

MITSuME 望遠鏡の自動観測・解析システムの  
高度化と観測

石村 拓人

修士論文

東京工業大学大学院 理工学研究科 基礎物理学専攻

2008年 2月

# Abstract

Gamma-Ray Bursts (GRBs) are the most luminous explosions at the cosmological distances. The purpose of our study is to reveal the origin and radiation process of GRBs. We also study the unknown early universe at the redshift  $z \sim 10$ . We therefore built the MITSuME robotic telescope so that we observe the early optical afterglows of GRBs. The MITSuME telescope responds the Gamma-Ray Burst Coordinates Network (GCN) alerts and starts observations immediately to catch the rapid decaying afterglows. The data which we obtain are analyzed automatically to determine the coordinates and redshifts of GRBs.

In this thesis, we report the software developments and modeling of the best focusing to upgrade the automatic observation/analyses system. We also summarize the results of our GRBs observations from September, 2006 to February, 2008.

We have developed the software for image reduction, which performs removal the noises of pixels of CCD, co-addition of the frames, automatic detection of GRBs, and photometry. We show the automatic detection worked well for seven objects including GRB061121 and GRB070920A, which not exist in catalogs. This software is necessary for performing all the analyses in automatic analyses system.

Modeling of the best focusing position of the secondary mirror is necessary to improve the quality of our data when automatic observations are performed. The focus depends on the temperature and the pointing elevation of the telescope. In the test of this model, the differences of the model values and actual best focus values are  $\pm 30\mu\text{m}$ . In our optical system, the quality changes little within the range of  $\pm 50\mu\text{m}$ . So we can conclude that our model is practicable.

We now detected six GRBs, one supernova associated with a GRB, and measured the limiting magnitudes of thirteen GRBs in 1 year and 4 months since our system had started. For GRB061121, our data, when compared to the Swift data, revealed a detailed evolution of the spectral energy distribution, and the combined afterglow light curve suggests an achromatic break at  $\sim 70000$  sec. For GRB071112C, our observation started at 102 sec

after the trigger, and we found that its light curve did not decay until 500 sec after the trigger. The high-redshift record of our detected GRBs is  $z \sim 4.0$  for GRB080205.

# 目次

第1章	はじめに	9
第2章	ガンマ線バースト	11
2.1	ガンマ線バーストとは	11
2.2	GRBの放射機構	12
2.2.1	Fireballモデル	12
2.2.2	cooling break	12
2.2.3	jet break	15
2.2.4	早期可視光残光	18
2.3	GRBによる初期宇宙探査	20
2.4	GRBの観測体制	22
第3章	MITSuMEシステムについて	25
3.1	MITSuME望遠鏡とは	25
3.2	望遠鏡の仕様	26
3.3	検出器	29
3.4	ネットワーク	29
3.5	自動観測・解析システム	30
3.6	監視システム	34
第4章	自動解析システムの高度化	38
4.1	自動解析システム高度化の必要性	38
4.2	依存ソフトウェア	40
4.3	リダクションと重ね合わせ	41
4.3.1	バイアスを引く	41
4.3.2	ダークを引く	43
4.3.3	フラットで割る	44



4.3.4	欠陥ピクセルの補完	47
4.3.5	重ね合わせ	49
4.3.6	性能評価	49
4.4	新天体検出	50
4.5	測光	50
<b>第5章</b>	<b>新天体検出ソフトウェアの開発</b>	<b>53</b>
5.1	開発前の状況	53
5.2	新天体検出ソフトウェアの設計	56
5.2.1	要求と開発方針	56
5.2.2	アルゴリズム	57
5.3	動作試験	60
5.3.1	小惑星を使用した動作試験	60
5.3.2	超新星を使用した動作試験	64
5.3.3	GRBを使用した動作試験	73
5.4	まとめ	76
<b>第6章</b>	<b>フォーカス調整の自動化</b>	<b>77</b>
6.1	フォーカス自動調整の方針	77
6.2	測定	77
6.2.1	観測	78
6.2.2	解析	80
6.2.3	ベストフォーカスの精度	81
6.3	望遠鏡の温度とベストフォーカスの相関	81
6.3.1	原理	82
6.3.2	結果	82
6.4	望遠鏡の指向方向とベストフォーカスの相関	84
6.4.1	原理	84
6.4.2	結果	87
6.5	モデルの実用性	88
6.6	まとめ	89

<b>第7章 GRB 残光観測</b>	<b>90</b>
7.1 GRB 残光の観測結果 . . . . .	90
7.2 GRB061121 . . . . .	90
7.3 GRB070920A . . . . .	92
7.4 GRB071020 . . . . .	94
7.5 GRB071112C . . . . .	96
7.6 GRB071118 . . . . .	98
7.7 XRF080109/SN2008D . . . . .	100
7.8 GRB080205 . . . . .	101
<b>第8章 GRB061121</b>	<b>103</b>
8.1 GRB061121 について . . . . .	103
8.2 GRB061121 と標準星の観測 . . . . .	104
8.2.1 GRB061121 の観測 . . . . .	104
8.2.2 標準星と GRB061121 領域の同時観測 . . . . .	105
8.3 解析 . . . . .	107
8.3.1 リダクションと重ね合わせ . . . . .	107
8.3.2 ゼロ点+大気吸収係数の算出 . . . . .	107
8.3.3 測光 . . . . .	108
8.3.4 光度曲線 . . . . .	111
8.4 議論 . . . . .	112
8.4.1 ジェットブレイクの可能性 . . . . .	112
8.4.2 母銀河による吸収を示唆 . . . . .	116
8.4.3 SED の時間変化 . . . . .	117
8.5 まとめ . . . . .	119
<b>第9章 まとめ</b>	<b>120</b>
<b>付録A 限界等級を見積もった GRB</b>	<b>122</b>
A.1 限界等級を見積もった GRB の画像 . . . . .	122
A.2 限界等級を見積もった GRB の光度曲線 . . . . .	124
<b>付録B 小惑星の確認</b>	<b>127</b>

# 目 次

2.1	GRB970228 の残光	13
2.2	GRB030329/SN2003dh のスペクトル	14
2.3	fire ball の模式図	14
2.4	synchrotron-shock モデル	15
2.5	jet break の模式図	16
2.6	$E_{iso}$ と $E_{\gamma}$ の関係	17
2.7	光度曲線中のジェットブレイク	18
2.8	早期可視光残光のモデル。	19
2.9	GRB041219A と GRB050401 の早期可視光残光。	20
2.10	GRB990123 の光度曲線と GRB021004 の早期可視光残光。	21
2.11	宇宙の歴史。	21
2.12	GRB050904 の可視光スペクトル	22
3.1	MITSuME 望遠鏡で観測可能な波長帯	26
3.2	MITSuME 望遠鏡による残光観測の流れ	27
3.3	明野に設置した望遠鏡とドーム	27
3.4	明野に設置した3色同時撮像カメラ	29
3.5	明野のネットワーク	31
3.6	GRB 観測および通常観測の流れ	32
3.7	パトロールシステムにおける、光度変化チェックの仕組み	34
3.8	GCN 情報 web ページ	35
3.9	ドーム内外の監視カメラの映像	36
3.10	視野カメラの web ページ	36
3.11	FITS ヘッダーの情報をグラフ化した web ページ	37
4.1	高度化された自動解析システムのフローチャート	39

4.2	リダクションのフローチャート	42
4.3	オーバースキャン領域	43
4.4	ダーク画像	44
4.5	マスクをかけた画像	45
4.6	フラット画像の比較	46
4.7	バッドピクセルマスクの画像	47
4.8	フラット画像とダーク画像のヒストグラム	48
4.9	aperture photometry の模式図	51
5.1	抜き出した恒星をカタログと比較し、更に誤認点を差し引いた図 (下川辺 卒論,2004)	54
5.2	ROTSE による、GRB070611 の画像	55
5.3	新天体検出ソフトウェアのフローチャート	59
5.4	1989kb を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行った 結果	62
5.5	1989kb を使用した動作試験での最終結果	62
5.6	kalypso を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行った 結果	63
5.7	kalypso を使用した動作試験での最終結果	64
5.8	montague を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行っ た結果	65
5.9	montague を使用した動作試験で出力された新天体候補の画像	66
5.10	ASRAS に投稿された、SN2007gi と SN2007gk の図	67
5.11	SN2007gi を撮像した 3 色の画像に対してカタログの比較を行った図	68
5.12	SN2007gi を使用した動作試験での最終結果	68
5.13	SN2007gi のカウント分布の切り方	69
5.14	SN2007gi のカウント分布	69
5.15	SN2007gk の動作試験で、使用した 6 枚の画像に対してカタログの比較を 行った図	71
5.16	SN2007gk を使用した動作試験での最終結果。	71
5.17	SN2007gk のカウント分布の切り方	72
5.18	SN2007gk のカウント分布	72

5.19	GRB061121 の画像を使用し、3色の画像でカタログとの比較を行った図	73
5.20	GRB061121 を使用した動作試験での最終結果	74
5.21	GRB070920 観測で得られた画像に対して、エラーサークル内の恒星とカタログの比較を行った図	75
5.22	GRB070920A の I バンドのデータについて、20 日と翌 21 日の比較をした図	75
6.1	冬場での、明野の典型的な温度変化	79
6.2	シーイングの模式図	79
6.3	PSF FWHM の平均を求めるために SExtractor で抽出した恒星	80
6.4	ベストフォーカスのフィッティングの図	81
6.5	ベストフォーカスの精度を算出するための模式図	82
6.6	ベストフォーカスの温度依存を説明する模式図	83
6.7	ベストフォーカスと望遠鏡の温度の相関	85
6.8	ベストフォーカスの高度依存を説明する模式図	86
6.9	ベストフォーカスと望遠鏡の指向方向の相関	87
6.10	実際のベストフォーカスとモデルとの残差	88
6.11	スケジューラによる自動観測から得られた画像	89
7.1	GRB061121 の画像	92
7.2	GRB070920A の画像	93
7.3	GRB070920A の光度曲線	94
7.4	GRB071020 の画像	95
7.5	GRB071020 の光度曲線	95
7.6	GRB071112C の画像	96
7.7	GRB071112C の光度曲線	97
7.8	GRB071118 の画像	99
7.9	GRB071118 の光度曲線	100
7.10	SN2008D の画像	101
7.11	GRB080205 の画像	102
8.1	GRB061121 の BAT の光度曲線	104
8.2	GRB061121 観測時のスカイレベルの時間変化	105
8.3	標準星観測時のスカイレベルの変動	106

8.4	参照星の画像	110
8.5	Page et al.(2007) の光度曲線に我々のデータをプロットした図	113
8.6	ジェットブレイクを示唆する図	114
8.7	Amati の関係および Ghirlanda の関係に GRB061121 をプロットした図	115
8.8	MITSuME と XRT の SED	116
8.9	596-1566 秒における UVOT と XRT を Broken power-law fit した図 (Page et al. 2007)	117
8.10	GRB061121 の SED 時間変化の図	118
A.1	GRB060923A と GRB061019 の画像。	122
A.2	GRB061222A と GRB061222B の画像	122
A.3	GRB070129 の画像と GRB070208 の画像	122
A.4	GRB070406 の画像と GRB070412 の画像	123
A.5	GRB070520 の画像と GRB070612B の画像	123
A.6	GRB070616 の画像と GRB070917 の画像	123
A.7	GRB071003 の画像と GRB071025 の画像	123
A.8	GRB071028 の画像	124
A.9	GRB060923A と GRB061019 の光度曲線。	124
A.10	GRB061222A と GRB061222B の光度曲線	125
A.11	GRB070129 の光度曲線と GRB070208 の光度曲線	125
A.12	GRB070406 の光度曲線と GRB070412 の光度曲線	125
A.13	GRB070520 の光度曲線と GRB070612B の光度曲線	126
A.14	GRB070616 の光度曲線と GRB070917 の光度曲線	126
A.15	GRB071003 の光度曲線と GRB071025 の光度曲線	126
B.1	1989kb が時間とともに移動している様子	127
B.2	kalypso が時間とともに移動している様子	127
B.3	montague が時間とともに移動している様子	128

# 表 目 次

2.1	日本および世界のロボット望遠鏡。 . . . . .	24
3.1	明野に設置した望遠鏡の仕様 . . . . .	28
3.2	明野に設置した CCD カメラ、Alat U6 の仕様 . . . . .	30
4.1	自動リダクションソフトウェアの処理時間 . . . . .	49
5.1	新天体検出ソフトウェアの出力形式 . . . . .	58
5.2	新天体検出ソフトウェアの動作試験の結果 . . . . .	60
5.3	1989kb の動作試験結果 . . . . .	61
5.4	kalypso の動作試験結果 . . . . .	63
5.5	SN2007gi の動作試験結果 . . . . .	68
5.6	SN2007gk の動作試験結果。 . . . . .	70
5.7	GRB061121 の動作試験結果 . . . . .	74
5.8	GRB070920 の動作試験結果 . . . . .	75
6.1	ベストフォーカスと望遠鏡の温度の相関 . . . . .	84
6.2	ベストフォーカスと望遠鏡の指向方向の相関 . . . . .	87
7.1	MITSuME 明野望遠鏡の GRB 残光観測結果 . . . . .	91
8.1	GRB061121 の基本データ . . . . .	103
8.2	標準星の観測スケジュール . . . . .	106
8.3	標準星解析から求めたゼロ点+大気吸収係数。 . . . . .	108
8.4	参照星の等級 . . . . .	109
8.5	GRB061121 の等級 . . . . .	110
8.6	各バンドの吸収量 . . . . .	111
8.7	AB 等級表した各バンドごとのベガの明るさ . . . . .	111

# 第1章 はじめに

我々は、ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst:GRB) の早期可視光残光を観測することにより、GRBの起源と放射機構の解明、およびGRBを用いた初期宇宙の探査を目標としている。この目標を達成するため、我々は東大宇宙線研究所明野キャンパスと国立天文台岡山天体物理観測所、石垣島天文台に MITSuME 望遠鏡 (Multicolor Imaging Telescopes for Survey and Monstrous Explosions) を設置した。このうち、東工大は明野の MITSuME 望遠鏡のシステム開発とその運用を担当している。

急速に減光する GRB 可視光残光を発生初期から捉えるため、我々は GRB 発生のお知らせを受けると自動的に追観測を行う、自動観測システムを開発した。さらに、すばる望遠鏡を始めとした世界中の研究機関へ我々の観測結果を素早くフィードバックするため、取得したデータが自動的に解析される自動解析システムの開発も行った。明野の MITSuME 望遠鏡では、これらのシステムの運用は2006年9月に開始され、2008年2月現在も GRB の自動観測とデータの自動解析が行われている。

また、我々は GRB 観測を行っていない時間を有効に活用するため、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei:AGN) や超新星などの突発天体の光度変化を自動的にモニターする、パトロール観測システムの開発にも着手した。パトロール観測システムとは、自動的に天体観測のスケジュールを作成し観測を行う自動観測システムと、取得したデータを測光し光度変化を調べる自動解析システムから構成される。これにより、現在、我々は GRB の観測も通常観測も完全に自動で運用を行っている。

この論文では、まず我々の自動観測・解析に不足していた機能を補うために行った、システムの高度化について記す。次に、我々のシステム運用の総括として、運用開始から2008年2月までの GRB 残光観測の結果を記す。第2章で GRB の性質と GRB の観測体制について記し、第3章で MITSuME 望遠鏡のシステムの詳細に付いて記す。自動解析システムの高度化として、第4章ではデータの一次処理 (リダクション) と重ね合わせ、測光を自動的に行うソフトウェアの開発について記し、第5章では GRB などの新天体を自動検出するソフトウェアの開発を記す。自動観測システムの高度化として、第6章で



フォーカス調整の自動化について記す。第7章で我々の GRB 残光の観測結果をまとめ、特に GRB061121 の解析結果は第8章に記す。最後に、第9章でまとめと今後について記す。

## 第2章 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (gamma-ray burst: GRB) とは、宇宙のある一点から突如として多量のガンマ線が数 10 秒程度の短時間に振り注ぐ現象であり、現在では宇宙最大の爆発現象であることが分かっている。しかし、その放射機構や中心エンジンにはいまだに謎が多く残されている。また近年、GRB を用いることにより、 $z \sim 10$  の最初期宇宙を観測することができるかと期待されている。この章では、まず現状での GRB の理解について記し、次に GRB の放射機構および GRB を用いた初期宇宙探査について記す。そして最後に、GRB の観測体制についてまとめる。

### 2.1 ガンマ線バーストとは

GRB は、1960 年代に打ち上げられた核実験査察衛星 (Vela 衛星) によって、予期せずに発見された (Klebesadel, Strong & Olson 1973)。継続時間は数 10 秒程度であり、激しい強度変化が見られ、全天で 1 日に 1 回程度発生することが分かった。しかし、その後 30 年ほどの間は発生場所がどこか不明であり、GRB の正体が何かも解明されずにいた。

GRB の研究は、1997 年にイタリアの X 線/ガンマ線天文観測衛星 BeppoSAX が GRB970228 と同じ位置で輝く X 線源、X 線残光を発見したことにより大きく進展する (Costa et al. 1997、図 2.1 の上図)。X 線残光の発見に続き、可視光で輝く残光が地上望遠鏡、さらにハッブル宇宙望遠鏡でも観測され (van Paradijs et al. 1997、図 2.1 の中図)、これらの残光が X 線・可視光とも時間のべき関数で急速に減光することが明らかになった (Wijers et al. 1997、図 2.1 の下図)。これ以後の観測から、今では GRB には X 線から電波までの幅広い波長帯で数日の間輝く残光を伴い、それらが典型的にはべき  $\sim -1$  で時間と共に減光することが知られている。また、GRB 残光および GRB 母銀河の分光観測によって GRB までの詳細な距離が求まり (Metzger et al. 1997 など)、現在では GRB は主に赤方偏移  $z > 0.2$  の遠方宇宙で発生する宇宙最大の爆発現象であると考えられている。

HETE-2 (High Energy Transient Explorer 2) 衛星が 2003 年 3 月 29 日 (UT) に検出した

GRB030329 の残光スペクトルに Ic 型の超新星成分が発見されたことから (図 2.2)、GRB と超新星に関連があることが確実になった (Stanek et al. 2003、Hjorth et al. 2003、Kawabata et al. 2003)。現在、多くの GRB は太陽の数 10 倍以上の質量を持つ巨大な星が一生を終えた際に、つぶれてブラックホールになるときに発生すると考えられている<sup>1</sup>。しかし、核心の物理的発生機構はいまだに謎に包まれている。

## 2.2 GRB の放射機構

### 2.2.1 Fireball モデル

GRB 本体および残光の特徴を説明するための標準的なモデルは Fireball モデルである (Paczynski et al. 1994、Ress and Meszaros et al. 1994、模式は図 2.3)。これは、大質量星を起源とした中心エンジンから大量のエネルギーをもつ光子と電子・陽電子の火の玉が生まれ、加速膨張するというものである。このとき、火の玉からローレンツ因子  $\Gamma \sim 100$  程度の相対論的速度でジェット状にシェルが放出される。そして、シェル同士の衝突から生じた衝撃波 (internal shock) によって加速された電子から放射されるシンクロトロン放射が GRB 本体を生み出し、1 つにまとまったシェルが星間物質と衝突する際に生じた衝撃波 (external shock) に加速された電子が放射するシンクロトロン放射によって残光が生み出されると考えられている。

### 2.2.2 cooling break

Fireball モデルの理論で予想される、残光のスペクトルおよび光度曲線は図 2.4 になる (Sari, Piran & Narayan et al. 1998)。これは、べき関数で分布する電子からシンクロトロン放射が放出されるとした場合のスペクトルと光度曲線である。GRB030329 では、東工大の屋上に設置した口径 30cm の望遠鏡が、シンクロトロン振動数  $\nu_c$  が観測振動数帯を通過した際に現れる cooling break を観測し<sup>2</sup>、そこから GRB の様々な物理量を求めることに成功した。求めた物理量は具体的には、ショックのエネルギーがどれだけの割合

---

<sup>1</sup>GRB には継続時間が異なる 2 つの種類があると考えられている。継続時間  $>2$  秒のものを long GRB、継続時間  $<2$  秒のものを short GRB と呼んでいる。long GRB の起源が大質量星であり、short GRB の起源は中性子星やブラックホールの合併と考えられている。

<sup>2</sup>この時観測された光度曲線は、図 2.4 の右下図にある光度曲線 “adiabatic hydrodynamics, slow cooling” であった。

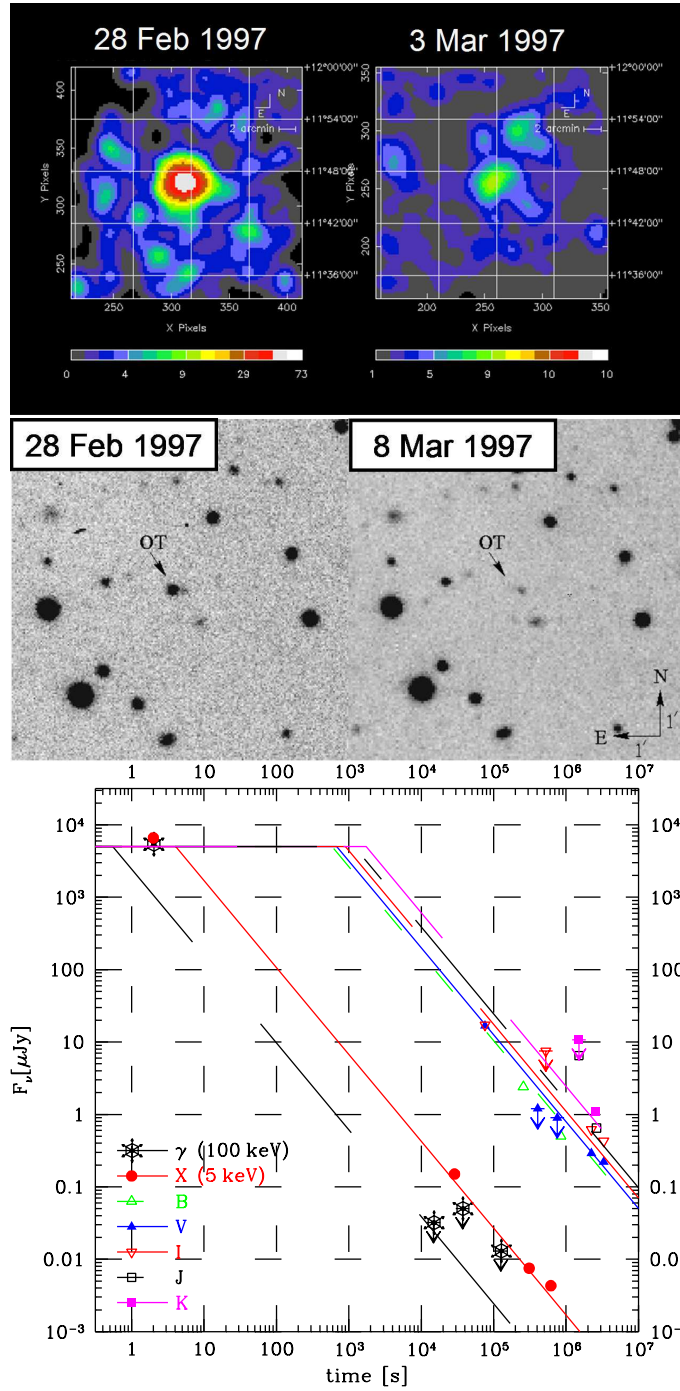


図 2.1: GRB970228 の残光。左上:BeppoSax による、発生 8 時間後の X 線残光。右上:BeppoSax による、発生 2 日後の X 線残光 (Costa et al. 1997)。左上と比較して、X 線残光は時間とともに減光していることがわかる。左中:ハッブル望遠鏡による、発生当日の可視光残光。右中: ハッブル望遠鏡による、発生 8 日後の画像 (van Paradijs et al. 1997)。可視光残光が減光し見えなくなっている。下:GRB970228 の X 線・可視光・赤外線残光の光度曲線 (Wijers et al. 1997)。残光はどの波長でも、時間のべき乗で減光している。

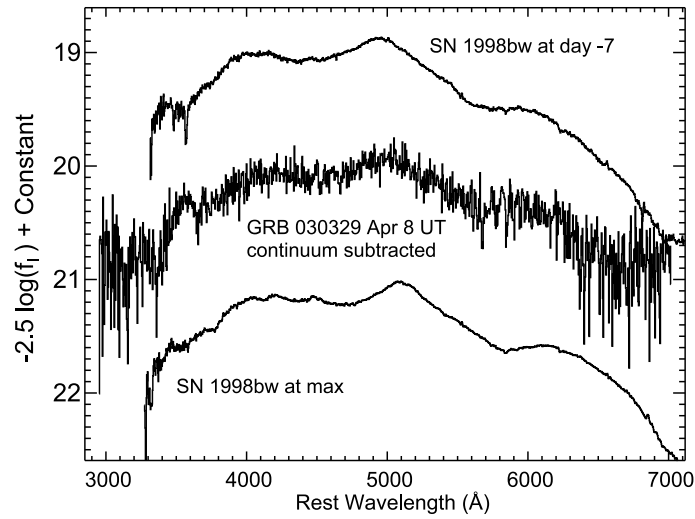


図 2.2: GRB030329/SN2003dh、SN1998bw のスペクトルの比較 (Stanek et al. 2003)。4月8日のGRB030329の観測では、GRB可視光残光のpower law成分が消え、Ic型の超新星SB1998bwと非常によく似たスペクトルが表れた。

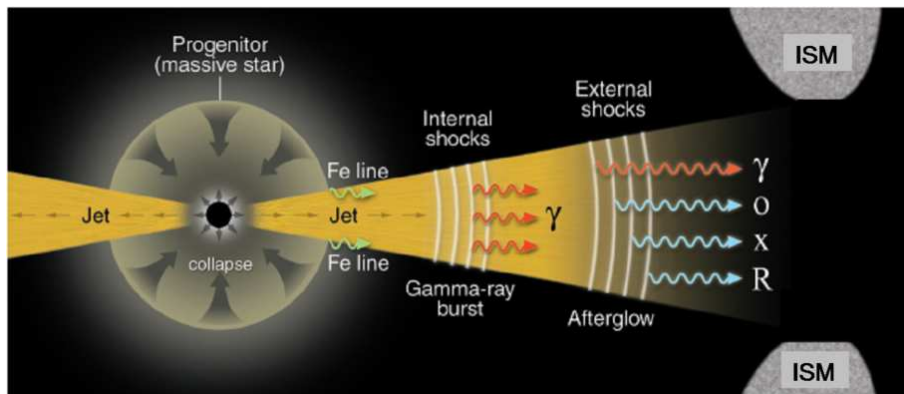


図 2.3: fire ball モデルの模式図。

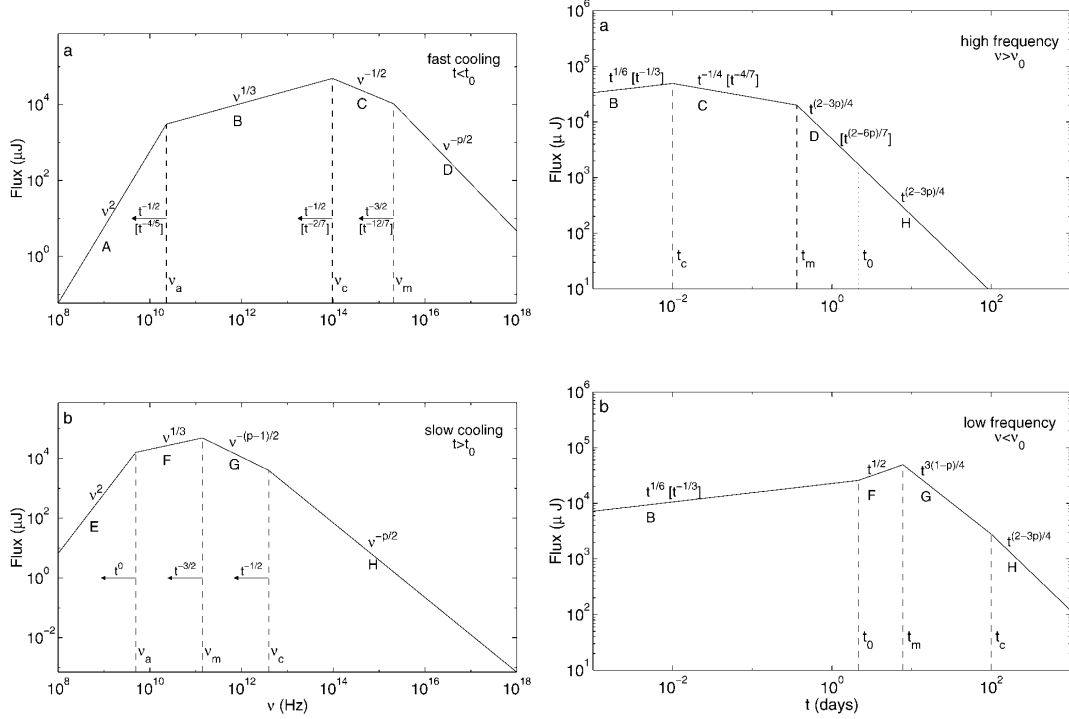


図 2.4: synchrotron-shock モデル (Sari, Piran & Narayan et al. 1998)。左上: $\nu_c < \nu_m$  のとき (fast cooling) のスペクトル。左下: $\nu_c > \nu_m$  (slow cooling) のスペクトル。 $\nu_c$  はクーリング振動数、 $\nu_m$  は星間物質の内部エネルギーから決まる典型的なランダム運動のローレンツ因子を持った電子が放出するシンクロトロン振動数、 $\nu_a$  は自己吸収振動数。 $p$  はべき関数で分布する電子のべき。右上: radiative evolution のときの光度曲線。右下: adiabatic evolution のときの光度曲線。

で電子や磁場に転換されたかを意味する  $\epsilon_e$  と  $\epsilon_B$ 、cooling break 時のローレンツ因子  $\Gamma$  と磁場の大きさ  $B$ 、である (Sato et al. 2003)。典型的には、電子のべき  $p$  は  $\sim -2$  であるので、cooling break 後における光度曲線のべきは  $\sim -1$  となる。なお、複数の可視光バンドで GRB の残光を観測した場合には、時間とともに減少するクーリング振動数  $\nu_c$  がそれぞれのバンドを通過する時刻に違いがあるため、バンド毎に異なるタイミングで cooling break が観測されることになる。

### 2.2.3 jet break

GRB のシェルの放射は等方的ではなくジェット状であると考えられている (Rhoads et al. 1997, Rhoads et al. 1999)。ある距離  $R$  でのジェットの横方向の大きさは、始めのジェットの角度  $\theta_j$  から評価される  $R\theta_j$  より  $R/\Gamma$  大きくなる。すなわち、ジェットの角度  $\theta$

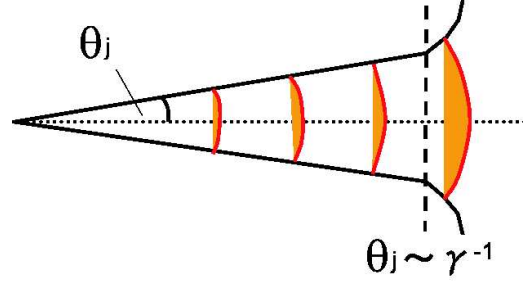


図 2.5: jet break の模式図。

は  $1/\Gamma + \theta_j$  となる。これが、星間物質との衝突により衝撃波が減速し  $1\Gamma \sim \theta_j$  となると、 $\theta$  は  $1/\Gamma$  に比例し急速に広がることになる (図 8.6)。その結果、よりたくさんの物質との衝突によりさらに減速し、残光は急に暗くなる。これにより光度曲線に現れる折れ曲がりを jet break と呼ぶ。jet break 後における光度曲線のべきは、典型的には  $\sim -2$  である。jet break の時刻と  $\theta_j$  には、次のような関係がある (Sari, Piran & Halpern et al. 1999)。

$$t_{jet} \sim 6.2(E_{52}/n_1)^{1/3}(\theta_j/0.1)^{8/3}hr \quad (2.1)$$

ここで、 $t_{jet}$  は jet break が起きた時刻、 $E_{52}$  は等方的な放射の場合の GRB のエネルギーを  $10^{52}$ [erg] で規格化したもの、 $n_1$  は周囲の星間物質の密度 [ $\text{cm}^{-3}$ ] である。

光度曲線に jet break が見つかり  $\theta_j$  を知ることができるので、そこから GRB 本来のエネルギー  $E_\gamma$  を算出することができる。等方的な放射を過程した場合の GRB のエネルギーを  $E_{iso}$ (観測量) とすると、 $E_\gamma$  は次のように与えられる。

$$E_\gamma = \{1 - \cos(\theta_j)\} \cdot E_{iso} \quad (2.2)$$

図 2.6 は  $E_{iso}$  と  $E_\gamma$  のヒストグラムである。 $E_{iso}$  は  $10^{52}$ erg から  $10^{54}$ erg まで、広く分布している。一方、ジェットの開き角分を補正した  $E_\gamma$  では、GRB のエネルギーは分布は  $10^{51}$ erg に集中し、超新星の運動エネルギーの総量と一致した値となる (Frail et al. 1997)。

jet break は幾何学的な理由で生じるため、複数の波長帯で同時に折れ曲がりが観測されることになる。図 2.7 の左図である GRB990510 の光度曲線では、I、R、V バンドで同時に折れ曲がりが観測されたため、この折れ曲がりは jet break であると考えられている (Harrison et al. 1999)。しかし近年、Swift 衛星の XRT により詳細な X 線残光の観測が可能になると、X 線と可視光で折れ曲がりが一致しない GRB も頻繁に観測されるようになった (Liang et al. 2008、図 2.7 の右図)。そのため、GRB 残光では X 線と可視光で放射メカニズムが異なるという議論も行われているが、いまだに答えは出ていない。この問

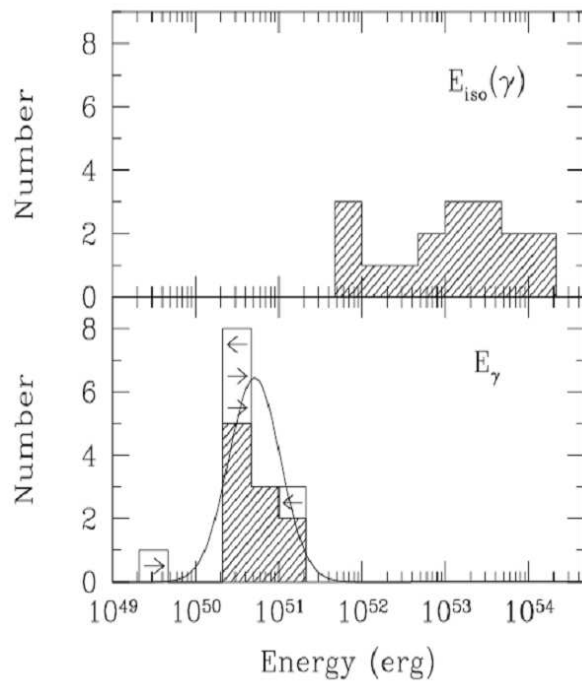


図 2.6:  $E_{iso}$  と  $E_\gamma$  の関係。  $E_{iso}$  の分布は  $10^{52}$ erg から  $10^{54}$ erg まで、広く分布している。一方、ジェットの開き角分を補正した  $E_\gamma$  では、GRB のエネルギーは分布は  $10^{51}$ erg に集中する (Frail et al. 1997)。



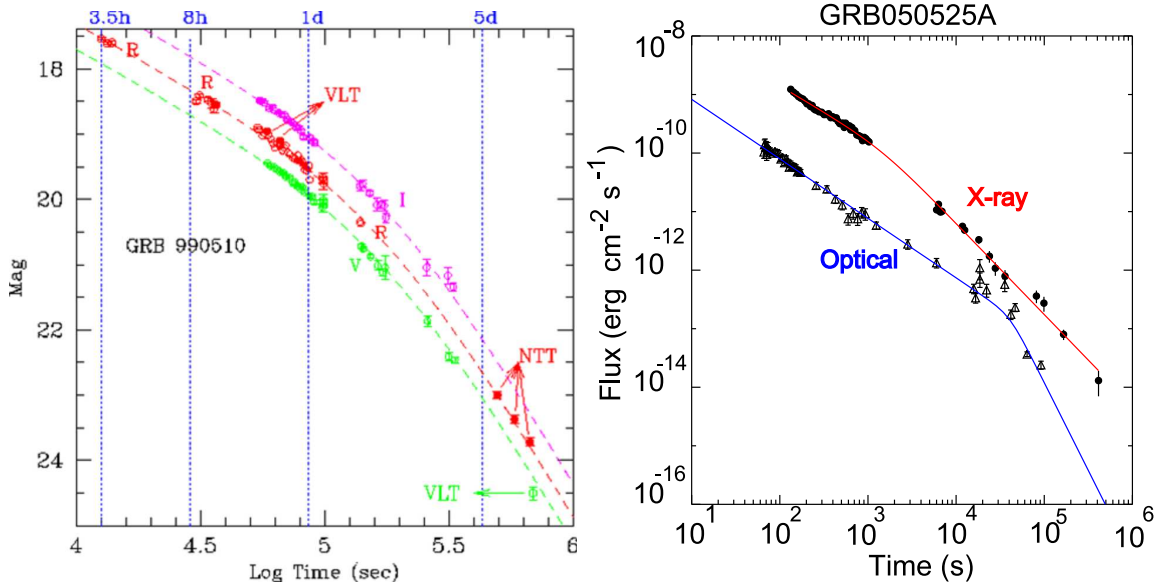


図 2.7: 光度曲線中のジェットブレイク。左:GRB990510 の光度曲線 (Harrison et al. 1999)。桃色:Iバンド、赤:Rバンド、緑:Vバンド。波長の異なる3バンドで同時に折れ曲がり観測された。右:GRB050525A の光度曲線 (Liang et al. 2008)。X線と可視光で折れ曲がりが見られる時間が異なる。

題を解決するためにも、多くのGRBにたいして、X線と可視光の同時観測を行っていく必要がある。

## 2.2.4 早期可視光残光

発生後しばらくしたGRB可視光残光は、べき $\sim -1$ で単調に減光する。一方、GRB発生直後の可視光残光には複雑な光度変化が現れることが知られている。観測例が非常に少ないために早期可視光残光はいまだに謎に包まれているが、その振る舞いで注目すべき点は大きく分けて2つあると思われる(玉川氏、2007年GRB京都発表資料)。それは、(1)GRB本体のガンマ線放射と同時刻の可視光残光の振る舞い(2)reverse shock成分による可視光残光の振る舞い、である。

(1)では、ガンマ線放射と同期し可視光残光が増光する例が観測されているが、ガンマ線放射と関係無く減光を続ける残光も観測されており、この増光のメカニズムは解明されていない。ただ、観測したGRBがいずれの場合でも、いまだに詳しいことが分かっていないGRB本体の放射プロセスを解明するための手がかりになるはずである。

(2)に関して、理論的に予想される早期可視光残光の光度曲線を図2.8に載せる(zhang

et al. 2003)。この理論では2つのタイプが考えられている。1つ目は、reverse shock 成分が forward shock(=external shock) による光度ピークの前に表れた場合 (Type I: 図 2.8 の太線)。これは、増光後に  $t^{-2}$  で急激に減光し (reverse shock 成分)、再び  $t^{1/2}$  で増光した後で通常の  $t^{-1}$  の減光を行う (forward shock 成分)。2つ目は、forward shock の光度ピーク後に reverse shock 成分が表れた場合 (Type II: 図 2.8 の細線) である。この場合には、reverse shock からの放射によりまず増光し、そして  $t^{-2}$  で急激に減光した後で通常の  $t^{-1}$  の減光を行うという。Type I、Type II とも、reverse shock によるピークの時刻から、Fireball から放出されたシェル最初のローレンツ因子に制限を与えることが出来る。

