

シミュレーションデータを用いた
将来ガンマ線バースト衛星での高赤方偏移候補検出

広島大学理学部物理学科
高エネルギー宇宙・可視赤外天文学研究室

B166482

山口 光

主査 川端 弘治 副査 飯沼 昌隆

日付:2020/2/7

概要

ガンマ線バースト (GRB) は、数秒から数十秒の短時間に 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線放射として開放する天体であり、初期宇宙の探査手段として期待されている。GRB が示す可視光残光は指数的に暗くなるため、超遠方の GRB の分光観測を実現するには、高赤方偏移であることをオンボードで検知し、地上の大望遠鏡にアラートを出すことが求められる。それを実現する衛星計画が HiZ-GUNDAM(HZG) である。私は、HiZ-GUNDAM に搭載される 4 チャンネルの可視赤外線望遠鏡で、高赤方偏移の GRB を実際に検出できるかどうかを、シミュレーション画像を用いて検証した。データリダクションは衛星上の非力な CPU でも動かせるよう Gnuastro ユーティリティを用いて行うこととし、まずその測光処理が期待通りに行われることを確認した。そして、周囲に星が混んでいる領域でなければ、HZG の仕様通りの天体検出・限界等級が得られることを確認した (図 1)。さらに、背景星をカタログ通りに人工的に再現した画像へ高赤方偏移 GRB と、強い星間赤化を受けた GRB のモデルを埋め込んで検出を試みたところ、限界等級より 1 等級ほど明るい天体でも検出できない、あるいは測光誤差が大きくなる例が見つかった。今後、検出・測光アルゴリズムの改善を図りたい。

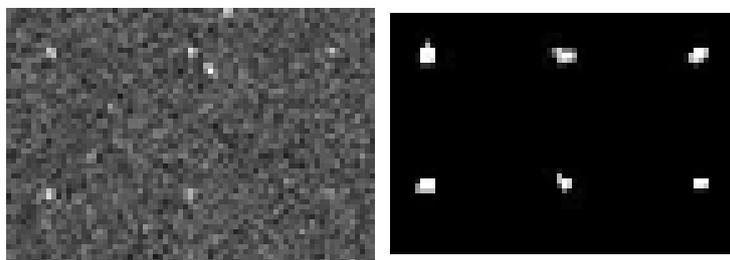


図 1: 宇宙線を含む約 20.5 等の星群のシミュレーション画像 (左) に、天体検知を掛け、天体光成分を含むと同定されたピクセル群 (右)

目次

第1章	序論	3
1.1	HiZ-GUNDAM(HZG)の概要と目的	3
1.2	HZG ミッションの科学的背景	4
1.2.1	初期宇宙とガンマ線バースト	4
1.2.2	ライマン α 吸収とダスト吸収	6
1.3	機器の仕様	7
1.3.1	近赤外線観測で要求される性能	7
1.3.2	搭載される近赤外線望遠鏡	11
1.4	本研究の目的	11
第2章	検出方法	12
2.1	GRB 検出から高赤方偏移候補の判定と地上への通知までの流れ	12
2.2	可視光・近赤外線観測の実際	13
2.2.1	一次処理	13
2.2.2	開口測光	13
2.3	機上搭載予定解析ソフト Gnuastro	14
2.3.1	Gnuastro の概要	14
2.3.2	IRAF と Gnuastro	14
2.3.3	Gnuastro の基本コマンド	15
第3章	検出シミュレーション	17
3.1	IRAF との比較	17
3.1.1	一次処理比較	18
3.1.2	開口測光比較	20
3.1.3	考察	23
3.2	あかり衛星の生データに準拠したシミュレーション画像での測光	23
3.2.1	シミュレーション画像について	23
3.2.2	天体の検出	25
3.2.3	測光結果	29
3.2.4	考察	30

3.3	Ultra-VISTA[14] のカタログから作成された画像での測光	31
3.3.1	シミュレーション画像について	31
3.3.2	天体検出と測光結果	32
3.3.3	考察	36
第 4 章	まとめと課題	52
A	節 3.2.2 および節 3.2.3 で使用したコマンドと引数	55
A.1	天体の検出	55
A.2	測光	56
B	節 3.3.2 で使用したコマンドと引数	56
B.1	天体の検出 (Ch.4 で PSF 半値幅 1.5pix のとき)	56
B.2	測光	57
B.3	開口測光	57

第1章 序論

1.1 HiZ-GUNDAM(HZG)の概要と目的

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts: GRBs) は宇宙最大級の爆発現象で、その多くが赤方偏移 $z > 2$ で発生しており、短時間だが通常の銀河の1000倍以上の光度で極めて明るく輝くことから、初期宇宙を探る手段として利用されつつある。

そこで $z > 7$ の初期宇宙観測を GRB を用いて進めるために、小型科学衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission) が計画されている (図 1.1)[1]。本ミッションの目的は、GRB を用いて宇宙暗黒時代の終焉と天体形成の幕開けを観測することで、初期宇宙における星・ブラックホールの形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史的な変遷を捉え、初期宇宙形成史の解明に寄与することである。

このミッションでは、初期宇宙で最も明るい光源である GRB を観測し、GRB の発生頻度から星形成率を測定する。特に、これまでに十分な観測が行われていない $z > 7$ における GRB を発見し、発生時刻や発生方向などの情報を地上に通報するまでを本プロジェクトの役割としている。それにより、地上や宇宙の大型望遠鏡によるスペクトル観測を促し、宇宙再電離時期の測定や、宇宙最初の重元素の精密観測の実現が期待される。よってこのミッションにより、国立天文台の TMT(Thirty Meter Telescope) プロジェクトが掲げている「GRB を用いた初期宇宙探査」という大きな目標を強く推し進めることができ、宇宙で最初の星が誕生した時期や、宇宙の進化に関する謎に対して、明るい GRB を光源として観測的にアプローチできるようになる。また、直接的な放射を観測することが困難な初代星に対して、初代星が爆発した際に発生する GRB 現象を利用すると、初代星が形成される環境も探査できると期待されている。

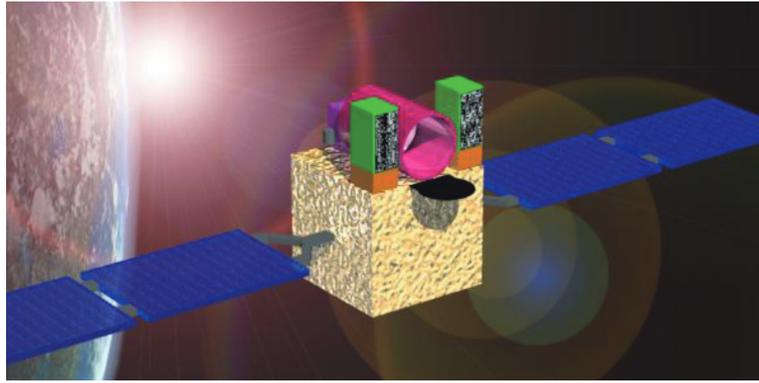


図 1.1: HZG 構想図 [2]

1.2 HZG ミッションの科学的背景

1.2.1 初期宇宙とガンマ線バースト

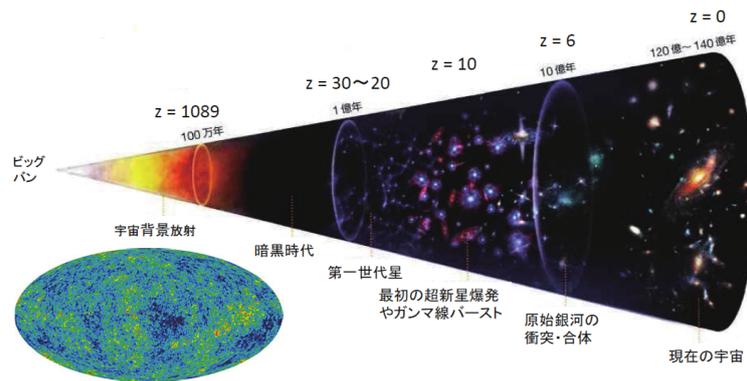


図 1.2: 宇宙の歴史的変遷を模式的に表した図 [2]

現在、宇宙年齢は 137.98 ± 0.37 年であることが知られている [2]。また、大型計算機によるシミュレーションによって、宇宙の晴れ上がり（電気的中性化）から約2億年後（ $z \sim 20$ ）には、宇宙で最初の星（初代星・Pop-III星）が誕生していたと考えられている（図1.2）。そして初代星の放出する強い紫外線は中性化していた宇宙を再び電離させ、 $z = 7$ の頃には、現在のようにほぼ完全電離した宇宙が形成したと考えられている。星の核融合で生成した重元素は、超新星爆発やGRBなどで宇宙空間中に広がり、水素とヘリウムによって構成されていた宇宙に新たな要素をもたらした。このように、赤方偏移 $7 < z < 20$ の6億年という期間は、短い時間で宇宙は大きく変化させ、現在の宇宙を形作る礎となった

重要な時期である。その頃の物理状態を探索することは、現代宇宙論にとって非常に重要な研究対象である。

(a) GRB 光度曲線の例。数 100keV 程度の大量のガンマ線が、激しい時間変動を伴いながら飛来する。
 (b) 可視光残光の光度曲線の例。平均的に可視光残光の光度は、時間 t に対し t^{-1} に比例して減光していく。

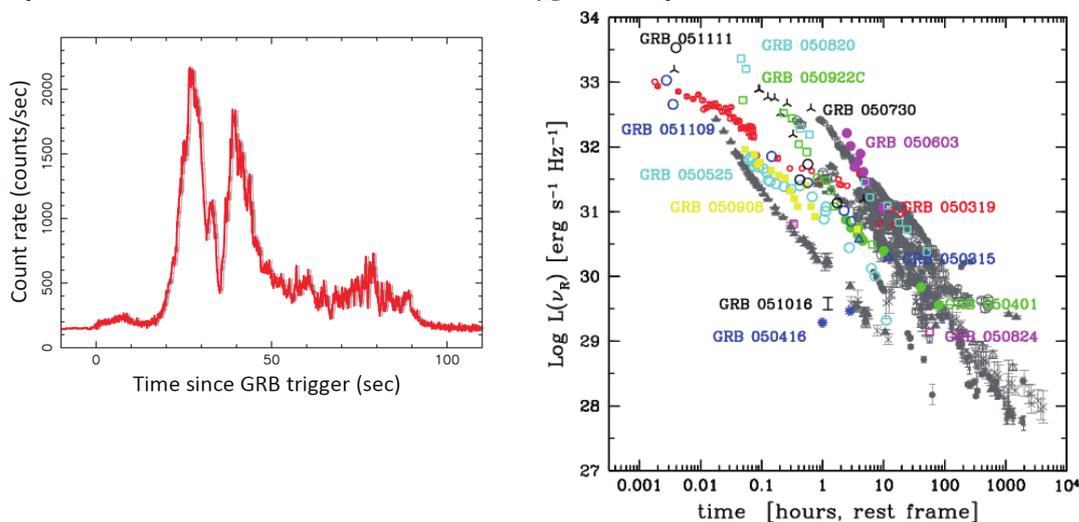


図 1.3: GRB の光度曲線の例 [2]

GRB は初代星の爆発からも発生すると考えられており、 10^{52} erg 程のエネルギーをガンマ線として放出し、図 1.3(a) に示すように数秒から数十秒の短時間だけ X 線とガンマ線で輝き、その後時間と共に暗くなる残光 (X 線, 可視赤外線, 電波等) を伴う現象である (図 1.3(b))。また、1997 年に初めて GRB の赤方偏移が測定されてから、急速にその記録を伸ばしてきた。高赤方偏移のものとして、近年では $z = 8.2$ の GRB 090423 が分光観測されており [4][5] 測光観測では $z = 9.4$ の GRB 090429B が確認されている [6]。しかし、その後はこの記録の伸びは停滞気味である。

1.2.2 ライマン α 吸収とダスト吸収

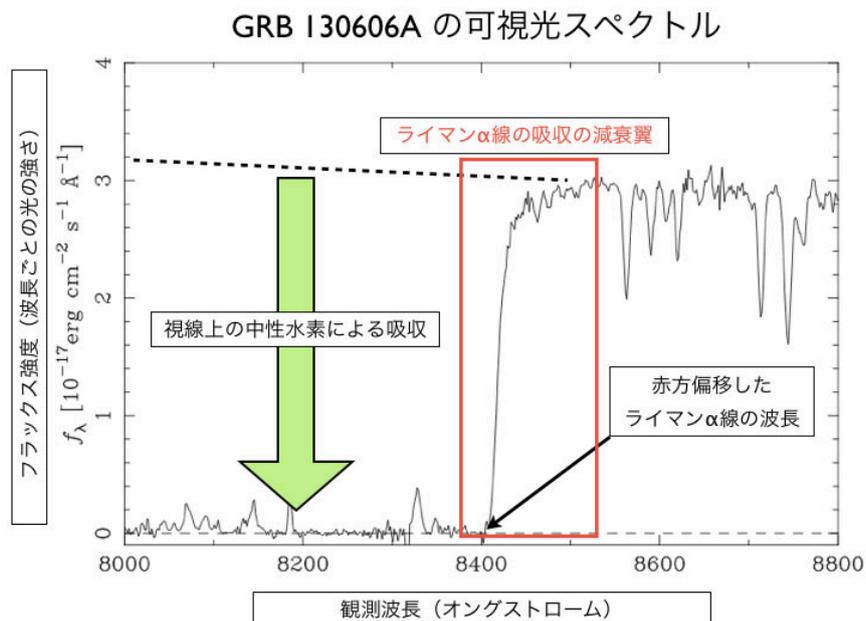


図 1.4: GRB130606A におけるライマン α 減衰翼の図 [7]

すばる望遠鏡を用いて $z = 5.913$ で起こった GRB 130606A を分光観測したところ、中性水素による吸収スペクトルが発見された [7]。この吸収はライマン α 吸収とよばれ、水素原子における主量子数 $n = 1$ の電子が $n = 2$ へ励起する際に発生する。このとき吸収される光の波長は 121.6nm の紫外域であるが、遠方の天体からの光は波長が $1 + z$ 倍に伸びて見えるため、この GRB における水素のライマン α 線は約 840nm 付近の近赤外線領域に現れる (図 1.4)。この波長より短波長側の光は、GRB の現場ではライマン α 線より短波長だが、宇宙空間を通じて伝播して行く中でライマン α 線の波長となり、その場の中性水素原子に吸収される。そのため、図内赤線で囲われている「ライマン α 減衰翼」と呼ばれる吸収端が発生する。この部分を詳細に解析することで、中性に近い水素ガスが GRB の周囲に存在するのかが判別でき、戸谷ら (2014) は実際に 3σ ほどの統計的有意性で中性に近い水素ガスが 10% 以上、GRB 周囲の銀河間空間に存在していることを示した [7]。このライマン α 吸収端の近赤外星領域における検出は、高赤方偏移で起こった GRB を選定する際に非常に重要な要素となる。

一方、近くで発生した GRB の残光は周辺ダストによる赤方偏移と吸収を受けて減衰する。よって、検出した GRB の中から高赤方偏移のものを絞り込むには、ダスト吸収の効果と中性水素によるライマン α 吸収を区別する必要がある。ライマン α 減衰翼はライマン吸収線の波長付近でスペクトルが大きく変化することで現れるが、ダストによる吸収の場

合、その吸収率は波長の関数として徐々に変化する。したがって、測光によって赤方偏移を測定する際はスペクトルの変化を詳細に知るため、近赤外線領域にいくつかの波長帯域を設定して観測する必要がある。

1.3 機器の仕様

1.3.1 近赤外線観測で要求される性能

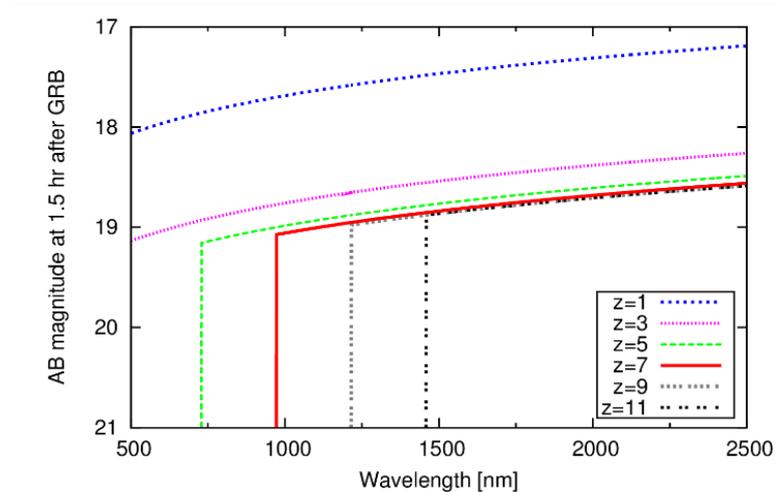


図 1.5: GRB 残光スペクトルの予測図 [3]

