

2022年度 卒業論文

将来GRB探査衛星HZGの赤外線望遠鏡における
ディザリング観測の必要性

広島大学 理学部 物理学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B183859 中西 優梨香

主査：川端 弘治
副査：小畷 康史

2022年2月8日

概要

ガンマ線バースト (GRB) は、数秒から数十秒の間に 10^{51}erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する天体で、初期宇宙の探査手段の1つとして期待されている。GRB が示す可視光残光は経過時間と共に指数的に暗くなるため、宇宙初期の暗い GRB の分光観測を実現するには、GRB 検出後、即座に高赤方偏移であることを検知して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 2029 年の打ち上げを目指す *HiZ-GUNDAM (HZG)* である。私達は *HZG* に同架される赤外線望遠鏡において検出器の欠陥ピクセルの割合を増やした場合に測光誤差がどの程度悪化するのか、視野をずらしながら行うディザリング観測が必須になるのはこういった条件かを検証した。具体的には恒星カタログや黄道光の実データに基づいた 4 バンドの撮像シミュレーション画像を作成し、欠陥ピクセルを模す処理をした後、全ての星像の測光を行い、カタログ等級と比較することで検証を行った。得られた結果は *HZG* の赤外線望遠鏡の仕様や調達方法に反映される予定である。

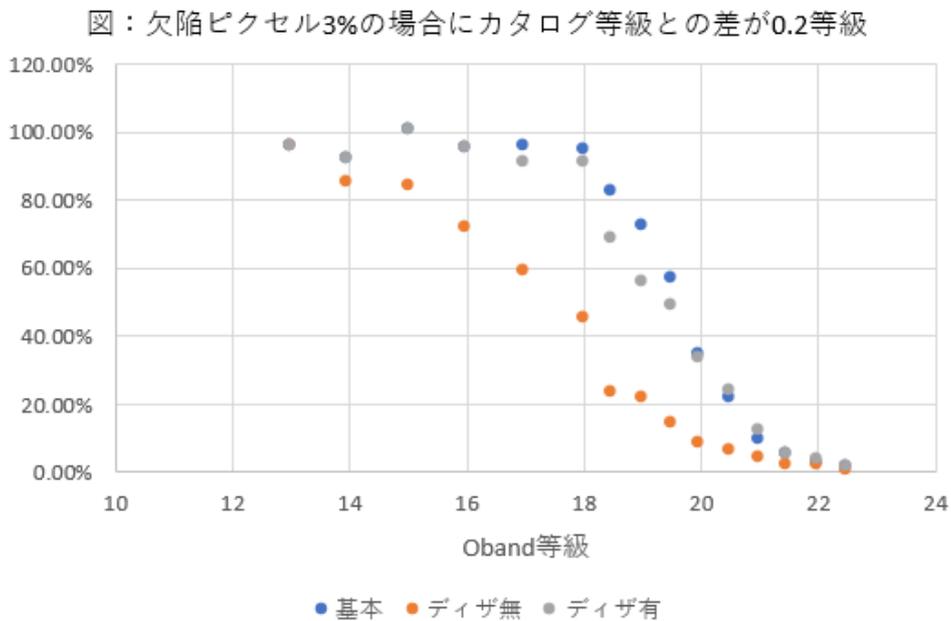


図 1: 欠陥ピクセル 3 % の場合にカタログ等級との差が 0.2 等級未満の割合

目次

第 1 章	序論	3
1.1	HiZ-GUMDAM の概要	3
1.2	HZG の赤外線望遠鏡と観測法	4
1.3	欠陥ピクセルとディザリング観測	4
1.4	本研究の目的	5
第 2 章	研究方法	6
2.1	HZG での遠方ガンマ線バーストの観測・検出手法	6
2.2	恒星カタログに基づいた観測シミュレーション画像の作成	7
2.3	合成画像の作成	8
2.4	天体検出と測光	12
2.5	カタログとの比較による検出・測光精度の検証	13
第 3 章	結果と考察	15
3.1	ディザリング無で欠陥無/有の比較	15
3.2	欠陥有でディザリング無/有の比較	23
3.3	38 パターンの結果と考察	32
第 4 章	まとめと課題	34

目次

1	欠陥ピクセル 3 % の場合にカタログ等級との差が 0.2 等級未満の割合	1
1.1	HZG ミッション機器	4
1.2	近赤外線望遠鏡の概要	4
1.3	欠陥ピクセルの例：かなた望遠鏡 HONIR の 2k2k 赤外線検出器	5
2.1	GRB 残光のカラーチャート	7
2.2	測光パラメータ	8
2.3	欠陥ピクセル無/O band	10
2.4	欠陥ピクセル無/J band	10
2.5	欠陥ピクセル無/H band	10
2.6	欠陥ピクセル無/K band	10
2.7	ディザリングによって各方向へずらした画像（左）、ディザリングした分だけ元の位置に戻した画像（右）	11
2.8	GRB 残光のカラーチャート	12
2.9	天体検出画像（ds9）	13
2.10	測光結果	13
3.1	欠陥ピクセル 3 % ・ single-pix defect	16
3.3	欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect	16
3.5	欠陥ピクセル 1 % ・ single-pix defect	17
3.7	欠陥ピクセル 1 % ・ 5-pix defect	17
3.9	欠陥ピクセル 0.3 % ・ single-pix defect	18
3.11	欠陥ピクセル 1 % ・ 5-pix defect	19
3.13	欠陥ピクセル 0.1 % ・ single-pix defect	19
3.15	欠陥ピクセル 0.1 % ・ 5-pix defect	20
3.17	欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect	20
3.19	欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect	21
3.21	欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect	22
3.23	欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect	22
3.25	欠陥ピクセル 3 % ・ single-pix defect	23
3.27	欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect	24
3.29	欠陥ピクセル 1 % ・ single-pix defect	25
3.31	欠陥ピクセル 1 % ・ 5-pix defect	25

3.33	欠陥ピクセル 0.3 % ・ single-pix defect	26
3.35	欠陥ピクセル 0.3 % ・ 5-pix defect	27
3.37	欠陥ピクセル 0.1 % ・ single-pix defect	28
3.39	欠陥ピクセル 0.1 % ・ 5-pix defect	28
3.41	欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect	29
3.43	欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect	30
3.45	欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect	31
3.47	欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect	31

第1章 序論

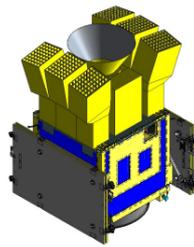
1.1 HiZ-GUMDAMの概要

ガンマ線バースト（GRB）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、短時間の間で通常の銀河の1000倍以上の光度で極めて明るく輝く。このことから、初期宇宙を探る手段として期待されてきたが、数あるGRBの中から超遠方のサンプルを即座に絞り込むことが難しいため、実用化は進んでいなかった。また、GRBは、ジェットと星間物質の衝突によるシンクロトロン放射による強い「残光」を示し、可視赤外線域では波長に対して単調なスペクトルで輝く。しかし、初期宇宙では星間空間に中性水素が多く存在するため、その吸収によりライマンブレイクと呼ばれる特徴ある減衰スペクトルが観測され、ある波長よりも短波長側では光が届かないという現象がみられる。GRB出現直後に、複数のバンドでその残光を観測し、長波長バンドのみで残光がみられるものをピックアップすることで、高赤方偏移のGRBサンプルを効率よく検出することができる。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（HZG）が計画されている。このミッションでは初期宇宙の中で最も明るい光源とされているGRBを観測することでGRBの発生頻度から星形成率を測定していく。HZG計画の役割は大きく2つある。1つ目はGRBによる初期宇宙探査である。ここではHZGで迅速な特定と大型望遠鏡による分光観測が行われている。これにより、これまで十分に観測が行われていない赤方偏移 $z > 7$ のGRB発生率を測定し、宇宙再電離時期の特定を行うことができる。また、これは宇宙最初期の重元素探査や初代星を起源とするGRB探査も可能にしている。2つ目は重力波と同期したX線突発天体の観測による極限時空の理解である。そのために必要な事項は、重力波と同期したX線突発天体/SGRBの発見や相対論的ジェットの存在の検証、早期の可視光/近赤外線観測によるエネルギー変遷の解明、中性子星連星の合体現象（キロノバ、又はマクロノバ）の多様性の検証である。いずれもX線によるGRB/SGRBの発見と迅速な近赤外線追観測が重要である。これらを踏まえたうえで、具体的に行う項目は以下4つである。

- 1.X線による突発天体（GRB/SGRBなど）の検出
2. 自律制御で姿勢変更を行い、300秒以内に追観測を開始
3. 「詳細な方向」「測光赤方偏移」「明るさ」を1時間以内にアラート
- 4.GRB発生から1.5時間以内に大型望遠鏡による詳細な分光観測

本ミッションの目的は、GRBを用いて宇宙暗黒時代の天体形成などを観測することで、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だとされている。

すべてが順調に進めば、JAXAにより2029年頃の打ち上げが予定されている。



ミッション機器:
 広視野X線モニター: 136.3 kg (6 units + 支持構造)
 近赤外線望遠鏡 : 35.6 kg
 ベースフレーム : 15.5 kg
 衛星バス : 約 250 kg **Total: 約 440 kg**

ミッション機器	HIZ-GUNDAM
打ち上げスケジュール	2029～2030 頃 (公募型小型5号機)
衛星軌道	太陽同期極軌道 (twilight)
姿勢変更速度	1 deg/sec
衛星質量	約 440 kg
ミッション期間	> 3 years
アラート送信方式	イリジウム SBD, VHF (SVOM地上局)
メンバー数	83名 (日、韓、英、伊、等) 4

図 1.1: HZG ミッション機器

1.2 HZG の赤外線望遠鏡と観測法

HZG 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。0.4 μm の幅のバンド 1 の限界等級は、21.4 等級、0.6 μm 幅のバンド 2 での限界等級は、21.3 等級 (AB)、0.5 μm 幅のバンド 3 での限界等級は、20.9 等級 (AB)、同じく 0.5 μm 幅のバンド 4 での限界等級は、20.7 等級 (AB) と見積もられている。図 1.2 の表に書かれているように、可視光バンドの検出器には HyViSi と呼ばれる Si 半導体アレイが、近赤外バンドの検出器には HgCdTe 半導体アレイが、それぞれ想定されている。異種の元素からなる近赤外検出器は一般に欠陥ピクセルが多く存在する。例えば、広島大学がなした望遠鏡の HONIR で用いられている HgCdTe 検出器は 0.1 % オーダーのピクセルが欠陥ピクセルとなっている。これについて、次の節で詳しく述べる。

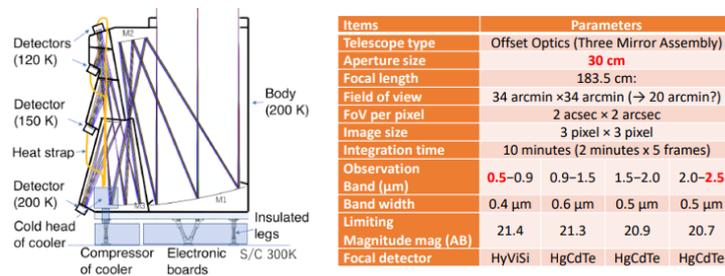


図 1.2: 近赤外線望遠鏡の概要

1.3 欠陥ピクセルとディザリング観測

量子効率が極端に悪い、ダークが高すぎる、読み出しノイズが極端に大きいといった理由で、正確な光量計測に使用しづらいピクセルを総称して、欠陥ピクセルと呼んでいる。実際には量子効率が 50 % 以下、ダークのみでカウントが飽和する可能性があるレベル、などといった条件で欠陥ピクセルを判定する。このピクセル上に天体があると正しくその星の明るさが評価できない。一例として下記に欠陥ピクセルが画像に現れているものを示す。このような欠陥ピクセルによる不具合を避ける手法として、ディザリング観測と呼ばれるものがある。このディザリング観測では指向方向を少しずつずらして複数フレームの観測を行う。通常の天体観測における露光は、同じ構図で何枚もの画像を重ねることでノイズを軽減している。ディザリ

