該天体をいち早く同定することや、様々な波長の電磁波で同時に観測することなどが重要である。波長 $1\sim 3\mu\text{m}$ の近赤外線は可視光に比べて透過力が高い上、遠方天体からの可視光が宇宙膨張によって赤方偏移した光を観測できるといったメリットがあるが、現在流通している大面積近赤外線検出器はいずれも海外製で極めて高価な上に、軍需品扱いで輸出入が規制されているため、天文観測での利用は依然制限されている。我々は、国立天文台や浜松ホトニクスなどと共に低ノイズ・大面積の近赤外線検出器の開発を進めてきた。これが実現すれば、大面積 CCD を多数利用した可視広視野カメラと同等の観測が、近赤外線でも実現するなど、天文学研究に大きく貢献することが期待される。

本研究では、今回開発した $1.3\text{k}\times 1.3\text{k}$ InGaAs 検出器の天文観測利用を見据えた性能評価を実施した。温度 140K の冷却下における暗電流は目標値である $< 0.1e^-/s$ を達成しており、出力信号の線形性も $140000e^-$ まで $\pm 1\%$ 以内の精度で保たれていることが判った。読み出しノイズは $\sim 40e^-$ とやや大きめではあるが、実用可能なレベルに抑えられている。また、欠陥画素数も 0.5% 程と、近赤外線検出器としては極めて良好な値が得られた。これら諸性能は、現在広島大学かなた望遠鏡で利用している海外製近赤外線検出器と比較しても遜色のない値である。一方で、素子の外縁部に暗電流値がやや不安定な画素群があるなどの課題も判明し、メーカーへフィードバックした。次回 1.3k InGaAs 検出器試作に向け、現在メーカー側で原因を調査中である。残る課題は枠状模様のみとなり、国産大面積近赤外線検出器の実用化の目途が立ったといえよう。

また、私はこの研究と並行して、かなた望遠鏡を用いて高エネルギーニュートリノ源候補天体の探索も実施した。南極にある IceCube 検出器が 2017 年 9 月 22 日に検出したニュートリノイベントにおいて、位置誤差領域内で明るさが変動する活動銀河核を見出した。IceCube ニュートリノイベントの電磁波対応天体候補が見つかったのは初めてであり、高エネルギー宇宙線の起源により迫る発見となった。

目次

第 1 章 序論	8
1.1 天文観測における可視光・近赤外線の波長とバンド	8
1.2 東広島天文台	9
1.2.1 かなた望遠鏡	9
1.2.2 可視赤外線同時カメラ HONIR	10
1.3 近赤外線領域における突発天体の観測	10
1.3.1 ブレーザー	11
1.3.2 GRB	12
1.3.3 重力波対応天体	13
1.4 高エネルギーニュートリノ対応天体の赤外線観測	15
1.4.1 高エネルギーニュートリノ	15
1.4.2 IceCube ニュートリノ観測所	16
1.4.3 高エネルギーニュートリノ起源天体の候補	18
1.5 近赤外線検出器	19
1.5.1 天文観測用赤外線検出器の現状	19
1.5.2 浜松ホトニクス社開発 InGaAs 赤外線検出器	20
1.6 本研究の目的	22
第 2 章 赤外線検出器評価システムの整備	23
2.1 デュワー全体像	23
2.2 温度コントローラー	24
2.3 真空度モニター	25
2.4 フィルターホイール	26
2.5 デュワー内部の配線整備	27
2.6 読み出しセットアップ	28
第 3 章 検出器の性能評価	31
3.1 128×128 InGaAs 検出器の読み出し試験	33
3.1.1 読み出しノイズ評価	33
3.1.2 リニアリティ評価	34
3.1.3 128×128 InGaAs 検出器性能評価まとめ	36
3.2 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の読み出し試験	36
3.2.1 バッドピクセル	37

3.2.2	読み出しノイズ評価	40
3.2.3	リニアリティ、及び暗電流評価	42
3.2.4	波長相対感度、及び読み出しノイズの温度依存性	43
3.2.5	エンジニアリンググレード素子を用いた試験観測	46
3.2.6	サイエンスグレード素子の量子効率測定	52
3.2.7	性能評価から判明した 1.3k InGaAs 検出器の問題点	55
3.3	各赤外線検出器の諸性能比較	57
第 4 章	IceCube 高エネルギーニュートリノ電磁波対応天体の探索	59
4.1	変動天体探索の流れ	59
4.2	変動天体判別の流れ	60
4.2.1	撮像データ一次処理	60
4.2.2	差分画像作成	62
4.2.3	測光	65
4.2.4	限界等級の導出	67
4.2.5	変動天体の追観測	67
4.2.6	追観測後のデータ処理	68
4.3	IceCube-161210A 対応天体探索	70
4.3.1	アラート概要	70
4.3.2	変動天体探索結果	70
4.3.3	変動天体探索の反省点	72
4.4	ブレーザーポインティング観測	73
4.4.1	BROS カタログ	73
4.5	IceCube-170321A 対応天体探索	74
4.5.1	アラート概要	74
4.5.2	変動天体探索結果	74
4.6	IceCube-170922A 対応天体探索	76
4.6.1	アラート概要	76
4.6.2	変動天体探索結果	76
4.6.3	OISTER による TXS0506+056 の追観測	80
4.6.4	かなた望遠鏡による TXS0506+056 の追観測結果	81
第 5 章	まとめと今後	93
5.1	1.3k×1.3k InGaAs 検出器の性能評価	93
5.2	IceCube 高エネルギーニュートリノニュートリノ電磁波対応天体の探索	93
5.2.1	IceCube-170922A	94
5.2.2	今後の課題	94
5.3	全体のまとめ	95

目次

1.1	フィルターシステム [1]	9
1.2	かなた望遠鏡	10
1.3	AGN の想像図、及びレーザーの模式図	12
1.4	HOWPol で観測された GRB121011A のライトカーブ。GRB 発生後 630s までは $t^{0.96}$ \propto で増光し、630s 以降は $t^{-1.3}$ \propto で減光。 [4]	13
1.5	過去 6 回 (内 1 回は重力波候補現象) の重力波到来方向の位置決定精度。GW170817 は 30 平方度。 [5]	14
1.6	日本チームが追観測した GW170817 のライトカーブ。可視光領域 (V,R,g,r,i,z バンド) の減光に比べて近赤外線領域 (J,H,K バンド) では緩やかに減光している。 [6]	15
1.7	宇宙線のスペクトル分布 [7]	16
1.8	IceCube 観測所の写真と検出器の構造イメージ図 [8]	17
1.9	IceCube が捉えた 250TeV のニュートリノイベントのイメージ図。水色の線で描かれた経路でニュートリノが到来。 [9]	17
1.10	IceCube が 2015 年までに検出したニュートリノの到来方向を示した図。図中の数字はイベントナンバーで、色はイベントの有意度を表す。 [10]	18
1.11	天体のサイズと磁場強度から求められる、各天体の荷電粒子加速限界エネルギー [11][12]	19
1.12	128×128 InGaAs 検出器	21
1.13	1.3k×1.3k InGaAs 検出器	22
1.14	1.3k×1.3k InGaAs 検出器の 2or8port 読み出しでのピクセルの読み出し方向 [16]	22
2.1	評価システム概念図	23
2.2	検出器試験用デュワー	24
2.3	フィルターホイールに設置した温度センサー。画像中央付近のネジ止めされているものがセンサー。	25
2.4	温度・真空度の制御とモニター結果。温度は 100K で制御している。	26
2.5	フィルターの写真。画像中央付近の色が付いているフィルターは J バンドフィルター。	26
2.6	デュワー内部の配線概念図	27
2.7	読み出しシステム。イーサネットケーブルで PC と接続されている。コネクタは FX2-60pin(4 列型)。	29
3.1	ノイズ対策の様子。平編金属線を加工した治具用いて、デュワー・TEXIO 電源・ADC ボードを電氣的に一致させている。	31
3.2	ノイズ対策の有無によるノイズ値の変化	32

3.3	大学実験室での試験時のセットアップ	32
3.4	128×128 InGaAs 検出器のノイズヒストグラム	34
3.5	赤色 LED を用いたリニアリティ測定のセットアップ。LED の電源は TEXIO 電源から供給している。	35
3.6	128×128 InGaAs 検出器のリニアリティ	35
3.7	1.3k InGaAs 検出器の読み出し列制限時の画像	37
3.8	素子温度 140K での 90s ダークから作成した 1.3k×1.3k InGaAs 検出器のバッドピクセル分布。白い箇所がバッドピクセル。左:エンジニアリンググレード 右:サイエンスグレード	38
3.9	バッドピクセル分布作成に用いたダーク画像とフラットフレームの ADU カウントヒストグラムと、バッドピクセルと判定したカウントの閾値。図中橙色の線と矢印は閾値を表す。	39
3.10	140K での 1.3k InGaAs 検出器のノイズヒストグラム	40
3.11	140K での 1.3k InGaAs 検出器サイエンスグレードのノイズ追加調査	41
3.12	140K での 1.3k InGaAs 検出器のリニアリティ。図中の下のプロットはフィットからの残差。	42
3.13	140K での 1.3k InGaAs 検出器の暗電流	43
3.14	InGaAs 素子の温度ごとの波長感度特性の理論値 (浜松ホトニクス社資料より)	44
3.15	波長相対感度測定時の様子	44
3.16	波長相対感度測定で取得したライトフレームと解析に用いた領域	45
3.17	1.3k InGaAs 検出器の温度ごとの波長相対感度測定結果。270k~273K でのカウントと各温度の 1350nm でのカウントを 1 と規格化している。	45
3.18	1.3k InGaAs 検出器のノイズ温度依存性	46
3.19	1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードの試験観測時のセットアップ。かなた望遠鏡ナスミス焦点に専用のデュワー固定台を設置。	47
3.20	1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードのファーストライトで撮像した木星の 3 色合成写真。1210×840pix(3.43'×2.38')。 Red=H バンド,Green=J バンド,Blue=Y バンド 左下:ガニメデ 右上:エウロパ 公転の影響で衛星の位置が動いているのが分かる	48
3.21	1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードのファーストライトで撮像した M3 球場星団の 3 色合成写真。1190×660pix(3.37'×1.87')。 Red=H バンド,Green=J バンド,Blue=Y バンド	49
3.22	試験観測時の東広島天文台上空の雲の様子。 左上:J バンド 右上:Y バンド 左下:H バンドの観測時の様子。	52
3.23	赤外線レーザーのドライバ。ドライバ右端の白い可変抵抗を回すことで、レーザー出力を変更できる。	53
3.24	パワーメーターを用いた赤外線レーザーの強度測定の様子	53
3.25	量子効率測定時のレーザーと ND フィルターのセットアップ	54
3.26	レーザー照射時の画像	55
3.27	枠状模様。左図の緑枠を拡大したものが右図で、素子の外縁部は他のピクセルとカウントが異なることが分かる。	56
3.28	通常部のピクセルと枠状模様内のピクセルのリニアリティの比較。dark 減算は行なっていない。枠状模様部もそれなりのリニアリティは保つが、傾きや 0 秒積分でのカウントが大きいが判る。	56

3.29	左から順に、100s,600s,100s/600s のダーク画像	57
4.1	変動天体探索の流れ	59
4.2	左:生画像。画像内の黒い線がオーバースキャン領域 右:オーバースキャン領域を切り取った後の画像	60
4.3	左:ダーク引きまでを行った J バンドの画像 中:J バンドフラットフレーム 右:フラット割り後の画像	61
4.4	赤経赤緯座標の模式図 [20]	62
4.5	差分画像作成の流れ	63
4.6	左:かなた望遠鏡 HONIR の画像 (インプット画像) 右:2MASS カタログ 1 観測領域の画像	64
4.7	swarp コマンドの使用例。左図のように 2MASS カタログから取得した 6 枚の画像に対して swarp コマンドを実行し、インプット画像と同じサイズの右図が出力される。	64
4.8	差分画像の作成例。左から順にインプット画像、テンプレート画像 (2MASS カタログ)、差分画像	65
4.9	器械等級 vs カタログ等級の plot 図。測光原点は切片から導出。	66
4.10	アパーチャー測光のイメージ図 [25]	67
4.11	IceCube-161210A の観測結果。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域	70
4.12	IceCube-161210A の J バンドの差分画像	71
4.13	IceCube-170321A の観測領域。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域	74
4.14	IceCube-0321A で観測した各ブレーザーの拡大図。それぞれ左:かなた 2017/3/22 中:2MASS 右:かなた-2MASS。画像中央付近の緑円が BROS カタログに記載されているターゲット天体の位置。~2'×2'。	75
4.15	IceCube-170922A の観測領域。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域	77
4.16	IceCube-0922A で観測した各ブレーザーの拡大図。それぞれ左上: かなた 2017/9/23 右上:2MASS 左下:かなた-2MASS 右下:かなた 9/24-9/23。画像中央付近の緑円が BROS カタログに記載されているターゲット天体の位置。~1'×1'。	78
4.17	ASAS-SN による TXS0506+056 モニター結果。左:MJD=55971~58017(2012/2/14~2017/9/21) 右:MJD=57826~58017(2017/3/14~2017/9/21)	80
4.18	reference 候補天体の ID	82
4.19	R バンドの比較星候補天体同士の plot 結果の一例。C1 を比較星として用いている。等級が 1 つの図に収まるよう、適当な定数を足している。	83
4.20	C3-b,j-b,f-b,l-b の plot。f-b と l-b が安定、つまり b,f,l が安定していることが判る。	83
4.21	SExtractor が検出した天体数を用いて雲の影響を評価した R バンドの画像。検出天体数は 左:25 中:69 右:108	84
4.22	雲の影響のある画像を除外したデータ。図 4.20 に比べて外れ値が減少しているのが判る。	85
4.23	比較星 b,f,l で $m_{obj_X} \pm \sigma_{obj_X}$ を plot したライトカーブ	86
4.24	比較星 b,f,l で $m_{obj_average} \pm \sigma_{obj_average}$ plot したライトカーブ	87
4.25	比較星 b,f,l の平均等級との相対測光と、画像内の多数の天体から導出した測光原点を用いた相対測光との比較	87
4.26	天体高度 vs 等級。大気減光がないかを確認。	88

4.27	TXS0506+056 のライトカーブ。上:ライトカーブ 中:R-J の色の変化 下:色等級図。	89
4.28	TXS0506+056 の SED	90
4.29	TXS0506+056 の偏光度と偏光方位角	91
4.30	HOWPol で取得した TXS0506+056 のスペクトル	92

表 目 次

1.1	天文観測に用いられるバンドと波長域の対応関係	8
1.2	浜松ホトニクス社製 CCD と Reytheon 社製 VIRGO-2k 検出器の仕様	10
1.3	128×128、及び 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の諸性能 (T=25°C)	21
2.1	デュワー内部に作成した MicroDsub25pin(オス)-ハーメチックコネクタ (24pin) の配線表。() 内は導線の被覆の色。	28
2.2	InGaAs 検出器と読み出しシステムの配線表	30
3.1	国立天文台と広島大学での 128×128 素子のノイズ評価試験結果比較。単位: e^-	34
3.2	1.3k×1.3k InGaAs 検出器に対して行った試験項目とその実施場所	37
3.3	パッドピクセルまとめ	39
3.4	検出器温度 140K における 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の各 port での平均ノイズ値。単位: $[e^-]$	40
3.5	検出器温度 140K における 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の各 port の暗電流値。単位: $[e^-/s]$	43
3.6	量子効率導出の際に考慮すべき反射面による光子の損失 (ナスミス台搭載)	50
3.7	1.3k×1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレード素子の M3 球状星団の天体を用いて導 出した量子効率 (参考値)	51
3.8	ND フィルターの透過率 (実測値)	54
3.9	1.3k InGaAs 検出器サイエンスグレード素子の量子効率	55
3.10	1.3k×1.3k InGaAs 検出器と Virgo 検出器の諸性能比較	57
4.1	IceCube-161210A の 16 観測領域の ID	71
4.2	IceCube-161210A の J バンドでの観測結果。限界等級は S/N=10 での値	72
4.3	IceCube-170321A の観測結果	76
4.4	IceCube-170321A の観測結果	79
4.5	TXS0506+056 の追観測を依頼した機関一覧	81
4.6	比較星候補天体のカタログ等級	82
5.1	1.3k×1.3k InGaAs 検出器性能評価まとめ	93

第1章 序論

1.1 天文観測における可視光・近赤外線の波長とバンド

この小節では、天文観測における波長とバンドについて述べる。可視光の全域、及び近赤外線の一部の波長帯は、地球大気にほとんど吸収されずに地上まで届くため、天文学においてメジャーな観測手段となっている。ただし、近赤外線領域においては地球大気の影響で地上まで透過する波長帯が不連続となっている。そのため近赤外線域の天文観測では、地球大気を透過する波長帯だけを観測できるように望遠鏡と検出器の間に狭帯域フィルターを挿入して観測を行っている。また、可視域でも波長依存性に関する情報が有用であることから、いくつかの帯域 (バンド) に分けて観測することが多い。表 1.1 に、かなた望遠鏡で用いられている可視・近赤外線領域のバンドとその波長域をまとめた。可視光領域のフィルターには SDSS system と、かなた望遠鏡でも使用されている Johnson-Cousins system が広く用いられており、中心波長や波長幅が異なっている。図 1.1 にそれぞれのフィルターシステムの波長透過曲線をまとめた図を載せる。本論文中でバンドと波長域を用いる場合、表 1.1 の対応関係を用いているものとする。

バンド	可視光					近赤外線		
	B	V	Rc	Ic	Y	J	H	Ks
中心波長 [μm]	0.445	0.551	0.659	0.806	1.035	1.249	1.638	2.157
波長幅 [μm]	0.101	0.083	0.157	0.154	0.157	0.159	0.286	0.320

表 1.1: 天文観測に用いられるバンドと波長域の対応関係

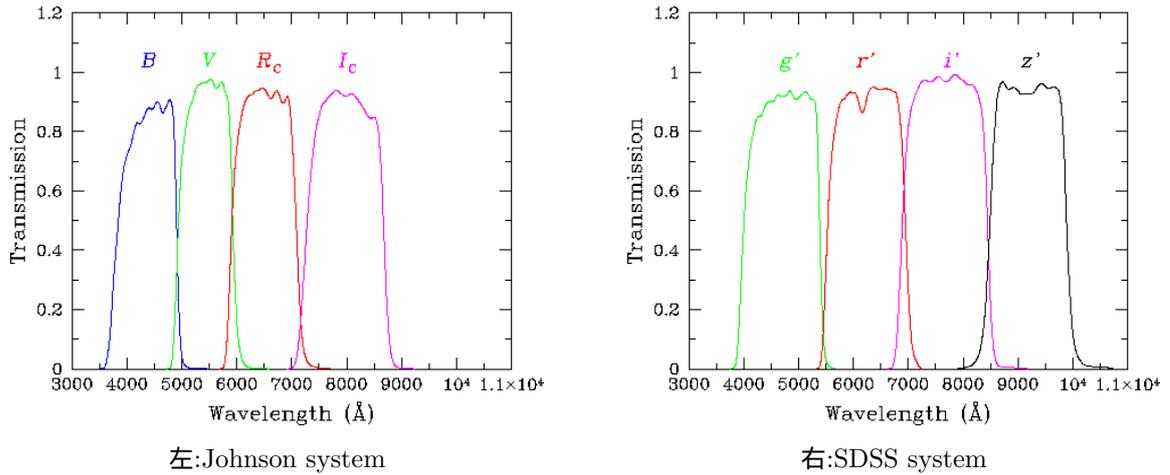


図 1.1: フィルターシステム [1]

1.2 東広島天文台

ここでは、東広島天文台の主力観測機器であるかなた望遠鏡と、その主力観測装置である赤外線同時カメラ HONIR について述べる。

1.2.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡(図 1.2)とは、広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台に備え付けてある口径 1.5m の可視近赤外望遠鏡である。このサイズの望遠鏡において、駆動速度が世界でもトップクラスであることに加えて、大学附属施設であるため観測時間が豊富にあることから、突発的に現れる、ないし明るくなった天体(突発天体)の観測や、その継続観測がし易いという利点を持つ。近年は重力波やニュートリノなどを検出した際に、流れるアラートを受け取った際に対応天体の探索やフォローアップ観測を実施するなど、他波長との連携にも取り組んでおり、マルチメッセンジャー天文学の発展にも貢献している。望遠鏡の構造上、天体高度が 10 度以上でなければ観測ができない。

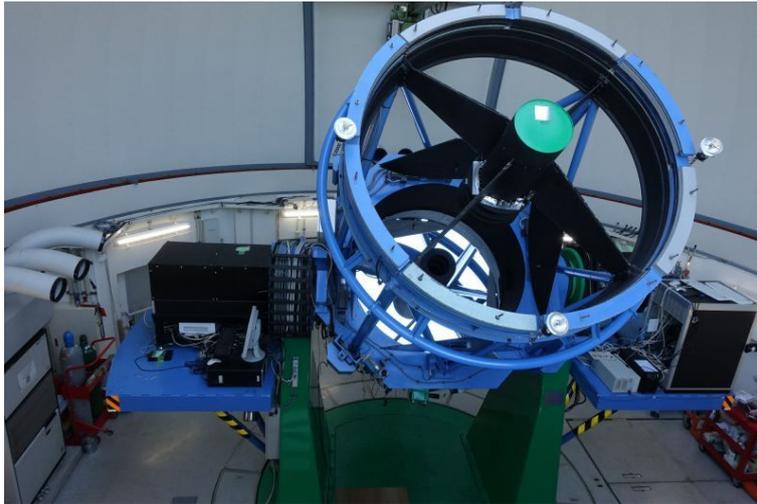


図 1.2: かなた望遠鏡

1.2.2 可視赤外線同時カメラ HONIR

可視赤外線同時カメラ HONIR(Hiroshima Optical and Near InfraRed camera) は広島大学が 2006 年から開発を進めているかなた望遠鏡の主力観測装置であり、可視光と近赤外線での同時撮像観測・偏光撮像観測など、多波長・多モード観測が可能な点が最大の利点である。可視 CCD 1 素子と、近赤外線検出器 2 素子が搭載可能、つまり最大 3 バンドでの同時観測が可能な設計となっているが、2018 年現在、可視 1・近赤外線 1 素子のみが搭載されており、2 バンドでの同時観測が可能となっている。いずれのバンドもその視野は $10' \times 10'$ (10 分角) である。表 1.2 に、搭載されている検出器の諸性能を示す。広島大学では現在、浜松ホトニクス社、国立天文台などと共同で大面積赤外線検出器を開発中であり、これが完成した際は HONIR の 3 つ目の検出器として搭載する予定である。

項目	完全空乏層型 CCD	VIRGO-2k
ピクセルサイズ [μm]	15×15	20×20
有効画素数 [pixel]	2048×4096	2048×2048
ノイズ [electrons]	5	5~15
有効感度波長域 [μm]	0.4~1.0	0.9~2.5
量子効率 [%]	>80(0.54~0.92)	70(1~2.4 μm)

表 1.2: 浜松ホトニクス社製 CCD と Reytheon 社製 VIRGO-2k 検出器の仕様

1.3 近赤外線領域における突発天体の観測

急激な増減光を示す突発天体には、 10^{20}eV まで達する高エネルギー宇宙線や重力波の起源など、宇宙の謎を紐解くための重要なメッセンジャーとなっているものがある。このような天体は、いつどの方向に現れ

るか、どのような光り方をするかが事前には判り得ないものも多く、また観測機会も限られることから観測の成功のためには広い観測範囲から当該天体をいち早く同定することや、様々な波長の電磁波で観測することなどが重要である。天文観測において赤外線は、可視光に比べて透過力が高いうえに遠方天体からの可視光が宇宙膨張によって赤方偏移した光を観測できるといったメリットがあるなど非常に重要であり、突発天体の観測に対しても非常に重要である。本章では主に突発天体の赤外線を用いた観測について述べる。

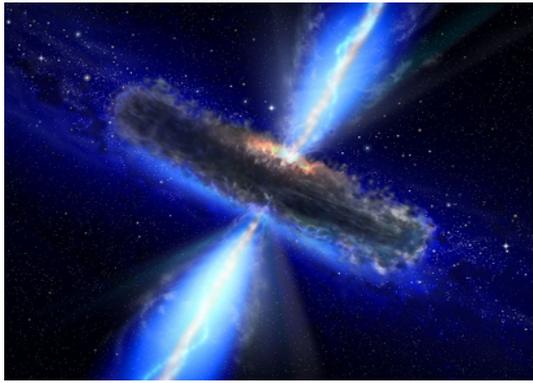
1.3.1 ブレーザー

中心部の輝度が、それ以外の周辺部を合わせた輝度よりも数百倍ほど明るい銀河のことを活動銀河核 (AGN:Active Galactic Nuclei) と呼ぶ。その中心には大質量ブラックホールがあると考えられている。ブレーザーとは AGN の一種で、AGN 放射されるジェットを正面から観測している天体のことを指す (図 1.3)。ブレーザーの観測的特徴として以下の点が挙げられる。様々な観測がなされているが、放射メカニズムは未だに謎が多い。

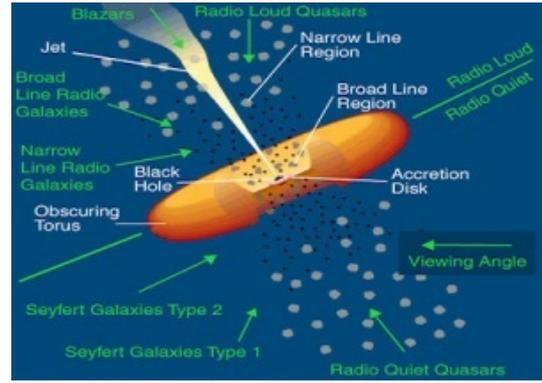
- 電波からガンマ線までの幅広いエネルギー領域で放射
- 数時間～数日という短時間での激しい光度変化
- 電波～可視領域での強い偏光
- 明るくなると青くなる、いわゆる”bluer-when-brighter” という特徴がある

bluer-when-brighter とは、ブレーザージェットに高エネルギー粒子が注入されることで起こると考えられている。エネルギーが注入された結果、短波長側のシンクロトロン放射の光量が増加し、青くなる。新たに注入されるエネルギーの起源は、相対論的速度を持ったシェル同士の衝突や星間物質との衝突であると考えられている。

ブレーザーは更に、FSRQ(Flat Radio Spectrum Quasar) と BL Lac に大別することができ、FSRQ は他のクエーサーと同様に可視スペクトル中に強い輝線を伴うが、BL Lac は可視域で輝線が非常に弱い、ないし見えない天体であるという違いがある。偏光度の変動幅にも違いがあり、BL Lac に比べて FSRQ のほうが激しく変動することが知られている。BL Lac 天体のシンクロトロン放射のピークは近赤外線領域にあるため、近赤外線領域で比較的精度のいい観測が可能である。シンクロトロン放射は磁場に高エネルギープラズマが巻き付き、その時に放射が起こるため、シンクロトロン放射を偏光観測することで、放射領域の磁場情報がわかる。よって、ブレーザーの構造を理解する上で有効な手段であると言える。また、ブレーザーは前述の通り幅広い領域での放射を持つため、ブレーザー放射メカニズムの解明のためには、近赤外線領域だけではなく多バンドでの観測が重要となる。



左:AGN の想像図 [2]



右:AGN の統一モデルの模式図 [3]

図 1.3: AGN の想像図、及びブレイザーの模式図

1.3.2 GRB

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst : GRB) は宇宙最大の爆発現象で、短時間の間に高エネルギーのガンマ線をジェット状に放射する現象である。GRB はガンマ線の放射継続時間から 2 種類に分類されており、典型的に 2 秒以下のものを short GRB、2 秒以上のものを long GRB といい、それぞれ発生機構は short GRB : 中性子星同士もしくは中性子星とブラックホールの連星合体による現象 long GRB : 大質量星の最期の爆発 だと考えられている。また、GRB はガンマ線を放射した後、エネルギーの小さい電磁波帯において、時間のべき乗で急激に減光する残光を残す (図 1.4)。この残光は可視光や近赤外線で見ることができ、残光の分光や偏光観測により GRB 源までの距離や放射メカニズムなどを調べることが出来る。

GRB は非常に明るいため、遠方で発生した場合でも電磁波が地球に到達できるため、宇宙が生まれて間もない頃の情報を取得できる可能性がある。過去には、GRB090423 おいて、約 131 億光年先 (赤方偏移=8.2) で発生した GRB を岡山天体物理観測所が所有する口径 1.88m 望遠鏡にて J バンドで観測している。岡山観測所では、同時に別望遠鏡にて可視光での追観測も行っているが、赤方偏移の影響を受けて可視光での残光は検出されていない。このように GRB は、かなた望遠鏡と同じ日本国内の口径 1m クラスの望遠鏡でも遠方宇宙の情報を得ることが可能なメッセンジャーである。国産大面積赤外線検出器が国内の天文観測所に普及すれば、このような高赤方偏移突発天体に対して国内での観測が容易になる。

GRB をモニターしている Swift 衛星が GRB を検出すると、インターネットを通じて全世界にアラートが届けられるようになっている。かなた望遠鏡もそのアラートを直接ソケット通信で受信している。かなた望遠鏡では、アラートを受け取った直後に自動で観測が開始されるようになっており、GRB121011A では GRB 発生から僅か 92 秒後から HOWPol(かなた望遠鏡の観測装置。可視 1 バンドによる一露出偏光撮像観測が可能。) による追観測にも成功している (図 1.4)。国産大面積近赤外線検出器が完成し、HONIR による自動可視・近赤外線 3 色同時偏光撮像追観測が実現できれば、可視・近赤外線領域における観測の決定や、放射メカニズムの決定に繋がるなど、そのサイエンス的価値は非常に高いものとなるだろう。

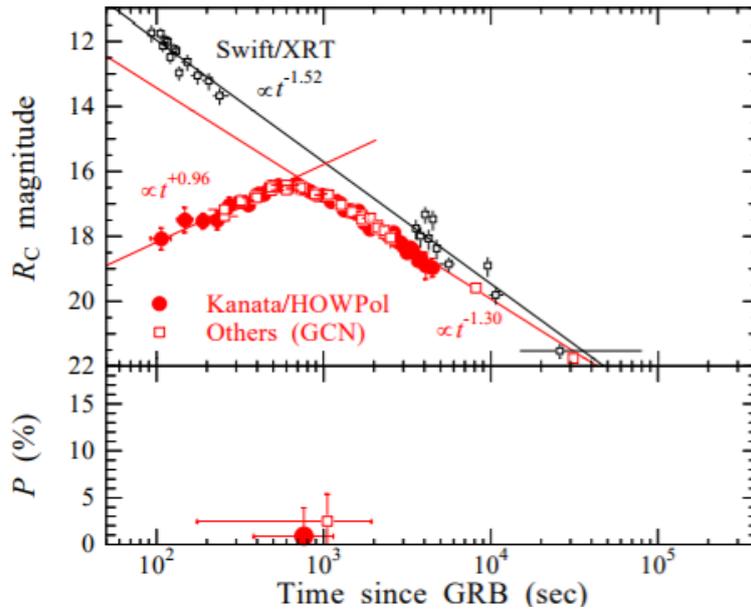


図 1.4: HOWPol で観測された GRB121011A のライトカーブ。GRB 発生後 630s までは $t^{0.96} \propto$ で増光し、630s 以降は $t^{-1.3} \propto$ で減光。[4]

1.3.3 重力波対応天体

重力を持つ物質が存在するときそのまわりの時空は歪む。さらにその物質が球対象ではない加速運動をするとき時空の歪みは光速で波動性を持って伝搬する。これを重力波と呼ぶ。そして、重力波の発生源である天体を重力波対応天体と呼ぶ。重力波対応天体は大質量かつ超高密度の中性子星やブラックホール同士の連星系、およびその衝突合体によって生じると理論的に提唱されており、中性子星同士の合体同士の場合、光赤外線領域においても観測可能である。しかしながら、重力波対応天体の観測は容易ではない。その理由の一つは、重力波到来方向の位置決定精度にある。重力波望遠鏡の Virgo と Ligo の 2 台を合わせた位置決定精度は 2017 年 8 月時点で数十 ~ 数百平方度である (満月の大きさが約 0.2 平方度)。

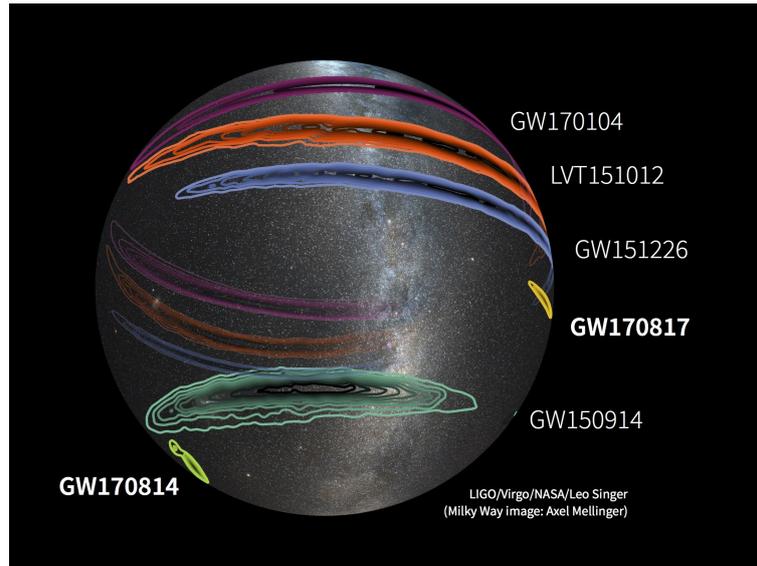


図 1.5: 過去 6 回 (内 1 回は重力波候補現象) の重力波到来方向の位置決定精度。GW170817 は 30 平方度。
[5]

中性子星同士の合体では速い中性子捕獲現象である r-process(rapid-process) が生じ、原子番号の大きい金などの重元素が生まれ、この物質が持つ放射性エネルギーにより電磁放射が放射されると考えられる。この電磁放射は kilonova と呼ばれ、理論モデルに基づいたシミュレーションの結果 kilonova は以下の特徴を持つとされる。