図 1.5 は、横軸を波長 (μm) とし、縦軸を等級 (AB) とした際の様々な赤方偏移における GRB が発生してから約 1 時間後の予測残光スペクトルを表している。 $z > 7$ の場合、GRB 残光の等級はライマン減衰翼よりも長い波長で z に関係なくほぼ一定であることから、より高赤方偏移で起こった GRB でも $z \sim 7$ の GRB 検出を想定したものと同一感度で観測することが可能であるということ、 $7 < z < 12$ ほどの GRB を検出するためには、 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の波長帯域で観測する必要があるということがわかる。

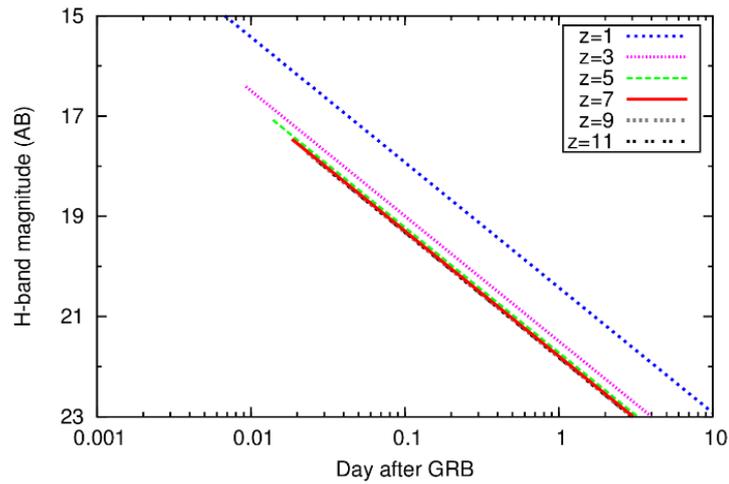


図 1.6: GRB 残光の光度曲線予測図 [3]

図 1.6 は、横軸を GRB 発生からの日数 (対数表示) とし、縦軸を等級 (AB) とした際の、様々な赤方偏移における GRB に対して H バンド (波長 $\sim 1.7\mu\text{m}$) で予測される残光の光度曲線を表している。平均して、高赤方偏移 GRB の発生後約 1 時間の明るさは最大 18 等級 (AB) となると予測される。そして、 $7 < z < 12$ における GRB はそれぞれ、光度の時間変化がほとんど同一のため、 ~ 20 等級 (AB) の感度を持つ近赤外線望遠鏡によってそれらは検出できるということが分かる。

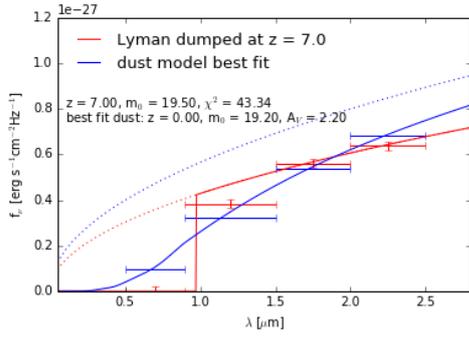
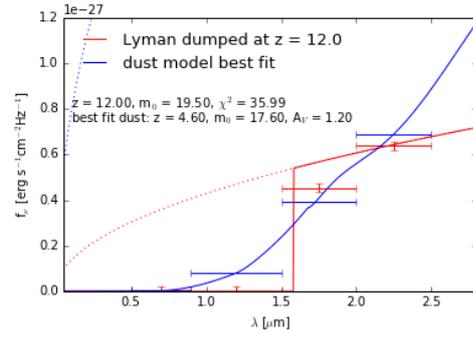
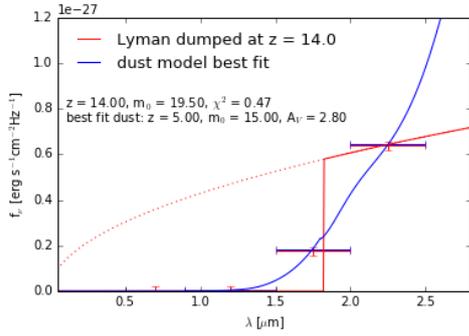
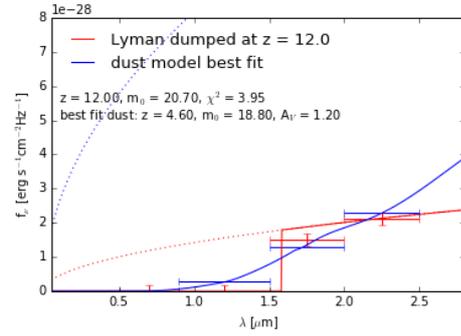
(a) $z=7,19.5$ 等 (AB)(b) $z=12,19.5$ 等 (AB)(c) $z=14,19.5$ 等 (AB)(d) $z=12,20.7$ 等 (AB)図 1.7: ライマン α 吸収とダスト吸収の区別 [3]

図 1.7 は、ダストによる吸収の効果を受けた残光であるか、ライマン吸収の効果を受けた残光であるかの判別精度を推定するためにシミュレーションを行った結果の図である。このシミュレーションでは近赤外線波長領域を、 $0.5\sim 0.9$ 、 $0.9\sim 1.5$ 、 $1.5\sim 2.0$ 、 $2.0\sim 2.5\mu\text{m}$ の4つのバンドに分割しており、それぞれのバンドでフラックスとその誤差を計算し、ダスト吸収 GRB モデルとライマン α 吸収 GRB モデルでそれらをフィットして、 χ^2 値の違いに基づいてそれぞれを区別できるか検証している。図 1.7 の各パネルでは、高赤方偏移で中性水素によってライマン α 吸収による効果を受けた GRB 残光の上記4バンドでの測光データを赤く表しており、ダスト吸収による効果を受けた GRB 残光の測光データを青く表している。そして、赤い実線はライマン α 吸収を受けた GRB の残光スペクトルモデルで、青い実線はダスト吸収を受けた GRB の残光スペクトルモデルを表している。また、図 1.7(a)、図 1.7(b)、図 1.7(c) における縦軸は、 $z = 7, 12, 14$ で 19.5 等級 (AB) の近赤外線フラックス ($\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) を示し、図 1.7(d) は $z=12$ で 20.7 等級 (AB) の赤外線フラックス ($\text{ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)、横軸は波長 (μm) を示している。図 1.7(a)、図 1.7(b) では、ライマン α 吸収モデルのケースとダスト吸収モデルのケースを、 5σ を超える統計的有意性で区別することができる。一方、図 1.7(c) の場合、両方のモデルの4バンドにおける測光データに大きな違いはなく、区別することは困難である。図 1.7(d) は、残光フラックスが

10 σ ほどの統計的有意性を示す検出しきい値に近い場合を表しており、区別の信頼性は約 2 σ となっている。よってこれらから言えることは、 $z=14$ ほどの高赤方偏移 GRB は 19.5 等で検出できたとしても、ダスト吸収の効果を受けた GRB と区別が難しいが、 $7 < z < 12$ ほどの高赤方偏移 GRB は、より明るいうちに測光することでデータ精度が上がり、ダストによる効果なのか、ライマン吸収による効果なのか、高い統計的有意性で判断できるということ、そして、それらを高い信頼性でライマン α 吸収であると決定するには、 ~ 20.5 等級 (AB) の限界等級をもつ近赤外線望遠鏡が必要であるということである。

赤方偏移 $z=7$ で発生した GRB の期待される残光光度曲線

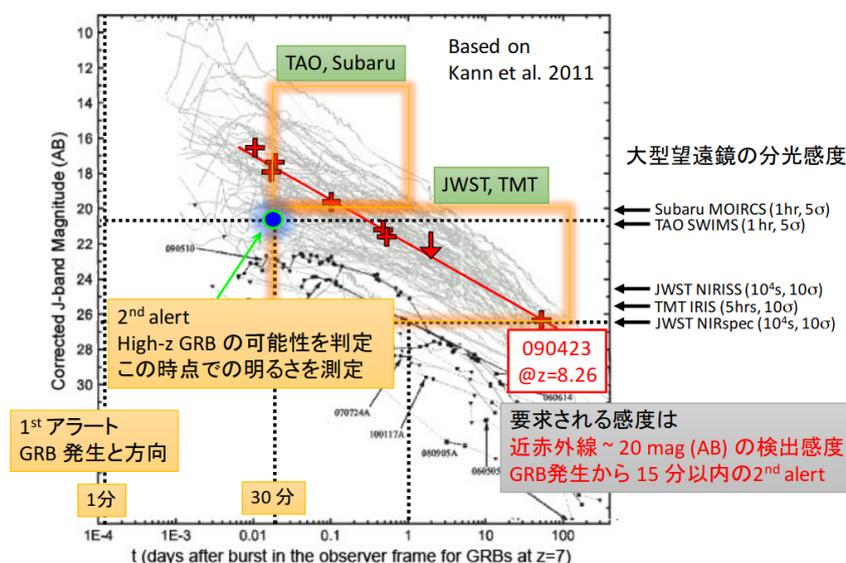


図 1.8: $z=7$ における GRB の残光光度曲線と地上望遠鏡の検出精度の予想図 [2][8]

また、図 1.8 は、赤方偏移 $z=7$ に存在すると仮定した場合の GRB 残光光度曲線の予想図に各地上大型望遠鏡の予想検出精度を加えた図となっている。HZG は高赤方偏移 GRB を検出次第測光を行い、その明るさと赤方偏移の推定値を地上の望遠鏡（すばる望遠鏡、東京大学アタカマ天文台 (TAO)、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)、国立天文台口径 30m 望遠鏡 (TMT)) に通知し、分光観測を促す。これをみると、大型望遠鏡がより高い統計的有意性をもって GRB を観測できるようにするには、地上への送信時間を考慮して、20.5 等級 (AB) ほどの明るさのものを 15 分以内に検出して送信し、30 分以内に地上で受信できるほどの性能が必要であるということが分かる。

以上より、高赤方偏移候補を選定するために要求される近赤外線望遠鏡の性能としては、次のようにまとめられる。

- 0.5~2.5 μm 帯を 4 チャンネルに分け、それぞれで測光
- 近赤外線波長領域で ~ 20.5 等級 (AB) の検出感度 (S/N 比 = 10)
- GRB 発生から 15 分以内に高赤方偏移候補を検出して、情報を送信

1.3.2 搭載される近赤外線望遠鏡

上記の性能を満たすため、HiZ-GUNDAM に搭載予定の近赤外線望遠鏡は口径 30cm を予定しており、撮像検出器は高赤方偏移のライマン α 吸収端とダストによる吸収とを区別するために最低限必要な、可視光 1 バンド (0.5~0.9 μm)、近赤外線 3 バンド (0.9~1.5, 1.5~2.0, 2.0~2.5 μm) の合計 4 バンドで構成する。10 分露光及び S/N 比=10 におけるバンド 1 での限界等級は、HiViSI を用いて 21.4 等級 (AB)、バンド 2 での限界等級は、HgCdTe で 21.3 等級 (AB)、バンド 3 での限界等級は、HgCdTe で 20.9 等級 (AB)、バンド 4 での限界等級は、HgCdTe で 20.7 等級 (AB) と見積もられている。

1.4 本研究の目的

近赤外線波長領域で ~ 20.5 等級 (AB) の明るさとなっている高赤方偏移の GRB 残光を実際のオンボード解析で検出することができるか、また、検出した GRB をどの程度の精度で測光をすることができるか、シミュレーション画像を用いて確認し、検証することを本研究の目的としている。

第2章 検出方法

2.1 GRB 検出から高赤方偏移候補の判定と地上への通知までの流れ

通常の GRB や他銀河からの X 線フラッシュを年間約 100 イベントの頻度で検出する中、高赤方偏移 GRB の候補はその約 1 割でほどと見積もられているが、多くは暗めで観測に時間がかかることから、地上観測がなされずに終わるケースがほとんどである。

HZG における、GRB 検出から高赤方偏移候補の判定までの大まかな流れは次のようになっている。

1. 広視野 X 線撮像検出器による GRB からの X 線検出

高赤方偏移 GRB は今までに観測されてきたガンマ線帯よりも X 線帯での検出が有効であるとされているため、1~20keV の軟 X 線帯域で視野 1 ステラジアンを監視する広視野 X 線撮像検出器を用いる。自律制御で、GRB のあると思われる方向へ衛星の姿勢を変更する。

2. 口径 30cm 可視光・近赤外線望遠鏡による GRB の追観測

GRB 発生約 1 分後からの追観測を実施し、波長 0.5~2.5 μm の可視・近赤外線計 4 バンドで、限界等級を ~ 20.5 等級 (AB) とした 2 分露光の画像を 5 枚ずつ撮像する。そして、機上にインストールされた天文画像処理ソフトを用いて GRB を検出し、測光を行い、高赤方偏移候補を選定する。

3. 選定結果を 15 分以内に地上へ送信し、他望遠鏡へ通知する。

GRB 発生後 30 分以内に、測光で分かった GRB の赤方偏移と明るさを、すばる望遠鏡、東京大学アタカマ天文台、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などへ通知し、分光追観測を促す。

2.2 可視光・近赤外観測の実際

2.2.1 一次処理

可視光・近赤外線波長領域において観測および測光を行う際、撮像した画像に対し、一次処理と呼ばれる処理を施す必要がある。なぜなら撮像した画像には、0秒露出で取得されるカウントであるバイアスが載っていることに加えて、外部からの一様な光は撮像器内部の複雑な構造によって、検出面に対して非一様な当たり方をするため、カウントにムラ（フラット）が生じるためである。これらに対して補正を行う処理のことを一次処理と呼ぶ。

$$y = ax + b$$

生データ ← y a ← フラット x ← 真の値 b ← バイアス

図 2.1: 一次処理のイメージ

2.2.2 開口測光

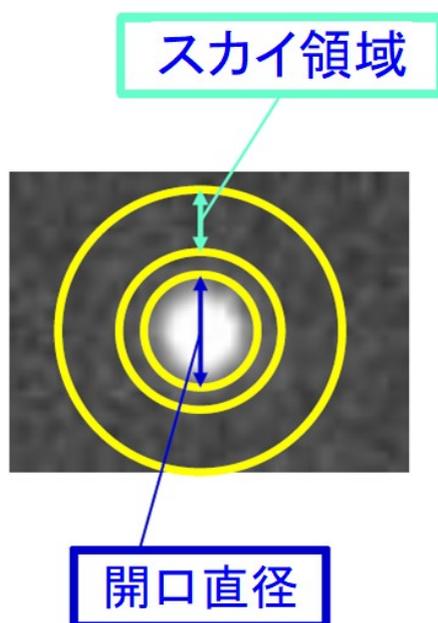


図 2.2: 開口測光のイメージ

天体を測光する際、よく使われる測光方法として、開口測光がある。一般に、星は点源であるが、観測装置の複雑な光学系内の様々な構成要素による影響で像が拡がる。拡がったカウント分布が十分小さくなるまでの領域（半径は半値幅の約 1.5 倍）のカウントを積分して計算し、スカイと呼ばれる対象天体周辺の背景からの光を差し引く測光方法である。

また、開口測光して導いた等級値が何らかの影響で真の値からずれている場合、補正を行う必要がある。その際行うのが相対測光である。同じ視野内のある、既知の星（参照星）の等級を基準として、相対的な等級の差から目的の星の等級を推定する方法を相対測光と呼ぶ。

2.3 機上搭載予定解析ソフト Gnuastro

2.3.1 Gnuastro の概要

GNU Astronomy Utilities(Gnuastro)とは、スペインのカナリア天体物理学研究所所属の天文学者 Mohammad Akhlaghi 博士によって開発された、天文画像でよく使われる FITS データの操作と分析のためのソフトウェアである [9]。Gnuastro は 16 種の基本コマンドからなっており、コマンドラインベースで動かすことを基礎としている。また、C 言語によって書かれており、GNU coding standard に準拠している。そして、ソースも公開されている。

Gnuastro を動かすためには GNU Scientific Library, CFITSIO, WCSLIB の 3 つがインストールされていることが必須となっている。GNU Scientific Library とは、C 言語で記述された科学技術計算関数のライブラリ、CFITSIO とは、FITS データ形式のデータファイルを読み書きするための C 言語及び Fortran のライブラリ、WCSLIB とは、世界座標系 (WorldCoordinateSystem) の C 言語によるライブラリである。

2.3.2 IRAF と Gnuastro

撮像した画像を機上で一次処理し、測光を行うが、HZG は宇宙望遠鏡であるため、搭載できるプロセッサやメモリ、消費電力には制限がある。我々が普段天文画像の処理および検出・測光に用いるソフトウェアである Image Reduction and Analysis Facility(IRAF) は、一次処理および検出・測光以外の余分な機能が多数含まれていることと、処理の詳細が不明で改変がしづらいことから、これを機上で用いることは現実的ではない。よって、今回のプロジェクトではソースが公開されており、GNU coding standard に準拠しているため HZG 搭載予定 OS の linux と相性が良く、機上でも軽く動くことが期待される Gnuastro を用いて画像を処理および測光を行う予定としている。