ングを用いて少しずつ構図をずらすことで写る星に対して欠陥ピクセルの位置もずれる。その上で合成画像を作成し、ピクセルごとのカウントの中央値を出力画像のカウントとすることでノイズの影響を軽減し、欠陥ピクセルによる情報欠落を回避することができる。この手法は欠陥ピクセルの多い検出器や、背景光が明るく時間変化が大きい場合に有効である。

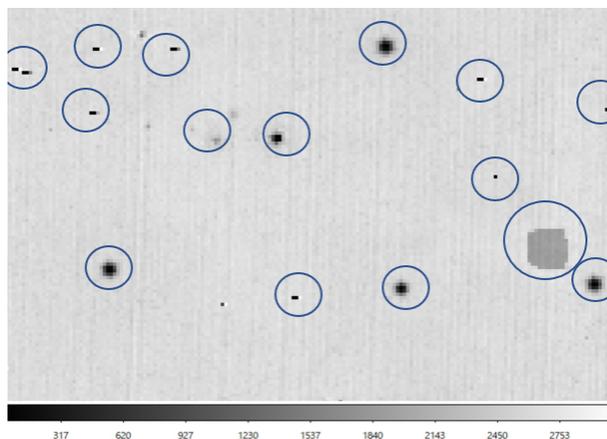


図 1.3: 欠陥ピクセルの例：かなた望遠鏡 HONIR の 2k2k 赤外線検出器

黒いピクセルや穴のようなもの、灰色部分はすべて欠陥ピクセル

1.4 本研究の目的

HZG では、3つある近赤外バンドでの GRB 残光の検出の可否がミッションの成功の鍵を握っているが、近赤外検出器には一定の欠陥ピクセルが存在する。欠陥ピクセルの存在割合によって、検出器そのものの価格が大幅に変わるため、欠陥ピクセルが少ないアレイの購入は困難である。その場合、ディザリング観測の手法を用いることで、欠陥ピクセルによる不具合を解消するのが常套手段であるが、地上望遠鏡ではディザリング観測は容易に行えるものの、慣性運動により望遠鏡の指向方向を変更・静止させなくてはならない人工衛星では、本来苦手の観測手法となる。すなわち、人工衛星そのものに特殊な指向機器の導入が必要となったり、ディザリングするたびに長いオーバーヘッドタイム（動作開始から静定まで典型的に数分掛かると言われている）が必要となるなど、様々なデメリットが生じる。そこで、本研究では、検出器の欠陥ピクセルを様々に変えた観測シミュレーションを行い、ディザリング観測の必要性や、欠陥ピクセルの許容割合を定量的に見出すことを目的とする。具体的には、さまざまな欠陥ピクセル割合で、ディザリング観測の無し／有りを模した観測シミュレーション画像を作成し、機上で実施するものと同じデータリダクション及び星像検出・測光を行うことで、欠陥ピクセルがどれくらい多くなった場合にディザリング観測が要求されるかや、ディザリング観測ができないという条件下でどれくらいの割合の欠陥ピクセルまで許容かのであるかを定量的に評価し、今後の HZG プロジェクトの検討に役立てる。

第2章 研究方法

2.1 HZG での遠方ガンマ線バーストの観測・検出手法

ここでは、GRB 検出の流れを詳しく説明する。

まず前提として HZG の赤外線望遠鏡は 2 分露出 × 5 フレーム × 4 バンドでの撮像を行う。HZG では $10' \times 10'$ (10 分角) が採用されている。これは画像の中央付近のみを使用することで、撮像画像の端に顕著に現れる誤差やノイズの影響を考慮する必要性をなくすためである。

X 線望遠鏡が GRB を受けると、その方向に望遠鏡を向け、位置を特定する。その時刻を露出開始時刻 0min として以下に GRB 検出の主な流れを示す。

時刻	カメラ露出
0min	全 4 バンド、フレーム 1 読み出し開始
2min	全 4 バンド、フレーム 2 読み出し開始
4min	全 4 バンド、フレーム 3 読み出し開始
6min	全 4 バンド、フレーム 4 読み出し開始
8min	全 4 バンド、フレーム 5 読み出し開始
10min	衛星指向

表 2.1: GRB 観測フロー

全 4 バンド、各 5 枚の撮像終了後 10min 以降、画像処理をして実際に星を検知する。

初めに一次処理とクリーン化を行う。ここで一次処理とは撮像画像に載るバイアス・ダーク成分の差し引き、欠陥ピクセルの処理を行うことである。クリーン化は各バンド 5 枚の撮像画像に出力されている星のカウント数の中央値を出力した画像を作成し、宇宙線やノイズを簡易的に取り除いた 1 枚の合成画像を作成する処理である。

その後、合成画像から星像検出を行う。各バンドで 20.5 等級よりも明るい星を約 1000 個程度検出する。その星に対して開口測光を行い、星のリストを作成する。得られた結果と星のカタログ等級とを比較して GRB 候補天体を検出する。

GRB 候補天体検出方法は「カラー」を用いた手法である。カラーというのは等級から等級を差し引いたもので、波長の小さいものから大きいものを引くことでスペクトルの傾きを求めることができる。このスペクトルの傾きがカラーである。

GRB の残光は赤色のものが極めて多い。よって通常の星と GRB 残光の境界となるカラーの条件を定め、条件よりも赤い星を GRB 候補だとすることができる。

現在は5枚の画像を1枚の合成画像として解析を進めているが、今後の課題としては1枚ずつ解析し、GRBの時間変化を捉えることが考えられている。

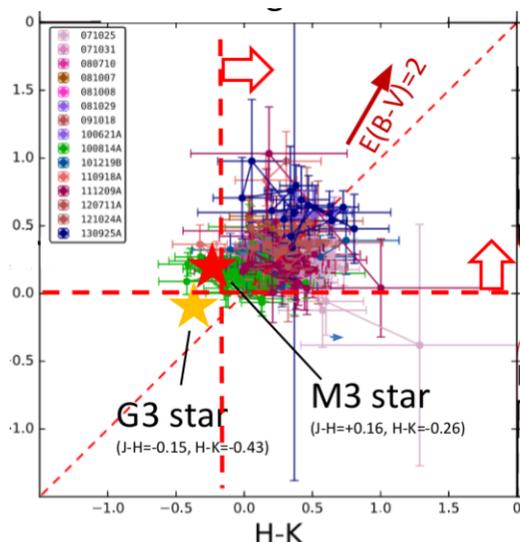


図 2.1: GRB 残光のカラーチャート

2.2 恒星カタログに基づいた観測シュミレーション画像の作成

IRAFとds9を用いて、天体画像を作成する。恒星カタログであるUltraVISTAや黄道光の実データ、HZGの光学系仕様(星像プロファイルの半値幅2秒角=1.5ピクセル)に基づいた4バンドの撮像シュミレーション画像を取得した。この4バンドとHZGのチャンネルとの対応は以下の通りである。

HZGのチャンネル 対応するバンド

Ch.1 (波長 0.5 1.0 μ m) O band

Ch.2 (波長 1.0 1.5 μ m) J band

Ch.3 (波長 1.5 2.0 μ m) H band

Ch.4 (波長 2.5 3.0 μ m) K band

UltraVISTA カタログに基づいた星の情報が入ったデータ (uvistao.xy, uvistaj.xy, uvistah.xy, uvistak.xy) の冒頭部分に各バンドの人工的な天体のデータを挿入した。(combineO.xy, combineJ.xy, combineH.xy, combineK.xy) ゆえに x 座標では 450 までは人工星のかなり明るい等級のデータ、475 850 までは GRB を入れた星の等級データとなっている。y 座標では 600 以降が UltraVISTA のデータとなっている。

本研究で用いた測光パラメータを以下に示す。

開口半径 3 秒角: apetur=3

スカイのぼらつき 30: background in counts (30.)

内径: annulus 3. 外径: dannulus 1.5

band	background	magzero
O band	899.67	27.5
J band	365.75	27.5
H band	169.56	27.5
K band	112.108	27.5

表 2.2: Caption

内径には星と周囲のスカイの足しあわされたカウント数が検出され、外径にはスカイのみのカウント数が検出されるため、内径のカウント数から外径のカウント数を引き算することで、必要な星のカウント数を算出している。

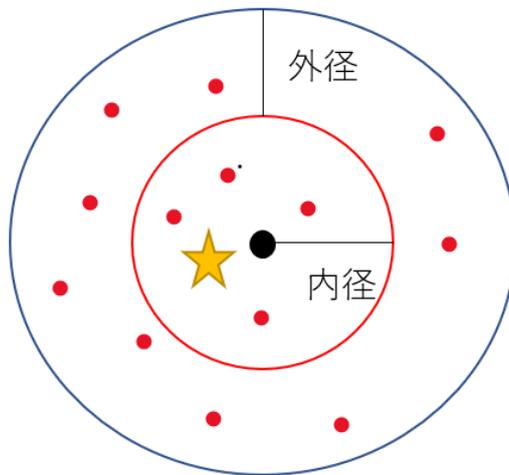


図 2.2: 測光パラメータ

天体画像を4バンドごと、各5枚ずつ取得した後に、それらの画像のカウント数の中央値を出力した画像を作成する。中央値を選択するのは、5枚の画像の中に存在する欠陥ピクセルやノイズなどが極端な値を示す場合に、それらの影響を最小限に留めることができるからである。

2.3 合成画像の作成

本研究では、欠陥ピクセルの有無、ディザリング観測の有無、欠陥ピクセルの割合6パターン(3%,1%,0.3%,0.1%,0.03%,0.01%)と欠陥ピクセルの取り方2パターン(1ピクセルごとにばらばらにとる方法と5×5ピクセルの島ごとにとる方法)によって26パターンのシミュレーションを予定していた。そこに加えて、ディザリング観測を行わなかった時のみ適応される補間補正の有無によってさらに12パターンに場合分けすることにした。すなわち合計38パターンのシミュレーション解析を行った。以下に38通りのパターンを示す。