- 明るく光るタイムスケールは 1 週間程度
- 放射のピークは近赤外線領域
- 可視光領域では早く減光し、近赤外線領域では緩やかに減光する

初の中性子星同士の衝突イベントとなった GW170817 において、観測された可視近赤外スペクトルや光度曲線が概ね理論と一致することが確認された (図 1.6)。このように重力波対応天体では、近赤外線領域での広視野探索が重要となる。国産大面積近赤外線検出器が普及すれば、このような観測も現在より容易になるだろう。

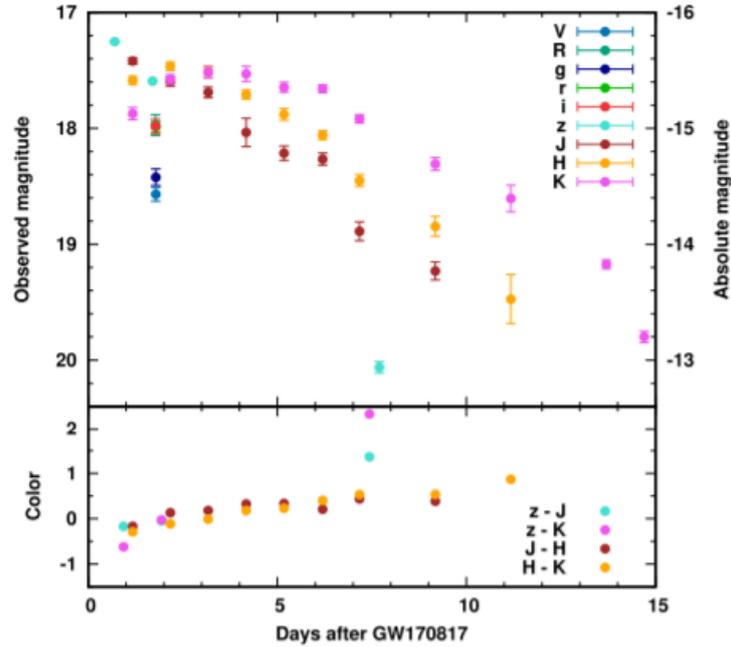


図 1.6: 日本チームが追観測した GW170817 のライトカーブ。可視光領域 (V,R,g,r,i,z バンド) の減光に比べて近赤外線領域 (J,H,K バンド) では緩やかに減光している。[6]

1.4 高エネルギーニュートリノ対応天体の赤外線観測

1.4.1 高エネルギーニュートリノ

宇宙空間を飛び回っている様々な粒子を宇宙線と呼ぶ。その 90%ほどは陽子が占めている。宇宙線のエネルギーは非常に幅広く、その中でも 10^{20} eV まで達するような宇宙線を最高エネルギー宇宙線と呼ぶ (10^{20} eV は、現在地球上で粒子を加速できる最高エネルギーの約 1000 万倍)。宇宙線は冪型のスペクトル分布をしており (図 1.7)、knee と呼ばれる 3×10^{15} eV までの宇宙線は銀河系内の超新星残骸、それ以上のエネルギーの宇宙線は銀河系外由来だと考えられている。しかしながら、宇宙線発見から約 100 年経つにも拘わらず、宇宙線を生成する起源天体、及び、最高エネルギー宇宙線の起源天体は実際に同定されたことはなく、その正体は未だに謎のままである。この原因の一つに、宇宙線の 90% を占める陽子が荷電粒子であるために、起源天体から地球に到達するまでに星間空間の磁場で進行方向が曲げられてしまい、宇宙線到来方向から起源天体を同定することが困難であることが挙げられる。

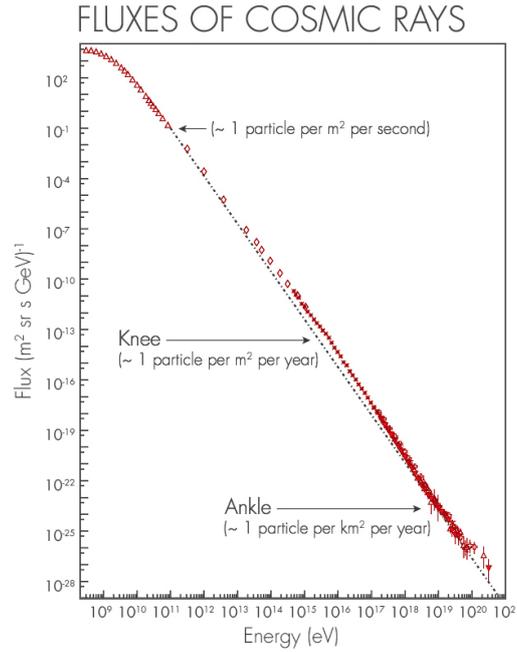


図 1.7: 宇宙線のスペクトル分布 [7]

陽子は天体内外の光子やガスと相互作用して以下の過程に従いニュートリノを生成する。



(p:陽子 (宇宙線), γ :ガンマ線, n:中性子, π : π 中間子, e:電子, ν ニュートリノ)

ニュートリノは相互作用が非常に弱く、生成されてから地球に到達するまでに軌道を曲げられることが無いため、ニュートリノ到来方向から起源天体の方向を決定することは比較的容易である。また、ニュートリノが生成される際、親陽子の約5%のエネルギーがニュートリノに与えられるため、ニュートリノのエネルギーから親陽子のエネルギーを推定することも容易である。つまり、宇宙線や最高エネルギー宇宙線の起源天体を探索する為には、宇宙線を観測するよりも、宇宙線から生成されるニュートリノを観測し、その到来方向から起源天体を探索する事が効果的である。高エネルギーニュートリノを観測し、最高エネルギー宇宙線の起源解明を目指すプロジェクトが次節で述べる IceCube である。

1.4.2 IceCube ニュートリノ観測所

IceCube は南極に設置されたニュートリノ観測所で、100GeV 以上の高エネルギーニュートリノを観測し最高エネルギー宇宙線の起源に迫ることを目的とした国際プロジェクトである。日本からは千葉大学が参加している。IceCube の構造としては、南極点の深氷河中に DOM(Digital Optical Module) と呼ばれる光センサーを数千個埋めて氷河をチェレンコフ放射体として用いており、検出容量 1km^3 (スーパーカミオカンデの約2万倍の検出容量) にも及ぶ巨大なニュートリノ検出器である (図 1.8)。



左:IceCube 観測所の写真

右:IceCube 検出器の構造イメージ図

図 1.8: IceCube 観測所の写真と検出器の構造イメージ図 [8]

DOM の中には光電子増倍管やデータ収集回路などが内蔵されており、深さ約 2500m ほどまで垂直に掘られた 86 本のストリング (中央の 6 本は Deep Core strings と呼ばれる。) に埋め込まれている。ニュートリノが氷河に入射すると、低確率ではあるが氷の中の水分子と衝突して電荷を持ったレプトンが生成され、そこから円錐状に放射されるチェレンコフ光が生成される。このチェレンコフ光を DOM で検出することで、元のニュートリノの到来方向やエネルギーを決定することができる (図 1.9 にニュートリノを検出した際のイメージ図を載せる)。

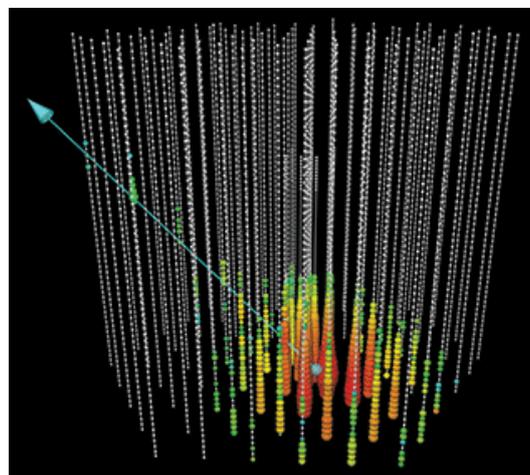


図 1.9: IceCube が捉えた 250TeV のニュートリノイベントのイメージ図。水色の線で描かれた経路でニュートリノが到来。 [9]

2018年1月までに、 $1\text{PeV}(10^{15}\text{eV})$ を超えるような高エネルギーニュートリノが2例検出されており、高エネルギーニュートリノの存在が始めて観測的に証明された。また IceCube 観測所は2016年4月から、高エネルギーニュートリノを検出した際にニュートリノのエネルギーや天球上での位置情報が記載されたアラートの配信を始めており(アラートの頻度は3~4ヶ月に1回程度)、世界中の様々な観測プロジェクトが対応天体の探索を行っている。典型的な位置決定精度は ~ 1 平方度と、重力波対応天体の探索領域と比較すると格段に位置決定精度が高く、対応天体の探索もその面積の観点においては比較的容易である。

1.4.3 高エネルギーニュートリノ起源天体の候補

高エネルギーニュートリノの起源天体は未だに議論が続いているが、IceCubeによる観測や様々な理論から、起源天体の候補はいくつかに絞られている。図1.10はIceCubeが過去に検出したニュートリノの到来方向を天球上に示したもので、銀河面や特定方向に偏ることなく等方分布を示している。これは、高エネルギーニュートリノの起源が系外銀河由来であることを示唆している。また、超高エネルギーまで親陽子を加速するには、強力な磁場が必要となる。図1.11は天体のサイズを横軸に、天体の磁場強度を縦軸に取ったもので、この図から各天体が陽子を加速できる限界エネルギーが導かれ、起源天体に制限がかけられる。図1.11から、高エネルギーニュートリノ、つまり最高エネルギー宇宙線の起源天体の候補はGRBやAGN(その中でも特に、フレア中のブレーザー)、スターバースト銀河(爆発的星形成領域)や電波銀河に絞ることができる。また、IceCubeの典型的な位置決定精度が1平方度程度であることから、IceCube対応天体の探索においても近赤外線での広視野観測が有効である。

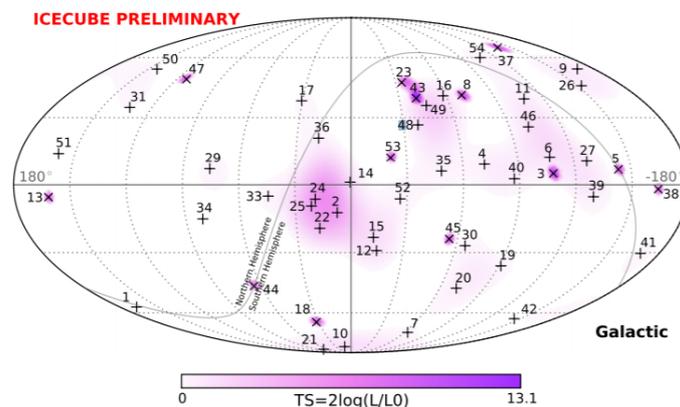


図 1.10: IceCube が 2015 年までに検出したニュートリノの到来方向を示した図。図中の数字はイベントナンバーで、色はイベントの有意度を表す。[10]

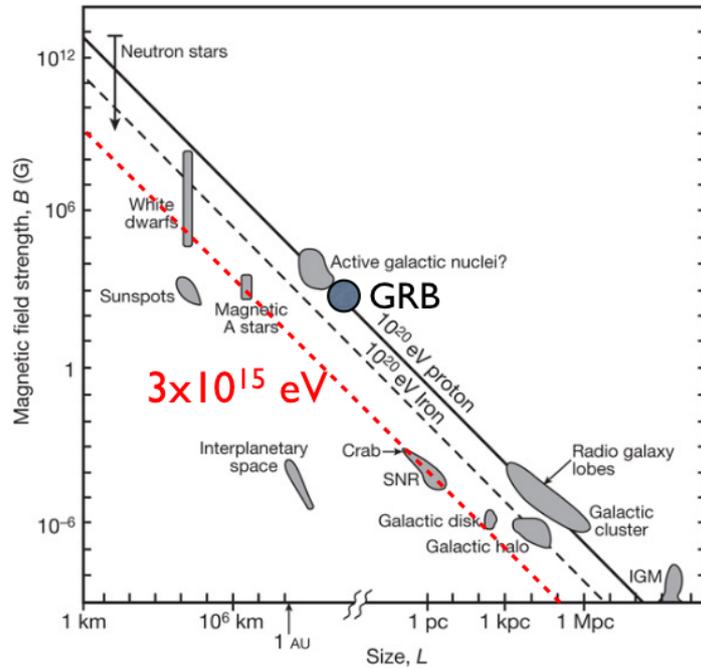


図 1.11: 天体のサイズと磁場強度から求められる、各天体の荷電粒子加速限界エネルギー [11][12]

1.5 近赤外線検出器

1.5.1 天文観測用赤外線検出器の現状

天文観測に使用される検出器には低ノイズであることが要求される。これは、天体からの信号が極めて微弱であるため、その信号をノイズで埋もれないようにするためである。また、常温域においては黒体放射により赤外線が放射されているため、天文学における赤外線観測では観測装置内部を冷却する必要がある。そのため、通常は常温で使用される民生用途の赤外線検出器と異なり、天文観測用検出器は冷却下での安定駆動が求められる。加えて、天体観測用の近赤外線検出器を選定する際に重要となるのが、検出器のピクセルサイズやイメージサイズである。これは、望遠鏡の性能にも依存するが、視野の大きさや分解能に直結しており、これはすなわち観測装置の性能へと直結する。しかしながら、現在流通している大面積近赤外線検出器はほぼ全てが海外メーカー製で極めて高価な上に、軍需品扱いで輸出入が規制されているため、天文観測での利用は依然制限されている。我々は、国立天文台や浜松ホトニクスなどと共同で低ノイズ・大面積の近赤外線検出器の開発を進めてきた。これが実現すれば、大面積 CCD を多数利用した可視広視野カメラと同等の観測が近赤外線でも実現し、これまで述べてきたような突発天体の近赤外線探索が行えるなど、天文観測に大きく貢献することが期待される。かなた望遠鏡においても、HONIR の 3 バンド目の検出器 (2 バンド目の赤外線検出器) として実装する目途が立つ。このようなニーズに対応した検出器を開発するためには、半導体検出器メーカーと研究機関が協力しあって開発を進める必要がある。

1.5.2 浜松ホトニクス社開発 InGaAs 赤外線検出器

本研究室では 2009 年から浜松ホトニクス社、国立天文台などと共同で国産の天文観測用赤外線検出器の開発を進めている。浜松ホトニクス社からは民生用としてインジウム・ガリウム・ヒ素 (InGaAs) フォトダイオードアレイを用いた赤外線検出器が販売されており、民生品 InGaAs 検出器の天文学分野での利用を見据えて本研究室にて実施された性能評価 [13] の結果から、主に以下のような問題点があることが判明している。

1. ノイズが高い。十分低温に冷却して約 $500e^-$ のノイズを持つ。
2. 画素サイズが大きい。⇒ 天文観測用として利用するには分解能が悪い。
3. 画素数が少なく、イメージサイズが小さい。⇒ 視野が狭い。

我々は、これらの問題を段階的に解決していき、最終的には国産での天文観測用赤外線検出器の開発を目指している。

上記 1 の問題に関して、これまでの試験で、読み出し部のノイズが工業用途に設計されたものでは解決が難しいことが判明している。そのため、読み出し部に天文観測用として使われている 3 トランジスタタイプの CMOS 回路を利用し、浜松ホトニクス社製の InGaAs と読み出し回路部を In のバンプで接続して低ノイズ化されたチップを作成した。この検出器には InGaAs 素子の情報を読まずに読み出し回路部の情報のみを取得するモードがある。以降、このモードを reset、InGaAs 素子の情報を読むモードを read と呼ぶこととする。

今回はこの低ノイズチップを用いて作成された、InGaAs 128×128 pixel 素子及び $1.3k\times 1.3k$ pixel 素子の性能評価を実施した。 $1.3k\times 1.3k$ pixel 素子については、浜松ホトニクス社の常温下 ($T=25^{\circ}C$) での試験において不良画素の多かったエンジニアリンググレード素子と、不良画素の少なかったサイエンスグレード素子の 2 つを購入しているため、両方の素子に対して性能評価を行っている。以下に今回評価した各検出器について述べる。

128×128 素子

今回評価した 128×128 素子は、低ノイズ化を実現できるかを確認する為に試験的に開発された素子で、大面積素子の開発に繋げるのが目的である。図 1.12 に 128 素子の写真、表 1.3 に $T=25^{\circ}C$ での諸性能を載せる。また、以下に本素子の特徴を述べる。

1. 国立天文台が開発した低ノイズ CMOS 回路部に、浜松ホトニクス社の市販品と同じ InGaAs アレイを貼り合わせ、低ノイズ化を目指した。広島大学としての要求ノイズは冷却下で $30e^-$ 。
2. 民生品に使用されている $20\times 20\mu m$ ピッチ画素用の画素回路 2 種類、低ノイズが期待される $15\times 15\mu m$ ピッチ画素回路、最も低ノイズが期待される $17\times 17\mu m$ ピッチ画素回路の計 4 種類の画素回路に $20\times 20\mu m$ サイズの素子を貼りつけたもので、低ノイズと狭ピッチ化の両立が出来るかの確認。最終目標は $15\times 15\mu m$ ピッチ。

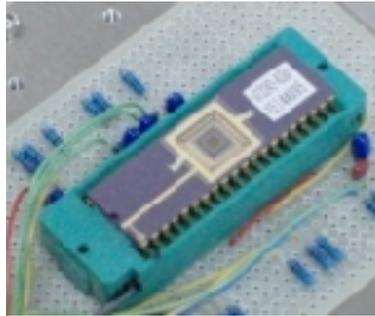


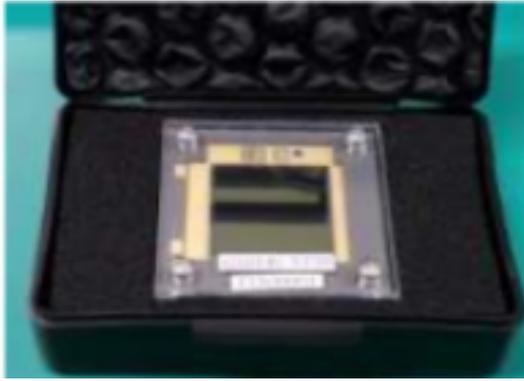
図 1.12: 128×128 InGaAs 検出器

1.3k×1.3k 素子

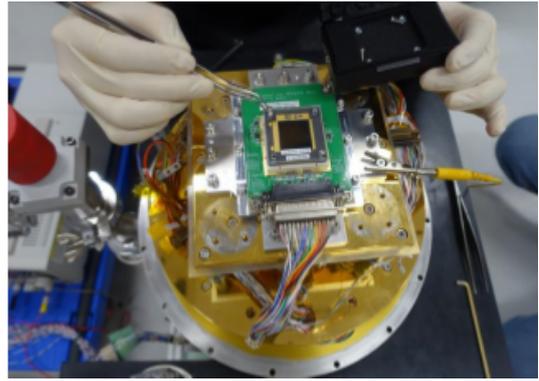
今回評価した 1.3k×1.3k 素子は、128×128 素子の性能評価を踏まえて、大面積での低ノイズ・狭ピッチ化を両立できるかを確認するために開発されたものである。図 1.13 に 1.3k 素子の写真、表 1.3 に $T=25^{\circ}\text{C}$ での諸性能を載せる。また、1.3k InGaAs 検出器は検出器の portsel 端子に供給する電圧を変えることで、読み出し port 数 (2 or 8port) の切り替えができる設計になっており、8port 読み出しでは 2port 読み出しの約 4 倍速で読み出しができるというメリットがある。各出力 port 数でのピクセルの読み出しの順番を図 1.14 に載せる。

項目	128×128 素子	1.3k×1.3k 素子
ピクセルサイズ [μm]	20×20,17×17,15×15	15×15
有効画素数 [pixel]	128×128	1280×1280
有効受光面サイズ [mm]	2.56×2.56	19.2×19.2
広島大学目標ノイズ (冷却下)[e^{-}]	≤ 30	≤ 30
目標暗電流値 (冷却下)[e^{-}/s]	≤ 0.1	≤ 0.1
有効感度波長域 [μm]	0.95~1.7	0.95~1.7
出力ポート数	1	2or8

表 1.3: 128×128、及び 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の諸性能 ($T=25^{\circ}\text{C}$)



左:1.3k×1.3k InGaAs 検出器の写真



右:1.3k×1.3k InGaAs 検出器のデューワー搭載時の様子

図 1.13: 1.3k×1.3k InGaAs 検出器

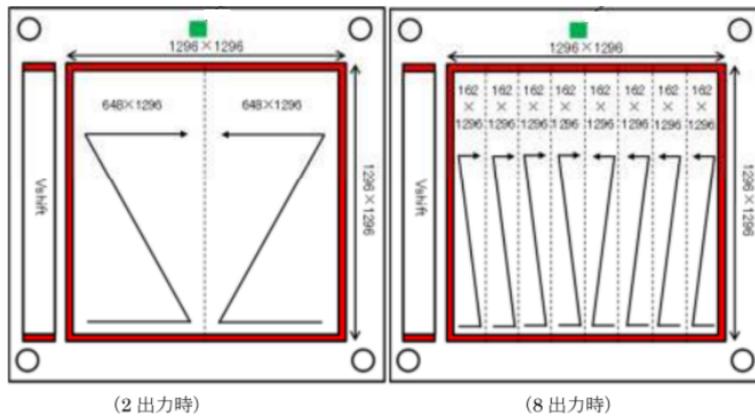


図 1.14: 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の 2or8port 読み出しでのピクセルの読み出し方向 [16]

1.6 本研究の目的

本研究では、突発天体の広視野多バンドでの観測を念頭に、国産大面積近赤外線検出器の天文学分野での実用化を目指して、浜松ホトニクス社製の InGaAs 近赤外線検出器の性能評価を行う。性能評価は天体観測時と同等の条件で行う必要があるが、その際は近赤外線検出器を真空・冷却状態に維持することが必須となるため、検出器の性能評価システムを構築する必要がある。本研究ではまず既存のデューワーを用いた評価システムの整備を行う。整備した評価システムにおいて、冷却下での性能評価を実施し、それらの結果をメーカーへフィードバックすることで、天文用途に適した国産での大面積近赤外線検出器の完成を目指す。

また、近赤外線検出器の性能評価と並行して、HONIR を用いた高エネルギーニュートリノ電磁波対応天体の探索も行う。

第2章 赤外線検出器評価システムの整備

今回 InGaAs 検出器の性能評価を行うにあたり、本研究室が検出器の試験に使用する目的で以前から所持していた赤外線検出器の評価システムの整備を行った。

2.1 デュワー全体像

1.5.1 章で述べたように、赤外線検出器を用いる際は観測装置全体を冷却する必要があり、その為に用いるのがデュワーである。図 2.2 に今回整備したデュワーの写真を、図 2.1 に全体の概念図を示したものを載せる。

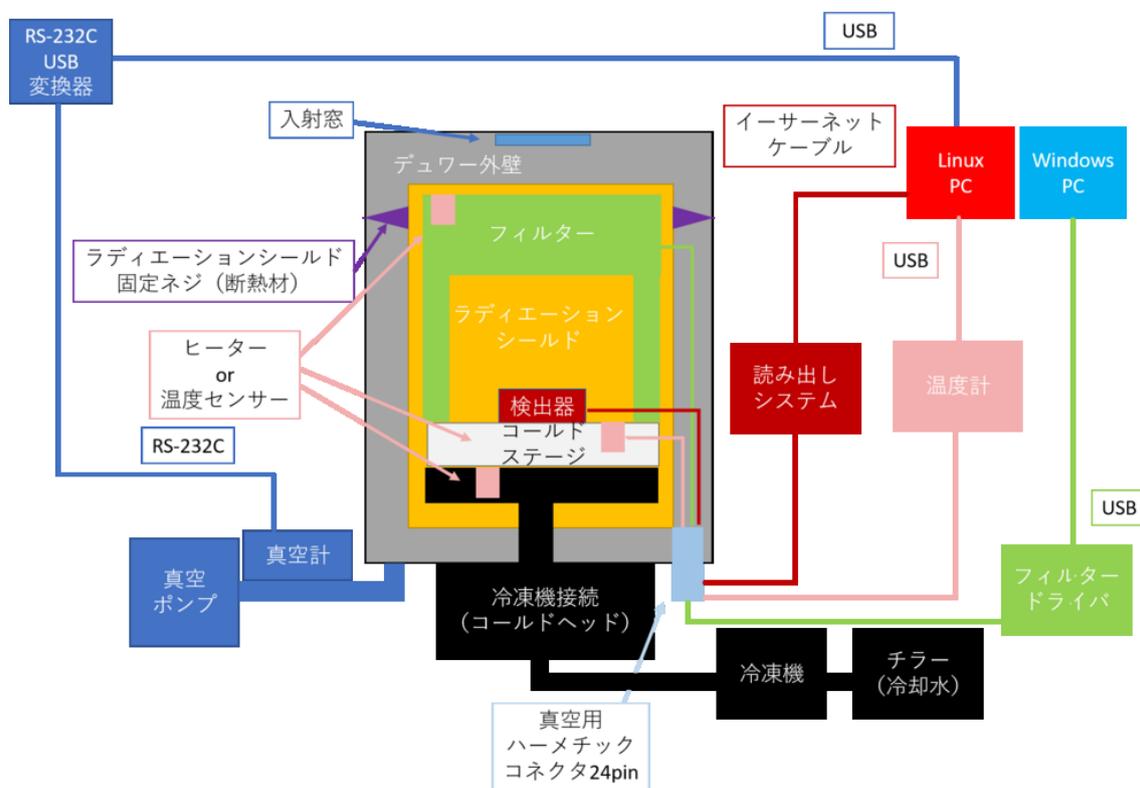
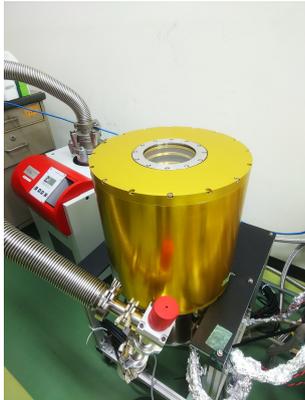
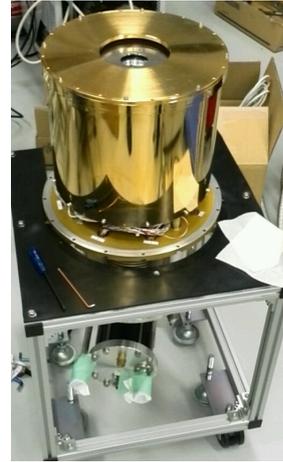


図 2.1: 評価システム概念図



左上:デュワーと真空ポンプ



右上:デュワー内部。ラジエーションシールド



下:ラジエーションシールド内部。最上部に付いているのがフィルターホイール

図 2.2: 検出器試験用デュワー

図 2.1 に示したように、このデュワーは外部からの熱伝導を遮断するため、デュワーボックス内部にラジエーションシールドが入る 2 層構造となっており、ラジエーションシールドは断熱材であるガラエポキシ素材のネジによりデュワーボックスに接しないよう固定されている。また、デュワーからの配線はデュワー底面に 6 カ所設置された真空用 24pin ハーメチックコネクタを介して行われており、真空を保つよう配慮されている。

2.2 温度コントローラー

1.5.1 章で述べたように、天文観測を行う際は、物体から放射される赤外線はバックラウンドとなるので、デュワー内の光学系や検出器を冷却状態に保つ必要がある。そこで私は、LakeShore 社製の温度コントローラー Lakeshore331 及び同社シリコンダイオード温度センサー DT470 を用いた温度制御・モニターシステム

ムの再整備を行った。

温度センサーは検出器を搭載する温度コントロールステージとフィルターホイールの計 2 カ所 (図 2.3)、ヒーターは温度コントロールステージに 1 カ所設置しており、デュワー底面のハーメチックコネクタを介してデュワー外部の温度コントローラーに繋がっている。温度コントローラーは USB 端子で PC に接続出来るようになっており、PC による Lakeshore331 の温度モニターには専用のドライバのインストールが必要となるが、PC の kernel の問題で LakeShore 社から配布されているドライバーが使用できなかった。その為、SiliconLabs 社からフリーで提供されている Linux 用 USB 通信ドライバ [14] をインストールし、シリアル通信を介して PC から温度情報を取得するプログラム `lakeshore_mon.c`, `lakeshoreLOG.c` を C 言語を用いて作成した。実際に 100K で温度が制御できるか、情報を取得できているかのテストを行った結果 (図 2.4)、正常に制御、及びモニターを行うことに成功した。

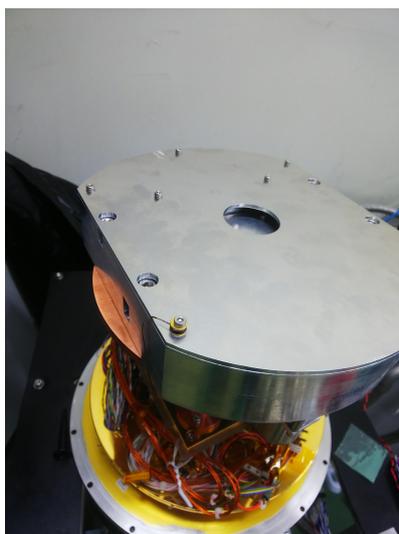


図 2.3: フィルターホイールに設置した温度センサー。画像中央付近のネジ止めされているものがセンサー。

2.3 真空度モニター

目標とする低温度を実現する為には、結露や熱伝導を抑制するために真空ポンプによるデュワー内部の真空引きが必要である。デュワー内部の真空度をモニターする為には、デュワーと真空ポンプ、真空度計を接続し、真空度計からは RS-232C を介したシリアル通信により PC で真空度をモニターできるようにした。制御プログラム `sinnkuu.c` を C 言語を用いて作成した。図 2.4 に真空度のモニター試験結果を載せる。

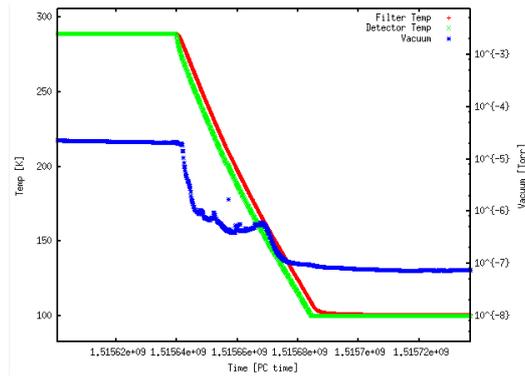


図 2.4: 温度・真空度の制御とモニター結果。温度は 100K で制御している。

2.4 フィルターホイール

1.1 章で述べたように、天文観測には様々なバンドフィルターが用いられる。その為、本システムにもフィルターを搭載する為のフィルターホイールを搭載した (図 2.5)。

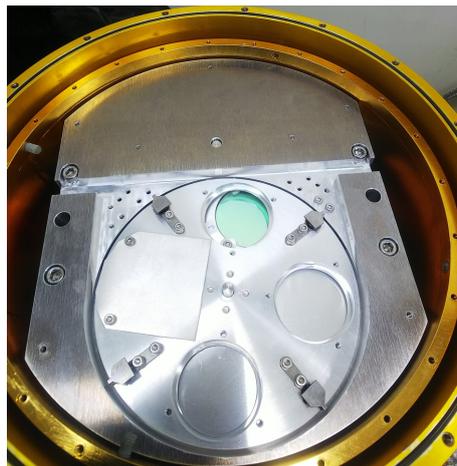


図 2.5: フィルターの写真。画像中央付近の色が付いているフィルターは J バンドフィルター。

フィルターホイールは 2 重構造となっており、各 4 カ所にフィルターを搭載できるようになっている。1 段目には 3 カ所が素通し、1 カ所にダークフレームを取得する為の鉄板をはめ込んでおり、2 段目には Y, J, H バンドフィルターを 1 枚ずつ搭載し、1 カ所が素通しになっている。Windows PC に本ホイール回転用モータのドライバーである Minilog[15] をインストールしており、フィルターホイールを Windows PC から制御できるようになっている。現状では 500step で一つ隣の窓に移動する設定になっており、2000step で 1 周となっている。フィルターモータの現状の問題点としては以下の 2 点が挙げられる。

- モーターへの通電による励磁力によりフィルターの位置固定を行っているが、そのための交流電流が

大きなノイズ源となる(電源 off 時に比べ 2 倍以上のノイズ)。その為、試験時はフィルターを回転してから一度電源を切り、再度電源を入れ直す必要がある。

- フィルターの位置情報を得る為の回路を作成していないため、どのフィルターが検出器上部に来ているのか判断できない。現状は、回転した step 数と素通しからの位置関係(正方向の step で回転した場合、H→J→Y→素通し)を頼りに判断している。

フィルターホイールには 2 カ所磁石が埋め込まれている。その為、未作成ではあるが上記のフィルター位置情報を取得する回路は、ホール素子と定電流回路を組み合わせ、出力電圧値の変動を Minilog でモニターすれば作成可能である。今回はその整備までは行なうことができなかったため、将来に託したい。

2.5 デュワー内部の配線整備

デュワー内部と外部の通信はデュワー底面から伸びている 6 カ所のハーメチックコネクタを介して行われる。ハーメチックコネクタはフィルター制御・温度制御に 1 つずつ使用され、残り 4 カ所は使用用途に応じてコネクタを変えて用いている。しかし、デュワー内部側のハーメチックコネクタをそのたびに付け替えるのは手間が掛かる。今回、これを改善する為にデュワー内部に MicroDsub25pin コネクタ (female)-ハーメチックコネクタ (24pin,female) のペアを両端にもつ中継ケーブルを 2 つ作成した。これにより、今後は MicroDsub25pin(male) を作成してハーメチックコネクタに繋がっている MicroDsub25pin(female) に接続すればよくなる(外部は今まで通り、ハーメチックコネクタ (male) へ接続する)。図 2.6 にデュワー内部の配線概念図を、表 2.1 にハーメチックコネクタと MicroDsub25pin(female) の配線表を載せる。今回購入した MicroDsub25pin は Glenair 社の型番 MWDM2L-25S-6E5-18 である。