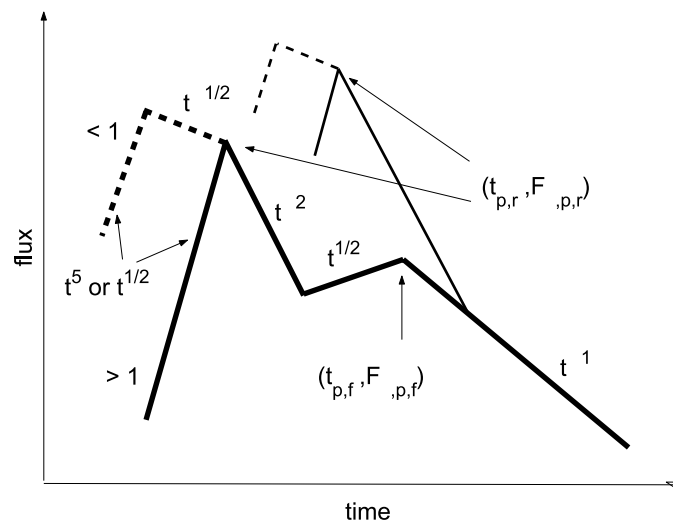


図 2.8: 早期可視光残光のモデル (zhang et al. 2003)。太線が Type I、細線が Type II。( $t_{p,r}$ ,  $F_{\nu,p,r}$ ) は reverse shock 成分のピークの時間とフラックス。( $t_{p,f}$ ,  $F_{\nu,p,f}$ ) は forward shock 成分のピークの時間とフラックス。

### GRB 本体のガンマ線放射と同時刻の可視光残光

GRB 本体のガンマ線放射と同時に可視光残光を観測した例として、GRB041219A、GRB050401 がある (図 2.9)。GRB041219A の場合では、GRB 本体のガンマ線放射と可視光の増光が同期している (Vestrand et al. 2005)。両者の放射メカニズムに関係があることが示唆される。しかし、GRB050401 の場合には、可視光残光は GRB 本体のガンマ線放射と相関なく減光を始めている (Rykoff et al. 2005)。

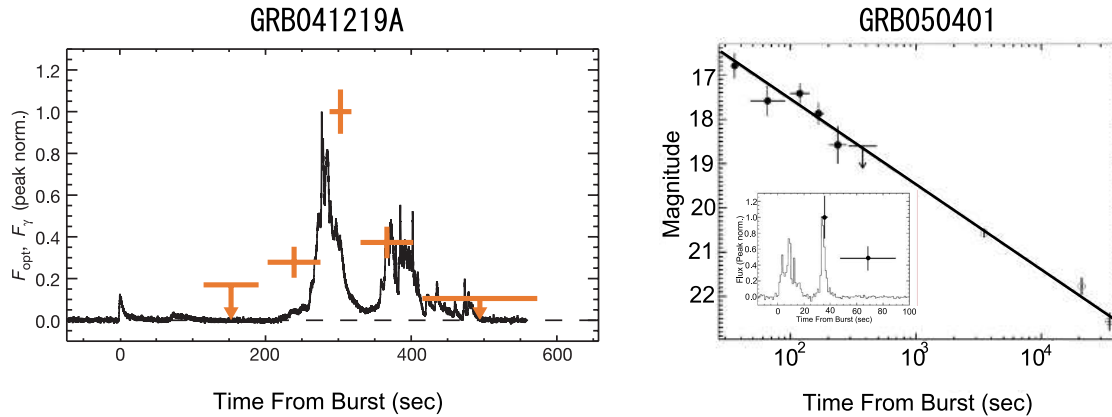


図 2.9: GRB041219A と GRB050401 の早期可視光残光。左:GRB041219A の光度曲線 (Vestrand et al. 2005)。増光と GRB 本体のガンマ線放射が同期している。右:GRB050401 の光度曲線 (Rykoff et al. 2005)。GRB 本体のガンマ線放射と可視光残光に相関は見られない。

### reverse shock 成分による可視光残光の振る舞い

reverse shock 成分を観測したと考えられている GRB には、GRB990123、GRB021004 などがある (図 2.10)。GRB990123 では、観測時に 9mag という明るい可視光残光が観測された (Akerlof et al. 1999)。増光成分は GRB 本体のガンマ線放射とずれた時間にピークがきている。この GRB は Type II に分類されるものであると考えられ、reverse shock 成分のピークの時刻から、Fireball から放出されたシェルの最初のローレンツ因子は  $\sim 300n^{-1/8}$  と推定された (zhang et al. 2003)。GRB021004 では、理化学研究所に設置された望遠鏡が発生 193 秒後からの観測に成功したのを始め、早期可視光残光が詳細に観測された (Uemura et al. 2003)。その振る舞いは Type I に分類されるものであり、発生 2000 秒後には  $t^{1/2}$  の部分に対応すると思われる台地構造の存在が明らかになった。

## 2.3 GRB による初期宇宙探査

GRB とその残光は、宇宙にある光源の中で一番明るいので  $z > 10$  の遠方でも検出可能である (図 2.11)。そのため、まず (1) 星形成の歴史の調査、が可能である。宇宙に初めて誕生した星<sup>3</sup>からの GRB を我々が捉えることも理論上は不可能ではない。また赤方偏移ごとの GRB の発生頻度を調べることにより、各世代の星形成率を知ることができる。次

<sup>3</sup>初代星は太陽の数 10 倍を越える大質量で生まれたと考えられているので、100 万年程度の短期間に燃えつき GRB を起こすと期待されている。

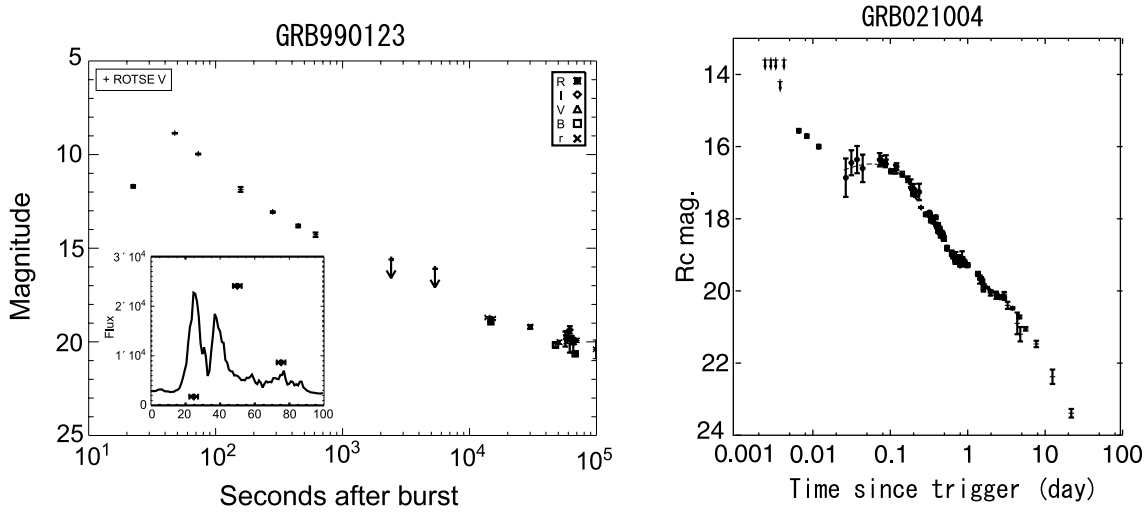


図 2.10: GRB990123 と GRB021004 の早期可視光残光。左:GRB990123 の光度曲線 (Akerlof et al. 1999)。Type II に分類されると考えられる。右:GRB021004 の光度曲線 (Uemura et al. 2003)。Type I に分類されると考えられる。

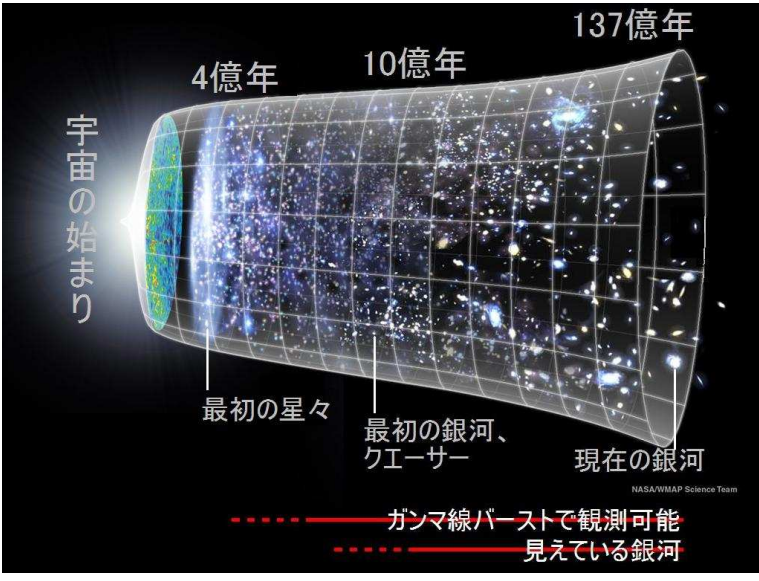


図 2.11: 宇宙の歴史 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: WMAP<sup>5</sup>)。GRB を用いることにより、第一世代星がいつ誕生したか、宇宙再電離の時期の特定、宇宙の重元素汚染の歴史、を調べることが可能と考えられている。

に、(2) 各時代の電離度の測定、(3) 重元素汚染の歴史の解明、ができる。GRB 残光を分光観測することにより、近赤外領域に赤方偏移した水素ライマン吸収端の形状からその時代の水素ガス電離度が、残光に見られる吸収線から重元素量が、それぞれ見積られる。

GRB050904 (赤方偏移  $z=6.3$ ) の観測から、GRB による (2)、(3) の探査が初めて行わ

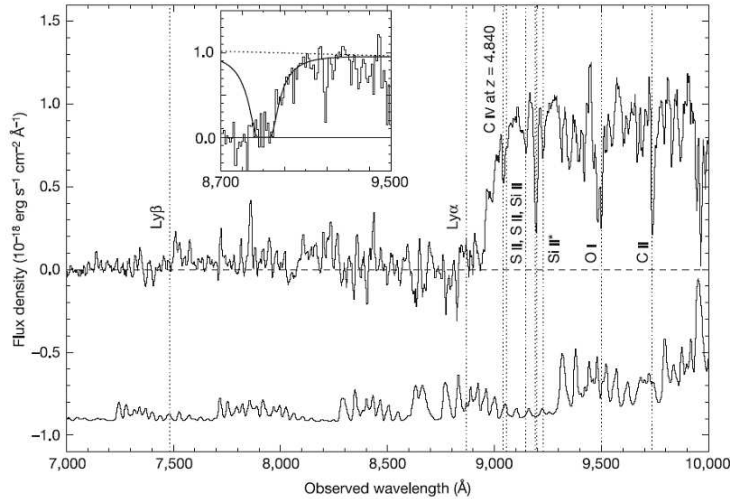


図 2.12: GRB050904 の可視光スペクトル (Kawai et al. 2006)。Ly $\alpha$  の吸収線から、この GRB が赤方偏移  $z=6.3$  と見積もられた。このスペクトルには、SII、SiII、OI および CII の吸収線が共通の赤方偏移  $z=6.295$  で検出された。

れ、GRB を用いた初期宇宙探査が現実のものとなった (Kawai et al. 2006)。図 2.12 がすばる望遠鏡で取得された GRB050904 の可視光残光スペクトルである。このスペクトルは、赤方偏移  $z=6.3$  のライマン吸収端を堺に短波長側では、中性水素の吸収を受けたためにフラックスがほとんど無い。解析の結果、この中性水素は母銀河に付随するものであることが分かった。また、この時代の水素の中性率は  $17\%(1\sigma)\sim 60\%(3\sigma)$  と求まり、 $z=6.3$  の宇宙はすでにほぼ電離していたことが判明した。さらにライマン吸収端の長波長側では SII、SiII、OI、CII の吸収線が検出され、水素と重元素の柱密度比からこれら重元素の金属量が太陽の  $1/10$  程度であると導かれた。

2007 年 10 月 21 日に発生した GRB071021 では、分光観測は行われていないものの、すばる望遠鏡をはじめ世界の大型望遠鏡の測光結果からこの GRB が赤方偏移  $z>6.3$  で発生したという可能性も議論されている (GCN6972、GCM6980)。今後、赤方偏移  $z>6.3$  の GRB が分光観測され、GRB050904 と同様の詳細な初期宇宙探査が行われるのも時間の問題である。

## 2.4 GRB の観測体制

GRB の研究には残光の観測が重要であり、特に現在までの GRB の理解には地上望遠鏡による可視光残光の観測が大きく貢献している。可視光望遠鏡の追観測は、GRB 観測

衛星が特定した GRB の位置情報を、GRB 位置情報ネットワーク (the Gamma ray burst Coordinate Network: GCN) からインターネットを介して即座に取得することから始まる。

全世界に残光観測を行う体制が充実し始めたのは、HETE-2 の打ち上げ以降である。HETE-2 は GRB の発生位置を機上で計算し、その位置情報を即座に GCN へ速報することができた。この HETE-2 の登場により、GRB を発生初期から詳細に観測することが可能になった。現在は、主に 2004 年に打ち上げられた Swift 衛星が GRB の検出、および世界中へ位置情報の速報を行っている<sup>6</sup>。Swift 衛星が搭載している検出器は、BAT(Burst Alert Telescope)、XRT(X-Ray Telescope)、UVOT(UltraViolet/Optical Telescope) の 3 種類である。Swift 衛星は全天の 1/6 を監視する BAT で GRB を検出し、およそ 3 分角の精度で GRB の位置を特定し、計算結果を GCN へ速報する。と同時に、高速で姿勢制御を行い、XRT と UVOT を GRB の方向へ向けて自身で X 線と紫外線/可視光の追観測も行い、結果を再び GCN に通知する。特に XRT の位置速報は通常では BAT のアラートの約 100 秒に流れ、その精度は数秒角と非常に高精度である。なお、Swift 衛星は年間 100 発のペースで、GRB の検出と GCN への通報を行っている。

現在多くの地上の望遠鏡は、GRB 発生を知らせる GCN を受け取ると自動的に GRB の座標へ導入するよう設計されており、GRB 発生初期から可視光の追観測を行っている。表 2.1 のように、このようなロボット望遠鏡は日本を含む世界中に広く設置されている。これらロボット望遠鏡の多くは基本的に数 10cm 程度の小型・中型の望遠鏡であるが、早期可視光残光の観測は十分行える。

---

<sup>6</sup>他に、X 線ガンマ線天文衛星 INTEGRAL、ガンマ線天文衛星 AGILE が GRB の位置情報を GCN に通知している。

望遠鏡	バンド	口径 [cm]	設置場所
MITSuME	<i>g</i> 、R、I (ZJHK)	50 (91)	明野、岡山、石垣島
Kanata	V(R)、J、K	150	広島
MAGNUM	R、I、J、H、K	200	ハワイ
ISAS Telescope	R,J,H,K	130	相模原
AROMA	R	30	青山大学
RIMOTS	no filter	30	宮崎大学

望遠鏡	バンド	口径 [cm]	設置場所
ROTSE III	no filter	45	米、豪、イスラエル、ナミビア
KAIT	V、I、no filter	76	米
TAROT	R	25	カナリア諸島
Faulkes Telescope	R	200	米、豪
P60	R、 <i>i'</i>	150	米
Crni Vrh	R	60	スロベニア
REM	R、I、Z、J、H	60	チリ
Xinglong	V、R、I	80、100	中国
PROMPT	B、V、R、I	40	チリ
GROND	<i>g</i> 、 <i>r</i> 、 <i>i</i> 、 <i>z</i> 、J、H、K	220	チリ
Super-LOTIS	R	60	米
PAIRTEL	J、H、K	130	米
RAPTOR	no filter	40	米
MASTER	no filter	35	露

表 2.1: 日本および世界のロボット望遠鏡。上段:日本のロボット望遠鏡。下段:世界のロボット望遠鏡。バンドは、GCN によく投稿されているバンドを記している。

## 第3章 MITSuME システムについて

この章では、我々が GRB を研究するために設置した MITSuME 望遠鏡、およびそのシステムについて述べる。

### 3.1 MITSuME 望遠鏡とは

GRB 可視光残光の振る舞い、特に早期残光の放射メカニズムを研究するためには、GRB 発生直後から多波長で観測することが重要である。また、宇宙の歴史を知るうえで、GRB は非常に強力な道具となることは第2章で述べた。

我々は、GRB の早期可視光残光の観測による GRB の放射機構の解明と、GRB を用いた初期宇宙探査を行うために MITSuME 望遠鏡を作成した。MITSuME 望遠鏡とは、東京大学宇宙線研究所明野キャンパスに設置された口径 50cm の可視光望遠鏡、国立天文台岡山天体物理観測所に設置された可視光 50cm 望遠鏡と近赤外 91cm 望遠鏡、石垣島の 105cm 望遠鏡の総称である。東工大は明野の 50cm 望遠鏡の開発および運用を担当している。g、Rc、Ic バンドの3色同時撮像が可能な明野の 50cm 望遠鏡と岡山の 50cm 望遠鏡、および石垣島の 105cm 望遠鏡、Z、J、H、K バンドをカバーする岡山 91cm 望遠鏡を使用し、可視光から近赤外の幅広い波長帯で残光を早期から観測する。

これにより、GRB 残光の光度曲線に現れる減光の様子を多波長観測で追うことが可能であり、そこから GRB の放射プロセスを明らかにすることを目指す。また、各バンドで検出した GRB 残光の明るさを比較することから、GRB のおおよその赤方偏移を見積もりを行う。この原理は、GRB 母銀河および銀河間に存在する中性水素により、Lyman $\alpha$  吸収線 (122nm) よりも短波長側で GRB 残光がうけた吸収が、赤方偏移により波長が  $(1+z)$  倍されると可視光領域にくることを利用したものである (図 3.1)。最終的には、我々が見積もった赤方偏移をすばる望遠鏡にフィードバックすることにより、高赤方偏移であるものについてはすばる望遠鏡による詳細な分光観測を実施する。

いつ、どこで発生するかが全く分からない GRB を発生と同時に捉えるため、MITSuME



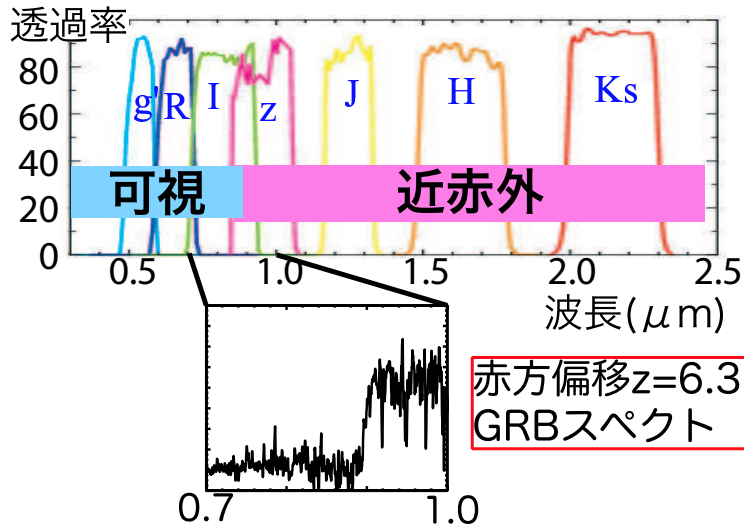


図 3.1: MITSuME 望遠鏡で観測可能な波長帯。下図は赤方偏移  $z = 6.3$  の GRB050904 のスペクトル。このスペクトルでは  $0.9\mu\text{m}$  に Lyman $\alpha$  の吸収端がきているため、Ic バンドより短波長側では検出されないことになる。

望遠鏡は GRB の発生を GCN から受け取ると、その座標へ自動的に望遠鏡を向けて観測を開始する (下川辺修論、2006)。また、GRB は急速に減光するので、我々が同定した GRB の位置情報や解析結果を GRB 残光が明るいうちにフィードバックさせるため、取得したデータを自動的に解析するシステムも開発されている (下川辺修論、2006)。GRB 観測衛星からの BAT の位置速報は誤差が 3 分角と精度が粗いため、可視光観測によって GRB の位置を特定することは重要である。また X 線で残光が観測されたとしても、およそ 50% の GRB は可視光残光が観測されない。発生した GRB が可視光や近赤外で検出されているかも、フィードバックさせるべき情報である。以上の観測の流れを図 3.2 に載せる。

## 3.2 望遠鏡の仕様

我々が開発と運用を行っている明野の望遠鏡の仕様についてまとめる。望遠鏡の設計は、基本的には岡山の 50cm 望遠鏡と同じものになっている。図 3.3 に明野の望遠鏡とドームの写真を載せる。また表 3.1 に望遠鏡の仕様を載せる。

望遠鏡の口径は 50cm である。視野は 28 分角  $\times$  28 分角であり、多くの参照星 (詳細は第 3 章) を視野に入れることが出来る。また、実際の GRB の座標がたとえ衛星の位置情報 (BAT であれば誤差は 3 分角) の外にあったとしても、大きな視野の中に実際の GRB の座

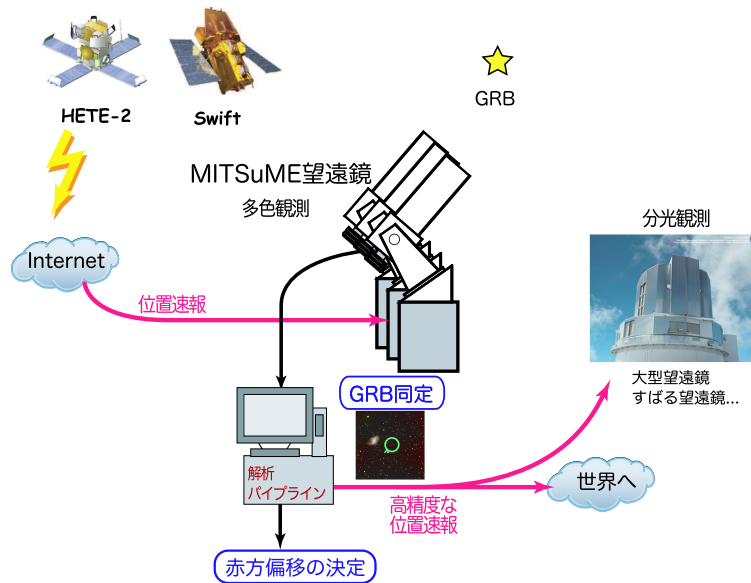


図 3.2: MITSuME 望遠鏡による残光観測の流れ。MITSuME 望遠鏡は衛星からの GCN 情報を受け取ると、自動的に GRB の観測を開始する。そして、GRB を同定し、解析結果をすばる望遠鏡へフィードバックし、分光観測を行う。



図 3.3: 左:明野に設置した望遠鏡。右:明野に設置したドーム。

設置位置	
所在地	山梨県北杜市明野町 東京大学宇宙線研究所附属明野観測所
座標	東経 138.4806°、北緯 35.7866°
高度	900 m
光学式	
形式	カセグレン型反射望遠鏡
有効直径	500 mm
副鏡口径	160 mm
焦点距離	3000 mm
口径比	F6
有効視野 (一辺)	28 分角
観測波長	400 – 950 nm
合焦方法	副鏡の電動移動
架台	
形式	フォーク式赤道儀
最大駆動速度	3°/sec

表 3.1: 明野に設置した望遠鏡の仕様

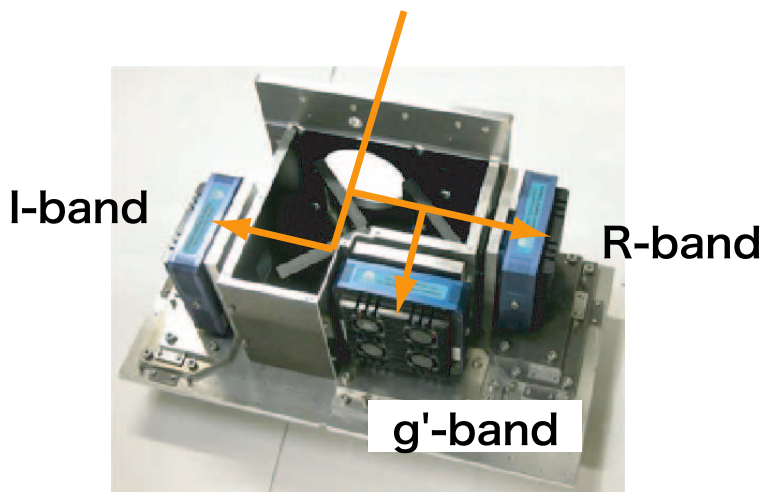


図 3.4: 明野に設置した3色同時撮像カメラ。入射した光は内部にある2枚のダイクロイックミラーで3分割される(オレンジ線)。3方向に分割された光は3台の CCD カメラに入射する。

標を入れることが出来る。望遠鏡は最速で $3^\circ/\text{sec}$ の高速導入が可能であり、即座に GRB 座標への導入が可能である。導入精度は平均 2.9 分角 (2007 年 8 月 9 日の観測) である。

ドームは半径 2m の半球型であり、最速 40 秒で 1 回転することが可能である。ドームのスリットの位置は望遠鏡架台制御 PC によって、望遠鏡の指向方向と自動的に同期する。

### 3.3 検出器

明野と岡山の 50cm 望遠鏡、および石垣島の 105cm 望遠鏡には Apogee 社製 Alta U6 の CCD が 3 台設置され、それぞれ  $I_c$ 、 $R_c$  バンド (Johnson-Cousins) と  $g'$  バンド (SDSS) が取り付けられている。このカメラは、望遠鏡から入射した光をダイクロイックミラーで波長毎に 3 つに分割することで、3 色同時撮像を行うことが可能である (図 3.4)。なお、Alta U6 は Linux PC と USB 接続することで制御している。表 3.2 に Alta U6 の仕様を載せる。

### 3.4 ネットワーク

明野 50cm 望遠鏡のネットワーク構成を図に載せる。明野の施設と東工大とは 3 回線の ADSL で繋がっている。東工大側で ADSL モデムに物理的に継っている PC は 'okalin' である。明野側で ADSL が繋がっている PC は、システムを統括する PC ・ 'linmaster' であ

CCD	Kodac KAF-1001E
Array size	1024 × 1024
Pixel size	24 μm × 24 μm
Imaging area	24.58 mm × 24.58 mm
Linear Full Well	550,000 e <sup>-</sup>
Digital resolution	16 bit
Exposure time	20 msec – 183 min
Cooling	ペルチェ素子 + 送風による冷却 (外気温 -50 °C)
PC Interface	USB 2.0

表 3.2: 明野に設置した CCD カメラ、Alat U6 の仕様

る。ドーム内には 'linmaster' の他、CCD を制御する PC ・ 'lincam'、気象情報を取得する PC ・ 'wincam'、望遠鏡を制御する PC ・ 'kadai'、そしてドーム内を監視するカメラ 3 台があり、これらは 1 つのネットワークを構成している。ドームの外にも監視カメラが 1 台ある。また、ドームに隣接する建物には解析 PC ・ 'dracula' がネットワークに繋がっている。

### 3.5 自動観測・解析システム

我々は、岡山の MITSuME 望遠鏡のシステムとの共通化を計るため、2006 年に開発を行ったシステム (下川辺修論、2006) に改良を加え、新たな自動観測・解析システムを開発した (森卒論、2008)。観測処理の流れを図 3.6 に載せる。

#### 自動観測システム

我々は通常の観測と GRB 観測の制御を無人にし、観測を自動的に行っている。

GRB が発生していない時間は AGN や超新星などを観測している。これには、まず観測を行う天体を「スケジュールリスト作成 web ページ」に入力する。すると、(1) 天体の高度、(2) 天体と月との離角、から観測の優先度を計算し観測スケジュールを作成する。その情報を 'linmaster' に送信すると、メインエンジンが望遠鏡を天体の座標へ向け、また撮像を行うように CCD の制御を行い、優先度に基づき作成されたスケジュールに従って観測を開始する。

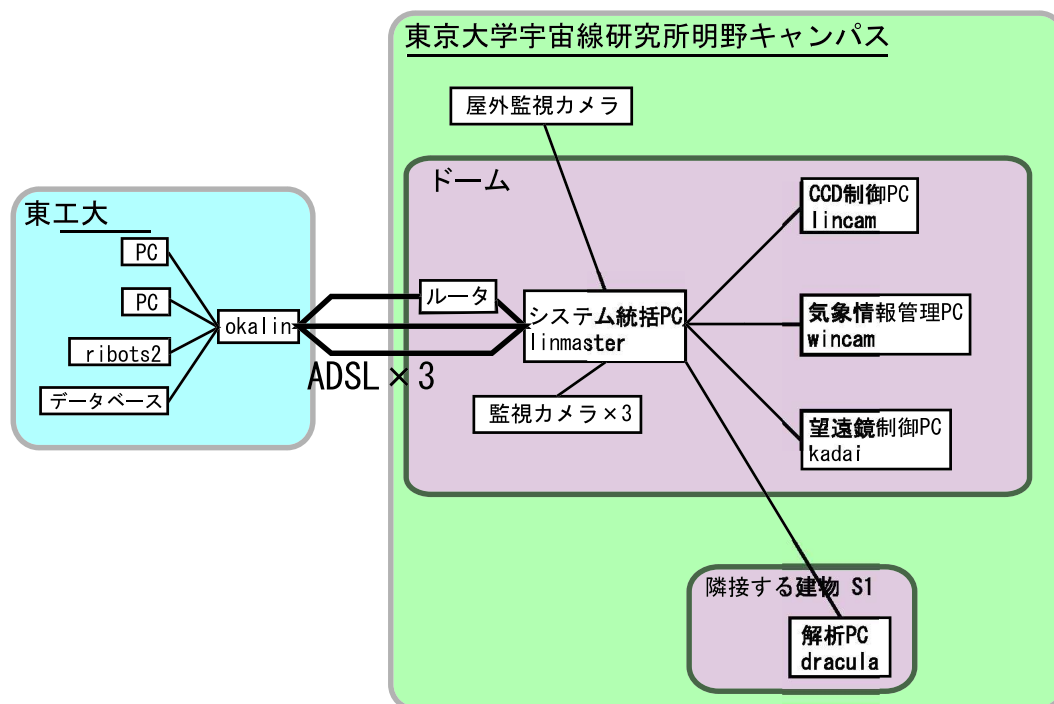


図 3.5: 明野のネットワーク。東工大の‘okalin’と明野の‘linmaster’の間は ADSL3 回線で繋がっている。そのうち 1 回線にはルータを介している。ドーム内には‘linmaster’、‘lincam’、‘wincam’、‘kadai’の 4 台の PC がある。ドームに隣接する建物 S1 には‘dracula’が設置してある。

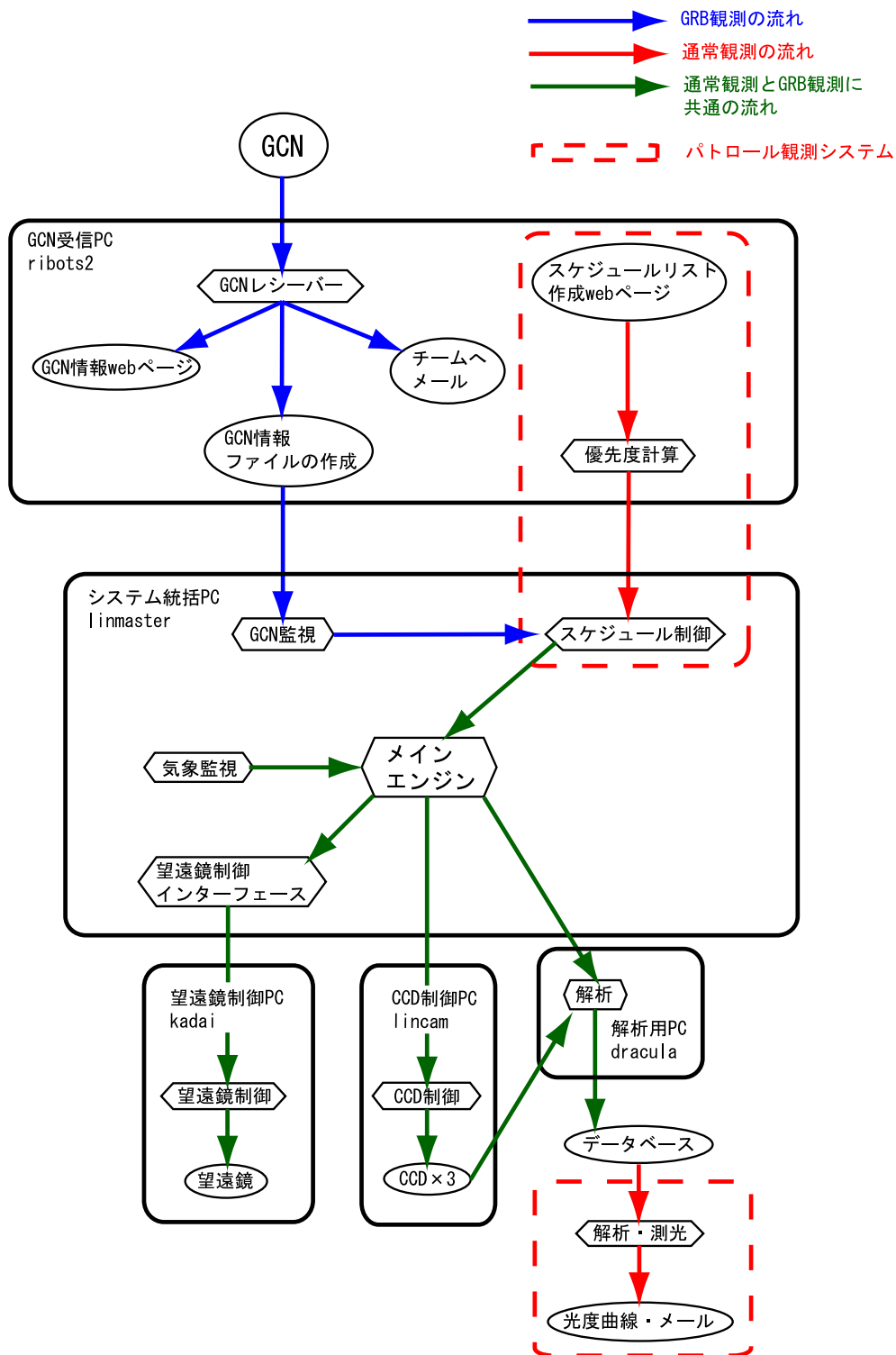


図 3.6: GRB 観測および通常観測の流れ。青線は GRB 観測時の処理の流れ。赤線は通常のスケジュール観測時の処理の流れ。緑線は GRB 観測時と通常のスケジュール観測時に共通する流れ。赤破線はパトロール観測システムで行われる処理。

GRB が発生した場合には、GRB 発生を告げる GCN を東工大の PC・‘ribots2’ で受け取り、その情報を明野の ‘linmaster’ へ送る。‘linmaster’ に GRB の情報が届くと、「スケジュール制御」がスケジュール観測から GRB 観測に切替えを行う。そして、望遠鏡を GRB へ向け撮像を行うようメインエンジンが指令を送る。

## 自動解析システムとデータベース

GRB 観測によって取得した画像も通常観測の画像も、作成されるとそのまま解析用 PC・‘dracula’ に送られる。そこで、メインエンジンの指示により全ての画像が解析を行われる(解析の詳細は第3章)。解析を終えた画像は順次東工大へと転送され、データベースへ登録を行われる。データベースでは、QL(Quick Lock) 画像の作成、FITS ヘッダーの検索などを行うことができる。なお登録されたデータは、翌日以降に国立天文台のデータベースである SMOKA(Subaru Mitaka Kiso Okayama Archive) にミラーリングされる。

## パトロール観測システム

パトロール観測システムとは、GRB 観測を行っていない時間を有効に活用するため、AGN や超新星などの突発天体の光度変化をモニターするシステムである(森卒論、2008)。このシステムは、上記の通りスケジュールに従って行う自動観測、そのスケジュール自動観測で取得したデータの解析・測光と光度曲線の作成を行う自動解析、この2種類の処理の総称である。この解析には、本研究で開発を行ったソフトウェアが使用されている(詳細は第4章)。自動解析の結果、例えば AGN がフレアを起こしたなど、観測を行った天体に光度変化があった場合には結果をメールで通知する。この自動解析の流れを記した図を図 3.7 に載せる。

## GCN 情報 web ページの作成

‘ribots2’ が GRB 発生を知らせる GCN を受け取ると、即座にその GRB の情報をまとめた web ページが自動的に作成される(図 3.8)。この web ページに更新される情報は、(1)GRB の座標情報、(2)GRB の高度変化、(3) 恒星カタログの web ページへのリンク、(4)Finding chart、である。GRB の解析者は、このページを見ることで解析に必要な情報を全て集めることができる。



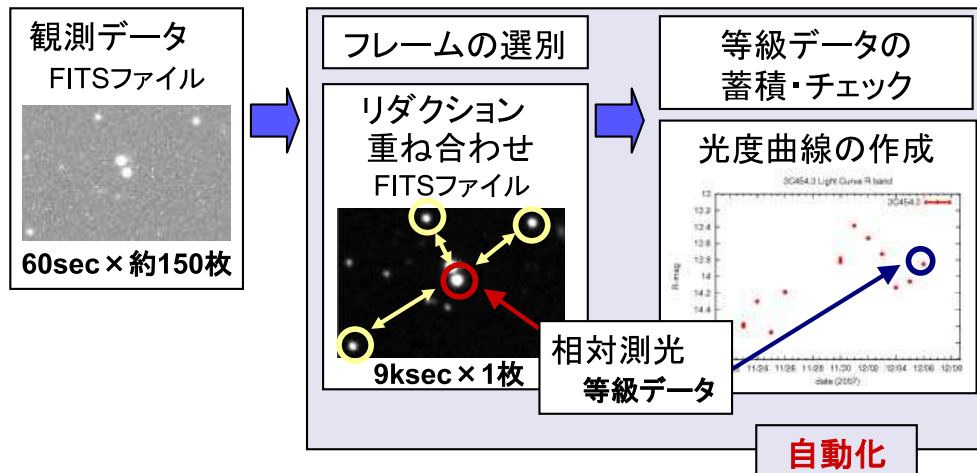


図 3.7: パトロールシステムにおける、光度変化チェックの仕組み。

### 3.6 監視システム

明野 50cm 望遠鏡の監視システムについて記す。明野 50cm 望遠鏡の操作は通常観測、GRB 観測とも無人で行っている。キャリブレーションのための観測は人の手で行うが、それも東工大から遠隔操作で行う。遠隔からの観測では現地の情報は限られたものしか収集できないため、些細なことが大きな問題に発展する可能性も十分に考えられ、また問題が発生した場合、迅速な復旧作業は困難である。そこで、事故や問題を未然に防ぐために我々は明野望遠鏡の監視システムを作成している。

ドーム内およびドーム外には、異常の有無を監視するためのカメラを設置している(図 3.9)。望遠鏡の鏡筒にもカメラが設置してあり、望遠鏡の指向方向の様子を写した映像がリアルタイムで更新され、観測天域の天候を知ることができる(図 3.10)。ドームの外には雨センサーが設置されていて、明野に雨が降った場合は自動的にドームが閉じるようになっている。明野の施設内と東工大にある PC には、定期的に Linux の ping コマンドを送り、通信が遮断された場合にメールを送信する。これにより、ネットワークが切断されていないか、動作しない PC が無いかを常時監視している。同様に、望遠鏡制御ソフトウェアも監視しており、ソフトウェアがハングアップした場合にもメールを送信する仕組みになっている。最後に、取得したデータの FITS ヘッダーから CCD の冷却温度の変化や明野の天候、ドーム内や望遠鏡の温度の監視を行っている。これらは、時間変化を自動的にグラフにし web から見る事ができる(図 3.11)。

[top](#) > [gcn08](#) > [01](#)