1. 欠陥ピクセル無/ディザリング観測
 2. 欠陥ピクセル無/ディザリング観測
 3. ディザリング無/欠陥ピクセル 3 %ばらばら/補間無
 4. ディザリング無/欠陥ピクセル 3 %ばらばら/補間有
 5. ディザリング有/欠陥ピクセル 3 %ばらばら
 6. ディザリング無/欠陥ピクセル 3 % 5 × 5 島/補間無
 7. ディザリング無/欠陥ピクセル 3 % 5 × 5 島/補間有
 8. ディザリング有/欠陥ピクセル 3 % 5 × 5 島
 9. ディザリング無/欠陥ピクセル 1 %ばらばら/補間無
 10. ディザリング無/欠陥ピクセル 1 %ばらばら/補間有
 11. ディザリング有/欠陥ピクセル 1 %ばらばら
 12. ディザリング無/欠陥ピクセル 1 % 5 × 5 島/補間無
 13. ディザリング無/欠陥ピクセル 1 % 5 × 5 島/補間有
 14. ディザリング有/欠陥ピクセル 1 % 5 × 5 島
 15. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.3 %ばらばら/補間無
 16. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.3 %ばらばら/補間有
 17. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.3 %ばらばら
 18. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.3 % 5 × 5 島/補間無
 19. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.3 % 5 × 5 島/補間有
 20. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.3 % 5 × 5 島
 21. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.1 %ばらばら/補間無
 22. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.1 %ばらばら/補間有
 23. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.1 %ばらばら
 24. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.1 % 5 × 5 島/補間無
 25. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.1 % 5 × 5 島/補間有
 26. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.1 % 5 × 5 島
 27. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.03 %ばらばら/補間無
 28. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.03 %ばらばら/補間有
 29. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.03 %ばらばら
 30. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.03 % 5 × 5 島/補間無
 31. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.03 % 5 × 5 島/補間有
 32. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.03 % 5 × 5 島
 33. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.01 %ばらばら/補間無
 34. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.01 %ばらばら/補間有
 35. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.01 %ばらばら
 36. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.01 % 5 × 5 島/補間無
 37. ディザリング無/欠陥ピクセル 0.01 % 5 × 5 島/補間有
 38. ディザリング有/欠陥ピクセル 0.01 % 5 × 5 島
- 計 38 パターン

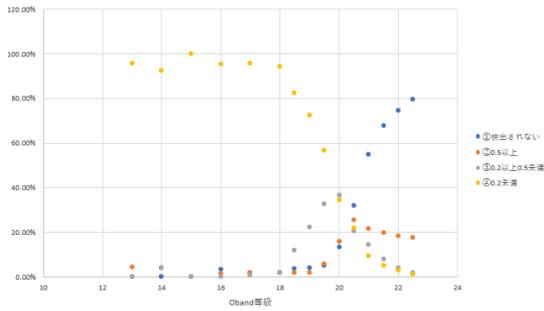


図 2.3: 欠陥ピクセル無/O band

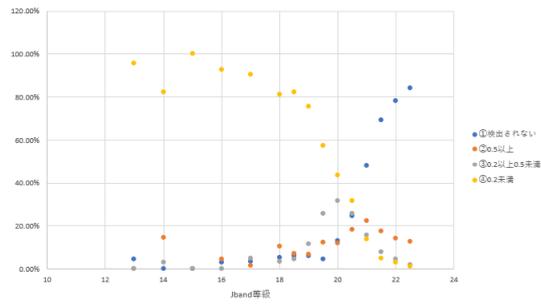


図 2.4: 欠陥ピクセル無/J band

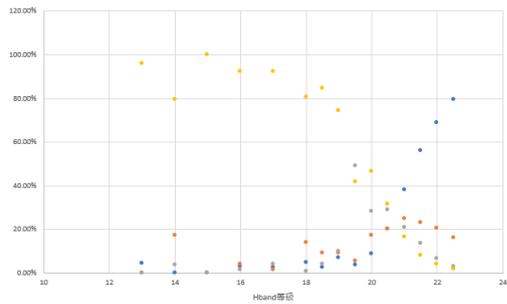


図 2.5: 欠陥ピクセル無/H band

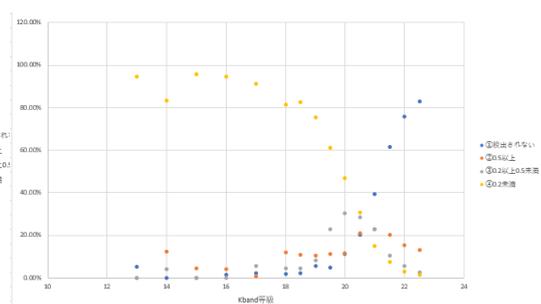


図 2.6: 欠陥ピクセル無/K band

以下に合成画像作成の手順を示す。

- 基本画像を作成する。まず初めに基本となる2つの合成画像を作成し、それらに基づいて本研究を進めた。基本となる2つのパターンは以下の通りである。

case01. 欠陥ピクセル無/ディザリング観測無

case02. 欠陥ピクセル無/ディザリング観測有

実際にこれらはGRBが検出可能な17~20等級を中心に明るい等級で精度が良いため、基準となる基本データとして正しいことが確認できた。

- ディザリング観測を適応させる。ディザリング観測では指向方向を少しずつずらして複数フレームの観測を行う。本研究では5枚の画像に対して以下のような処理を行った。

	X 方向	Y 方向
1 枚目	0	0
2 枚目	+15 ピクセル	+15 ピクセル
3 枚目	-15.3 ピクセル	15 ピクセル
4 枚目	-15.2 ピクセル	-15.4 ピクセル
5 枚目	+15.4 ピクセル	-15.1 ピクセル

表 2.3: ディザリングによるずれの方向と値

基本画像 case01 では 5 枚の画像を取得後、中央値を出力した画像を作成したが、今回はディザリングを行っているため、ずらしている分だけ、元の位置に戻してから、中央値を出力した画像を作成する必要がある。

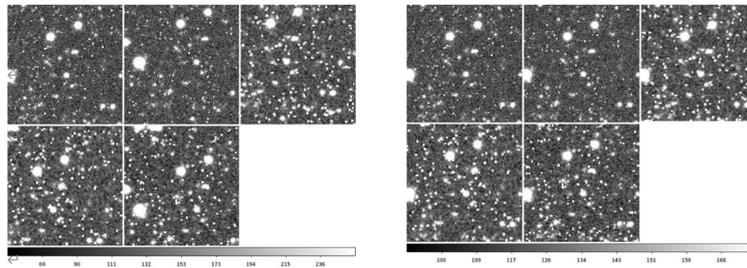


図 2.7: ディザリングによって各方向へずらした画像 (左)、ディザリングした分だけ元の位置に戻した画像 (右)

- ・ 欠陥ピクセルのマスク画像を作成する。

取得した画像に欠陥ピクセルのマスク画像を掛け算することで欠陥ピクセルの影響を考慮した合成画像を作成した。

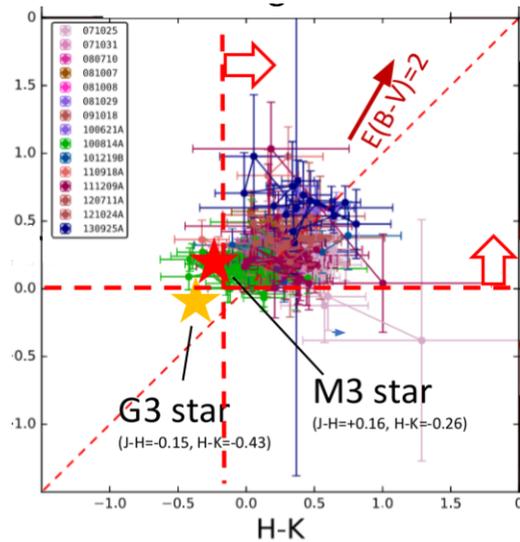


図 2.8: GRB 残光のカラーチャート

- ・補間処理を適応させる。

ここで補間というのは欠陥ピクセルの影響を受けて穴の開いている部分の周囲のカウンタ数の平均値を取り、埋め合わせる処理のことである。この処理で、欠陥ピクセルによる影響を、ある程度のレベルまで補正を行うことができる。

補間処理はマスク画像の処理から行う。IRAFのコマンド `imcopy`, `imreplace` を用いて、欠陥ピクセルの影響でカウンタ数が0になっている部分のカウンタ数が1、その他のカウンタが0と表示されるような反転の処理を行う。反転のマスク画像を掛け算した後に、IRAFのコマンド `fixpix` を用いて補間処理を実行した。

2.4 天体検出と測光

取得した天体の合成画像を IRAF と ds9 を用いて天体検出と測光を行った。天体検出では、K band、H band、J band は約 6000 個、O band は約 8000 個以上に設定した。以下に測光結果の一例を示す。

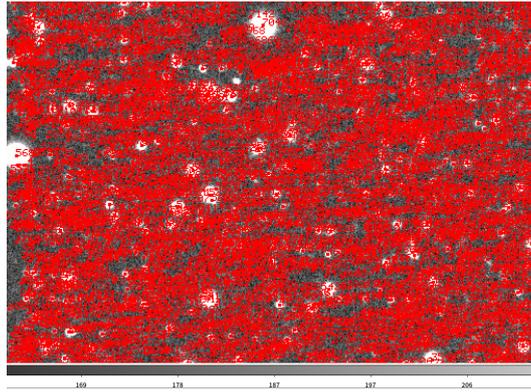


図 2.9: 天体検出画像 (ds9)

Star at	24.98	26.31	24.77	26.56
Star at	115.34	999.70		
Star at	24.43	23.28	23.49	23.47
Star at	746.12	999.64		
Star at	33.73	25.40	23.94	23.93
Star at	38.79	999.93		
Star at	29.65	24.83	23.94	25.11
Star at	723.31	999.95		
Star at	25.28	24.66	24.99	26.12
Star at	48.55	999.96		
Star at	24.42	24.40	24.92	23.90
Star at	48.55	999.96		
Star at	23.90	23.90	23.90	23.90

図 2.10: 測光結果

左から順に x 座標、y 座標、カタログ等級、測光結果

2.5 カタログとの比較による検出・測光精度の検証

測光結果から得られた等級と元のカタログデータの等級を比較し、その測光誤差の程度によって分類し、どれだけの精度で測光ができているのか統計的に解析を進めた。

解析を行うにあたり、等級の補正を行う必要があり、以下に等級補正の流れを示す。

それぞれ $y=200,300,400,500,600\text{pix}$, $x=450\text{pix}$ にいずれのバンドにも 13.38 等級の人工星が入っている。

1. 測光結果の等級を m_{obs} として、バンドごとに 5 つの等級差 $m_{\text{diff}}=13.38-m_{\text{obs}}$ を計算する。
 2. バンドごとに 5 つの m_{diff} の平均値を求める。これを補正值とする。
- この操作はのパターンのみ行い、それ以降は同様の補正值を用いる。

補正值

O band : -0.578

J band: -0.580

H band: -0.584

K band: -0.576

3. さらに、各バンドの全ての星の m_{obs} にそのバンドの補正値を足し合わせる。

以上で等級の補正が行われたことになり、13 17 等級程の非常に明るい星ではカタログ等級との誤差が 0.1 等級以下になるとされており、確認できた。

補正後の人工星を含む各星の各バンドのデータについて 4 つのグループに分類し、カタログ等級 13 22 等級台ごとにカタログ上の個数、並びにそれに対するグループごとの割合を統計的に求めた。

HZG での観測できる限界等級は 20.5 等級であるので、今回重要視されている 18 等級以降は 0.5 等級台ごとに分類を行った。以下にグループとその区分を示す。

グループ	分類区分
1	検出されなかった ($i < 30$)
2	等級差が 0.5 等級以上
3	等級差が 0.2 等級以上 0.5 等級未満
4	等級差が 0.2 等級未満