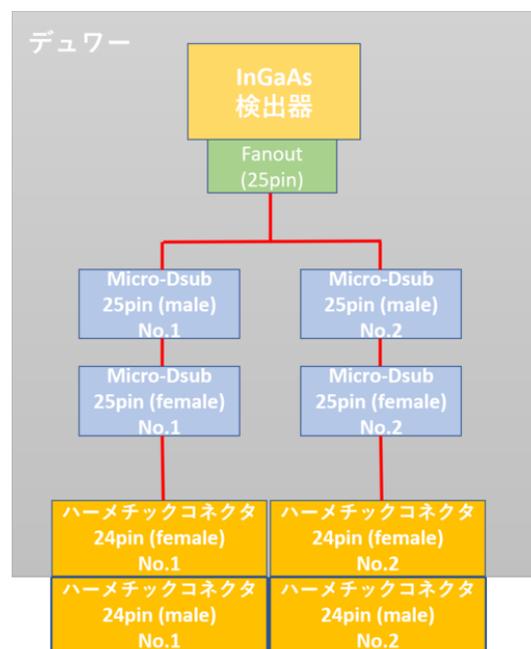


図 2.6: デュワー内部の配線概念図

MicroDsub25pin(female)	ハーメチックコネクタ 24pin(female)
1(黒)	1(赤)
2(茶)	2(赤白)
3(赤)	3(青)
4(橙)	4(青白)
5(黄)	5(黄)
6(緑)	6(黄白)
7(青)	7(緑)
8(紫)	8(緑白)
9(灰)	9(茶)
10(白)	10(茶白)
11(黒白)	11(灰)
12(茶白)	12(灰白)
13(赤白)	24(茶灰)
14(橙白)	13(赤)
15(黄白)	14(赤橙)
16(緑白)	15(青)
17(青白)	16(青橙)
18(紫白)	17(黄)
19(灰白)	18(黄橙)
20(黒茶白)	19(緑)
21(黒赤白)	20(緑茶)
22(黒橙白)	21(茶)
23(黒黄白)	22(濃橙茶)
24(黒緑白)	23(灰)
25(黒青白)	なし

表 2.1: デュワー内部に作成した MicroDsub25pin(オス)-ハーメチックコネクタ (24pin) の配線表。() 内は導線の被覆の色。

2.6 読み出しセットアップ

検出器にクロック (読み出しの命令等) を送り、検出器の信号を読み出す装置を読み出しシステムと呼ぶ。今回の試験では、すばる望遠鏡にも使用されている読み出しコントローラーのバックエンド回路と CMOS センサー用に開発されたフロントエンド回路を組み合わせたシステムを、国立天文台から借り受けて試験を行った (図 2.7)。

今回試験した 128×128 素子は 24pin であるため 1 つのハーメチックコネクタで配線が可能であるが、1.3k×1.3k 素子は全部で 25pin であるため 2 つのハーメチックコネクタを使用してデュワー内の検出器から

外部の読み出しシステムに繋ぐ必要がある。その為、検出器と読み出しシステムを繋ぐためのケーブルを作成した。この際、表 2.2 にケーブルの配線表を載せる。



図 2.7: 読み出しシステム。イーサネットケーブルで PC と接続されている。コネクタは FX2-60pin(4 列型)。

Funoute(検出器のコネクタ)	ハーメチックコネクタ 24pin	読み出しシステム
Dub25pin	1or2 番ハーメチック-pin 番号	FX2-60pin(4列型)
1	1-1	a15
2	1-2	b24
3	1-3	b9
4	1-4	b8
5	1-5	b7
6	1-6	b6
7	1-7	a3
8	1-8	a2
9	1-9	b2
10	1-10	b3
11	1-11	b4
12	1-12	b5
13	1-24	b26
14	1-13	a18
15	1-14	b17
16	1-15	b16
17	1-16	a17
18	1-17	a16
19	1-18	a12
20	1-19	b12
21	1-20	a26
22	1-21	a27
23	1-22	a28
24	1-23	b27
25	128 素子:なし 1.3k 素子:2-12	b28

表 2.2: InGaAs 検出器と読み出しシステムの配線表

第3章 検出器の性能評価

本章では、 128×128 及び $1.3k \times 1.3k$ InGaAs 検出器の常温/低温下での性能評価について述べる。各試験時にはノイズ対策として以下の項目を実施している。

- デュワー/TEXIO 電源/ADC ボードのグラウンドを、平編金属線を加工した治具を用いて電氣的に一致 (図 3.1)
- 真空計の電源を切り、コンセントを抜く
- フィルターホイールの電源を抜く (試験観測時を除く)

以上の対策を全て行うことで、対策なしに比べてノイズが 70% 程低下する (図 3.2 参照。)。基本的に試験時は部屋の明かりを消し、デュワーに暗幕をかけることで遮光している。図 3.3 に大学実験室での試験時の様子を載せる。

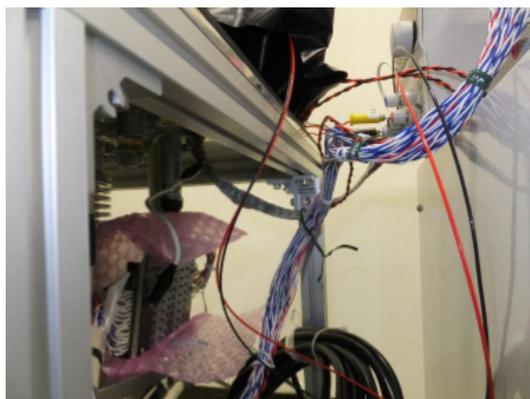
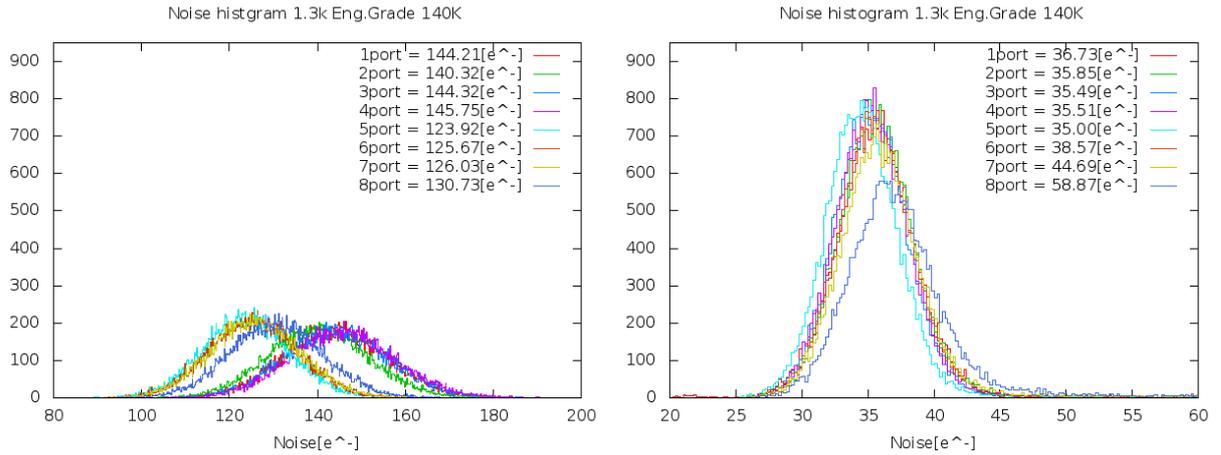


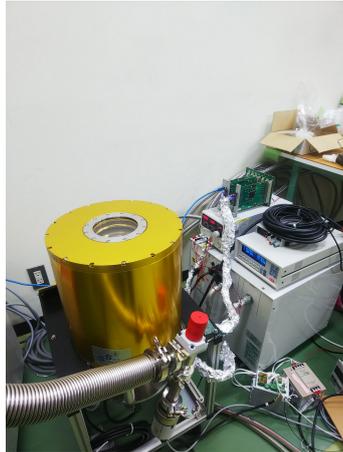
図 3.1: ノイズ対策の様子。平編金属線を加工した治具を用いて、デュワー・TEXIO 電源・ADC ボードを電氣的に一致させている。



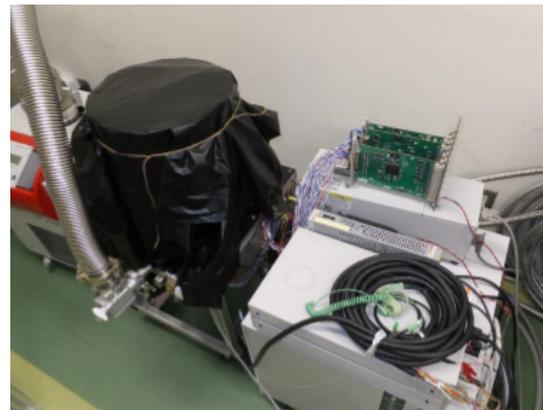
左: ノイズ対策なし。ノイズ $\sim 140e^-$

右: ノイズ対策あり。ノイズ $\sim 40e^-$

図 3.2: ノイズ対策の有無によるノイズ値の変化



左: デュワー、温度計、TEXIO 電源、Messia6 の配置



右: デュワーを暗幕で覆った様子

図 3.3: 大学実験室での試験時のセットアップ

また、天体から検出器に入射した光子は光電効果により光電子に変換され、その電荷量を持つアナログ値が ADC ボードにて AD 変換されデジタル値になる。そのデジタル値は ADU(ないし、カウント) を単位として表されるが、デジタル値は ADC ボードのゲインなどで決まるものなので、異なるシステムを用いた検出器間で性能を比較する場合はアナログ値の e^- 単位に変換の方が便利である。今回は Virgo 検出器との比較も行うため、本論文に載せる値は ADU を e^- 単位に変換している。今回の試験時の ADC ボードのゲインは $6.647e^-/ADU$ であるので、本文中ではこの関係を用いて変換している。

3.1 128×128 InGaAs 検出器の読み出し試験

広島大学実験室にて、128×128 InGaAs 検出器の読み出し試験を実施した。試験温度は140Kと300Kの2種類で実施した。本素子の開発目的は1.5.2章で述べた通りだが、今回試験した際には既に大面積素子の製作が開始されていたこともあり、以下の目的に絞って128×128 InGaAs 検出器の試験を実施した。

- 大面積素子の試験に向けて広島大学において素子を駆動する環境を構築
- 赤外線検出器の取り扱いに慣れる
- 国立天文台で実施された同一素子の試験結果を再現できるか (性能評価をできるようになる)

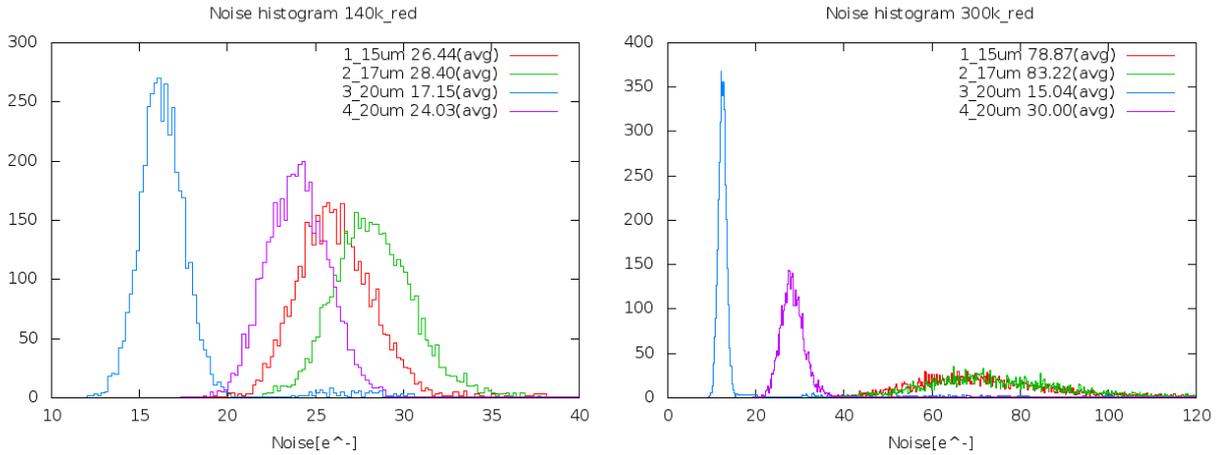
3.1.1 読み出しノイズ評価

本素子のノイズが、我々が要求するレベルの低ノイズを達成しているか調査した。1.5.2章でも述べたように、広島大学としての要求ノイズは $30e^-$ 以下である。

N枚取得した画像において、特定のピクセル($x=i, y=j$)におけるノイズ(標準偏差) σ_{ij} は、k番目の画像での(i,j)における出力カウント $A_{ij:k}$ 、そのピクセルでのN枚の平均カウント $\overline{A_{ij}}$ を用いて以下のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (A_{ij:k} - \overline{A_{ij}})^2} \quad (3.1)$$

今回のノイズ評価では、140K(冷却下)と300K(常温下)においてそれぞれ最短積分時間で100枚(N=100)の画像を取得し、各ピクセルでの画像間の出力カウントの標準偏差の平均値をノイズとした。測定時は室内の明かりを消し、デュワーに暗幕を被せている。図3.4は式3.1を用いて算出した今回取得した広島大学でのノイズヒストグラムで、表3.1は国立天文台での試験結果と比較した表である。尚、 $20\mu\text{m}$ ピッチの領域が2つあるが、これはソースフォロア回路の貼り付け方の違いである。図中の3がソースタイ、4がボディタイと呼ばれる方式で貼り付けられている。



左:140k でのノイズヒストグラム

右:300k でのノイズヒストグラム

図 3.4: 128×128 InGaAs 検出器のノイズヒストグラム

	20×20μm(ソースタイ)		20×20μm(ボディタイ)	
	国立天文台	広島大学	国立天文台	広島大学
140K	10.54	17.18	20.14	24.03
300K	11.10	15.04	26.46	30.00
	17×17μm		15×15μm	
	国立天文台	広島大学	国立天文台	広島大学
140K	21.67	28.40	21.80	26.44
300K	78.57	83.22	73.98	78.87

表 3.1: 国立天文台と広島大学での 128×128 素子のノイズ評価試験結果比較。単位: e^-

図 3.4 から、冷却下で全ての画素サイズにおいて要求性能である $30e^-$ を満たしていることが判明した。また、表 3.1 から、広島大学での結果がやや大きいノイズ値を示していることが判るが、これは読み出しシステムの個体差というよりも、実験室内の環境の差による部分が大きいと考えている。

3.1.2 リニアリティ評価

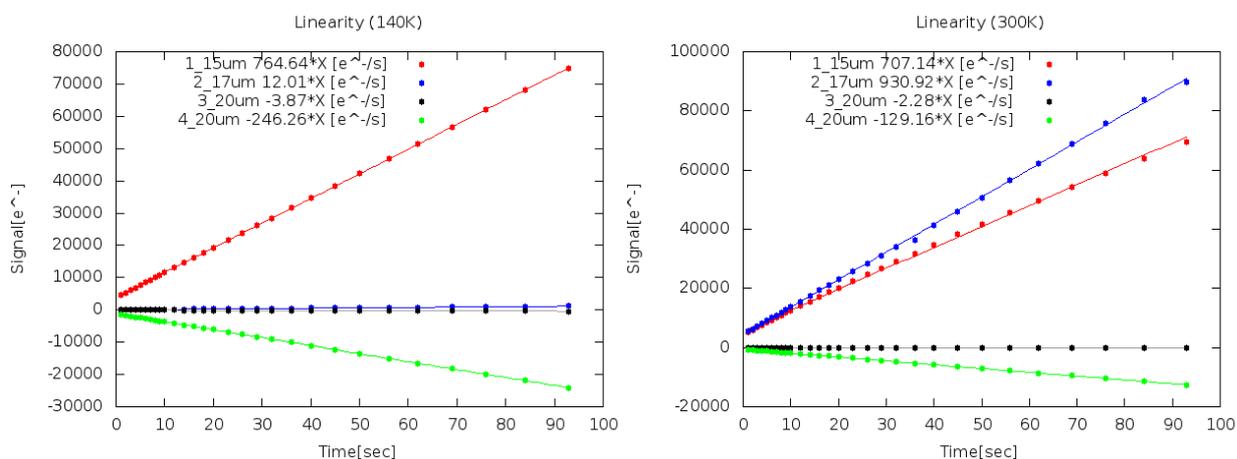
赤色 LED を用いて素子のリニアリティを測定した (図 3.5)。これは、検出器の出力カウントがどの程度まで線形性を保ちつつ出力できるかを確認する為の試験である。実際の天文観測では線形性が保たれたカウント範囲内で行う必要がある。

線形性測定では、140K 及び 300K でそれぞれ 0~93 秒の様々な露出時間でライトフレームを撮像後、同じ露出時間でダークフレームを撮像し、同一露出時間のライトフレームとダークフレームで減算処理をした後、露出時間と光量の相関を調べた。図 3.6 に測定結果を載せる。尚、積分時間に対してカウントが正と

負の方向に増加している領域の 2 種類があるが、これは検出器内部の MOSFET の極性が逆の物を用いて開発されているからである。



図 3.5: 赤色 LED を用いたリニアリティ測定のセットアップ。LED の電源は TEXIO 電源から供給している。



左:140k でのリニアリティ

右:300k でのリニアリティ

図 3.6: 128×128 InGaAs 検出器のリニアリティ

今回はどの程度のカウントで飽和するか調査を行わなかったが、高い精度で線形性が保たれていることが判った。

3.1.3 128×128 InGaAs 検出器性能評価まとめ

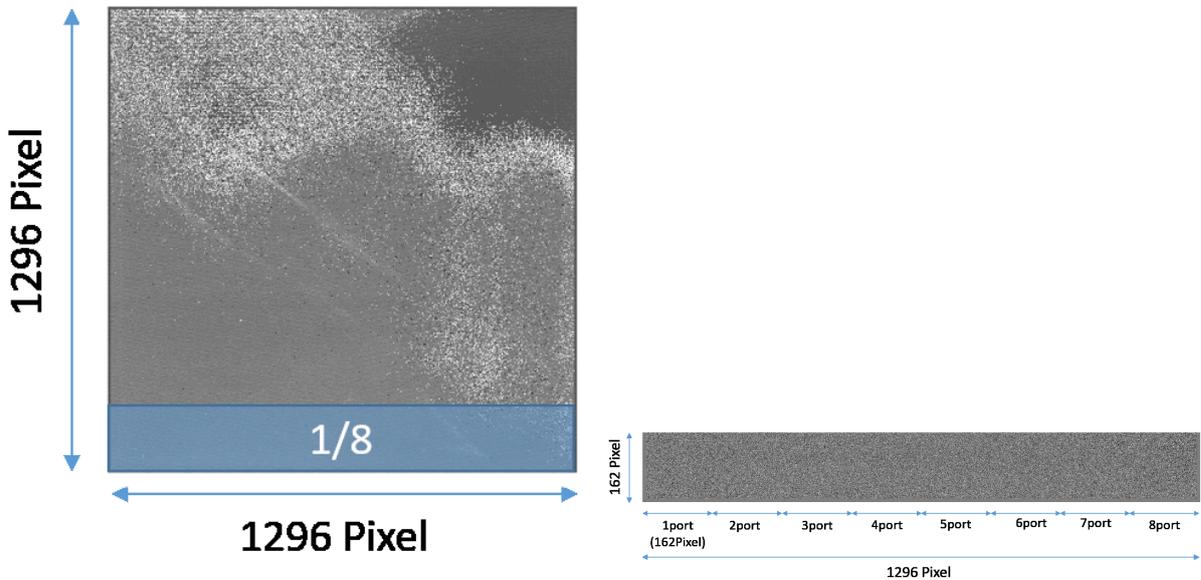
今回の 128×128 InGaAs 検出器の読み出し試験の目的である 3 つの項目に対しては以下のような結果となった。

- 大面積素子の試験に向けて広島大学において素子を駆動する環境を構築
⇒ 2 章の検出器評価システムの整備と併せて、試験環境を構築することに成功した。
- 赤外線検出器の取り扱いに慣れる
⇒ 取扱いに慣れた。
- 国立天文台で実施された同一素子の試験結果を再現できるか (性能評価をできるようになる)
⇒ 国立天文台での試験結果とよりもやや大きめのノイズ値を示したが、それは実験室環境の要因である可能性がある。実験そのものは順調に行われ、広島大学においても評価試験を行なう準備が整った。

3.2 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の読み出し試験

構築した評価システムと 128 素子の試験で培った性能評価の方法を駆使して、1.3k×1.3k InGaAs 検出器のエンジニアリンググレード素子、及びサイエンスグレード素子の性能評価を実施した。ここでは、その試験結果について述べる。

試験の際、読み出しには 8port 読み出しを用いて、データ容量節約、時間短縮などの理由から基本的には図 3.7 のように読み出しピクセル列を下部 8 分の 1 に制限して試験を行っている。全ピクセル列を読み出した際の読み出し時間は 2.1s で、図 3.7 は列方向が全ピクセル 1296pix の内 $\frac{1}{8}$ 倍の 162pix なので、読み出し時間も $\frac{1}{8}$ 倍の 0.2625s となる。読み出し列数 (最大 1296 ピクセル) は試験内容に応じて適宜変更している。今回 1.3k×1.3k InGaAs 検出器に対して行った試験項目と実施場所を表 3.2 にまとめた。



左:全ピクセル読み出し時。1296×1296pix

右:読み出し列制限時。1296×162pix

図 3.7: 1.3k InGaAs 検出器の読み出し列制限時の画像

	エンジニアリンググレード素子	サイエンスグレード素子
読み出しノイズ	天文台実験室	大学実験室
リニアリティ	かなた望遠鏡ナスミス焦点	大学実験室
暗電流	かなた望遠鏡ナスミス焦点	大学実験室
波長相対感度	大学実験室	大学実験室
読み出しノイズの温度依存性	大学実験室	大学実験室
試験観測	かなた望遠鏡ナスミス焦点	-
量子効率	試験観測時	大学実験室

表 3.2: 1.3k×1.3k InGaAs 検出器に対して行った試験項目とその実施場所

3.2.1 バッドピクセル

他のピクセルより感度が悪いもの、感度が良すぎるものを総じてバッドピクセルと呼ぶ。1.3k InGaAs 検出器のバッドピクセルの分布を調査した。今回は、フィルターを通さずに取得したフラットフレームと、90s ダーク画像を用いてバッドピクセル分布を作成した。reference pixel を除くピクセルで、フラットフレームの平均カウントの 0.5 倍以下と、ダーク画像の平均カウントの 1.5 倍以上のカウントを持つピクセルの集合をバッドピクセルとした。図 3.8 にエンジニアリンググレード素子とサイエンスグレード素子のバッドピクセル分布、図 3.9 に元画像 (ダーク画像、フラットフレーム) の ADU カウントヒストグラム、表 3.3 にバッドピクセルの結果まとめを載せる。表 3.3 において、平均値の 0.5 倍以下及び 1.5 倍以上のカウントのピク

セル数の合計とバッドピクセル数が一致しないが、これはフラットフレームで平均値の 0.5 倍以下のカウントを持ち、且つダーク画像で平均値の 1.5 倍以上のカウントを持つピクセルも存在しているためである。エンジニアリンググレードは製造時にバッドピクセルが多数あるためそう呼んでいるものであり、その定義通りの結果となっている。サイエンスグレード素子に関しては、バッドピクセルの割合が 0.4%と、近赤外線検出器としては極めて少なく、申し分のないレベルであると言える。このバッドピクセルは安定しているため、そのピクセルマップを、バッドピクセルをマスクすることに用いる。

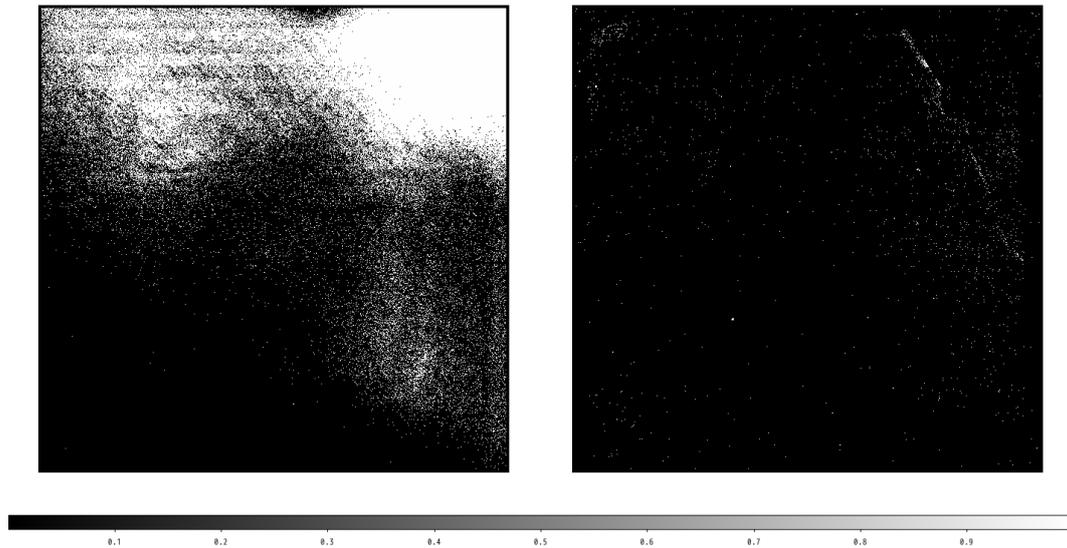
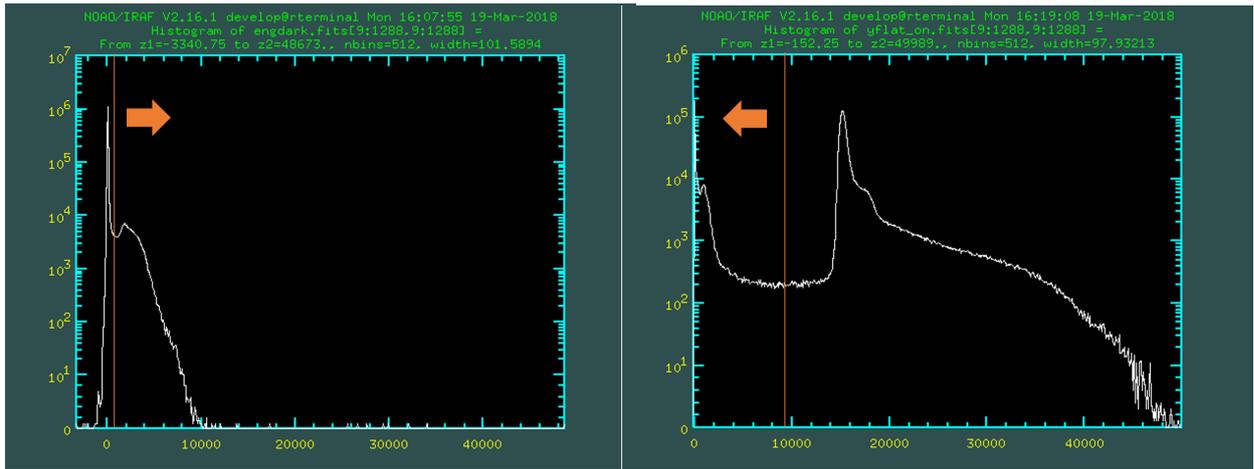
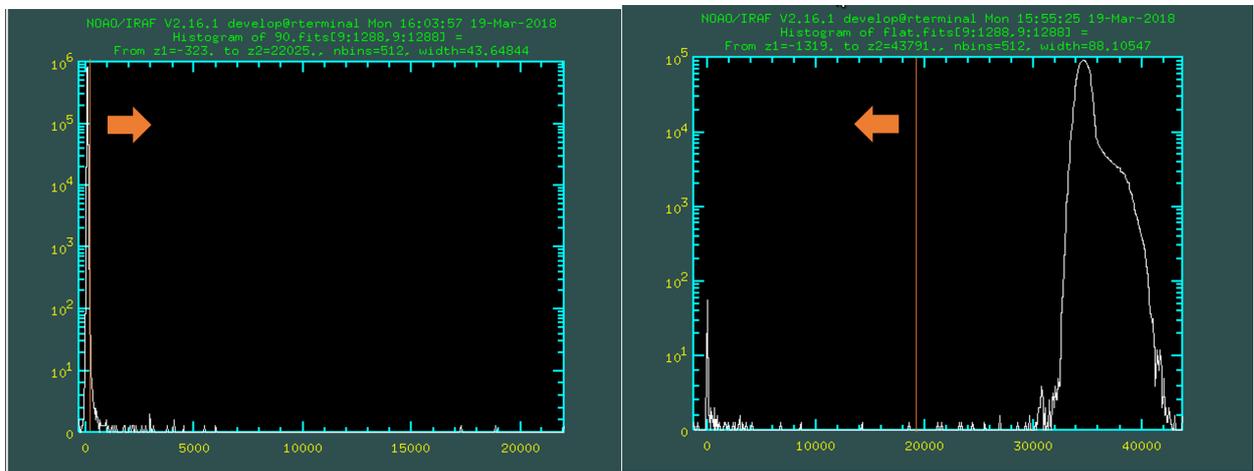


図 3.8: 素子温度 140K での 90s ダークから作成した 1.3k×1.3k InGaAs 検出器のバッドピクセル分布。白い箇所がバッドピクセル。左:エンジニアリンググレード 右:サイエンスグレード



左上:エンジニアリンググレード・ダーク画像

右上:エンジニアリンググレード・フラットフレーム



左下:サイエンスグレード・ダーク画像

右下:サイエンスグレード・フラットフレーム

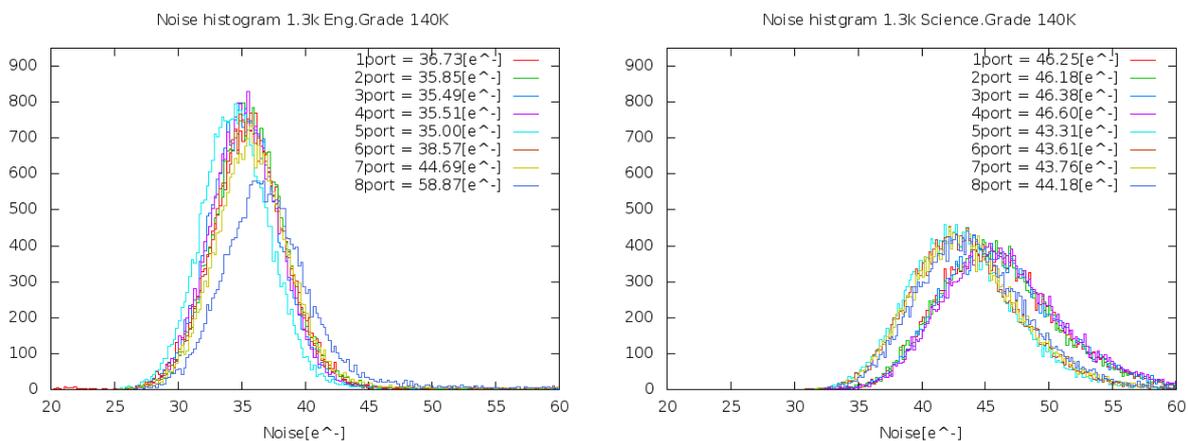
図 3.9: バッドピクセル分布作成に用いたダーク画像とフラットフレームの ADU カウントヒストグラムと、バッドピクセルと判定したカウントの閾値。图中橙色の線と矢印は閾値を表す。

	エンジニアリンググレード素子	サイエンスグレード素子
有効ピクセル数 [pix]	1658944	1658944
平均値の 0.5 倍以下のカウントのピクセル数 [pix]	318984	90
平均値の 1.5 倍以上のカウントのピクセル数 [pix]	177313	6854
バッドピクセル数 [pix]	468802	6944
有効ピクセルに占めるバッドピクセルの割合 [%]	28.259	0.419

表 3.3: バッドピクセルまとめ

3.2.2 読み出しノイズ評価

検出器温度 140K にて 162×1296pix 読み出し +0.1s 露出 ~0.36s 積分でデータを取得し、各 port に対して 128×128 素子と同様に読み出しノイズの評価を実施した。図 3.10 にノイズヒストグラム、表 3.4 に試験結果のまとめを載せる。



左:エンジニアリンググレード素子の結果

右:サイエンスグレード素子の結果

図 3.10: 140K での 1.3k InGaAs 検出器のノイズヒストグラム

	エンジニアリンググレード素子	サイエンスグレード素子
1port	36.73	46.25
2port	35.85	46.18
3port	35.49	46.38
4port	35.51	46.60
5port	35.00	43.31
6port	38.57	43.61
7port	44.69	43.76
8port	58.87	44.18

表 3.4: 検出器温度 140K における 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の各 port での平均ノイズ値。単位: [e⁻]

エンジニアリンググレード素子

結果を見ると、7,8port を除いた port の平均が 35e⁻ 程度となっており、我々の要求である 30e⁻ を若干上回っているものの、観測に影響が出るほどのノイズではないと言えるだろう。このノイズは、周辺機器からのノイズ混入の軽減や、CMOS 回路の寸法の変更、もしくはグラウンドの取り回し方で改善する余地はあると考えている。また、7,8port においてノイズの上昇が見られるが、これは 3.2.1 章で述べたように 7,8port ではバッドピクセルが点在する為、この影響であると考えられる。

サイエンスグレード素子

結果を見ると、エンジニアリンググレード素子の結果よりも一様に高いノイズとなっている。ノイズは試験環境によっても大きく左右されることから、両者の試験実施日に開きがあったことも踏まえ（エンジニアリンググレード:2017/3/28、サイエンスグレード:2018/1/14）、評価を下すには注意を要する。図 3.10 から言えることとして、1~4port に比べて 5~8port の方が低ノイズであるという結果となっている。なぜこのような傾向が現れるのか調べる為に、以下の条件で追加の試験を実施した。図 3.11 に試験結果を載せる。