2.3.3 Gnuastro の基本コマンド

Gnuastro に搭載されている基本コマンドを簡潔に記したものが次である。

- `astarithmetic`
複数のデータに対する四則演算を行う。数学的演算や統計的な演算 (`sqrt`, `log`, `min`, `mean`, `median` など) も行える。Gnuastro での算術演算は逆ポーランド記法 (演算子を被演算子の後に記述する表記法) を用いて記述する。
- `aststatistics`
入力データ (表、画像など) を統計計算し、表示する。
- `astnoisechisel`
天体画像中のスカイを引き、ノイズ内から天体の信号を検出する。
- `astsegment`
信号の構造と入力データセットのノイズ特性に基づいて、`astnoisechisel` の結果からの検出領域を細分化する。
- `asttable`
FITS バイナリおよび ASCII テーブルを他のテーブルに変換し、コマンドラインで表示し、プレーンテキストファイルに保存するか、FITS テーブル情報として FITS 内に保存する。
- `astmkprof`
曇り込みのためのカーネルなどの 2 次元模擬画像を作成する。
- `astmkcatalog`
画像 (`astnoisechisel` の出力) 内の天体の情報 (画像上の星の等級やその誤差、ピクセル座標など) のカタログを作成する。
- `astcrop`
画像から領域を切り取り、必要に応じていくつかの画像をつなぎ合わせる。入力はピクセル座標または世界座標にて行う。
- `astfits`
FITS ファイルのヘッダーキーワードを表示したり、操作したりする。
- `astwarp`
画像を新しいピクセル座標へ移す。

- `astmatch`
2つの入力カタログが与えられたとき、指定された範囲内で互いに一致する行を見つける。
- `astcosmiccal`
赤方偏移 Z の値を代入すると、そこで一般的な宇宙論的特性を出力する。
- `astmknoise`
乱数ジェネレータを使用して、画像にノイズを追加する。
- `astconvolve`
与えられたカーネルを使用して、画像を畳み込む (ぼかす又は平滑化する)。
- `astconvertt`
天体画像の保存形式である FITS や IMH ファイルを TXT, JPEG, EPS, PDF へ変換する。
- `astbuildprog`
Gnuastro ライブラリに依存するプログラムをコンパイルしたり、実行する。

以上が基本的な機能であるが、各コマンドにオプションをつけることで、より様々な機能を果たすことができる。

第3章 検出シミュレーション

以下、次のような環境で検出シミュレーションを行った。

- OS :Ubuntu 18.04 LTS 64bit
- RAM :7.7GB
- Processer :Core i5-6500 (3.20GHz x 4)
- GSL(GNU Scientific Library):ver 2.6
- WCSLIB :ver 6.4
- CFITSIO :ver 3.47
- Gnuastro :ver 0.10
- IRAF :ver 2.16

3.1 IRAF との比較

まず、我々がよく用いる IRAF と同じように処理、および測光が行えるか確認するため、同一画像、同じパラメータで一次処理、開口測光を行い、結果が誤差範囲内で一致するかどうかを確認した。一次処理及び開口測光の比較検証には、広島大学附属東広島天文台かなた望遠鏡で撮影された超新星 (Supernova:SN)SN 2018zd の画像を用いた。また、等級の表し方には Vega 等級 (ベガを基準とした等級で、明るさが波長により変化する。) と AB 等級 (全ての波長において $3.63 \times 10^{20} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ を 0 等級としている) があり、本検証では参照したカタログの等級が Vega 等級であったため、Vega 等級で等級を表しているが、その他の検証では AB 等級を使用している。

3.1.1 一次処理比較

- 検証方法

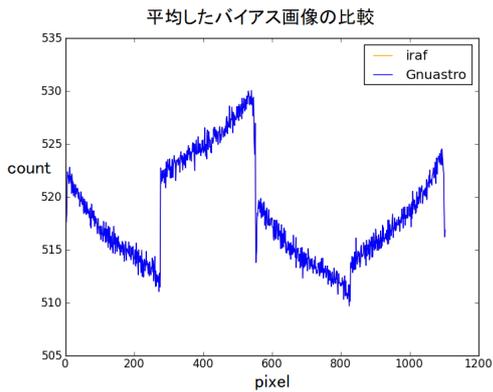
1. 0秒露出で取得されたイメージ(バイアス画像)を平均し、平均バイアス画像を作成した。
2. 1.で作成した平均バイアス画像を天体画像、フラット画像から引いた。
3. フラット画像を各波長領域(B,V,R,Iバンド)ごとに平均した。
4. 平均した各フラット画像のカウント平均値を算出した。
5. 4.で算出したカウント平均値で各平均フラット画像を割り、規格化した。
6. 天体画像を規格化した平均フラット画像で除算した。

本来画像内のオーバースキャン領域(図3.2(a)の画像中の白い縦線)を切り取り画像をつなげる必要があるが、一次処理および測光性能の比較検証の結果には影響しないと考えたため、今回はIRAFにおける解析にもGnuastroを用いた解析にもオーバースキャン領域を取り除いていない画像を用いた。

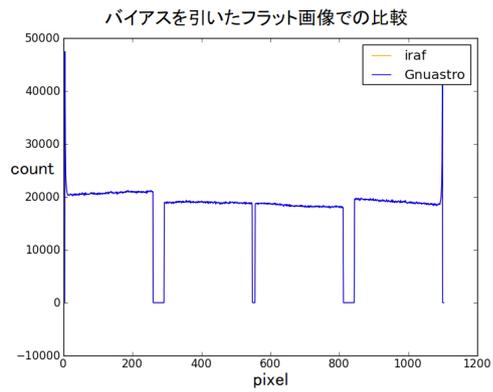
- 結果

検証結果は次のようになった。

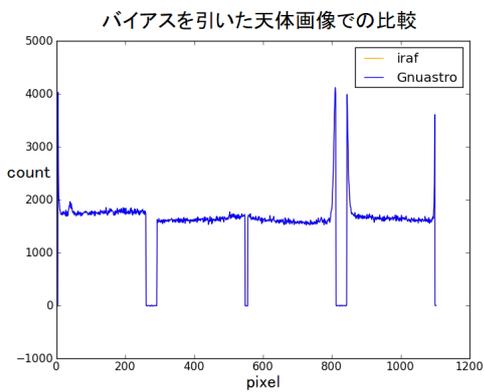
(a) 平均したバイアスでの比較



(b) バイアスを引いたフラット画像での比較



(c) バイアスを引いた天体画像での比較



(d) 規格化したフラット画像での比較

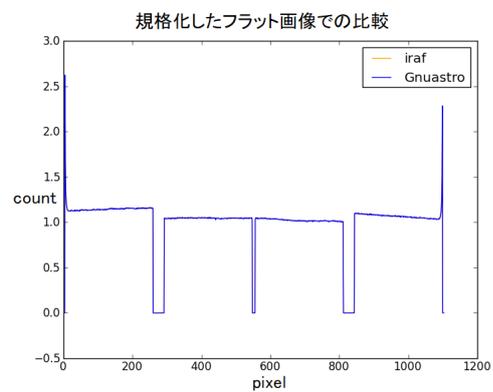


図 3.1: Gnuastro と IRAF で同じ演算を施した結果

図 3.1 はそれぞれ、一次処理の過程 (方法 1,2,5) での Gnuastro を用いたときの結果と IRAF を用いたときの結果を同じピクセル y 座標で切り取り、横軸をピクセル x 座標、縦軸を光子のカウント数として、同じ図にそれぞれのグラフに載せている。また、これらに用いたフラット画像や天体画像は V バンドフィルタを通して撮影されたものである。

これらを見ると全ての図において両グラフにずれはなく、Gnuastro を用いて一次処理を施しても IRAF の結果と変わらないことがわかる。また、 B, V, R, I のどのバンドフィルタを通して撮影された画像でも Gnuastro の結果と IRAF の結果で違いはみられなかった。

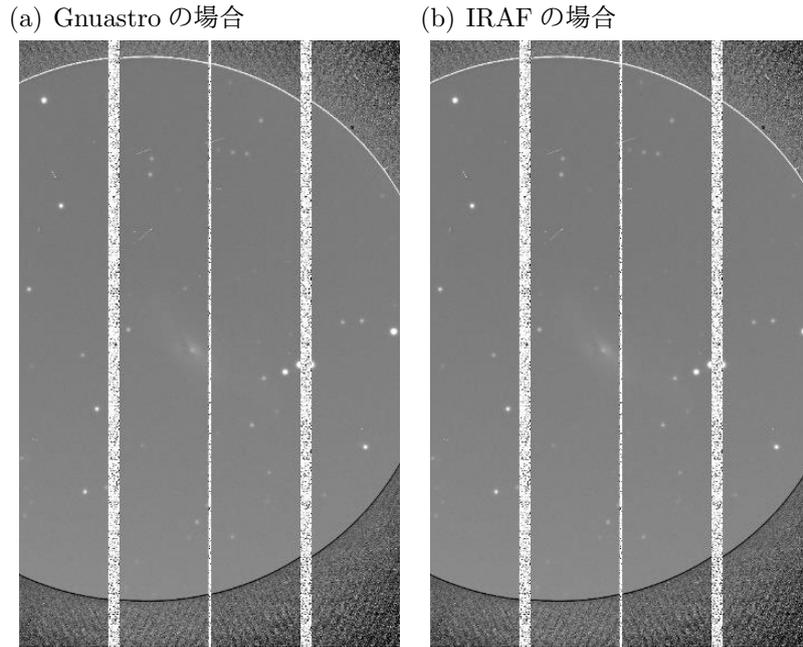


図 3.2: Gnuastro と IRAF で一次処理を施した結果

それぞれで一次処理をした結果、図 3.2 のようになった。左図が Gnuastro を用いた場合の天体画像、右図が IRAF を用いた場合の天体画像である。これらを用いて節 3.1.2 の開口測光の検証を行った。

3.1.2 開口測光比較

- 検証方法

1. 節 3.1.1 で一次処理を施した天体画像を用いて、以下の図の SN と参照星 1 と参照星 2 で開口半径を 5pixel とした開口測光を行う。
2. 1. の結果を、APASS カタログ [11] 上の参照星の等級とその誤差を用いて、相対測光を行い、補正する。

- 結果

方法 1. による開口測光を行った結果、V バンドでは次のようになった。

	APASSカタログ等級(vega)	APASSカタログ等級誤差	IRAF等級	IRAF等級誤差	GNUastro等級	GNUastro等級誤差
SN			13.73	0.02	13.473	0.006
参照星1	14.77	0.03	14.08	0.02	13.823	0.007
参照星2	13.69	0.02	12.96	0.01	12.721	0.004

図 3.3: 開口測光の結果

これを見ると、IRAF で求めた等級と Gnuastro で求めた等級で値が異なっていること、また、Gnuastro で計算した等級誤差は IRAF や APASS カタログの誤差と比べて1桁ほど小さいことが分かる。

また、方法2の結果は次のようになった。

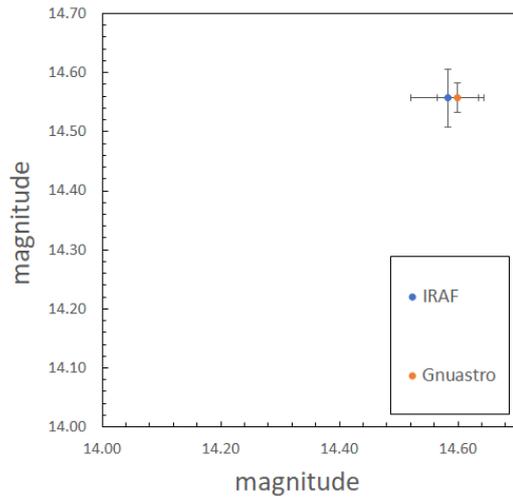
	iraf算出等級	GNUastro算出等級	iraf算出誤差	GNUastro算出誤差
SNの等級(参照星1との相対測光)	14.42	14.42	0.04	0.03
SNの等級(参照星2との相対測光)	14.46	14.44	0.03	0.02

図 3.4: 相対測光の結果

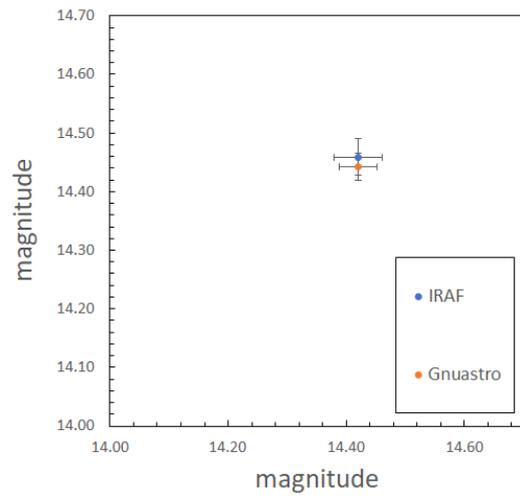
ここでの等級誤差は、APASS カタログの誤差と IRAF, Gnuastro それぞれの誤差を二乗平均して求めた。この表を見ると、参照星1との相対測光で算出した等級は IRAF でも Gnuastro でも同じ値となっていること、参照星2との相対測光で算出した等級は小数点一桁まで同じ値となっており、その差分も誤差の範囲内でおさまっていることがわかる。

さらに、B,V,R,I バンドそれぞれの相対測光の結果をグラフとしたものが次である。

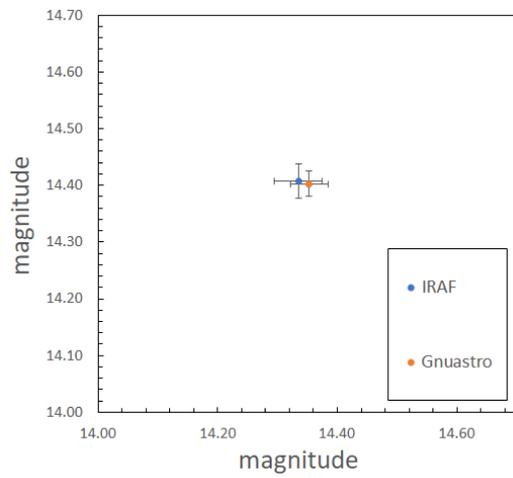
(a) Bバンド



(b) Vバンド



(c) Rバンド



(d) Iバンド

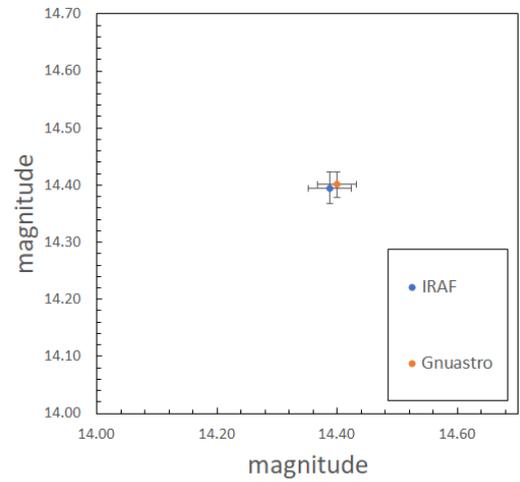


図 3.5: 相対測光して等級を補正した結果

図 3.5 の縦軸は参照星 2 を用いた相対測光での SN の等級を表しており、横軸は参照星 1 を用いた相対測光での SN の等級を表している。これらを見ると、どのバンドフィルタを通して撮影された天体画像でも IRAF を用いて算出した SN の等級と Gnuastro を用いて算出した SN の等級は、誤差の範囲内で一致していることがわかる。

3.1.3 考察

節 3.1.1、節 3.1.2 の結果から、一次処理の過程で Gnuastro を用いた際と IRAF を用いた際の違いは見受けられなかったこと、Gnuastro が算出した等級の誤差は、IRAF のものより小さいこと、相対測光によって補正して算出した等級は、誤差の範囲内で一致するということが分かった。誤差に関して、これは Gnuastro と IRAF 間における誤差の定義の違いによるものであると考えられる。そして、一次処理および測光処理を行う際、IRAF の代わりに Gnuastro を用いても問題ないと思われる。

3.2 あかり衛星の生データに準拠したシミュレーション画像での測光

地上の望遠鏡で撮像した天体画像にはしばしば宇宙線が載っているが、HZG で撮像された画像にも当然宇宙線が載ると考えられる。Gnuastro を用いて、実際に衛星で撮られた高視野撮像の生データに人工的に天体像を付加したものの中から突発天体を検知できるか、どの程度の精度で測光できるか確かめるため、宇宙線イベントの影響を含めて検証を行った。

3.2.1 シミュレーション画像について

この検証では、HZG で最も感度が悪い Ch.4 バンド (波長 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$) のシミュレーション画像を用いた。また、シミュレーション画像のスカイ輝度と宇宙線イベントレートは、2006 年に打ち上げられ、2011 年に運用終了した日本の赤外線天文衛星あかり (Akari) で撮像されたデータのものに準拠しており、スカイ (背景) の輝度を $20.91 \text{mag(AB)/arcsec}^2$ 、宇宙線のイベントレートを $0.053893 \text{個/mm}^2/\text{sec}$ と設定している。HZG で撮像される画像のピクセルスケールは $18.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 、2 秒角/ pixel であるため、 $412 \times 375 \text{pix}$ で 2 分露光を行うと、342 個の宇宙線がのることとなる。そして参照星として、2MASS カタログから 13.375(AB) 等級の星 [13] を使用している。Massey(1988)[12] によると、近赤外波長領域 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ における 0mag(AB) の光子数は 5.4×10^8 個であるため、13.735 等級の参照星からの信号は 120sec で 289450 個の電子数となり、スカイからの信号は 1pixel 当たり、120sec で 1121.08 個の電子数、信号の読み出しノイズによる電子数は 17 個となっている。また、1 電子で 1 カウントとしている。シミュレーション画像は HZG チームが用意したものをを用いた。