表 2.4: カタログ等級との差による分類区分

第3章 結果と考察

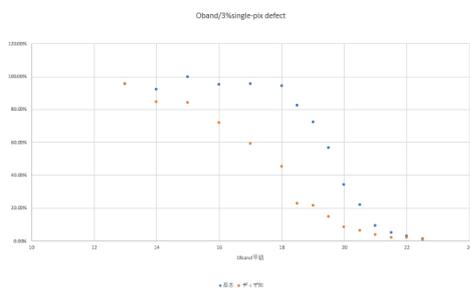
本研究では実際のHZGの仕様に基づいている。そのため、HZGで見られる欠陥ピクセルの割合1%を中心として、0.01%~3%の範囲でシミュレーションを行った。

また、欠陥ピクセルの取り方についてもピクセルごとにばらばらに取る方法（以下 single-pix defect とする）と5×5ピクセルの島ごとに取る方法（5-pix defect とする）の2種類あるため各欠陥ピクセルの割合につき、2種類の結果を示す。欠陥ピクセル3%は最悪の場合を想定しており、ほとんど見られないが、比較する際に大きく違いが見られると考えたため、3%の割合から研究を進めた。

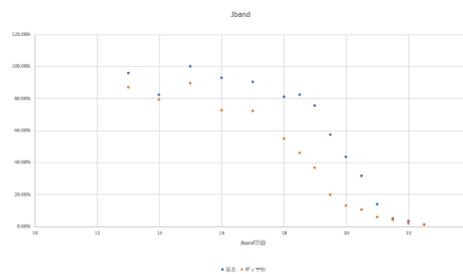
3.1 デザリング無で欠陥無/有の比較

以下に3%~0.01%までの結果を順に示す。

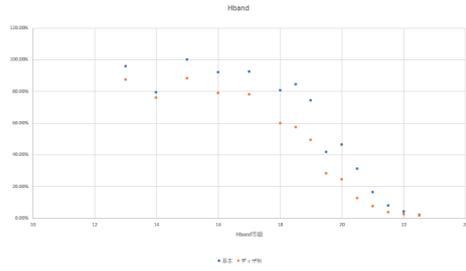
- ・ 欠陥ピクセル3%・single-pix defect



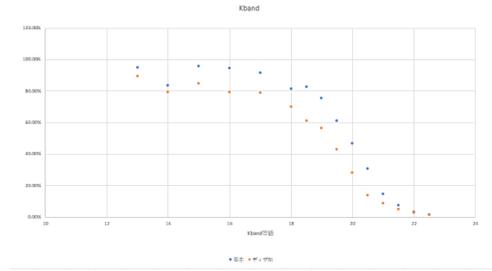
O band



J band



(a) H band

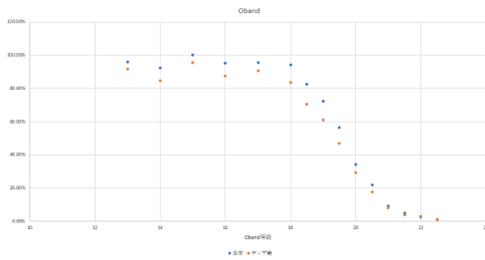


(b) K band

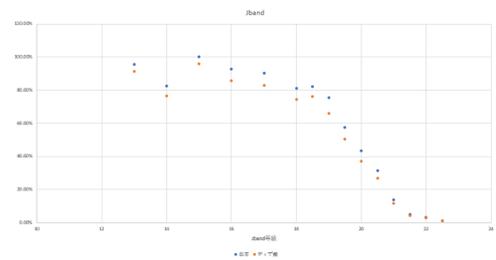
図 3.1: 欠陥ピクセル 3 % ・ single-pix defect

横軸は等級、縦軸は星の個数割合（カタログ個数に対する当該グループの個数; 表 2.4 参照）を表している。

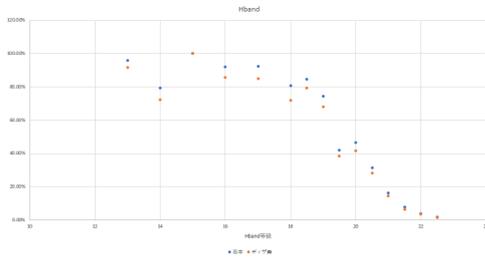
・ 欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect



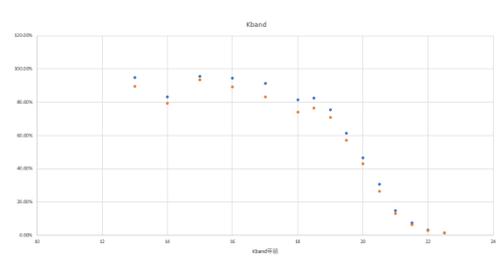
(a) O band



(b) J band



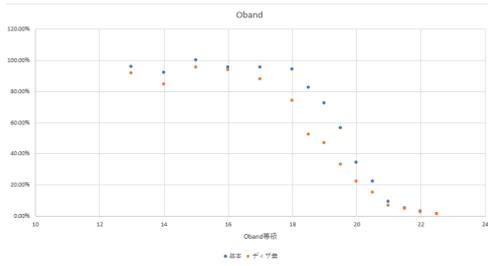
(a) H band



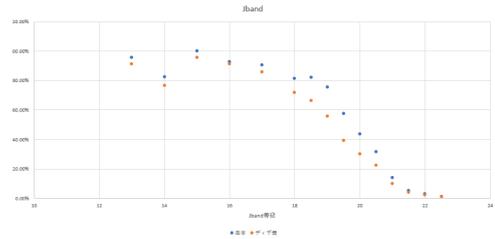
(b) K band

図 3.3: 欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect

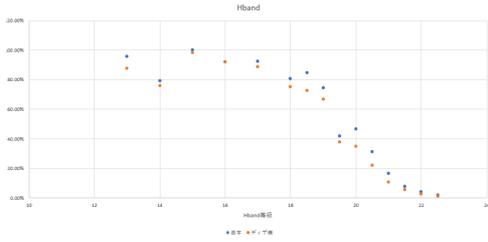
・ 欠陥ピクセル 1 % ・ single-pix defect



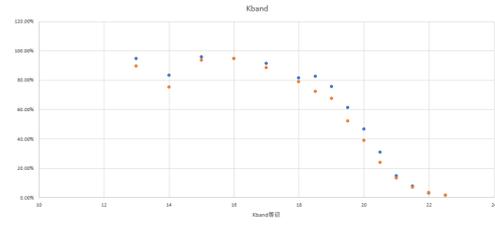
(a) O band



(b) J band



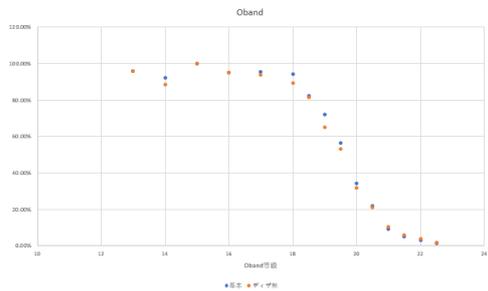
(a) H band



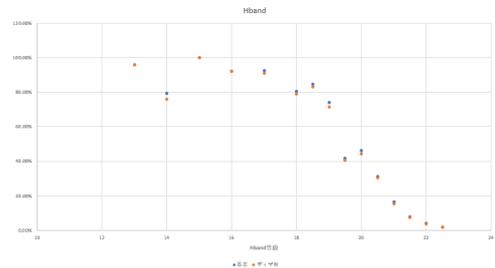
(b) K band

図 3.5: 欠陥ピクセル 1%・single-pix defect

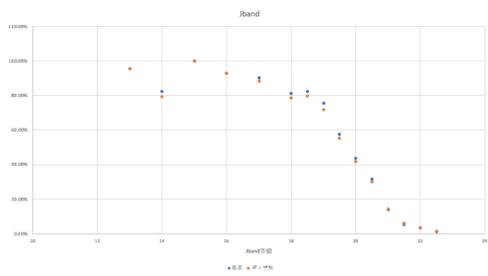
・欠陥ピクセル 1%・5-pix defect



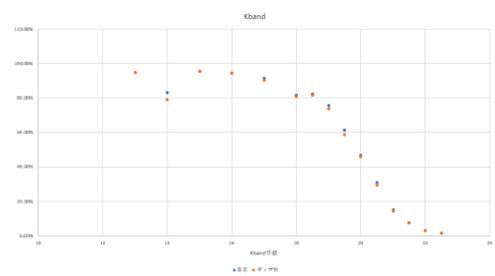
(a) O band



(b) J band



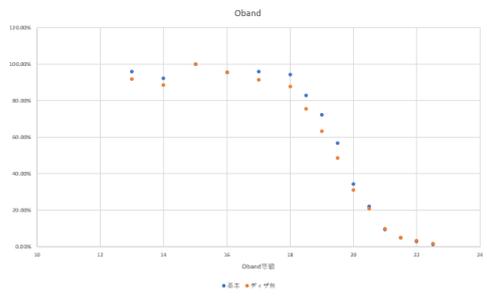
(a) H band



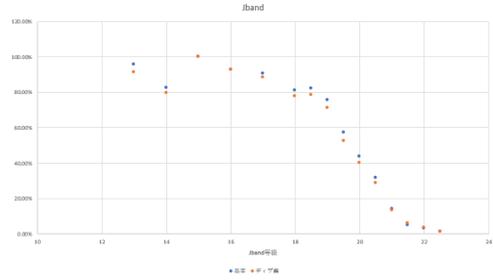
(b) K band

図 3.7: 欠陥ピクセル 1%・5-pix defect

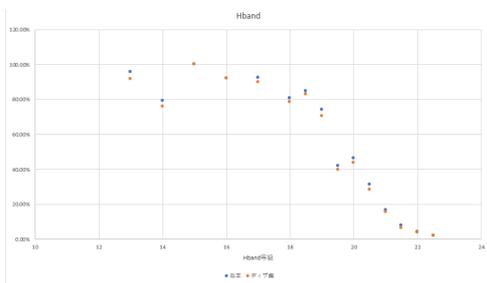
• 欠陥ピクセル 0.3 % • single-pix defect



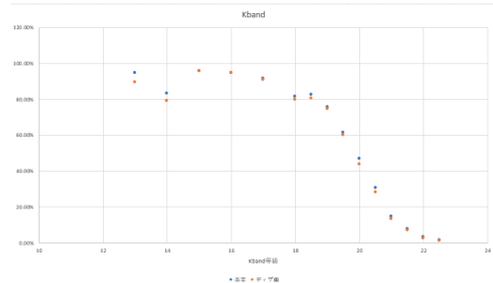
(a) O band



(b) J band



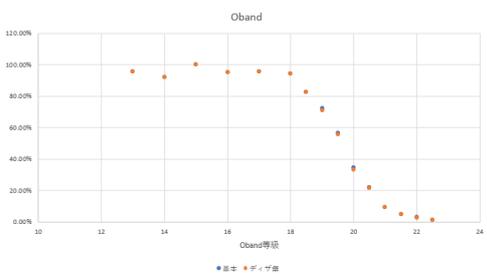
(a) H band



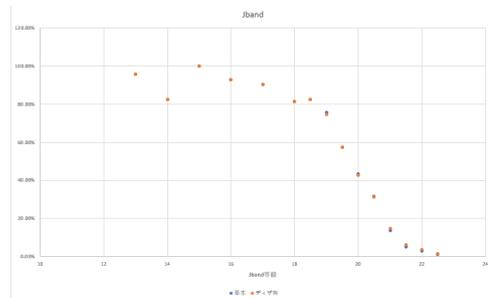
(b) K band

図 3.9: 欠陥ピクセル 0.3 % • single-pix defect

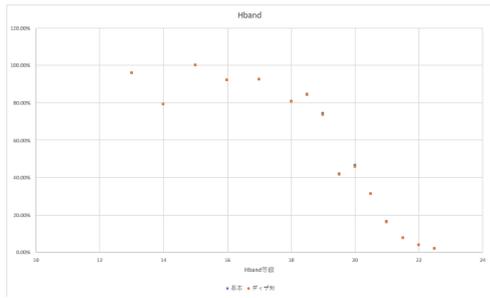
• 欠陥ピクセル 0.3 % • 5-pix defect



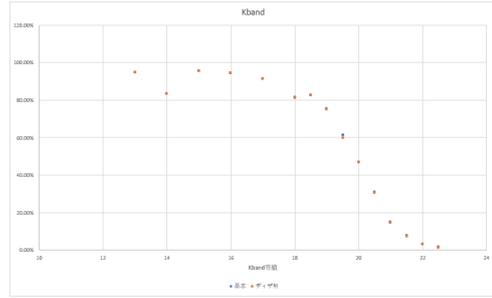
(a) O band



(b) J band



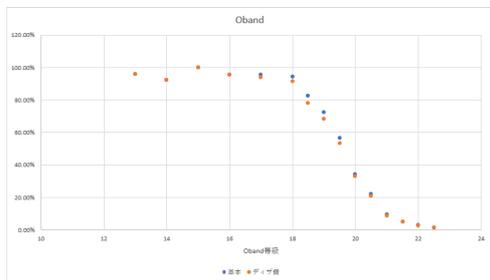
(a) H band



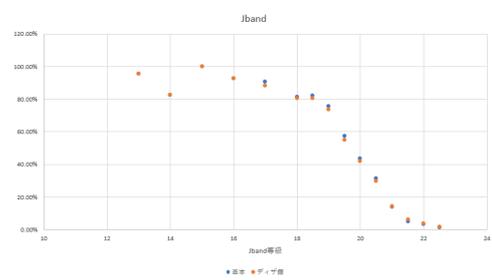
(b) K band

図 3.11: 欠陥ピクセル 1%・5-pix defect

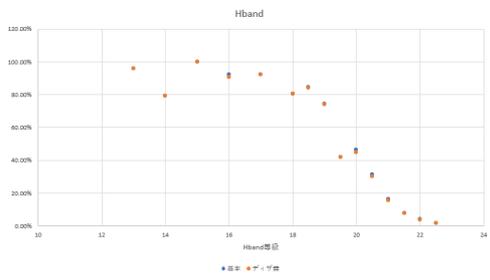
・ 欠陥ピクセル 0.1%・single-pix defect



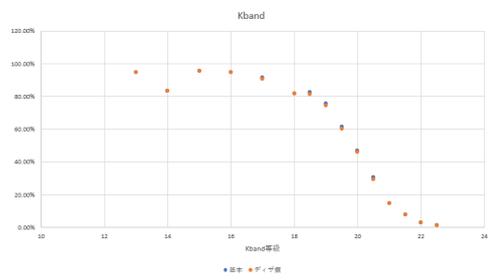
(a) O band



(b) J band



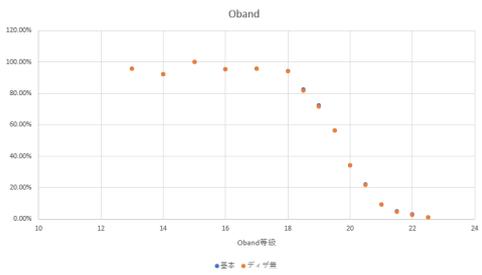
(a) H band



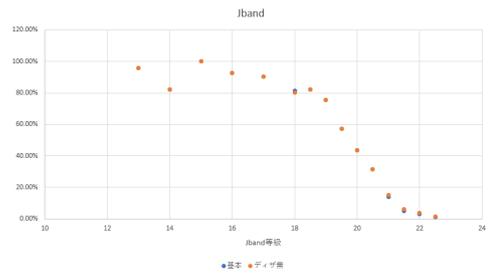
(b) K band

図 3.13: 欠陥ピクセル 0.1%・single-pix defect

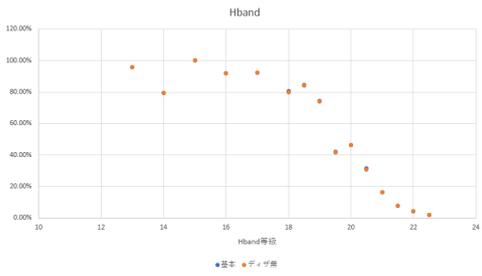
・ 欠陥ピクセル 0.1%・5-pix defect



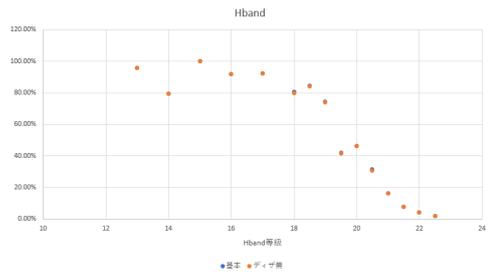
(a) O band



(b) J band



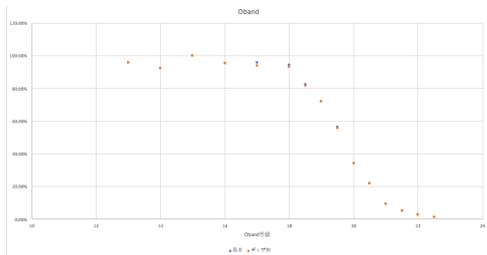
(a) H band



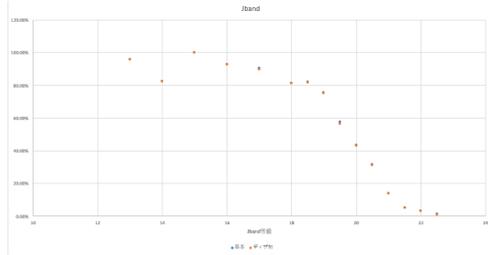
(b) K band

図 3.15: 欠陥ピクセル 0.1 % ・ 5-pix defect

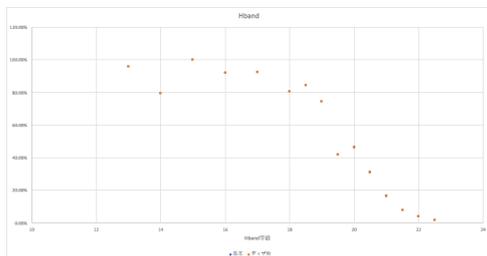
・ 欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect



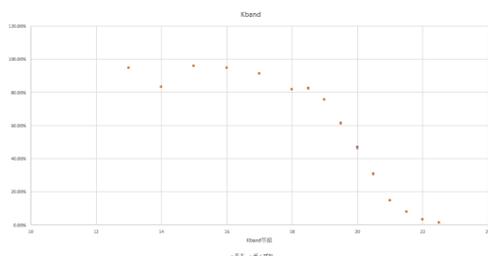
(a) O band



(b) J band



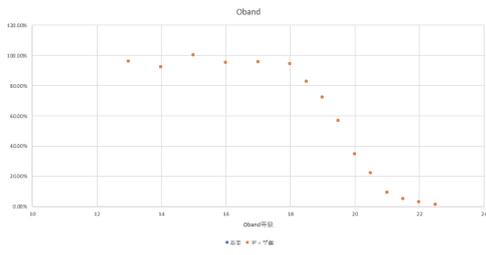
(a) H band



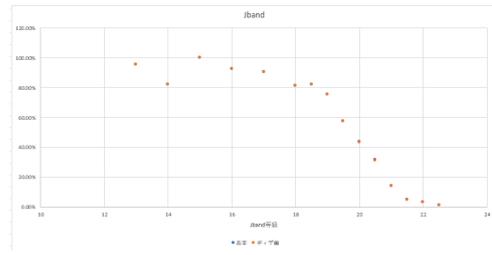
(b) K band

図 3.17: 欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect

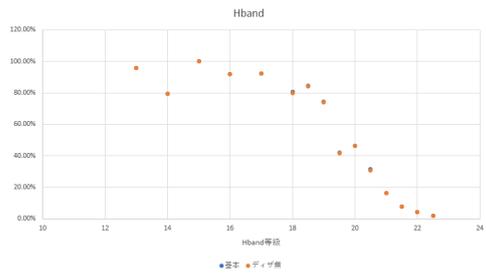
・欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect



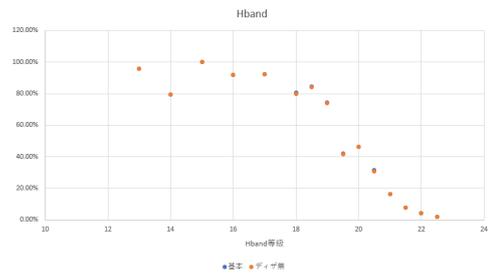
(a) O band



(b) J band



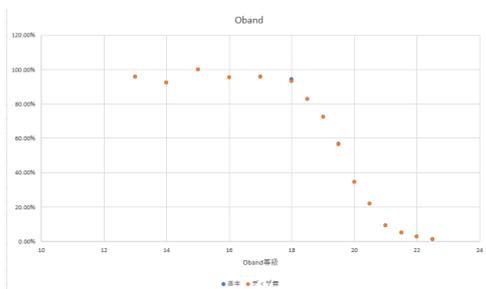
(a) H band



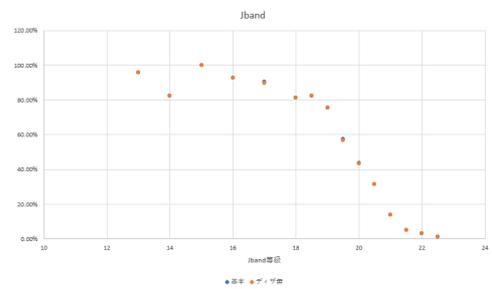
(b) K band

図 3.19: 欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect

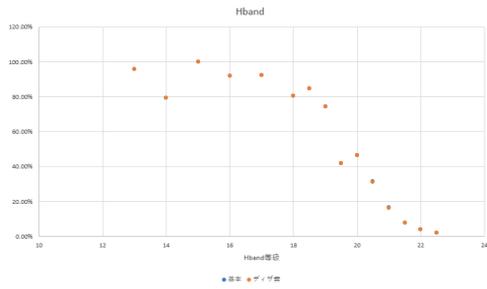
・欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect



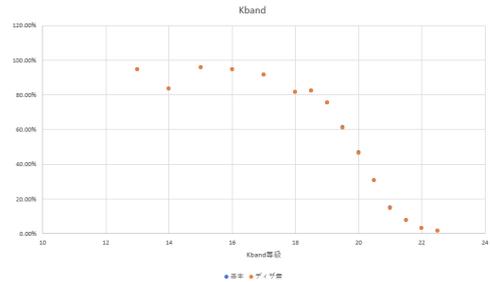
(a) O band



(b) J band



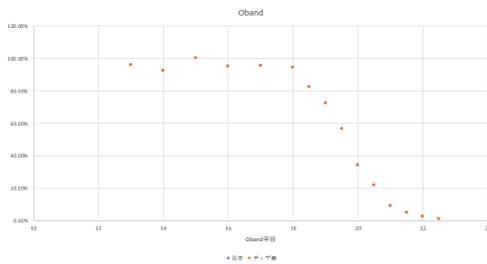
(a) H band



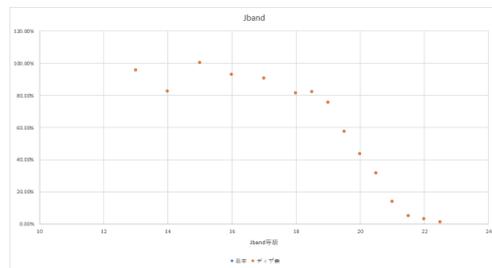
(b) K band

図 3.21: 欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect

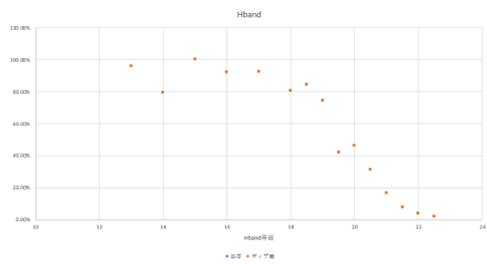
・ 欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect



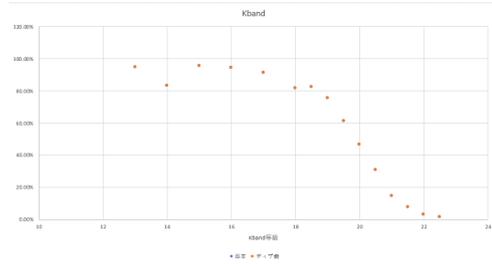
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.23: 欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect

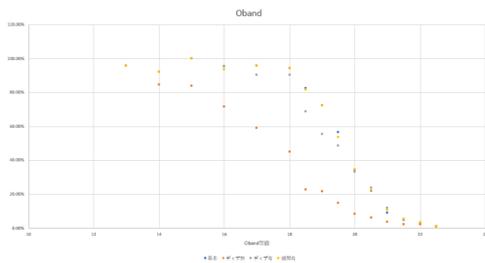
以上の結果より、3 %～0.01 %の全ての欠陥ピクセルの割合において、カタログ等級との差が0.2等級未満の良い精度で測光された星は欠陥ピクセル有では減少する傾向が見られた。つまり、欠陥ピクセルがない場合に比べて、欠陥ピクセル有の場合は、欠陥ピクセルの影響によって測光の精度が悪くなっていることが分かった。欠陥ピクセルの割合が高いほど顕著に現れており、欠陥ピクセルをピクセルごとにばらばらに取った方が5×5ピクセルの島ごとに取り取った場合よりも差が大きくなることを確認できた。

3.2 欠陥有でディザリング無/有の比較

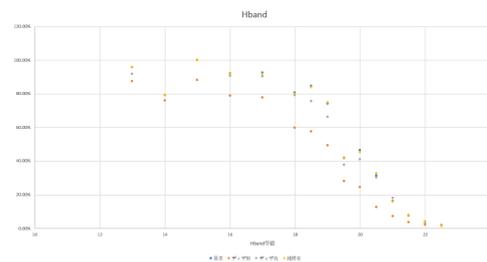
3.1 で示したように、欠陥ピクセルによる測光誤差は顕著に現れることが分かった。

先ほどの結果を基に、本研究のテーマでもあるディザリング観測を用いて、どの程度まで測光精度を回復させることができるのかシミュレーションを行った。同時に、ディザリング観測をしなかった場合にのみ適応される補間処理の影響も今回は比較の対象としているため、ディザリング無で補間無/有の比較も行った。ディザリング観測の必要性を定量的に理解するために、どの程度までの欠陥ピクセルの割合に有効であるのかについても検証を行った。以下にグラフ結果とディザリング観測の有無による基本との差の平均値を求めた結果を示す。また、HZG の仕様に基づいて 17~20 等級台のデータに着目した結果も示す。

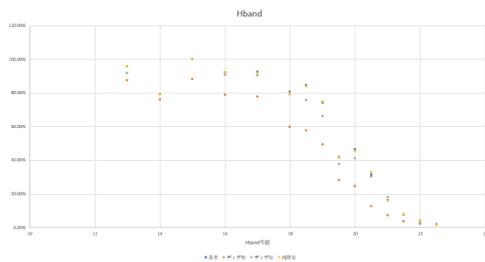
- 欠陥ピクセル 3 % ・ single-pix defect



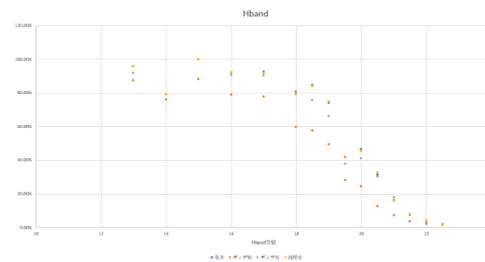
(a) O band



J band



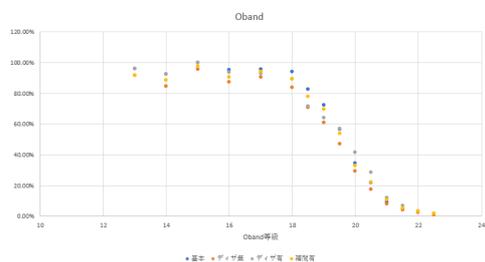
(a) H band



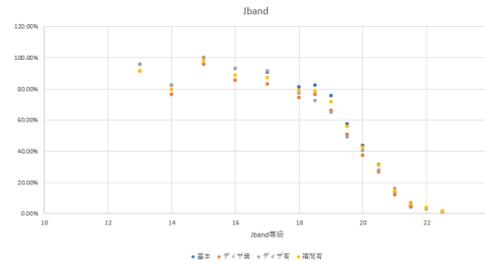
(b) K band

図 3.25: 欠陥ピクセル 3 % ・ single-pix defect

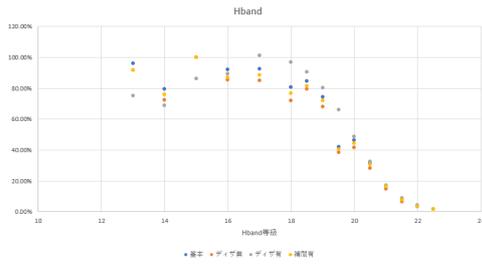
- 欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect



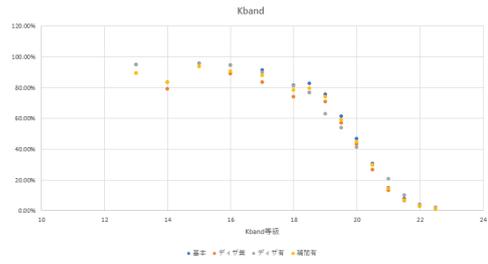
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.27: 欠陥ピクセル 3 % ・ 5-pix defect

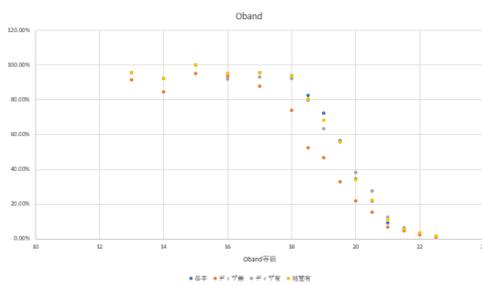
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	22.39	2.93	39.91	6.72
J band	17.43	3.79	29.88	8.04
H band	12.90	2.37	10.53	4.35
K band	10.84	3.12	16.87	6.38

(a) 欠陥ピクセル 3 % single-pix : 単位 (%)

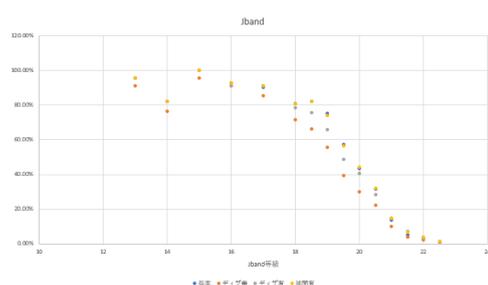
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	5.66	0.60	8.29	1.78
J band	4.83	2.37	6.82	5.64
H band	4.00	1.20	5.50	9.25
K band	3.93	1.72	5.51	5.07

(a) 欠陥ピクセル 3 % 5-pix : 単位 (%)

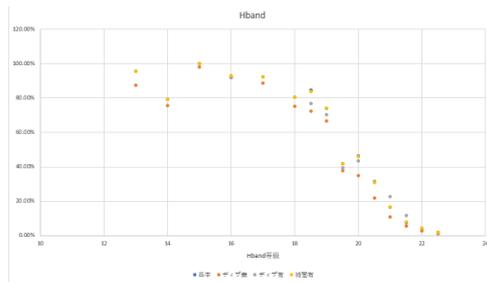
・ 欠陥ピクセル 1 % ・ single-pix defect



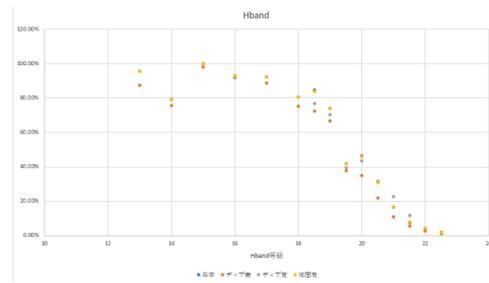
(a) O band



(b) J band



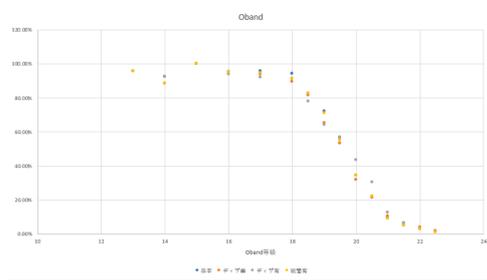
(a) H band



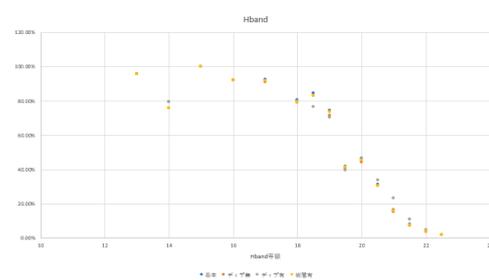
(b) K band

図 3.29: 欠陥ピクセル 1 % ・ single-pix defect

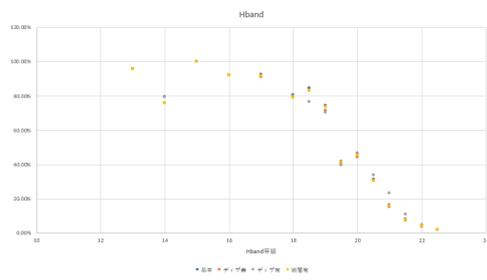
・ 欠陥ピクセル 1 % ・ 5-pix defect



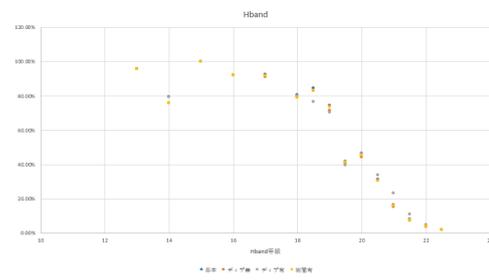
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.31: 欠陥ピクセル 1 % ・ 5-pix defect