## GRB 080129-060808

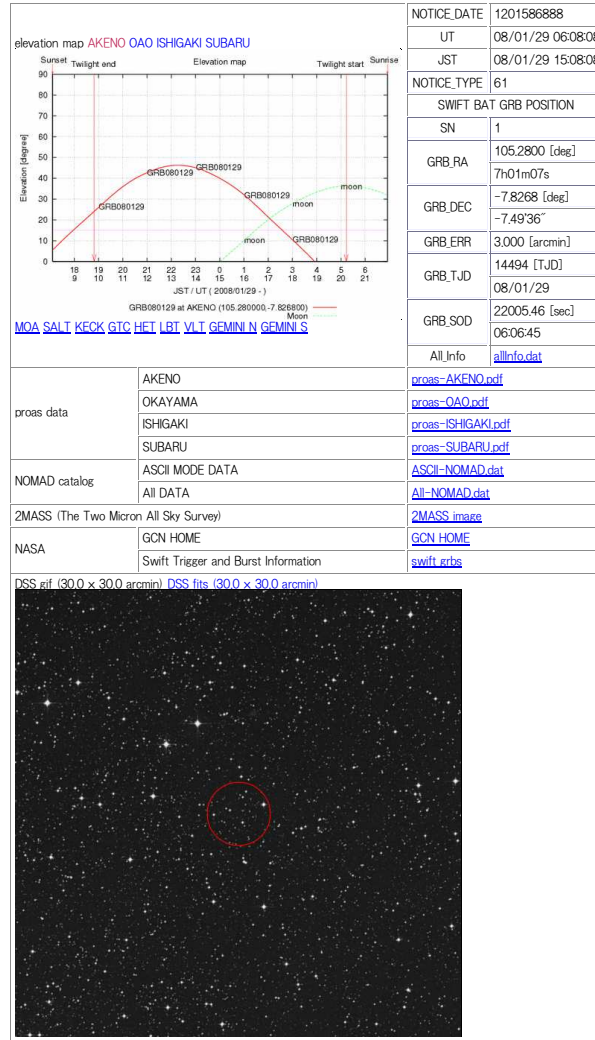
[top](#) > [gcn08](#) > [01](#)

図 3.8: GCN 情報 web ページ。GCN を受信すると、その GRB の情報を集約した web ページが自動的に作成される。左上:Elevation Map。右上:GRB の位置などの情報。右中: 各種恒星カタログへのリンク。下:Finding chart。

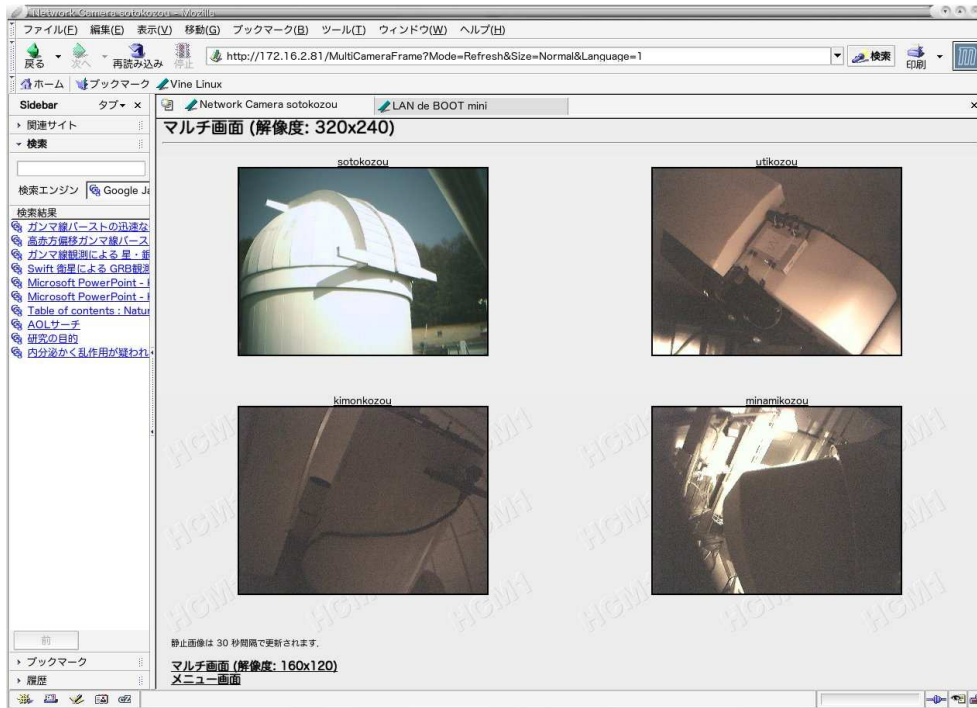


図 3.9: ドーム内外の監視カメラの映像。左上: ドーム外カメラ。その他の図: ドーム内のカメラ。

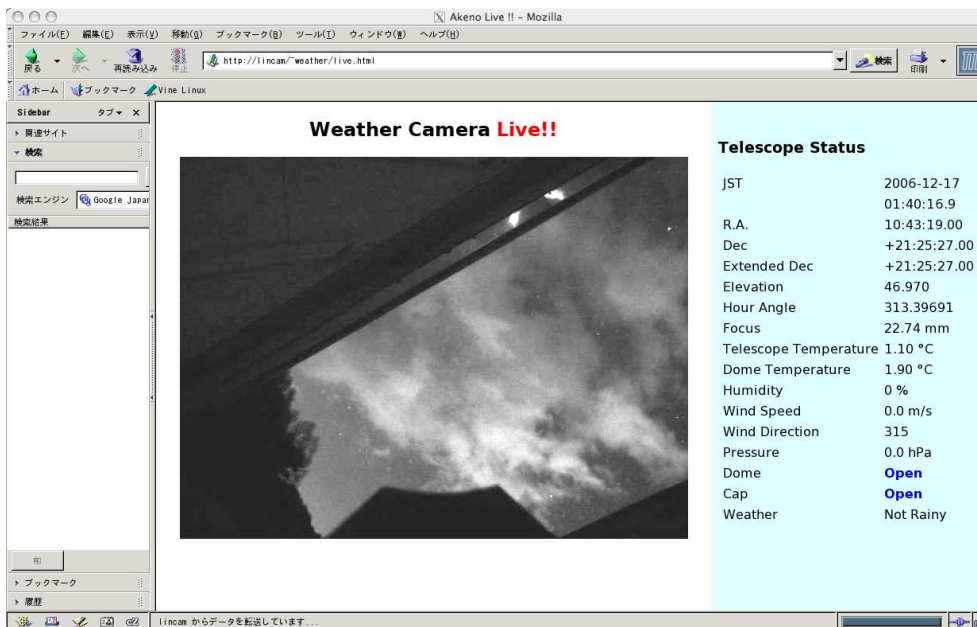
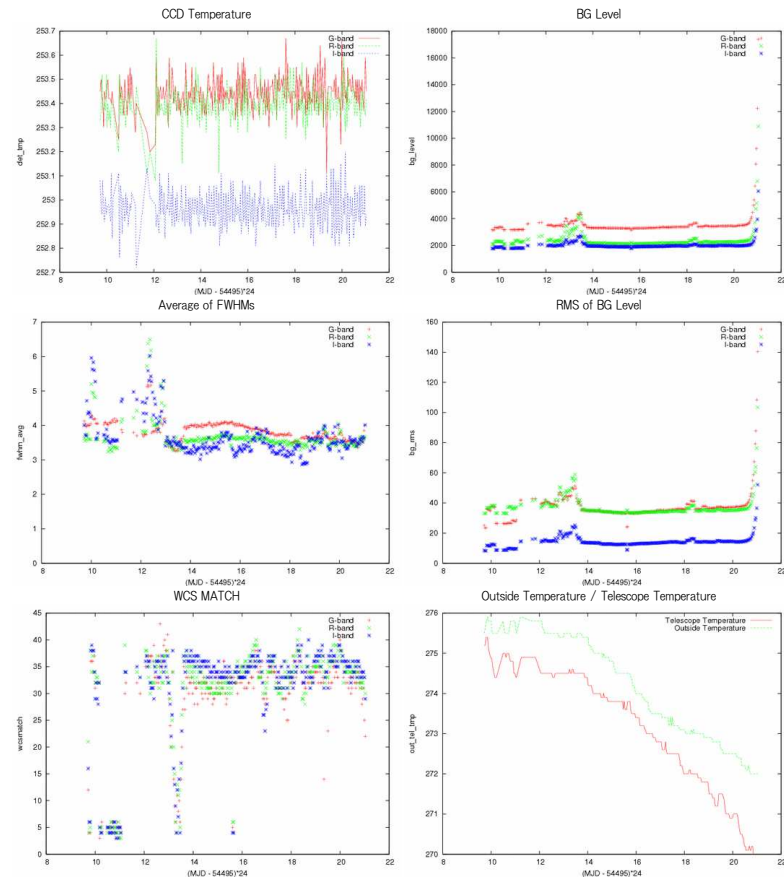


図 3.10: 視野カメラの web ページ。望遠鏡の視野方向の天域をリアルタイムで写す。これを見ることにより、望遠鏡が実際にどの方向を向いているか確認でき、また明野の天候を調べられる。映像の右側は望遠鏡のステータスであり、望遠鏡の状態を知ることができる。

2008-01-30



[Go back to Archive page](#)  
[Go back to Monitoring Center](#)

図 3.11: FITS ヘッダーの時間変化ををグラフ化した web ページ。左上:‘DET-TMP’(CCD の温度)。右上:‘BG-LEVEL’(バックグラウンドレベル)。左中:‘FWHM-AVG’(画像の恒星の PSF FWHM)。右中:‘BG-RMS’(バックグラウンドレベルの Root Mean Square)。左下:‘WCSMATCH’(WCS を画像に書き込む際に、カタログとマッチした数)。右下:‘OUT-TMP’(ドーム内の温度) と ‘TEL-TMP’(望遠鏡の温度)。

## 第4章 自動解析システムの高度化

この章では、自動解析システムの高度化のために行ったソフトウェアの開発についてまとめる。

### 4.1 自動解析システム高度化の必要性

我々の観測した GRB 残光の観測結果がすばる望遠鏡などの世界中の研究機関に活用されるためには、取得したデータを即座に解析する必要がある。この即時解析を実現するために、我々は自動解析システムを構築した。

現在の自動解析システムで行われている解析は、スカイレベルの見積り、画像にある恒星から求めた PSF(Point Spread Function) FWHM (Full Width at Half Maximum) の平均値の算出、赤道座標 (World Coordinates System) の決定、ゼロ点の決定、以上の4種類である(下川辺修論 2006)。これらの解析は明野に設置した PC・‘dracula’で行われ、明野から東工大に転送されてきたデータの全てに上記の情報が書き込まれている。1枚の画像に対して、全ての解析が行われるまでの時間はおよそ10秒である。またこれらの解析結果から、得られたデータが測光可能であるか否か<sup>1</sup>の判断が可能である。しかし、その解析結果から測光可能な画像を選出し、最終的に GRB を測光するまでの解析は人の手で行っているのが現状である。まだ全ての解析を自動化するには至っておらず、即時解析を実現させるためには自動解析システムの高度化が必須となる。

この自動解析システムの高度化を行うため、我々は画像の一次処理(以降、リダクション)と重ね合わせ、新天体 (GRB) の検出、天体および参照星の測光、を自動で行うソフトウェアを開発した。ここでいう新天体とはカタログに載っていない天体、例えば GRB や超新星などの突発天体などのことを指す。個々の解析における処理の詳細は後述する。今後、これらの解析を自動解析システムに組み込む予定である。現在の自動解析システムは画像1枚ずつの解析を行っているのに対し、高度化された自動解析システムでは、新天

---

<sup>1</sup>画像の質の判断には、スカイレベルの変化、WCS 書き込みの際にカタログにマッチした星の数、を用いている。

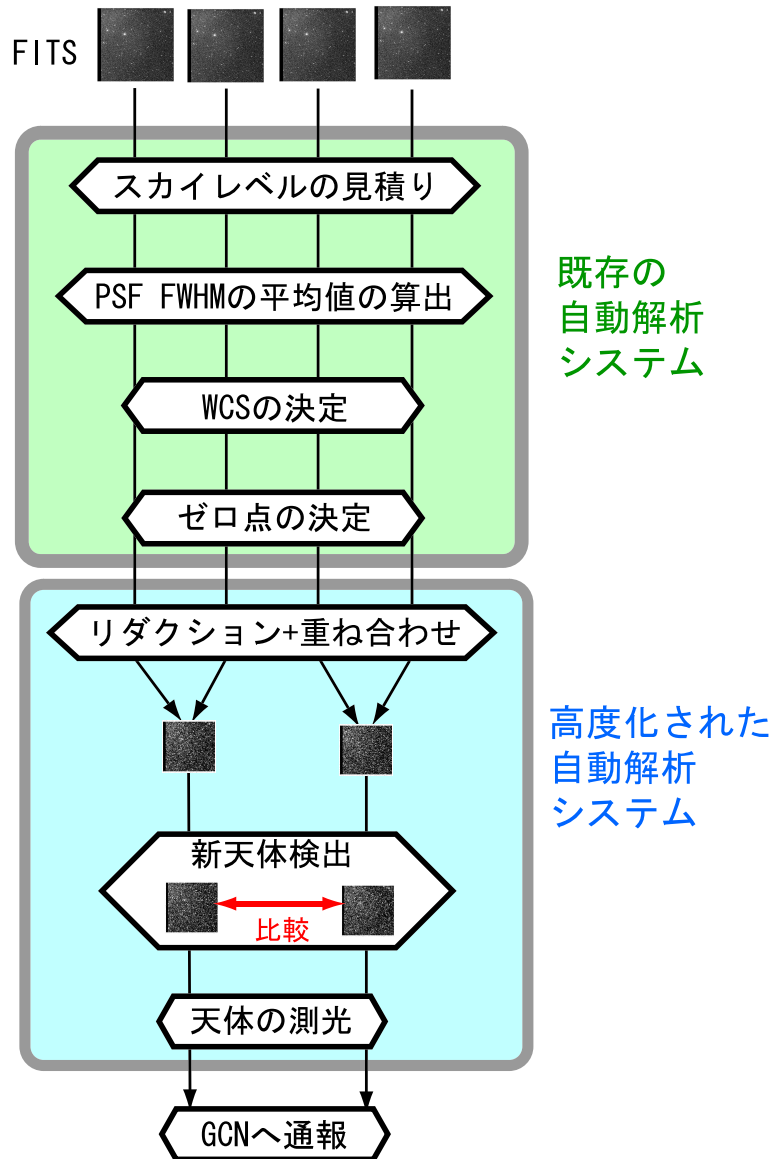


図 4.1: 高度化された自動解析システムのフローチャート。緑色の部位は既存の自動解析システムで行われている解析。本研究で開発を行ったソフトウェアが組み込まれ、高度化される自動解析システムが水色の部位である。

体検出処理や画像の重ね合わせを行うために複数の画像に対して処理を行うことになる。さらに画像のセレクション処理を組み込む必要がある。そして最終的には、自動観測から GRB の検出と測光、GCN 原稿の作成・通報までを自動的に行うことを目指す。開発されたソフトが高度化された自動解析システムに組み込まれた際のフローチャートを図 4.1 に載せる。

なお、現在すでに、パトロール観測システム自動解析ではここで開発を行ったリダク

ション+重ね合わせソフトウェア、測光ソフトウェアが稼働している(図3.7)。そして、リダクションから画像のセレクション、天体の測光までが自動的に行われ、対象天体の光度変化をモニターしている。

## 4.2 依存ソフトウェア

今回開発を行ったソフトウェアは、既存の自動解析システムで使用されているものと同じ天文学関連のソフトウェアを連携させている。これは、開発したソフトウェアと既存の自動解析システムで互換性を持たせるため、開発したソフトウェアをそのまま自動解析システムに組み込むため、である。

今回開発を行ったソフトウェアで使用している天文関連のソフトウェアを以下に列挙する。

**スクリプト作成言語:Perl** 現在の自動解析システムは基本的にPerlで開発されている(下川辺卒論 2004 や下川辺修論 2006)。

**IRAF(The Image Reduction and Analysis Facility)**<sup>2</sup> FITSファイルの解析に使用するソフトウェア。測光やリダクション、重ね合わせ、天体にマスクをかけるなど、様々な状況で使用される。光赤外データの解析に使用される標準的なソフトウェアである。

**SExtractor**<sup>3</sup> FITS形式の画像から天体を抽出するソフトウェア。抜き出したそれぞれの天体のピクセルのxy座標、赤経、赤緯、PSF FWHMなどを取得できる。なお、画像抽出の際にはフィルターを使用するが、このフィルターはデフォルトのものを使用している。

**atFunctions** 天文関連で必要となる計算を行うためのライブラリ。今回のソフトウェア開発では、天体間の離角計算を行う際にこのライブラリを使用している。

**WCSTOOLS**<sup>4</sup> FITS形式の画像ファイルに対して、WCSの情報操作を行うことが出来るソフトウェアパッケージ。プログラム集とライブラリ集から構成される。

**恒星カタログ** 目的の天体の等級を調べたり、画像から抽出した天体とマッチングを行うために使用。I-bandではUSNO-B1.0<sup>5</sup>を使用し、R-band, g-bandではNOMADカ

---

<sup>5</sup>U.S. Naval Observatory, USNO-B1.0 Catalog <http://www.usno.navy.mil/>

タログ<sup>6</sup>を使用している。

### 4.3 リダクションと重ね合わせ

自動解析を高度化するためのソフトウェアとして、リダクションと画像の重ね合わせを自動的に行うソフトウェアを開発した。

リダクションとは、取得した生のデータからノイズ等を取り除き、夜空からきたシグナル (天体+スカイ) の成分のみを取り出す処理のことである。生データのカウント値  $COUNT_{Raw}$  は、原理的には以下のように構成されている。

$$COUNT_{Raw} = F(OBJ + SKY) + DARK + BIAS \quad (4.1)$$

ここで、 $OBJ$  は天体からのシグナル、 $SKY$  は空からの放射、 $BIAS$  は各ピクセルに固有のオフセット、 $DARK$  は暗電流 (ダーク) の寄与、 $F$  は検出器のピクセルの感度ムラを表している。この式 4.1 にある  $COUNT_{Raw}$  から、 $OBJ + SKY$  を取り出すための処理がリダクションである。

このソフトウェアでは以下の流れに沿って、リダクション、画像の重ね合わせを自動的に行っている。

1. バイアスを引く
2. ダークを引く (ダーク画像の作成を含む)
3. 感度ムラを補正する (フラット画像の作成を含む)
4. 欠陥ピクセルの補完
5. 画像を重ね合わせる

図 4.2 はリダクションから重ね合わせまでの流れを示したフローチャートである。以下に、個々の処理の詳細を記していく。

#### 4.3.1 バイアスを引く

バイアスとは、CCD が読み出した電荷を電圧に替え、AD 変換する際にあたえるゲタのようなものである。そこで、解析の際にこの余計なバイアスを差し引かなければならない。

---

<sup>6</sup>United States Naval Observatory Flagstaff Station, <http://www.nofs.navy.mil/>





図 4.2: リダクションのフローチャート。

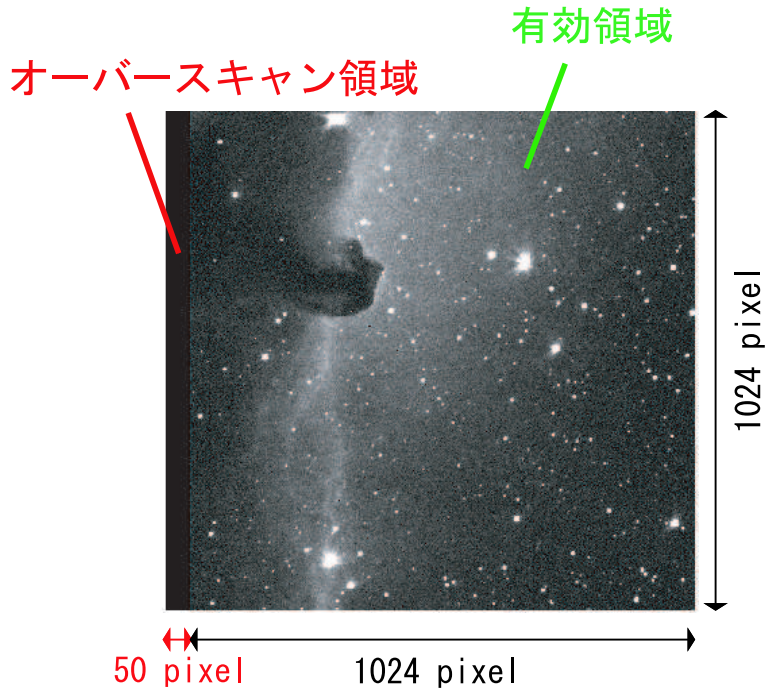


図 4.3: MITSuME 明野望遠鏡で得られる画像。有効領域とオーバースキャン領域からなる。

我々は、このバイアスの大きさがいくつを見積もるためにオーバースキャン領域を利用している。オーバースキャン領域とは、CCDの電荷を読み出した直後に、電荷の無いはずの場所をそれでも電荷転送を行いつつ読み出した部分である。オーバースキャン領域の平均値はFITSヘッダーの‘PEDLEVEL’に書き込まれているので、我々はこの‘PEDLEVEL’の値をバイアス値だとみなし、生のデータからこれを差し引いている。データの引き算にはIRAFの‘imarith’コマンドを使用する。

図4.3は、我々が取得する生のデータである。オーバースキャン領域は $[xmin : xmax, ymin : ymax] = [1 : 50, 1 : 1024]$ であり、天域の写る有効領域は $[xmin : xmax, ymin : ymax] = [51 : 1074, 1 : 1024]$ である。

### 4.3.2 ダークを引く

CCDには、シャッターを閉じて光が入らない状態にしておいても暗電流(ダーク)が出てくる。バイアスを引いた画像にたいして、次にこのダーク成分を取り除く。

ダークとは、CCD内の電子の熱運動によりポテンシャルの井戸の中に湧いて出た電荷の総称である。CCDのポテンシャルの井戸は熱平衡状態になく、電荷が湧いて出ること

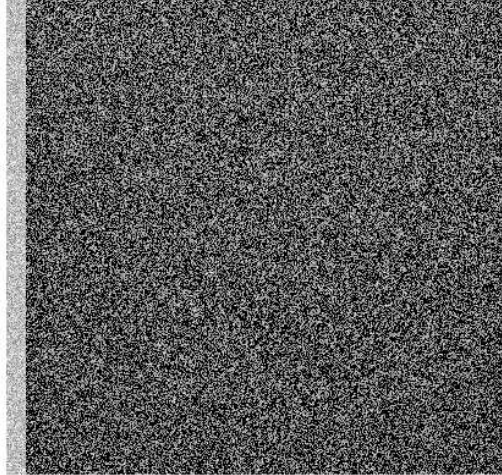


図 4.4: ダーク画像。黒い部分がカウントが高い。

はあっても蓄えた電荷が無くなることは殆ど起きない。このため、ダークとして発生する電荷は時間に比例する。このダークの発生率は各ピクセルごとに異なる。また熱運動に由来するため、CCD の温度に強く依存する性質がある。

暗電流が発生している時間は、CCD の電荷を全てクリアしてから CCD 内の電荷を全て読み出すまでの間で、それは露出時間に等しいと考えらる<sup>7</sup>。そこでリダクションの際には、まずオブジェクト画像の撮像時と同じ CCD の冷却温度、同じ露出時間のダーク画像を 10 枚程度用意する。次に統計を上げるため、それぞれのダーク画像のバイアスを引いたうえで、それらを重ね合わせる。重ね合わせには IRAF の 'imcombine' コマンドを使用し、重ね合わせ時には中央値を取る。解析の際には、このダーク画像も自動的に作成される。そして作成されたダーク画像をオブジェクト画像から差し引くことで、オブジェクト画像からダークの成分を差し引くことが可能となる。引き算には、IRAF の 'imarith' コマンドを使用する。図 4.4 に、ダーク画像の例を載せる。

### 4.3.3 フラットで割る

CCD の感度はピクセルごとに若干異なる。式 4.1 にあるように、この感度ムラを補正するためには、ピクセルごとの感度ムラの情報を持った画像を用意してその画像でオブジェクト画像を割らなければならない。ここでの割算には IRAF の 'imarith' コマンドを使用する。

---

<sup>7</sup>これは露出時間が読み出し時間よりも十分に長い場合の近似である。しかし、我々が撮像する際の露出時間は 60 秒と十分長いので、この近似で問題ない。

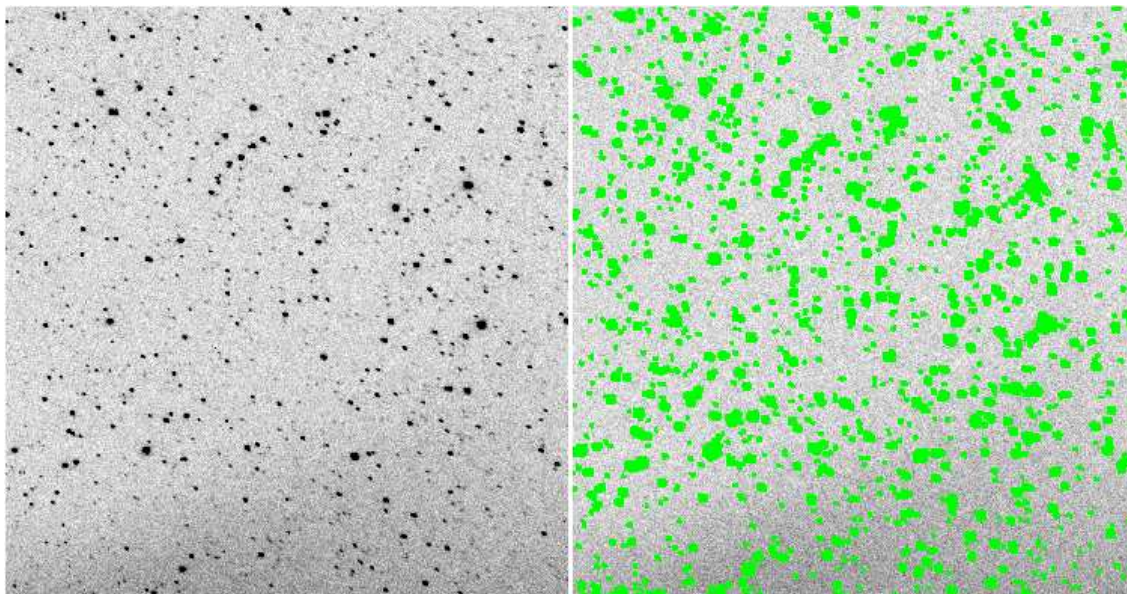


図 4.5: 左:もとのオブジェクト画像。右:左のオブジェクト画像にマスクをかけた画像。緑色の領域がマスクをかけた領域である。

感度ムラの情報を持った画像は、CCDに一様（つまりフラット）な光を入射してやることによって得られる。このためこの画像はフラット画像と呼ばれる。また、フラット画像で割ることはピクセルの感度ムラ補正を行う以外に、フィルターについてのホコリや光が望遠鏡に入射した際に生じる周辺減光を補正する役割もある。

我々が使用しているフラット画像は、オブジェクト画像のスカイ成分を利用した、セルフフラット画像を使用している。我々は観測時にディザリング<sup>8</sup>を行っているため、得られたデータをオブジェクト画像とフラット画像の両方に使用することが出来る。撮像した画像を、恒星同士が重なるように位置を調整した上で重ね合わせを行うことによりオブジェクト画像が作成される。一方、撮像した画像を画像のx座標、y座標を揃えて重ね合わせ、中央値を取ることによりセルフフラット画像が作成される。我々のCCDは低カウント (ADU<1000程度) では出力の線型性が保たれず、各ピクセルの個性、ばらつきが表れてしまう特徴がある。そのため感度ムラを補正するためには、オブジェクト画像のカウントと同程度のカウントで作成されたフラット画像を作成しなければならない。この問題を解決するため、我々はセルフフラット画像を使用している。

セルフフラット画像作成時に注意すべきことがある。それは、オブジェクト画像にある明るい星がディザリングの間隔以上に広がってしまっている場合や、星が混んだ領域の場

<sup>8</sup> 1枚撮像したら望遠鏡をわずかに動かし、また1枚撮像しては望遠鏡をわずかにうごかし、という動作を繰り返す撮像方法。

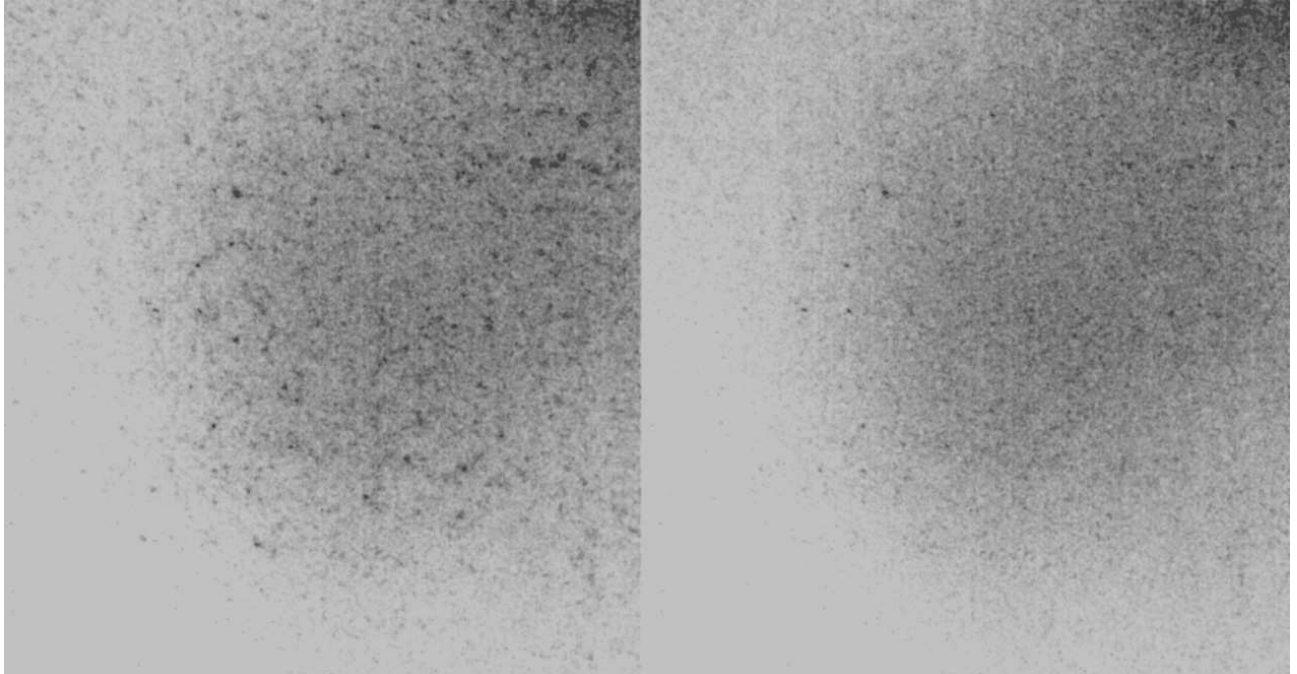


図 4.6: 左:図 4.5 の左側のマスクをかけていない画像を使用したセルフフラット画像。恒星のパターンが残る。右:図 4.5 の右側のマスクをかけた画像を使用したセルフフラット画像。恒星のパターンがほとんど消え、滑らかな画像になっている。

合は、星のパターンが残ったフラット画像になってしまうことである。この星のパターンを消すため、明るい天体にマスクをかけたうえで画像を重ね合わせる。マスクをかける処理には IRAF の ‘objmasks’ コマンドを使用する。マスクをかける領域は、デフォルトではスカイレベルよりも  $3\sigma$  以上のカウントが 50 ピクセル連続している箇所としている。そして、IRAF の ‘xdimsum’ コマンドを使用し、それぞれの画像に対してマスクをかけた画像の平均値を見積り、その平均値でおのおのの画像を規格化したうえで画像を重ね合わせている。

セルフフラット作成の例として、まずオブジェクト画像にマスクをかけた画像を図 4.5 に載せる。そして、マスクをかけずに作成したセルフフラット画像とマスクをかけたセルフフラット画像の比較を図 4.6 に載せる。図 4.6 の左の画像には星の跡が見られるが、マスクをかけた右側の画像では、その星の跡はほとんど消え、フラットな画像が得られている。解析の際には、このマスクをかけたフラット画像は自動的に作成される。

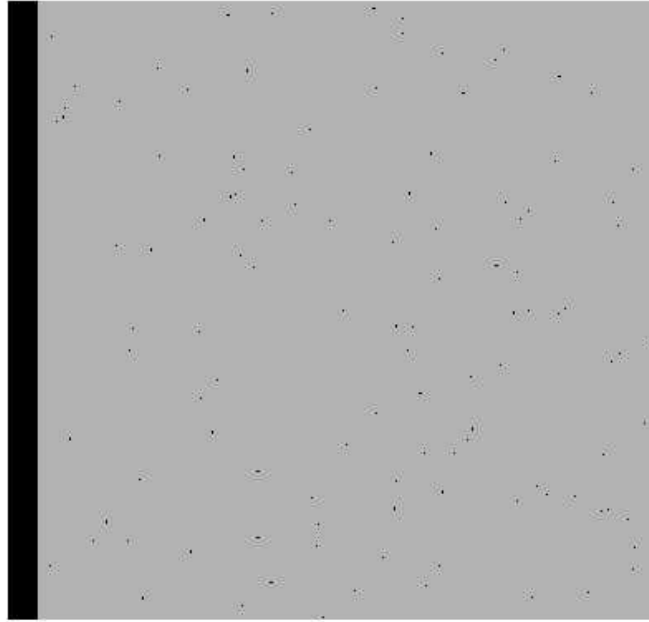


図 4.7: バッドピクセルマスクの画像。黒い箇所が、この検出器に固有のバッドピクセルであり、バッドピクセル上でのカウントは1(または正の整数)になっている。

#### 4.3.4 欠陥ピクセルの補完

CCD には検出器ごとに固有の欠陥ピクセルがある。欠陥ピクセルには大きく分けて2種類ある。それは、感度が悪すぎるピクセルと、ダークが高過ぎるピクセルである。これら欠陥ピクセルは解析の過程で取り除かなければならない。この処理を自動的に行う。なお、バッドピクセル定義は次のようなものとした。

- 感度が悪すぎるピクセル → 感度が30%以下のピクセル
- ダークが高すぎるピクセル → 平均のダークカウントの50倍

欠陥ピクセルの補完を行うためには、まずバッドピクセルマスクを作成する必要がある。バッドピクセルマスクとは、上記の閾値を満たす欠陥ピクセルがあるピクセルのカウントを「1」または正の整数とし、それ以外の問題のないピクセルのカウントを「0」とした画像のことである。図 4.7 にバッドピクセルマスクを載せる。

欠陥ピクセルの補完方法は次の通りである。まず、バッドピクセルマスクではカウントが1になっている座標を、その周囲のピクセルのカウントからバッドピクセルである座標が本来どの程度のカウントかを見積もる。そして見積もったカウントをバッドピクセルの



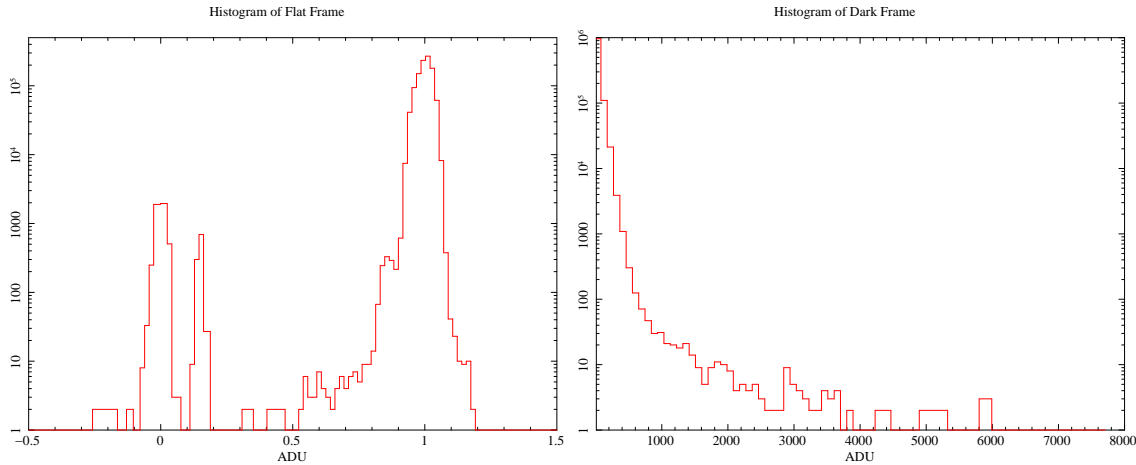


図 4.8: 左:フラット画像のヒストグラム。カウント(感度)が0.3以下のピクセルが欠陥ピクセルである。右:ダーク画像のヒストグラム。カウントが828以上のピクセルが欠陥ピクセルである。

ピクセルに適応する。この処理は感度ムラの補正までを終えたオブジェクト画像にたいして行う。なお、バッドピクセルの補完には IRAF の 'fixpix' コマンドを使用する。

バッドピクセルマスクの作成方法は次の通りである。まず、感度が悪すぎるピクセルの座標を知るためには、マスク処理を行っていないセルフフラット画像<sup>9</sup>を用意する。図 4.8 の左図にフラット画像のヒストグラムを載せる。この図のカウントが0.3以下のピクセルがバッドピクセルになる。このフラット画像にたいして、IRAF の 'imreplace' コマンドを使用し感度が低すぎるピクセルのカウントを1に、それ以外の箇所のカウントを0とした画像(画像Aとする)を作成する。ダークが高すぎるピクセルの座標を知るためには、リダクションに用いるダーク画像を使用する。図 4.8 の右図はダーク画像のヒストグラムである。このカメラの場合、ダーク画像の平均値  $\times 50 = 828$  であるので、この図の828カウント以上のピクセルがバッドピクセルである。同様に IRAF の 'imreplace' コマンドを使用し、ダークの高すぎるピクセルのカウントを1に、正常な箇所のカウントを0にした画像(画像Bとする)を用意する。これら画像Aと画像Bを重ねることによってバッドピクセルマスクは完成する。欠陥ピクセルはCCDに固有のため、このバッドピクセルマスクは1度作成してしまえばあとは何回も使いまわしが可能である。なお、このバッドピクセルマスクは自動的に作成することが可能である。

<sup>9</sup>ディザリングを行い得られた画像をそのまま、CCDのxy座標が一致するようメジアンで重ね、画像全体の平均値が1になるように規格化した画像。

### 4.3.5 重ね合わせ

バッドピクセルの補完までの処理を終えた複数の画像を赤道座標系で重ね合わせ、1枚の画像にすることにより S/N を上げる。これには、WCS をもとにシフト量を計算し、それぞれの画像をシフトさせたうえで重ね合わせを行う。画像のシフトには IRAF の 'imshift' コマンドを使用し、また画像の重ね合わせには IRAF の 'imcombine' コマンドを用いる。

なお、天体の観測において何度かの露出に別けて撮像を行うには、S/N を上げる以外にも意味がある。それは、まず、観測時に一時的に雲がかかるなど、測光に適さない環境が生じた場合に、長時間露出ではおおくの観測時間を失うことになってしまう。そして、ディザリングを行った画像を重ねた場合にはある天球上の座標が CCD の同じ座標にこないため、1枚のリダクションでは取り除くことが出来なかったバッドピクセルの影響を除去することができ、またフラット等による系統誤差を軽減することができる。これによりクラッチパターン等のバックグラウンドのパターンを無くし、スカイが滑らかな画像ができあがる。