- 8port 読み出しだけではなく、2port 読み出しで画像を取得
- read と reset でそれぞれ画像を取得

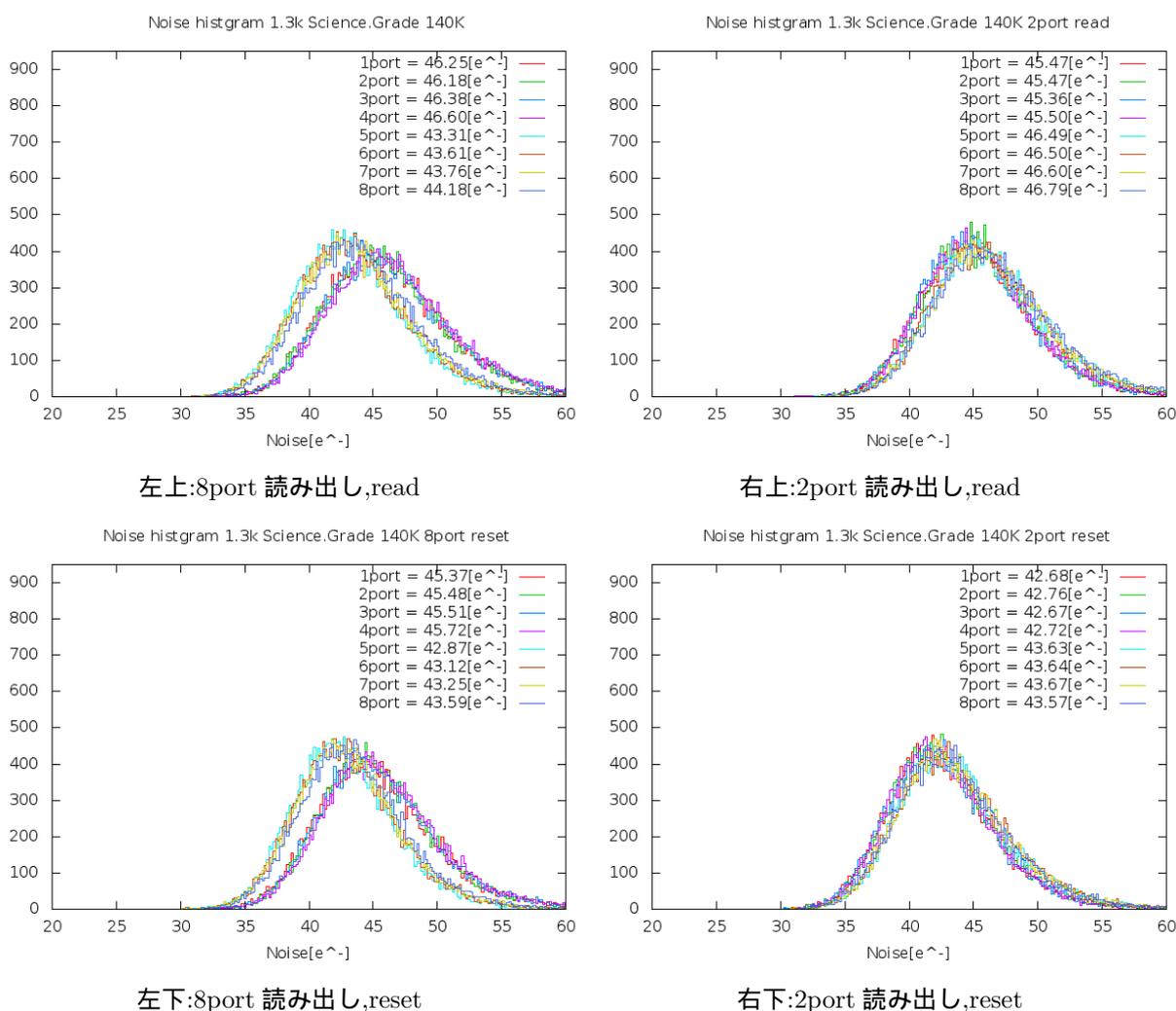


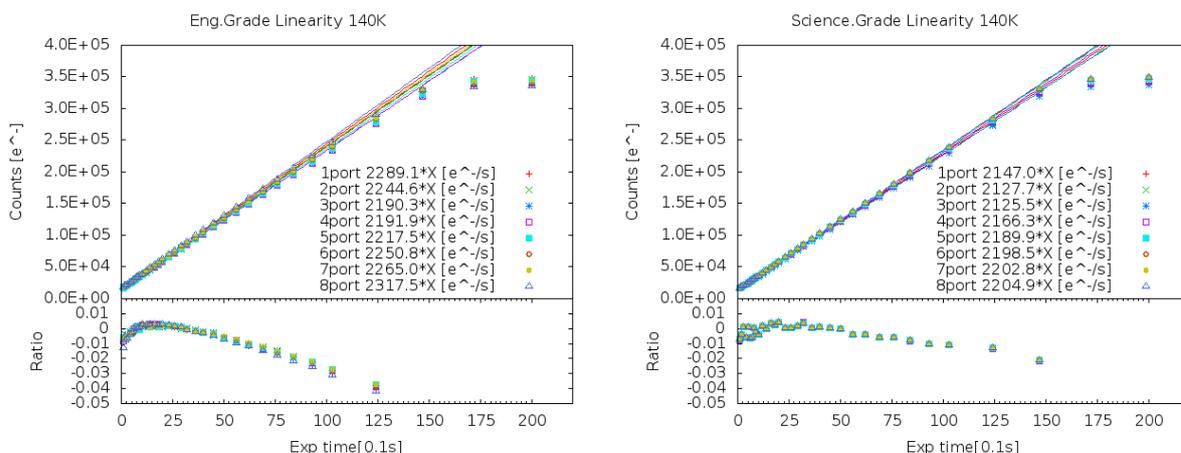
図 3.11: 140K での 1.3k InGaAs 検出器サイエンスグレードのノイズ追加調査

結果から、8port 読み出し時は read,reset 共に 1~4port の方が若干ノイズが高いのに対し、2port 読み出し時には read,reset 共に 5~8port の方がノイズが高くなっている。読み出し port 数によってノイズの傾向

が変わることから、読み出し port 切り替えを行う portsel に何らかの原因があると考えられる。ただし、ノイズ差が小さいことから、今回は問題提起のみに留めることとする。

3.2.3 リニアリティ、及び暗電流評価

エンジニアリンググレードはかなた望遠鏡ナスミス焦点にて観測時に使用するフラットライトを、サイエンスグレード素子は大学実験室にて赤色 LED をそれぞれ光源としてリニアリティの試験を行った。図 3.12 に測定結果を載せる。図 3.12 は、線形性が $\pm 1\%$ の精度で保たれている範囲をフィッティングしたもので、エンジニアリンググレード・サイエンスグレード共に $140000e^-/\text{pixel}$ 程度まで $\pm 1\%$ 以内の精度で線形性が保たれていることが判った。これは、HONIR に搭載されている Virgo 検出器と同等の性能であることから、十分に天文観測用途に使用可能であると言える。

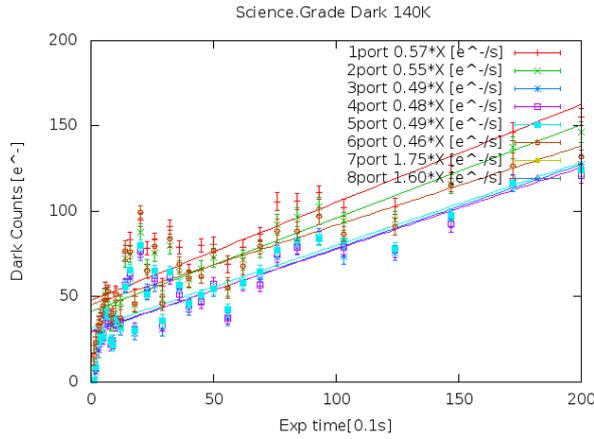


左:エンジニアリンググレード素子の結果

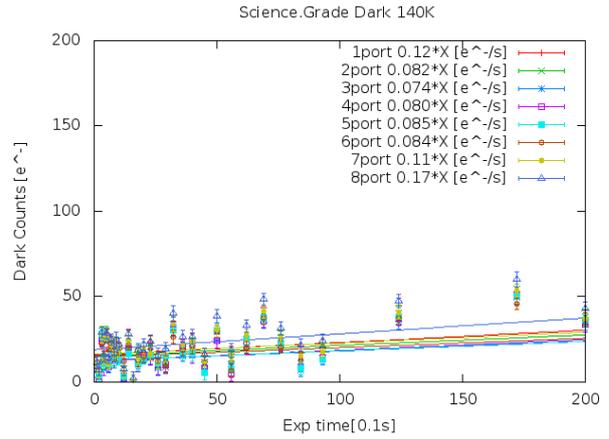
右:サイエンスグレード素子の結果

図 3.12: 140K での 1.3k InGaAs 検出器のリニアリティ。図中の下のプロットはフィットからの残差。

また、この試験に伴って取得したダークを用いて暗電流の評価も行った。ダーク画像のリニアリティを測定することで、その傾きが 1 秒当たりには発生している暗電流量となる。図 3.13 に測定結果を、表 3.5 に暗電流測定の結果まとめを載せる。結果から、エンジニアリンググレード素子の暗電流値は $0.46 \sim 1.75e^-/s$ とやや高めだが、サイエンスグレード素子の暗電流は $\sim 0.1e^-/s$ と、目標としていた値を達成している。ただ、図 3.13 を見ると、暗電流値は単純に露出時間に比例するわけではなく、露出時間に対してばらつくような傾向が見られる。今後は、このノイズの原因を調査し、対策することでより暗電流を抑えられる可能性がある。



左:エンジニアリンググレード素子の結果



右:サイエンスグレード素子の結果

図 3.13: 140K での 1.3k InGaAs 検出器の暗電流

	エンジニアリンググレード素子	サイエンスグレード素子
1port	0.57	0.12
2port	0.55	0.082
3port	0.49	0.074
4port	0.48	0.080
5port	0.49	0.085
6port	0.46	0.084
7port	1.75	0.11
8port	1.60	0.17

表 3.5: 検出器温度 140K における 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の各 port の暗電流値。単位: [e⁻/s]

3.2.4 波長相対感度、及び読み出しノイズの温度依存性

InGaAs 素子は、冷却下において長波長側で感度の低下が予想される (図 3.14)。これは、InGaAs 素子のバンドギャップエネルギーによる影響で、半導体の格子定数は温度によって値が変動するため、バンドギャップには温度依存性があり、波長感度にも温度依存性が生じるからである。

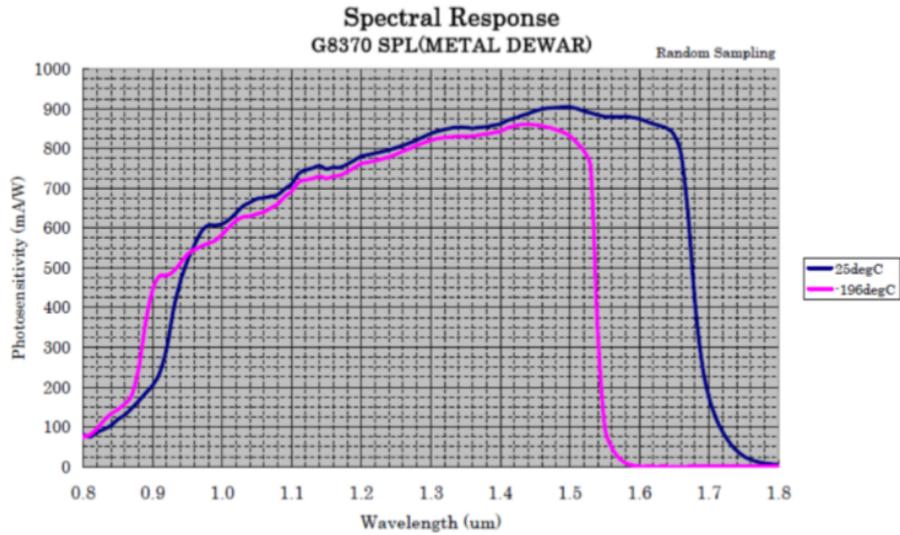


図 3.14: InGaAs 素子の温度ごとの波長感度特性の理論値 (浜松ホトニクス社資料より)

冷却下において、1.3k×1.3k InGaAs 素子がどの程度の波長まで感度を持つのかを確認した。バンド幅 50nm、中心波長が 1050nm から 1650nm までの計 7 枚の狭帯域赤外線フィルターを用いて、100K~270K までの各温度で波長ごとの相対感度を測定した。170K 以上ではヒーターの昇温能力と冷凍機の冷却能力が釣り合わず、温度を一定に保持することができないため、冷凍機の電源を切り、昇温しながらの測定となる。昇温中は平均で 0.1K/min で温度上昇しており、約 30 分間で各温度の全データを取得できているため、温度上昇によるカウント上昇は無視できるものとする。光源には 0.5W 豆電球を用いており、測定時は部屋の明かりを消し暗幕を被せている (図 3.15)。

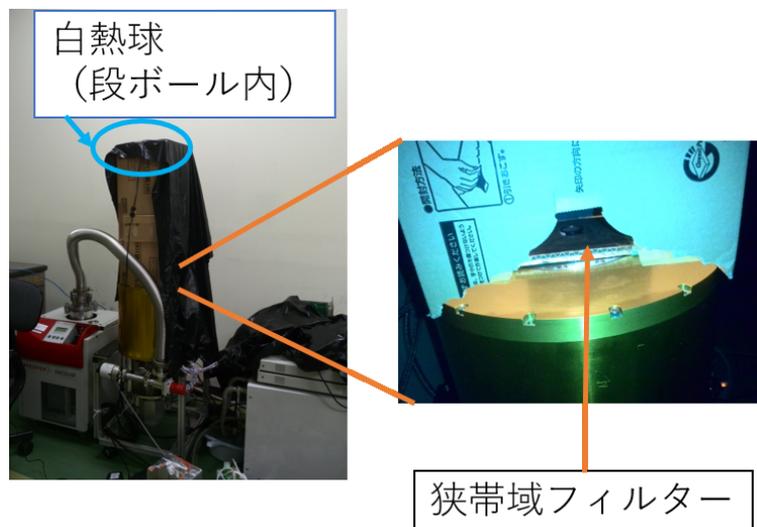


図 3.15: 波長相対感度測定時の様子

試験では、照射したフレームを 50 枚連続で取得し、その後同じ積分時間でダークフレームを 50 枚取得し、それぞれ 50 枚で median を取ったものを減算処理している。これを各 7 波長域に対して行うことで、光量を測定した。図 3.16 に示すように、減算処理を行った画像の $[x=100:500,y=100:115]$ の計 2406pix の総カウントを縦軸にとり、同領域内のピクセルの 50 枚での標準偏差をエラーとした。解析にこの領域のピクセルを用いたのは、バッドピクセルが少なく、本章の後半で述べるが枠状模様の問題もないためである。図 3.17 に測定結果を載せる。図をプロットする際、常温下 (270K~273K) でのカウントと各温度の 1350nm でのカウントを 1 と規格化し、且つ、各温度での積分時間の違いなども補正している。

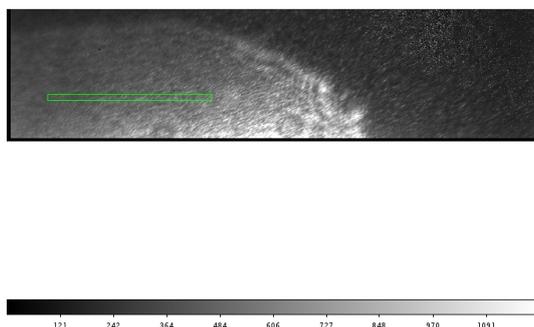
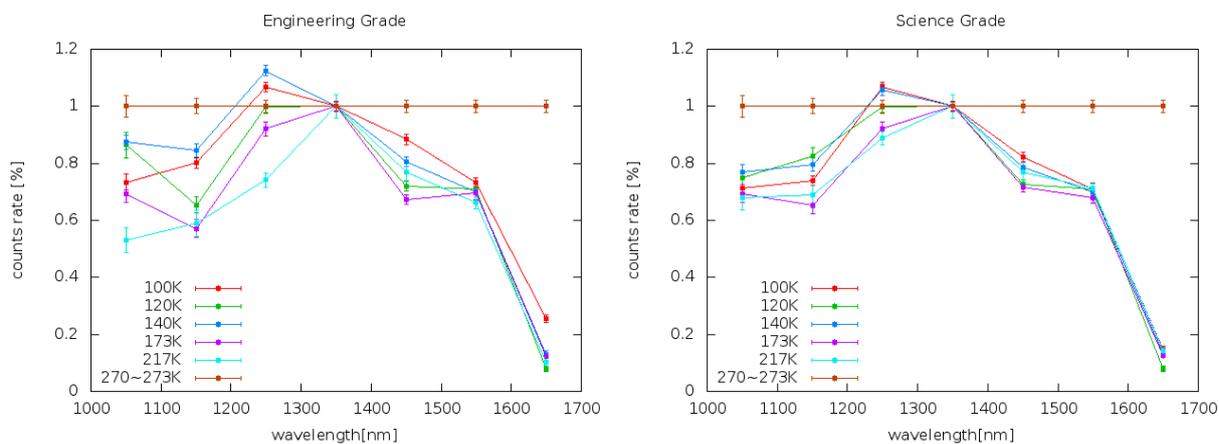


図 3.16: 波長相対感度測定で取得したライトフレームと解析に用いた領域



左:エンジニアリンググレード素子の結果

右:サイエンスグレード素子の結果

図 3.17: 1.3k InGaAs 検出器の温度ごとの波長相対感度測定結果。270k~273K でのカウントと各温度の 1350nm でのカウントを 1 と規格化している。

エンジニアリンググレード素子・サイエンスグレード素子両方の結果から、冷却下において 1550nm 以

上の波長域で常温下に比べて感度が低下しているのが判る。つまり、カットオフ波長が短波長側に遷移していることが分かる。このことから、表 1.1 で示したように、典型的な H バンドフィルターの波長透過域はおおよそ 1500nm~1800nm なので本素子を用いた H バンドの観測は難しいことが判った。

また、今回の試験で取得した 1350nm でのダークフレームの [x=100:500,y=100:115] の計 2406pix を用いて、読み出しノイズの温度依存性を調査した。この時、積分時間は読み出しノイズ試験同様 0.36s 積分である。ノイズの算出には式 3.1 を用いており、今回の場合は N=50 となる。今回はノイズに対してもエラーバーを付けており、領域内のピクセルの標準偏差をエラーとしている。図 3.18 に結果を載せる。この結果から、150K 辺りから冷却によるノイズ低下は見られなくなり、ほぼ一定になることが分かる。また、200K~250K 程度でも観測対象によっては十分に観測に利用出来る(例えば明るい天体。天体からの信号がノイズに埋もれなければ観測には利用できる。)ことが判った。この 200K~250K という温度は冷却能力の弱い冷凍機でも冷却可能な温度である。

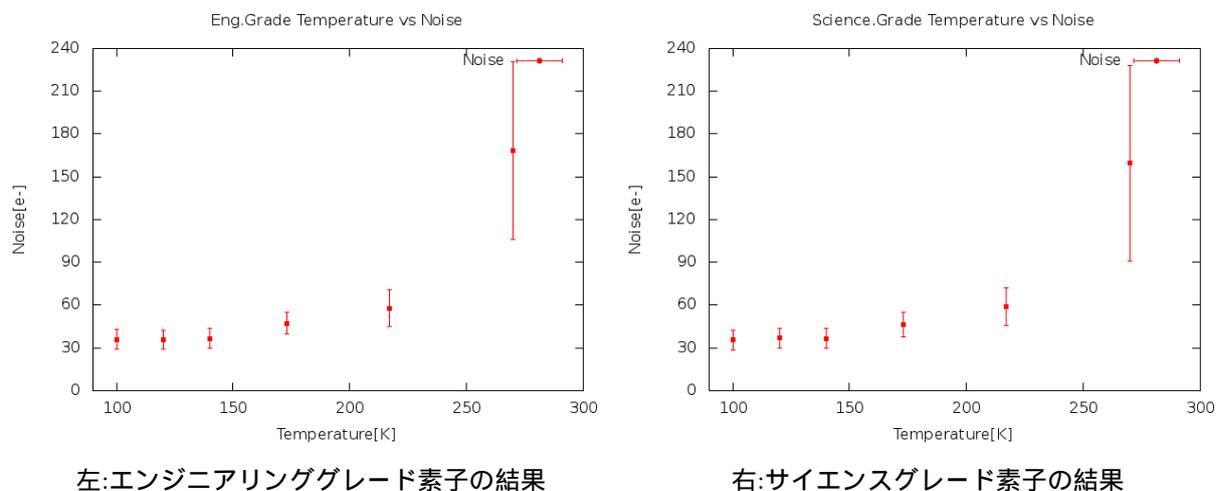


図 3.18: 1.3k InGaAs 検出器のノイズ温度依存性

3.2.5 エンジニアリンググレード素子を用いた試験観測

2017/3/28-29 にかけて、かなた望遠鏡ナスミス焦点にデューワーを搭載し、エンジニアリンググレード素子を用いた試験観測を実施した。観測バンドは短波長側から順に Y,J,H バンドで、観測対象は M3 球状星団、及び木星。検出器の温度は 140K である。本節では、その結果について述べる。また、図 3.19 にナスミス焦点に搭載した際のデューワーの写真を載せる。

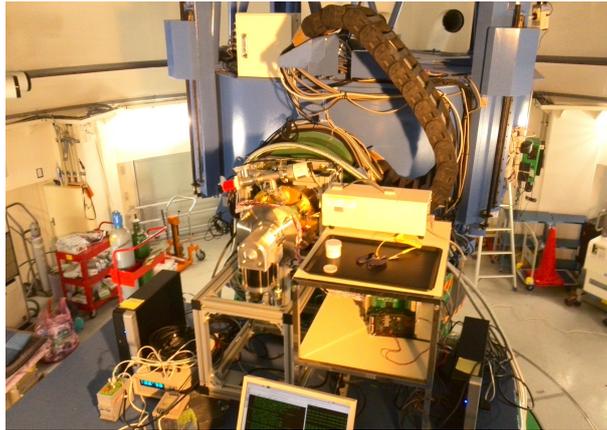


図 3.19: 1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードの試験観測時のセットアップ。かなた望遠鏡ナスミス焦点に専用のデューワー固定台を設置。

1.3k×1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレード素子のファーストライト 3 色合成写真

図 3.20 に木星、図 3.21 に M3 球状星団の 3 色合成写真をそれぞれ載せる。パッドピクセルの部分を切り取っているため、図 3.20,3.21 共に、1.3k×1.3k InGaAs 検出器のフルサイズである 1296×1296 ピクセルよりも小さくなっている。写真を見て分かるように、本検出器により星像を取得することに成功した。

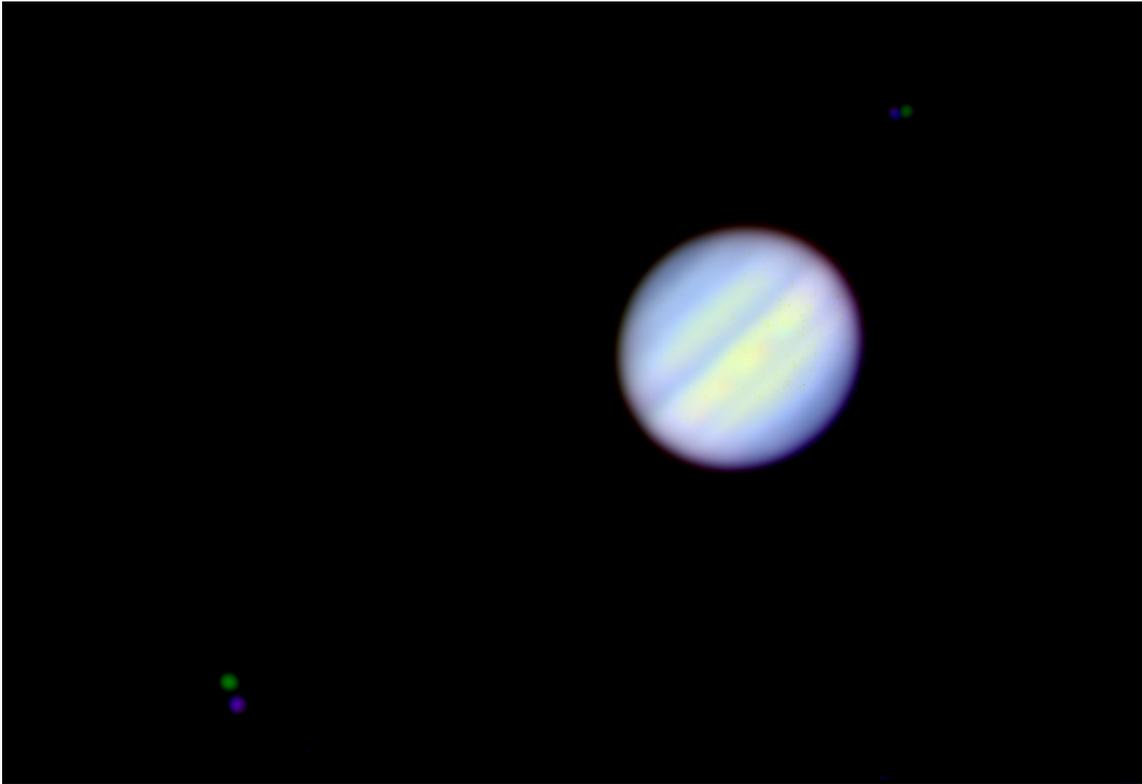


図 3.20: 1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードのファーストライトで撮像した木星の 3 色合成写真。1210×840pix(3.43'×2.38')。 Red=H バンド,Green=J バンド,Blue=Y バンド 左下:ガニメデ 右上:エウロパ 公転の影響で衛星の位置が動いているのが分かる

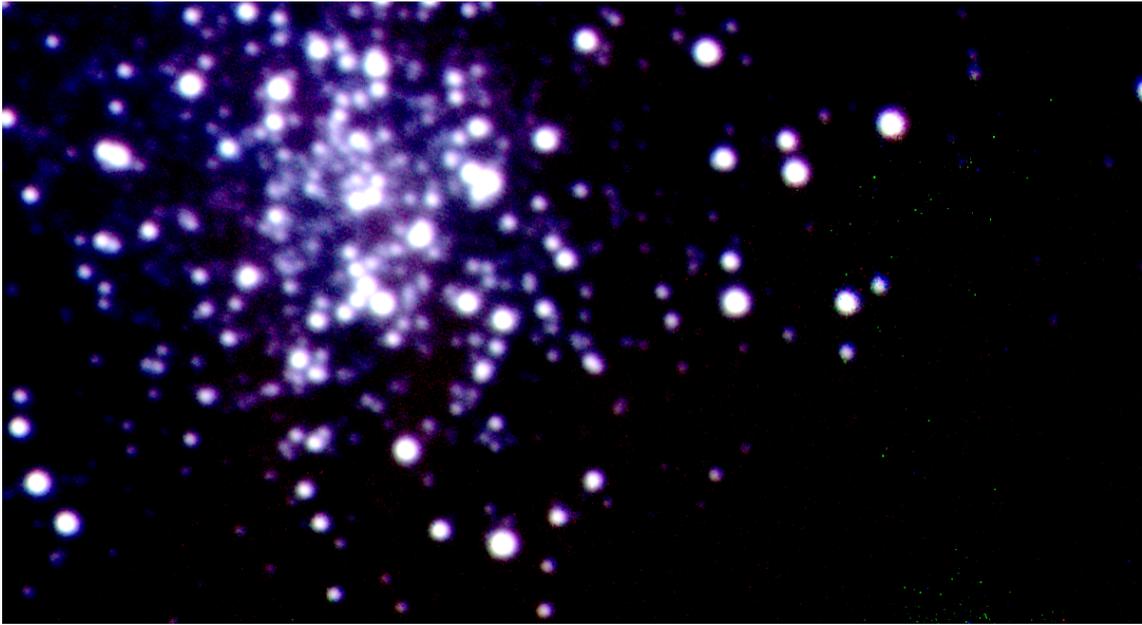


図 3.21: 1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレードのファーストライで撮像した M3 球場星団の 3 色合成写真。1190×660pix(3.37'×1.87')。 Red=H バンド,Green=J バンド,Blue=Y バンド

3 色合成写真とは、色の 3 原色の R(赤),G(緑),B(青) に対応する波長の画像を、それぞれ色の強度を調整してから重ね合わせることで、疑似的に色を付けた写真の事である。今回は天文解析ソフトである iraf を用いて、R=H バンド,G=J バンド,B=Y バンドとして合成を行った。以下に 3 色合成の手順を示す。

1. 各画像の天体の位置を合わせる。今回は iraf のコマンドである、imexam と imshift を用いて位置合わせを行った。imshift は、画像の座標をずらすコマンドで、imexam は簡易的に天体の様々な情報を取得することが出来るコマンドである。
各画像の同一天体に対し imexam で天体の重心を求めた後に、各画像の重心座標を imshift を用いて合わせる。これを複数の天体に対して行うことで、位置合わせを行った。 WCS(天体の天球上での位置。詳細は 4 章を参照。) が貼れる場合、より簡単に位置合わせを行える。
2. 位置を合わせた 3 枚の画像のサイズを合わせる (トリミングをする)。今回は iraf のコマンドである、imcopy を用いた。imcopy はファイルの画像領域を指定し、別のファイル名にコピーすることが出来るコマンドである。
3. トリミングをした 3 枚の画像を重ねる。今回は iraf のコマンドである、rgbsun を用いた。rgbsun は R,G,B に対応する画像の色の強度を調整し、重ね合わせを行うコマンドである。

エンジニアリンググレード素子の量子効率 (参考値)

図 3.21 に写っている恒星を用いて、素子の量子効率を簡易的に評価した。導出の際に使用した恒星は周囲に他の恒星との重なりがない 5 星を選定した。観測で得たデータでは、薄雲がかかっている、画像処理

の段階で大気の影響が完全には取り除けていないなど不定性があるため、今回導出した量子効率はいくまで参考値であることに留意しておく。以下に、天体を用いた際の量子効率の導出方法を示す。

口径 D の望遠鏡に M 等級の天体から 1 秒間に入射する光子数 S_i の理論値は以下のように表される。

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \frac{\Delta\lambda F_\lambda \lambda}{hc} \times 10^{-\frac{M}{2.5}} [e^-/s] \quad (3.2)$$

ここで、式 3.2 で用いている物理量はそれぞれ、

$\Delta\lambda$: X バンドの波長幅 [\AA](今回の試験観測では X=Y,J,H バンド), F_λ : X バンドでの 0 等級のフラックス [$\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{\AA}^{-1}$], λ : X バンドの中心波長 [\AA], h : プランク定数 ($6.63 \times 10^{-27} [\text{erg}\cdot\text{s}]$), c : 光速 ($2.998 \times 10^{18} [\text{\AA}\cdot\text{s}^{-1}]$), D^2 : かなた望遠鏡の場合 150^2 (主鏡)- 32^2 (副鏡)[cm^2]

である。また、望遠鏡の鏡やフィルター、入射窓の面で反射による光子の損失なども影響する。その為、実際に検出器に入射する光子数は以下の損失を考慮する必要がある。

項目	損失率 [%]	面数
主鏡・副鏡・第三鏡	20	各 1
バンドフィルター	15	1
大気	10	1
ウィンドウ	4	6(ナスミス台 ×2、デュワー ×1。それぞれ入射面と出射面。)

表 3.6: 量子効率導出の際に考慮すべき反射面による光子の損失 (ナスミス台搭載)

上記を計算すると、ナスミス台に搭載された検出器に入射する天体からの光子数は、理論値に対して約 30.7%に減光して入射する為、これを補正する必要がある。補正後の光子数の理論値 S_i は以下ようになる。

$$S_i = S \times 0.307 [e^-/s] \quad (3.3)$$

一方、実際の観測で得られる 1 秒あたりの光電子数 N_i は、積分時間を t , 対象天体の総実測カウントを N_{total} とすると以下のように表される。

$$N_i = \frac{N_{total}}{t} [e^-/s] \quad (3.4)$$

今回、天体の測光には iraf の apphot というコマンドを用いた。以上を用いて、効率 QE は以下のように導出できる。

$$QE = \frac{N_i}{S_i} \times 100 [\%] \quad (3.5)$$

以上の関係式を用いて量子効率を導出した。表 3.7 に各バンドでの物理量と量子効率を載せる。繰り返しになるが、今回導出した値はいくまで参考値である。尚、今回導出した量子効率は 5 天体に対して効率を求めた後、その平均値を量子効率としている。また、誤差は 5 星で求めた効率の標準誤差を用いている。

	Yバンド	Jバンド	Hバンド
$\lambda[\text{\AA}]$	10350	12485	16380
$\Delta\lambda[\text{\AA}]$	1570	1593	2862
$F_\lambda[\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{\AA}^{-1}]$	5.88×10^{-10}	3.31×10^{-10}	1.15×10^{-10}
量子効率 [%](5 天体の平均値 \pm 標準誤差)	31.622 \pm 3.85	45.352 \pm 2.42	54.208 \pm 1.81

表 3.7: 1.3k \times 1.3k InGaAs 検出器エンジニアリンググレード素子の M3 球状星団の天体を用いて導出した量子効率 (参考値)

J,Hバンドというのは天文分野ではメジャーなバンドであり、2MASS カタログでそれらのバンドの等級が公開されている。ただ、Yバンドの全天カタログは存在せず、Y等級は不明である。その為、今回 Yバンドの等級は式 3.6[17] を用いて推定した。

$$Y = K_s + 1.901(J - K_s) - 1.296(J - K_s)^2 + 2.289(J - K_s)^3 - 2.4091(J - K_s)^4 + 0.999(J - K_s)^5 \quad (3.6)$$

この式は、天体温度 3500~10000K, 等級 $0.7\text{mag} < (J - K_s) < 1.2\text{mag}$ の天体に対して 0.1mag の精度で推定可能で、今回用いた 5 天体はこの条件に該当する。