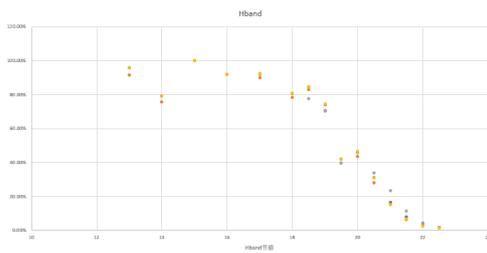
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	9.84	0.32	18.06	0.99
J band	7.46	2.08	12.93	4.63
H band	5.13	0.38	7.64	2.26
K band	4.34	1.20	6.79	4.08

(a) 欠陥ピクセル 1 % single-pix : 単位 (%)

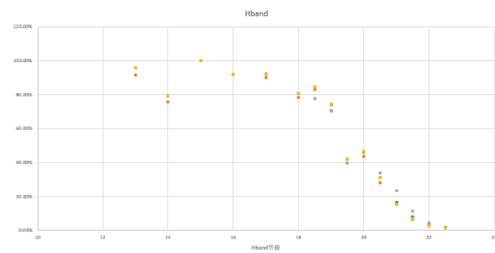
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	1.13	0.15	1.68	1.42
J band	0.93	1.83	1.44	3.23
H band	0.90	0.22	1.47	0.39
K band	0.68	0.99	1.17	2.04

(a) 欠陥ピクセル 1 % 5-pix : 単位 (%)

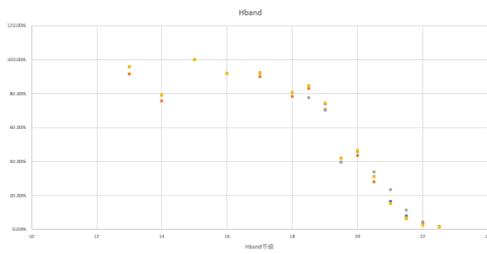
・ 欠陥ピクセル 0.3 % ・ single-pix defect



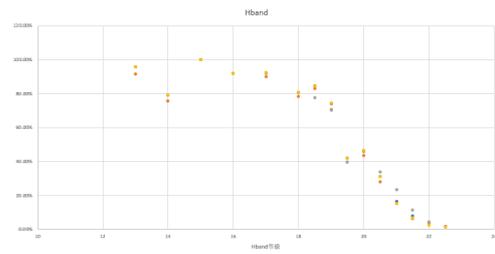
(a) O band



(b) J band



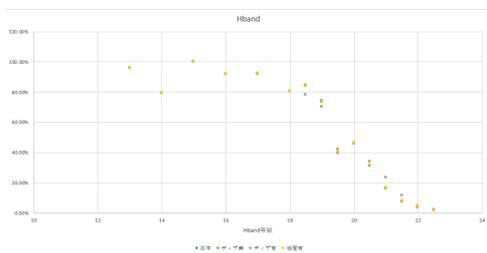
(a) H band



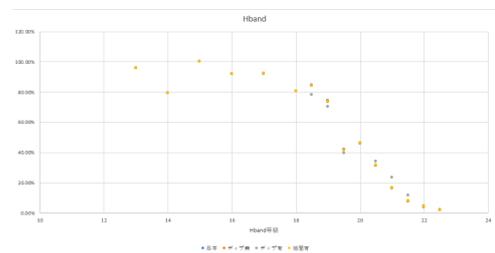
(b) K band

図 3.33: 欠陥ピクセル 0.3 % ・ single-pix defect

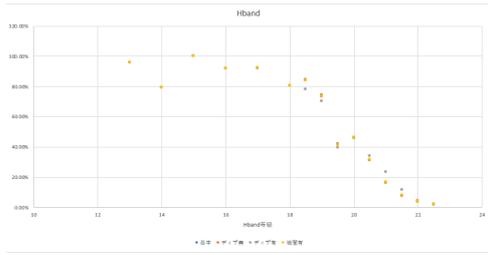
・ 欠陥ピクセル 0.3 % ・ 5-pix defect



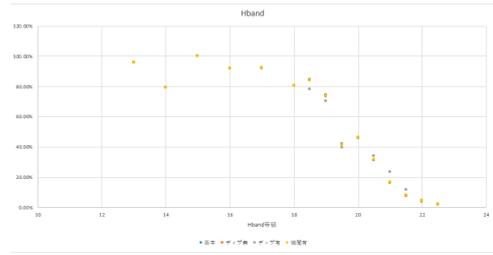
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.35: 欠陥ピクセル 0.3 % ・ 5-pix defect

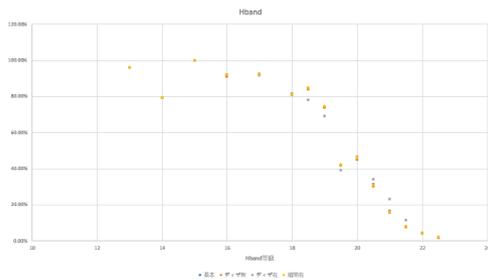
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	3.17	0.54	5.73	0.59
J band	2.10	1.07	3.59	3.79
H band	1.90	0.08	2.59	1.71
K band	1.59	0.91	1.68	3.53

(a) 欠陥ピクセル 0.3 % single-pix : 単位 (%)

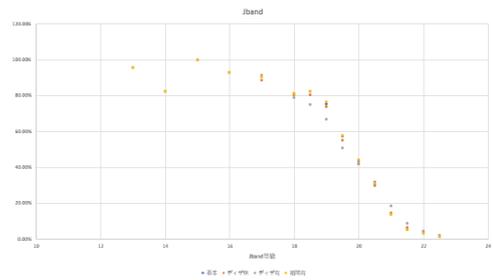
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	0.24	0.37	0.47	0.19
J band	0.09	1.29	0.24	4.21
H band	0.20	0.00	0.35	1.60
K band	0.22	1.04	0.40	3.78

(a) 欠陥ピクセル 0.3 % 5-pix : 単位 (%)

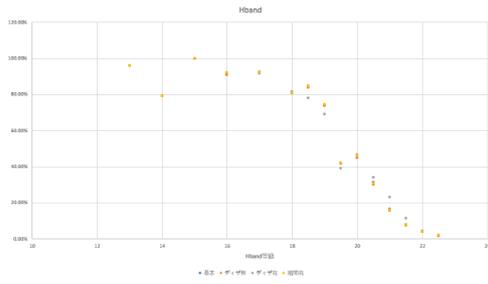
・ 欠陥ピクセル 0.1 % ・ single-pix defect



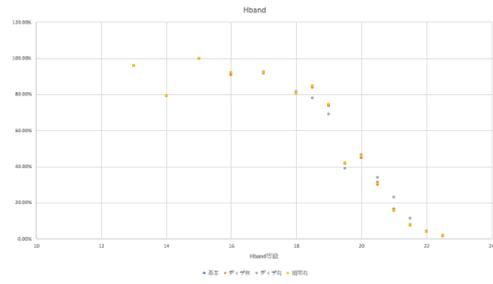
(a) O band



(b) J band



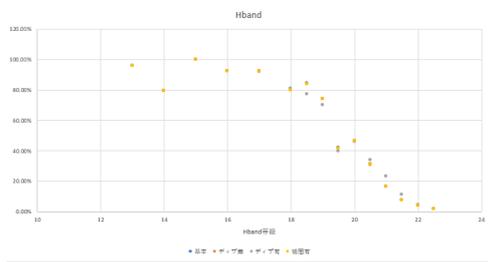
(a) H band



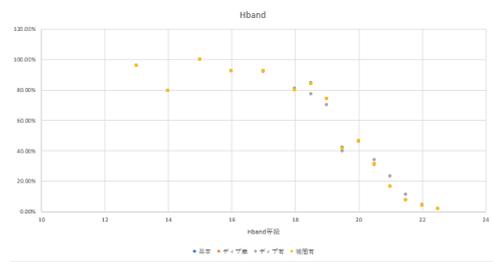
(b) K band

図 3.37: 欠陥ピクセル 0.1 % ・ single-pix defect

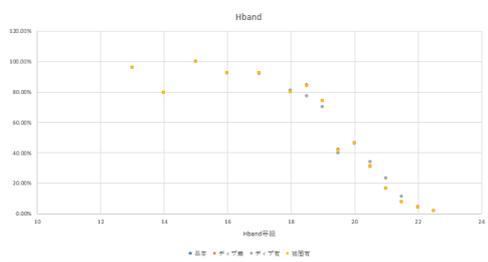
・ 欠陥ピクセル 0.1 % ・ 5-pix defect



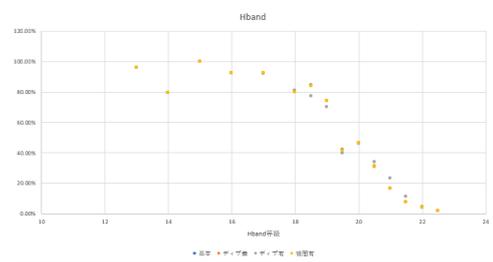
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.39: 欠陥ピクセル 0.1 % ・ 5-pix defect

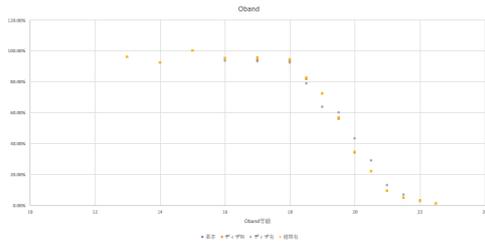
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	1.31	0.60	2.67	0.44
J band	0.63	1.10	1.77	3.85
H band	0.40	0.06	0.52	1.67
K band	0.40	1.07	0.81	3.77

(a) 欠陥ピクセル 0.1 % single-pix : 単位 (%)

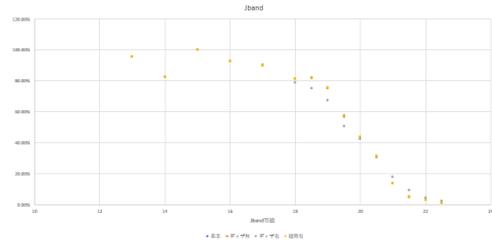
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	0.16	0.53	0.31	0.56
J band	0.19	1.04	0.12	3.74
H band	0.16	0.15	0.32	1.78
K band	0.13	0.92	0.25	3.49

(a) 欠陥ピクセル 0.1 % 5-pix : 単位 (%)

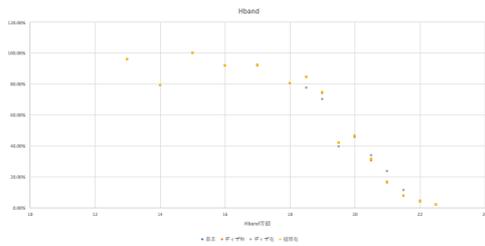
・ 欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect



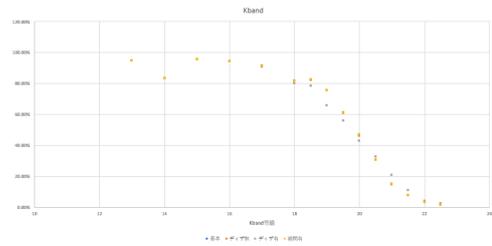
(a) O band



(b) J band



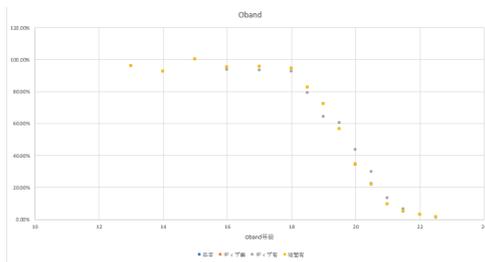
(a) H band



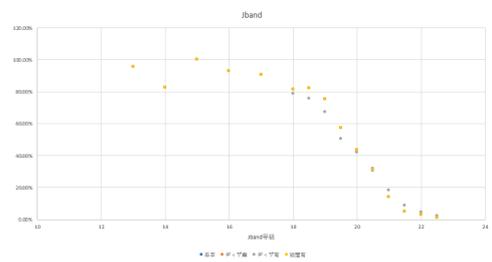
(b) K band

図 3.41: 欠陥ピクセル 0.03 % ・ single-pix defect

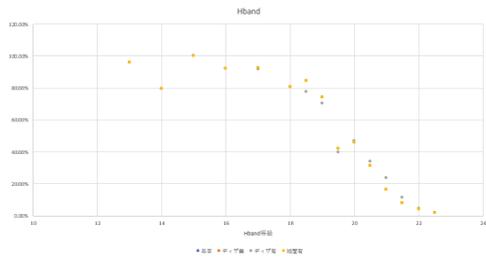
・ 欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect



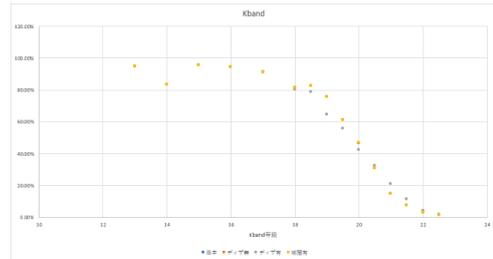
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.43: 欠陥ピクセル 0.03 % ・ 5-pix defect

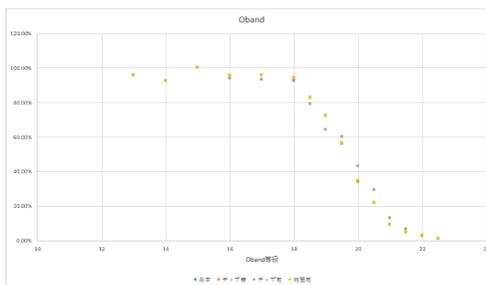
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	0.31	0.45	0.65	0.39
J band	0.25	1.11	0.50	3.88
H band	0.08	0.07	0.13	1.73
K band	0.11	0.82	0.20	3.35

(a) 欠陥ピクセル 0.03 % single-pix : 単位 (%)

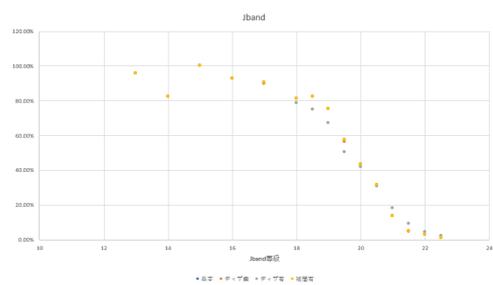
band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17~20 等級	ディザリング観測 17~20 等級
O band	0.16	0.53	0.31	0.56
J band	0.19	1.04	0.12	3.74
H band	0.16	0.15	0.32	1.78
K band	0.13	0.92	0.25	3.49

(b) 欠陥ピクセル 0.03 % 5-pix : 単位 (%)

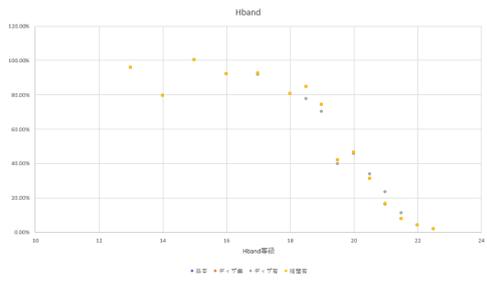
・ 欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect



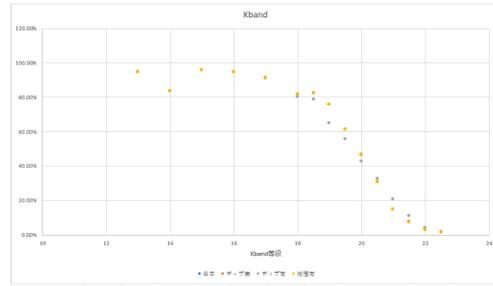
(a) O band



(b) J band



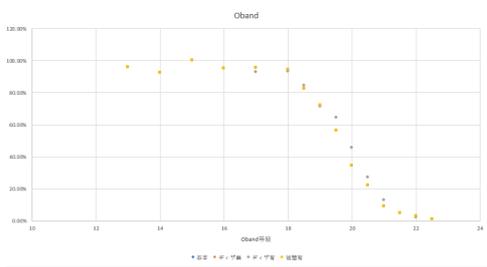
(a) H band



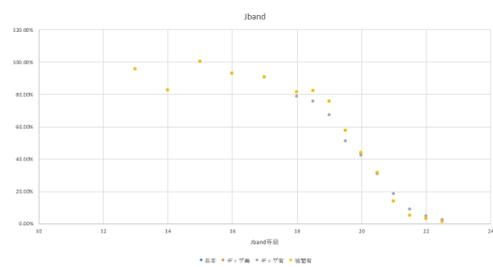
(b) K band

図 3.45: 欠陥ピクセル 0.01 % ・ single-pix defect

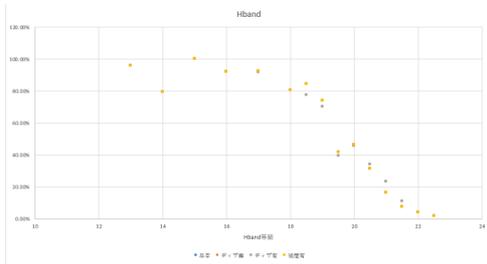
・ 欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect



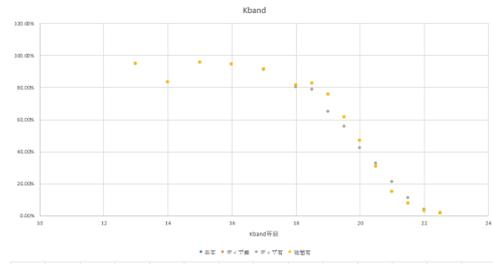
(a) O band



(b) J band



(a) H band



(b) K band

図 3.47: 欠陥ピクセル 0.01 % ・ 5-pix defect

band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17～20 等級	ディザリング観測 17～20 等級
O band	0.09	0.50	0.19	0.50
J band	0.13	1.09	0.26	3.86
H band	0.02	0.08	0.02	1.71
K band	0.03	0.88	0.06	3.47

(a) 欠陥ピクセル 0.01 % single-pix : 単位 (%)

band	欠陥ピクセル	ディザリング観測	欠陥ピクセル 17～20 等級	ディザリング観測 17～20 等級
O band	0.00	1.61	0.00	3.05
J band	0.00	1.04	0.00	3.72
H band	0.00	0.09	0.00	1.71
K band	0.00	0.92	0.00	3.56

(b) 欠陥ピクセル 0.01 % 5-pix : 単位 (%)

3.3 38 パターンの結果と考察

3.1 の比較結果より、3 %～0.01 %の全ての欠陥ピクセルの割合で、欠陥ピクセル無に比べて、欠陥ピクセル有の方が、カタログ等級との差が 0.2 等級未満で測光された星の割合が減少していることが分かった。HZG でとらえようとしている超遠方の GRB 残光は、期待される極大光度は 17～20 等級程度であるので、その等級帯を「遠方 GRB 等級帯」として詳しくみていく。遠方 GRB 等級帯では、カタログ等級との差が 0.2 等級未満の高精度で測光された割合が大きく減少する傾向がみられた。よって、欠陥ピクセルが HZG の赤外線望遠鏡の測光精度に影響を及ぼす原因の 1 つであることを確認することができた。また、欠陥ピクセルを 1 ピクセルごとにばらばらに取る場合と、5 × 5 ピクセルの島ごとに取る場合とでは、前者の方が、より大きな影響を受けて、測光精度が悪くなっている。これはばらばらに取る方が、単純に欠陥ピクセルの個数が多いため、欠陥ピクセルの上に星本体ないしその近傍スカイ領域が乗る確率が高いからだと考える事ができる。欠陥ピクセルの割合が高い方が顕著に結果として現れている。

3.2 の比較結果より、ディザリング観測の有効性が確認できた。欠陥ピクセルの影響で、特に遠方 GRB 等級帯で測光精度の悪化がみられたが、ディザリング観測は欠陥ピクセルが 3 %と多い場合でも極めて有効に働き、測光精度が顕著に改善していることが読み取れる。さらに 4 バンドのうち、O band と H band に比較的良く、ディザリング観測が有効に働いていた。また、どの程度の欠陥ピクセルに対して、ディザリング観測が有効であるのか、という検証では、やはり、欠陥ピクセルの割合が小さいと、星を測光する際に受ける影響も小さくなるため、0.1 %未満の欠陥ピクセルの割合では、ディザリングの有効性を明確には確認することができなかった。

欠陥ピクセルのカウント値を、周囲のピクセルのカウント値（の平均）で置き換える補間処理の結果について考察する。

この処理は、人工衛星の仕様上、ディザリング観測を行うことができないことになった場合に、欠陥ピクセルへの対応として代替として取り入れる手法であるが、欠陥ピクセルが 1 ピクセルずつばらばらにある

場合よりも、 5×5 ピクセルごとまとまっている場合の方が有効に働くことが確認できた。補間処理の精度は、いずれの欠陥ピクセルの割合においてもほぼ同様に、基本となる精度から0.1%未満の誤差の範囲内である。これは、高々3%の欠陥ピクセルが恒星像の真上に乗るケースは少なく、欠陥ピクセルにはスカイ領域が乗ることがほとんどであるため、星像そのものの測光を乱すことは少ないためではないかと考えられる。ディザリング観測を用いることができない場合でも、この補間処理により実質的な測光精度を維持できる可能性が得られた。どの程度まで回復するかは、欠陥ピクセルの割合に応じて変わることから、実際に手にする検出器の仕様に依って得られる測光精度が決まると考えられる。

第4章 まとめと課題

超遠方 GRB をオンボードで検出する人工衛星プロジェクト HZG の観測シミュレーション画像を作成し、測光してカタログ値と比較することにより、検出器上の欠陥ピクセルの影響を調べ、ディザリング観測の有効性や、その代替である補間法の有効性を定量的に調べた。

本研究から以下の事柄が導かれる。・欠陥ピクセルが3%という極めて多いレベルに達しても、HZG の赤外線望遠鏡におけるディザリング観測は極めて有効であり、データの欠損はほぼ免れる。

- ・特に、遠方 GRB 等級帯での測光精度の回復が顕著である。
- ・欠陥ピクセルが1ピクセルごとにばらばら存在する場合の方が、 5×5 ピクセルの島ごとに存在するよりも、ディザリング観測による測光精度の回復の有効性が高い。
- ・ディザリング観測が行えない場合、補間処理を行うことで、欠陥ピクセル有りによる影響の大半を軽減できることが分かった。

謝辭

参考文献

[1]

[2]

[3]

[4]

[5]