### 4.3.6 性能評価

このソフトウェアの性能評価として、処理時間の計測を行った。その結果を表 4.1 に記す。

処理の内容	枚数	処理時間
ダーク画像の作成	$10 \times 3 = 30$ 枚	22 秒
フラット画像の作成	$20 \times 3 = 60$ 枚	3 分 12 秒
リダクションと重ね合わせ	$20 \times 3 = 60$ 枚	1 分 53 秒
全ての処理	$50 \times 3 = 150$ 枚	5 分 27 秒

表 4.1: 自動リダクションソフトウェアの処理時間。処理の内容はダーク画像の作成、フラット画像の作成、リダクションと重ね合わせである。

この結果、計 150 枚の画像にたいして全ての処理を行うまでにかかる時間は 5 分半であった。この中で一番時間がかかっているのは、フラット画像作成時に行うマスク処理である。自動解析を高度化した際、新天体検出や測光の前作業であるリダクションと重ね合わせを 5 分半で終わらせられるので、GRB の解析結果を早期に通報することが可能にな



る。なお、これらの処理を手動で行った場合の処理時間は、個人の技量によるので一概にはいえないが、それでも1時間~2時間程度かかる。経験の少ない人が解析を行った場合はそれ以上の時間がかかるだろう。ソフトウェア開発による解析の自動化により解析時間とケアレスミスを大幅に減らすことが可能であり、高度化を行うまでのGRBの手動解析においてもこのソフトウェアは非常に強力なツールになる。

## 4.4 新天体検出

取得した画像からGRBなどの新天体を自動的に検出するソフトウェアを開発した。GRBは突発的に発生するため、カタログには載っていない天体(新天体)である。そこで、取得した画像からSExtractorにより天体を抜き出しカタログと比較を行うことによって、カタログには載っていない天体を見つけ出す処理を行う。この内容については、第4章で詳細を述べる。

## 4.5 測光

自動解析システムの高度化のために開発したソフトウェアの最後に、目的の天体、参照星を自動的に測光するソフトウェアを開発した。参照星とは、目的の天体を測光する際に基準となる星のことである。参照星は通常、目的天体の周囲にあり、なおかつ恒星カタログに記載されている恒星を選ぶ。このソフトウェアが1枚の画像に対して、目的の天体と参照星の測光にかかる時間は0.8秒である。

測光の処理とは次の通りである。まず、リダクションを終えた画像では、画像のカウント  $COUNT_{Reduction}$  は次のように構成されている。

$$COUNT_{Reduction} = OBJ + SKY \quad (4.2)$$

ここから  $SKY$  を差し引き、天体からのシグナル  $OBJ$  がいくつかを数え上げる処理が測光である。この処理をIRAFの'phot'コマンドを使用したaperture photometryで行っている。図4.9はaperture photometryの概念を説明するための模式図である。aperture photometryとは、aperture内のカウント( $COUNT_{Reduction}$ )から、内径annulusで幅widthの円環内のカウントをaperture内の面積で規格化したもの( $SKY$ )を差し引き、 $OBJ$ のカウント数を見積もる、という測光方法である。IRAFの'phot'コマンドでは、以下の関

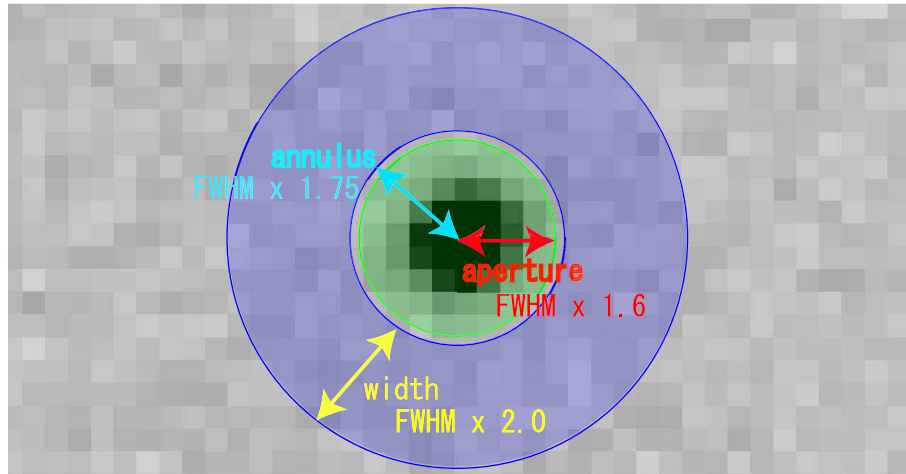


図 4.9: aperture photometry の模式図。中心の黒い点が恒星であり、その他のグレーはスカイである。

係式により天体のシグナルから等級を算出している。

$$OBJ = COUNT_{Reduction} - SKY \quad (4.3)$$

$$MAG = ZMAG - 2.5 \log_{10}(OBJ) + 2.5 \log_{10}(EXPTIME) \quad (4.4)$$

ここで、 $ZMAG[\text{mag}]$  はゼロ点、 $EXPTIME[\text{sec}]$  は画像の露出時間である。 $EXPTIME$  の値は FITS ヘッダーに記されている。ゼロ点とは、画像中の  $1[\text{ADU}/\text{sec}]$  が何等級に相当するかという量であり、いわばオフセットである。

このソフトウェアでは、SExtractor で画像全体から恒星を抽出し、PSF の FWHM の最頻値<sup>10</sup> を求める。次に、指定した座標の天体に対して測光を行う。画像中の天体のカウント分布は全て、この FWHM の最頻値程度に広がっていると考え、この FWHM をもとに測光パラメータを決めている。aperture の値は  $\text{FWHM} \times 1.6$ 、annulus の値は  $\text{FWHM} \times 1.75$ 、width の値は  $\text{FWHM} \times 2.0$  としている。この測光パラメータは、自動解析で行われている測光のパラメータと同じものを使用している。

式 4.4 にあるように、目的の天体の等級を見積もるにはゼロ点を求める必要がある。これには、まず参照星を測光し、参照星の測光結果とカタログの等級 (カタログ等級:  $MAG_{cat}$ )

<sup>10</sup>PSF FWHM のヒストグラムは正規分布ではなく、PSF FWHM が大きい方へ尾を引いたような分布をしている。そのため、抽出した恒星全ての平均値を取った場合の PSF FWHM は、シーイングによる PSF FWHM よりも大きく見積もったものになり、最頻値を使用する必要がある (下川辺修論 (2007 年) の図 4.6)。

との比較を行うことによって求められる。この手法を相対測光と呼ぶ。式4.4で  $ZMAG = 0$  とした等級、 $MAG = -2.5 \log_{10}(OBJ) + 2.5 \log_{10}(EXPTIME)$  を機械等級  $MAG_{inst}$  と定義すれば、ゼロ点  $ZMAG$  は次のように与えられる。

$$ZMAG = MAG_{cat} - MAG_{inst} \quad (4.5)$$

カタログ等級を参照するカタログは、 $g'$  バンド<sup>11</sup>、R バンドでは NOMAD カタログを使用し、I バンドでは USNO-B1.0 を使用している。

相対測光を行う際には、通常は複数の参照星を用いる。ゼロ点の計算は、自動解析システムでは横軸にカタログ等級、縦軸に機械等級を取りフィッティングにより行っているが、他に複数の参照星から求めたゼロ点の加重平均を取る方法がある。n 個の参照星を測光し、 $i$  番目の参照星から求めたゼロ点を  $zero_i$  とし、その誤差を  $\sigma_i$  とする。加重平均を取る場合の  $ZMAG$  およびその誤差  $ZERR$  は以下の式で与えられる。

$$ZMAG = \frac{\sum_{i=1}^n zero_i / \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n 1 / \sigma_i^2} \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{ZERR^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (4.7)$$

任意の天体を測光する際に、自動解析のゼロ点の値ではなく、あらかじめ複数個の参照星を決めて相対測光することには利点がある。それは、変光星などを除き、相対測光するうえで信用のおける恒星のみを使用できることである。つまり、より正確なゼロ点を見積もることが可能となる。パトロール観測システムでは、あらかじめ参照星を決め、加重平均を取ることでゼロ点を算出している。

---

<sup>11</sup> $g'$  のカタログ等級を求める際には、smith et al (2002) にある関係式  $g' = V + 0.54(B - V) - 0.07$  を使用している。

# 第5章 新天体検出ソフトウェアの開発

GRB を発生直後に即時に同定することを可能にするために、新天体を検出するソフトウェアの開発を行った。このソフトウェアは、バンド、観測時刻の異なる複数の画像を使用することで新天体の検出を行う。現状では、カタログに載っていない天体である GRB、小惑星、超新星の計 7 天体で動作テストを行い、その 7 例全てで新天体の検出に成功している。この章では、このソフトウェアの設計、動作テストの結果、および今後の方針についてを記す。

## 5.1 開発前の状況

今回開発を行った新天体検出ソフトウェアの開発は下川辺卒論 (2004) で初めて開発され、議論がなされている。その時のソフトウェアの設計は次の通りである。

1. SExtractor を使用し、対象の画像 1 枚から恒星を抜き出す
2. 抜き出した恒星をカタログと比較し、その天体がカタログに記載されている既知の天体か、カタログに無い新天体かを識別する
3. 新天体と識別された天体の中で、バッドピクセルやスクラッチパターンなどの新天体と誤認された点を取り除く
4. 新天体が検出される

ここで、一番の問題だったことは 3 番に記した誤認点の完全な除去である。もちろんバッドピクセルやスクラッチパターンはカタログには記載されていないため、それらを新天体として判断しないように新天体候補から除く必要がある。この除去方法の検討が議論の大きなテーマであり、これを行うために種々の処理が試みられた。そこでの処理を列挙すると、(1) 画像のリダクションを行う、(2) SExtractor が出力する検出された像の特徴を記した flag から、明らかに恒星では無いと判断できるものを除外する、(3) SExtractor に

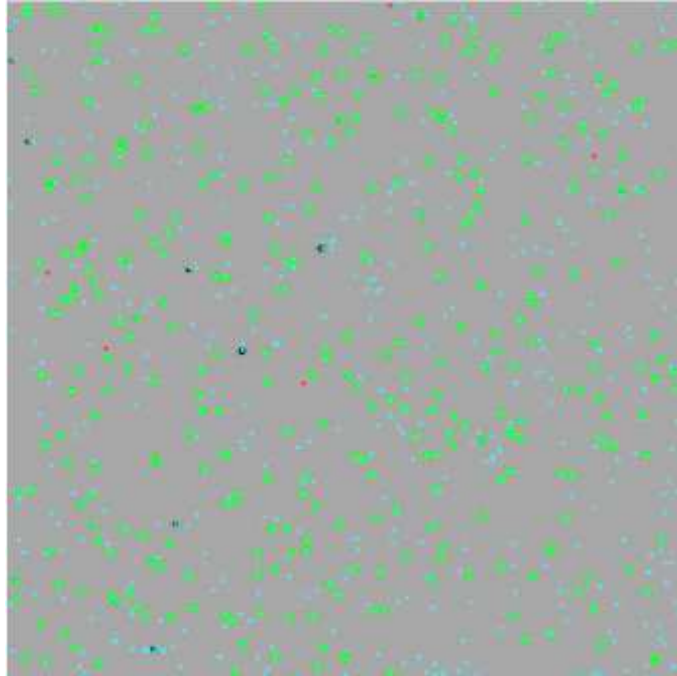


図 5.1: 抜き出した恒星をカタログと比較し、更に誤認点を差し引いた図(下川辺卒論,2004)。誤認点を完全に除くには至っていない。赤丸:誤認点 緑丸:天体 水色丸:USNO-A 2.0に掲載されている全天体。

よる検出の際に、スムージングを行うフィルターを使用する、(4) カウント分布がガウシアンではないものを検出するフィルターを作成し、それにより検出された天体を新天体候補から削除する、である。

このような処理を行われた結果を図 5.1 に記す。この図が示す通り、種々の対策をほどこしても誤認点の完全な除去には至っていない。従って下川辺卒論(2004)における結論は、1枚の画像からはこの誤認点を完璧に取り除くことは不可能である、というものであった。

この結果は、ガンマ線バースト残光専用自動望遠鏡 Robotic Optical Transient Search Experiment(ROTSE)で行われていると考えられる、新天体検出ソフトウェアと一致するものである。ROTSE が GRB070611 を検出したときの画像を図 5.2 に記す。黄色丸が新天体候補であり、ID で識別されている。ID=156 が GRB070611 である。この図から、ROTSE においても一枚の画像から誤認点を除去出来ていないことが分かる。

そこで、今回の新天体検出ソフトウェアでは、下川辺卒論(2004)で行われた議論を踏襲しそれを発展させる形で、正しく新天体のみを検出することを目的として開発を行った。

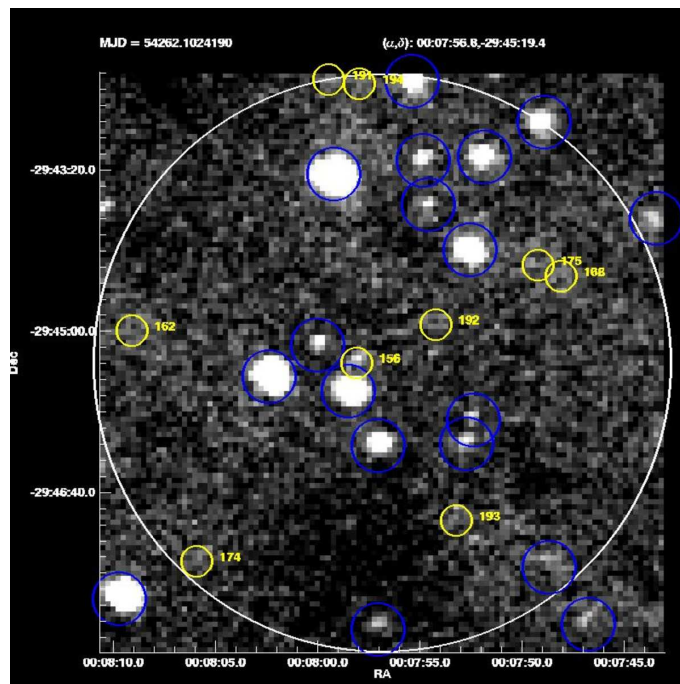


図 5.2: ROTSE による、GRB070611 の画像 (GCN6497)。白丸:エラーサークル、青丸:カタログと一致した恒星、黄色丸:新候補、ID が振られている。GRB070611 は黄色丸、ID156 の天体である。ROTSE で行われている新天体検出ソフトウェアにおいても、誤認点は除去されていない。

## 5.2 新天体検出ソフトウェアの設計

ここでは、改めて開発を行う上での新天体検出ソフトウェアへの要求、それに応える設計について述べる。

### 5.2.1 要求と開発方針

このソフトウェアへの要求を列挙する。

- 誤認点の完璧な除去

GRBの正確な座標を知るということは、GRBの研究においては重要な意味を持ち、可視光残光の観測からもたらされる貴重な情報の1つである。そのため、誤認点を正確に取り除くことをこのソフトウェアの達成すべき第一目標とする。

- MITSuMEシステムへの適合性

MITSuMEシステムの特徴は、3色のバンドの同時撮像であり、得られた3枚の画像の比較からGRBの距離を見積もる。すなわち、高赤方偏移のGRBを観測した場合には短波長側ではGRBは検出されないのである。こうした、長波長側でのみGRBを検出していることがすぐに判別できるような、波長毎の比較を行える設計である必要がある。

- 一時的な新天体不検出への対応

観測中の天候の変化、GRBの減光、画質の劣化、などにより、GRBの観測で得られた画像全てでGRBが検出されているとは限らない。そのようなGRBが検出されていなかった1枚の画像から、GRB不検出と判断してしまうことを避けられなければならない。

- 自動解析パイプラインへの組み込み

将来的には自動解析パイプラインへの組み込みを行えるような設計である必要がある。

以上の要求を満たすため、このソフトウェアは次の2つを考慮した設計にする。(1) バンド、観測時刻の異なる複数の画像に、共通する新天体を探す。(2)「共通する新天体を検出した画像の枚数/処理を行った画像の総枚数」という割合を調べる。その理由は次に記す通りである。

## バンド、観測時刻の異なる複数の画像に、共通する新天体を探す

誤認点の正体である、バッドピクセルやスクラッチパターンなどは CCD の  $xy$  座標に固有のものであると考えられ、赤道座標系では画像ごとに異なる位置に分布する。一方、GRB はじめ新天体はどのバンド、どの時間においても、赤道座標系で同じ位置にある。そこで、複数の画像で共通する新天体を調べることで誤認点は確実に除去されるはずである。また、MITSuME は 3 色同時撮像を行うので、短時間の観測であったとしても調査を行える画像は豊富にある。この方法を採用することで、MITSuME の特性を十分に活かすことが出来るのである。

### 「共通する新天体を検出した画像の枚数 / 処理を行った画像の総枚数」を調べる

ここで、偶然、誤認点も赤道座標系で複数の画像に一致する可能性が考えられる。しかし偶然の一致は少数であると考えられる。処理を行った画像の中で、新天体を検出した画像がどれだけの枚数かという割合を導けば、1 番高い割合の天体が新天体であることが期待される。そのため、割合を見ることで、偶然の一致による誤認点を判断出来るのである。

また、天候等が原因で、処理画像において新天体の検出に偶然失敗している画像があったとしても、割合は下がるものの 1 番高い割合の天体が新天体であることに変わりはない。割合で判断することで、新天体検出の失敗を防ぐことが可能となる。

さらに、特定の波長毎に別けて処理を行い割合を見ることにより、測定波長域にライマンドロップがあるか否かも判断できる。ライマンドロップがあった場合、短波長では新天体が無く、長波長で割合の高い新天体が見つかることになる。

## 5.2.2 アルゴリズム

新天体検出ソフトウェアの処理の流れを記す。

1. 処理を行いたい画像をまとめてリストにし、このソフトウェアの引数とする。この画像には WCS の書き込み行われており、リダクションも行われているものを使用する。
2. SExtractor により、リストにある画像それぞれから天体を抽出する。この際、使用するフィルターは SExtractor のデフォルトのものを使用する。ただし、後述する



ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	224.296782	-12.273696	12	12	100.0
2	224.322731	-12.309618	2	12	16.7

表 5.1: 新天体検出ソフトウェアの出力形式。ID:新天体候補を識別する ID、R.A.:候補の赤経、Dec.:候補の赤緯、unknown\_num:一致した枚数、input\_num:処理を行った枚数、probability: unknown\_num / input\_num の割合を%で表示している。montague のテストでは、ID=1 が montague、ID=2 は bad pixel であり、割合は montague が 100%である。

SN2007gk に対する動作試験では、パラメータ・‘DEBLEND\_MINCONT’ を通常の 1/50 である 0.0001 にして行った。

3. 抽出した天体のうち、衛星からもたらされた GRB の誤差円の中にあるもののみを選出する。これは、GRB の座標と SExtractor で抽出した個々の天体との離角計算の結果から判断する。
4. GRB の誤差円内の天体に対してカタログとの比較を行い、それらを既知の天体、新天体候補に分類する。
5. ある画像から得られた新天体候補と、別の画像から得られた新天体候補との離角計算を行い、その結果から共通して同じ赤道座標にある新天体候補を探す。明野の典型的な分解能を 5 秒角程度であるので、同じ赤道座標にあるかどうかの判断は、デフォルトでは候補天体同士の離角が 5 秒角以下であった場合になる。
6. 同じ赤道座標にある新天体候補が、リストにある画像全てのうちの何枚の画像に共通していたかを調べる。
7. 2 枚以上の画像に共通した新天体候補すべてについて、「共通する新天体を検出した画像の枚数 / 処理を行った画像の総枚数」を出力する。

このソフトウェアにより出力される結果を表 5.1 に記す。表 5.1 は小惑星「montague」におけるものであり、結果の詳細は後述する。また、このアルゴリズムをフローチャートにしたものを図 5.3 に記す

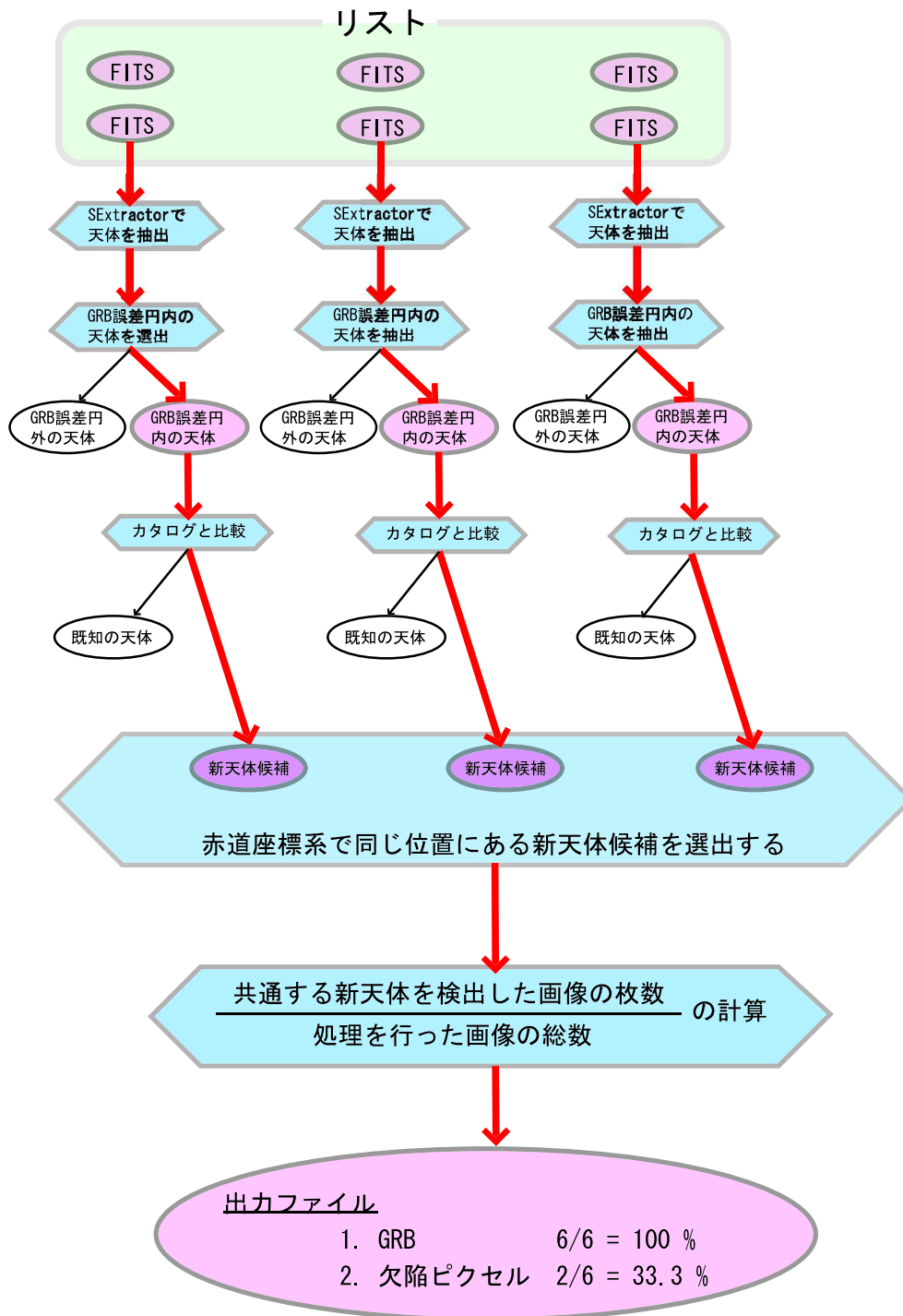


図 5.3: 新天体検出ソフトウェアの処理を記したフローチャート。

天体の種類	天体名	観測日 (JST)	等級 [mag]	試験結果
小惑星	1989kb	2007/06/15	15.5	検出
小惑星	kalypso	2007/06/15	13.4	検出
小惑星	montague	2007/06/15	13.5	検出
超新星	SN2007gi	2007/08/13	13.4	検出
超新星	SN2007gk	2007/09/08	18.8	検出
GRB	GRB061121	2006/11/22	19.2	検出
GRB	GRB070720A	2007/07/21	18.0	検出

表 5.2: 新天体検出ソフトウェアの動作テストを行った天体とその結果。7つの天体でテストを行い、その全てで検出に成功している。

## 5.3 動作試験

新天体検出ソフトウェアの動作試験について記す。試験に用いた天体は小惑星3天体、超新星2天体、GRB2天体の、3種類、計7天体である。その全てで新天体を検出することが出来た。表 5.2 に、今回の動作試験に使用した天体の情報を記す。

### 5.3.1 小惑星を使用した動作試験

惑星の語源とは、天球上を移動していく星、つまり「惑う星」という意味を込めてその名前が付けられたものである。太陽以外の恒星は地球から遠方にあるため、見かけ上生じるの位置変化（固有運動）は非常に僅かであり、地球の自転によって互いの位置関係を保ったまま天球上を回転しているように見える。惑星の場合、地球との距離が近いために互いの公転による見かけ上の位置変化が大きくなる。地球から見ると、惑星は他の恒星たちとの位置関係を変え、つまり天球上を動いているように見える。小惑星も太陽系内の小天体で、天球上を動いているように見える天体である。

そのため、小惑星の座標は恒星カタログに記されていない。画像から抽出した恒星をカタログと比較し、一致しないものを新天体候補とするため、小惑星は新天体検出の試験を行うための題材には適している。

発見されている小惑星の軌道はすでに正確に計算されており、何時にどの座標にあるかを調べることが可能である。小惑星を観測するために、小惑星センター (Minor Planet Center、MPC) が管理しているデータベース<sup>1</sup>を使用し、小惑星の座標を調べた。MPC と

<sup>1</sup>小惑星の座標を調べるために使用したデータベースの URL: <http://scully.cfa.harvard.edu/cgi/CheckMP>

ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	235.715366	-11.158725	9	9	100.0

表 5.3: 1989kb の動作試験結果。1989kb は 9 枚の画像全てに共通する新天体候補であった。1989kb 以外に、新天体の候補は無かった。

は小惑星と彗星の発見に関する情報の提供、観測の受け付け、軌道の計算・報告・出版などを公式におこなう機関である。国際天文学連合 (IAU) の監督のもと、スミソニアン天体物理観測所 (SAO) が運営している。

表 5.2 に記したように、今回の動作試験では 1989kb, kalypso, montague の 3 例を使用した。この 3 天体の等級は 13 mag ~ 15 mag と明野の望遠鏡にとっては検出は容易な天体である。

### 小惑星 1989kb

1989kb を撮像した画像を使用し、動作試験を行った。使用した画像はフレームナンバー:50811 ~ ID:50813、それぞれにつき 3 色の画像を使用し、計 9 枚の画像を使用した。図 5.4 に、1989kb の座標を中心とした BAT と同じ 3 分角のエラーサークル内の恒星をカタログと比較した図を記した。各画像で、新天体候補として 1989kb と誤認点がピックアップされている。

動作試験結果の出力結果を表 5.3 に記す。複数の画像全てで同じ座標にある新天体候補は ID:1 の 1989kb のみであり、誤認点は候補から削除されている。期待通りの動作を行っている。出力結果を表した画像、つまり ID:1 の天体に印を付けた画像を図 5.5 に記す。

### 小惑星 kalypso

kalypso を撮像した画像を使用し、動作試験を行った。ID:50831 ~ ID:50833 までの 3 色の画像、計 9 枚の画像を使用した。図 5.6 に、各画像について、kalypso の座標を中心とした 3 分角のエラーサークル内の恒星をカタログと比較した図を記した。各画像で、新天体候補として kalypso と誤認点がピックアップされている。

動作試験結果の出力結果を表 5.4 に記す。新天体候補は ID:1 の kalypso のみであり、その割合は 9/9=100% である。誤認点は候補から削除されている。動作は期待通りのものである。出力結果に記した ID:1 の天体に印を付けた画像を図 5.7 に記す。

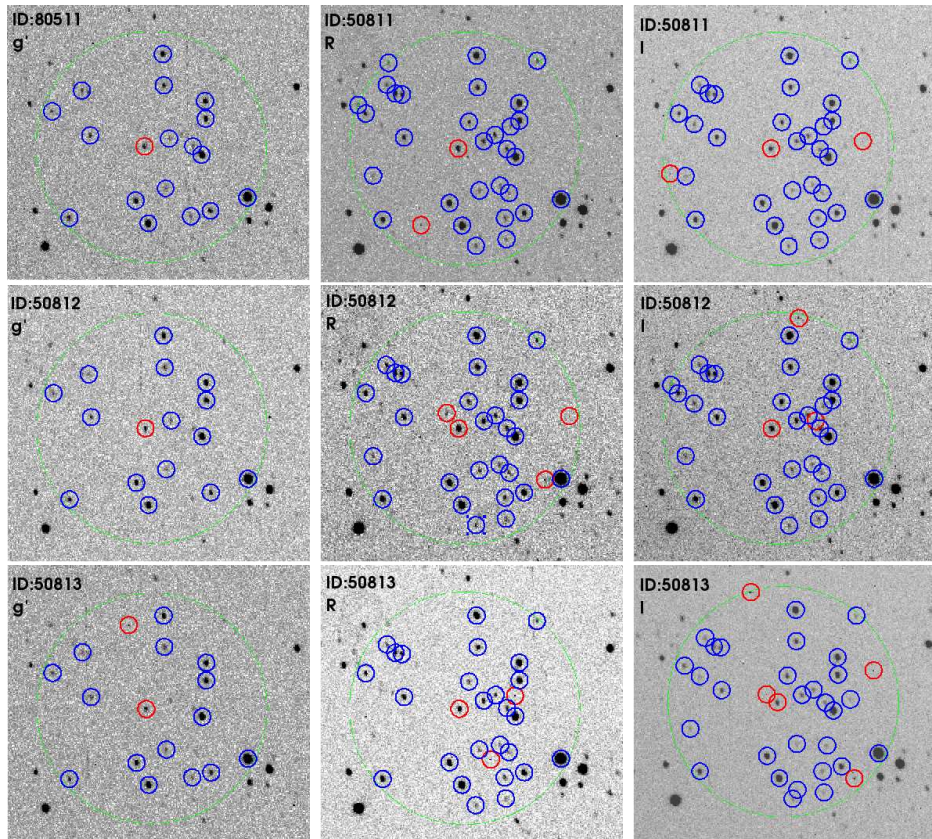


図 5.4: 1989kb を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行った結果。動作試験では ID:50811 の 3 色 ~ ID:50813 の 3 色、計 9 枚の画像を使用している。緑丸:1989kb の座標を中心にした、半径 3 分角のエラーサークル。青丸:カタログとマッチした天体。赤丸:新天体候補。

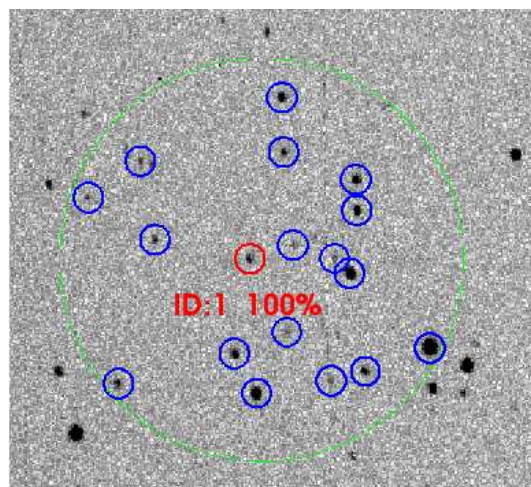


図 5.5: 1989kb を使用した動作試験での最終結果。表 5.3 に記した ID:1 の天体・1989kb を赤丸で囲った。



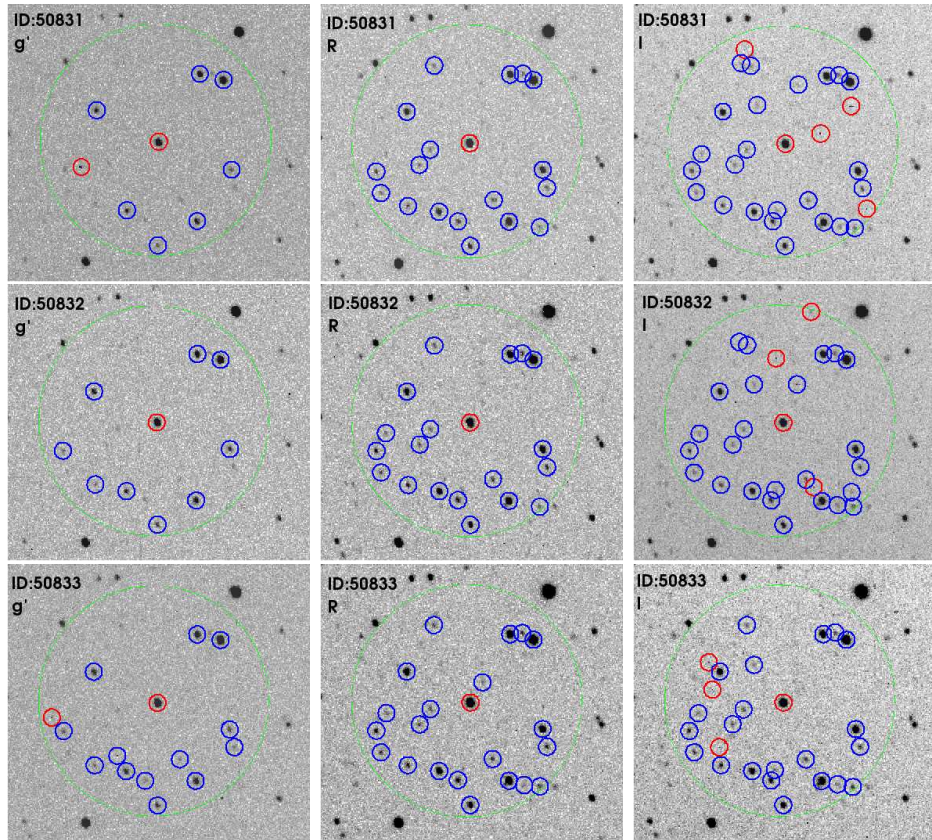


図 5.6: kalypso を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行った結果。動作試験では ID:50831 の 3 色 ~ ID:50833 の 3 色、計 9 枚の画像を使用している。緑丸:kalypso の座標を中心にした、半径 3 分角のエラーサークル。青丸:カタログとマッチした天体。赤丸:新天体候補。

ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	237.335753	-12.598013	9	9	100.0

表 5.4: kalypso の動作試験結果。kalypso は 9 枚の画像全てに共通する新天体候補であった。kalypso 以外に、新天体の候補は無かった。

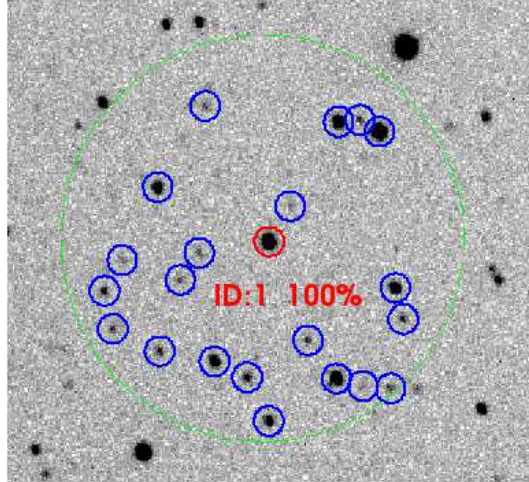


図 5.7: kalypso を使用した動作試験での最終結果。表 5.4 に記した ID:1 の天体である kalypso を赤丸で囲った。

### montague

montague を撮像した画像を使用し、動作試験を行った。使用した画像は ID:50790 ~ ID:50793、それぞれの ID につき 3 色の画像を使用し、計 12 枚の画像を使用した。図 5.8 に、それぞれの画像における montague の座標を中心とした BAT と同じ 3 分角のエラーサークル内にある恒星をカタログと比較した図を記した。各画像で、新天体候補として montague と誤認点がピックアップされている。

動作試験結果の出力結果はすでに、表 5.1 に記した。新天体候補はまず ID:1 の montague があり、その割合は  $12/12=100\%$  である。次に誤認点である ID:2 のバッドピクセルが割合  $2/12=16.7\%$  で出力されている。それ以外の誤認点は候補から削除されており、期待通り新天体が割合最大で出力されている。出力結果に記した ID:1、ID:2 の天体に印を付けた画像を図 5.9 に記す。

### 5.3.2 超新星を使用した動作試験

「超新星」という名称は、夜空に明るい星が突如輝き出すように見え、まるで星が新しく生まれたように見えることに由来するが、実際は星全体が飛び散る大爆発である。超新星爆発には大きく別けて 2 つの種類 (1 つ目は、白色矮星に伴星のガスが降り積もり爆発的な核反応を起こしてしまうもので、Ia 型と呼ばれる。2 つ目は、大質量星の一生の最後に重力崩壊するもので、II 型と呼ばれる。) があるが、どちらの種類でも銀河に付随し突



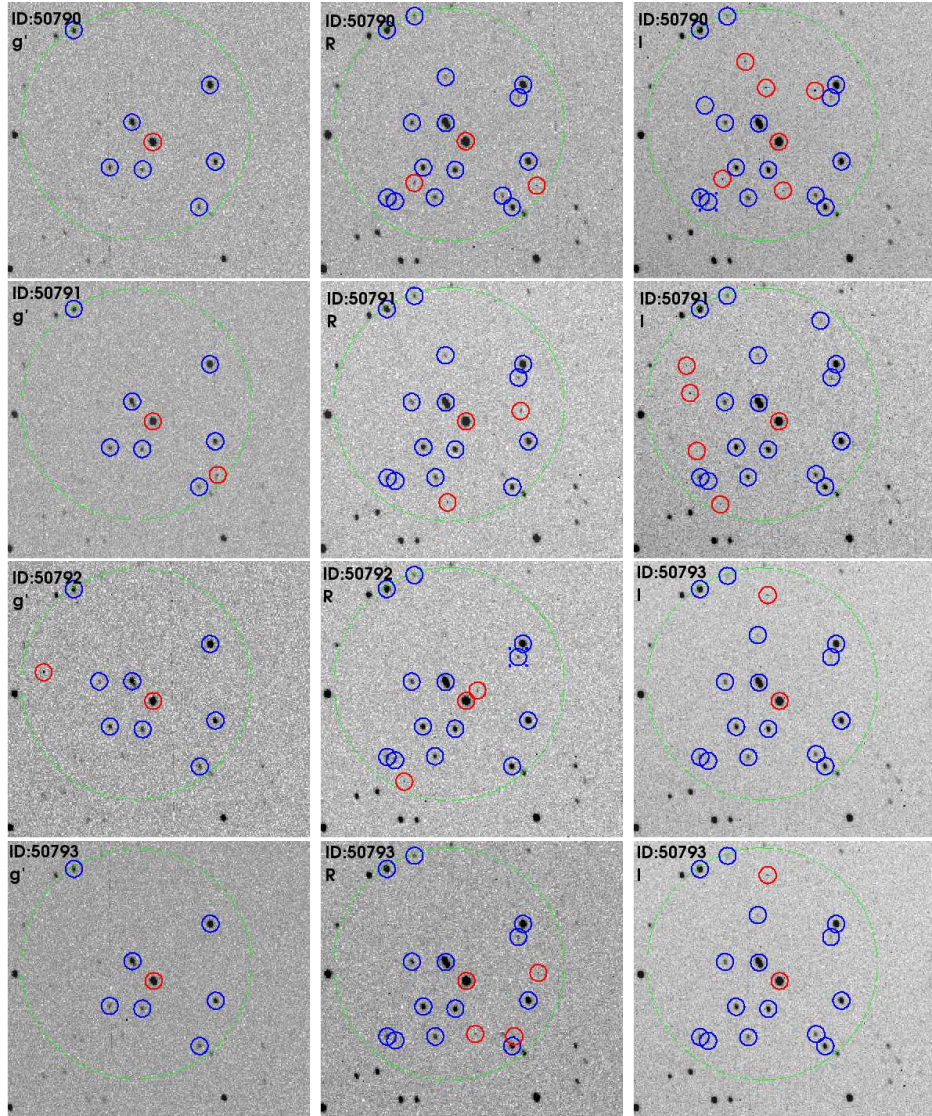


図 5.8: montage を使用した動作試験で、各画像についてカタログとの比較を行った結果。動作試験では ID:50790 の 3 色 ~ ID:50793 の 3 色、計 9 枚の画像を使用している。緑丸:montage の座標を中心にした、半径 3 分角のエラーサークル。青丸:カタログとマッチした天体。赤丸:新天体候補。