節 2.2.2 で、星の像は拡がることを説明したが、この拡がり関数を用いて表したもの

を点拡がり関数 (Point Spread Function:PSF) といひ、Gauss 関数 (式 3.1) や Moffat 関数 (式 3.2)、Lorentz 関数 (式 3.3) などがある。

$$\text{Gauss 関数 : } A \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

$$\text{Moffat 関数 : } A\left(1 + \frac{r^2}{\sigma^2}\right)^{-\beta} \quad (3.2)$$

$$\text{Lorentz 関数 : } A\left(1 + \frac{r^2}{\sigma^2}\right)^{-1} \quad (3.3)$$

上記の設定で IRAF を用いて、PSF を Moffat、 $\beta = 2.5$ 、 $r = 0.5$ 、PSF の半値幅を $\sim 1.5\text{pix}$ とした星像を 11 種計 24 個加えた。等級スケールのゼロ点を 27.5 等とし、各星の等級は、参照星を 13.735 等級、その他が 16 等から 21 等まで 0.5 等ずつ加えたものとなっている (図 3.6)。

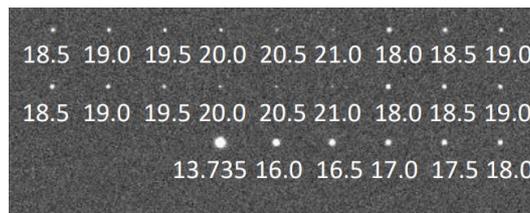


図 3.6: シミュレーション画像における星像

また、星自体はそれぞれは 1pix に全体が入るようにしているが、ピクセルを跨いで載っている星への影響を考え、上段は中段を 0.5pix ずらしたものとなっている。人工星像を加えた画像を 5 フレーム作成した後、Akari のデータから抽出した 3 種の宇宙線イベントに、カウントが一致するよう定数をかけてスケールアップさせたものを足している。(4,5 枚目には、1 及び 2 枚目の上下反転したものを足している。) このとき、定数は、1 秒あたりのスカイが同じとなる $(1121.8/120)/(67/44.41)=6.196$ を採用している。図 3.7 が作成した 5 つの図である。

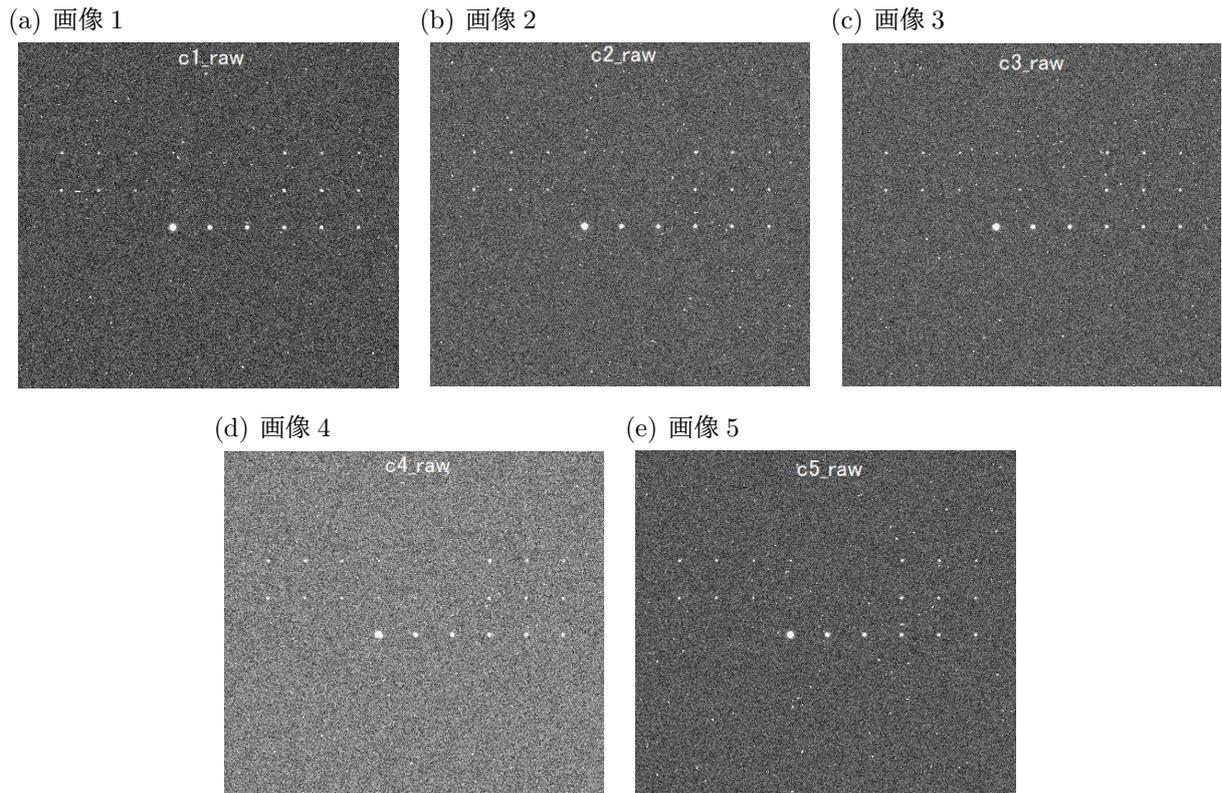


図 3.7: 検証に用いたシミュレーション画像

3.2.2 天体の検出

まず初めに、図 3.7(a) を用いて天体検出を行った結果が次である。

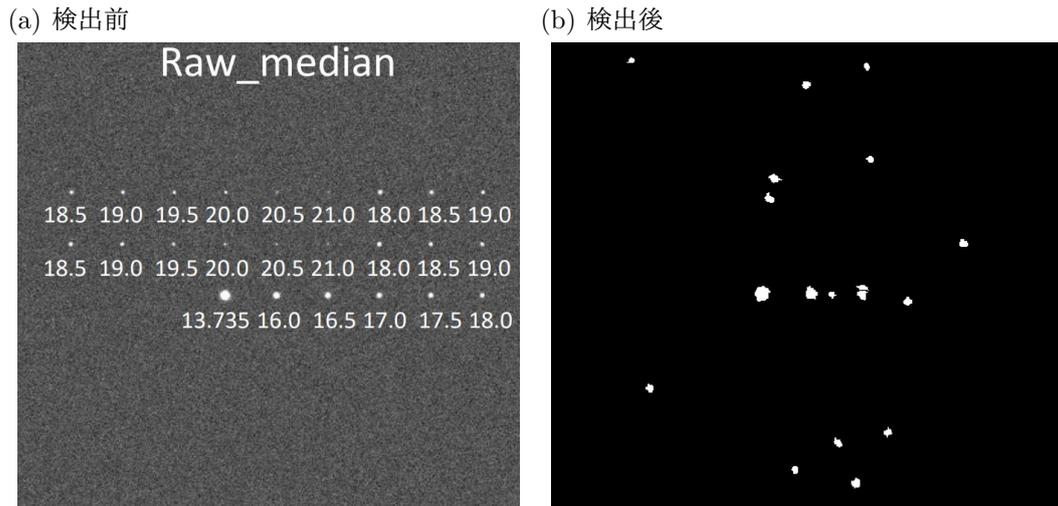


図 3.8: デフォルト設定で画像 1 の天体検出を行った結果

図 3.8(b) において、デフォルト設定で検出することができた人工星像は 13.735 等の参照星と下段 16、16.5 等、中段 18.5 等のもののみであった。よって、次のように検出パラメータを変更した。

- kernel(検出の際に畳み込むカーネル)
 ガウス関数 (半値幅 2pix、半値幅の 5 倍まで) ⇒ ガウス関数 (半値幅 1.5pix、半値幅の 7.5 倍まで)
- qthresh(畳み込んだ画像に適用する、ピクセルをカウントの大きい順に並べた際の分位点のしきい値 (0~1))
 0.3 ⇒ 0.1
- snthresh(検出する天体の S/N 比のしきい値)
 4.87 ⇒ 5.8
- outliersigma(何 σ 周りのピクセルから離れていると外れ値とするか)
 10 σ ⇒ 3 σ
- sigmaclip(何 σ 以上周りのピクセルから離れているものを、どの割合 (0~1) まで省くか)
 3 σ ,0.2 ⇒ 3 σ ,0.1
- 天体があると推定される領域決定の際の snminarea(S/N 比を計算する際の最小面積)
 10pix ⇒ 1pix

- 領域内の天体検出での snminarea
15pix ⇒ 12pix
- clumpsnthresh(検出したうちの天体の S/N 比のしきい値)
none ⇒ 2

そして再度画像 1 の検出を行った結果、次のようになった。

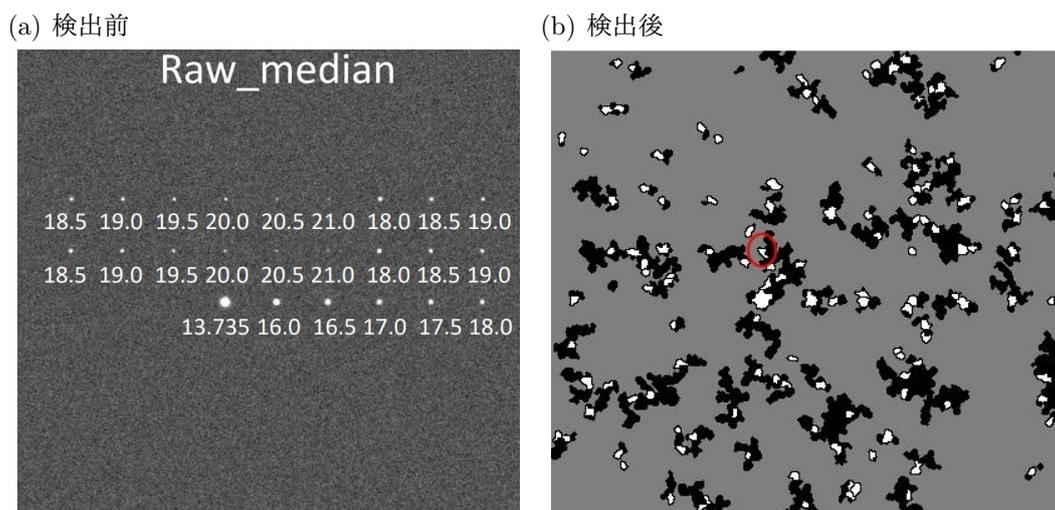


図 3.9: 検出パラメータを変更して画像 1 の天体検出を行った結果

図 3.9(b) 中の赤い円部分を見ると、20.0 等の人工星像を検出することができていることがわかる。しかし、その他の 20.0 等以上の星像を検出することはできなかった。また、個の宇宙線が天体として検出されてしまった。

図 3.7 における画像 2 ~ 5 についても同様のパラメータで天体検出処理をかけたが、全ての画像で 20.0 等より暗い星像を検出をすることはできず、少なくとも 85 個以上の宇宙線が天体として検出された。

次に、宇宙線を効率よく画像から排除するため、1 ~ 5 の画像の中央値をとった画像 (図 3.10) を用いて天体検出処理を行った。

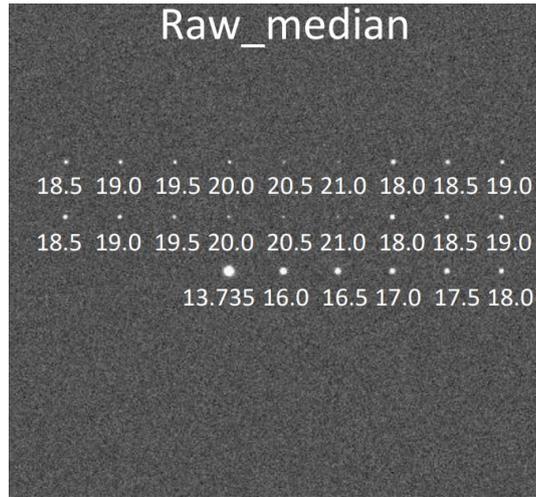


図 3.10: 中央値を取った画像

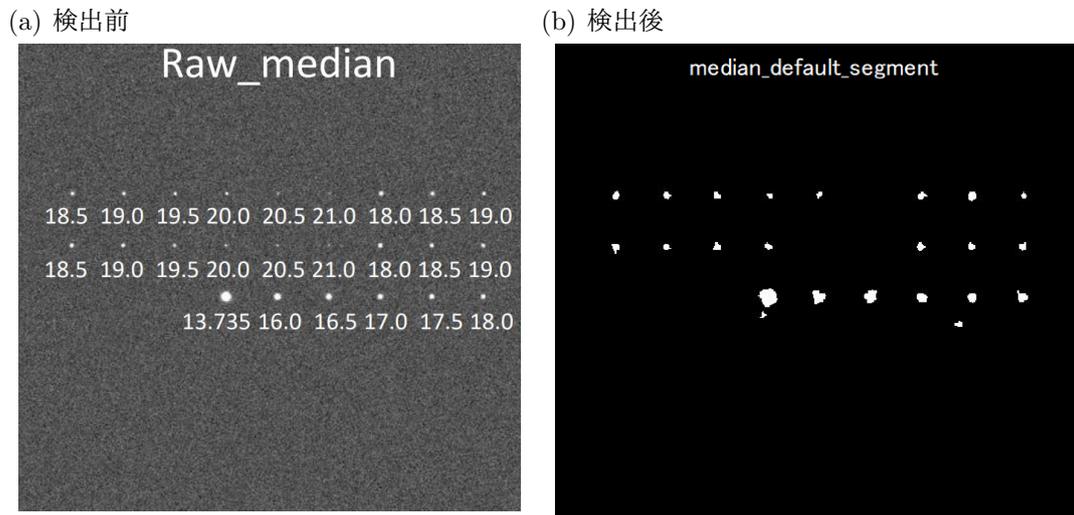
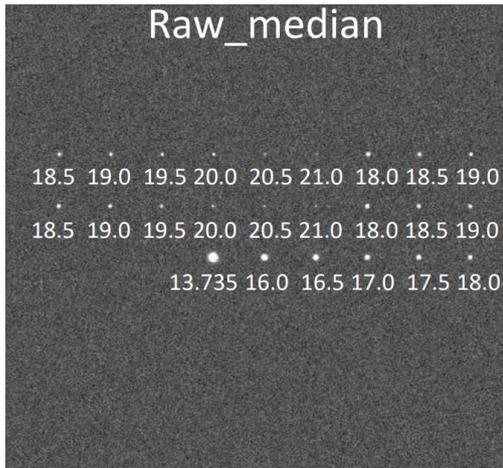


図 3.11: デフォルトの設定で中央値画像の天体検出を行った結果

宇宙線の検出は2つになり、大きく改善されたが、中央値を取った画像の場合でもデフォルトの設定では中段の20.5等級および21等級の天体を検出することができなかった。

よって、検出処理の際のパラメータを画像1の際と同様に変更し、検出を行った結果を図3.12に示す。

(a) 検出前



(b) 検出後

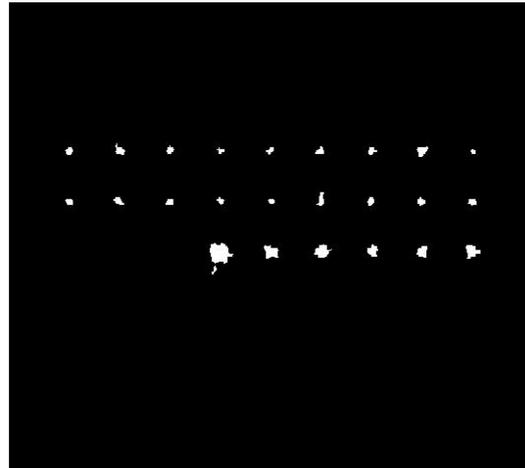


図 3.12: 人工星像の検出

図 3.12(b) を見ると、13.735 等の参照星下部に宇宙線が一つ検出されているが、参照星と 16 等から 21 等までの全ての人工星像が検出できていることが確認できる。この検出結果を用いて測光を行った結果を次節に記した。

3.2.3 測光結果

IRAF ではカウントの重心を中心とした開口（通常は円）内を測光するが、Gnuastro は天体検出領域を開口として測光を行うことができる。図 3.12(b) における天体検出領域を用いて、ゼロ点を 27.5 等として測光したところ、次のような結果になった。参考として、IRAF で半径 1.5pix とした円形開口でゼロ点を 27.5 等として測光を行った結果も記した。

(a) 開口測光結果 (図 3.12(b) の上段)

設定等級	Gnuastro等級	Gnuastro等級誤差	IRAF等級	IRAF等級誤差
18.5	18.54	0.04	18.52	0.03
19	18.95	0.06	18.99	0.03
19.5	19.55	0.09	19.52	0.06
20	19.9	0.1	19.95	0.07
20.5	20.7	0.2	20.8	0.2
21	20.6	0.2	21.2	0.2
18	18.05	0.03	18.01	0.02
18.5	18.43	0.04	18.50	0.02
19	19.03	0.05	18.97	0.04