エンジニアリンググレード素子の量子効率に対する考察

冷却下における InGaAs 検出器の感度は、3.2.4 章で見たように、InGaAs 素子のバンドギャップの影響で長波長側、特に Hバンドの長波長側で大きく低下する。今回の試験観測で用いた波長フィルターは短波長側から順に Y,J,H である。そのため、量子効率としては $Y, J > H$ バンドとなることが予想されるが、表 3.7 に示したように今回の測定では $H > Y, J$ バンドとなった。この原因として雲の影響が考えられる。図 3.22 に試験観測時の東広島天文台上空の雲の様子を載せる。この写真を見て分かるように、Hバンドに比べ、Y,Jバンドの観測時は M3 星団の辺りの雲が厚いことが判る。よって、Y,Hバンドでの感度低下は天候の影響だと考えられる。

このように天体を用いた量子効率の測定は天候の影響を大きく受ける為、サイエンスグレードの量子効率の導出は、実験室環境下にて赤外線レーザーを用いて行うことにした。

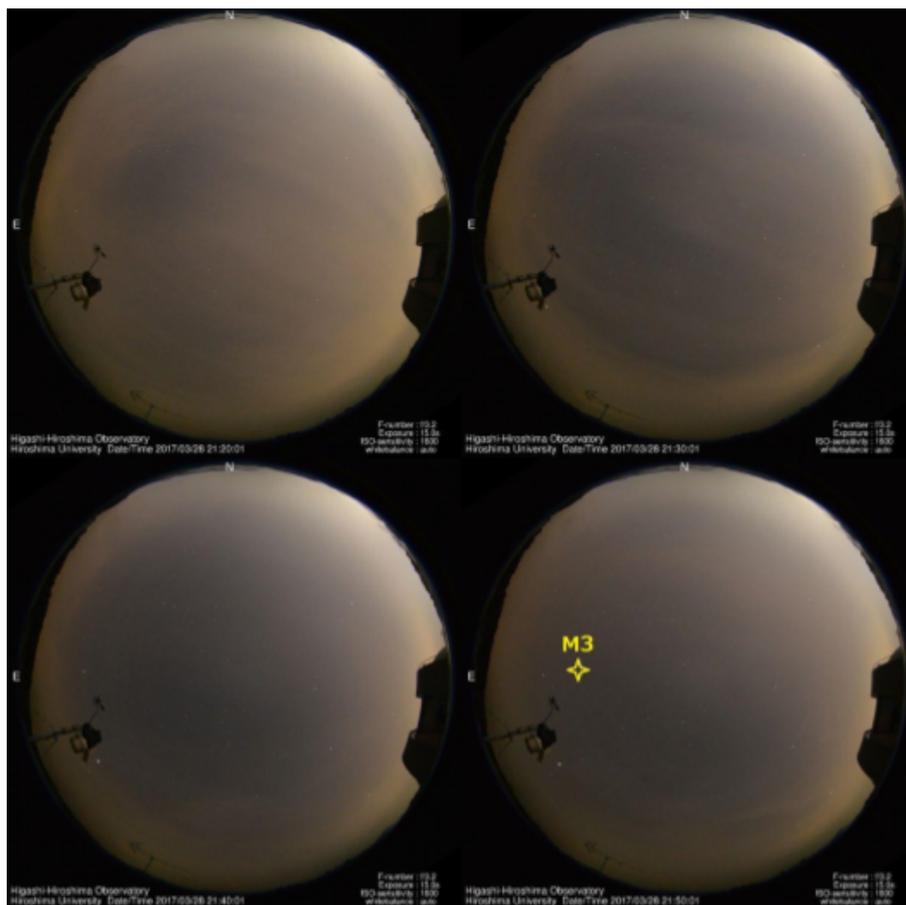


図 3.22: 試験観測時の東広島天文台上空の雲の様子。 左上:J バンド 右上:Y バンド 左下:H バンド の観測時の様子。

3.2.6 サイエンスグレード素子の量子効率測定

大学実験室にて波長 1310nm の赤外線レーザーを用いて、サイエンスグレード素子の量子効率の測定を行った。赤外線レーザーは Edmont Optics 社の赤外線レーザー NT56-114 を使用している。このレーザーは専用のドライバ(図 3.23) の可変抵抗を調整することで、出力強度を $10\mu\text{m}\sim 0.3\text{mW}$ まで連続的に調整できる。レーザー強度は OPHIR 社のレーザーパワーメーター NOVA II を用いて測定している。図 3.24 に NOVA II を用いたレーザー出力強度の計測時の様子を載せる。尚、実際の計測時は暗幕を掛け、室内の明かりを消している。



図 3.23: 赤外線レーザーのドライバ。ドライバ右端の白い可変抵抗を回すことで、レーザー出力を変更できる。

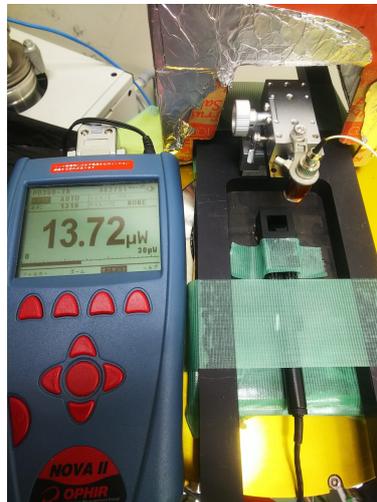


図 3.24: パワーメーターを用いた赤外線レーザーの強度測定の様子

今回使用した赤外線レーザーは、1.3k InGaAs 検出器に対してレーザー強度が強すぎる為、レーザーと検出器の間に Thorlabs 社の吸収型 ND フィルターを挟んで減光している。また、今回の試験では $10^{-10}W$ オーダーの極めて弱いレーザー強度が要求されるため、ND フィルターを挟んだ状態で NOVA II でレーザー強度を測定することは不可能である。その為、試験時は ND フィルターを挟む前のレーザー強度を測定し、その値に ND フィルターの透過率をかけたものを検出器に入射するレーザー強度とした。表 3.8 に今回用いた ND フィルターの 1310nm に対する透過率を、図 3.25 にレーザー照射時のセットアップの写真を載せる。

1310nm での透過率 [%]	1310nm での OD(光学濃度)
0.022	3.65
0.0013	4.89

表 3.8: ND フィルターの透過率 (実測値)

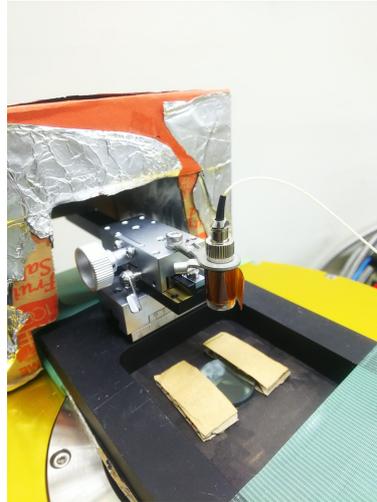


図 3.25: 量子効率測定時のレーザーと ND フィルターのセットアップ

以下に赤外線レーザーを用いた量子効率測定について述べる。

強度 P_{laser} のレーザーを t 秒間照射した場合、1 秒間に照射された総光子数 S は

$$S = \frac{\lambda}{hct} P_{laser} [e^-/s] \quad (3.7)$$

と、表される。ここで、 λ はレーザーの波長であるので今回は 1310nm となる。今回、素子のピクセルスケールが $15\mu\text{m}$ 角である為、レーザーのビーム径 3mm は 200pixel に相当する。読み出し列を限定する際、レーザーの光子が全て検出器に照射するように 200pixel 以上は最低でも必要で、今回は $1296 \times 432\text{pix}$ で読み出しを行った。また、天体での量子効率導出時と同様に、フィルター等による光子の損失を考える必要がある。今回考慮すべきはウィンドウの入射面・出射面による損失のみで、それぞれ約 4% の減光と仮定すると、レーザー光は約 92% に減光して検出器に入射するため、これを補正すると以下ようになる。

$$S_l = S \times 0.922 [e^-/s] \quad (3.8)$$

このとき、量子効率 QE は式 3.4,3.8 を用いて以下のように表される。

$$QE_l = \frac{N_i}{S_l} \quad (3.9)$$

今回の測定では、レーザー照射画像とダークフレームをそれぞれ連続で 10 枚ずつ取得し、ダーク減算を行った上で量子効率を求めている。誤差はレーザーの出力不定性:4% , パワーメーターの計測不定性:5% , ND

フィルターの透過率不定性:4% , 10 枚の測定画像の標準偏差 を考慮して計算している。図 3.26 にレーザー照射時の画像、表 3.9 に量子効率の測定結果を載せる。試験の結果、1310nm での量子効率は (誤差は大きいものの)80%程度と、所期性能と同等の結果が得られた。

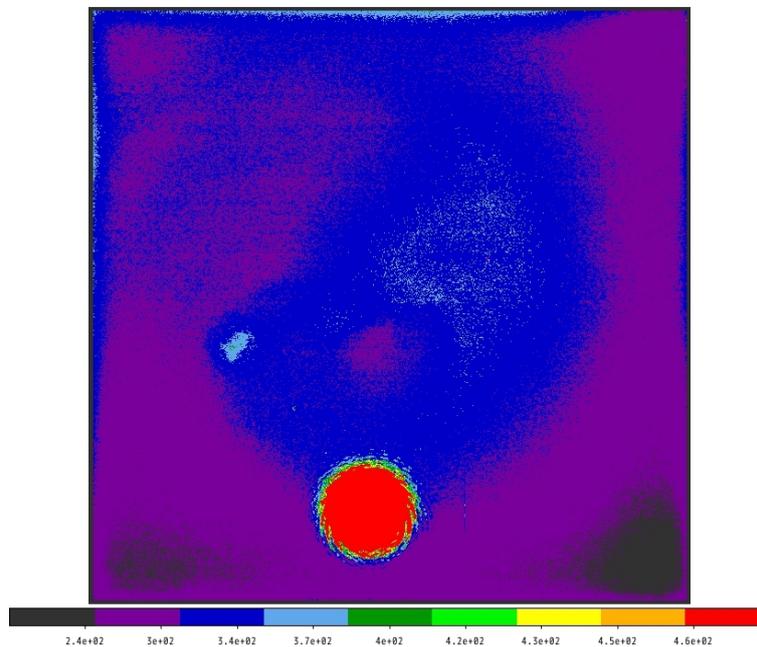


図 3.26: レーザー照射時の画像

	140K	270K
フィルターなしレーザー強度 [W]	221.0×10^{-6}	13.0×10^{-6}
フィルターありレーザー強度 [W]	6.28×10^{-13}	4.94×10^{-10}
積分時間 [sec]	13.10	2.18
$S_i [e^-/s]$	4142176	3255873883
$N_i [e^-/s]$	3064216	2455663281
QE[%]	80.27 ± 7.13	81.84 ± 7.51

表 3.9: 1.3k InGaAs 検出器サイエンスグレード素子の量子効率

3.2.7 性能評価から判明した 1.3k InGaAs 検出器の問題点

今回の性能評価を通して、1.3k InGaAs 検出器の課題も見えてきた。今回評価した検出器には、図 3.27 に示すように「杵状模様」と呼んでいる、チップの外縁部に、内側の素子に比べて暗電流値が不安定な素子群があることが判った。これは、1.3k InGaAs 検出器のエンジニアリンググレード素子、サイエンスグレード素子の両方に見られるが、128 素子には見られなかった。

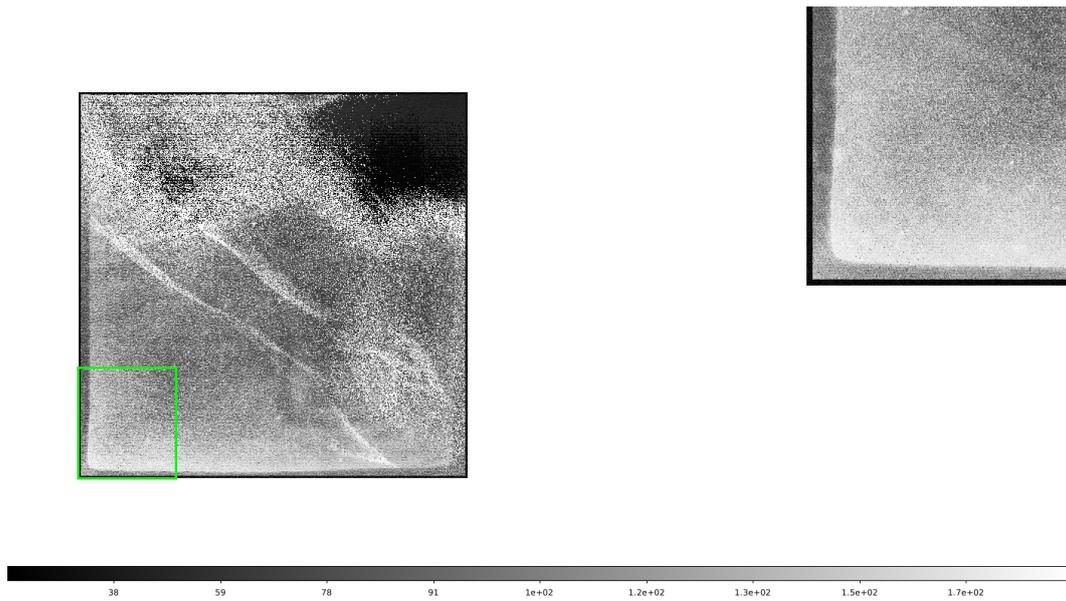


図 3.27: 枠状模様。左図の緑枠を拡大したものが右図で、素子の外縁部は他のピクセルとカウントが異なることが分かる。

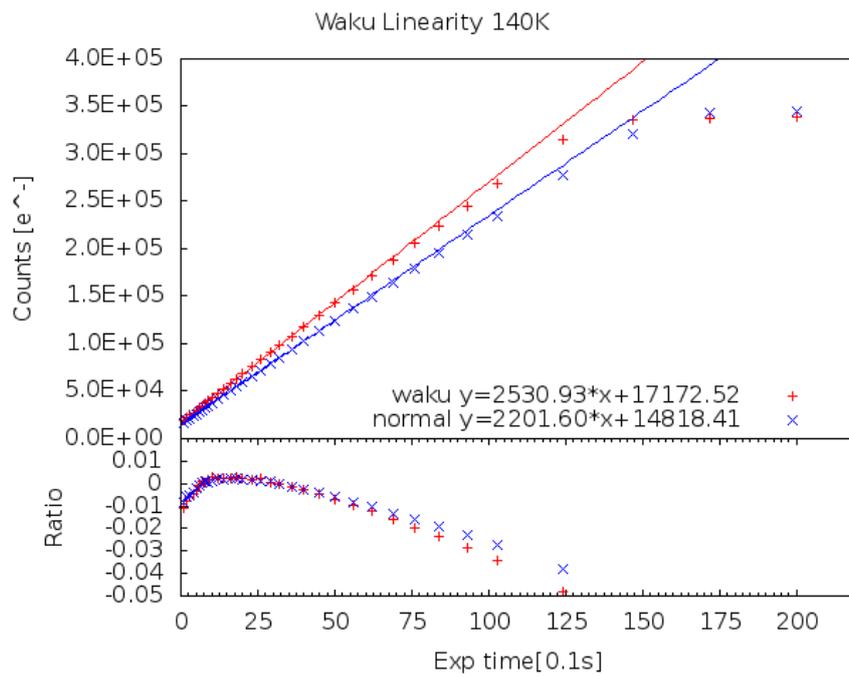


図 3.28: 通常部のピクセルと枠状模様内のピクセルのリニアリティの比較。dark 減算は行なっていない。枠状模様部もそれなりのリニアリティは保つが、傾きや 0 秒積分でのカウントが大きいことが判る。

近赤外線データにおいては、これまでの試験時でも行ってきたように照射したフレームから同じ積分時間のダークフレームを減算した後に画像解析を行う。その為、本来ならば暗電流の影響は画像処理の段階である程度は軽減できるのだが、枠状模様は暗電流が不安定なため、画像処理の段階で影響を消しきることができないことが判った。また、積分時間に依存して模様のパターンが変わるなど(図 3.29) 不可解な点も多い。以上から、枠状模様上で撮像した天体に対して精度のいい解析ができなくなるため、検出器上に枠状模様があるままでの天文観測での利用は難しい。我々はこの課題をメーカーにフィードバックし現在メーカー側で解決を試みている。

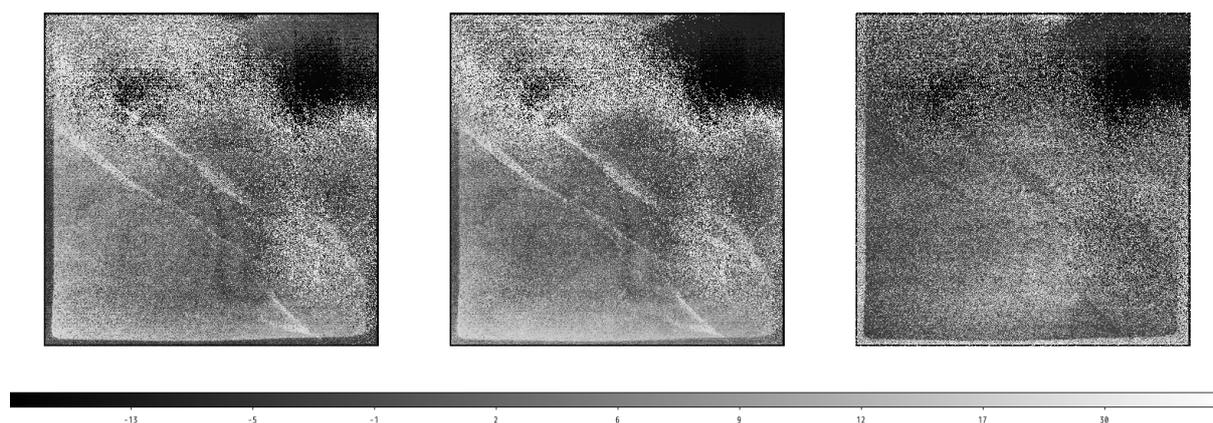


図 3.29: 左から順に、100s,600s,100s/600s のダーク画像

3.3 各赤外線検出器の諸性能比較

現在 HONIR に搭載されている海外製第面積近赤外線検出器である Virgo 検出器と、今回試験を行った 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の諸性能を表 3.10 にまとめた。Virgo 検出器の諸性能は 2013 秋田谷内部レポート、2014 宇井内部レポート、及び 2013 大橋卒論 [18] の値を参照している。注意事項として、Virgo の試験温度は 70~75K で読み出しシステムは Messis5+MACS2、HONIR 筐体に搭載中の素子の試験であり、それぞれの項目で試験方法やスレッシュヨルド値が若干異なることを挙げておく。

	サイエンスグレード	エンジニアリンググレード	Virgo
読み出しノイズ [e^-]	44	35	26
暗電流 [e^-/s]	0.074~0.17	0.46~1.75	0.45
リニアリティ($\pm 1\%$)[e^-]	≤ 140000	≤ 140000	$\leq 100000-150000$
バッドピクセルの割合 [%]	0.548	33.426	0.611

表 3.10: 1.3k×1.3k InGaAs 検出器と Virgo 検出器の諸性能比較

表 3.10 からは以下のことが読み取れる。

- リニアリティは InGaAs 検出器と Virgo 検出器でほぼ同レベル
- バッドピクセルの割合と暗電流に関しては InGaAs 検出器の方が高性能
- ノイズは Virgo 検出器の方が低く、InGaAs 検出器は改善 (対策) の余地あり

以上より、今回試験した 1.3k×1.3k InGaAs 検出器 (サイエンスグレード素子) は、Virgo 検出器と比較しても遜色ない性能を有していることが判った。この事から、この InGaAs 検出器の性能は、天文分野で利用する際の要求性能を満たし得ると言える。また、今回試験した検出器を広島大学 HONIR に搭載する場合は、有効感度波長域やノイズの温度依存性なども含め統合的に判断すると、Y,J バンドを用いて検出器温度 173K 以下での使用が望ましいと言える。

第4章 IceCube 高エネルギーニュートリノ電磁波対応天体の探索

近赤外線検出器の性能評価と並行して、突発天体の観測・解析を行った。特に私は IceCube ニュートリノ観測所が検出する、高エネルギーニュートリノイベントの電磁波対応天体の探索を行った。IceCube 観測所は、2016 年 4 月から高エネルギーニュートリノを検出した際にニュートリノの到来方向を位置情報が記載されたアラートを流し始めており (1.4.2 章参照)、そのアラートに呼応して既存装置を用いて対応天体の探索を行った。IceCube が検出するような高エネルギーニュートリノの対応天体を観測することで、その親粒子である最高エネルギー宇宙線の起源天体に迫ることが目的である。また本研究には、国産大面積近赤外線検出器が完成した場合のサイエンス的価値を確かめる為の予行演習という位置付けもある。

4.1 変動天体探索の流れ

我々が IceCube 対応天体を探索する際には、アラートに記載されている位置誤差領域内に可視・近赤外領域で変動している天体がないかをかなた望遠鏡 HONIR を用いて探索する方針をとっている。簡単な変動天体探索の流れを図 4.1 に示す。

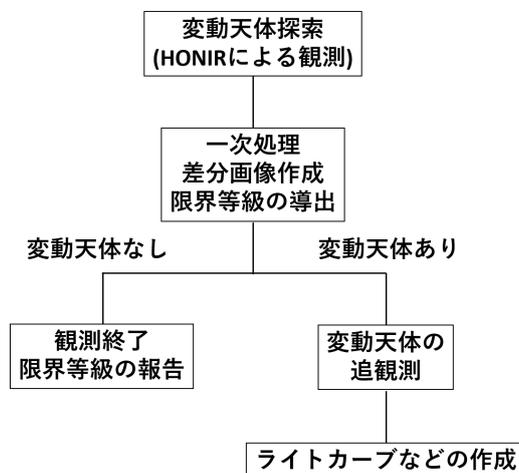


図 4.1: 変動天体探索の流れ

4.2 変動天体判別の流れ

4.2.1 撮像データ一次処理

取得した生画像には天体以外のノイズなどが乗っている他、感度ムラの影響を受けているため、生画像のカウントを直接読み取るだけでは正しい結果を得ることができない。その為、生画像に対して以降で述べる一次処理を行なう必要がある。

オーバースキャン領域補正

オーバースキャン領域は CCD や近赤外線検出器上の受光素子上ではない、読み出し回路部の電荷を読み取ること得られるものである。本来の使用用途としては、オーバースキャン領域のカウント (= バイアスレベル) を検出器受光面のカウントから引くことで短時間スケールでの電圧の揺れによるノイズの影響を軽減することが挙げられる。図 4.2 に示すように、HONIR で取得した生画像上には黒い線が伸びており、これがオーバースキャン領域である。バイアスレベルの差し引き後は不要なものなので、オーバースキャン領域を切り取り、受光面のピクセル同士を繋げる。

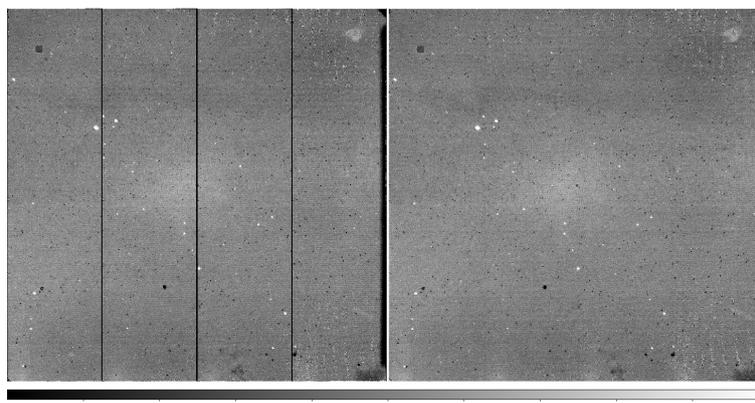


図 4.2: 左:生画像。画像内の黒い線がオーバースキャン領域 右:オーバースキャン領域を切り取った後の画像

バイアス・ダーク引き

バイアスとは読み出し回路に掛けるバイアス電圧に伴うカウントのことで、ダークとは受光素子中の熱電子により生じるカウントである。2章で述べたように、ダークを抑えるために検出器を冷却する必要がある。また、可視 CCD が十分に冷却されている場合はダークを無視することができるため、HONIR で取得した可視画像はバイアス処理のみで充分である。

フラット割り

検出器の感度は理想的には全ピクセルで一様であることが望ましいが、実際の検出器にはピクセルごとに感度ムラが存在する。それに加えて、望遠鏡の光学系の収差や望遠鏡上にあるホコリなどの影響も受けてしまうため、観測装置の視野中に一様な強度を持った光を照射しても、ピクセルごとに異なるカウントを持った画像になる。これを補正するのがフラット割りである。かなた望遠鏡では、ドームに設置されているフラット板にライトを当てた、オフフォーカスのフラット板の像を擬似的なフラット像であると仮定し、望遠鏡を通して撮像することで、フラットフレームを取得している。図 4.3 にフラット割り前後の画像を載せる。

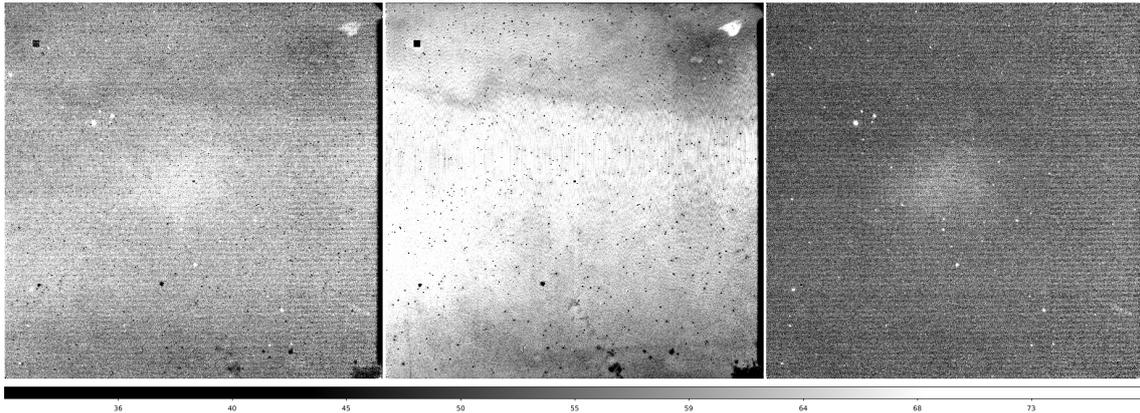


図 4.3: 左:ダーク引きまでを行ったJバンドの画像 中:Jバンドフラットフレーム 右:フラット割り後の画像

スカイ引き

スカイとは大気による天体・街明かりの散乱光や、上空大気電離層の自発光などのバックグラウンドの総称で、天体の解析時には不要なもので、主に近赤外線領域では顕著である。今回は SExtractor[19] を用いてスカイ引きを行った。SExtractor はフランスで開発された天体解析ソフトで、主に天体の自動検出、及び測光を得意とするソフトである。SExtractor を用いたスカイ引きでは、画像全面の測光を行った後、天体以外のバックグラウンドを見積もり元画像から差し引いている。

WCS 貼り

WCS(World Coordinates System) とは天体の天球上での座標系を示すもので、通常、赤道座標 (図 4.4) で表され、赤経 (Declination:DEC) と赤緯 (Right Ascension:RA) の単位はそれぞれ、時 (度の場合もある)、度で表される。地球の赤道を天球面に投影したものを天の赤道と呼び、この大円は赤緯 0° の大円と一致する。地軸を北極方向と南極方向に伸ばして天球と交わる点をそれぞれ天の北極、天の南極とよび、これらは赤緯 90° , -90° に相当する。赤経は春分点を基準として、東回りに $0^\circ - 24^\circ$ で表される。

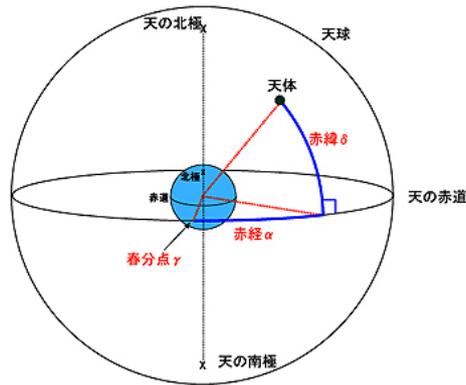


図 4.4: 赤経赤緯座標の模式図 [20]

かなた望遠鏡では望遠鏡の高度・方位をモニターしており、これらによる撮影時の望遠鏡位置情報と検出器座標を用いて、観測した画像に簡易的な WCS が張ってある (具体的には fits ファイルのヘッダーに記録される)。しかしながら、今回のように突発天体の探索するには位置精度が十分ではないので、公開されている全天サーベイデータのカatalogを用い、書き込んでいる星々の赤経赤緯を参照し、solve-field コマンド [21] で WCS の貼り直しを行っている。

4.2.2 差分画像作成

変動天体を見付けるには、過去の画像と比較して増減光している天体がないかを探せば良い。その為に私は、hotpants というソフトウェアを用いて過去の画像との差分画像を作成し、変動している天体がないかを調査した。差分画像作成の流れは以下の通りである (図 4.5 は、下の項目の流れを図示したもの)。

1. インพุット画像 (対象天体を観測した画像) と同じ領域のテンプレート画像の取得
2. インพุット画像とテンプレート画像の位置合わせ
3. インพุット画像とテンプレート画像の PSF(天体のサイズ) 合わせ
4. インพุット画像とテンプレート画像のカウントのスケーリング (カウントを合わせる)
5. インพุット画像-テンプレート画像で引き算

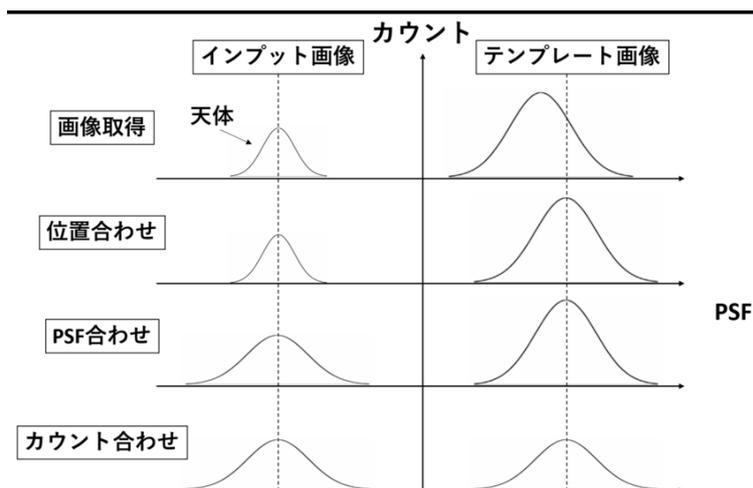


図 4.5: 差分画像作成の流れ

以下に各項目について詳細を述べる。

テンプレート画像の取得

今回私は、テンプレート画像に2種類の画像を用いた。1つは全天サーベイカタログから得た画像、1つはかなた望遠鏡で別の日に観測した画像である。

- カタログ画像

- カタログ画像とは、過去に観測され、データベース上に公開されている画像の事である。今回、近赤外線領域には2MASSカタログを用いている。可視光領域はPanSTARRSカタログを用いる予定であったが差分が上手くできていないためデータリダクションは行わなかった。カタログ画像を取得する際は、入力画像のWCSを読み取り、同じ領域の画像を取得するスクリプトを用いた。ただし、カタログ画像と入力画像の観測領域が完全には一致せず、1枚のカタログ画像では入力画像の観測領域全てを補うことができなかったため(図4.6)、図4.7のように隣接するカタログ画像を複数枚取得し、それをswarpコマンド[22]を用いて1枚の画像として繋げ合わせて用いた。

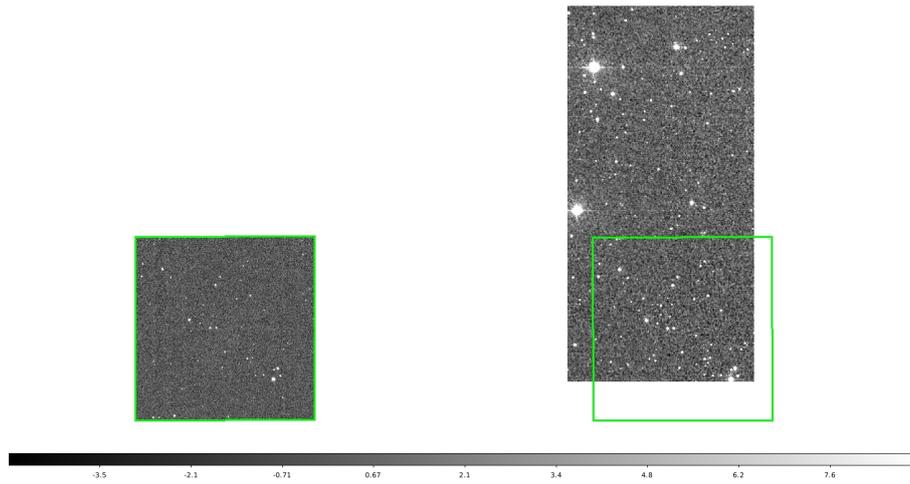


図 4.6: 左:かなた望遠鏡 HONIR の画像 (入力画像) 右:2MASS カタログ 1 観測領域の画像

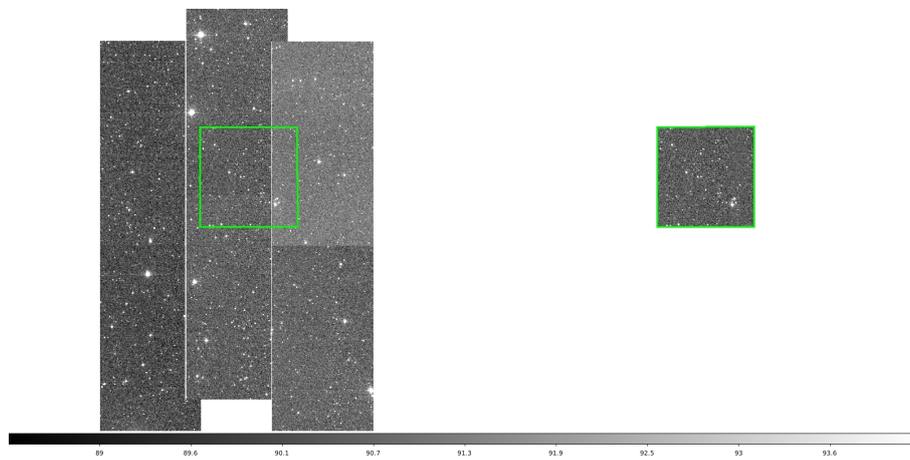


図 4.7: swarp コマンドの使用例。左図のように 2MASS カタログから取得した 6 枚の画像に対して swarp コマンドを実行し、入力画像と同じサイズの右図が出力される。