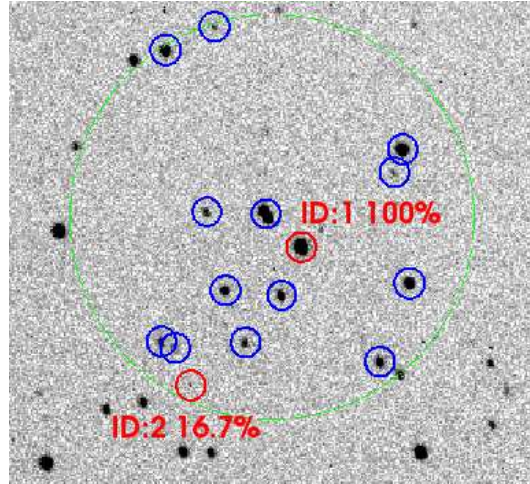


図 5.9: montague を使用した動作試験で出力された新天体候補の画像。表 5.1 に記した ID:1(montague) と ID:2(バッドピクセル) を赤丸で囲った。

発的に発生する。

そのため、超新星は恒星カタログには記載されていない。この超新星も GRB 同様に新天体であり、新天体検出ソフトウェアの動作試験を行うには最適な天体である。また、超新星は銀河のごく近い場所で発生する。このソフトウェアは異なる画像で同じ座標にある新天体候補を探すので、近距離にある超新星とその母銀河を分解出来るか否かを確認する必要がある。GRB を検出する場合でも、GRB が偶然に恒星の付近に発生した場合に、正確に GRB と恒星を分解出来るか否かの指標にもなるだろう。

動作試験で使用する際に観測を行った超新星の情報は、The Astronomy Section of the Rochester Academy of Science(ASRAS)<sup>2</sup> から調べた。ここにある情報は、国際天文学連合 (The International Astronomical Union (IAU)) にある情報を整理したもので、超新星の座標、等級、種類、母銀河の名前、画像、光度曲線について調べることが出来る。

表 5.2 に記したように、今回の動作試験では SN2007gi, SN2007gk の 2 種類を使用した。SN2007gi は 13.4 mag ととても明るい、銀河の上に発生した超新星である。この 2 つの天体を分解出来るか否かの結果も重要である。SN2007gk は 18.8 mag と明野望遠鏡の検出限界ギリギリの超新星である。GRB の観測は検出限界ギリギリで行われるので、この SN2007gk の動作試験では実際の GRB 検出に近い環境での試験になる。ASRAS から取得した、SN2007gi、SN2007gk の画像を図 5.10 に記す。

<sup>2</sup>超新星の情報を調べるために使用した web の URL:<http://www.rochesterastronomy.org/supernova.html>

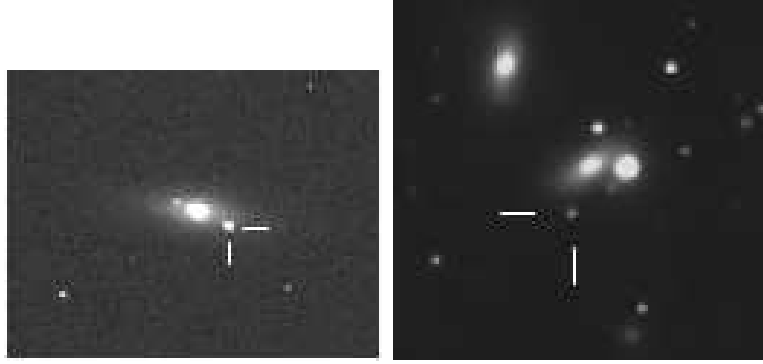


図 5.10: ASRAS に投稿された、SN2007gi(観測者は Koichi Itagaki) と SN2007gk (観測者は Tristan Dilapo) の図。左: SN2007gi、右: SN2007gk

### SN2007gi

SN2007gi を用いて、動作試験を行った。SN2007gi は NGC4036 で発見された超新星である。使用した画像は3色とも、15枚の画像を重ね合わせたものである。ディザリングは行っている。図 5.11 に、3枚の画像での、SN2007gi の座標を中心とした3分角のエラーサークル内の恒星に対してカタログとの比較した図を記す。それぞれの画像で、SN2007gi と誤認点が抽出されている。特に、*g* バンドの画像には誤認点が多い。

表 5.5 に、SN2007gi で行った動作試験の出力結果を記す。新天体候補は3枚の画像に共通していた ID:1 の SN2007gi のみであった。その割合は100%であった。多数あった *g* の誤認点は全て削除されている。表 5.5 の出力結果にある ID:1 の天体に印を付けた画像を図 5.12 に記す。

SN2007gi と母銀河のカウント分布を調べることから、隣接した2天体が分解出来るかを見る。図 5.13 に調査するカウント分布の方向について記した。(1) と (2) の2方向で分布を調べてみた。図 5.14 左に記した (1) の方向では、母銀河の裾の成分に SN2007gi の成分が乗っている。一方、図 5.14 右に記した (2) の方向では母銀河の分布に重なる形で、SN2007gi のカウント分布がある。母銀河と SN2007gi の離角は22分角である。このように、同程度の明るさの2つの天体が近い距離で重なりあっていた場合でも、このソフトウェアは2つの天体を分解できることが示せた。

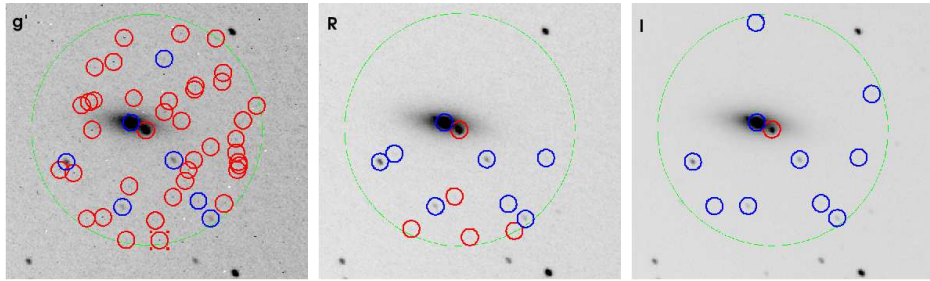


図 5.11: SN2007gi を撮像した 3 色の画像に対してカタログの比較を行った図。画像は 3 色とも ID:57122 ~ ID:57136 まで計 15 枚の画像を重ね合わせた画像。緑丸: SN2007gi の座標を中心にした 3 分角のエラーサークル。青丸: カタログとマッチした天体。赤丸: 新候補天体。

ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	180.348484	+61.892593	3	3	100.0

表 5.5: SN2007gi の動作試験結果。3 枚の画像に共通する新天体候補は SN2007gi のみであった。SN2007gi 以外には複数枚に共通する新天体候補は無かった。

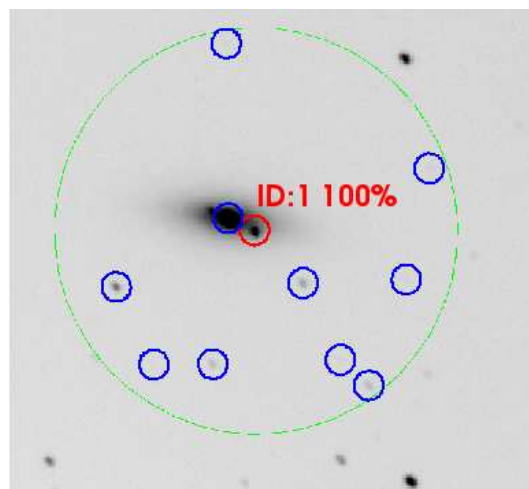


図 5.12: SN2007gi を使用した動作試験での最終結果。表 5.5 に記した ID:1 の天体である SN2007gi を赤丸で囲った。

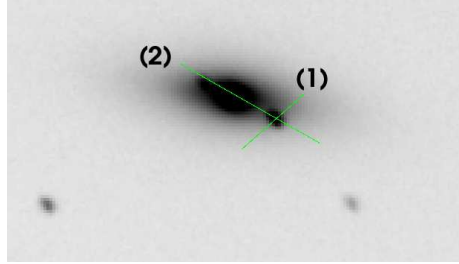


図 5.13: SN2007gi のカウント分布の切り方を示した図。(1) と (2) の線上でのカウントの分布を図 5.14 に記す。

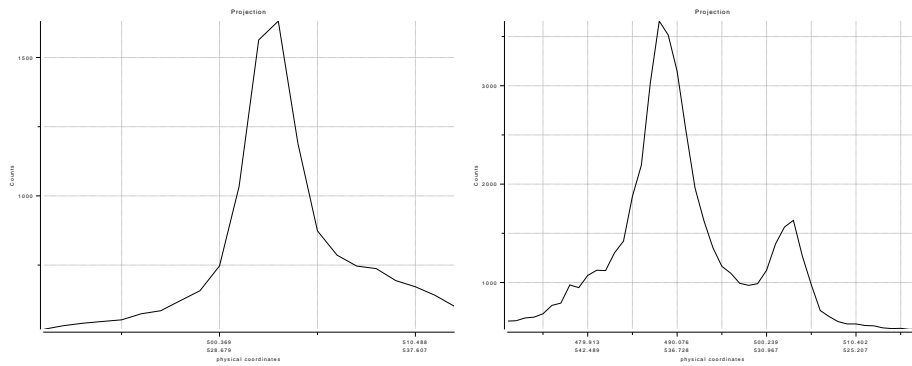


図 5.14: SN2007gi のカウント分布。左:(1) 方向での SN2007gi のカウント分布。この方向では、平らな母銀河の成分の上に SN2007gi の成分が乗っている。右:(2) 方向での SN2007gi のカウント分布。10.8 mag の母銀河の裾の部分に 13.4 mag の SN2007gi 成分がある。母銀河と SN2007gi の離角は 22 分角で、互いに重なりあっているが 2 つ分解のピークは分解出来ている。

ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	251.3266335	+67.9307928	6	6	100.0
2	251.3037899	+67.9558622	2	6	33.3

表 5.6: SN2007gk の動作試験結果。6 枚の画像に共通する新天体候補が SN2007gk、2 枚の画像に共通する新天体候補はバッドピクセルである。

## SN2007gk

SN2007gk を用いた動作試験について記す。SN2007gk は MGC+11-20-027 で発見された超新星である。使用した画像は 13 枚の画像を重ね合わせたものと 14 枚の画像を重ね合わせたもの 2 種類が 3 色ずつの計 6 枚である。重ね合わせた画像はディザリングを行っている。図 5.15 に、6 枚の画像での、SN2007gk の座標を中心とした 3 分角のエラーサークル内にある恒星に対して、カタログとの比較した図を記す。それぞれの画像で、SN2007gk と誤認点が抽出されている。

表 5.6 に、SN2007gk で行った動作試験の出力結果を記す。新天体候補は ID:1 の SN2007gk と ID:2 のバッドピクセルの 2 つであった。割合は ID:1 が  $6/6=100\%$ 、ID:2 が  $2/6=33.3\%$  であった。SN2007gk の検出割合が最も高いことは期待通りの結果である。表 5.6 の出力結果にある ID:1、ID:2 の天体に印を付けた画像を図 5.16 に記す。

隣接した 2 天体の分解について見るために、SN2007gk とその母銀河のカウント分布を見る。図 5.17 は、カウント分布の切り方について示した図である。(1) と (2) の 2 方向で分布を調べてみた。図 5.18 右に記した、母銀河の影響を受けていない (1) 方向では、分布は 1 つのピークを持つ。一方、図 5.18 左に記した (2) 方向では、母銀河のカウント分布の裾に SN2007gk のピークがある。今回の試験では、パラメータ ‘DEBLEND\_MINCONT’ がデフォルトの 0.005 では、SN2007gk と母銀河を分解することが出来なかった。このパラメータは、大小異なる 2 つのピークが隣接する場合に、小さいピークと大きいピークの比がどれくらいで 2 つ天体を分解するか、という値である。そこで、この値をデフォルトの  $1/50$  である 0.0001 にすることで、2 天体を分解することが出来た。なお、母銀河の等級は R バンドで 9 mag、SN2007gk の等級は R バンドで 18.8 mag あった。母銀河と SN2007gk の明るさの比はおよそ 0.0001 である。

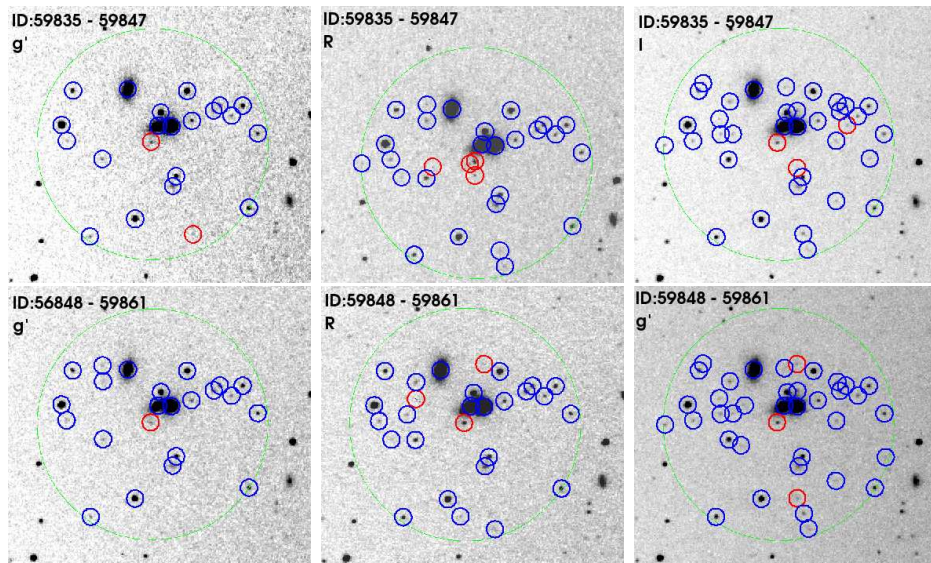


図 5.15: SN2007gk の動作試験で、使用した 6 枚の画像に対してカタログの比較を行った図。画像は ID:59835 ~ ID:59847 までを重ね合わせた画像が 3 色、ID:59848 ~ ID:59861 までの画像を重ね合わせた画像が 3 色、計 6 枚である。緑丸: SN2007gk の座標を中心にした 3 分角のエラーサークル。青丸: カタログとマッチした天体。赤丸: 新候補天体。

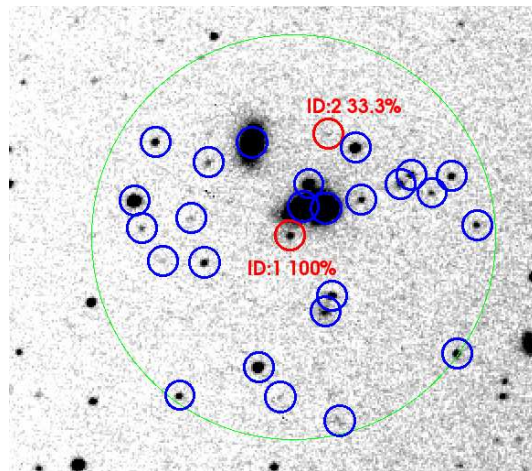


図 5.16: SN2007gk を使用した動作試験での最終結果。表 5.6 に記した ID:1 の天体である SN2007gk と ID:2 のバッドピクセルを赤丸で囲った。

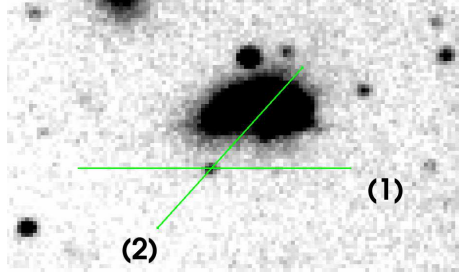


図 5.17: SN2007gk のカウント分布の切り方を示した図。(1) と (2) の線上でのカウントの分布を図 5.18 に記す。

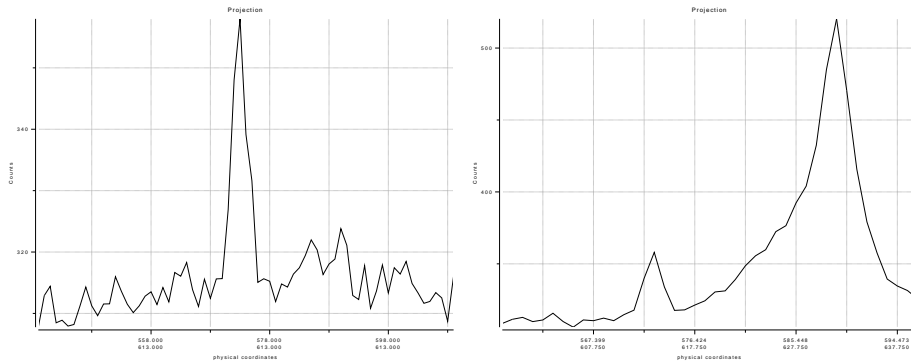


図 5.18: SN2007gk のカウント分布。左:(1) 方向での SN2007gk のカウント分布。この方向では母銀河成分は見えていない。右:(2) 方向での SN2007gk のカウント分布。9 mag の母銀河の裾の部分に 18.8 mag の SN2007gk 成分がある。この 2 山を分解するために、SExtractor の設定をパラメータを分解に対する感度をあげる方向に変更した。



### 5.3.3 GRB を使用した動作試験

このソフトウェア検出を行った目的である、GRBのみを正確に検出出来るかの動作試験を行う。ここで用いる画像は、明野で観測に成功した GRB061121 である。また、このソフトウェアを実際に使用し発見した GRB070920A(この GRB に関しては他の検出報告が全く無いため、実際に GRB であったかの確認が出来ていない。詳細は 6 章。)についてを記す。

#### GRB061121

GRB061121 を撮像した画像を用いての動作試験について記す。GRB061121 は 15:22:29(UT) に、Swift が検出した GRB である。今回のテストで使用した画像は、得られた画像のうち観測始めから 24 枚を重ね合わせた画像の 3 色である。観測時にディザリングを行っていないため、重ね合わせた画像にはスクラッチパターンが目立っている。図 5.19 に、3 枚の画像について、BAT からのアラート内にある恒星に対してカタログとの比較を行った図を記す。エラーサークルは 3 分角である。それぞれの画像で、GRB061121 とスクラッチパターンが検出されている。

表 5.7 に、GRB061121 で行った動作試験の出力結果を記す。新天体候補は ID:1 の GRB061121 のみで、その割合は  $3/3=100\%$  である。この天体で初めて、スクラッチパターンが顕著に表れている画像を使用した。誤認点の除去は正確に行われている。表 5.7 の出力結果にある ID:1 の天体に印を付けた画像を図 5.20 に記す。このテスト結果から、検出限界ギリギリの実際の GRB でも検出が可能であることが示せた。

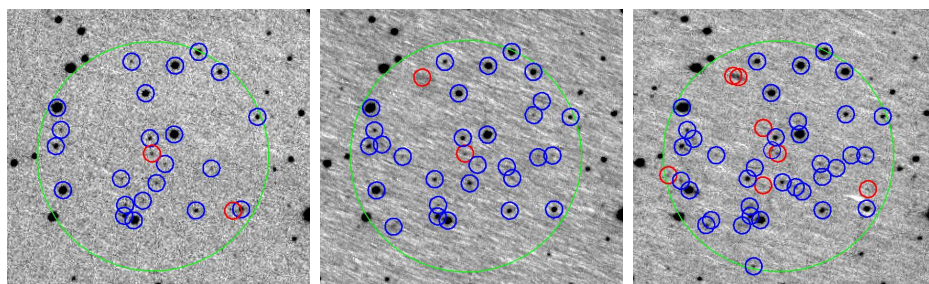


図 5.19: GRB061121 の画像を使用し、3 色の画像でカタログとの比較を行った図。画像は 3 色とも ID:30932 ~ ID:30955 までを重ね合わせた画像。緑丸: BAT のエラーサークルで大きさは 3 分角。青丸: カタログとマッチした天体。 赤丸: 新候補天体。



ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	147.2274959	-13.1950466	3	3	100.0

表 5.7: GRB061121 の動作試験結果。3 枚の画像に共通する新天体候補は GRB061121 のみであった。スクラッチパターンの目立つ画像であったが、GRB061121 以外には複数枚に共通する新天体候補は無かった。

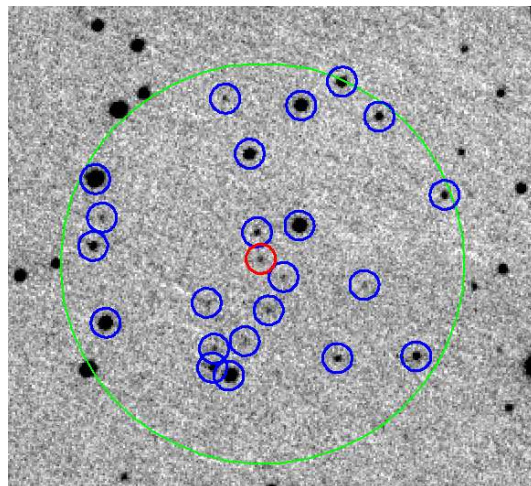


図 5.20: GRB061121 を使用した動作試験での最終結果。表 5.7 に記した ID:1 の天体である GRB061121 を赤丸で囲った。

## GRB070720A

GRB070920A のデータに対して、このソフトウェアに処理を行った際の結果について記す。

GRB070920A は 04:00:13(UT) に Swift がトリガーをかけた GRB である。我々は GCN6807 に報告されているエラーサークルの端に、I バンドのみ、GRB の可視光残光と思われる天体を発見した。図 5.21 に、エラーサークル内の恒星に対してカタログと比較を行った図を記す。I バンドの画像と同じ領域の DSS との比較を行った図を図 5.22 に記す。また、表 5.8 に、I バンドのみに検出された天体の情報を記す。

これまでの動作試験では、新天体があると分かっていた画像に対してテストを行っていた。しかし、この GRB070920A の場合、新天体を検出しているかどうか分かっていない画像に対して処理を行い、GRB070920A の検出に成功した。今後も GRB 観測で得られた

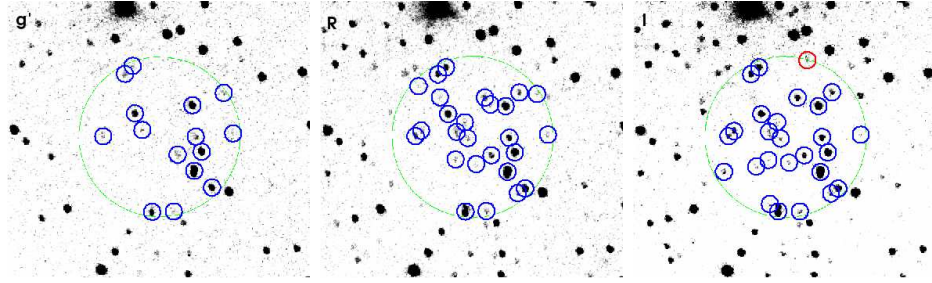


図 5.21: GRB070920 観測で得られた画像に対して、エラーサークル内の恒星とカタログの比較を行った図。Iバンドにのみ新天体候補が検出されている。画像は3色とも ID:60790 ~ ID:60820 までを重ね合わせた画像。緑丸: GRB070920 の座標を中心にした3分角のエラーサークル。青丸:カタログとマッチした天体。赤丸:新候補天体。

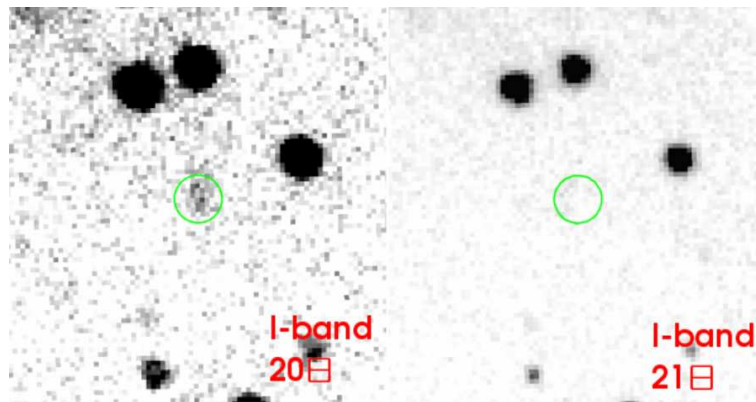


図 5.22: GRB070920A の I バンドのデータについて、20 日と翌 21 日の比較をした図。GRB070920A と思われる天体は翌日に減光している可能性がある。

データに対してこのソフトウェアを使用することで、GRBを検出しているか否かをより早期に判断出来ると期待できる。

ID	R.A.	Dec.	unknown_num	input_num	probability
1	100.9369620	+72.2833071	1	3	33.3

表 5.8: GRB070920 の動作試験結果。Iバンドにのみ、新天体候補が発見された。

## 5.4 まとめ

開発を行ったソフトウェアの動作試験から、複数の画像を利用し、新天体検出の割合を調べることにより、問題であった誤認点を完全に取り除くことができるとわかった。これにより正確な新天体検出が行えると考えられ、本研究の第一目標を達成することが出来た。

動作試験の結果から、自動解析を高度化するには、最低3枚(1回の撮像)の画像を比較ことで新天体の検出を行えることが分かった。多くの画像を使用せず、1回の撮像で新天体検出の有無を調べられることは、自動解析システムを高度化するうえで非常に強みになる。ただしこの場合、誤認点が偶然同じ赤道座標にきてしまい、なおかつ1枚の画像で新天体が検出出来なかった場合には、新天体と誤認点が同じ割合になってしまう可能性がある。6枚(2回の撮像)の画像での比較を行った場合には、確実に新天体を検出できるだろう。

今後、このソフトウェアを運用する際に生じると考えられる問題は、「極端条件において、新天体を SExtractor によって抽出できない」であると思われる。例えば、明るい恒星のすぐ近くに GRB が起こった場合、星の混んだ領域で GRB が起こった場合、検出限界ギリギリであった場合、などである。SN2007gk の場合では、検出を行うためにパラメータ 'DEBLEND\_MINCONT' を変更する必要があった。今後も、恐らくこの 'DEBLEND\_MINCONT' を変更することに必要が生じる可能性もある。このソフトウェアを使用するには、パラメータに注意を払う必要があるだろう。

## 第6章 フォーカス調整の自動化

我々の GRB の自動観測システムでは、フォーカスの調整を行うまでは出来ていなかった。そのため、今までの GRB 観測のなかでは星像が歪んでしまっているケースもあった。適切にフォーカスの調整を行わなければ、恒星の PSF FWHM は大きくなってしまう。それは測光のエラーが大きくなり、限界等級が浅くなることを意味する。GRB の等級を深く、精度良く決定するためには、フォーカスの調整は非常に重要なファクターである。更に、パトロール観測システムの導入により通常の観測も自動化されるため、フォーカスの調整を自動化することは必須である。そこで、我々はベストフォーカスのモデルの作成することにより、フォーカスの調整の自動化を実装する。この章では、モデル作成の詳細と自動フォーカス調整機能の実用性について述べる。

### 6.1 フォーカス自動調整の方針

岡山の望遠鏡ではフォーカスの自動調整はすでに行われている。その手法は、まず2種類の相関、(1) 望遠鏡の温度とベストフォーカスの相関、(2) 望遠鏡の指向方向とベストフォーカスの相関を調べ、そこからベストフォーカスのモデルを作成する。そして、各観測におけるフォーカス調整では、モデルから得られる値をフォーカス値として使用するというものである。

我々の望遠鏡の光学系はほとんど岡山と同じものである。そこで今回のフォーカス自動調整化を行うにあたって、まず岡山と同じベストフォーカスモデルを作成出来るかを調べる。次に、そのモデルが我々にとっても実用可能かを確認する。

### 6.2 測定

観測方法、解析方法について記す。また、ベストフォーカスの許容範囲についても記す。

## 6.2.1 観測

明野の望遠鏡では副鏡を移動することにより合焦を行う。CCD カメラを用いる際のフォーカスの調整は、この副鏡を少しずつずらしながら撮像を行い、フィッティングにより PSF FWHM が一番小さくなる副鏡の位置を求めれば良い。データ取得に際して、特筆すべきことを以下に記す。

**積分時間** トラッキングのエラーにより恒星の像が崩れてしまうのを避けるため、1枚の積分時間は10秒とした。

**合焦方法** 副鏡の移動は電動であり、課題制御 PC に表示されるフォーカス値 (単位:mm) を変化させることで調整を行う。このフォーカス値は、副鏡位置を検出器面に近づける方向を正に取っている。そのため、フォーカス値を変化させる場合には、バックラッシュができる限り小さくするため、フォーカス値を負方向へのみ動かす。

**副鏡の移動幅** 今回の測定では、(1) 測定開始のフォーカス値よりも 0.1mm 大きくフォーカス値を動作させ、(2) フォーカス値を測定開始の値に戻し、(3) その後はフォーカス値が小さくなる方向へ 0.03mm 変化させながら撮像を行った。

**観測時刻** 前述の通りフィッティングによりベストフォーカスを求めるが、シーイングが悪いと PSF FWHM が極小となる領域が見えなくなってしまう、誤ったフォーカス値をベストフォーカスとする可能性がある。そこで、大気の変動が激しい時刻を避け、気温が緩やかに下がる 11 時 UT (JST で 20 時) 以降から観測を開始した。図 6.1 に冬場における典型的な明野の温度変化を載せる。

なお、シーイングとは、大気によって星からの平面波が乱され、星像が広がる減少である。これは、階層的な屈折率分布を持つ媒質中で、力学的乱流が発生した際に生じる。等温大気の変動はシーイングには関係ない。シーイングについて説明した図を図 6.2 に載せる。

**注意事項** 副鏡を移動させた後や望遠鏡の導入後に生じる副鏡の振動により、星像が悪化しベストフォーカスが決められなくなる可能性がある。そこで振動が減衰してから観測を開始するため、フォーカスを移動する際には、その動作の 25 秒後から撮像を開始した。また、望遠鏡導入の際は、動作の 1 分後から撮像を開始した。

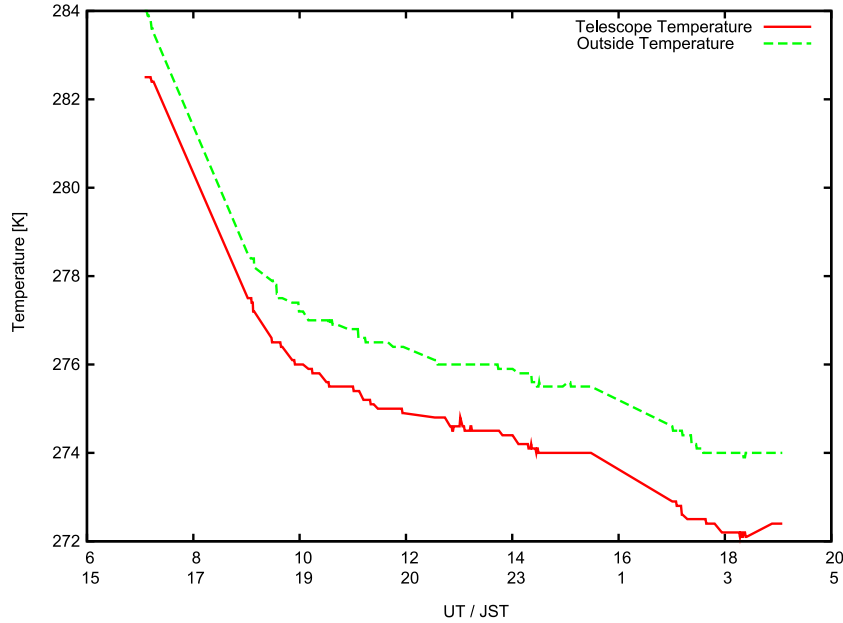


図 6.1: 冬場での、明野の典型的な温度変化(2007年12月14日)。日没(この時期は16:30過ぎ)後、気温と望遠鏡の温度は急激に下がる。UTで11時(JSTで20時)以降になると、気温と望遠鏡の温度変化は緩やかになっていく。

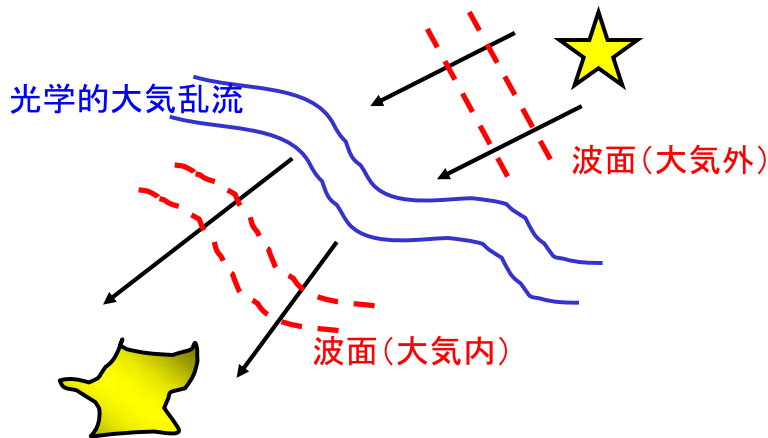


図 6.2: シーイングの模式図。温度勾配を持った大気の流れにより、平面波が乱されてしまう。

**観測日** ベストフォーカスの温度依存を調べるための観測日は、2007年12月7日(以降、071207)、071211、071214、071215、071216、071217、071218、である。ベストフォーカスの高度依存を調べるための観測日は、071216、080101、080102、080103、080107、である。モデルの実用性を確かめるための観測日は、080109、080124 である。

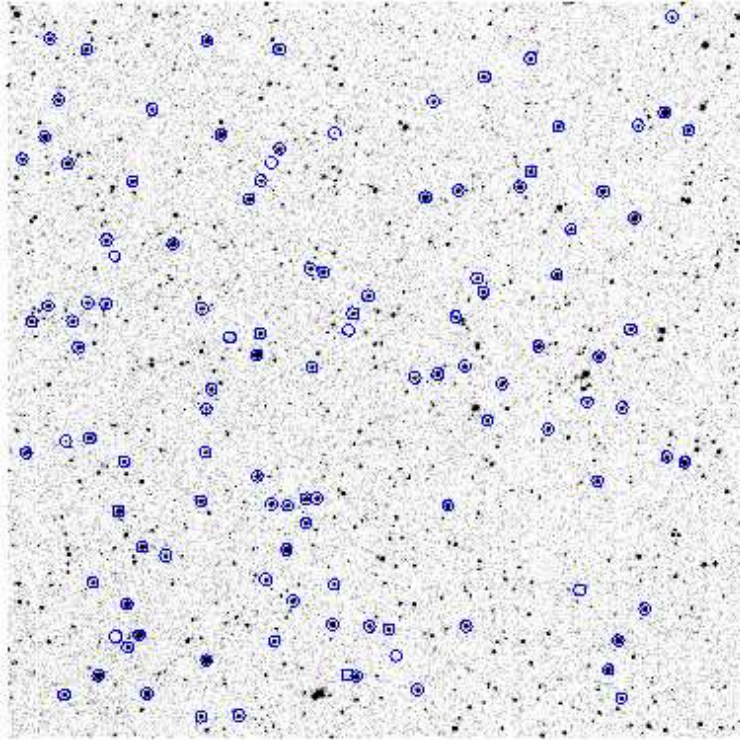


図 6.3: PSF FWHM の平均を求めるために、SExtractor で抽出した恒星。

## 6.2.2 解析

解析方法は次の通りである。まず、SExtractor を使用し 1 枚の画像に写っている恒星を抽出し、PSF FWHM の平均を計算する。天体抽出の際、恒星以外の誤認点を除去し、かつ十分統計の良い明るい恒星のみを使用したいので、(1) 画像の周囲 20 ピクセルは除去、(2)  $1000 < \text{スカイを引いた天体のカウント [ADU]} < 40000$  の恒星、(3)  $1.5 < \text{PSF FWHM [ピクセル]} < 6.0$  の恒星、の条件を満たした恒星のみを使用する。例えば、今回の解析で使用される恒星は図 6.3 の通りである。取得したデータのフィッティングには

$$y = \sqrt{a(x - F_{best}^2 + b^2)} \quad (6.1)$$

を使用する。a は適当な正の係数。Fbest は最適フォーカス値。b は最小錯乱像の PSF FWHM(光学系の性能とシーイングをあわせたもの) である。図 6.4 にフィッティングを行った図を載せる。

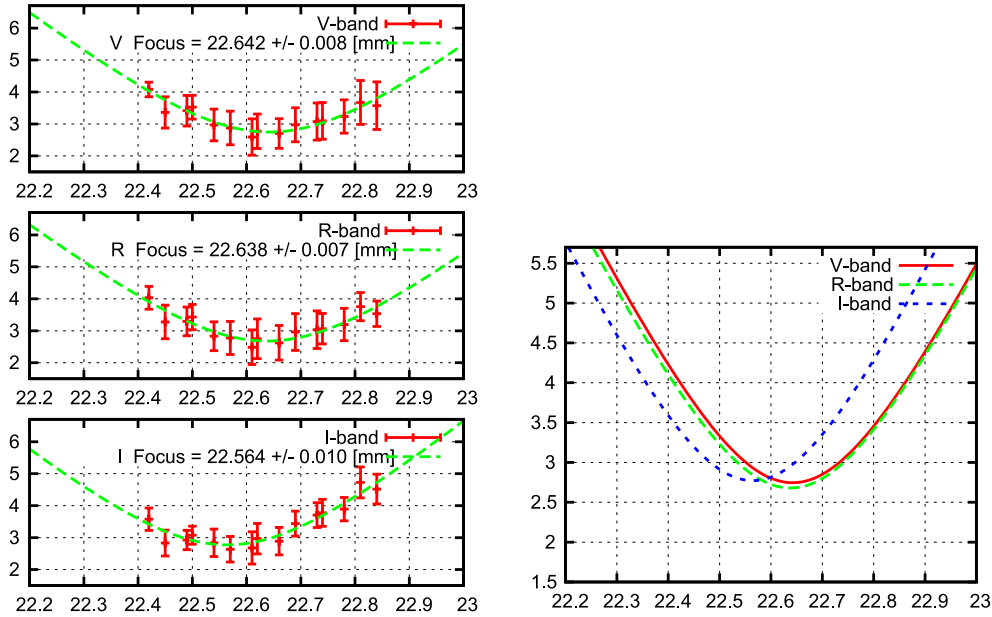


図 6.4: ベストフォーカスのフィッティングの図。左:3色ごとのフィット。右:3色のベストフォーカスの関係。IバンドのベストフォーカスはRバンド、gバンドのベストフォーカスとずれている。今後、3色の CCD の位置を揃える必要がある。

### 6.2.3 ベストフォーカスの精度

ベストフォーカスの精度は、星像の悪化が1ピクセルに収まるまでの副鏡のずれ幅から導かれる。図 6.5 に模式図を載せる。我々の CCD のピクセルサイズは  $24\mu\text{m}$  である。その場合、口径比が F6 であるので、焦点のずれ幅を  $df$  とすれば  $df \sim 300\mu\text{m}$  である。焦点のずれ幅と副鏡の移動幅には以下の関係式がある。

$$m = \frac{F}{F_1} = 3$$

$$dS = \frac{df}{(m^2 + 1)} = \frac{300\mu\text{m}}{3^2 + 1} = 30\mu\text{m} \quad (6.2)$$