(b) 開口測光結果 (図 3.12(b) の中段)

設定等級	Gnuastro等級	Gnuastro等級誤差	IRAF等級	IRAF等級誤差
18.5	18.52	0.04	18.50	0.03
19	19.04	0.06	18.98	0.04
19.5	19.56	0.08	19.50	0.06
20	20.1	0.1	20.03	0.07
20.5	20.7	0.2	20.79	0.1
21	20.9	0.3	21.06	0.2
18	18.08	0.03	17.97	0.02
18.5	18.53	0.04	18.47	0.03
19	18.97	0.05	18.97	0.04

(c) 開口測光結果 (図 3.12(b) の下段)

設定等級	Gnuastro等級	Gnuastro等級誤差	IRAF等級	IRAF等級誤差
13.735	13.734	0.002	13.722	0.002
16	15.991	0.007	15.986	0.006
16.5	16.49	0.01	16.485	0.008
17	16.98	0.01	16.98	0.01
17.5	17.46	0.02	17.48	0.01
18	17.98	0.03	18.03	0.02

図 3.13: 開口測光結果

埋め込んだ人工星像の設定等級と、Gnuastro で算出した等級とその誤差、IRAF で算出した等級とその誤差を図 3.13 に記している。そして、誤差の範囲に設定等級が入っていないものを赤く表示している。

Gnuastro を用いての測光では、図 3.12(b) の上段の 21 等級の人工星像は誤差の範囲内に入らなかったが、20.5 等と中段の 20.5, 21.0 等の人工星像は誤差の範囲内におさめることができた。また、Gnuastro と IRAF では赤い項目の数の差が 3 つほどとなっており、Gnuastro は IRAF と同等以上の測光精度であることが見て取れる。

3.2.4 考察

節 3.2.2 の結果より、HZG で撮像する画像は 2 分露光の 5 枚で、中央値をとった画像を作成するのに 10 分程時間を要する (要改善) が、宇宙線の載った個々の生画像での天体検出は難しいため、中央値をとって検出をかける方法が最も宇宙線の影響が少ないと考えられる。また中央値を取った画像において、Gnuastro の検出パラメータをデフォルトから変更して行った検出では、21 等、20.5 等を含めた全ての人工星像を検出することができたが、実際の機上での天体検出の際は、さらにパラメータを適切に設定する必要があるだろう。また、節 3.2.3 の結果のように、Gnuastro と IRAF では赤い項目の数に差が出たのは、Gnuastro はスカイを画像全体から引く処理を行うのに対して、IRAF ではそれぞれの星の周りのスカイを、各星ごとに引くという処理を行ったため、そして、開口が半径 1.5pix の円で一律であった IRAF とは違い、Gnuastro は各天体で異なった、それぞれの光の拡がりに合わせた開口の大きさを測光を行ったためであると考えられる。

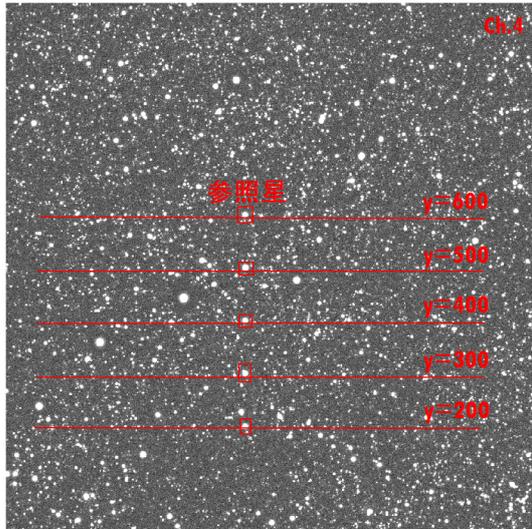
3.3 Ultra-VISTA[14] のカタログから作成された画像での測光

次に、多数の星に囲まれている状態で GRB による ~ 20.5 等級の残光を検出できるか、また、そのような状況で測光するとどのような結果となるか確認するため、Ultra-VISTA の Y バンド (Ch.1 を想定)、Ultra-VISTA の JHK バンド (Ch.2-4) の各カタログ上の星 (限界等級は 25 等程度) を載せて作成された 4 つの波長帯域での画像上に、疑似的に高赤方偏移 GRB 残光モデル、星間ダストによって強く赤化した GRB 残光モデル、各チャンネルで一定の等級を示す星を埋め込んで、GRB の検出および測光を行った。また、画像作成は HZG チームが行った。

3.3.1 シミュレーション画像について

1000×1000pix(34×34 分角視野) の画像に節 3.2 と同様のパラメータで、Ch.1(0.5 \sim 0.9 μ m, 背景星データは Y バンド)、Ch.2(1.0 \sim 1.5 μ m, 同 J バンド)、Ch.3(1.5 \sim 2.0 μ m, 同 H バンド)、Ch.4(2.0 \sim 2.5 μ m, 同 Ks バンド) の 4 バンドにおける、高赤方偏移 GRB モデルの残光、星間赤化 GRB モデルの残光をそれぞれ 8 種類計 16 個を横並びに、ピクセル y 座標 200 から 100 ピクセルおきに 600 まで計 5 列並べている。また、節 3.2 でも用いた、13.735 等級の参照星と各チャンネルで一定の等級を示す星 (17.0 等級から 0.5 等級ずつ 21.5 等級まで) も参考として同じ列に並べている。また今回は、HZG の姿勢制御の際に発生する星像の拡がりによる影響を考慮するため、それぞれのチャンネルごとに PSF の半値幅が 1pix (2 秒角) のものと 1.5pix (3 秒角) のものを用意した。それらの中に、カタログから視野内に含まれる 40 万個ほどの星を同時に埋め込んでいる (図 3.14(a))。

(a) PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.4 におけるシミュレーション画像



(b) 埋め込んだ GRB モデルの例

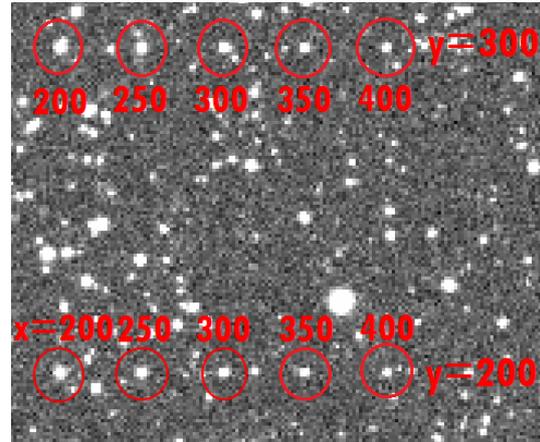


図 3.14: 背景星からの影響を確かめるためのシミュレーション画像の例

図 3.14(a) の赤い枠で囲んだ部分に 13.735 等の参照星があり、それを中心として赤線上で各波長で同じ等級を決め打ちした星と、高赤方偏移 GRB モデルと星間赤化 GRB モデルが並んでいる。このような画像を 4 つ分のチャンネル用いて、埋め込んだ星や GRB モデルの検出及び測光を行った。

3.3.2 天体検出と測光結果

PSF 半値幅 1.0pix, 1.5pix の場合それぞれ 4 チャンネルずつ、計 8 つの画像における天体の検出には次のように Gnuastro のパラメータを設定した。

- kernel
PSF 半値幅 1.0pix の場合=ガウス関数 (半値幅 1.0pix、半値幅の 7.5 倍まで)
PSF 半値幅 1.5pix の場合=ガウス関数 (半値幅 1.5pix、半値幅の 7.5 倍まで)
- tileSize(検出をかける際のグリッドサイズ)
デフォルト : 30pix×30pix ⇒ 15pix×15pix
- qthresh=0.1
- snthresh=2.0
- outliersigma=3 σ

- sigmaclip= $3\sigma, 0.1$
- 天体があると推定される領域決定の際の snminarea=1pix
- 領域内の天体検出での snminarea=12pix
- clumpsnthresh=2

検出の際に用いるカーネルにおけるガウス関数の半値幅は、それぞれの PSF 半値幅の値に揃えた。そして、非常に多くの星を埋め込んでいるため、検出をかける際のグリッドサイズを小さく設定する必要がある。また、小さな信号を取り逃がさないよう、S/N 比のしきい値を低く設定した。その他のパラメータは、図 3.12(b) での検出に用いた値と同様となっている。

上記パラメータで天体検出をかけ、検出した天体領域を開口として測光を行った結果、次のようになった。

- PSF 半値幅 1.0pix の場合

各チャンネルでの検出・測光結果を 40 ページから 43 ページにおける図 3.24、図 3.25、図 3.26、図 3.27 に示している。また、うまく検出できなかった部分は、星像を埋め込んだ座標で開口半径 1.5pix の開口円によって強制的に測光を行った結果を赤字で記している。

それらにおける一定等級星 (17~19.5 等) 140 個、一定等級星 (20,20.5 等) 40 個、一定等級星 (21,21.5 等) 40 個、高赤方偏移 GRB モデル 160 個、星間赤化 GRB モデル 160 個の検出結果を、百分率でまとめた表が次である。

モデル	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
一定等級星 (~19.5mag)	100.0	97.1	97.1	88.6
一定等級星 (20,20.5mag)	80.0	30.0	50.0	70.0
一定等級星 (21mag~)	20.0	20.0	40.0	20.0
高赤方偏移 GRB	0.0	25.0	52.5	62.5
星間赤化 GRB	0.0	12.5	32.5	52.5

図 3.15: 各チャンネルの画像における星像の検出率 (PSF 半値幅 1.0pix)

これを見ると、どのモデル、どのチャンネルにおいても暗い星ほどその検出率は低くなっていくことがわかる。また Ch.4 に注目すると、節 3.2.3 の図 3.13 の、背景星を含めなかった場合の Ch.4 における検出率に比べて、今回のように背景星を多く含んだ場合では検出率は低下し、限界等級 ~20.5 等より明るい星でも検出できない例

が存在することがわかる。

また、各チャンネルでの測光結果を見ると、節 3.2.3 の結果に比べて、一定等級星、両 GRB モデルどちらにおいても、測定等級の誤差の範囲に設定等級が入っていないものが多いことがわかる。そして検出されたものの中でも、0.1 等以上明るくなっている、かつ 3σ 以上設定等級より明るくなっているものの割合を百分率で表した結果、次のようになった。

等級	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
~19.5mag	48.6	55.3	56.0	53.2
20.0mag~	100.0	75.0	74.1	61.9

図 3.16: 各チャンネルにおける、背景星が測光値へ影響した割合 (PSF 半値幅 1.0pix)

これをみると、チャンネルに寄らず、より暗い星像の方が設定等級よりも明るく測定される割合が多いことが見て取れる。また、20 等以上の星像はチャンネル数が小さくなるほどその割合が多くなっていた。

- PSF 半値幅 1.5pix 場合

PSF 半値幅が 1.0pix の時と同様に、各チャンネルでの検出・測光結果を、44 ページから 47 ページにおける図 3.28、図 3.29、図 3.30、図 3.31 に示している。これも同様に、一定等級星 (17~19.5 等) 140 個、一定等級星 (20,20.5 等) 40 個、一定等級星 (21,21.5 等) 40 個、高赤方偏移 GRB モデル 160 個、星間赤化 GRB モデル 160 個の検出結果を、百分率でまとめると次のようになった。

モデル	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
一定等級星 (~19.5mag)	100.0	94.3	97.1	88.6
一定等級星 (20,20.5mag)	90.0	100.0	80.0	90.0
一定等級星 (21mag~)	40.0	50.0	40.0	60.0
高赤方偏移 GRB	0.0	27.5	40.0	45.0
星間赤化 GRB	0.0	7.5	22.5	55.0

図 3.17: 各チャンネルの画像における星像の検出率 (PSF 半値幅 1.5pix)

これをみると、PSF 半値幅 1.0pix のときと同様に、限界等級 ~20.5 等よりも明るい星でも検出されないものがあることがわかる。また図 3.15 と比較すると、19.5 等以

下の星像ではほとんど検出率に違いは見られないが、限界等級に近い 20 等台の星像や、さらに暗い 21 等台の星像では、どのチャンネルにおいてもそれぞれ 80% 以上、40% の検出率となっており、1.0pix のときより高い検出率であることがわかる。しかし、高赤方偏移 GRB モデルおよび星間赤化 GRB モデルに関しては、両者とも 1.0pix のときに比べて若干低い検出率となっていた。

また、各チャンネルでの測光結果を見ると、こちらも PSF 半値幅 1.0pix のときと同様に、一定等級星、両 GRB モデルどちらにおいても、測定等級の誤差の範囲に設定等級が入っていないものが多いことがわかる。そして検出されたものの中でも、0.1 等以上明るくなっている、かつ 3σ 以上設定等級より明るくなっているものの割合を百分率で表した結果、次のようになった。

等級	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
~19.5mag	54.3	50.0	60.8	53.4
20.0mag~	100.0	87.5	76.5	71.4

図 3.18: 各チャンネルにおける、背景星が測光値へ影響した割合 (PSF 半値幅 1.5pix)

これをみると、こちらも 1.0pix のときと同様に、チャンネルに寄らず、より暗い星像の方が設定等級よりも明るく測定される割合が多いことや、20 等以上の星像はチャンネル数が小さくなるほどその割合が多くなるということがわかる。また、20 等以上の星像が明るく測定された割合は、1.0pix の場合と比べるとどのチャンネルにおいても大きかった。

- IRAF による検出

参考として、PSF 半値幅 1.5pix の各チャンネル同じ画像で、我々が良く使い慣れている IRAF を用いて天体検出及び測光を行った。その結果を 48 ページから 51 ページの図 3.32、図 3.33、図 3.34、図 3.35 に記した。パラメータを $scale=2.0$, $fwhmpsf=3.0$, $threshold=3.0$, $aperture=3$, $annulus=3$, $dannulus=1.5$ として調整し、IRAF の天体検出・測光機能 (DAOPHOT パッケージ) を用いており、こちらも同様に、一定等級星 (17~19.5 等) 140 個、一定等級星 (20,20.5 等) 40 個、一定等級星 (21,21.5 等) 40 個、高赤方偏移 GRB モデル 160 個、星間赤化 GRB モデル 160 個の検出結果を、百分率でまとめると次のようになった。

モデル	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
一定等級星(~19.5mag)	100.0	100.0	100.0	100.0
一定等級星(20,20.5mag)	100.0	100.0	100.0	100.0
一定等級星(21mag~)	10.0	30.0	50.0	70.0
高赤方偏移GRB	35.0	52.5	85.0	92.5
星間赤化GRB	30.0	27.5	67.5	95.0

図 3.19: IRAF による各チャンネルの画像における星像の検出率 (PSF 半値幅 1.5pix)

これをみると、19.5 等以下の星像および 20 等台の星像の検出率は 100%、両 GRB モデルの検出率は、Gnuastro による検出に比べて各チャンネルにおいて 2 倍以上となっており、Gnuastro と比較すると高い検出率であることがわかる。

そして、各チャンネルでの測光結果を見ると、20.0 等で 0.1 等程度の誤差で多くの星が測光できている。そして、検出されたものの中でも、0.1 等以上明るくなっている、かつ 3σ 以上設定等級より明るくなっているものの割合を百分率で表した結果、次のようになった。

等級	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
~19.5mag	5.7	7.5	3.6	8.1
20.0mag~	58.1	23.4	15.6	14.9

図 3.20: IRAF による各チャンネルにおける、背景星が測光値へ影響した割合 (PSF 半値幅 1.5pix)

これをみると、19.5 等以下の星像における割合は 1 割未満、20 等以上の星像における割合は Ch.1 では 6 割ほどあるものの、その他のチャンネルでは 2 割程度と、設定等級より明るく測定されているものの割合は Gnuastro に比べると少なかった。

3.3.3 考察

まず、Gnuastro を用いた検出では PSF 半値幅 1.0pix, 1.5pix どちらにおいても、限界等級より明るい星でも検出されなかった例が存在したことについて、ある同じ等級の人工星で検出されなかった部分と、検出された部分を見比べてみると、次のようになっていた。

(a) PSF 半値幅 1.5pix、 $x=675$ における $y=200$ での人工星像 (b) PSF 半値幅 1.0pix、 $x=675$ における $y=600$ での人工星像