- IceCube アラート翌日にかなた望遠鏡で観測した画像

- 翌日の画像をテンプレート画像に用いることで、日スケールでの短期変動を確認できる。同じ望遠鏡・装置を用いた画像では、画像サイズや収差などの影響が入力画像と同じであるため、差分の精度が高いなどのメリットがある。一方デメリットとしては、翌日の観測を待つ必要がある為、差分画像の作製までに時間がかかることが挙げられる。

WCS を用いた位置合わせ

画像間の引き算を行うためには精度よく天体の位置情報が一致している必要がある。その為、各画像の WCS を参照して画像間の位置を合わせる `wcsremap` コマンド [23] を用いて、位置合わせを行った。

カウントのスケールリング・PSF 合わせ・差分

PSF(Point Spread Function) とは点広がり関数のことで、点光源の 2 次元カウント分布がそれに当たる。PSF がインプット画像とテンプレート画像で異なると引き算した際に星像のどこかで引きすぎ/引き残しが発生するため、画像間で PSF を合わせる必要がある。PSF を合わせる際は PSF が良い方を悪い方に合わせてなまらせる方法をとる。画像間のカウントのスケールリング・PSF 合わせ・引き算を、`hotpants`(High Order Transform of Psf ANd Template Subtraction) コマンド [24] で行った。図 4.8 に、差分画像の作成例を載せる。

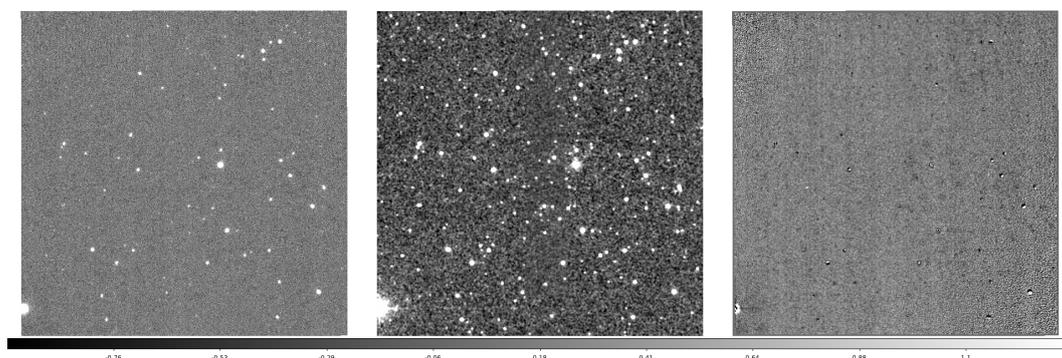


図 4.8: 差分画像の作成例。左から順にインプット画像、テンプレート画像 (2MASS カタログ)、差分画像

4.2.3 測光

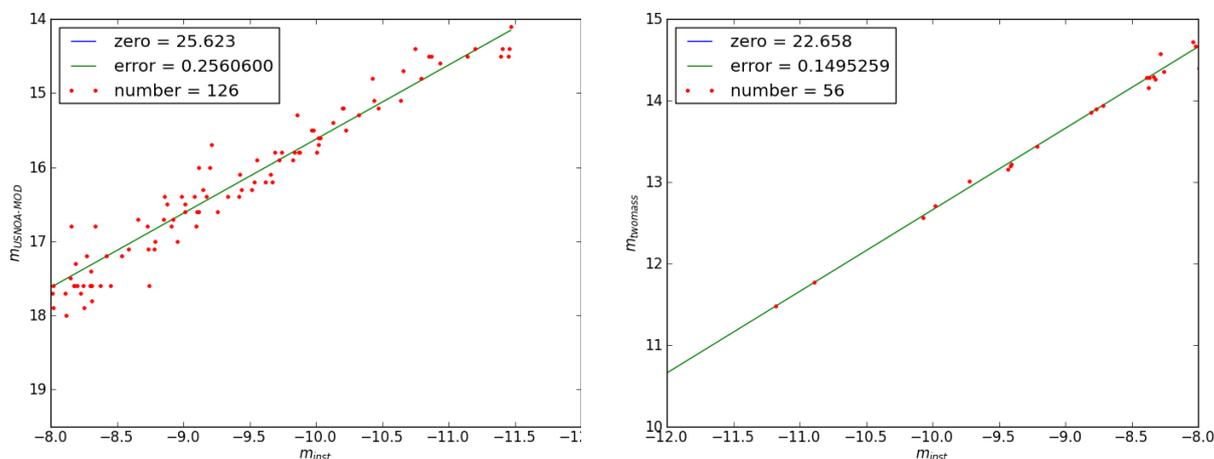
星の明るさを測ることを測光という。対象天体が観測領域内に存在した場合、その天体が光度変化を示す可能性があるため、複数の画像にわたり測光を行ない、光度変化を調べる。測光にはアパーチャー測光と PSF 測光があるが、今回はアパーチャー測光を採用した。また、かなた望遠鏡で取得した画像での測光値は器械等級と呼んでおり、天体本来の等級を知るためには、等級が正確に求められている標準星 (比較星) との相対測光を行ない、器械等級から変換する必要がある。器械等級と本来の等級との差をここでは測光原点と呼ぶことにすると、それらは式 4.1 で与えられる。

$$m_{inst} = m_{catalog} + m_0 \quad (4.1)$$

(m_{inst} :器械等級, $m_{catalog}$:カタログ等級 m_0 :測光原点)

この式から、器械等級 vs カタログ等級の図を plot した時、その切片が測光原点となる。今回は、HONIR で観測して取得した各画像に対して、SExtractor を用いて画像内の天体を全面測光した後、器械等級 vs カタログ等級で plot してその切片から測光原点を導出した。暗すぎる天体や明るすぎる天体はそれぞれ、S/N

比の悪さとリニアリティのズレの影響でデータの精度を悪化させる可能性があり、測光原点導出の際に除外するために、データを plot をする際、器械等級に上限と下限値を設けて、その範囲内の標準星に対して plot した。図 4.9 に測光原点導出時の plot 例を載せる。図中の zero が測光原点、error が直線 fitting からの残差、number が検出天体数である。



左:R バンドの plot 図。USNO カタログを使用。

右:J バンドの plot 図。2MASS カタログを使用。

図 4.9: 器械等級 vs カタログ等級の plot 図。測光原点は切片から導出。

アパーチャー測光

アパーチャー測光は日本語で開口測光とも呼ぶ。アパーチャー測光は、天体の重心からある開口 (アパーチャー) 半径の円内のピクセルのカウントを積分することで、天体のカウントを見積もる手法である。一般的に、アパーチャー半径は星像の半値幅である FWHM の 1.5~3 倍程度が適切であると言われている。アパーチャーの外側に円環状のスカイ領域を用意し、その領域のカウントの平均値をスカイと見積りアパーチャー領域のカウントから差し引くことで、画像の一次処理では取り除けなかったスカイ成分の寄与を小さくする。このスカイ領域の内径を annulus、外径を daanulus と呼ぶ。以上の説明をまとめたアパーチャー測光のイメージ図を図 4.10 に載せる。

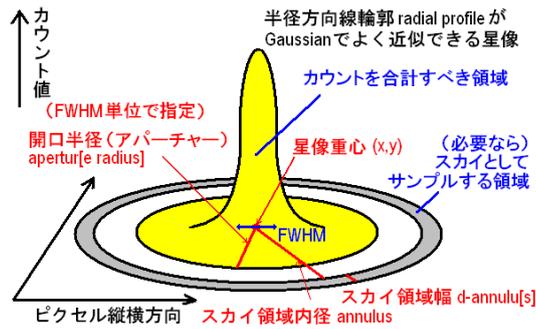


図 4.10: アパーチャー測光のイメージ図 [25]

比較星との相対測光

ターゲット天体の器械等級を m_{inst_obj} 、比較星の器械等級を m_{inst_comp} 、カタログ等級を $m_{catalog_inst}$ とすると、以下の関係式からターゲット天体の本来の等級 m_{obj} を導出できる。

$$m_{obj} = m_{inst_obj} - m_{inst_comp} + m_{catalog_inst} \quad (4.2)$$

4.2.4 限界等級の導出

限界等級とは望遠鏡の性能を表す指標のひとつで、観測できる最も暗い天体の光度を表すものである。今回は、観測した各画像に対して限界等級を求めることで、対象の画像内に写っている最も暗い天体の等級を調べた。観測領域内に変動天体がない場合、限界等級より明るい天体には変動天体が存在しないという情報を得ることができる。

4.2.5 変動天体の追観測

変動天体があった場合、かなた望遠鏡では以下のように追観測を実施している。

- HONIR での撮像・偏光観測、HOWPol での分光観測
- 必要に応じ光赤外線天文学大学間連携事業 ([26]) ないし共同研究者に追観測依頼を出す

かなた望遠鏡での変動天体の追観測

IceCube アラートに応じた観測で変動天体を発見した後、連続的にモニター観測を行うことで高エネルギーニュートリノ起源候補天体の活動性を調査し、偏光観測で磁場情報や放射メカニズムを取得すると共に、分光観測で天体までの距離 (赤法偏移) を求めることを目指している。

光赤外線天文学大学間連携での変動天体の追観測

光赤外線天文学大学間連携, 通称 OISTER(Optical and Infrared Synergetic Telescopes for Education and Research) とは、日本の大学と国立天文台が国内外に所有する中小の望遠鏡を結びつけることにより、観測時間などの制約が大きい大型望遠鏡では達成できない突発天体の即時観測・連続追観測などを主な目的として平成 23 年度に発足した事業である。2018 年現在 OISTER には 10 の大学・機関が正式に加盟している。その利点は、様々な観測装置を用いた多波長・多モードでの観測であり、北は北海道から南は石垣島まで、参加機関が各地に点在しているため、広島が悪天候時でも他の観測所では観測できるといったように地理的リスクの分散も大きな強みの一つである。

かなた望遠鏡だけでは取得が難しい、より多くの情報を取得することを目的として、OISTER による多波長・多モードでの追観測を実施している。

4.2.6 追観測後のデータ処理

偏光観測

古典的には光は空間を伝わる電磁波で、進行方向に対して電場と磁場が垂直に振動している。すなわち、横波である光にはその振動に方向性がある。振動の方向がある向きに偏った一群の光を偏光と呼ぶ。1.3.1 章で述べたブレーザーのように、ジェットの高い磁場によるシンクロトロン放射によって可視近赤外線領域で強い偏光が観測される天体もある。このような天体に対して偏光観測を行なうことで、磁場構造の解明に繋がる。偏光は一般的に、どのくらい偏光しているかを表す偏光 (Polarization Degree: PD) と、どの方向に偏光しているのかを表す偏光方位角 (Position Angle: PA) で記述する。 PA と PD は、ストークスパラメーターから換算することも容易である。ストークスパラメーターは以下の式で定義される 4 つの物理量である。

$$I = a_1^2 + a_2^2 \quad (4.3)$$

$$Q = a_1^2 - a_2^2 \quad (4.4)$$

$$U = 2a_1a_2\cos\delta \quad (4.5)$$

$$V = 2a_1a_2\sin\delta \quad (4.6)$$

ここで、 a_1, a_2 は x 軸と y 軸方向の電場の振幅、 δ はその位相差、 I は光の強度に関するパラメーター、 Q, U は直線偏光に関するパラメーターである。一方 V は円偏光に関するパラメーターであり、本論文では直線偏光のみを扱うため $V = 0$ として考える。ストークスパラメーターを用いると PA, PD は以下のように表される。

$$PA = \frac{\sqrt{(Q^2 + U^2)}}{I} \quad (4.7)$$

$$PD = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (4.8)$$

偏光観測は、半波長板とウォラストンプリズムという光学素子を用いて行なう。半波長板は偏光方向を変える役割を、ウォラストンプリズムは入射光を偏光方位角が互いに 90° 異なる常光 $I_o(\phi)$ と異常光 $I_e(\phi)$ の 2 成分に分ける役割を持つ。半波長板を $0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ$ と回転させ、計 4 回偏光撮像を行なうこ

とで偏光度を導出する。光が大気に吸収される量を $\xi(t)$ 、全光学系を通過した後の常光・異常光の補正係数を k_o 、 k_e とすると、

$$I_o(\phi) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \cos 4\phi + \frac{U}{I} \sin 4\phi \right\} k_o \xi(t) \quad (4.9)$$

$$I_e(\phi) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \cos 4\phi - \frac{U}{I} \sin 4\phi \right\} k_e \xi(t) \quad (4.10)$$

$\phi=0^\circ$ 、 45° 、 22.5° 、 67.5° の強度は式 4.9、4.10 にそれぞれ代入して、以下のようになる。

$$I_o(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{0^\circ}) \quad (4.11)$$

$$I_e(0^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{0^\circ}) \quad (4.12)$$

$$I_o(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{45^\circ}) \quad (4.13)$$

$$I_e(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{45^\circ}) \quad (4.14)$$

$$I_o(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{22.5^\circ}) \quad (4.15)$$

$$I_e(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{22.5^\circ}) \quad (4.16)$$

$$I_o(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{67.5^\circ}) \quad (4.17)$$

$$I_e(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{67.5^\circ}) \quad (4.18)$$

式 4.12 から式 4.11 を割ることで大気による透過率 ξ を消去できる。他も同様に計算していく。

$$\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} = \left(\frac{1 - Q/I}{1 + Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (4.19)$$

$$\frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} = \left(\frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (4.20)$$

$$\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} = \left(\frac{1 - U/I}{1 + U/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (4.21)$$

$$\frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{1 + U/I}{1 - U/I} \right) \frac{k_e}{k_o} \quad (4.22)$$

式 4.19 から式 4.20 を割り、 $\frac{k_e}{k_o}$ を消去して、 $\frac{Q}{I}$ について解くことができる。 $\frac{U}{I}$ も同様にして解くと、

$$I = \sum_{\phi} (I_o(\phi) + I_e(\phi)) \quad (4.23)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{1 - a_1}{1 + a_1} \quad \left(a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)/I_o(0^\circ)}{I_e(45^\circ)/I_o(45^\circ)}} \right) \quad (4.24)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{1 - a_2}{1 + a_2} \quad \left(a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)/I_o(22.5^\circ)}{I_e(67.5^\circ)/I_o(67.5^\circ)}} \right) \quad (4.25)$$

となる。以上の式から、4 回の偏光観測で光学系の補正係数や大気の透過率によらず、偏光度と偏光方位角を導出することができる。

4.3 IceCube-161210A 対応天体探索

IceCube-161210A ニュートリノイベントに対して、かなた望遠鏡 HONIR を用いて電磁波対応天体の探索を実施した。ここでは、その結果について述べる。

4.3.1 アラート概要

以下に IceCube-161210A イベントのアラート [27] の内容を示す。この位置情報を元に対応天体の探索を実施した。

- 時刻:2016/12/10 , 20:07:16(UT)
- 位置:RA=46.58deg(+1.10 -1.00deg 90% PSF containment) , DEC=14.98deg(+0.45 -0.40 deg 90% PSF containment)
- ニュートリノエネルギー: $\sim 10^{14}$ eV

4.3.2 変動天体探索結果

IceCube アラートの位置誤差領域内全ての領域をターゲットとして R,J バンドを用いて変動天体の探索を行った。今回採用した観測手法は、位置誤差領域の中心から観測していき、観測時間の許す限り観測領域を徐々に埋めていくタイル観測である。また今回の観測では、十分な S/N を稼ぐために一領域につき 5 枚 1 セットで観測し、領域によって積分時間を変更している。J バンド差分画像作成の際のテンプレート画像は 2MASS カタログを使用した。図 4.11 に観測領域を、図 4.12 に観測領域の拡大図、表 4.2 に各領域の J バンドの観測結果を示す。以下に観測条件と探索結果を示す。

- 観測時間:2016/12/11 09:30~17:30(UT) (雲が厚い時間帯は観測を中断しているため実際に観測した時間ではない。解析に使用したのは 2 時間分のデータ。)
- 天候:曇り, 観測領域のすぐ横に満月あり

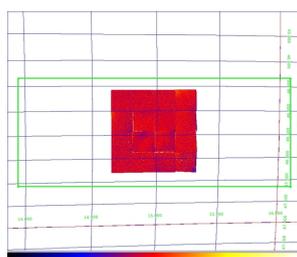


図 4.11: IceCube-161210A の観測結果。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域

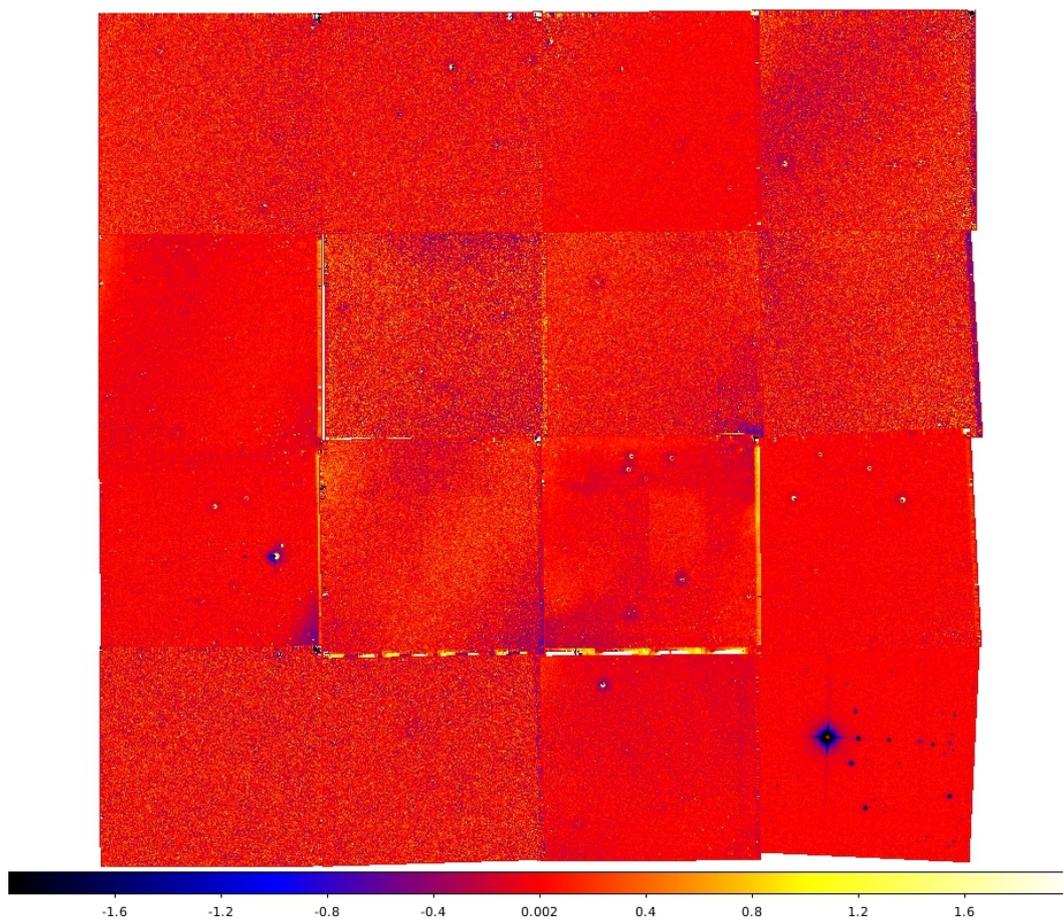


図 4.12: IceCube-161210A の Jバンドの差分画像

16	12	8	4
15	11	7	3
14	10	6	2
13	9	5	1

表 4.1: IceCube-161210A の 16 観測領域の ID

ID	1	2	3	4	5	6	7	8
積分時間 [sec]	300	300	300	300	300	900	1200	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	19.29	19.39	19.27	18.64	18.58	18.07	18.50	18.32
変動天体 (目視)	なし							
ID	9	10	11	12	13	14	15	16
積分時間 [sec]	300	900	1020	300	300	300	300	300
5sigma 限界等級 [AB mag]	18.97	19.02	18.54	19.21	19.20	18.82	18.77	19.12
変動天体 (目視)	なし							

表 4.2: IceCube-161210A の J バンドでの観測結果。限界等級は S/N=10 での値

観測の結果、 $40' \times 40'$ の領域内には J~18mag よりも明るい天体に対して変動天体がないことを確認した (移動天体や小惑星を除く)。翌日以降も探索を実施する予定だったが、2016/12/12,13 は悪天候のため観測ができなかった。また、東京工業大学 MITSuME(可視光望遠鏡。視野 $\sim 28' \times 28'$)、東京大学木曽観測所 KWFC(可視光観測装置。視野 $\sim 2\text{deg} \times 2\text{deg}$) でも観測を実施しており、可視光領域でも変動天体は発見されていない。以上より、2016/12/11 の観測をもって IceCube-161210A イベントの対応天体探索は終了となった。

4.3.3 変動天体探索の反省点

観測方法の見直し

今回の観測ではエラー内の全ての天体の変動の可能性のあるターゲットとしてタイル観測を実施したが、かなた望遠鏡の視野では十分な S/N を持った 16 領域 ($\sim 40' \times 40'$) の画像を取得する為に約 2 時間を要した。今回の IceCube アラートの位置誤差領域を面積で考えると約 6800 平方分角となり、今回の観測領域の約 4 倍以上となる。観測時間で考えると 8 時間以上が必要となる。8 時間というのは

- 夜が長い冬場
- 天候が安定して良く、連続的に観測できる
- かなた望遠鏡の観測可能高度である 10 度以上を保ち続ける

といった条件が揃ってようやく 1 晩で観測が可能な広さである。今回の IceCube アラートの位置決定精度は典型的なものであり、かなた望遠鏡の視野では IceCube アラートの位置誤差領域全面のタイル観測には向いていないことが分かる。以上より、次回の観測以降は観測手法をタイル観測から観測可能な程度に絞った数の天体へ向けて観測するポインティング観測に切り替えることとした。

差分テンプレート画像の見直し

IceCube-161210A での差分画像作成の際、テンプレート画像として 2MASS カタログを使用した。しかしながら、図 4.11 を見ると、観測領域 1 番の大きな黒い穴のような引き残りが多いことが分かる。テンプレート画像にカタログ画像を用いた際に引き残りが生じる理由として以下のようなことが挙げられる。

- 収差の違い (画像中心と端での PSF の違い)
- 検出器応答性の線形性の悪さ
- フィルターシステムの違い

差分画像を作成する際に用いる hotpants は、領域内の全天体の PSF を平均化してフィッティングして PSF を合わせようとするため、PSF が大きく崩れた天体が多いと精度よく引き算ができない。HONIR は光学系の収差の影響で画像端で大きく PSF が崩れているため、この崩れに引きずられて差分が精度よくできていない可能性が高い。また、比較的上手く差分ができた近赤外線領域と比べて可視光領域でカタログ画像との差分が上手くできない理由の 1 つとし、HONIR に搭載しているフィルターシステムとカタログ画像のフィルターシステムが違うことが挙げられる (HONIR では Johnson-Cousins system, カタログ画像は主に SDSS system)。今回テンプレート画像として使った Panstarrs カタログも SDSS system で、波長が若干異なっている。

今回の変動天体探索では東京大学や東京工業大学と協力して探索を実施し、3 大学ともに領域内に変動天体がないという結論に至ったが、引き残りが多くと変動天体の有無を自信を持って判断できない。そこで、次回以降は変動天体探索の翌観測日に取得した画像を差分のテンプレート画像に用いることとした。

4.4 ブレーザーポインティング観測

IceCube-161210A 変動天体探索の結果を活かし、観測手法をタイル観測からポインティング観測に切り替えることとした。この場合のポインティング観測とは、ある天体が IceCube イベントの対応天体だと仮定して、その天体を観測するというものである。我々が観測対象を選別する上で重要な点として以下の 3 点が挙げられる。

- 高エネルギーニュートリノの起源天体候補である
- 可視近赤外線での観測が可能 (有効) である
- IceCube 位置誤差領域内に確率的に数天体存在する (多過ぎても観測が難しい)

図 1.11 に示したように、高エネルギーニュートリノの起源天体候補はフレア中のブレーザーや GRB などであると考えられており、これらの天体は可視近赤外線領域での観測が可能、且つ有効である。しかしながら、GRB は発生確率が非常に低く、IceCube アラート時に位置誤差領域内で発生する可能性は極めて低い。事実、過去 5 年間の IceCube アラート時に同期した GRB は 1 つも存在しない。そのため我々は、IceCube 位置誤差領域内に存在するブレーザーを観測することとした。観測するブレーザーの選定は、電波ブレーザーカタログの BROS カタログ [28] を用いて行うことにした。尚、IceCube-161210A の位置誤差領域内には BROS カタログに載っているブレーザーは 0 個であった。

4.4.1 BROS カタログ

BROS カタログ (Blazar Radio and Optical Survey) とは、広島大学の田中康之氏を中心として作成された電波ブレーザーカタログで、電波カタログの TGSS カタログ [29], NVSS カタログ [30] から電波領域でフ

ラットなスペクトルを持つブレーザーを抽出し、可視の PanSTARRS カタログで可視領域での等級を引いたものである。カタログには 50000 天体以上が収録されている。

4.5 IceCube-170321A 対応天体探索

IceCube-170321A ニュートリノイベントに対して、かなた望遠鏡 HONIR を用いて電磁波対応天体の探索を実施した。ここでは、その結果について述べる。

4.5.1 アラート概要

以下に IceCube-170321A イベントのアラート [31] の内容を示す。

- 時刻:2017/03/21 , 07:32:20.69(UT)
- 位置:RA=98.30deg(± 1.2 deg 90% PSF containment) , DEC=-15.02deg(± 1.2 deg 90% PSF containment)
- ニュートリノエネルギー: $\sim 1.2 \times 10^{14}$ eV

4.5.2 変動天体探索結果

今回の探索では IceCube-161210A の経験を活かし、IceCube アラートの位置誤差領域内にある BROS カタログに載っているブレーザーの観測を行った。以下に観測条件と観測結果を示す。

- 観測時間:2017/03/22 10:30~11:10(UT)
- 天候:曇り

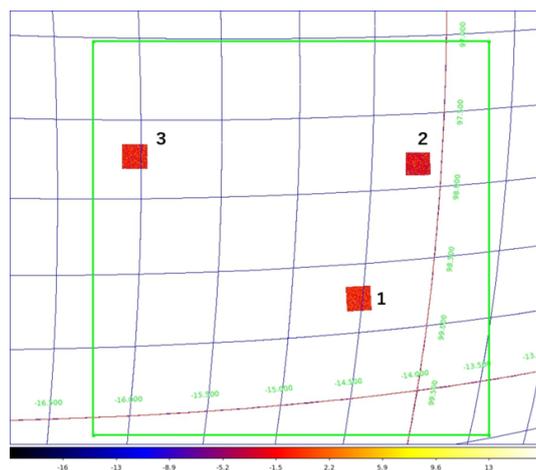
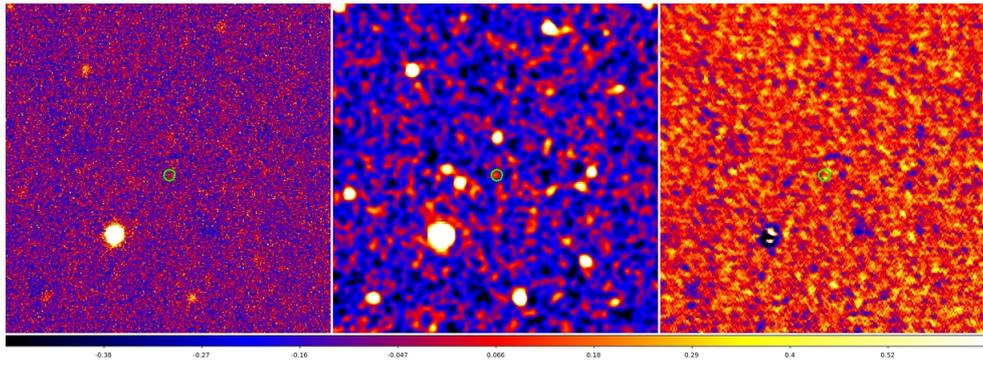
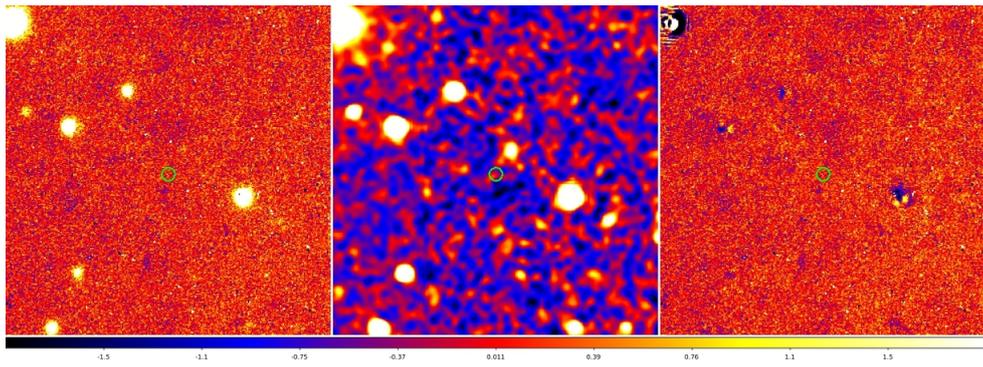


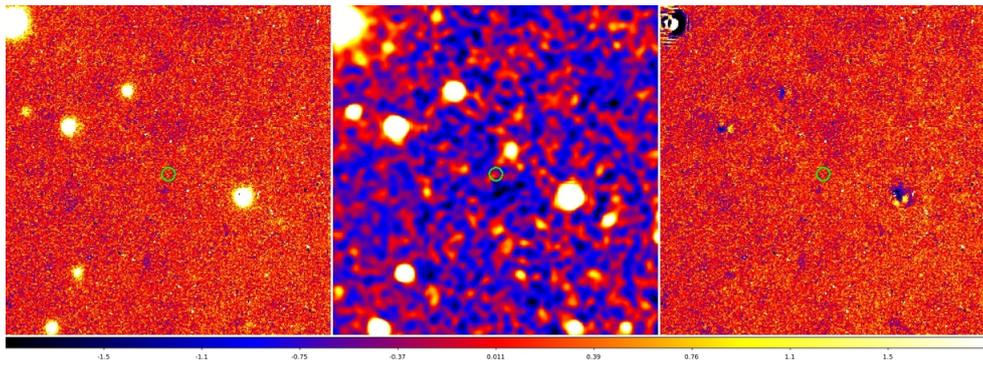
図 4.13: IceCube-170321A の観測領域。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域



ID:1-J063459 の拡大図



ID:2-J063120 の拡大図



ID:3-J063120 の拡大図

図 4.14: IceCube-0321A で観測した各ブレーザーの拡大図。それぞれ左:かなた 2017/3/22 中:2MASS 右:かなた-2MASS。画像中央付近の緑円が BROS カタログに記載されているターゲット天体の位置。~2'×2'。

ID-天体名		1-J063459	2-J063120	3-J063120
PanSTARRS,r バンド等級 [AB mag]		20.33	20.01	No data
2MASS,J バンド等級 [AB mag]		No data	No data	No data
RA[deg]		98.7463	97.8343	97.7285
DEC[deg]		-14.5301	-14.1757	-16.0434
HONIR	R バンド積分時間 [sec]	375	375	375
	R バンド限界等級 [AB mag]	19.27	19.17	19.15
	J バンド積分時間 [sec]	300	300	300
	J バンド限界等級 [AB mag]	18.14	17.95	17.91
	観測結果	未検出	未検出	未検出

表 4.3: IceCube-170321A の観測結果

結果、今回観測した3天体共に暗く、かなたでは検出することはできなかった。3天体ともカタログ等級は限界等級よりも暗く、対象天体が変動しなかったか、あるいは増光幅が小さく限られたと考えられる。差分プレート画像取得のために翌日も観測する予定だったが、天体が検出できなかったため、2017/03/22の観測をもってIceCube-170321A イベントの対応天体探索を終了した。

4.6 IceCube-170922A 対応天体探索

IceCube-170922A ニュートリノイベントに対して、かなた望遠鏡 HONIR を用いて電磁波対応天体の探索を実施した。ここでは、その結果について述べる。

4.6.1 アラート概要

以下にIceCube-170922A イベントのアラート [32] の内容を示す。

- 時刻:2017/09/22 , 20:54:30.43(UT)
- 位置:RA=77.43deg(-0.80 deg/+1.30 deg 90% PSF containment) , DEC=5.72deg(-0.40 deg/+0.70 deg 90% PSF containment)
- ニュートリノエネルギー:~ 1.2×10^{14} eV

4.6.2 変動天体探索結果

IceCube-170321A イベントの際と同様に、アラートの位置誤差領域内にあるBROSカタログに載っているブレーザーの観測を行った。以下に観測条件と観測結果を示す。

- 観測時間:2017/09/23 16:10~20:20(UT)