ここで、 $dS$  は副鏡の移動幅、 $m$  は副鏡拡大率、 $F$  は合成焦点距離、 $F_1$  は主鏡焦点距離である。計算から、ベストフォーカスの精度は  $dS \sim \pm 15\mu\text{m}$  であることが分かる。そこで、これをベストフォーカスの許容範囲とする。ただ、図 6.4 を見る限り、 $dS \sim \pm 50\mu\text{m}$  までは PSF FWHM に変化はほとんど見られない。

## 6.3 望遠鏡の温度とベストフォーカスの相関

最初に、ベストフォーカスと望遠鏡温度との相関を確かめる。



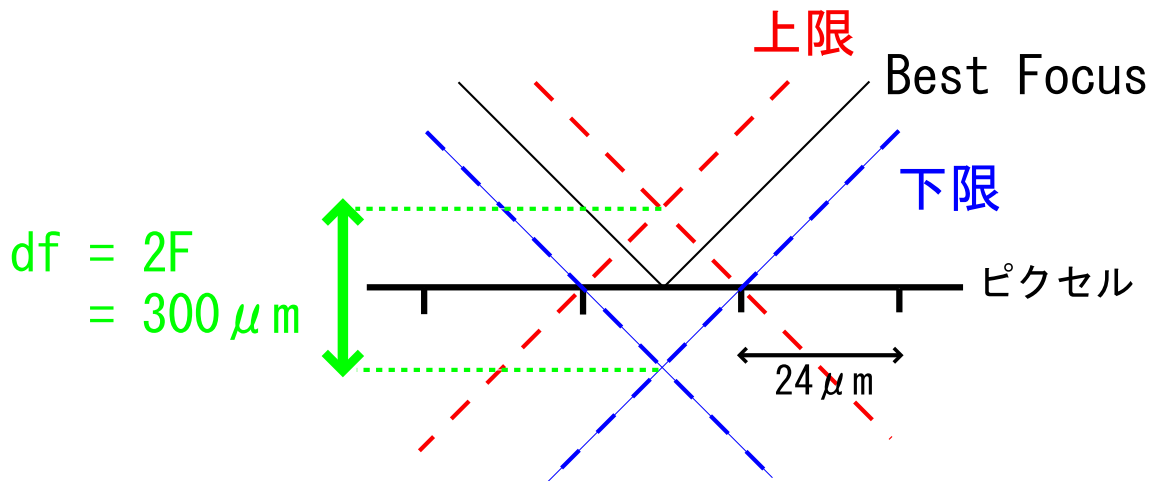


図 6.5: ベストフォーカスの精度を算出するための模式図。1 ピクセルは  $24\mu\text{m}$  である。赤線と青線は、星像の劣化が 1 ピクセル以内に収まるギリギリの範囲。赤線と青線の交点の幅  $df=300\mu\text{m}$  が許容される焦点のずれ幅である。

### 6.3.1 原理

望遠鏡の温度が変化することにより、焦点位置の補正が必要となる。温度変化に最も影響があるのは、主鏡と副鏡の間隔を決めるスチール製の筒である。この筒が熱伸縮することにより、フォーカス値が変化することになる。副鏡は、熱膨張で主鏡と副鏡の間隔が広がるのを補正する方向へ動かす必要があるため、望遠鏡の温度が上昇した場合は副鏡の変化方向は重力方向、つまりフォーカス値の正方向へ変化することになる。図 6.6 はこれを説明する模式図である。明野の望遠鏡では、この部分の光軸方向の長さは約  $1300\text{mm}$  である。鉄の膨張係数は  $11.8 \times 10^{-6}[1/\text{K}]$  であるので、単位温度あたりの副鏡の変化量は

$$11.8 \times 10^{-6}[1/\text{K}] \times 1300[\text{mm}] = 0.0153[\text{mm}/\text{K}] \quad (6.3)$$

となるはずである。そこで、色々な温度におけるベストフォーカスを求めて、変化量が熱膨張に従っていることを確認する。

### 6.3.2 結果

望遠鏡の温度として、FITS ヘッダーの TEL-TMP(鏡筒の温度を表す) の値を使用している。高度依存が反映されないよう、天頂で撮像を行った。Iバンドのベストフォーカス

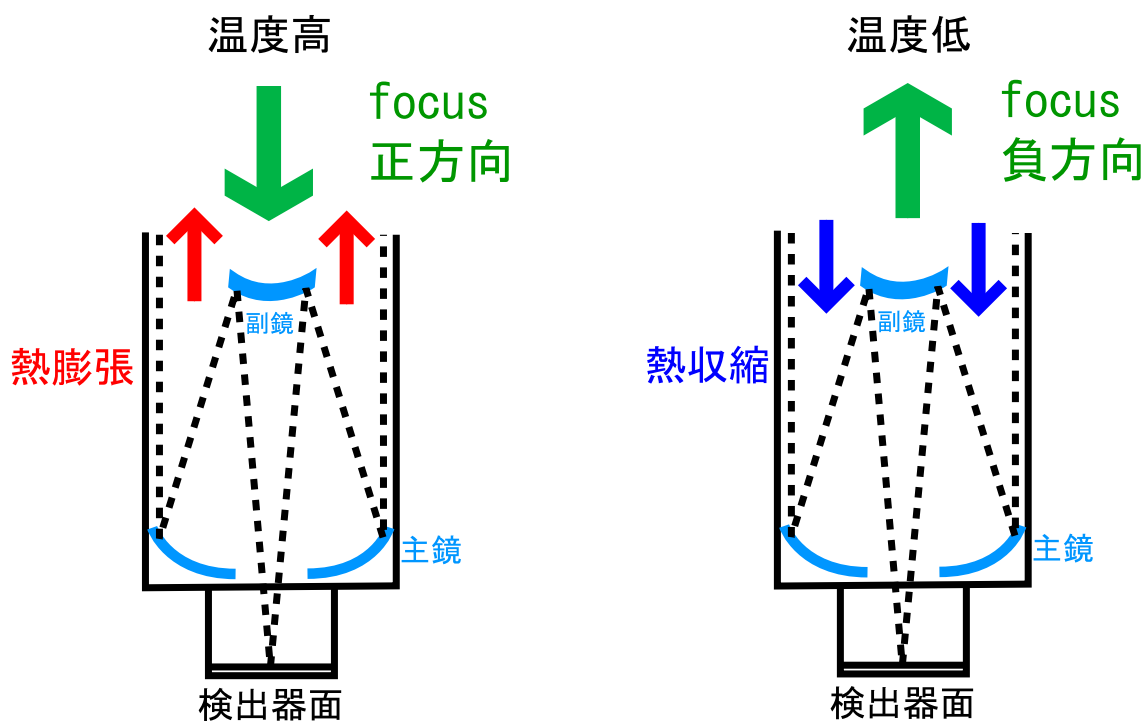


図 6.6: ベストフォーカスの温度依存を説明する模式図。左:温度が高くなる場合の副鏡の移動方向。熱膨張により副鏡が検出器から離れるので、副鏡を検出器を近づける方向へ動かさなければならない。右:温度が低くなる場合の副鏡の移動方向。熱収縮により副鏡が検出器に近付くので、副鏡を検出器を遠ざける方向へ動かす必要がある。

はRバンド、gIバンドとずれているため、今回は測定を行っていない。

測定結果を図6.7に示す。Rバンド、gIバンドとも、温度が上昇するにつれベストフォーカスが期待される方向に変化している。一次直線  $y = ax + b$  でフィットした結果は表6.1の通りである。Rバンド、gIバンドとも、変化量は式6.3で求めた熱伸縮に由来する変化量とちょうど一致する (gIでの測定点はややばらついているが)。

	a	b
Rバンド	$0.0157 \pm 0.0015$	$18.302 \pm 0.002$
gIバンド	$0.0150 \pm 0.0016$	$18.491 \pm 0.002$

表 6.1: ベストフォーカスと望遠鏡の温度の相関。

## 6.4 望遠鏡の指向方向とベストフォーカスの相関

次に、上記のベストフォーカスと望遠鏡温度との相関を使用し、指向方向とベストフォーカスの相関を調べる。

### 6.4.1 原理

望遠鏡の指向方向が天頂の場合と低空の場合では、望遠鏡への重力のかかり方が異なる。特に、副鏡を支える金属部位は重力変化によって最もフォーカス値の変化に影響すると考えられる。望遠鏡が天頂を向いていた場合では、大きな重力がかかった金属部位は歪み、副鏡は検出器に近付く。それを補正するため、フォーカスを負方向へ動かさなければならない。逆に望遠鏡が低空を向いていた場合には金属部位にかかる重力が弱くなるので、金属部位の歪みは解消され、副鏡は検出器から離れる。それを補正するため、フォーカスを正方向に動かさなければならない。図6.8にその模式図を載せる。天頂距離<sup>1</sup>を  $ZD$  とすれば、副鏡とそれを支える金属部位にかかる重力は  $\cos(ZD)$  に比例して変化するので、色々な高度・方位でベストフォーカスを求めその変化量が  $\cos(ZD)$  に比例していることを確かめる。

<sup>1</sup>天頂距離は 90 度 - 高度で表される。

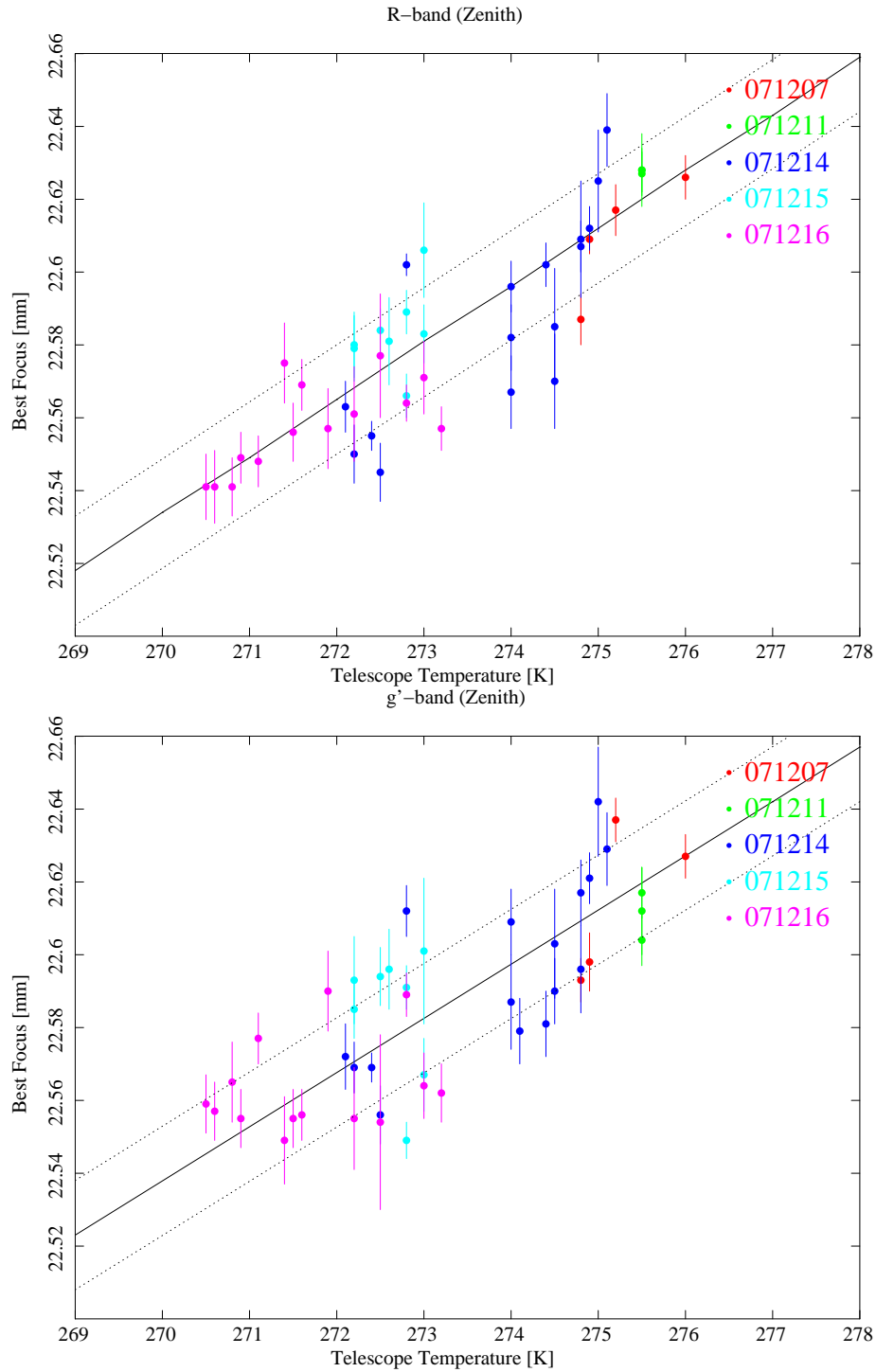


図 6.7: ベストフォーカスと望遠鏡の温度の相関。上:Rバンド。下:g'バンド。モデル線と並行の点線で囲まれた領域は、ベストフォーカスの許容範囲。

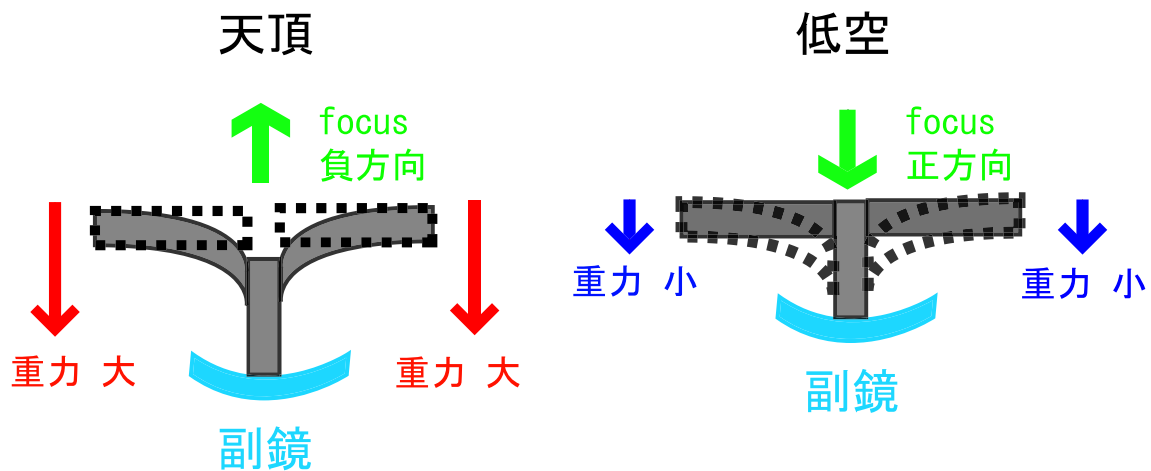


図 6.8: ベストフォーカスの高度依存を説明する模式図。左図:望遠鏡が天頂を向いた場合の副鏡の移動方向。副鏡を支える金属部位にかかる重力が強まるので、金属部位が歪むことにより副鏡は検出器に近付く。それを補正するため、副鏡を検出器から遠ざける方向へ移動させなければならない。右図:望遠鏡が低空を向いた場合の副鏡の移動方向。副鏡を支える金属部位にかかる重力が弱まるので、金属部位の歪みが無くなることにより副鏡は検出器から遠ざかる。それを補正するため、副鏡を検出器へ近づける方向へ移動させる必要がある。

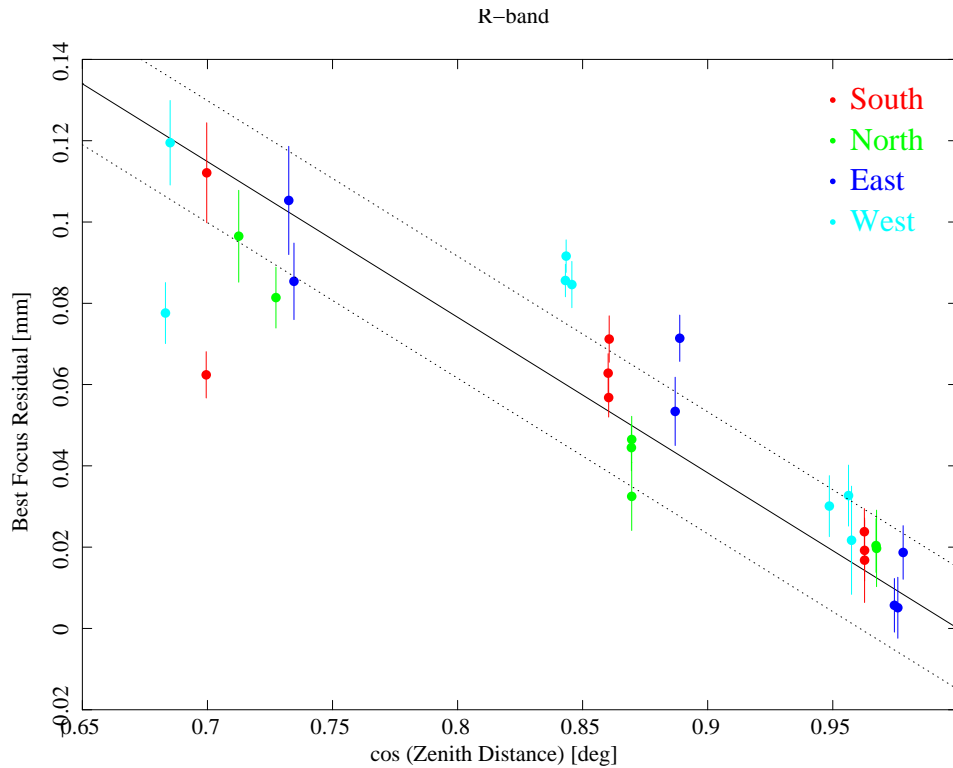


図 6.9: Rバンドにおける、ベストフォーカスと望遠鏡の指向方向の相関。赤:南、緑:北、青:東、水色:西。モデル線と並行の点線で囲まれた領域は、ベストフォーカスの許容範囲。

### 6.4.2 結果

天頂距離として FITS ヘッダーの ZD の値を使用し、これを横軸に取る。縦軸には、温度依存が反映されないよう、上記の温度依存の相関を使用し温度変化を相殺したうえでの残差を取る。なお、図 6.7 の gI バンドはモデルからのばらつきが大きいので、今回は R バンドの結果のみを記す。

測定結果を図 6.9 に示す。図からは、温度依存の相関からの残差と天頂距離に  $\cos$  を取ったものに比例の関係があるように見ることが出来る。しかし、東西南北の方位とベストフォーカスに相関は無いと考えられる。ベストフォーカスが単純に高度にのみ依存していることが分かる。一次直線  $y = c(1 - x)$  でフィッティングした結果を表 6.2 に記す。

c	
R バンド	$0.383 \pm 0.025$

表 6.2: ベストフォーカスと望遠鏡の指向方向の相関。

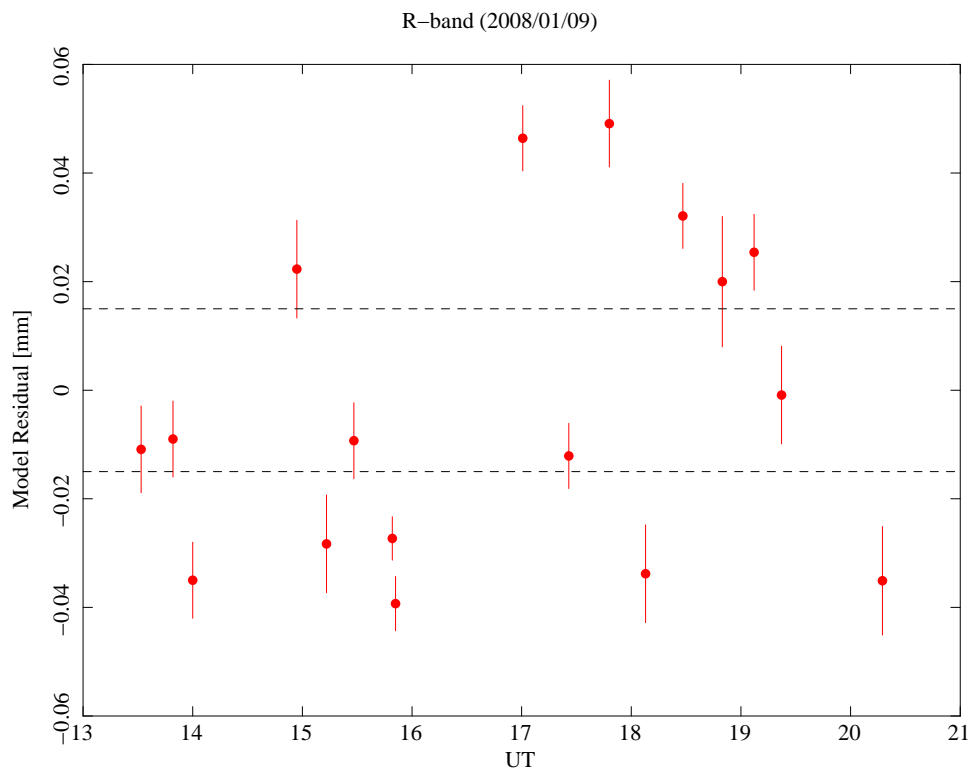


図 6.10: 実際のベストフォーカスとモデルとの残差。並行の点線で囲まれた領域は、ベストフォーカスの許容範囲。

## 6.5 モデルの実用性

作成したモデルが実用可能か否かを確認する。

モデルのフォーカス値は、望遠鏡の鏡筒温度から得られたフォーカス値に、高度依存分のオフセットが加わる形で与えら、それは以下の式になる。

$$Foc = a \cdot TEL - TMP + b + c \cdot 1 - \cos(ZD) \quad (6.4)$$

ここで、 $Foc$  はモデルのフォーカス値である。

確認方法の1つ目として、1晩の間に任意の天域を無作為に観測し、そこでのベストフォーカスを求め、モデルフォーカスとの残差を調べる。観測日は2008年1月9日である。観測時刻は13:32~20:17 UT (22:32 ~ 5:17 JST)、温度変化は2.5 Kであり、天頂から天頂距離45°までで測定を行った。その結果を図6.10に記す。データの残差は許容範囲の $\pm 15\mu\text{m}$ を以上で分布しており、その範囲はモデルから $\pm 30\mu\text{m}$ 程度である。

次に、スケジューラによる自動観測から得られた画像を図6.11に載せる。観測日は2008年1月31日である。観測時刻は9:37~19:58 UT (18:37 ~ 4:58 JST)、温度変化は4.7 Kであり、スケジューラは天頂から天頂距離46°までの領域を観測した。得られた画像に写る

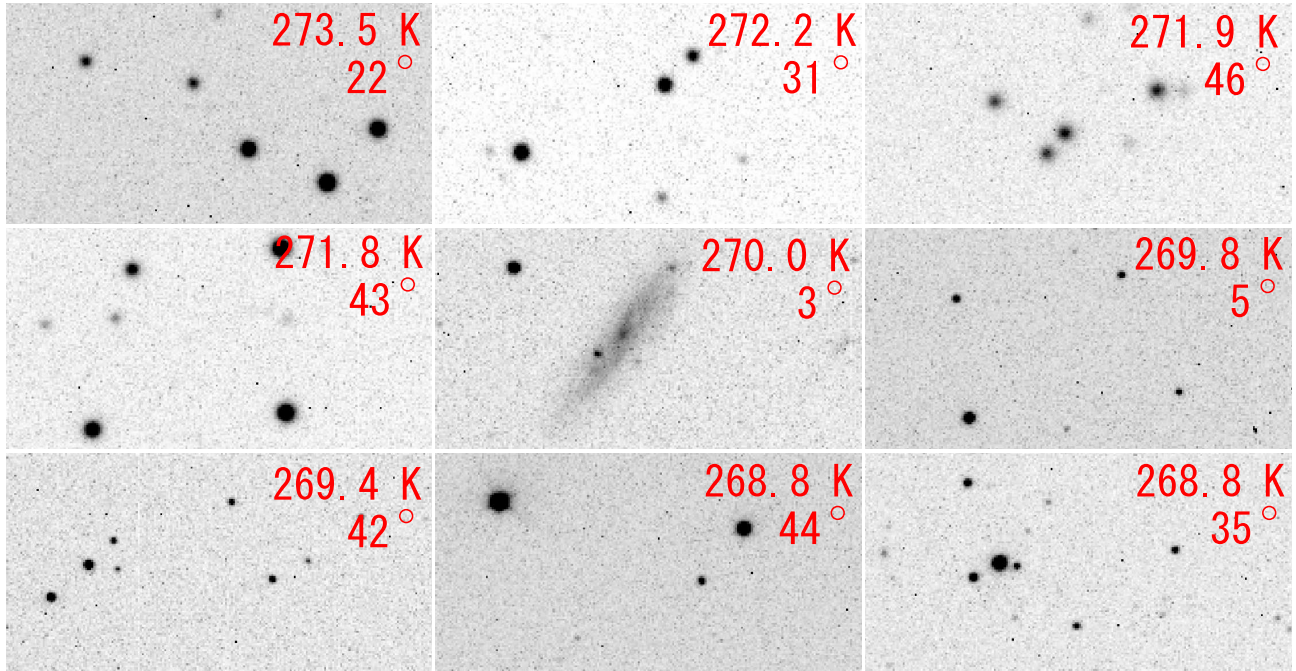


図 6.11: スケジューラによる自動観測から得られた画像。画像はそれぞれほぼ視野の中心をとり、星の多い箇所を示している。画像には、撮像時の望遠鏡の温度(上段)と天頂距離(下段)を赤字で記している。どの画像もフォーカス調整がよく行えている。

恒星の星像がきれいであり、フォーカス調整がよく行われていることがわかる。

## 6.6 まとめ

岡山の望遠鏡と同じパラメータを使用したベストフォーカスモデルを作成することに成功した。今回のモデルで運用を行った場合、観測したデータはベストフォーカスより PSF FWHM が  $\pm 30\mu\text{m}$  ほど大きくなってしまふことが予想される。しかし、図 6.4 から分かるとおり、フォーカス値の  $\pm 50\mu\text{m}$  以下の変化では、PSF FWHM はベストフォーカスとほとんど変わらない。また、図 6.11 を見て分かるように、取得した画像はどの画像も恒星がきれいに円形になっている。以上より、このモデルが実用可能であると結論付ける。フォーカス調整を自動化することにより、GRB 観測や通常観測で取得するデータの質を大幅に向上することが可能になる。

ベストフォーカスの温度依存から求めた変化率は鉄の膨張係数とちょうど一致しているため、このモデルは一年を通して有効であると考えられるが、季節ごとに取得する画像を注視する必要がある。



## 第7章 GRB 残光観測

我々の開発した MITSuME 明野望遠鏡の自動観測・解析システムが本格的に稼働し始めたのは2006年9月である。それからの1年4ヶ月間におけるシステム運用の総括として、この章ではシステム運用開始からのGRB残光観測の結果を記す。また、我々が検出に成功したGRBの残光については、その観測状況や解析結果についても記す。限界等級を見積もることに成功したGRBについては、観測から得られた画像と光度曲線を付録Aに載せる。

### 7.1 GRB 残光の観測結果

2006年9月から2008年1月までのGRB残光観測結果を表7.1に載せる。検出に成功したGRB残光は6例(うち1例は検出したか確実ではない)、超新星成分を検出したGRBが1例、限界を見積もることに成功したGRBは16例、計23例のGRB観測を行った。このうち、高赤方偏移と考えられるイベントはGRB060923A (GCN5597), GRB070520 (GCN6441), GRB071021 の3例である。付録の光度曲線にあるように、これらのイベントは発生初期からの可視光( $g$ , R, Iバンド)観測では未検出であるにもかかわらず、赤外線(J, H, Kバンド)ではGRB残光の検出が報告されている。これらのイベントのうち、GRB070520, GRB071021 の2例ではすばる望遠鏡によるToO観測が行われた(GCN6441, GCN6976)。

### 7.2 GRB061121

GRB061121は、2006年11月21日15:22:29 UTにSwift衛星のBATによって検出されたイベントである。座標は赤経、赤緯( $\alpha, \delta$ )=(09:48:54.58, -13:11:42.7)であった(GCN5823)。発生直後にX線で $1.84 \times 10^{-8}$  erg/cm<sup>2</sup>/s(GCN5823)、地上光学観測(no filter)で14.9等(GCN5824)とX線、可視光ともあかるい残光が観測された。我々はGRB発生132分後

イベント	衛星トリガー 時刻 (UT)	トリガー からの時間	等級		
			$g'$	R	I
GRB061121	15:22:29	2 時間 14 分後	$19.89 \pm 0.12$	$19.16 \pm 0.13$	$18.78 \pm 0.15$
GRB070920A	4:00:13	14 時間 48 分後	$> 19.1$	$> 19.3$	$18.0 \pm 0.3$
GRB071020	7:02:26	9 時間 18 分後	$> 21.1$	$21.2 \pm 0.3$	$19.8 \pm 0.3$
GRB071112C	18:32:57	1 分後	$17.3 \pm 0.4$	$17.3 \pm 0.3$	検出
GRB071118	8:57:17	7 分後	検出	検出	検出
XRF080109 <sup>1</sup> /SN2008D	13:32:48	2 日後	検出	検出	検出
GRB080205	7:55:51	1 時間 20 分後	$> 20.9$	$> 20.9$	$19.6 \pm 0.3$

イベント	衛星トリガー 時刻 (UT)	トリガー からの時間	限界等級 ( $3\sigma$ )		
			$g'$	R	I
GRB060923A	5:12:15	4 時間 58 分後	18.7	18.8	18.3
GRB061019	4:19:06	9 時間 24 分後	-	19.5	18.7
GRB061222A	3:28:52	5 時間 20 分後	20.6	20.4	19.6
GRB061222B	4:11:02	8 時間 41 分後	19.4	19.7	18.3
GRB070129	23:35:10	10 時間 9 分後	19.4	19.0	18.4
GRB070208	9:10:34	2 時間 50 分後	19.1	19.2	18.2
GRB070406	0:50:40	39 時間 21 分後	20.2	20.6	19.6
GRB070412	1:27:03	11 時間 41 分後	20.4	20.2	19.2
GRB070520	13:05:10	10 分後	21.1	21.2	20.3
GRB070612B	6:21:17	5 時間 25 分後	17.4	18.6	18.6
GRB070616	16:29:33	22 分後	17.8	19.1	18.6
GRB070917	7:33:56	2 時間 13 分後	-	-	17.8
GRB071003	7:40:55	7 時間 31 分後	16.4	16.4	16.9
GRB070921	9:41:33	1 時間 32 分後	20.0	19.7	19.1
GRB071025	4:08:54	5 時間 20 分後	18.5	18.0	17.7
GRB071028	17:41:01	13 分後	19.1	19.4	18.8

表 7.1: MITSuME 明野望遠鏡の GRB 残光観測結果。上段:GRB 残光の検出に成功したイベント。GRB070920A は、我々が検出した天体が可視光残光かどうか確定していないが、ここでは検出したとして数える。下段:GRB の残光の限界等級を見積もることに成功したイベント。これらのイベントの残光は検出されていない。

から観測を開始した。その時の観測で得られたデータを全て重ね合わせた画像が図 7.1 である。緑丸内に、DSS(Desital sky servay, カタログ画像)には無い天体が 3 バンドで検出されている。この観測結果については 7 章で改めて述べる。

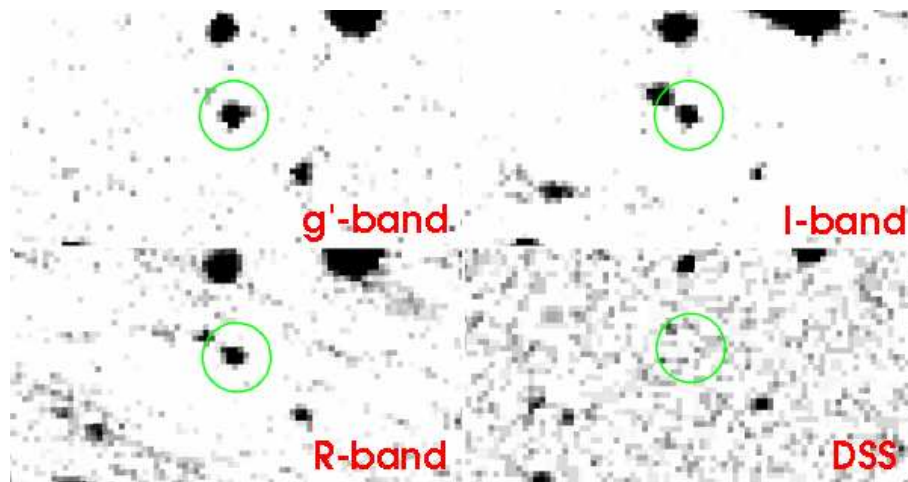


図 7.1: GRB061121 の画像。取得した  $115 \times 60s$  の画像を重ね合わせている。緑丸が可視光残光の対応天体。

### 7.3 GRB070920A

GRB070920A は、2007 年 9 月 20 日 4:00:13 UT に Swift 衛星の BAT によって検出されたイベントである。座標は赤経、赤緯  $(\alpha, \delta) = (06:43:52.32, 72:15:00.00)$  であり (GCN6805)、誤差円は 2.1 分角であった (GCN6807)。この時期、Swift 衛星の故障のため XRT, UVOT の自動追尾観測は行われていない。そのため、このイベントに対して Swift の ToO 観測が実施されたが、残光は検出されなかった。地上光学観測では、TAROT 望遠鏡のみが発生 544 秒後から観測を行ったが、残光の検出はできず R バンドで限界等級 18.2mag を報告している (GCN6806)。

我々は、夜明け前の GRB 発生 14 時間 48 分後からデータを取得することができた。その時のデータを全て重ねた画像が図 7.2 の左の画像である。この画像の I バンドの緑丸の中にのみ、DSS にない天体が写っている。この天体の等級は  $I = 18.0 \pm 0.3$  であり、S/N は 6 であった。

そこで我々はこの天体が減光していることを確かめるため、翌 21 日に再び同じ領域を観測した。図 7.2 の右図は 20 日と 21 日の画像の比較である。翌 21 日の I バンドの限界等級は 19.4mag であるが、20 日に見られる天体は無い。つまりこの天体が GRB の残光であ

り、21日には減光したために我々が検出できなかったという可能性が考えられる。このGRBの光度曲線を図7.3に記す。

しかし、20日に取得した画像の質が悪く、また我々以外にこのGRBの残光を検出したという報告が無いため、この天体が実際にGRB残光であったかは確定していない。

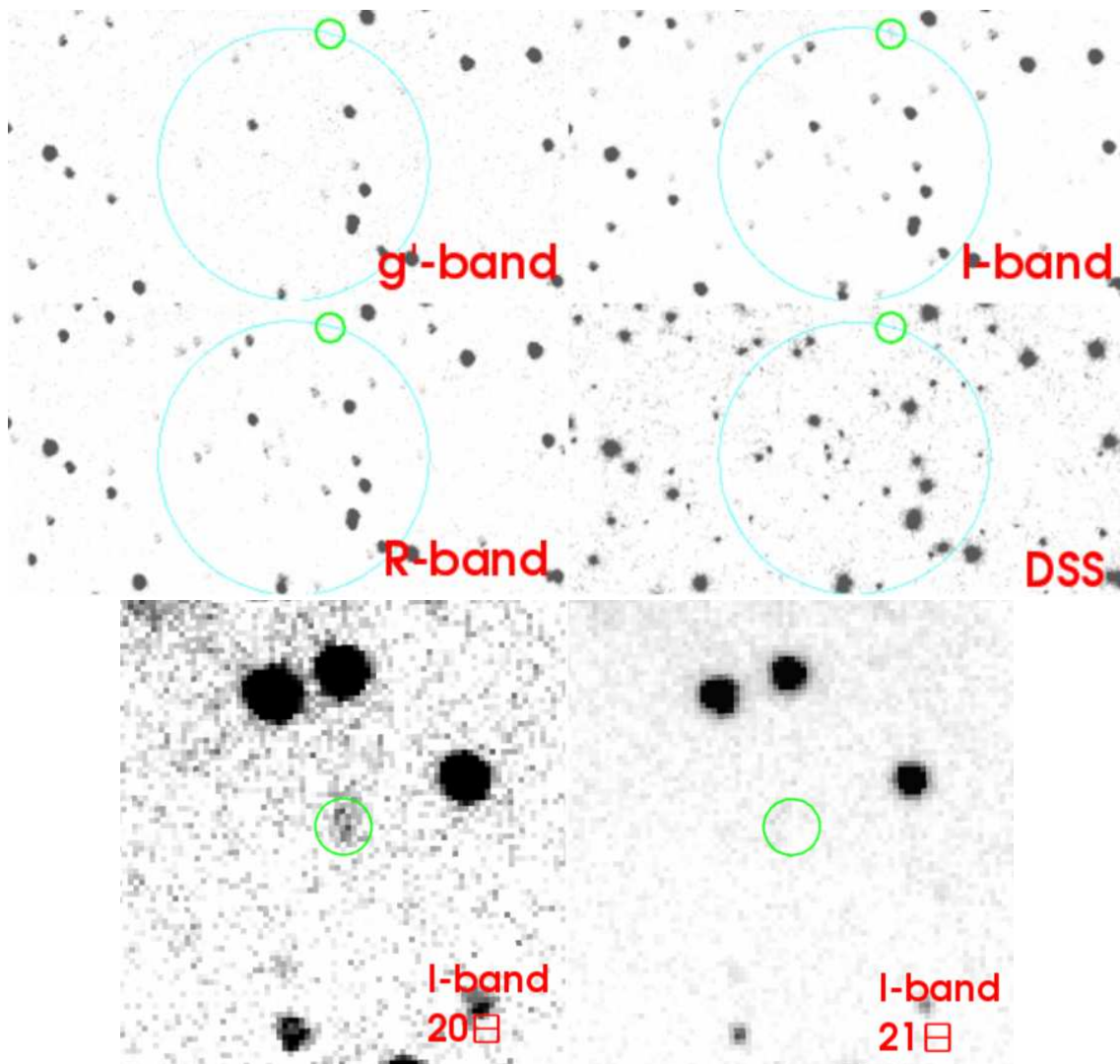


図 7.2: GRB070920A の画像。緑丸が対応天体の座標。水色丸はBAT の誤差円。上: 2006年9月20日の観測で我々が取得した  $g'$ , R, I の画像と DSS の比較。積分時間は  $31 \times 60s$ 。下: 2006年9月20日に取得した I バンドの画像と 2006年9月21日に取得した I バンドの画像 ( $43 \times 60s$ ) の比較。

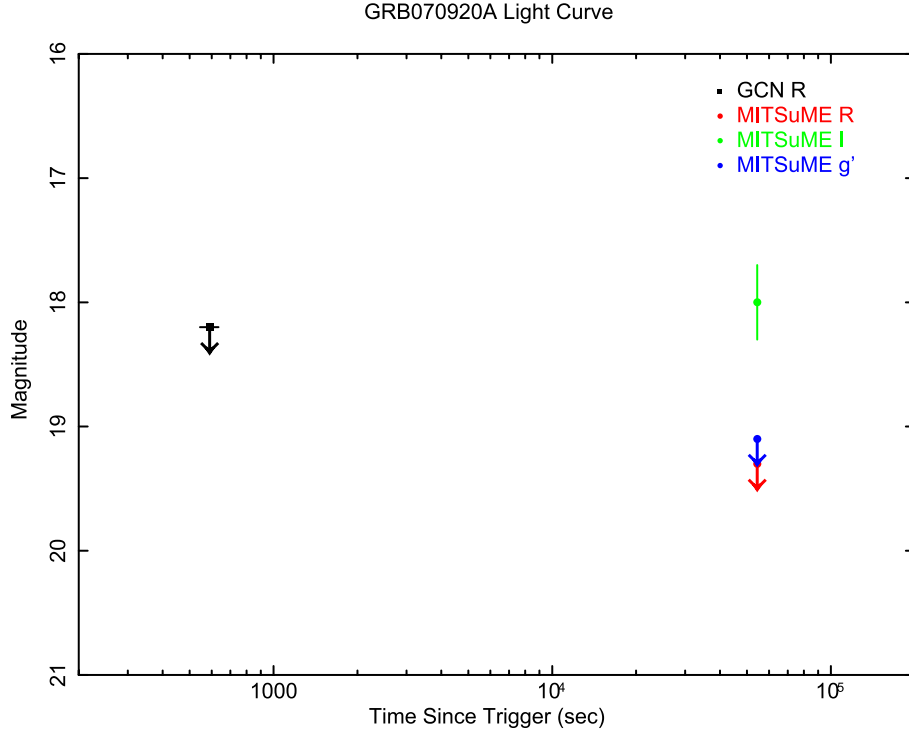


図 7.3: GRB070920A の光度曲線。TAROT の R バンドの観測結果 (GCN6806) と我々の観測結果をプロットしている。

## 7.4 GRB071020

GRB071020 は、2007 年 10 月 20 日 07:02:26 UT に Swift 衛星の BAT によって検出されたイベントであり (GCN6949)、座標は赤経、赤緯  $(\alpha, \delta) = (07:58:39.78, 32:51:40.40)$  である (GCN6948)。ROTSE 望遠鏡による発生初期に 13.6mag(no filter) という明るい残光が検出され (GCN6948)、VLT 望遠鏡の分光観測から赤方偏移  $z = 2.145$  という結果が報告されている (GCN6952)。