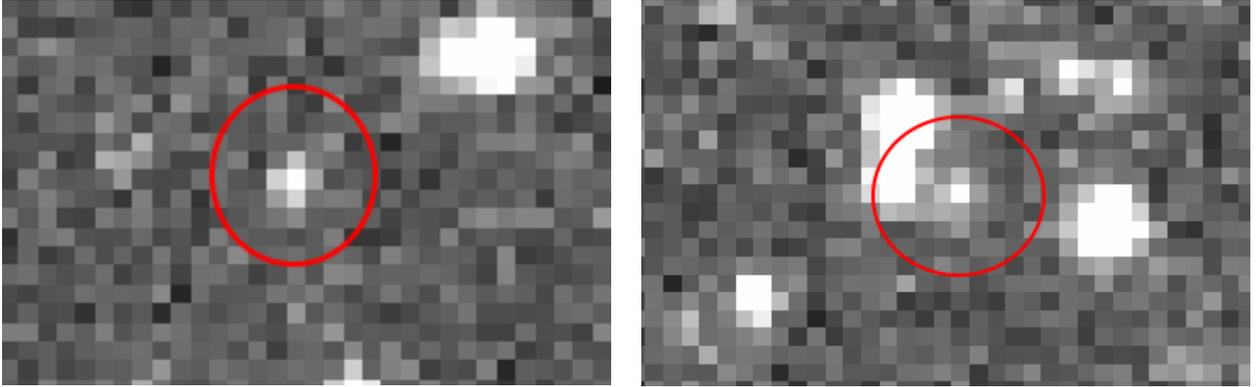


図 3.21: 設定等級とよく一致していて、検出された部分の星像 (左) とうまく検出されなかった部分の星像 (右)

これをみると、背景星によるコンタミネーションの影響を受けて、近傍のさらに明るい背景星のカウントに飲み込まれ、背景星の検出領域に含まれたことが、限界等級よりも明るい人工星像が検出されなかった事例が存在した理由であると考えることができる。

一定等級星、両 GRB モデルの検出率をまとめた結果 (図 3.15, 図 3.17) において、PSF 半値幅が 1.5pix の方が、PSF 半値幅が 1.0pix に比べると限界等級付近の一定等級星の検出率が高かったのは、検出前に畳み込むカーネルの半値幅が 1.5 倍大きかったため、星像がより滑らかになったことで、外れ値として除外されにくかったからではないかと考えられる。

そして PSF 半値幅が 1.5pix の場合、PSF 半値幅が 1.0pix の場合に比べると両 GRB モデルの検出率が小さかったのは、点拡がりが大きいため、星像からのカウントがより広い範囲に分配されることでなまってしまい、背景星からの影響を大きく受けてしまったことがその理由であると考えられる。

また、測光の結果 (図 3.24, 図 3.25, 図 3.26, 図 3.27, 図 3.28, 図 3.29, 図 3.30, 図 3.31) を見渡すと、Gnuastro では PSF 半値幅の大きさ、チャンネル問わず、節 3.2.3 の結果と比べて、設定等級と誤差の範囲内で一致しない測定等級の割合が大きかった。また、図 3.16, 図 3.18 をみると、19.5 等以下の星像においても 50% 以上が設定等級よりも 3σ 以上明るく測定されていた。そのため、よく一致している測光等級部分の星像と、一致していない測光等級部分の星像を見比べてみた結果次のようになっていた。

(a) PSF 半値幅 1.0pix、 $y=200$ における $x=200,225,250$ での人工星像 (b) PSF 半値幅 1.0pix、 $y=600$ における $x=200,225,250$ での人工星像

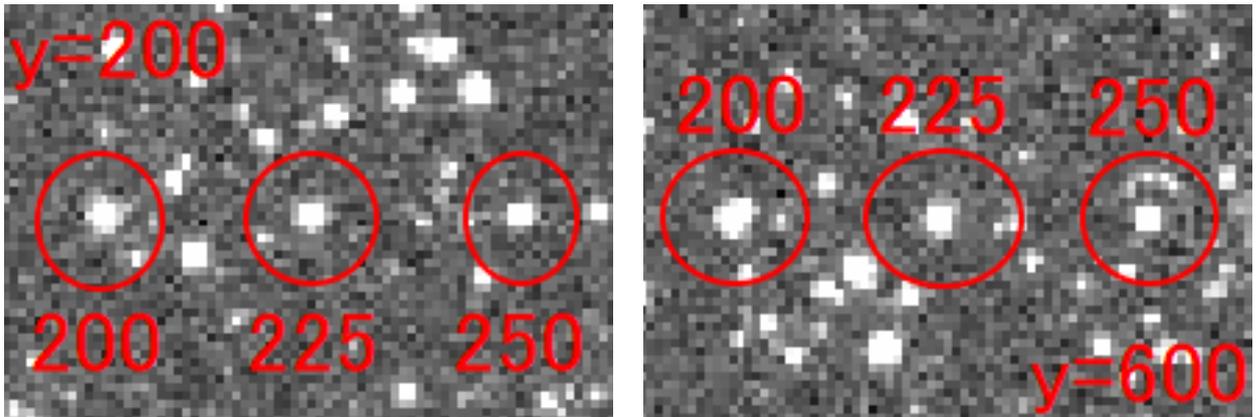


図 3.22: 設定等級とよく一致している測光等級部分の星像（左）と一致していない測光等級部分の星像（右）

これらは、PSF 半値幅が 1.0pix の場合の Ch.4 画像での、ピクセル y 座標が 200 と 600 におけるピクセル x 座標 200,225,250 に埋め込んだ人工星像である。右図の 250 がわかりやすいが、右図には人工星像の周りに明るい星が多く存在していることが見て取れる。そこで、図 3.22 における星像を測光する際に用いられた開口面積を調べたところ、次のようになっていた。

x	設定等級	y=200	y=600
200	17	85	153
225	17.5	107	128
250	18	64	182

図 3.23: 図 3.22 における星像の測光に用いられた開口面積 (pix^2)

この表をみると、図 3.22 の右図の星像の測光に用いられた開口面積は、左図のものより大きいことがわかる。その中でも $y=600, x=200$ における開口面積が最も大きかった。このことから、測定等級が設定等級と誤差の範囲で一致しない事例が存在する理由は、画像に多数の背景星を埋め込んでいるため、人工星像の周りにそれらが密集している場合、人工星像周りのカウント数が上昇することで、実際の星像の拡がりより大きい天体検出領域として検出されたためであると考えられる。

よって、図 3.16、図 3.18 のように 20 等以上の星像において、チャンネル数が小さくなるほど設定等級より明るく測定される星の割合が増加したのは、チャンネル数が小さくなるほど両 GRB モデルは暗くなるため、小さいチャンネル数ではそれらの GRB モデルが

背景星のコンタミネーションの影響を大きく受けたことが理由だと考えられる。そして PSF 半値幅が 1.5pix の場合、PSF 半値幅が 1.0pix の場合に比べると、20 等以上の星像が設定等級より明るく測定された割合が多かったのは、星像の点拡がりが大きく、より背景星の影響を受けやすかったためであると考えられる。

IRAF を用いた検出・測光結果においても、多くの星で 20.0 等で 0.1 等程度の誤差で測光ができていて、 3σ 以上明るくなっているものが 19.5 等以下の星像においても 5% 前後、20 等以上の星像においては Ch.1 で 6 割、その他チャンネルでは 2 割近くあったことから、周囲の背景星からの影響が見て取れた。そして、よく検出パラメータを調整した上で検出処理を行ったため、Gnuastro のときに比べて、高い割合で天体を検出することができた。

以上のことから、多数の星が密集している状態で、HZG の限界等級 ~20.5 等級の明るさの天体を検出し、測光を行う際には、天体検出の際に行う畳込み処理のパラメータを工夫することや、目標天体周辺の星の影響を小さくするため、検出パラメータの工夫（検出をかける際のグリッドサイズを更に小さくするなど）をすることが重要であるといえる。

節 3.2 において、背景星が混んでいない状況では Gnuastro で仕様どおりの検出および十分な精度の測光ができることを確認したが、背景星が混んでいる状態での天体検出については、Gnuastro では暗い星の検出率が悪くなった。上記のように、天体検出の成功率はどれだけパラメータをよく調整できるかによるところが大きいが、今回は時間の都合上 Gnuastro であまり試すことができなかった。IRAF による検出などの既存の方法では、パラメータの最適化を行えば検出できるものも多かったことから、Gnuastro でもさらにパラメータの調整及び最適化を行う余地があると考えられる。

星間赤化GRB 高赤方偏移GRB 一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.994	0.009	16.921	0.010	16.967	0.009	16.987	0.009	16.892	0.009
225	17.5	17.51	0.01	17.30	0.01	17.37	0.01	17.43	0.01	17.42	0.01
250	18	18.01	0.02	17.80	0.02	17.94	0.02	17.89	0.01	17.67	0.02
275	18.5	18.51	0.02	17.94	0.02	17.90	0.01	18.38	0.02	18.41	0.02
300	19	18.79	0.03	19.04	0.03	18.94	0.03	18.38	0.02	18.34	0.02
325	19.5	19.09	0.03	19.58	0.03	19.13	0.03	19.02	0.03	19.06	0.04
350	20	19.66	0.06	19.12	0.03	19.27	0.04	19.88	0.04	19.33	0.04
375	20.5	20.39	0.05	20.9	0.1	19.80	0.06	20.27	0.05	20.23	0.07
400	21	20.77	0.09	20.7	0.1	20.53	0.06	21.07	0.07	21.27	0.09
425	21.5	21.27	0.08	21.18	0.08	21.09	0.08	21.29	0.08	21.34	0.09
450	13.375	13.372	0.002	13.360	0.002	13.369	0.002	12.671	0.001	13.368	0.002
475	20.3855	20.31	0.05	20.44	0.05	20.41	0.05	19.93	0.05	19.97	0.04
500	20.3855	20.43	0.05	20.52	0.07	20.57	0.06	19.92	0.04	20.11	0.05
525	20.3855	19.93	0.06	20.29	0.07	20.50	0.07	19.97	0.06	20.28	0.05
550	20.3855	20.29	0.05	20.28	0.07	20.33	0.05	20.48	0.05	19.39	0.03
575	18.5306	18.49	0.02	18.50	0.02	18.45	0.02	18.30	0.02	18.55	0.02
600	18.5306	18.33	0.02	18.52	0.02	18.55	0.02	18.51	0.03	18.39	0.02
625	19.5305	19.61	0.04	19.22	0.04	19.44	0.03	19.29	0.04	19.56	0.04
650	19.5305	19.10	0.03	19.46	0.03	19.48	0.03	19.31	0.04	19.50	0.03
675	20.2661	20.10	0.04	20.27	0.05	20.33	0.05	20.22	0.05	20.31	0.07
700	20.2661	20.17	0.05	20.14	0.05	20.05	0.04	20.23	0.05	20.09	0.04
725	20.2745	20.17	0.06	20.34	0.05	19.89	0.05	19.85	0.05	20.25	0.05
750	20.2741	20.19	0.06	20.40	0.05	20.02	0.05	20.03	0.05	20.26	0.05
775	18.5213	18.27	0.02	18.35	0.02	18.45	0.02	18.50	0.02	18.57	0.02
800	18.5229	18.14	0.02	18.29	0.02	18.28	0.02	18.39	0.02	18.41	0.02
825	19.5239	19.54	0.03	19.46	0.03	19.16	0.03	19.53	0.03	19.49	0.03
850	19.5181	19.17	0.03	19.27	0.03	19.25	0.04	19.49	0.03	19.34	0.03

図 3.24: PSF 半値幅 1.0pix の星像をのせた Ch.4 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.986	0.008	16.887	0.009	16.900	0.009	17.001	0.009	16.925	0.008
225	17.5	17.50	0.01	17.26	0.01	17.324	0.009	17.47	0.01	17.44	0.01
250	18	17.97	0.01	17.77	0.01	17.62	0.01	17.83	0.01	18.00	0.01
275	18.5	18.38	0.02	18.05	0.02	17.94	0.01	18.46	0.02	18.39	0.02
300	19	18.76	0.02	18.97	0.02	18.97	0.03	18.56	0.02	15.81	0.00
325	19.5	19.00	0.03	19.57	0.03	19.27	0.03	19.40	0.03	19.16	0.03
350	20	20.07	0.04	19.54	0.03	19.23	0.03	19.55	0.04	19.33	0.03
375	20.5	19.81	0.05	20.44	0.05	19.78	0.05	20.35	0.04	20.35	0.04
400	21	21.12	0.07	21.11	0.07	20.45	0.05	20.29	0.06	19.46	0.04
425	21.5	20.01	0.06	21.11	0.07	21.18	0.07	21.28	0.07	20.26	0.06
450	13.375	13.372	0.001	13.363	0.001	13.372	0.001	12.577	0.001	13.368	0.001
475	20.5256	20.48	0.05	20.60	0.05	20.47	0.06	20.55	0.05	19.95	0.04
500	20.5256	20.71	0.07	20.54	0.06	20.70	0.05	20.07	0.04	20.23	0.05
525	20.5256	20.10	0.06	20.44	0.05	20.60	0.05	20.08	0.05	20.43	0.05
550	20.7562	20.65	0.05	20.51	0.07	20.66	0.05	20.90	0.06	19.74	0.03
575	19.0831	18.93	0.02	19.00	0.03	18.88	0.02	18.76	0.02	19.07	0.03
600	19.0831	18.88	0.03	19.08	0.03	19.07	0.02	18.88	0.03	18.98	0.02
625	20.0829	20.14	0.05	19.77	0.05	19.92	0.04	19.75	0.06	20.13	0.06
650	20.2726	20.21	0.04	20.19	0.04	20.17	0.04	20.21	0.04	20.23	0.04
675	20.6015	20.36	0.04	20.32	0.05	20.67	0.05	20.22	0.07	20.70	0.07
700	20.6015	20.49	0.05	20.43	0.05	20.30	0.08	20.58	0.05	20.43	0.05
725	21.1107	20.78	0.07	21.27	0.07	20.84	0.06	21.57	0.09	21.04	0.06
750	21.4686	21.8	0.1	21.7	0.1	20.99	0.06	21.6	0.2	21.42	0.08
775	19.1106	19.12	0.02	18.90	0.03	18.97	0.03	19.07	0.02	19.10	0.02
800	19.2367	19.24	0.02	19.24	0.03	18.86	0.02	18.83	0.03	19.06	0.03
825	20.7184	20.69	0.05	20.56	0.05	19.85	0.03	20.35	0.06	20.52	0.05
850	21.058	20.88	0.06	21.09	0.07	21.34	0.08	20.96	0.06	21.08	0.06

図 3.25: PSF 半値幅 1.0pix の星像をのせた Ch.3 画像における検出・測光結果

一定等級星像 高赤方偏移GRB 星間赤化GRB

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17.0	16.960	0.007	16.904	0.007	16.978	0.007	16.981	0.007	16.974	0.007
225	17.5	17.493	0.009	17.210	0.009	17.345	0.008	17.515	0.009	17.462	0.009
250	18	18.00	0.01	17.80	0.01	17.78	0.01	17.84	0.01	18.03	0.01
275	18.5	18.42	0.02	18.09	0.02	17.98	0.01	18.46	0.02	18.40	0.01
300	19	18.81	0.02	19.04	0.02	18.82	0.02	18.63	0.02	15.66	0.004
325	19.5	19.13	0.03	19.23	0.03	19.21	0.02	19.31	0.03	19.35	0.03
350	20	20.05	0.03	19.56	0.02	19.97	0.03	19.92	0.03	20.09	0.03
375	20.5	19.72	0.04	20.27	0.04	20.07	0.04	20.41	0.04	20.39	0.04
400	21	21.14	0.06	21.15	0.06	20.46	0.04	20.63	0.06	21.34	0.07
425	21.5	20.87	0.08	21.08	0.06	21.22	0.06	21.32	0.06	21.44	0.07
450	13.375	13.372	0.001	13.360	0.001	13.373	0.001	12.578	0.0008	13.369	0.001
475	20.7496	20.71	0.04	20.19	0.05	20.84	0.05	20.77	0.05	20.10	0.03
500	21.3132	21.38	0.07	21.10	0.08	21.76	0.08	20.60	0.04	20.53	0.05
525	22.4635	22.7	0.2	22.1	0.1	23.2	0.2	21.61	0.08	22.1	0.1
550	99.9	22.9	0.2	nan	nan	24.1	0.6	nan	nan	20.53	0.04
575	19.9469	19.52	0.03	19.80	0.04	19.77	0.03	19.52	0.03	19.93	0.03
600	20.3611	20.21	0.03	20.20	0.05	20.25	0.04	20.39	0.04	20.25	0.05
625	22.3502	22.8	0.2	22.2	0.1	21.51	0.07	23.1	0.3	22.0	0.1
650	99.9	23.8	0.5	23.1	0.2	22.5	0.1	23.0	0.2	26	2
675	21.3645	20.97	0.05	20.84	0.06	21.38	0.07	21.25	0.06	21.35	0.07
700	21.3509	21.22	0.06	20.99	0.05	21.0	0.1	21.28	0.06	21.03	0.05
725	23.0358	22.5	0.1	24.3	0.7	21.82	0.09	nan	nan	22.9	0.2
750	24.1001	nan	nan	nan	nan	21.76	0.08	24.0	0.6	24.2	0.7
775	20.4795	20.50	0.04	20.60	0.04	19.90	0.04	20.41	0.04	20.45	0.04
800	20.8854	20.86	0.05	20.98	0.05	20.96	0.05	21.3	0.1	20.38	0.06
825	23.3502	23.2	0.2	22.5	0.1	20.45	0.04	23.6	0.4	22.0	0.1
850	24.3223	22.5	0.2	25	1	nan	nan	23.0	0.2	23.6	0.3