- 天候:晴れ

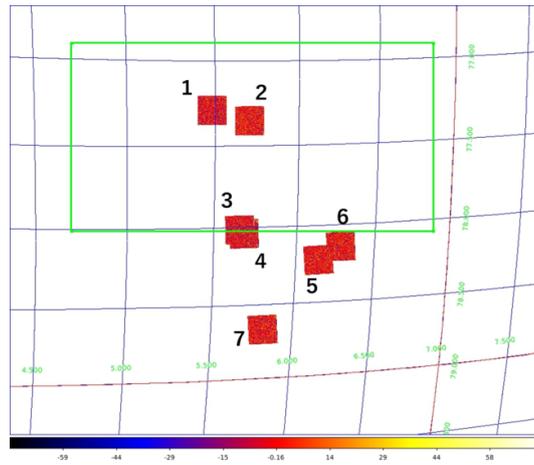
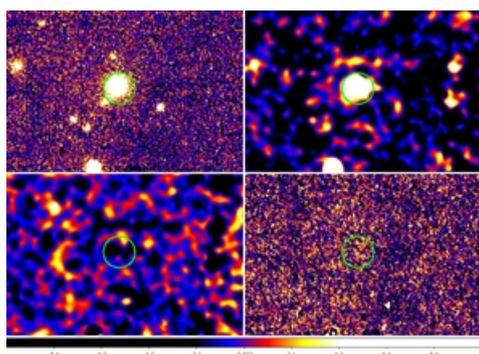
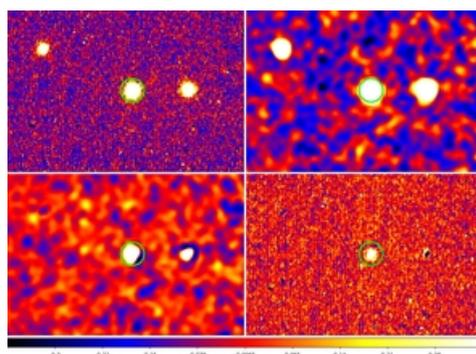


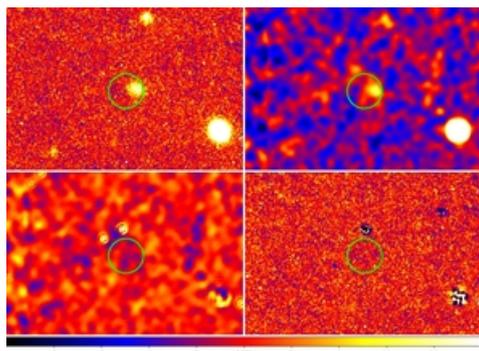
図 4.15: IceCube-170922A の観測領域。緑枠が IceCube アラートの位置誤差領域



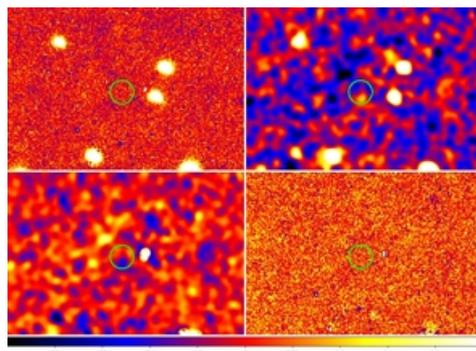
ID:1-J050912 の拡大図



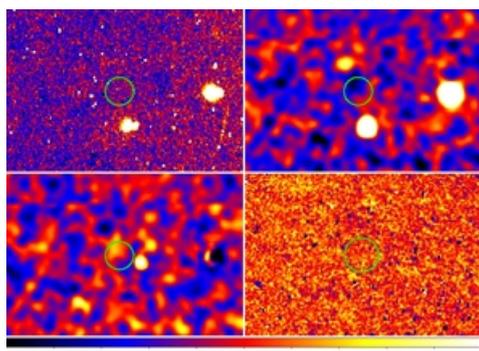
ID:2-J050926 の拡大図



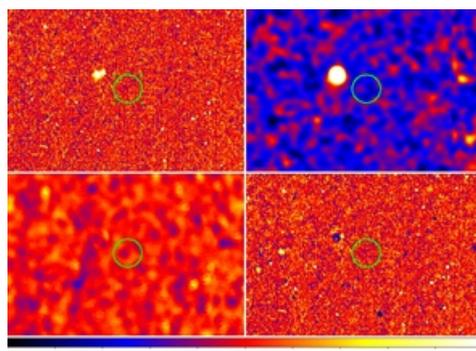
ID:3-J051205 の拡大図



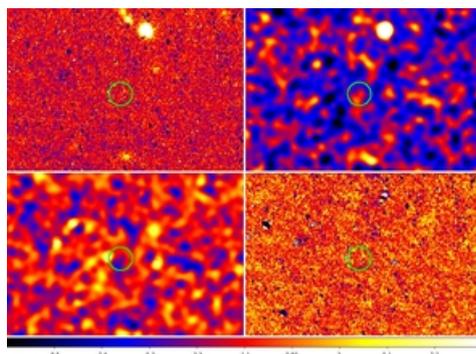
ID:4-J051211 の拡大図



ID:5-J051256 の拡大図



ID:6-J051236 の拡大図



ID:7-J051440 の拡大図

図 4.16: IceCube-0922A で観測した各ブレーザーの拡大図。それぞれ左上: かなた 2017/9/23 右上:2MASS 左下:かなた-2MASS 右下:かなた 9/24-9/23。画像中央付近の緑円が BROS カタログに記載されているターゲット天体の位置。 $\sim 1' \times 1'$ 。

ID-天体名		1-J050912	2-TXS0506+056(J050926)	3-J051205	
PanSTARRS,r バンド等級 [AB mag]		18.56	15.06	16.06	
2MASS,J バンド等級 [AB mag]		16.342	13.623	15.92	
RA[deg]		77.3009	77.3585	78.02355	
DEC[deg]		5.4896	5.6931	5.6443	
HONIR	R バンド積分時間 [sec]	650	120	150	
	R バンド限界等級 [AB mag]	20.80	20.16	19.60	
	J バンド積分時間 [sec]	500	100	100	
	J バンド限界等級 [AB mag]	16.97	17.73	17.25	
	観測結果	変動なし	変動あり	変動なし	
ID-天体名		4-J051211	5-J051256	6-J051236	7-J051440
PanSTARRS,r バンド等級 [AB mag]		21.76	18.56	No data	No data
2MASS,J バンド等級 [AB mag]		No data	No data	No data	No data
RA[deg]		78.0483	78.2360	78.1526	78.6673
DEC[deg]		5.6711	6.1396	6.2627	5.8234
HONIR	R バンド積分時間 [sec]	1610	1610	650	1380
	R バンド限界等級 [AB mag]	19.82	20.81	19.84	18.72
	J バンド積分時間 [sec]	1400	1400	500	1000
	J バンド限界等級 [AB mag]	18.51	18.40	18.40	17.67
	観測結果	未検出	未検出	未検出	未検出

表 4.4: IceCube-170321A の観測結果

結果、7 天体の内 3 天体を検出し、その内 TXS0506+056 において変動性を検出した。我々はこの天体
が対応天体である可能性があると思われ、TXS0506+056 に対してかなたでの追観測、及び OISTER での
追観測を開始した。

TXS0506+056 について

変動を検出した TXS0506+056 についての基本情報を以下に示す。

- BL Lac 天体 (ブレーザーの一種)
- 赤法偏移の情報がない¹(BL Lac であるため輝線が見えない)
- 可視光モニター望遠鏡 ASAS-SN[33] のデータを確認すると IceCube アラート前から比較的明るい時
期が続いていた (図 4.17)
- 過去に偏光観測が行われておらず偏光の情報がない

¹2018/2/7 に astroph に投稿された論文 "The redshift of the BL Lac object TXS 0506+056" にて、 $z=0.3365\pm 0.001$ との報告が挙げられている。これは、スペインにある 10.4m カナリア大望遠鏡を用いた分光観測の結果である。尚、本論文では赤方偏移を用いた議論を行わないため影響はない。

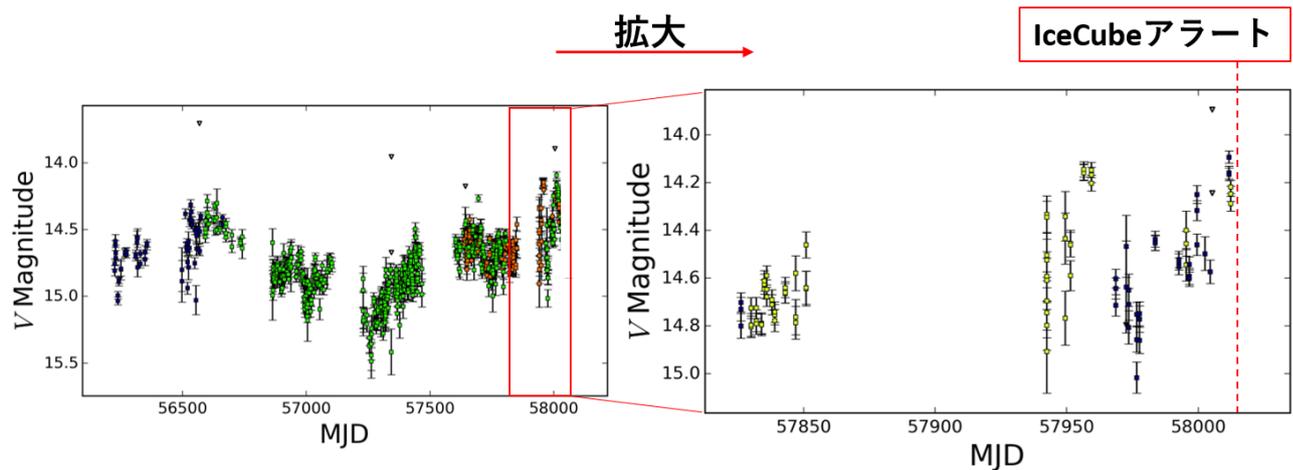


図 4.17: ASAS-SN による TXS0506+056 モニター結果。左:MJD=55971~58017(2012/2/14~2017/9/21)
右:MJD=57826~58017(2017/3/14~2017/9/21)

また、ガンマ線衛星である Fermi 衛星のデータを確認したところ、GeV 領域のエネルギー帯にてフレアを示していることを確認した。可視近赤外線領域以外の他波長観測についての詳細はここでは言及しないが、IceCube アラートの位置誤差領域内で Fermi 衛星が同時に GeV 領域でフレアしているブレイザーを観測する確率は極めて低く、IceCube が検出した高エネルギーニュートリノと Fermi 衛星が観測した TXS0506+056 のフレアは何らかの関連があることが IceCube 及び Fermi チームの計算により指摘されている。IceCube 高エネルギーニュートリノ対応天体の候補が実際に同定されるのは初の出来事である。こうして、我々の発見を機に TXS0506+056 の世界的な多波長モニターが始まった。

4.6.3 OISTER による TXS0506+056 の追観測

OISTER の各機関に TXS0506+056 の追観測を依頼した。今回観測した機関一覧を表 4.5 に載せる。OISTER の各機関により約一ヶ月半の間、連続的かつ多波長・多モードでの追観測が行われた。私はそれらのデータ解析を行った。OISTER のデータを扱う論文がまだ未発表であることから、本論文での OISTER の結果についての言及は控えることとする。

観測モード	機関名/望遠鏡	フィルター	観測日数	備考
撮像	東京工業大学/MITSuME	g',R,I	g':6 , R,I:8	-
	名古屋大学/IRSF	J,H,Ks	5	-
	京都大学/屋上	V	5	-
	広島大学/かなた	R,J	11	-
	国立天文台石垣観測所/MITSuME	g',r,i	-	悪天候のため観測未実施
分光	兵庫県立大学/なゆた	-	1	-
	広島大学/かなた	-	1	-
偏光	北海道大学/ピリカ	R	-	悪天候, データ提供無し
	広島大学/かなた	R,J	R:6 , J:4	-

表 4.5: TXS0506+056 の追観測を依頼した機関一覧

4.6.4 かなた望遠鏡による TXS0506+056 の追観測結果

撮像観測

比較星

撮像のデータを解析するにあたり、まず最初に相対測光を行なうための比較星を探した。比較星に求める条件としては以下の点が挙げられる。

1. 変動が小さい(ターゲット天体の変動よりも小さい)
2. ターゲット天体と同一画像内の、なるべく画像中心付近(端に行くほど収差の影響があるため)
3. ターゲット天体と同等かそれ以上の明るさ

比較星として使える天体を探すために、上記 2,3 を満たすような天体を実際に測光して、変動の有無を調査した。方法としては、図 4.18 に示した C1~C4,a~l の ID を振った天体に対して、図 4.19 のように比較星候補-比較星候補で plot する。変動が小さい天体同士ならばライトカーブは平坦なものとなるので、最も変動の小さい天体を比較星として用いた。表 4.6 に比較星候補天体の等級を載せる。

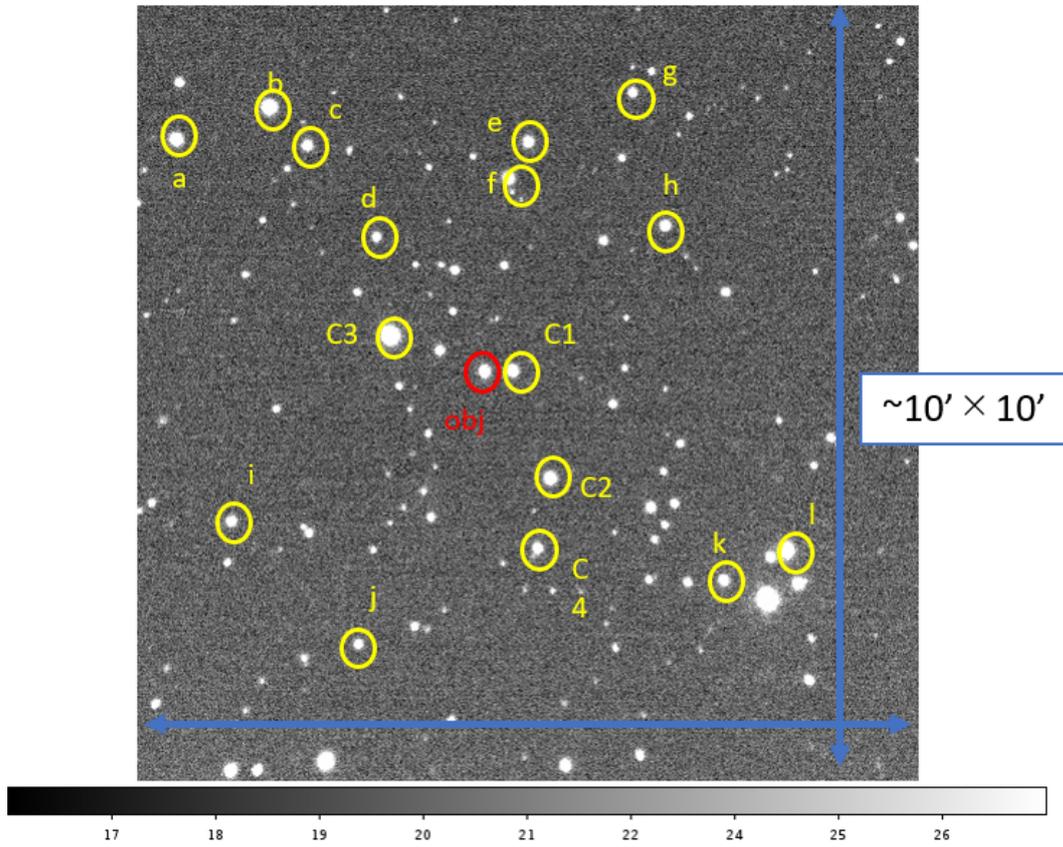
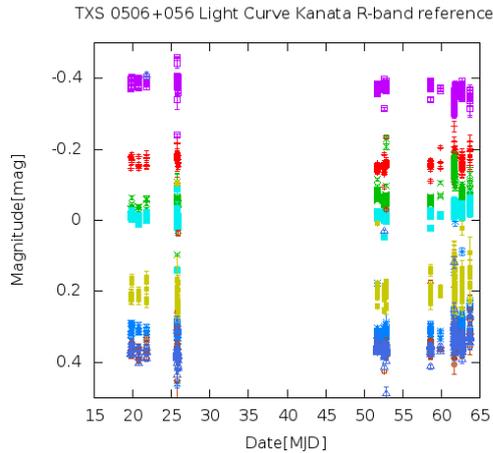


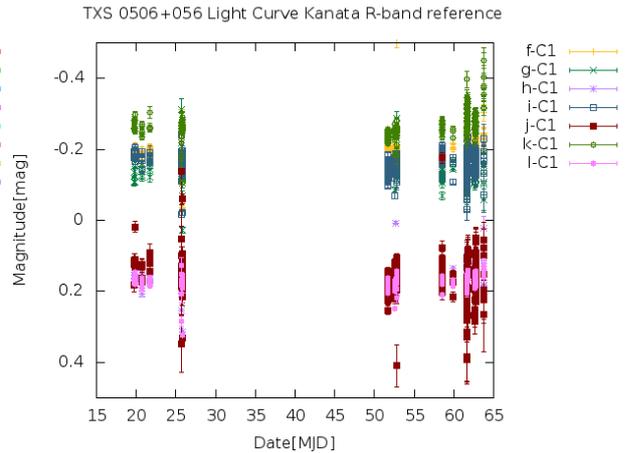
図 4.18: reference 候補天体の ID

ID	C1	C2	C3	C4	a	b	c	d
AAVOS,R バンド等級 [AB mag]	14.277	14.133	12.278	14.971	13.949	13.291	14.961	15.603
2MASS,J バンド等級 [AB mag]	14.347	14.065	12.384	15.173	13.990	12.849	14.999	15.686
ID	e	f	g	h	i	j	k	l
AAVOS,R バンド等級 [AB mag]	14.674	14.090	15.399	14.921	15.209	15.957	15.005	12.952
2MASS,J バンド等級 [AB mag]	14.424	13.477	15.303	14.127	15.202	15.891	15.065	12.686

表 4.6: 比較星候補天体のカタログ等級



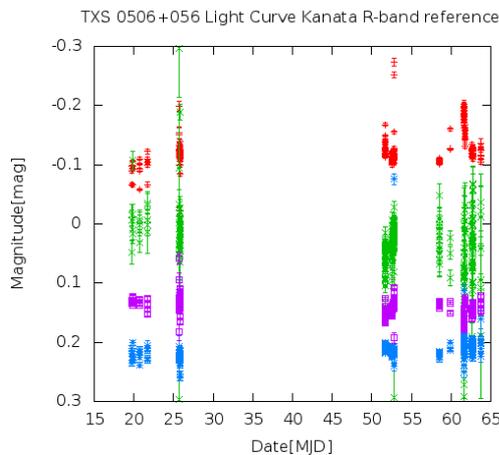
左:RバンドのC2~C4,a~eの相対測光結果



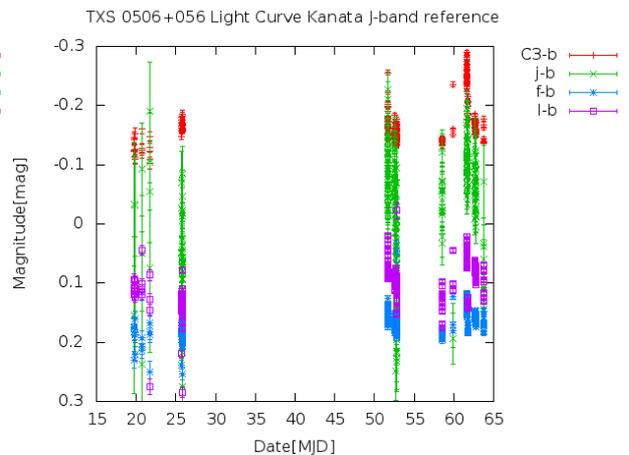
右:Rバンドのf~lの相対測光結果

図 4.19: Rバンドの比較星候補天体同士のplot結果の一例。C1を比較星として用いている。等級が1つの図に収まるよう、適当な定数を足している。

上記の調査を行った結果、ID:b,f,lの3天体が今回観測を実施した期間において変動が小さく、比較星に適していることが判明した。図 4.20 は b,f,l が安定していることを示す一例として、変動が大きいC3-b,j-bと、小さいf-b,l-bを同一図内に収まるように適当な定数を足してplotしたものである。これを見ると、C3-b,j-bに対してf-b,l-bが安定、つまりb,f,lが安定していることが判る。



左:Rバンド



右:Jバンド

図 4.20: C3-b,j-b,f-b,l-bのplot。f-bとl-bが安定、つまりb,f,lが安定していることが判る。

雲の影響のある画像の選別

図 4.20 は雲の影響を取り除いていない全観測データをplotしたものであり、b,f,lにおいて、雲の影響が疑われる測光の外れ値が点在している。そのため次に、雲の影響があるデータの選別を行った。今回の観測

では同じピクセルに同じ天体が写るように望遠鏡の指向方向を調整しながら観測を実施している。つまり、画像内に写る天体は基本的に一定であるため、測光原点を導出する際に検出される天体数(図 4.9 参照。)もほぼ一定になるはずである。雲が通過した場合は検出される天体数が減少するので、検出される天体数に一定の基準を設けて、それ以下の天体数の場合は雲の影響があると判断してそのデータを除外した。今回は、R バンド 100 天体、J バンド 50 天体を基準とした。図 4.21 に同一観測日・積分時間で取得した R バンドの画像に対して実施した、雲の影響の選別例を載せる。これを見ると、検出数 108 天体の画像に対して、69 で暗い天体が写っておらず、25 では比較的明るい天体も暗いイメージになっているのが判る。

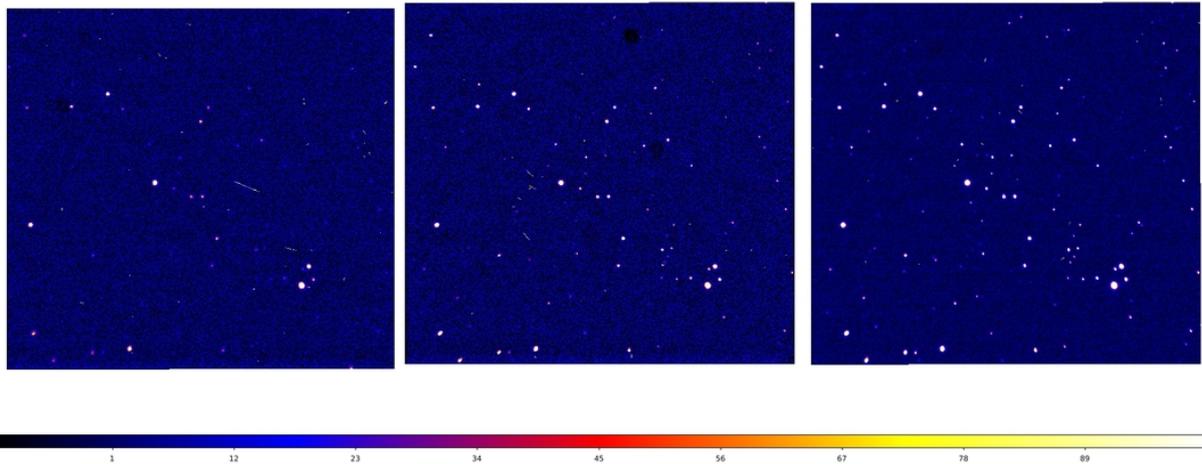


図 4.21: SExtractor が検出した天体数を用いて雲の影響を評価した R バンドの画像。検出天体数は 左:25 中:69 右:108

雲の影響を取り除いたデータの測光例として、図 4.22 に、図 4.20 のデータから雲の影響を取り除いたデータを plot したものを載せる。これを見ると、b,f,l の外れ値が取り除かれている事が判る。

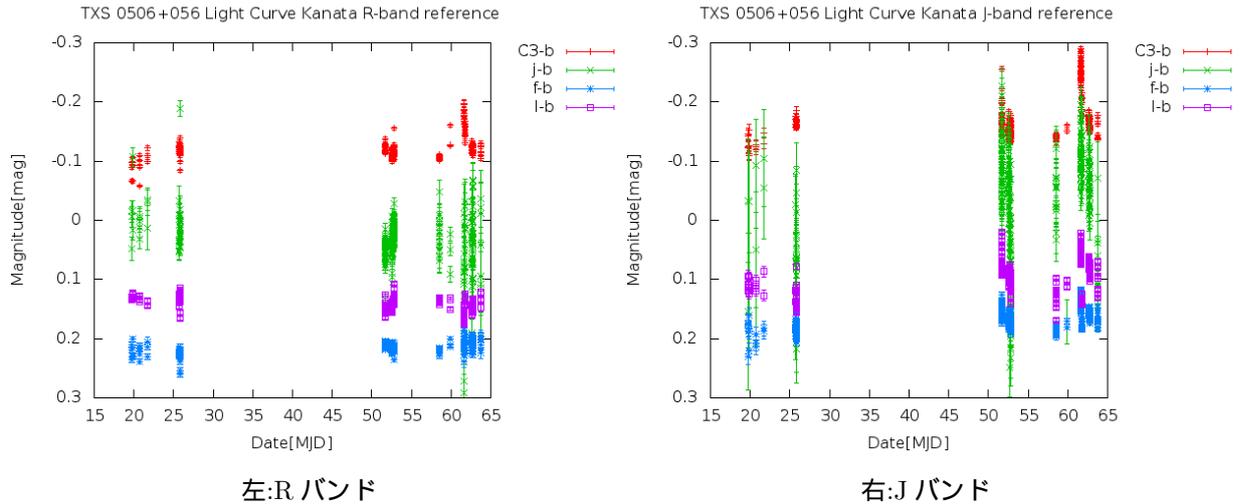


図 4.22: 雲の影響のある画像を除外したデータ。図 4.20 に比べて外れ値が減少しているのが判る。

測光原点との比較

先述のように、今回は画像内の多数の標準星を用いた測光原点の導出も行なっているため、比較星 b,f,l との相対測光と測光原点を用いた相対測光のどちらが精度よくライトカーブを描けるかを比較した。誤差の比較をする際、これまでのように全観測点を plot した図だと比較がしづらく、また、今回我々が確認したいのは、TXS0506+056 の中・長期的なスケールでの変動であるため、一日の観測点の平均等級と不偏分散を、それぞれ等級と誤差として plot を行った。以下に導出時の計算工程を示す。

まず、TXS0506+056(obj) に対して、obj-b , obj-f , obj-l の各観測日の平均等級を導出する。X=b,f,l として、 m_{obj_X} は以下のように導出できる。

$$m_{obj_X} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{obj_inst.i} - m_{X_inst.i}}{n} + X_{catalog} \quad (4.26)$$

(n:各観測日のデータ数, m_{obj_inst} : m_{X_inst} :obj-X の器械等級, $X_{catalog}$:X のカタログ等級)

その誤差 σ_{obj_X} は不偏分散を用いて以下の式で導出できる。

$$\sigma_{obj_X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((m_{obj_inst.i} - m_{X_inst.i} + X_{catalog}) - m_{obj_X})^2} \quad (4.27)$$

図 4.23 に、以上の関係式を用いて導出した $m_{obj_X} \pm \sigma_{obj_X}$ を plot したものを載せる。

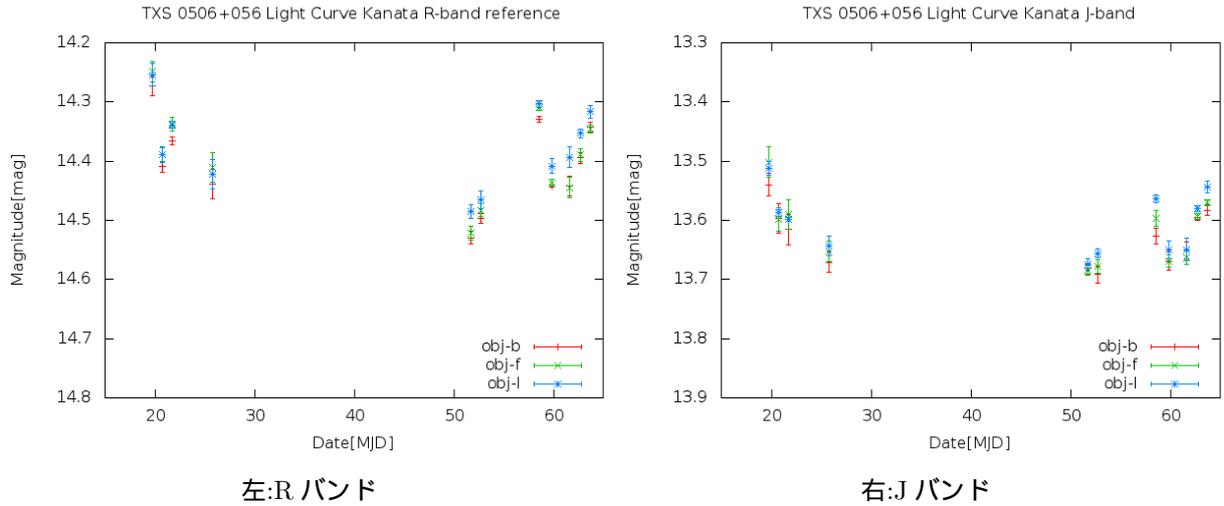


図 4.23: 比較星 b,f,l で $m_{obj-X} \pm \sigma_{obj-X}$ を plot したライトカーブ

次に、b,f,l の平均等級との相対測光を行なう。obj-b,f,l の平均等級を $m_{obj_average}$ とすると、

$$m_{obj_average} = \sum_{X=b,f,l} \frac{m_{obj-X} + X_{catalog}}{3} \quad (4.28)$$

で導出でき、誤差 $\sigma_{obj_average}$ は

$$\sigma_{obj_average} = \sqrt{\sum_{X=b,f,l} \left\{ (\sigma_{obj-X})^2 + \left(\frac{m_{obj-X} - m_{obj_average}}{3-1} \right)^2 \right\}} \quad (4.29)$$

で導出できる。この時、誤差の $\left(\frac{m_{obj-X} - m_{obj_average}}{3-1} \right)^2$ の項は obj-b, obj-f, obj-l の誤差 (不偏分散) をカタログ等級の誤差と見積り、伝搬させたものである。図 4.24 に、 $m_{obj_average} \pm \sigma_{obj_average}$ を plot したものを載せる。

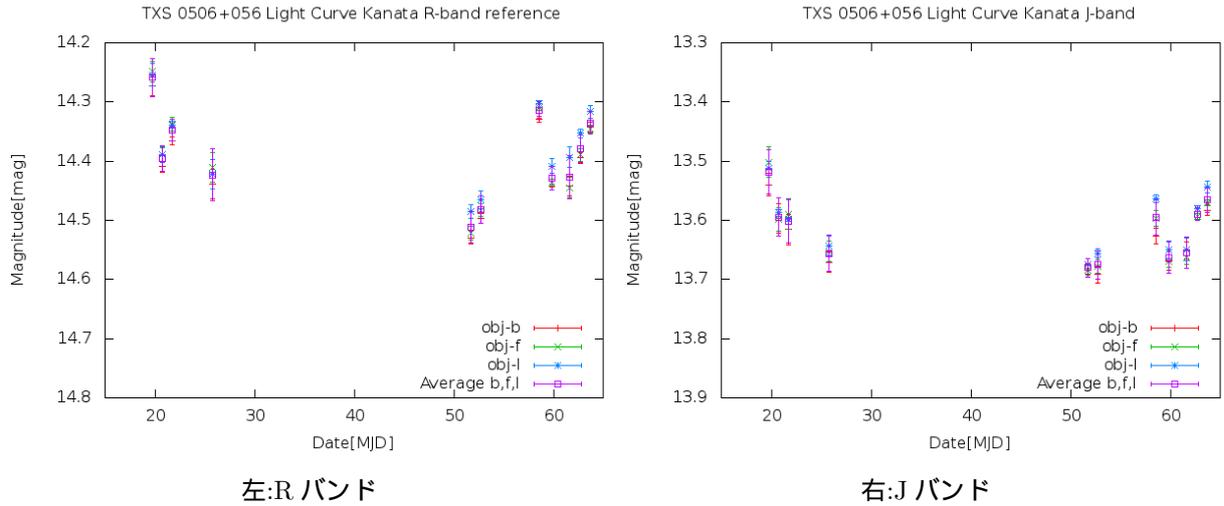


図 4.24: 比較星 b,f,l で $m_{obj_average} \pm \sigma_{obj_average}$ plot したライトカーブ

多数の天体を用いて導出した測光原点に対しても同様に平均等級を導出し、図 4.24 の誤差と比較を行った。図 4.25 に結果を載せる。

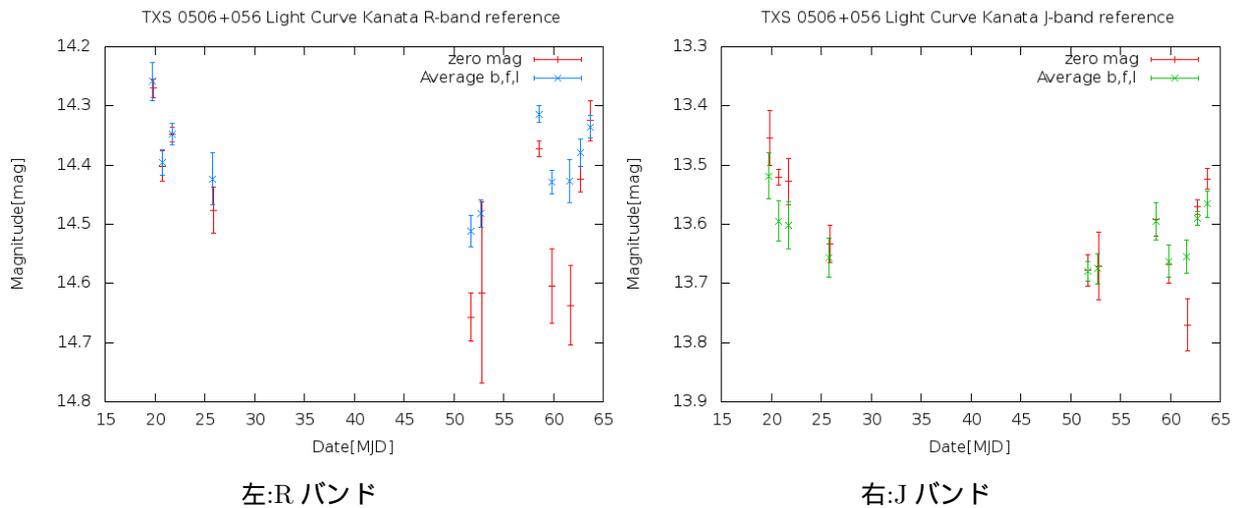


図 4.25: 比較星 b,f,l の平均等級との相対測光と、画像内の多数の天体から導出した測光原点を用いた相対測光との比較

結果から、多数の天体を用いて導出した測光原点では $\pm 0.1mag$ を超える誤差の日もあるのに対して、b,f,l との相対測光ではコンスタントに $< 0.1mag$ の誤差となっており、b,f,l との相対測光の方が誤差が小さくなることが判った。この理由として、今回の観測領域は銀河面に近く変光星が多いため、多数の天体を用いて測光原点を導出してしまおうと変光星の変動も含む平均値を取ることになってしまい、誤差が大きくなるのだと考えられる。その為、今回は比較星 b,f,l との相対測光で TXS0506+056 の等級を導出する。