Swift 衛星からのアラートが来たときは日本ではまだ昼間であったため、日没後、GRB が観測可能高度に達した 16:21:13 UT から観測を行った。この観測で取得した画像が図 7.4 である。R、I バンドの緑丸内に GRB 残光が写っている。g' バンドでもそれらしい天体が写っているように見えるが、S/N が低すぎるため測光に耐えられないと判断した。

図 7.5 は、我々の観測 (GCN7026) と GCN に報告されている観測結果をプロットした光度曲線である。我々と同時刻に Xinglong 望遠鏡でも R バンドの観測が行われており、その結果は我々と一致している (GCN6956)。この光度曲線から、R バンドの残光は我々の

観測後に減光をやめ、光度変化が平坦もしくは増光していることが分かる。

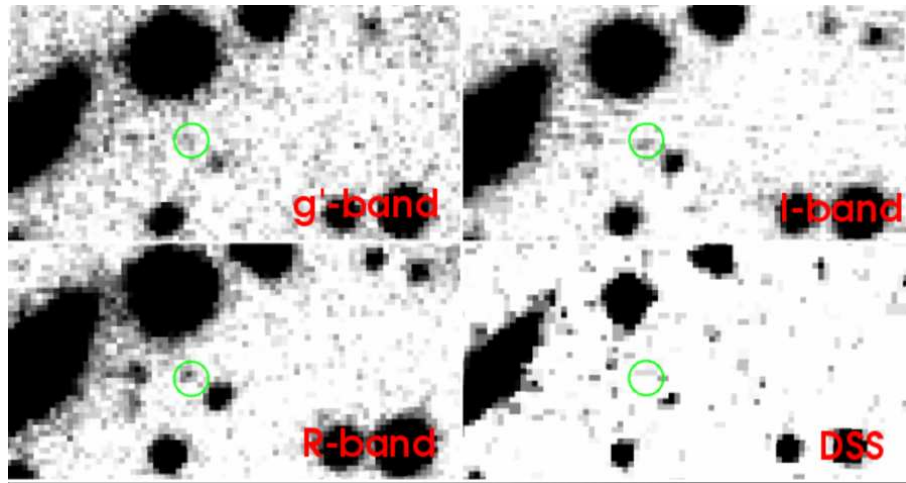


図 7.4: GRB071020 の画像。緑丸が GRB 残光の位置。

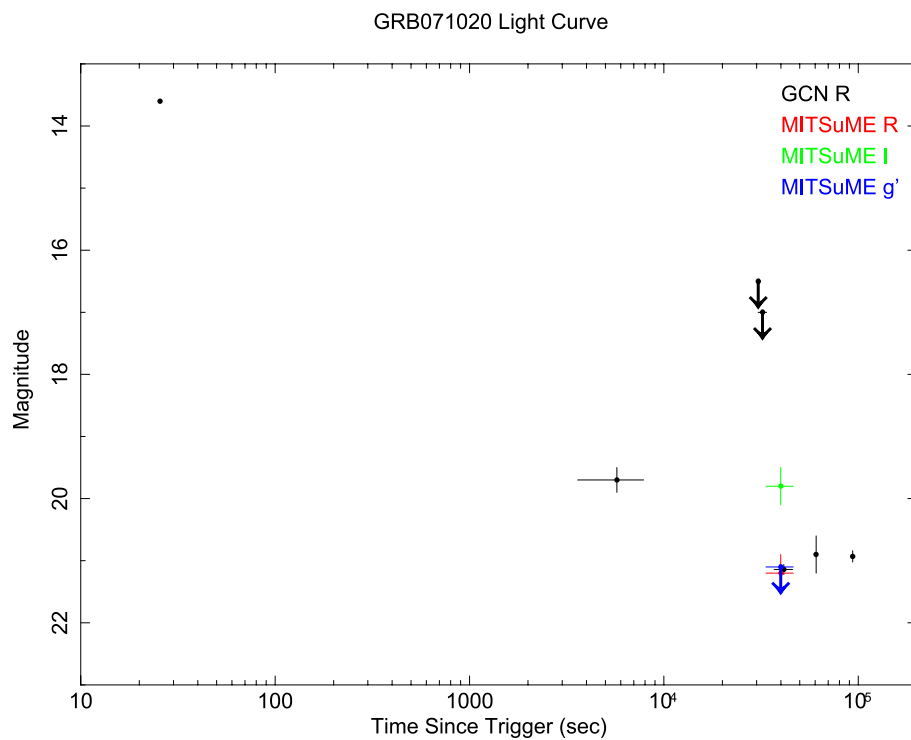


図 7.5: GRB071020 の光度曲線。我々の結果 (GCN7026) と GCN に投稿された R バンドのデータをプロットしている (GCN6948, GCN6952, GCN6956, GCN6970, GCN6979, GCN6981, GCN7006)。

## 7.5 GRB071112C

GRB071112Cは、2007年11月12日 18:32:57 UTにSwift衛星のBATによって検出されたイベントであり、UVOTの観測から座標は赤経、赤緯 $(\alpha, \delta)=(2:36:50.93\ 28:22:16.68)$ と報告された(GCN7059)。UVOTの観測から、発生初期に17.4mag(no filter)という報告がある(GCN7059)。このGRBは多くの検出器で赤外線、可視光、紫外線、X線、 $\gamma$ 線の多波長観測がなされた。また、VLT望遠鏡の分光観測から赤方偏移が $z = 0.823$ と見積もられた(GCN7076)。

我々は発生102秒後の18:34:39 UTから観測を開始し、 $1 \times 60s$ の画像を取得した。その画像が図7.6であり、3バンドとも検出に成功した<sup>2</sup>。我々の観測は地上観測機器としては世界で2番目の早さであり、フィルターを取り付けた多色での観測としては世界最速である。

我々と岡山の観測結果(GCN7087, GCN7091)、およびGCNに報告されているRバンドの結果をプロットしたグラフが図7.7の上図である。我々の観測から、このGRBの可視光残光は発生初期には減光をせず、発生500秒後から減光を始めたことを明らかにした。なお、可視光残光に見られる光度変化が平坦な段階は、図7.7下図に記したX線残光の光度曲線では見られず(GCN Report, 104.2)、可視光残光にのみにある構造である。

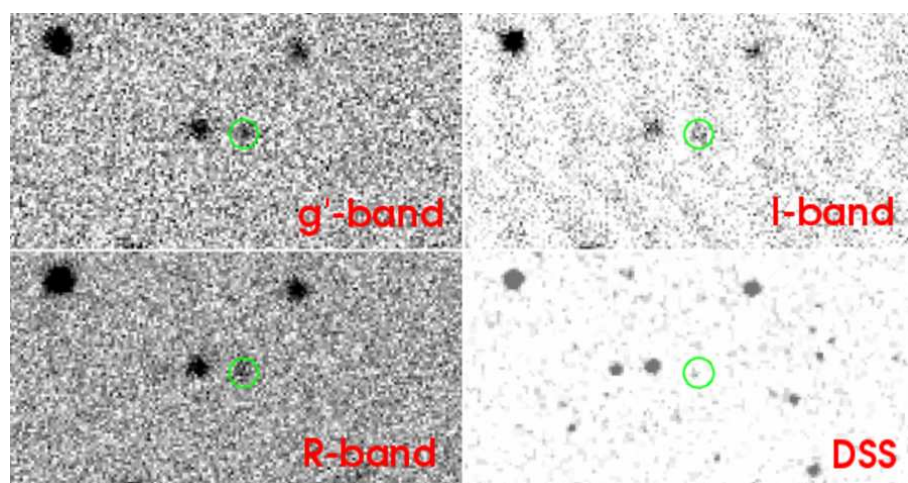


図 7.6: GRB071112C の画像。緑丸が残光の位置。

<sup>2</sup>この観測時、Iバンドはカメラが壊れていたため、測光は行っていない

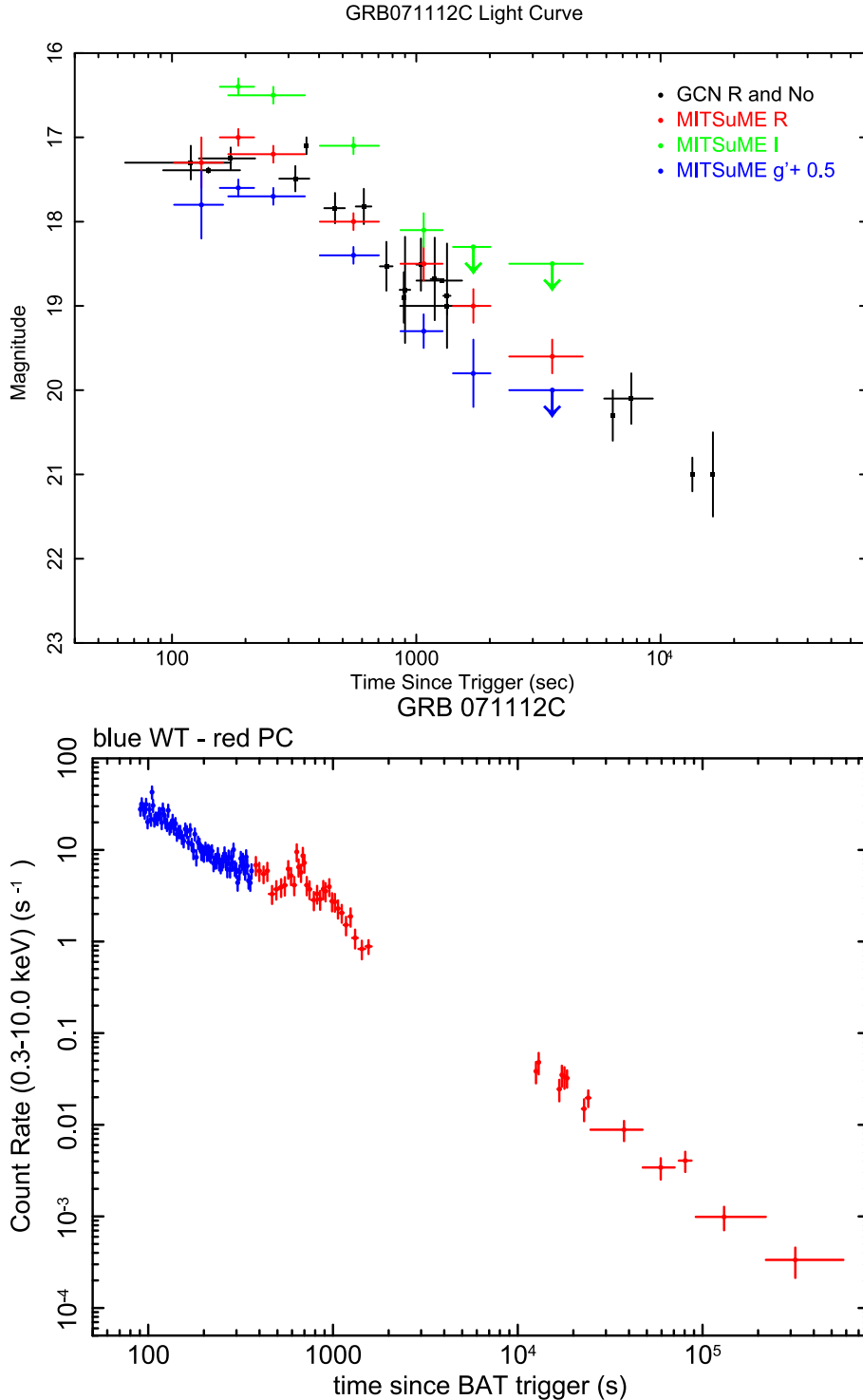


図 7.7: GRB071112C の光度曲線。上:可視光残光の光度曲線。MITSuME のデータは最初の1点が明野のデータ (GCN7087)、以降は岡山のデータである (GCN7091)。また、GCN に報告されている Rバンドのデータをプロットしている (GCN7061, GCN7065, GCN7067, GCN7078, GCN7080, GCN7083, GCN7089, GCN7090)。下:Swift の XRT による X 線残光の光度曲線 (GCN Report, 104.2)。赤と青は XRT の観測モードの違いである。



## 7.6 GRB071118

GRB071118 は、2007 年 11 月 18 日 8:57:17 UT に Swift 衛星の BAT によって検出されたイベントである (GCN7106)。XRT の位置情報のすぐ近くに明るい恒星があったが、UVOT の観測から対応天体の減光が確認された。座標は赤経、赤緯  $(\alpha, \delta) = (19:58:51.80, 70:07:29.20)$  である (GCN7116)。

我々は、雨がやんだ後、発生 440 秒後の 9:04:37 から観測を開始した。我々の画像では、シーイングが悪いため GRB と両隣の恒星を分解できなかった。しかし R バンドと I バンドにおいて、発生後 509 秒後～2515 秒後までのデータ 30 枚を重ねた画像 (Epoch 1) で GRB と同じ座標にある天体が、発生後 10400 秒後～13000 秒後までのデータ 41 枚を重ねた画像 (Epoch 2) では減光していることを確認した。この天体が GRB であることは間違い無いと考えられる。観測で取得した画像を図 7.8 に載せる。

岡山の観測結果 (GCN7119)、我々の Epoch 1 と Epoch 2 における画像の限界等級、および GCN に報告されている R バンドの結果をまとめた光度曲線を図 7.9 に記す。岡山の測光結果と我々の限界等級の結果を比較からも、我々の GRB の検出が確かであることがわかる。

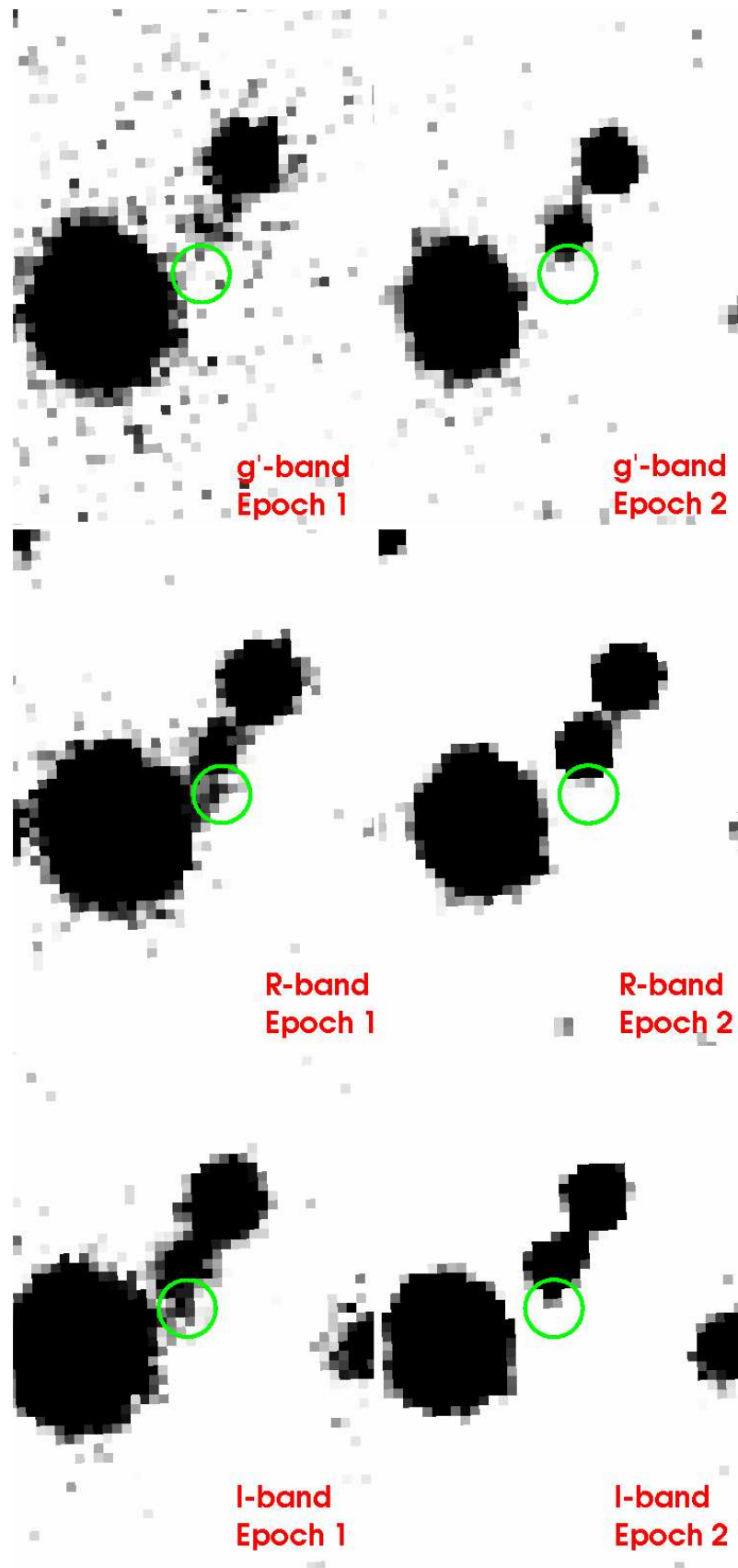


図 7.8: GRB071118 の画像。上:g'バンドの画像。中:Rバンドの画像。下:Iバンドの画像。緑丸は GRB の座標である。RバンドとIバンドの画像では、Epoch 1(30×60s)で緑丸内に写っている GRB が Epoch 2(41×60s)では減光している。

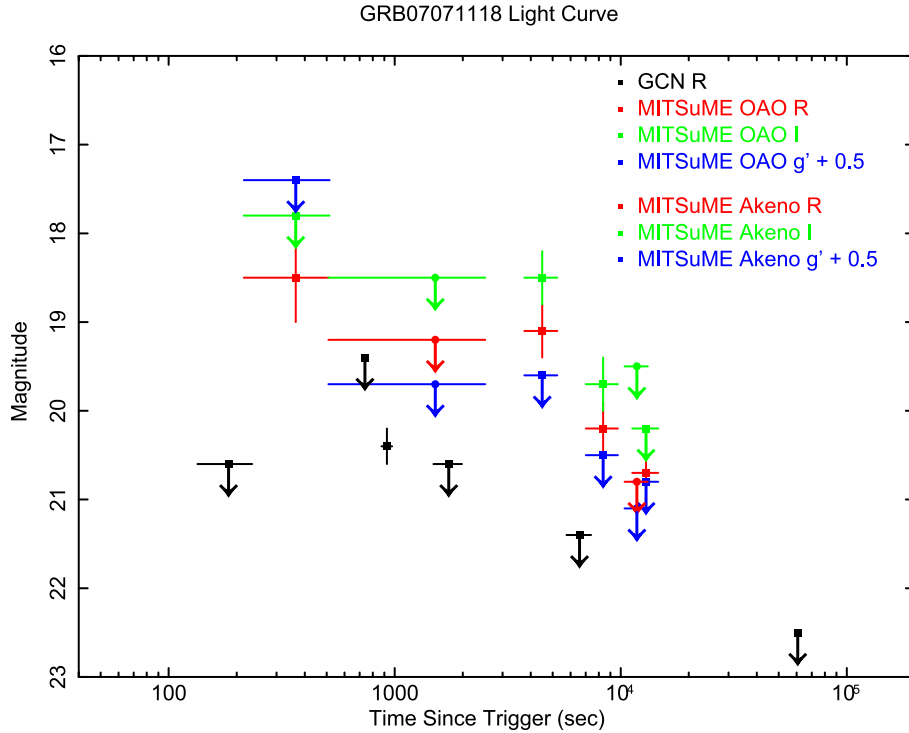


図 7.9: GRB071118 の光度曲線。●点が明野の結果、■点が岡山の結果である (GCN7119)。黒色は GCN に報告されている R バンドのデータである (GCN7116, GCN7120)。

## 7.7 XRF080109/SN2008D

XRF080109 は、2008 年 1 月 9 日 13:32:49 UT に Swift 衛星によって検出されたイベントである (GCN Report 110.1)。Swift 衛星は NGC2770 に発生した SN2007uy を観測中に、偶然この XRF を検出した。GCN で初めて報告された座標は TNG 望遠鏡による可視光観測から得られたもので、赤経、赤緯 ( $\alpha, \delta$ )=(9:09:30.65, 33:08:20.3) であった (GCN 7162)。NGC2770 までの距離は 27Mpc であり、この XRF は今まで観測された GRB の中で最も近傍で発生した GRB である。Swift の観測直後から、XRF と同じ位置に Ic 型 (GCN7171, GCN7173, GCN7184, GCN7188, GCN7189, GCN7212) の超新星 SN2008D が観測された。この SN2008D は XRF に付随したものであると考えられている。

我々は、XRF080109 の発生 2 日後の 1 月 11 日の 13:38:50 UT から観測を行い、3 バンドとも検出することに成功した。その際に取得したデータ (10×60s) を図 7.10 に載せる。通常、超新星は数ヵ月程度輝きつづけるので、我々は 1 月 11 日以降この SN2008D を定期的にモニターしている。

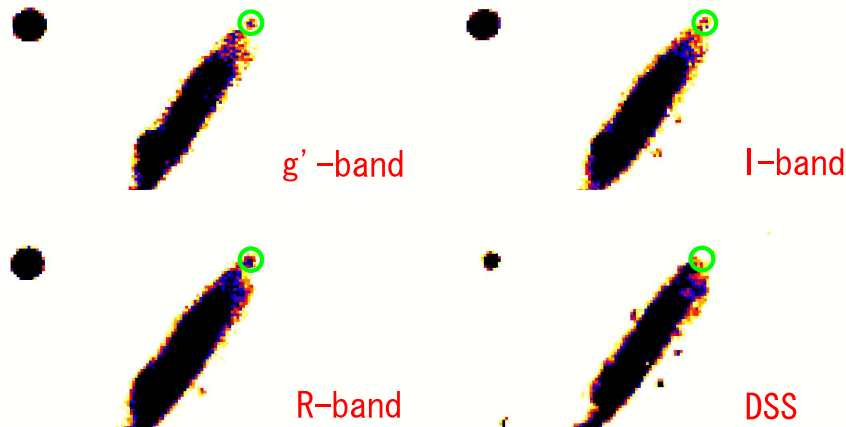


図 7.10: SN2008D の画像。緑丸が SN2008D の位置。

## 7.8 GRB080205

GRB080205 は、2008 年 2 月 5 日 7:55:21 UT に Swift 衛星の BAT によって検出されたイベントである (GCN7250)。KAIT 望遠鏡の観測から、座標は赤経、赤緯  $(\alpha, \delta) = (6:33:00.64, 62:47:32.0)$  であった (GCN7251)。発生初期に、UVOT の white、v バンドで検出されたにもかかわらず b、u、uv バンドで検出されなかったことから、赤方偏移は  $z \sim 4.0$  と推測されている (GCN 7253)。

GRB080205 が発生した時刻は日本では夕方であったため、我々は発生 1 時間 20 分後から観測を開始し、I バンドで GRB080205 を検出することに成功した。観測で取得したデータのうち、9:16~10:48 UT (Epoch 1) の間のデータ  $80 \times 60s$  を重ねた画像と、10:49~12:21 UT (Epoch 2) の間の  $80 \times 60s$  を重ねた画像を図 7.11 に載せる。この画像の I バンドにおいて、Epoch1 で検出されている GRB が Epoch 2 では減光していることが確認できる。測光の結果、 $I = 19.6 \pm 0.3$  であった。また、R バンドにも GRB と思われる天体を検出している。なお、この GRB に関してはまだ解析途中であり、この論文で記した解析結果は変更される可能性がある。

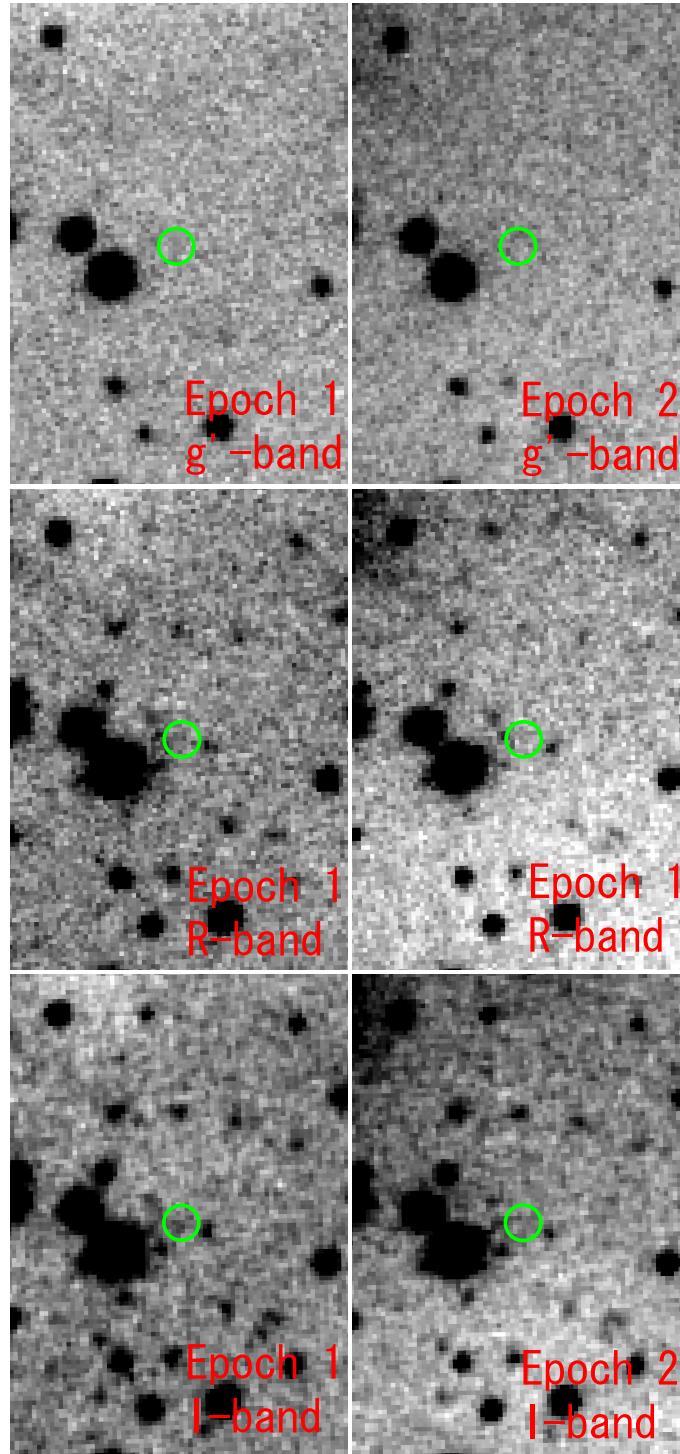


図 7.11: GRB080205 の画像。上: $g'$ バンドの画像。中: $R$ バンドの画像。下: $I$ バンドの画像。緑丸は GRB の座標である。 $I$ バンドの画像では、Epoch 1( $80 \times 60s$ )で緑丸内に写っている GRB が Epoch 2( $80 \times 60s$ )では減光している。 $R$ バンドでもわずかに GRB を検出している可能性がある。 $g'$ バンドではまったく検出出来ていない。

# 第8章 GRB061121

MITSuME 明野望遠鏡が検出に成功した GRB061121 についての解析結果をまとめる。まず、GRB061121 および測光に使用した標準星の観測状況を記す。次にこれらを測光するための解析手順の詳細をまとめる。そして、解析したデータと Swift 衛星のデータの比較から分かった、 $\sim 70000$  秒におけるジェットブレイクの可能性と SED の時間変化についてを記す。

## 8.1 GRB061121 について

Swift により検出された GRB061121 はプリカーサでトリガーがかかったため、プロンプト放射を BAT、XRT、UVOT、また地上の ROTSE で観測することに成功した (GCN5823, GCN5824)。このようにプロンプト放射を多波長で観測することに成功した例は、Swift 時代ではこの GRB を含め 3 例しかない。また、この GRB061121 は Swift チームから “burst of interest” に指定されたこともあり (GCN5839)、MITSuME 望遠鏡を始め多くの検出器によるブロードバンドな観測がなされた。図 8.1 に BAT がとらえた GRB061121 の光度

Trigger Time	2006/11/21 15:22:29 UT	(GCN5823)
Coordinate	R.A. = 09:48:54.58 , DEC. = -13:11:42.7	(GCN5823)
Initial Flux	$1.8 \times 10^{-8} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$	(GCN5823)
$z$	1.314	(GCN5826)
$E_{peak}$	460keV	(GCN5838)
$E_{iso}$	$2.8 \times 10^{53} \text{ erg}$	(Page et al. 2007)

表 8.1: GRB061121 の基本データ。

曲線を記す。また表 8.1 に GRB061121 の基本データを記す。

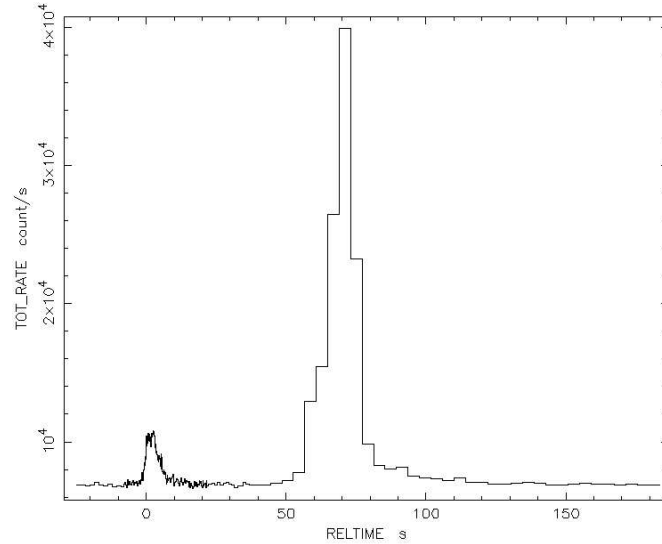


図 8.1: GRB061121 の BAT の光度曲線 (GCN5823)。Swift は GRB061121 のプリカーサでトリガーをかけた。

## 8.2 GRB061121 と標準星の観測

最初に、2006/11/21(UT)に発生した GRB061121 の観測状況についてまとめる。GRB061121 を正確に測光するためには、R、I バンドでは Landolt カタログに記載されている標準星のデータが、*g* バンドでは SDSS カタログの標準星のデータが、それぞれ必要になる (柳澤氏、MITSuME 標準星カタログ)。この標準星の観測は 2007/02/15(UT) に行った。この観測の詳細についても記す。

### 8.2.1 GRB061121 の観測

Swift 衛星からもたらされた、GRB061121 のアラートの時刻は 15:22:29(UT) であった。このとき明野の上空では、GRB061121 はまだ地平線ギリギリの高度であった。我々は、アラート 134 分後の 17:36:34(UT) から観測を開始し、日の出前の 20:38:39(UT) まで観測を行った。当日は快晴であった。この観測から  $115 \times 60$ s 枚の画像が得られた。

得られたデータのスカイレベルの変化を図 8.2 に記す。観測中のスカイレベルは安定しており、測光に適した空であったことがわかる。なお、観測の始めでは低空の観測のため夜光や薄曇りが影響し、スカイレベルが若干高くなっている。また、日の出前の薄明のため、観測終盤もスカイレベルが高くなっている。

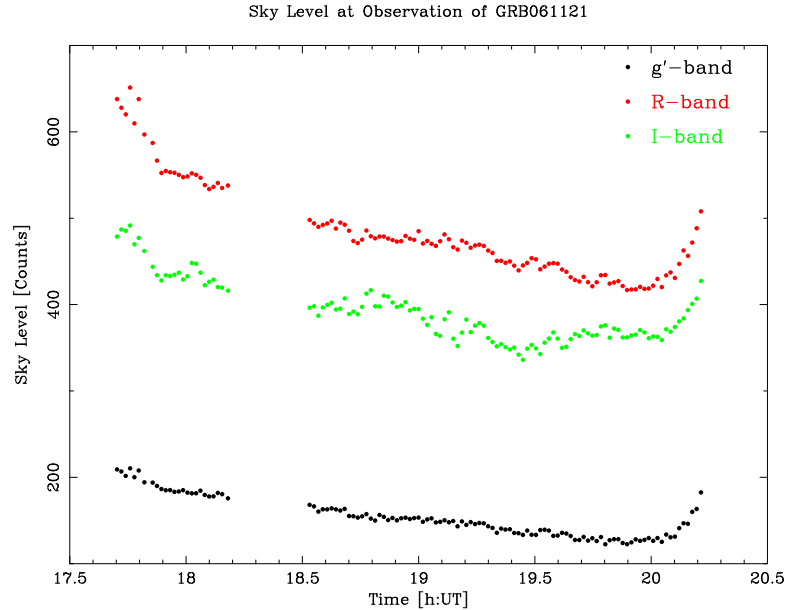


図 8.2: GRB061121 観測時のスカイレベルの時間変化。データは、スカイレベルの高い順に R バンド、I バンド、 $g'$  バンドである。観測初期は薄曇りと夜光のため、観測終盤は薄明のため、それぞれスカイレベルが若干高くなっているが、観測中はスカイレベルが安定している。

## 8.2.2 標準星と GRB061121 領域の同時観測

GRB061121 の領域には Landolt カタログなどに記載されている標準星がない。そのため、GRB061121 を測光するためには、標準星と GRB061121 の発生した領域とを同時に観測し、標準星の解析結果をもとに GRB061121 を測光する必要がある (詳しい解析手順は後述)。

そのための標準星の観測は、GRB061121 を観測してから 85 日後の 2007/02/15(UT) に行った。標準星の観測スケジュールを表 7.2 に記す。当日の天候は快晴であり、図 8.3 に記したグラフからスカイレベルが安定していることが分かる。この日の観測では、大気吸収の量を求めるために様々な高度の標準星を撮像したので、スカイレベルの変化は主に夜光に由来するものである。当日の天候は標準星観測に適した状況であったといえる。

標準星の観測は、観測中に大気の状態が変わってしまわぬよう短時間 (1~2 時間) に行う必要がある。今回の標準星の観測は、14:23:40 から 15:10:34(UT) までの 1 時間 46 分間の短時間に、GRB061121 の発生した領域の観測を間に挟んで行った。観測時にはスカイレベルも安定しており、大気の状態に変化は無いと考えられる。



観測対象	開始時刻 (UT)	終了時刻 (UT)	積分時間
Dark Frame	13:06:42	13:12:21	30s x 10
G163	14:23:40	14:30:03	30s x 10
SA100	14:32:21	14:38:52	30s x 10
SA98	14:41:03	14:47:28	30s x 10
SA102	14:49:44	14:56:05	30s x 10
SA103	14:58:24	15:04:46	30s x 10
SA104W	15:15:48	15:22:16	30s x 10
GRB061121 の領域	15:24:28	15:37:18	30s x 19
SA103	16:04:13	16:10:34	30s x 10

表 8.2: 標準星の観測スケジュール。23:23:40~01:10:34 の間に標準星と GRB 領域の観測を行っている。

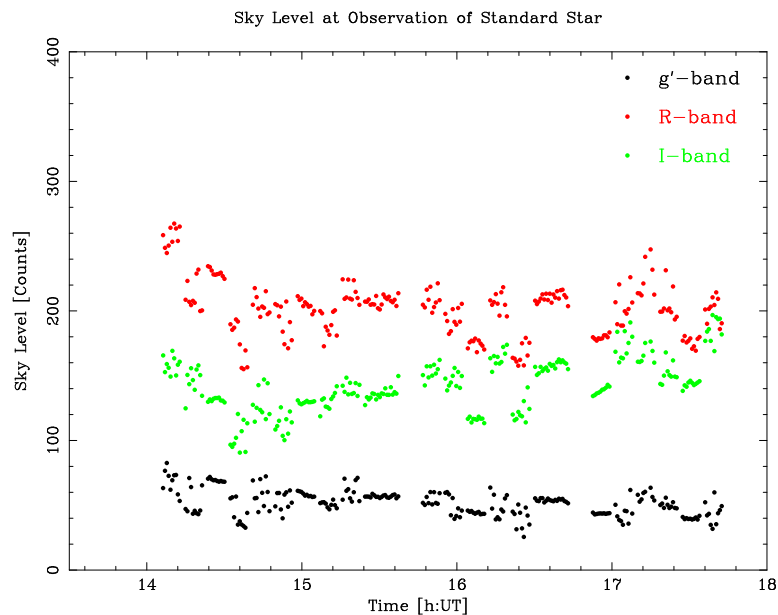


図 8.3: 標準星観測時のスカイレベルの変動。データは上から、Rバンド,Iバンド,g'バンドである。スカイレベルの変動は、低空観測時における夜光の影響であると考えられる。

## 8.3 解析

今回の解析では、GRB061121 の測光を次のような手順で行った。

1. 取得したデータをリダクションし、重ね合わせを行う
2. 標準星を測光することで、後述するゼロ点+大気吸収係数(色変換係数は夏に算出したもので固定)を求める
3. 得られたゼロ点+大気吸収係数を用いて、GRB061121 の領域にある参照星を測光する
4. 参照星との相対測光により、GRB061121 の等級を見積もる
5. GRB061121 の光度曲線を作成する

### 8.3.1 リダクションと重ね合わせ

GRB061121 と標準星の観測で得られたデータは、まずリダクションと重ね合わせを行う。手順は第 4.3 章に記したものと同一である。ただし欠陥ピクセルの補完は行っていない。

### 8.3.2 ゼロ点+大気吸収係数の算出

正確に星の等級を求めるためには、まず標準星を測光し、そこからシステム変換係数を求める必要がある。以下の関係式で表されるシステム変換係数から正確な星の等級が求められる。

$$G_{inst} = G_{cat} + k_g \cdot F(Z) + C_g \cdot (G_{cat} - R_{cat}) + z_g \quad (8.1)$$

$$R_{inst} = R_{cat} + k_r \cdot F(Z) + C_r \cdot (R_{cat} - I_{cat}) + z_r \quad (8.2)$$

$$I_{inst} = I_{cat} + k_i \cdot F(Z) + C_i \cdot (U_{cat} - I_{cat}) + z_i \quad (8.3)$$

ここで、 $G_{inst}$ 、 $R_{inst}$ 、 $I_{inst}$  は G、R、I バンドでの機械等級、 $G_{cat}$ 、 $R_{cat}$ 、 $I_{cat}$  はカタログに記載された等級である。F(Z) は天頂からの離角が Z の時の Airmass である。ここにかかる  $k$  はバンドごとの大気吸収係数で、星からの光が大気によりどれだけ散乱・吸収されてしまうかを表す量である。波長が短いものほど、この大気吸収係数  $k$  は大きい値にな