図 3.26: PSF 半値幅 1.0pix の星像をのせた Ch.2 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.973	0.005	16.938	0.005	16.920	0.006	16.960	0.005	16.978	0.005
225	17.5	17.500	0.007	17.312	0.007	17.370	0.006	17.515	0.007	17.483	0.007
250	18	17.920	0.009	17.862	0.008	17.721	0.009	17.833	0.009	18.015	0.009
275	18.5	18.52	0.01	18.11	0.01	18.106	0.009	18.38	0.01	18.40	0.01
300	19	18.87	0.02	18.98	0.02	18.90	0.01	18.73	0.01	15.610	0.003
325	19.5	18.98	0.02	19.26	0.02	18.89	0.01	19.25	0.02	19.27	0.02
350	20	19.60	0.03	19.08	0.02	19.96	0.02	19.58	0.02	19.70	0.02
375	20.5	20.00	0.03	19.81	0.03	19.75	0.03	19.54	0.02	20.42	0.03
400	21	21.14	0.04	21.13	0.04	19.26	0.02	20.99	0.04	19.83	0.03
425	21.5	21.41	0.05	21.15	0.04	21.35	0.05	21.34	0.05	21.40	0.05
450	13.375	13.372	0.001	13.362	0.001	13.374	0.001	12.544	0.001	13.368	0.001
475	23.7302	23.5	0.3	24.0	0.4	nan	nan	24.1	0.4	21.05	0.04
500	99.9	nan	nan	25	1	nan	nan	21.47	0.05	nan	nan
525	99.9	nan	nan	23.2	0.2	nan	nan	22.38	0.09	23.8	0.3
550	99.9	23.3	0.2	nan	25	1	nan	nan	20.84	0.04	
575	23.3949	23.3	0.2	22.4	0.1	22.8	0.1	21.73	0.06	23.2	0.2
600	99.9	22.5	0.1	24.2	0.5	25	1	nan	nan	23.6	0.3
625	99.9	nan	nan	24.6	0.7	22.5	0.1	nan	nan	23.8	0.3
650	99.9	23.3	0.2	23.2	0.2	22.7	0.1	23.3	0.2	27	7
675	23.1619	21.88	0.07	23.2	0.2	23.0	0.2	22.6	0.1	23.1	0.2
700	23.1966	22.6	0.1	22.01	0.07	21.92	0.07	22.8	0.1	22.23	0.09
725	28.0783	23.8	0.3	nan	nan	22.4	0.1	nan	nan	24.7	0.6
750	31.3355	nan	nan	nan	nan	22.20	0.08	nan	nan	nan	nan
775	23.9211	24.7	0.7	nan	nan	22.5	0.1	23.1	0.2	23.4	0.2
800	25.016	24.2	0.5	nan	nan	nan	nan	nan	nan	23.5	0.2
825	30.586	26	2	25	1	20.71	0.03	28	15	22.5	0.1
850	33.6946	22.4	0.1	nan	nan	nan	nan	24.9	0.8	23.7	0.3

図 3.27: PSF 半値幅 1.0pix の星像をのせた Ch.1 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.94	0.01	16.84	0.01	16.90	0.01	16.94	0.01	16.90	0.01
225	17.5	17.47	0.01	17.16	0.01	17.46	0.01	17.43	0.01	17.43	0.01
250	18	17.98	0.02	17.79	0.02	17.55	0.01	17.86	0.02	17.68	0.02
275	18.5	18.50	0.02	18.36	0.02	17.88	0.02	18.33	0.02	18.36	0.02
300	19	18.70	0.03	19.03	0.03	18.97	0.03	18.36	0.02	16.16	0.01
325	19.5	19.41	0.03	19.57	0.04	19.29	0.03	19.05	0.03	19.06	0.04
350	20	19.96	0.04	18.97	0.03	19.17	0.04	19.39	0.04	19.29	0.04
375	20.5	19.93	0.06	20.55	0.07	19.21	0.04	19.49	0.04	20.15	0.07
400	21	21.18	0.09	19.13	0.05	19.01	0.03	20.21	0.08	18.76	0.03
425	21.5	20.8	0.1	20.87	0.07	18.86	0.03	20.97	0.08	21.4	0.1
450	13.375	13.368	0.002	13.358	0.002	13.370	0.002	12.671	0.001	13.365	0.002
475	20.3855	20.32	0.05	20.37	0.05	19.98	0.06	20.35	0.05	19.76	0.04
500	20.3855	20.48	0.06	20.48	0.06	20.43	0.06	19.67	0.04	20.52	0.06
525	20.3855	20.38	0.06	20.46	0.06	20.5	0.1	19.90	0.05	20.07	0.05
550	20.3855	20.21	0.05	20.41	0.06	20.26	0.05	20.32	0.05	19.11	0.03
575	18.5306	18.28	0.02	18.38	0.02	18.43	0.02	18.22	0.02	18.50	0.02
600	18.5306	18.28	0.02	18.46	0.02	18.52	0.02	18.35	0.02	18.45	0.02
625	19.5305	19.61	0.04	19.12	0.03	19.30	0.03	19.56	0.03	19.48	0.04
650	19.5305	19.78	0.03	19.66	0.03	19.32	0.03	19.26	0.04	19.47	0.03
675	20.2661	20.19	0.08	20.31	0.07	20.19	0.05	20.35	0.05	20.10	0.05
700	20.2661	20.37	0.05	20.45	0.05	19.88	0.04	20.19	0.05	20.09	0.05
725	20.2745	20.20	0.09	20.26	0.05	19.79	0.04	20.38	0.05	20.31	0.06
750	20.2741	20.00	0.05	20.5	0.1	19.94	0.04	19.96	0.06	19.95	0.06
775	18.5213	18.20	0.02	18.44	0.02	18.33	0.02	18.48	0.02	18.51	0.02
800	18.5229	18.23	0.02	18.37	0.02	18.45	0.02	18.51	0.02	18.35	0.02
825	19.5239	19.34	0.05	19.34	0.06	19.09	0.03	19.47	0.03	19.40	0.04
850	19.5181	19.51	0.05	19.48	0.03	19.20	0.04	19.42	0.03	19.20	0.03

図 3.28: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.4 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.913	0.008	16.855	0.009	16.858	0.009	16.954	0.008	16.931	0.008
225	17.5	17.48	0.01	17.28	0.01	16.58	0.01	17.48	0.01	17.45	0.01
250	18	17.89	0.01	17.98	0.01	17.67	0.01	17.82	0.01	17.97	0.01
275	18.5	18.31	0.02	18.22	0.02	17.94	0.01	18.31	0.02	18.37	0.02
300	19	18.82	0.02	19.04	0.03	19.03	0.03	18.51	0.02	15.802	0.005
325	19.5	19.41	0.03	19.36	0.03	19.33	0.03	18.69	0.03	18.98	0.03
350	20	19.94	0.04	18.80	0.02	19.15	0.04	19.45	0.04	19.10	0.04
375	20.5	20.02	0.05	20.60	0.06	19.76	0.05	20.26	0.04	20.19	0.06
400	21	21.18	0.08	21.16	0.07	19.13	0.04	20.01	0.06	18.77	0.03
425	21.5	20.84	0.09	20.78	0.06	20.74	0.06	21.01	0.07	21.41	0.09
450	13.375	13.371	0.001	13.362	0.001	13.373	0.001	12.577	0.001	13.365	0.001
475	20.5256	20.51	0.05	20.53	0.05	20.49	0.05	20.49	0.05	19.70	0.03
500	20.5256	20.62	0.06	20.59	0.06	20.57	0.05	19.85	0.04	20.69	0.06
525	20.5256	20.48	0.05	20.63	0.06	20.42	0.06	20.17	0.04	20.19	0.04
550	20.7562	20.54	0.05	20.85	0.06	20.59	0.05	20.65	0.06	19.43	0.03
575	19.0831	18.89	0.02	18.88	0.03	18.97	0.02	18.70	0.02	19.04	0.03
600	19.0831	18.78	0.03	19.03	0.03	19.10	0.03	18.94	0.03	18.95	0.02
625	20.0829	20.12	0.04	19.95	0.04	19.07	0.02	19.79	0.05	20.05	0.05
650	20.2726	20.19	0.04	20.03	0.04	19.71	0.03	20.38	0.05	20.26	0.04
675	20.6015	20.6	0.1	20.45	0.05	19.90	0.04	20.72	0.06	20.42	0.05
700	20.6015	20.40	0.05	20.37	0.05	20.27	0.07	20.50	0.05	20.48	0.05
725	21.1107	21.09	0.07	20.99	0.07	20.90	0.07	21.39	0.09	21.02	0.07
750	21.4686	22.2	0.2	21.8	0.1	20.88	0.06	21.14	0.07	21.40	0.09
775	19.1106	18.89	0.03	19.01	0.02	18.98	0.02	19.07	0.02	19.09	0.03
800	19.2367	19.23	0.03	19.17	0.02	19.11	0.02	18.84	0.02	18.98	0.03
825	20.7184	20.70	0.06	20.40	0.05	19.72	0.03	20.59	0.05	20.52	0.05
850	21.058	20.83	0.06	21.04	0.07	21.28	0.08	20.77	0.06	20.91	0.06

図 3.29: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.3 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.951	0.007	16.857	0.007	16.946	0.008	16.938	0.007	16.930	0.007
225	17.5	17.48	0.01	17.09	0.01	17.45	0.01	17.51	0.01	17.45	0.01
250	18	17.91	0.01	17.86	0.01	17.76	0.01	17.81	0.01	17.88	0.01
275	18.5	18.36	0.02	18.05	0.02	17.98	0.01	18.33	0.02	18.43	0.02
300	19	18.61	0.02	19.04	0.02	18.97	0.02	18.69	0.02	15.65	0.00
325	19.5	19.13	0.02	19.57	0.03	19.31	0.02	19.27	0.03	18.92	0.03
350	20	19.32	0.03	18.81	0.02	19.18	0.03	19.59	0.03	19.24	0.03
375	20.5	20.24	0.05	20.29	0.04	19.80	0.04	19.58	0.03	19.85	0.04
400	21	19.00	0.03	21.23	0.07	19.22	0.03	19.93	0.05	18.68	0.03
425	21.5	21.20	0.07	20.80	0.05	20.76	0.05	20.01	0.05	21.37	0.07
450	13.375	13.373	0.001	13.362	0.001	13.371	0.001	12.577	0.001	13.364	0.001
475	20.7496	20.76	0.05	20.38	0.06	20.72	0.05	20.70	0.05	19.80	0.03
500	21.3132	21.50	0.09	21.46	0.09	21.50	0.08	20.33	0.04	21.49	0.09
525	22.4635	22.5	0.2	23.26	0.38	22.5	0.2	21.34	0.07	21.25	0.07
550	99.9	22.2	0.1 nan	nan	nan	22.9	0.3	23.8	0.6	20.01	0.03
575	19.9469	19.84	0.04	19.87	0.06	19.85	0.03	19.63	0.04	20.24	0.06
600	20.3611	19.91	0.05	20.27	0.06	20.29	0.04	20.33	0.07	20.18	0.06
625	22.3502	22.4	0.2	21.51	0.08	20.82	0.05	24.0	0.8	22.2	0.1
650	99.9	23.5	0.4	21.9	0.1	21.22	0.07	26	4 nan	nan	nan
675	21.3645	21.00	0.06	21.06	0.06	21.18	0.07	21.57	0.09	21.02	0.06
700	21.3509	20.94	0.06	20.90	0.05	20.9	0.1	21.16	0.07	21.06	0.06
725	23.0358	22.6	0.2	22.2	0.1	22.2	0.2	24.1	0.9	22.6	0.2
750	24.1001	nan	nan	nan	nan	21.59	0.09	22.3	0.2	23.6	0.5
775	20.4795	20.17	0.04	20.23	0.04	19.99	0.04	20.27	0.04	20.48	0.04
800	20.8854	20.83	0.05	20.62	0.05	20.86	0.05	20.88	0.05	20.89	0.05
825	23.3502	22.7	0.2	21.8	0.1	20.26	0.04	22.6	0.2	21.9	0.1
850	24.3223	22.1	0.1	23.4	0.4 nan	nan	nan	22.2	0.1	22.6	0.2

図 3.30: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.2 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	16.972	0.005	16.893	0.005	16.880	0.006	16.958	0.005	16.963	0.006
225	17.5	17.487	0.007	17.246	0.008	16.754	0.005	17.464	0.007	17.456	0.007
250	18	17.863	0.009	17.87	0.01	17.86	0.01	17.872	0.009	17.876	0.009
275	18.5	18.49	0.01	18.16	0.01	18.10	0.01	18.46	0.01	18.40	0.01
300	19	18.87	0.02	18.99	0.02	18.96	0.02	18.68	0.01	15.60	0.00
325	19.5	19.43	0.03	18.83	0.02	18.92	0.02	19.22	0.02	19.17	0.03
350	20	19.97	0.02	18.99	0.02	19.18	0.02	19.55	0.03	19.44	0.03
375	20.5	19.73	0.03	20.16	0.03	20.03	0.04	19.65	0.02	20.20	0.04
400	21	19.63	0.04	21.09	0.05	19.21	0.02	20.82	0.04	19.71	0.03
425	21.5	20.36	0.05	20.83	0.04	20.88	0.04	21.07	0.04	21.47	0.06
450	13.375	13.373	0.001	13.363	0.001	13.367	0.001	12.544	0.001	13.367	0.001
475	23.7302	24.0	0.5	23.2	0.2	23.3	0.3	23.2	0.2	20.53	0.03
500	99.9	nan	nan	nan	nan	nan	nan	21.05	0.05	nan	nan
525	99.9	25	1	nan	nan	23.7	0.4	22.11	0.09	21.98	0.09
550	99.9	22.5	0.1	nan	nan	23.1	0.2	24.6	0.9	20.29	0.03
575	23.3949	23.4	0.3	22.7	0.2	22.9	0.2	21.61	0.07	24.1	0.6
600	99.9	22.4	0.1	23.9	0.5	22.9	0.2	nan	nan	22.8	0.2
625	99.9	25.1	1.4	22.3	0.1	21.28	0.05	nan	nan	26	5
650	99.9	22.8	0.2	22.3	0.1	21.33	0.05	24.5	0.9	nan	nan
675	23.1619	22.0	0.1	22.2	0.1	21.96	0.08	23.2	0.3	22.3	0.1
700	23.1966	21.86	0.08	21.88	0.08	21.33	0.05	22.4	0.1	22.2	0.1
725	28.0783	23.4	0.3	23.2	0.3	22.4	0.1	nan	nan	24.1	0.6
750	31.3355	nan	nan	nan	nan	21.86	0.08	22.7	0.2	23.6	0.4
775	23.9211	nan	nan	21.99	0.09	23.0	0.2	22.1	0.1	22.8	0.2
800	25.016	24.4	0.8	22.4	0.1	24.5	0.8	23.3	0.3	23.6	0.3
825	30.586	23.5	0.3	22.7	0.2	20.51	0.03	22.6	0.1	22.2	0.1
850	33.6946	22.2	0.1	24.5	0.8	nan	nan	22.4	0.1	22.9	0.2

図 3.31: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.1 画像における検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	17.02	0.01	16.96	0.02	17.01	0.01	17.02	0.02	16.99	0.02
225	17.5	17.52	0.02	17.52	0.01	17.51	0.03	17.49	0.03	17.49	0.02
250	18	17.98	0.03	17.95	0.03	17.92	0.03	18.08	0.03	18.02	0.03
275	18.5	18.55	0.04	18.55	0.04	18.5	0.04	18.59	0.04	18.46	0.03
300	19	19.06	0.05	18.95	0.06	19	0.04	18.94	0.04	16.44	0.02
325	19.5	19.53	0.09	19.54	0.06	19.4	0.1	19.59	0.06	19.57	0.06
350	20	20.2	0.1	19.4	0.2	20.2	0.1	20.06	0.08	20.0	0.1
375	20.5	20.5	0.2	20.4	0.2	20.8	0.3	20.6	0.1	20.2	0.1
400	21	21.4	0.3	98.47	99	98.47	99	98.47	99	98.47	99
425	21.5	98.47	99	98.47	99	98.47	99	98.47	99	98.47	99
450	13.375	13.38	0	13.38	0	13.38	0	12.94	0.09	13.38	0
475	20.3855	20.3	0.1	20.5	0.1	20.4	0.1	20.5	0.2	98.47	99
500	20.3855	20.5	0.1	98.47	99	20.4	0.1	19.9	0.3	20.6	0.2
525	20.3855	20.2	0.1	20.6	0.2	20.3	0.2	20.05	0.06	20.16	0.06
550	20.3855	20.4	0.1	20.5	0.2	20.3	0.1	21.0	0.2	19.3	0.08
575	18.5306	18.54	0.03	18.52	0.04	18.62	0.04	18.45	0.04	18.54	0.03
600	18.5306	18.46	0.03	18.51	0.03	18.55	0.03	18.52	0.03	18.57	0.03
625	19.5305	19.52	0.07	19.64	0.08	19.26	0.07	19.55	0.05	19.47	0.06
650	19.5305	19.46	0.06	19.6	0.2	98.47	99	19.51	0.04	19.65	0.06
675	20.2661	98.47	99	20.3	0.2	20.4	0.2	20.3	0.2	98.47	99
700	20.2661	20.43	0.09	20.1	0.1	20.0	0.1	20.1	0.1	19.95	0.08
725	20.2745	20.2	0.1	20.4	0.1	20.4	0.1	20.6	0.2	20.4	0.2
750	20.2741	20.3	0.1	20.28	0.09	20.1	0.2	20.3	0.1	20.3	0.2
775	18.5213	18.53	0.03	18.53	0.04	18.58	0.04	18.56	0.05	18.53	0.04
800	18.5229	18.56	0.03	18.63	0.04	18.58	0.03	18.56	0.03	18.62	0.04
825	19.5239	19.42	0.07	19.30	0.07	19.13	0.05	19.55	0.07	19.37	0.07
850	19.5181	19.44	0.06	19.48	0.09	19.65	0.09	19.5	0.1	19.43	0.09