大気減光

次に、大気減光の影響がないかを確認した。1.1 章でも述べたように、天体からの光は可視光・近赤外線領域では大気を透過してくるものの、天体高度が低ければ大気も厚くなっていくため、波長(色)依存をもつ大気減光が生じる場合がある。今回は簡易的な方法として、観測時の天体高度 vs 等級を plot し、高度によって等級が変動していないかを目視で確認した。plot に用いるデータは雲を除いた TXS0506+056 の b,f,l との相対測光の全データである。図 4.26 に結果を載せる。図 4.26 から、高度依存性をもたないことが判る。よって、大気減光の影響はないと判断した。

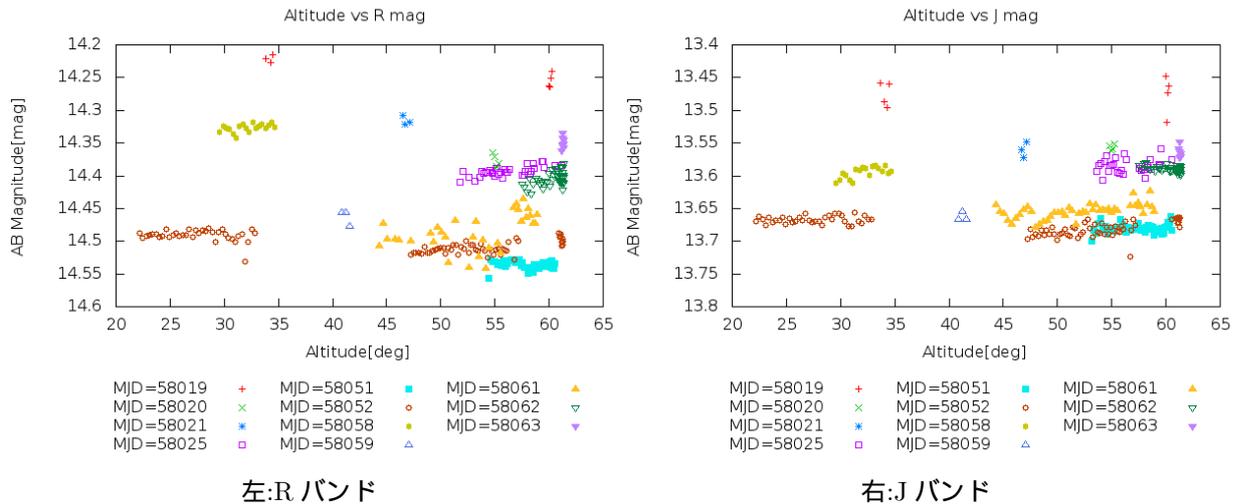


図 4.26: 天体高度 vs 等級。大気減光がないかを確認。

ライトカーブ

以上の解析を踏まえて導出した TXS0506+056 のライトカーブを図 4.27 に載せる。図中中段の R-J の色の变化は上に行くほど青くなり、下段の色等級図は上に行くほど R バンドで明るく、右に行くほど青くなることを表す。

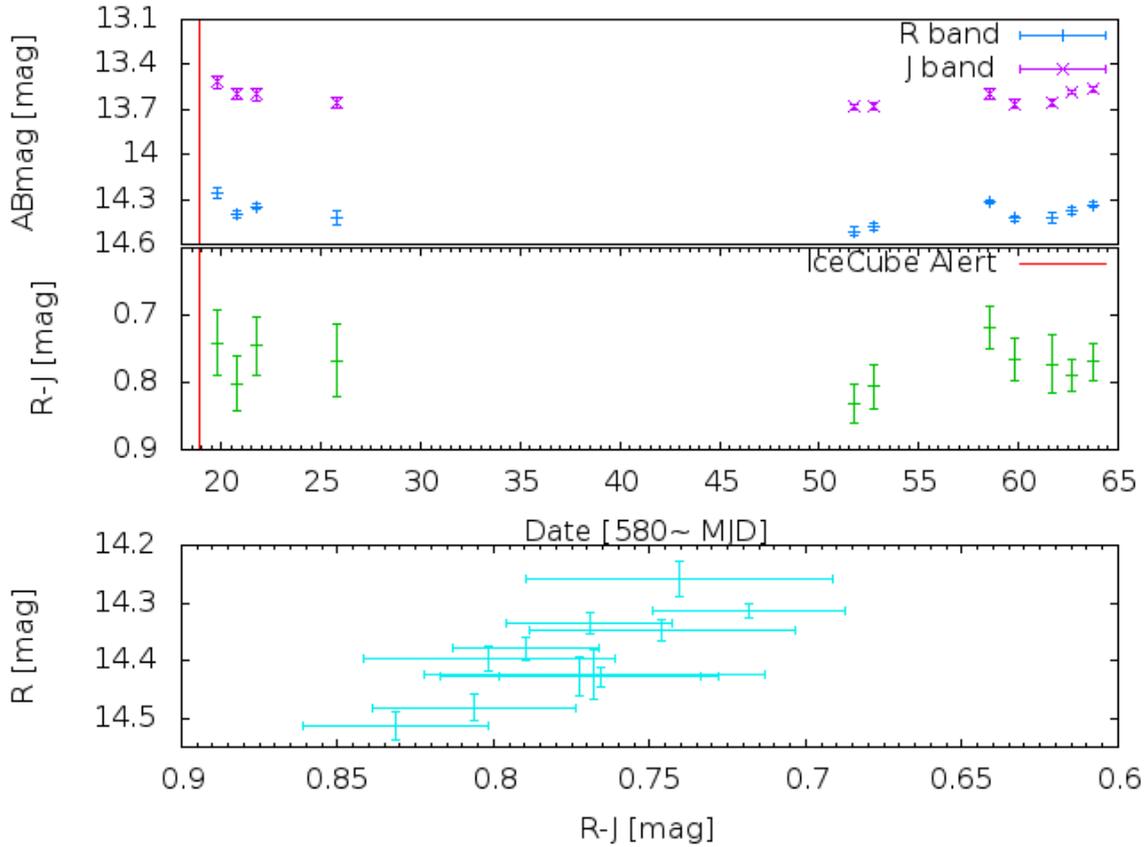


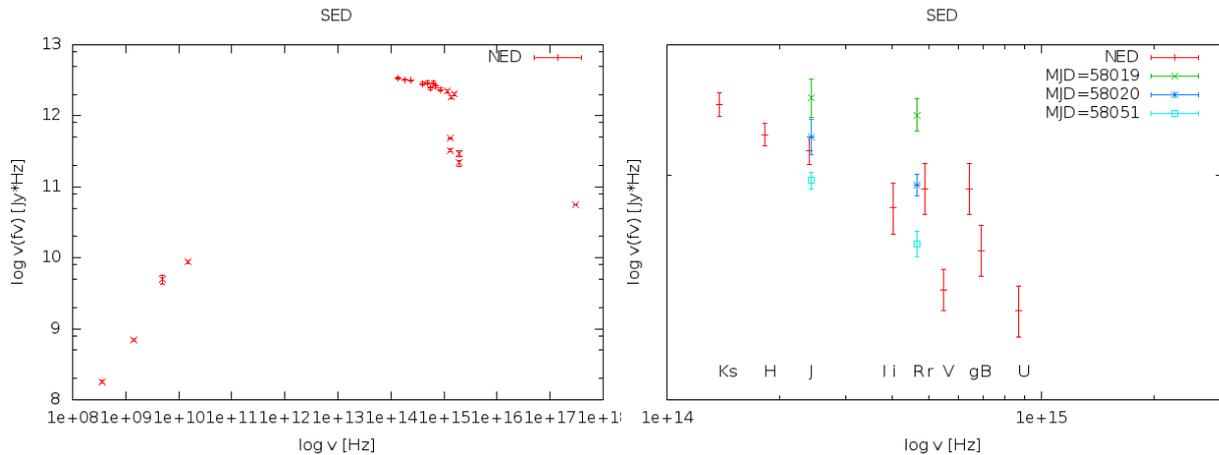
図 4.27: TXS0506+056 のライトカーブ。上:ライトカーブ 中:R-J の色の变化 下:色等級図。

結果から、IceCube アラート後の MJD=58019(2017/9/23) に比べて MJD=58020 では誤差を超えて有意に減光している事が判る。これは図 4.16 の差分画像解析の結果と一致している。しかし中期的な変動を見ると、IceCube アラート前の 1ヶ月間で 0.5 等もの増光が見られるような活発な時期にも関わらず (図 4.17)、アラート後の 1ヶ月半の間、そのような大きな変動は見られない。これは、活発な時期であるものの安定期にあると捉えることができる。色等級図に対して、光度と色の相関係数を計算し、各々に対して t 検定を用いて相関の有無を調べたところ、bluer-when-brighter の傾向が見られた。

また、今回取得した R,J バンドの等級のデータを用いて、SED(Spectral Energy Distributions) を描くと、図 4.28 のようになる。等級の単位を mag から Jy に変換する際、以下の関係式を用いた。

$$1Jy = 3631 \times 10^{-0.4 \times ABmag} \quad (4.30)$$

SED には 3 つの観測日のデータを用いており、MJD=58019:IceCube アラート直後のデータ、MJD=58020:IceCube アラート直後に対して減光を確認した日のデータ、MJD=58051:観測期間中で最も暗かった日のデータ を用いている。



左:カタログ (NED) データを用いた SED

右:可視近赤外線領域の拡大図

図 4.28: TXS0506+056 の SED

SEDを見ると、MJD=58019において、NEDや他の観測日に比べて高エネルギーになっており、若干ではあるがフラットな形になっていることが判る。これは、ライトカーブで bluer-when-brighter の傾向が見られることと一致しており、シンクロトロン放射成分によるものだと考えられる。しかしながら、かなたでは J バンドよりも長波長側のデータを取得できていないため、どのような幕になっているのかは判らない。

以上の結果から、TXS0506+056 について以下の事が言える。

- IceCube アラート後の MJD=58019(2017/9/23) に比べて MJD=58020 で誤差を超えて有意に減光している
- ここ 5 年間では活発な時期にあるにも拘わらず (図 4.17)、中長期的なスケールでは 0.5mag を超えるような大きな変動は確認できない (IceCube アラート前の 1ヶ月で 0.5mag の増光が確認できる)→ 明るいフェーズが継続しているとも捉えることができる
- 明るくなると青くなる、いわゆる bluer-when-brighter の傾向が見られる。
- MJD=58019 の SED を見ると、他の観測日に比べて若干ではあるがフラットな形のスペクトルになっている。

偏光観測

カタログによれば、TXS0506+056 は BL Lac に分類されている。1.3.1 章で述べたように、BL Lac は近赤外線領域にシンクロトロン放射のピークが来ることから、偏光観測を行うことで放射領域の磁場構造の理解に繋がる。その為、TXS0506+056 に対して偏光観測を実施した。図 4.29 に結果を載せる。

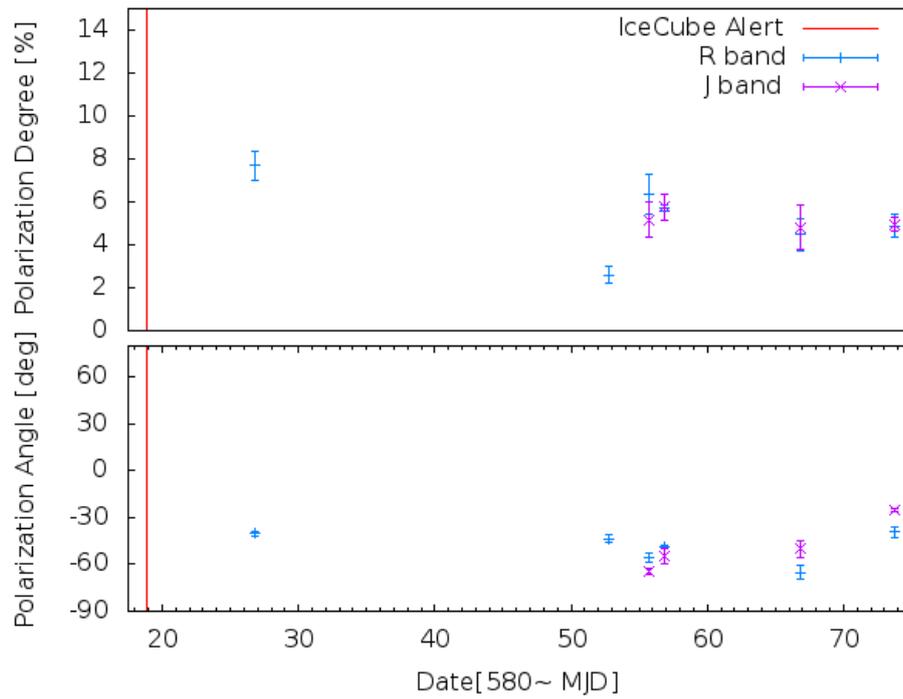


図 4.29: TXS0506+056 の偏光度と偏光方位角

今回の観測によって、初めて TXS0506+056 の偏光度の情報を得ることに成功した。偏光度は MJD=58052 で 3% まで落ち込むものの、R, J バンド共に ~6% 程度でほぼ一定、偏光方位角も -45° 付近で一定であるなど、偏光の変動幅が小さいことが見て取れる。1.3.1 章でも述べたように、BL Lac は偏光度の変動幅が小さいことが知られているため、今回の観測結果は BL Lac として分類されることを裏付ける結果である。

分光観測

TXS0506+056 までの距離 (赤方偏移 z) を決定するために HOWPol にて分光観測を実施した。図 4.30 に結果を載せる。

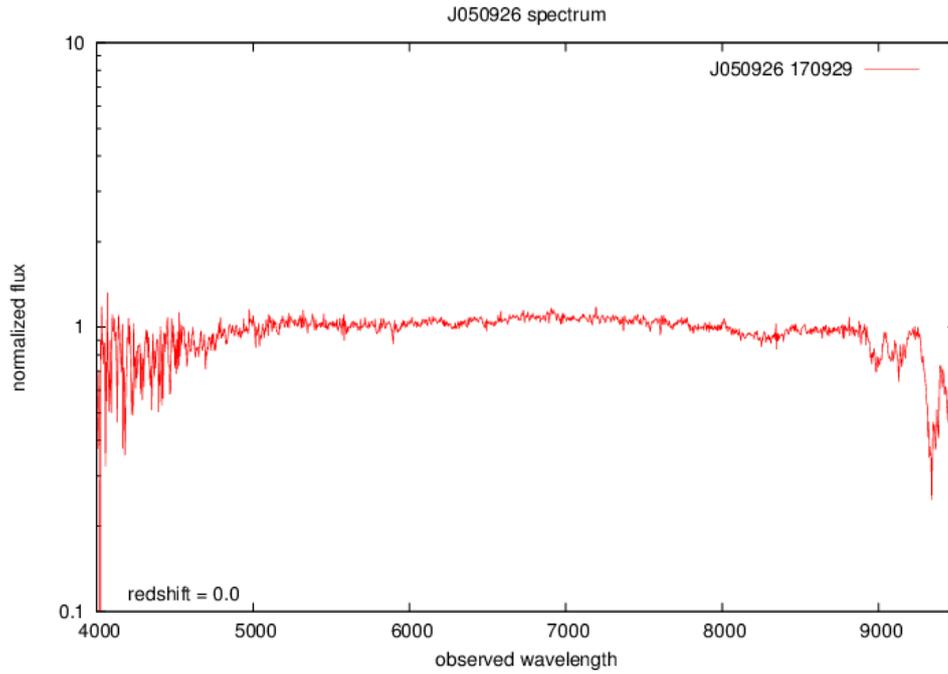


図 4.30: HOWPol で取得した TXS0506+056 のスペクトル

結果から、他の典型的な BL Lac 天体と同様、featureless な連続光を示しており、有意な輝線は検出されなかった。その為、 z を決定することができなかった。

第5章 まとめと今後

5.1 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の性能評価

天文分野での使用を見据えた国産での大面積近赤外線検出器の完成を目指し、浜松ホトニクス社製 1.3k×1.3k InGaAs 検出器の性能評価を実施した。今回の試験で、冷却下において検出器が正常に駆動することが確認できた。冷却下において、リニアリティが十分に保たれており、欠陥素子数も全ピクセルの 0.5%程度と赤外線検出器としては極めて良好な値が得られた。また、波長 1310nm での量子効率も 80%程度という結果が得られた。これら諸性能は、海外製大面積近赤外線検出器と比べても遜色ない値である。一方で、冷却下におけるノイズは $\sim 40e^-$ 程と、改善の余地があることが判明した。また、素子の外縁部に暗電流値がやや不安定な画素群 (枠状模様) があるなどの課題も判明し、メーカーへフィードバックした。現在も改善に向けてメーカー側で原因を調査中である。以上の結果から、残る課題は枠状模様のみとなり、国産大面積近赤外線検出器の実用化の目処が立ったといえよう。またこれにより、広島大学 HONIR の 3 色同時観測化の目処がたったとも言える。表 5.1 に性能評価の結果をまとめる。

	サイエンスグレード (140K)	エンジニアリンググレード (140K)
読み出しノイズ [e^-]	44	35
暗電流 [e^-/s]	0.074~0.17	0.46~1.75
リニアリティ [e^-]	~ 140000	~ 140000
バッドピクセルの割合 [%]	0.548	33.426
有効感度波長 [μm]	≤ 1.5	≤ 1.5
1310nm での量子効率 [%]	80.27 ± 7.13	-

表 5.1: 1.3k×1.3k InGaAs 検出器性能評価まとめ

5.2 IceCube 高エネルギーニュートリノニュートリノ電磁波対応天体の探索

高エネルギーニュートリノ、更にはその親粒子である $10^{20}eV$ にも達する最高エネルギー宇宙線の起源天体の同定を目指し、IceCube 高エネルギーニュートリノイベントの電磁波対応天体探索を実施した。以下にその結果をまとめる。

- IceCube-161210 では IceCube 位置誤差領域内のタイル観測を実施。しかし、対応天体は発見できず。この探索以降、差分画像作成時のプレート画像をカタログ画像から別観測日に HONIR で取得した画像に、観測方法をタイル観測からブレイザーポインティング観測に切り替えることとした。

- IceCube-170321A では、BROS カタログを用いたブレーザーポインティング観測を実施した。カタログでは、位置誤差領域内に3つのブレーザーが存在していたが、かなた望遠鏡では検出できず。これは、今回観測したブレーザーが暗かった為である。

5.2.1 IceCube-170922A

IceCube-170922A イベントにて、IceCube の位置誤差領域内に変動しているブレーザー TXS0506+056 を発見した。我々の発見により TXS0506+056 の世界的な多波長モニター観測が開始され、IceCube-170922A イベントと TXS0506+056 の増光に何らかの関係があることが判明した。IceCube が検出するような高エネルギーニュートリノ、つまり最高エネルギー宇宙線の起源天体候補が実際に観測されたのは初の出来事である。また、TXS0506+056 に対してかなた望遠鏡で行った追観測の結果、以下のことが判った。

- IceCube アラート後の MJD=58019(2017/9/23) に比べて MJD=58020 で誤差を超えて有意に減光している。
- IceCube アラート前の1ヶ月で0.5等を超えるような大きな増光を示している活発な時期にも関わらず(図4.17)、今回の1ヶ月半の追観測期間内ではほぼ平坦なライトカーブを示しており、0.5等を超えるような大きな変動は確認できない。これは、明るいフェーズが継続しているとも捉えることができる。
- TXS0506+056 では、明るくなると青くなる、いわゆる bluer-when-brighter の傾向が見られる。
- 偏光観測の結果、偏光度 ~6%、偏光方位角 ~ 45° となり、観測期間内でほぼ一定だった。また、TXS0506+056 に対する偏光観測は今まで行われておらず、初の偏光の情報である。
- 分光観測の結果、featureless な連続光を示しており、有意な輝線は検出されず、 z の決定はできなかった。これは TXS0506+056 が BL Lac として分類されることを裏付ける結果である。

5.2.2 今後の課題

今回実施した一連の対応天体探索を経て、今後の課題が大きく3つ浮かび上がった。

1. 対応天体の無バイアス探索に向けて、差分画像の精度向上
2. 対応天体の即時発見に向けて、変動天体判定の自動化
3. 対応天体探索の自動化

対応天体の無バイアス探索・即時発見に向けて

今回の IceCube-170922A イベントの対応天体探索では、ブレーザーにターゲットを絞ったポインティング観測により、世界に先駆けて TXS0506+056 の変動を発見するという大きな成果を挙げることができた。しかしながら、この方法ではブレーザー以外が対応天体だった場合、対応天体の探索に出遅れ、その後の追観測でも出遅れる可能性が高い。つまり、本来はターゲットを絞らず、無バイアスに探索をすることが重要である。しかしながら、現状では以下の理由でかなた望遠鏡での変動天体の無バイアス探索は難しい。

1. IceCube の位置決定精度に対してかなたの視野が狭く、広視野無バイアス探索には向かない (4.3.3 章参照)
2. カタログ画像との差分が上手くできないため、無バイアスで取得した画像内の変動天体を判別することが困難 (4.3.3 章参照)

上記 1 については望遠鏡の視野で決まっている。しかし、2 については今後改善することで、かなた望遠鏡の視野で観測できる限りの最大面積を、無バイアス探索できるようになる。よって、今後は差分画像の精度向上が課題となる。

また、今回の解析結果から、かなた望遠鏡の視野と限界等級ならば (観測領域にもよるが) 可視 1 領域につき 100 天体以上が検出される (4.2.3, 4.6.4 章参照)。差分画像の精度が向上して無バイアス探索が可能となった場合、観測領域も広くなり検出天体数も増加するため、その中から目視で変動天体を探すのは困難である。その為、差分画像の精度向上と共に、変動天体判定の自動化も課題として挙げられる。

対応天体探索の自動化

現在のレーザーポインティング観測は、IceCube 位置誤差領域内にあるレーザーを BROS カタログから選定して観測を行なっているが、観測天体リストの作成や観測は手動で行われている。今後無バイアス探索が可能になったとしても、観測する領域の選定や実際の観測は手動のままである。今回実施した 3 度の対応天体探索は、全て日本時間で昼間だったため観測までの時間的猶予があったが、今後は夜にアラートが来る可能性も十分にある。その際、手動でのリスト作成・観測だと、全自動観測に比べるとタイムラグが生じ、IceCube アラート直後という好条件を活かし切ることができない。その為、対応天体探索の自動化も課題の 1 つとして挙げられるだろう。幸いにも本研究室では、他の突発天体探索用に整備された自動観測リスト作成・観測・解析のパイプラインが存在する。このパイプラインを IceCube 高エネルギーニュートリノ対応天体探索用に整備すれば、自動観測が可能となる。

5.3 全体のまとめ

今回の IceCube 高エネルギーニュートリノ電磁波対応天体の探索を通して以下のことが言える。

- 突発天体の探索を行なう上で、広視野観測は極めて有効である。
→ 広視野観測の為には大面積の検出器が必要。
- 変動天体探索の段階で HONIR による 3 色同時観測が実現していれば、IceCube アラート後の早い段階での SED を描き、そこから放射メカニズムの決定に繋がる可能性があった。
→ 安価で入手が容易な近赤外線検出器が望ましい。
- 高赤法偏移天体に対して近赤外線領域での観測は有効である上、今後もレーザーのように近赤外線領域での観測が有効な天体が IceCube 対応天体であった場合、赤外線領域での観測が重要である。その為には近赤外線観測装置の普及が求められる。
→ 安価で入手が容易な近赤外線検出器が望ましい。

以上より、突発天体探索において更なる成果を挙げるためには、大面積で、安価且つ入手が容易な近赤外線検出器の存在が鍵となる。1.5.1 章で述べたように、現在の面積近赤外線検出器はほぼ全て海外メーカー製で極めて高価な上に、軍需品扱いであるため輸出入の規制が厳しく入手が非常に困難である。これに対して、天文観測で使用出来る性能を有する国産面積近赤外線検出器があれば、海外製に比べて安価、且つ国内メーカー製であるため入手が容易である。今回性能評価を行った国産 $1.3\text{k}\times 1.3\text{k}$ InGaAs 近赤外線検出器が完成すれば、突発天体の広視野多バンド探索が可能になり、突発天体探索において大きな武器となるだろう。今回の IceCube 高エネルギーニュートリノ電磁波対応天体の探索から、国産面積近赤外線検出器の重要性が再確認された。

謝辞

まず最初に、本研究に携わってくださった皆様にお礼申し上げます。

指導教官の川端先生には、卒業研究から合わせて3年間お世話になりました。色々な研究をしてみたいという私の我が儘を許してくださり、本当にありがとうございます。装置開発から天体観測や解析まで様々な研究を行うことができ、それらで得た知識や、各分野に携わっている方々と接して広がった視野など、人生の大きな経験となりました。コーラをこよなく愛していたり、雑談にも付き合ってもらったり、コーラをこよなく愛していたり、いつメールを送っても返信が来て睡眠という概念を持っているのか分からなかったり、コーラをこよなく愛している、そんな川端先生が担当教官で本当に良かったです。今までありがとうございました。(結果的に中途半端に終わってしまった研究もあり、大変申し訳ないです。。)

田中 Y さん、内海さん、IceCube フォローアップの研究に誘ってくださりありがとうございます。ヤンキーなお二人に囲まれ、自分の口調が少しづつ悪くなっていったのを感じています。優秀なお二人についていだけで精一杯だった僕は、内海さんから与えられた課題を片付けるのに必死で、課題が終わっていない時に大部屋のドアが開くと「内海さんか!？」と思い、ビクツとしていました。水野さんがコーヒーを淹れに来ているだけでした。それでも、お二人のお陰で非常に大きな研究プロジェクトの一員になれて、充実した日々を送ることができ、非常に楽しかったです。ありがとうございました。IceCube フォローアップの初期メンバーは全員広大を離れますが、山中さんや4年の山崎さんが何とかしてくれると思います。

大野さん、週末のたびにテニスに付き合ってくれてありがとうございました。学生の僕が体力切れで休む中、全く休憩を取らないばかりかテニスの後にランニングやスイミングをする無尽蔵のスタミナ、そして夜の飲み会で自滅していくスタイル。畏怖の念を禁じ得ません。大野さんはスタッフというよりも学生に近く、学生だけの飲み会に誘ったら学生ではなく大野さんが潰れる(自滅)など、非常に楽しかったです。研究では全く接点がなかったですが、3年間で一番長く一緒にいたスタッフは、間違いなく大野さんです。今後も機会があれば是非飲みましょう。それと、テニス相手が研究室に増えることを祈っています。ありがとうございました。

山中さんには、僕が手が回らなかったデータの解析をやっていただいたり、解析のやり方を教えてもらいました。最初にお会いしたのはいつだかの研究会(2016OISTER?)でしたが、その時の山中さんは僕に対して、「他の大学の学生と会えば、“あの山中さんですか!?”みたいになるのに、広大生で俺を知らないとは何事だ!」みたいなことを言っていて、「あ、関わったらいけない人だ。」って思っていました。今では非常に親しみやすいその性格で、最初のイメージとは180度反対になってます。

研究室のボスである深沢先生にもお世話になりました。夏の学校の時にM2総出で潰しにかかるなど、今までのご無礼をお詫び申し上げます。中岡さん、川端 M さん、いつも観測をしてくださりありがとうございました。と、というか、あまり観測に入らずすみませんでした。(装置開発系だから許してください。。)結局テイルズ裏面クリアできなくて残念です。新たな観測人員と髪の毛が増えることを祈っています。東工大に異動された伊藤さん、本当に何でもできる人で、勝手に尊敬しています。研究面ではInGaAs検出器関連でお世話になりました。国立天文台の中屋さんにはInGaAs検出器でお世話になりました。装置開発の面で大きな経験を積ませていただき、結果的に修士論文のテーマにもなりました。宇井さん、すみません。宇井システムを完成させることが出来ませんでした。去年修了された志岐さん、4月から職場近いんで遊びましょう。それと何か奢ってください。

研究室の同期にも恵まれていたと思います。ひたすらに飲み会を開催しては騒いでと、本当に楽しい3年間でした。どや、6年間の腐れ縁だったな。お前のノートがあったからこそ単位とれたわ。職場も近いかもしれんし、これからもよろしく。河原、テニス楽しかったわ。東京オリンピックの錦織の試合観に行こうぜ。ロリコン。ジーコ、洗濯物が溜まり過ぎて着るものがないから研究室に来ないというエピソードが非常に印象的でした。あべ、今までの人生で出会った人の中で、最も個性的だったと思います。我々は君の個性を存分に引き出すことはできたのでしょうか？宮岡、釣り竿使ってやってくれ。廣地、仕事頑張ってください。ボーイング、またどこかで会おう。それと後輩の長嶋、部活も一緒に結構長い付き合いになりました。喋るコミュ障卒業できればいいな。松場、研究の引継ぎよろしく。

関連図書

- [1] <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/iwamuro/LECTURE/OBS/atmos.html>
- [2] ESA/NASA, the AVO project and Paolo Padovani(<http://sci.esa.int/integral/49029-the-unified-model-of-agn/>)
- [3] MEGAN URRY, M. and PAOLO, PADOVANI 'Unied Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei' Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v.107, p.803,1995PASP..107..803U
- [4] 高木勝俊 2013 年春季天文学会”GRB 初期残光の偏光観測”(広島大学)
- [5] <https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>
- [6] Utsumi ,Y. et al.2017 “J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817” Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 69, Issue 6, 1 December 2017, 101
- [7] Simon Swordy “Physicists are beginning to unravel the mysteries of ultrahigh-energy cosmic rays, particles accelerated by the most powerful forces in the universe” Augre project proposal
- [8] <http://icecube.wisc.edu/>
- [9] IceCube Collaboration 2013 “Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector” Science 22 Nov 2013 p947
- [10] IceCube Collaboration 2015 “Observation of Astrophysical Neutrinos in Four Years of IceCube Data” arXiv 21 Oct 2015
- [11] Pablo M.Bauleo et al.2009 “The dawn of the particle astronomy era in ultra-high-energy cosmic rays” Nature 458, 847–851 (16 April 2009)
- [12] Tanaka ,Y. et al.2016”IceCube 高エネルギーニュートリノ事象の可視近赤外線フォローアップ観測” タイムドメイン天文学研究会 京都大学 20 Feb 2017
- [13] 伊藤亮介 2010 年度修士論文” 近赤外線検出器用評価システムの立ち上げと InGaAs 検出器の性能試験”(広島大学)
- [14] <http://jp.silabs.com/products/mcu/Pages/USBtoUARTBridgeVCPDrivers.aspx>
- [15] https://www.phytron.eu/fileadmin/user_upload/produkte/endstufen_controller/pdf/ma-minilog-comm-gb.pdf

- [16] 浜松ホトニクス社 低ノイズ大面積 InGaAs 検出器カタログ (2016)
- [17] Persson, S. E., Murphy, D. C., Krzeminski, W., Roth, M., & Rieke, M. J. 1998, AJ, 116, 2475
- [18] 大橋佑馬 2012 年度卒業論文” かなた望遠鏡用可視赤外線同時カメラ HONIR の検出器・光学系に関する性能評価”(広島大学)
- [19] <https://www.astromatic.net/software/sextractor>
- [20] https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/koyomi/koyomi_012.html
- [21] <https://www.mankier.com/1/solve-field>
- [22] <https://www.astromatic.net/software/swarp>
- [23] Becker, A. “http://www.astro.washington.edu/users/becker/v2.0/c_ software.html”
- [24] <https://github.com/acbecker/hotpants>
- [25] <http://www.wakayama-u.ac.jp/atomita/ccd/magnitude/>
- [26] <http://oister.oao.nao.ac.jp/>
- [27] GCN CIRCULAR NUMBER 20247 “<https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/20247.gcn3>”
- [28] Tanaka ,Y. et al. in prep
- [29] <http://tgssadr.strw.leidenuniv.nl/doku.php>
- [30] <http://www.cv.nrao.edu/nvss/>
- [31] GCN CIRCULAR NUMBER 20929 “<https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/20929.gcn3>”
- [32] GCN CIRCULAR NUMBER 21916 “<https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/21916.gcn3>”
- [33] <http://www.astronomy.ohio-state.edu/asassn/index.shtml>
- [34] 中屋秀彦 2017 年秋季天文学会 “国産の天文観測用大面積 InGaAs 近赤外線イメージセンサーの試作”(国立天文台)
- [35] 長嶋大樹 2016 年度卒業論文” HinOTORI 望遠鏡の性能評価と重力波の可視赤外線追観測システムの試験”(広島大学)
- [36] 志岐健成 2016 年度修士論文” 多波長観測で探るガンマ線を放射する電波銀河のジェット放射機構の研究研究”(広島大学)
- [37] 高木勝俊 2013 年度修士論文” 極超新星に類似した Ib 型超新星 SN 2012au の観測的研究”
- [38] 笹田真人 2008 年度修士論文” かなた望遠鏡を用いた可視近赤外偏光観測におけるブレーザー天体の変動機構の研究”(広島大学)

- [39] 池尻祐輝 2009 年度修士論文” かなた望遠鏡を用いた可視近赤外偏光観測によるブレーザー天体の光度、色、偏光の相関の研究”(広島大学)
- [40] 長木舞子 2016 年度卒業論文” 可視近赤外線同時カメラ HONIR における一露出型偏光観測モードの性能評価”(広島大学)
- [41] Kirk, J. G., Rieger, F. M., & Mastichiadis, A. 1998, A&A, 333, 452
- [42] <http://www.astr.tohoku.ac.jp/mikito/IRAF/extreme.html>