図 3.32: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.4 画像における、IRAF での検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	17.02	0.01	16.98	0.01	17.00	0.01	17.02	0.02	16.99	0.02
225	17.5	17.50	0.02	17.52	0.01	17.50	0.03	17.50	0.02	17.50	0.02
250	18	17.99	0.02	17.96	0.03	18.00	0.03	18.07	0.02	18.02	0.02
275	18.5	18.54	0.03	18.55	0.03	18.51	0.03	18.60	0.03	18.44	0.03
300	19	19.06	0.04	18.97	0.05	19.02	0.03	18.99	0.04	16.09	0.02
325	19.5	19.53	0.07	19.59	0.06	19.40	0.08	19.56	0.04	19.60	0.06
350	20	20.1	0.1	19.2	0.1	20.1	0.1	20.06	0.07	20.0	0.1
375	20.5	20.4	0.2	20.4	0.2	20.7	0.2	20.5	0.1	20.3	0.1
400	21	21.5	0.3	98.748	99	20.1	0.1	21.1	0.4	98.748	99
425	21.5	98.748	99	98.748	99	98.748	99	98.748	99	98.748	99
450	13.375	13.378	0	13.378	0	13.378	0	12.79	0.05	13.378	0
475	20.5256	20.4	0.1	20.7	0.2	20.7	0.1	20.7	0.2	98.748	99
500	20.5256	20.6	0.1	98.748	99	20.5	0.1	20.2	0.2	20.7	0.2
525	20.5256	20.4	0.1	20.7	0.2	20.4	0.2	20.10	0.05	20.35	0.07
550	20.7562	20.7	0.1	98.748	99	20.6	0.2	98.748	99	19.6	0.1
575	19.0831	19.16	0.05	19.08	0.04	19.14	0.06	19.05	0.06	19.12	0.04
600	19.0831	18.98	0.04	19.06	0.04	19.08	0.04	19.06	0.04	19.06	0.04
625	20.0829	20.1	0.1	20.1	0.1	19.6	0.1	20.06	0.07	19.91	0.08
650	20.2726	20.14	0.09	20.2	0.2	98.748	99	20.27	0.08	20.53	0.08
675	20.6015	98.748	99	20.4	0.2	20.7	0.2	20.6	0.2	98.748	99
700	20.6015	20.7	0.1	20.4	0.1	20.4	0.1	20.3	0.1	20.33	0.09
725	21.1107	21.2	0.2	98.748	99	20.8	0.1	98.748	99	98.748	99
750	21.4686	98.748	99	98.748	99	21.0	0.4	98.748	99	98.748	99
775	19.1106	19.13	0.04	19.12	0.04	19.18	0.06	19.12	0.08	19.2	0.1
800	19.2367	19.32	0.05	19.34	0.06	19.37	0.04	19.26	0.04	19.3	0.1
825	20.7184	20.4	0.1	20.6	0.2	19.75	0.07	20.6	0.1	20.3	0.1
850	21.058	20.6	0.2	98.748	99	98.748	99	98.748	99	98.748	99

図 3.33: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.3 画像における、IRAF での検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	17.01	0.01	16.98	0.01	17.00	0.01	17.01	0.02	17.01	0.01
225	17.5	17.52	0.01	17.52	0.01	17.51	0.03	17.50	0.02	17.49	0.02
250	18	17.98	0.02	17.99	0.02	18.02	0.02	18.08	0.02	18.00	0.02
275	18.5	18.54	0.03	18.53	0.03	18.51	0.04	18.62	0.02	18.47	0.03
300	19	19.05	0.04	18.96	0.05	18.96	0.03	19.05	0.05	15.91	0.02
325	19.5	19.51	0.07	19.62	0.06	19.39	0.09	19.56	0.04	19.57	0.05
350	20	19.9	0.1	19.2	0.1	20.1	0.2	20.08	0.06	20.1	0.1
375	20.5	20.4	0.2	20.3	0.1	20.6	0.1	20.6	0.1	20.2	0.1
400	21	21.6	0.2	99.118	99	20.17	0.06	20.9	0.3	99.118	99
425	21.5	99.118	99	21.0	0.3	99.118	99	99.118	99	21.0	0.2
450	13.375	13.368	0	13.378	0	13.378	0	12.78	0.05	13.378	0
475	20.7496	20.6	0.2	20.8	0.2	20.6	0.1	20.8	0.2	99.118	99
500	21.3132	21.4	0.2	99.118	99	99.118	99	20.6	0.4	21.5	0.4
525	22.4635	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99
550	99.9	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99	19.73	0.05
575	19.9469	20.0	0.1	19.86	0.06	20.0	0.1	19.69	0.08	19.89	0.05
600	20.3611	20.14	0.09	20.2	0.1	20.5	0.1	20.3	0.1	20.37	0.09
625	22.3502	99.118	99	99.118	99	19.84	0.08	99.118	99	21.4	0.3
650	99.9	99.118	99	21.3	0.2	99.118	99	99.118	99	99.118	99
675	21.3645	99.118	99	20.7	0.2	99.118	99	21.2	0.4	99.118	99
700	21.3509	99.118	99	20.8	0.1	99.118	99	20.37	0.09	20.9	0.1
725	23.0358	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99
750	24.1001	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99
775	20.4795	20.6	0.1	99.118	99	20.6	0.2	99.118	99	20.3	0.2
800	20.8854	99.118	99	99.118	99	21.3	0.2	20.8	0.1	99.118	99
825	23.3502	99.118	99	99.118	99	20.58	0.08	99.118	99	99.118	99
850	24.3223	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99	99.118	99

図 3.34: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.2 画像における、IRAF での検出・測光結果

星間赤化GRB

高赤方偏移GRB

一定等級星像

x	設定等級	y=200	誤差(200)	y=300	誤差(300)	y=400	誤差(400)	y=500	誤差(500)	y=600	誤差(600)
200	17	17.01	0.01	16.99	0.01	17.00	0.01	17.00	0.01	17.01	0.01
225	17.5	17.52	0.01	17.52	0.01	17.52	0.02	17.51	0.02	17.50	0.02
250	18	17.99	0.01	18.01	0.02	18.01	0.02	18.06	0.02	18.02	0.02
275	18.5	18.51	0.02	18.53	0.02	18.53	0.04	18.62	0.02	18.49	0.03
300	19	19.06	0.03	18.96	0.04	18.99	0.03	19.05	0.04	15.85	0.02
325	19.5	19.58	0.06	19.62	0.05	19.30	0.08	19.53	0.04	19.57	0.04
350	20	19.9	0.1	19.5	0.1	22	2	20.06	0.06	20.0	0.1
375	20.5	20.4	0.1	20.3	0.1	20.4	0.1	20.6	0.1	20.2	0.1
400	21	21.6	0.2	21.5	0.3	20.2	0.1	21.0	0.2	99.708	99
425	21.5	99.708	99	21.0	0.3	99.708	99	23	1	20.9	0.2
450	13.38	13.378	0	13.378	0	13.378	0	12.79	0.05	13.378	0
475	23.73	21.9	0.3	21.5	0.2	24	2	99.708	99	99.708	99
500	99.9	99.708	99	99.708	99	99.708	99	21.0	0.3	24	2
525	99.9	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99
550	99.9	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99	20.02	0.09
575	23.39	99.708	99	21.8	0.2	99.708	99	99.708	99	99.708	99
600	99.9	21.5	0.4	99.708	99	24	2	21.498	0.2	99.708	99
625	99.9	21.9	0.4	99.708	99	20.03	0.06	99.708	99	22.3	0.7
650	99.9	99.708	99	21.7	0.3	99.708	99	99.708	99	99.708	99
675	23.16	23	1	21.7	0.5	99.708	99	99.708	99	99.708	99
700	23.2	21.5	0.2	99.708	99	99.708	99	21.1	0.2	21.6	0.3
725	28.08	22.2	0.7	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99
750	31.34	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99
775	23.92	99.708	99	99.708	99	24	3	21.1	0.2	99.708	99
800	25.02	99.708	99	22.3	0.5	99.708	99	99.708	99	21.4	0.2
825	30.59	99.708	99	99.708	99	20.89	0.08	99.708	99	99.708	99
850	33.69	21.0	0.3	99.708	99	99.708	99	99.708	99	99.708	99

図 3.35: PSF 半値幅 1.5pix の星像をのせた Ch.1 画像における、IRAF での検出・測光結果

第4章 まとめと課題

今回私は、HiZ-GUNDAMに搭載される4チャンネルの可視赤外線望遠鏡で、高赤方偏移のGRBを実際に検出できるかどうかを、シミュレーション画像を用いて確認することを目的として検証を行った。

節3.1における検証では、機上計算機への移植が容易なGnuastroを用いて一次処理及び開口測光を行い、相対測光による補正を行っても、誤差の範囲内でIRAFによる結果と一致し、Gnuastroを用いた画像処理そして測光処理は期待通り行われることを確認した。また、節3.2における検証では、宇宙線の影響が大きい画像において天体の検出を行う際には、複数画像の中央値をとった画像を用いると、効率よく宇宙線除去が行えること、天体検出処理をかける際には、検出パラメータの値によって天体検出の結果が大きく異なること、周囲に星が混んでいる領域でなければ、HZGの仕様通りの天体検出が行われ、測光では限界等級が得られることを確認した。そして節3.3における検証では、星が非常に混んでいる中、そしてPSFの半値幅の値が異なる中にGRBモデルを含めた天体を配置し、それらの検出を行うと、限界等級より1等級ほど明るい天体でも検出できない、あるいは測光誤差が大きくなる例が見つかること、周囲の天体の数や天体の点拡がりの仕方、天体検出処理の仕方は、検出率にも影響を与えることを確認した。そして、IRAFでの検出・測光結果から、よく検出パラメータを調整することで、暗い星の検出率を高めることができるということを確認した。

これらの結果から、HZGに搭載される4チャンネルの可視赤外線望遠鏡で、一定の割合の取りこぼしはあるものの、高赤方偏移のGRBを実際に検出できそうであることが確認できた。実際に高赤方偏移かどうかを限界に近い等級のものまで判定するためには、測光精度を少しでも上げることが必要であり、天体検出パラメータの値や測光方法のさらなる改善と、高赤方偏移の判定シミュレーションを今後行うべきと考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究方針の御指導、科学的背景知識の御教授、論文の添削等、様々な御指導を頂きました。指導教員の宇宙科学センター 川端弘治 教授に深く感謝申し上げます。また、お忙しい中御意見を下さったHZGチームの皆様、深沢泰司 教授、植村誠准教授、水野恒史准教授、高橋弘充助教、稲見華恵助教、笹田真人特任助教、中岡竜也さん、秋田谷洋さんに、深く感謝の意を表します。居室では様々な御相談にのって下さった、高木健吾さん、平出尚義さん、眞武寛人さん、研究室での御仕事を教えて下さった山本竜哉さん、大間々知輝さんに深く感謝致します。そして、最後まで論文を共に執筆し、支えて下さった同期の皆さんに感謝致します。

関連図書

- [1] Yonetoku, D., et al., 2014, SPIE, 9144, 91442S, 12
- [2] 光赤外線天文学将来計画検討会検討報告書編集委員会, 「2020年代の光赤外天文学 : 将来計画検討報告書」, 2016, 312
- [3] Yonetoku, Proposal of a space science mission concept, 2017
- [4] Tanvir, N. R., et al., 2009, Nature, 461, 1254
- [5] Salvaterra, R., et al., 2009, Nature, 461, 1258
- [6] Cucchiara, A., et al., 2011, ApJ, 736, 7
- [7] Totani T. et al., 2014, PASJ, 66, 63
- [8] Kann, D. A., et al., 2011, ApJ, 734, 96
- [9] Akhlaghi, Ichikawa, 2015, ApJ, 220, 1
- [10] GNU Astronomy Utilities
<https://www.gnu.org/savannah-checkouts/gnu/gnuastro/gnuastro.html>
Astrophysics Source Code Library, ascl.net/1801.009
- [11] Strasbourg astronomical Data Center, APASS NGC2146
<https://cdsportal.u-strasbg.fr/?target=NGC%202146>
- [12] Massey 1988, ApJ, 328 315
- [13] NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVE, 2MASS, J17551760+6637195
<https://irsa.ipac.caltech.edu>
- [14] European Southern Observatory (ESO), Ultra-VISTA Catalog
<https://www.strw.leidenuniv.nl/galaxyevolution/ULTRAVISTA/Ultravista/>

補遺

検出に用いたパラメータ

- kernel(検出の際に畳み込むカーネル)
- qthresh(畳み込んだ画像に適用する、ピクセルをカウントの大きい順に並べた際の分位点のしきい値 (0~1))
- snthresh(検出する天体の S/N 比のしきい値)
- outliersigma(何 σ 周りのピクセルから離れていると外れ値とするか)
- sigmaclip(何 σ 以上周りのピクセルから離れているのものを、どの割合 (0~1) まで省くか)
- snminarea(S/N 比を計算する際の最小面積)
- clumpsnthresh(検出した天体の S/N 比に対するしきい値)

測光に用いたパラメータ

- clumpshdu(検出した天体に関する情報をどの hdu に記録するか)
- zeropoint(等級のゼロ点)

A 節 3.2.2 および節 3.2.3 で使用したコマンドと引数

A.1 天体の検出

- 畳み込むカーネルの作成

```
astmkprof --kernel=gaussian,1.5,7.5 --oversample=1
```

- 天体領域の検出

```
astnoisechisel files/hzg_ch4_c_med.fits -h0 --kernel=kernel.fits
--qthresh=0.1 --snthresh=5.8 --snminarea=1 --outliersigma=3
--outliersclip=3,0.1 --sigmaclip=3,0.1 --output=nc/detected.fits
```

- 天体領域の細分化

```
astsegment nc/detected.fits --snminarea=12 --clumpsnthresh=2
-oseg/segmented.fits
```

A.2 測光

- 検出した星の識別番号、ピクセル座標、等級値、等級誤差をカタログ化

```
astmkcatalog seg/segmented.fits --clumpshdu=2 --ids --x --y
--magnitude --magnitudeerr --zeropoint=27.5 --clumpscat
--output=cat/catalog.fits
```

B 節 3.3.2 で使用したコマンドと引数

B.1 天体の検出 (Ch.4 で PSF 半値幅 1.5pix のとき)

- 畳み込むカーネルの作成

```
astmkprof --kernel=gaussian,1.5,7.5 --oversample=1
```

- 天体領域の検出

```
astnoisechisel files/uvissim3_mk.fits -h0 --kernel=kernel.fits
--tilesize=15,15 --interpnumngb=1 --qthresh=0.1 --snthresh=2.0
--outliersigma=3 --snminarea=1 --sigmaclip=3,0.1 -onc/detected.fits
```

- 天体領域の細分化

```
astsegment nc/detected.fits --snminarea=12 --clumpsnthresh=1
-oseg/segmented.fits
```

B.2 測光

- 検出した星の識別番号、ピクセル座標、等級値、等級誤差をカタログ化

```
astmkcatalog seg/segmented.fits --clumpshdu=2 --ids --x --y
--magnitude --magnitudeerr --zeropoint=27.5 --clumpscat
--output=cat/catalog.fits
```

B.3 開口測光

- 検出した星の位置に開口を作る準備 1(開口を作る位置と半径 (1.5pix) の設定)

```
asttable cat/catalog.fits -hCLUMPS -cx,y |
awk '!/^#{print NR, $1, $2, 5, 1.5, 0, 0, 1, NR, 1}'
> forced_apertures.txt
```

- 検出した星の位置に開口を作る準備 2(fits 内データを hdu0 から hdu1 に移動)

```
astarithmetic files/uvissim3_mk.fits -h0 1 /
--output=files/uvissim3_mk_h1.fits
```

- 検出した星の位置に開口を作る

```
astmkprof forced_apertures.txt --background=files/uvissim3_mk_h1.fits
--clearcanvas --replace --type=int16 --mforflatpix --mode=img
```

- 開口測光して識別番号、ピクセル座標、等級、等級誤差をカタログ化

```
astmkcatalog forced_apertures.fits -h1 --zeropoint=27.5
--valuesfile=nc/detected.fits --ids --x --y --magnitude --magnitudeerr
--output=cat/forced-phot-catalog.fits
```

- 作成したカタログをテキストファイル化

```
asttable cat/forced-phot-catalog.fits > forced_cat.txt
```