る。 $C$ はバンドごとの色依存係数で、設置した各バンドのフィルターが通すべき波長以外の光をどれだけ通してしまっているかを表すものである。この値はフィルターの質を表すもので、 $C$ の値が大きいほどフィルターが通すべき波長以外の光を通してしまっていることになる。 $z$ はバンドごとのゼロ点であり、カタログ等級と機械等級のオフセットである。

Band	大気吸収係数 $k$	ゼロ点 $z$	色変換係数 $C$
g'	$0.33 \pm 0.08(0.27)$	$20.98 \pm 0.12(20.82)$	0.05(固定)
R	$0.18 \pm 0.04(0.16)$	$21.30 \pm 0.06(20.63)$	0.02(固定)
I	$0.05 \pm 0.04(0.09)$	$20.19 \pm 0.06(19.68)$	0.013(固定)

表 8.3: 標準星解析から求めたゼロ点+大気吸収係数。括弧内に記した値は8月の標準星観測で求めたゼロ点+大気吸収係数の値である。今回得られた値と、8月に求めた値は一致している。

今回の解析では、得られた標準星のデータからゼロ点+大気吸収係数の2つを求め、色変換係数は我々が8月時に求めた値を使用する。その理由は、色変換係数はフィルターの精度に依存する量であるため、半年で精度が変化はしないと考えたからである。また、8月に求めたシステム変換係数は岡山で得られたシステム変換係数の値と一致したものであった。明野の望遠鏡は岡山と同じ仕様のカメラを用い、補正光学系もほぼ同じなので、システム変換係数は一致することが期待される。

ゼロ点+大気吸収係数は谷津修論(2007)に記されている解析手法に従い解析を行った。得られた解析結果を表8.3に記す。括弧内に記した値は8月時に求めたシステム変換係数である。今回得られたシステム変換係数と括弧内に記した8月時のシステム変換係数は一致している。

### 8.3.3 測光

今回、標準星を撮像すると同時に、GRB061121が発生した領域を撮像した。このような同時刻の観測では、標準星を観測して得られた上記のゼロ点+大気吸収係数は、GRB061121の領域を観測した場合でも同じ値であると考えられる。そこで、GRB061121が発生した付近の恒星に対してこの値を使用して測光する。そこで得られた結果を、GRB061121を測光する際の参照星の等級とする。

図 8.4 に参照星の画像を載せる。赤丸が GRB061121 の座標、緑丸が参照星である。参照星は、GRB061121 のすぐ近くの恒星 11 個を選んだ。恒星にふった数字は、表 8.4 での ID の括弧内に記した数字と対応する。

参照星の測光結果を表 8.4 に記す。等級の括弧内に記した値は USNOB1.0 および NOMAD のカタログ値である。USNO と NOMAD のエラーは 0.3 等級、場合によってはそれ以上大きく精度は低い。さらに  $g'$  は Smith et al. にある経験的な変換式を使用しているため、エラーはさらに大きくなる。そのようなことを考慮すると、今回の参照星の等級は USNOB1.0 と NOMAD のカタログ値と一致している。

ID	赤経	赤緯	$g'$ [mag]	R [mag]	I [mag]
07029678(1)	9:48:37	-13:07:54	14.60 ± 0.17(14.0)	14.03 ± 0.09(14.3)	13.88 ± 0.09(13.6)
07029120(2)	9:48:32	-13:08:06	14.95 ± 0.17(—)	14.23 ± 0.09(14.5)	13.98 ± 0.09(13.5)
07029484(3)	9:48:35	-13:08:50	15.09 ± 0.17(14.4)	14.22 ± 0.09(14.5)	13.94 ± 0.09(13.5)
07029540(4)	9:48:36	-13:10:14	13.70 ± 0.17(13.5)	12.52 ± 0.09(12.5)	12.05 ± 0.09(11.9)
07029697(5)	9:48:37	-13:13:18	12.84 ± 0.17(12.8)	12.18 ± 0.09(12.1)	11.88 ± 0.09(11.6)
07031262(6)	9:48:52	-13:11:12	16.29 ± 0.17(15.5)	14.95 ± 0.09(15.3)	14.54 ± 0.09(14.0)
07031721(7)	9:48:56	-13:13:26	16.27 ± 0.17(15.5)	15.39 ± 0.09(15.8)	15.17 ± 0.09(14.9)
07032629(8)	9:49:05	-13:13:21	15.28 ± 0.17(14.6)	14.47 ± 0.09(14.8)	14.24 ± 0.09(14.0)
07032509(9)	9:49:04	-13:12:40	16.27 ± 0.17(15.5)	15.23 ± 0.09(15.7)	14.97 ± 0.09(14.6)
07033053(10)	9:49:09	-13:11:56	17.05 ± 0.17(16.3)	15.19 ± 0.09(15.5)	14.43 ± 0.09(14.2)
07031877(11)	9:48:57	-13:07:26	12.60 ± 0.17(12.2)	12.08 ± 0.09(11.3)	11.84 ± 0.09(10.9)

表 8.4: 参照星の等級。ID は USNO-A2.0 のものを使用している。ID の隣にある括弧内の数字が、表 8.4 にふってある数字の恒星と対応する。等級の隣にある括弧内の数字はその星のカタログ等級である。I バンドでは USNO-B1.0、 $g'$  バンド、R バンドでは NOMAD を参照した。“—” はカタログの等級が無かったものである。

この参照星との相対測光により、GRB061121 の等級を求めた。求めた等級を表 8.5 に記す。括弧内に記した値は限界等級である。“—” と記してあるものは、検出限界を切っけてしまい測光できなかったものである。

次に、GRB061121 の測光結果にたいして、天の川銀河による吸収を補正する。GCN5833 より、天の川銀河による吸収は  $E_{B-V} = 0.04$  mag (Schlegel et al. 1998) と報告されてい

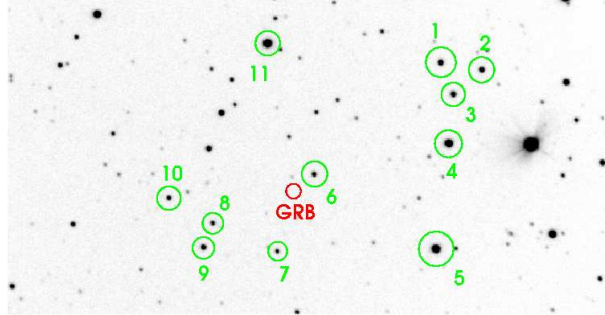


図 8.4: 参照星の画像。緑丸が参照星。赤丸が GRB61121 が発生した位置。

Time(トリガー後)[s]	$g'$ [mag]	R [mag]	I [mag]
$9064 \pm 1019$	$19.57 \pm 0.18$	$19.1 \pm 0.2$	$18.4 \pm 0.17$
$12005 \pm 642$	$20.0 \pm 0.2$	---	---
$13352.5 \pm 638.5$	$19.91 \pm 0.18$	$19.0 \pm 0.2$	$18.08 \pm 0.12$
$14698 \pm 639$	$19.8 \pm 0.2$	$19.1 \pm 0.2$	$18.60 \pm 0.16$
$16042.5 \pm 638$	$20.1 \pm 0.2$	$19.24 \pm 0.18$	$18.60 \pm 0.17$
$17085 \pm 337$	$19.88 \pm 0.19$	$19.2 \pm 0.2$	$18.9 \pm 0.3$
$12733.5 \pm 4688.5$	$19.89 \pm 0.12$	$19.16 \pm 0.13$	$18.78 \pm 0.15$

表 8.5: GRB061121 の等級。"—" となっている箇所は、検出限界で測光が出来なかったものである。

る。天の川銀河の吸収量を求めるには、表 8.6 にある  $A/E(B-V)$  に、 $E_{B-V} = 0.04$  mag をかけ算してやることにより求まる。例えば  $g'$  バンドの場合、 $A/E(B-V)=3.793$  であるので、吸収量は  $3.793 \times 0.04 = 0.152$  mag となる。同様の計算をし、R バンドの場合では 0.105 mag、I バンドでは 0.078 mag の補正を行った。

Filter	$\lambda_{eff}$ [Å]	$A/A(V)$	$A/E(B-V)$
$g'$ バンド	4925	1.151	3.793
R バンド	6602	0.807	2.634
I バンド	8046	0.601	1.962

表 8.6: 各バンドの吸収量 (Schlegel et al. 1998)。

### 8.3.4 光度曲線

まず、得られた GRB061121 の等級をエネルギーフラックスの単位に変換する。これまでの解析で求めた等級はベガ等級であるが、ベガ等級からエネルギーフラックスを求めることは困難である。これに対し、エネルギーフラックスとの変換を明確に定義している単位系が AB 等級である (Fukugita et al. 1996)。AB 等級の定義は次の式であたえられる。

$$AB_{\nu} = -2.5 \times \log f_{\nu}(\text{erg/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}) - 48.60 \quad (8.4)$$

ここで  $f_{\nu}$  は単位周波数あたりのフラックスである。そこで、エネルギーフラックスを求めるために、ベガ等級である MITSuME のデータを一度 AB 等級に変換し、次に AB 等級からエネルギーフラックスに変換するという方法を取る。ベガ等級から AB 等級への変換方法は Fukugita et al.(1996) に報告されており、それは測定したベガ等級に、表 8.7 に記した AB 等級でのベガの明るさを加えればよい。こうして、MITSuME データをベガ等級から AB 等級へ変換したうえで、エネルギーフラックスへと変換を行った。

	u'	$g'$	r'	i'	z'	U	B	V	$R_c$	$I_c$
AB	0.981	-0.093	0.166	0.397	0.572	0.719	-0.120	0.019	0.212	0.453

表 8.7: AB 等級で表した各バンドごとのベガの明るさ。

図 8.5 に、Page et al. (2007) にある光度曲線に MITSuME のデータをプロットした光度曲線を記す。この図には Swift 衛星の BAT、XRT、UVOT の White/V バンド、ROTSE を始めとする地上観測の R バンド、VLA の電波、といった多波長観測によって得られたデータが記してある。図 8.5 を見ると、MITSuME のデータもこの観測と一致していることがわかる。特に  $g_I$  は V バンドのデータよりも暗くなることが期待されるが、その通りの観測結果であることがわかる。

この Page et al. (2007) の光度曲線から分かる GRB061121 の特徴として、次のことがあげられる。(1) プリカーサでトリガーがかかったため、プロンプト放射を XRT、UVOT、地上観測機器の多波長での観測に成功。(2) X 線のデータのみ、300s 付近から台地のような構造が見られる。(3) 可視光の観測では台地構造は無く、すぐに減光が始まる。(4) X 線、V バンド、R バンドでの減光のべきが異なる。

## 8.4 議論

### 8.4.1 ジェットブレイクの可能性

X 線でのみ見られる台地の構造と、X 線 ( $\alpha_X = 1.32$ )・R バンド ( $\alpha_R = 0.84$ )・V バンド ( $\alpha = 0.66$ ) で減光のべきが異なるという GRB061121 の特徴は、今まで知られている GRB の理解とは異なる描像である。

しかし、 $\sim 70000$  秒後の R バンドの光度曲線は折れ曲がりがあり、折れ曲がり後のべきは  $\alpha_R = 1.5$  (Uemura et al. 2007) である。またこの  $\sim 70000$  秒以降の X 線のべきは ( $\alpha_X = 1.32$ ) よりも急であり、そのべきは  $\alpha_X = 1.5$  (Page et al. 2006) と、R バンドのべきと同じである。さらに、図 8.6 のように MITSuME・R バンドのデータ点を打つと、R バンドの減光のべきは Page et al. (2007) にある値  $\alpha_R = 0.86$  よりも緩やかになる。そして、その値は V バンドのべき ( $\alpha = 0.66$ ) に一致するように見える。

そこで、図 8.6 の緑線で記したように、GRB061121 の  $\sim 70000$  秒付近に異なる波長で同時に折れ曲がりがあったという可能性を考える。その場合、折れ曲がり前のべきが  $\alpha_1 = 0.66$ 、折れ曲がり後のべきが  $\alpha_2 = 1.5$  となり、今まで知られている GRB のジェットブレイクの描像に一致する。ジェットブレイクが  $\sim 70000$  秒であるとしたとき、 $E_{iso} = 2.8 \times 10^{53} \text{ erg}$ 、 $z=1.314$  から式 2.1 を使用すると、ジェットの開き角度は  $\theta_j = 2.5^\circ$  ( $n=0.1$  を仮定)、 $\theta_j = 3.3^\circ$  ( $n=1.0$  を仮定) となる。実際の放射エネルギー  $E_\gamma = E_{iso} \times (1 - \cos\theta_j)$

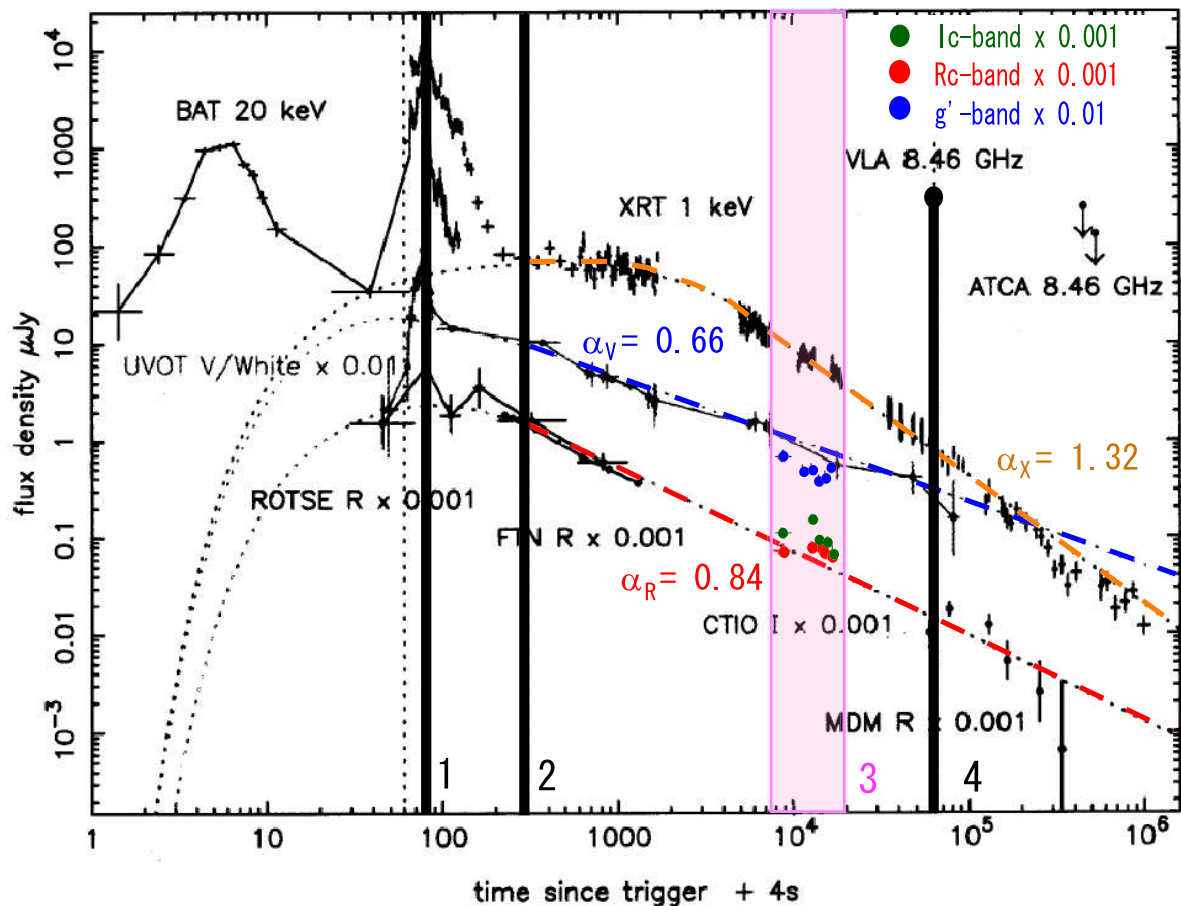


図 8.5: Page et al.(2007) の光度曲線に我々のデータをプロットした図。多波長のデータをひとつのグラフに記すため、UVOT のデータはフラックス  $\times 0.01$  倍、地上の R バンドのデータはフラックス  $\times 0.001$  倍してプロットされている。MITSuME のデータについては、I バンドを緑色、R バンドを赤色にしフラックス  $\times 0.001$  倍にしてプロットしており、g' バンドについては青色でフラックス  $\times 0.01$  倍してプロットしている。オレンジの点線は X 線のモデルで、べきは  $\alpha_X = 1.32$ 。水色の点線は V バンドのモデルでべきは  $\alpha_V = 0.66$ 。赤色の点線は R バンドのモデルでべきは  $\alpha_R = 0.84$ 。



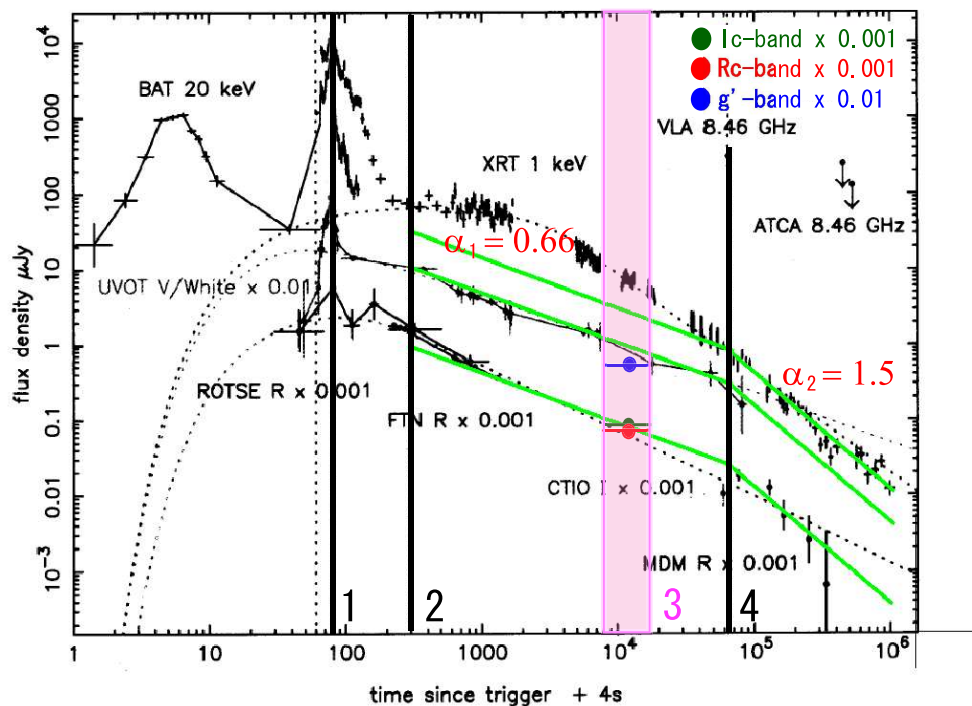


図 8.6: ジェットブレイクを示唆する図。MITSuME のデータは、得られたデータ全てを重ね合わせた画像を測光した値を使用している。緑線はジェットブレイクがあったとした場合のモデルである。実際にフィッティングは行っていない。

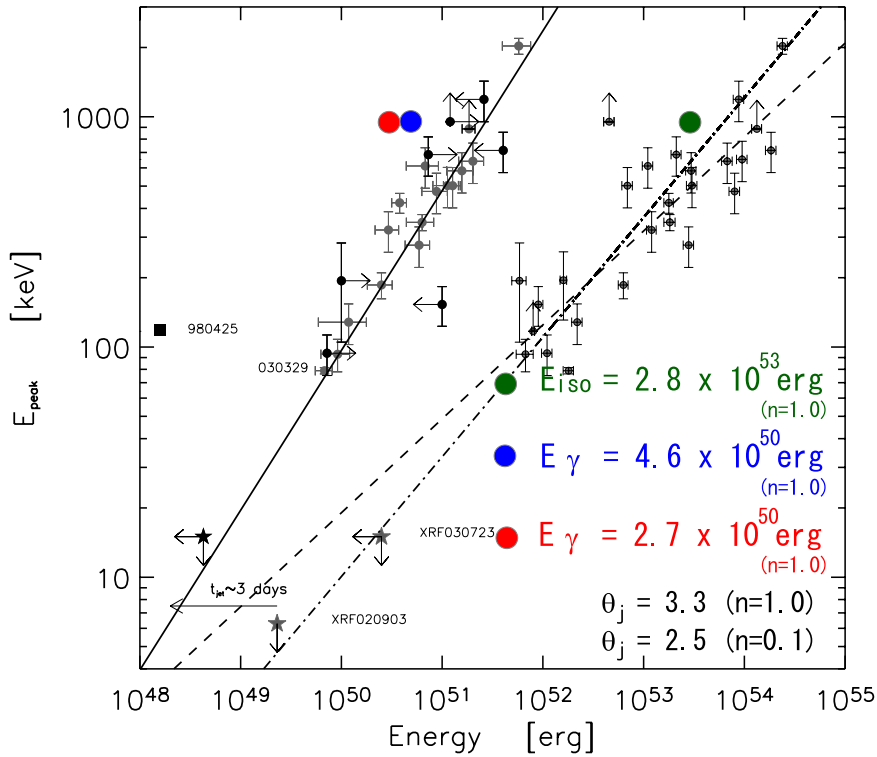


図 8.7: Amati の関係および Ghirlanda の関係に GRB061121 をプロットした図。  $E_{peak}$  は、Konus-Wind の 670keV と RHESSI の 455keV の 2 つで決められており、この図では 2 種類の場合をプロットした。GRB061121 は Amati の関係を満たしている。一方、 $\sim 70000$  秒にジェットブレイクがあったとした場合、GRB061121 は Ghirlanda の関係を満たしていない。

は、ジェットの開き角度が  $\theta_j = 2.5^\circ$  の場合には  $E_\gamma = 4.6 \times 10^{50} \text{ erg}$ 、 $\theta_j = 3.3^\circ$  の場合は  $E_\gamma = 2.7 \times 10^{50} \text{ erg}$  となる。

図 8.7 に、Amati の関係 (Amati et al. 2002) および Ghirlanda の関係 (Ghirlanda et al. 2004) のグラフにおいて、GRB061121 がどの位置にくるかを示した図を記す。Amati の関係では、GRB061121 は分布の中心に乗っていないが、1 桁ぐらいのずれで分布の端に乗っている。一方、GRB061121 は Ghirlanda の関係には乗っていない。Ghirlanda の関係を満たすには、ジェットブレイクが  $\sim 70000$  秒よりも遅い時間帯に起こっていないとしないことになる。

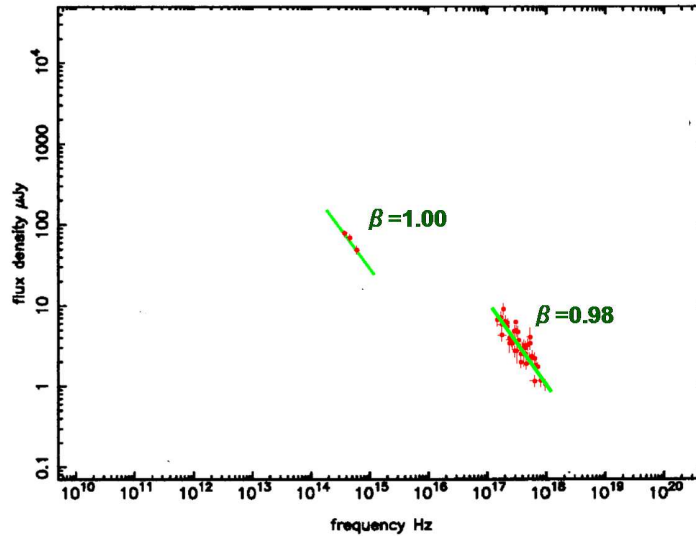


図 8.8: MITSuME と XRT の SED。MITSuME のデータは低周波数側から、Iバンド,Rバンド,gIバンドのデータである。天の川銀河の吸収は考慮している。本来なら MITSuME のデータと XRT のデータは継ることが期待されるが、得られた結果はそうはなっていない。これは天の川銀河の吸収の他に、母銀河における吸収を受けたことを示唆している。

#### 8.4.2 母銀河による吸収を示唆

図 8.5 のグラフの 3 に対応する時間における、MITSuME と XRT の SED を作成した (図 8.8)。MITSuME のデータは、得られたデータ全てを重ね合わせて作成した画像を測光して得られたデータである。MITSuME のデータ 3 点を Power-law でフィットしたのべきは  $\beta = 1.0 \pm 0.5$ 、Swift のデータを Power-law でフィットしたべきは  $0.98 \pm 0.07$  であった。

図 8.8 を見ると、可視光と X 線の SED が継っていない。天の川銀河の吸収を補正したにも係わらず可視光と X 線の間が継らないということは、さらに GRB061121 の母銀河において吸収を受けている可能性が考えられる。GRB061121 は  $z = 1.314$  であるので、GRB061121 の母銀河の系では、MITSuME の gI バンド、R バンド、I バンドは波長が  $1/(1+z)$  倍されるため紫外線の領域となる。紫外線の領域であるならば、母銀河によって吸収の影響を受けた可能性は十分に考えられる。

この議論を指示する内容が Page et al. (2007) に記されている。図 8.9 は 596-1566 秒における可視光、紫外線、X 線の SED を Broken Power-law+銀河間の吸収+母銀河の吸収のモデルでフィッティングを行った図である。静止系での Lyman- $\alpha$  は我々の系では  $1215\text{\AA}$  が  $(1+z)$  倍され、 $\sim 2812\text{\AA}$  となる。我々の系でこの波長は紫外線の領域であり、図 8.9

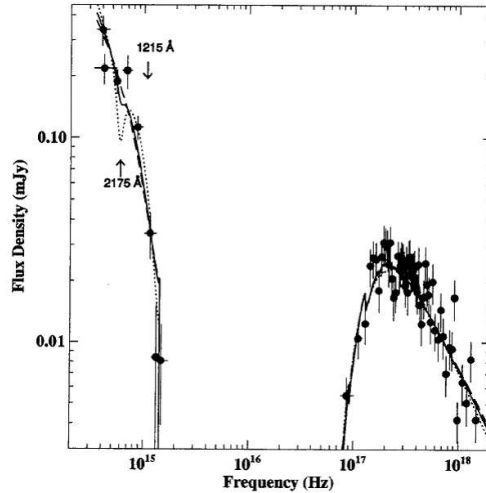


図 8.9: 596-1566 秒における UVOT と XRT を Broken power-law fit した図 (Page et al. 2007)。矢印は静止系での Lyman- $\alpha$  (1215Å) のはじまる波長。

においても UVOT の紫外線のデータ点が強く吸収を受けている。

### 8.4.3 SED の時間変化

Page et al.(2007) では、GRB061121 の発生初期から発生 65000 秒までの SED 時間変化が議論されている。図 8.10 に Page et al. (2007) にある SED 時間変化のグラフに MITSuME のデータを重ねた図を記す。この図における SED の 1~4 は、図 8.5 の 1~4 の数字を振った時間帯に対応している。この図で、実線は実際に行ったフィッティングの結果を記している。一方、可視光と X 線を結ぶべきは、R バンドのデータ点と X 線の一番周波数の小さい点の 2 点でのフィッティングからべきを求めたものである。電波・可視光と X 線を結ぶ点線は、このようなフィッティングを行い、2つの点を直接つなげた線である。ここでは特に、MITSuME のデータ前後である、2(X 線の台地構造が始まる時間)、3(MITSuME の観測時間)、4(電波の観測がある 65000 秒後)における SED 時間変化についての議論を記す。

図 8.10 を見ると、時間 2~4 の間で X 線のべきの変化はほとんど見られない。一方、可視光と X 線をむすぶべきに注目すると、時間 2( $\beta = 0.6$ ) から MITSuME の観測時間である時間 3( $\beta = 0.39$ ) に移ると、一端べきが小さくなる。そして時間 4( $\beta = 0.53$ ) では再びべきが大きくなる。

このべきの時間変化は、X 線のみに見られる台地構造に由来するものである。つまり、

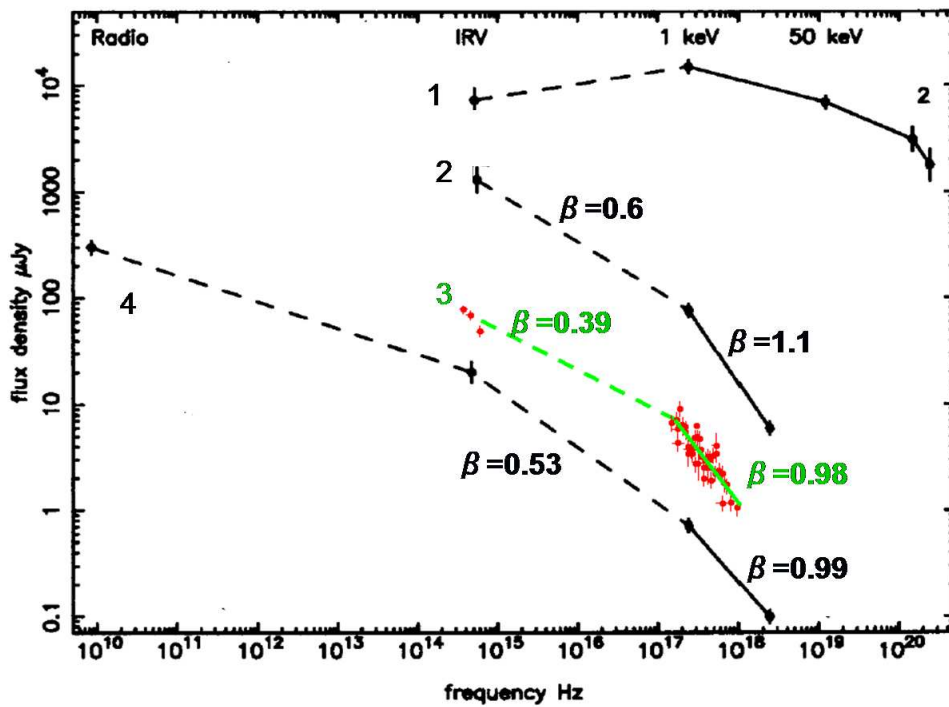


図 8.10: GRB061121 の SED 時間変化の図。実線は X 線での実際のフィッティングの結果。電波・可視光を結ぶ点線は直接結んだものである。グラフ中に記してある  $\beta$  の値は R バンドの点と一番周波数の小さい X 線の点の 2 点を結んだ際のべきである。

時間2から時間3の間では、可視光の減光は直線的なのに対して、台地構造がある X 線の減光は可視光よりも緩やかである。X 線より可視光の方が暗くなるため、可視光・X 線を結ぶべきが小さくなるのである。また、時間3から時間4において、X 線では台地構造が終了した後急激に減光を始める。今度は可視光に比べて X 線は急速に暗くなるため、可視光・X 線を結ぶべきが大きくなるのである。

また、時間2と時間4の間で考えると X 線と可視光の減光はほぼ同じであるため、X 線と可視光を結ぶべきはさほど変化していない。

## 8.5 まとめ

我々のデータは、UVOT や他の地上観測の時間的空白を埋めることに成功し、より詳細な SED の時間変化を明らかにした。この SED から、3 色のデータが  $z=1.314$  の母銀河による吸収を受けていることが示唆される。また、我々のデータをプロットした多波長観測の光度曲線から、GRB 発生 70000 秒に多色同時の折れ曲がりが見られる。しかし、Ghirlanda の関係からは、この時間よりも後にジェットブレイクがあったことを示している。

## 第9章 まとめ

本研究では、まず明野の MITSuME 望遠鏡における自動観測・解析の機能を向上させるため、システムの高度化を行った。またシステム運用の成果として、GRB 可視光残光の観測結果についてまとめた。

我々は、取得した画像から GRB を検出し、測光を行うまでの処理を全て自動解析システムで行うことを最終目標とし、そのために必要な「画像のリダクションと重ね合わせ」、「新天体検出」、そして「測光」を自動的に行うソフトウェアの開発を行った。このうち、「画像のリダクションと重ね合わせ」と「測光」を行うソフトウェアは、現在パトロール観測システムにおける自動解析で稼働している。GRB の解析を全て自動化するには、画像のセレクションや複数の画像の組合せ方法など、まだまだ困難が多く、出力された最終結果の信頼度を向上させることは困難が多いと思われる。そこで、まずはパトロール観測システムの光度変化モニターの運用から、自動解析のノウハウを培う必要がある。そしてこの経験を活用し、今後は本研究で開発されたソフトウェアを GRB 自動解析システムへ移植したい。

MITSuME 望遠鏡では、GRB 観測および通常時のスケジュール観測も無人制御で自動的に行われる。制御が無人の場合、観測に重要なフォーカスの調整も自動的に行う必要が生じる。本研究で開発したフォーカスのモデルは運用する上で問題の無い精度で、フォーカスの調整を自動的に行うことが可能である。これにより、自動観測で取得されるデータの質を大幅に向上させることに成功した。単位温度あたりのフォーカスの変化率は鉄の膨張係数とちょうど一致しているので、このモデルは一年を通して有効であると考えられる。だが、気温が上昇する夏場でも、実際にこのモデルが適用出来るかを注視する必要がある。

我々は、運用開始から1年4ヶ月間の間に6例の GRB と、GRB に付随する超新星を1例検出し、13例の GRB の限界等級を見積もることに成功した。GRB061121 では、Swift 衛星の X 線データとの比較から、スペクトルエネルギー分布の詳細な時間変化を明らかにした。また我々のデータからはホスト銀河の吸収、ジェットブレイクの可能性が示唆され

る。GRB071112Cでは、発生102秒後の早期可視光残光の観測に成功し、可視光残光が発生～500秒まで減光をしていないことを明らかにした。我々が観測を行ったGRB071021では、すばる望遠鏡をはじめとした大型望遠鏡の測光結果から、このGRBが $z > 6.3$ の初期宇宙で発生したことを示唆している。将来、 $z > 6.3$ のGRBが発生する可能性は十分に考えられる。今後もシステムを運用していき、発生直後の可視光残光を捉えるとともに、高赤方偏移のGRB観測から初期宇宙の探査を行っていく。



# 付録A 限界等級を見積もったGRB

## A.1 限界等級を見積もったGRBの画像

限界等級を見積もったGRBの画像を載せる。図の緑丸は可視光観測から明らかになったGRBの座標、水色はXRTの観測から明らかになったGRBの座標を意味している。

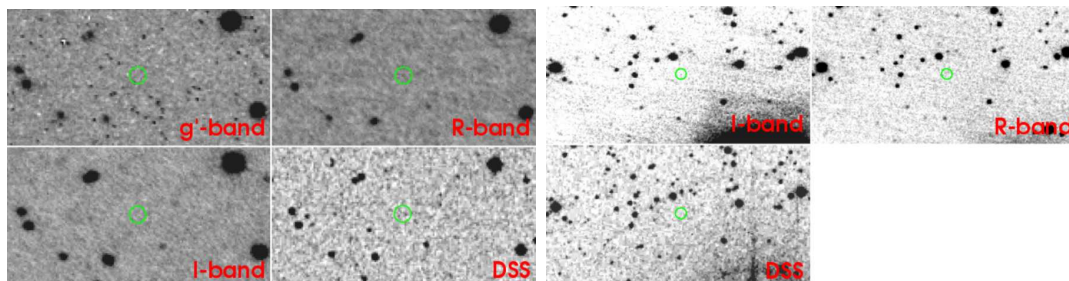


図 A.1: 左:GRB060923A の画像。右:GRB061019 の画像。

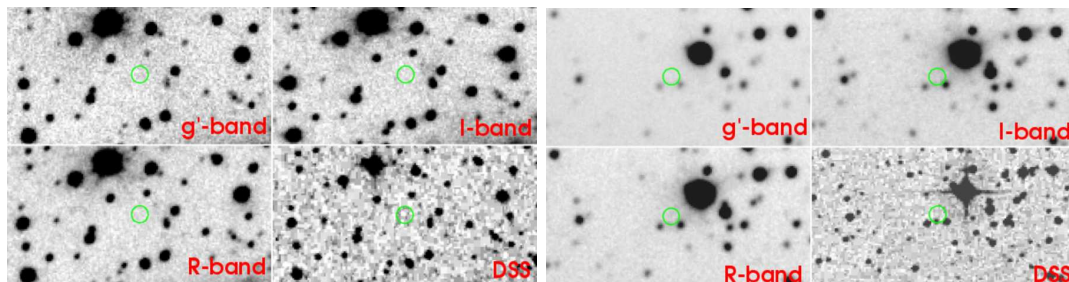


図 A.2: 左:GRB061222A の画像。右:GRB061222B の画像。

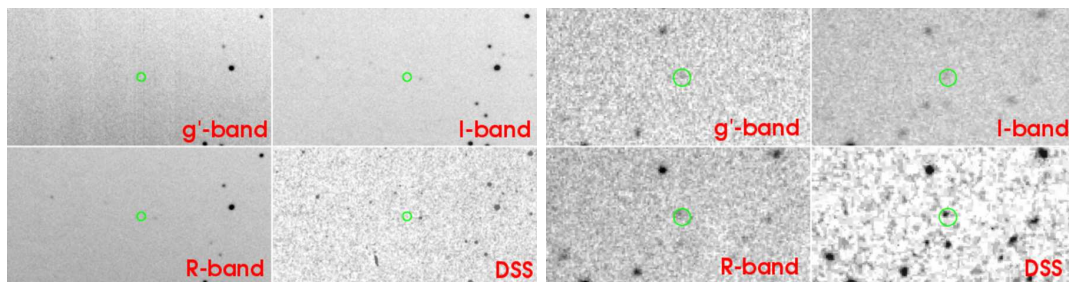


図 A.3: 左:GRB070129 の画像。右:GRB070208 の画像。

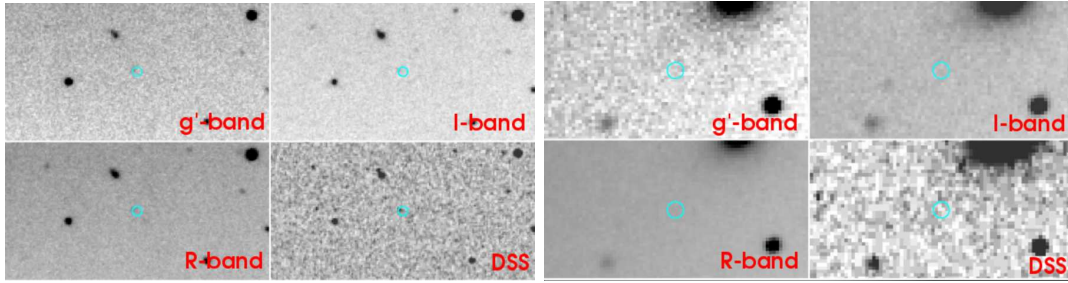


図 A.4: 左:GRB070406 の画像。右:GRB070412 の画像。

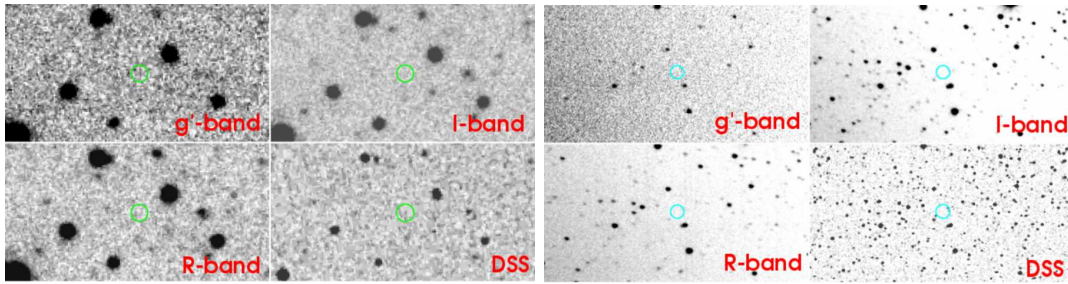


図 A.5: 左:GRB070520 の画像。右:GRB070612B の画像。

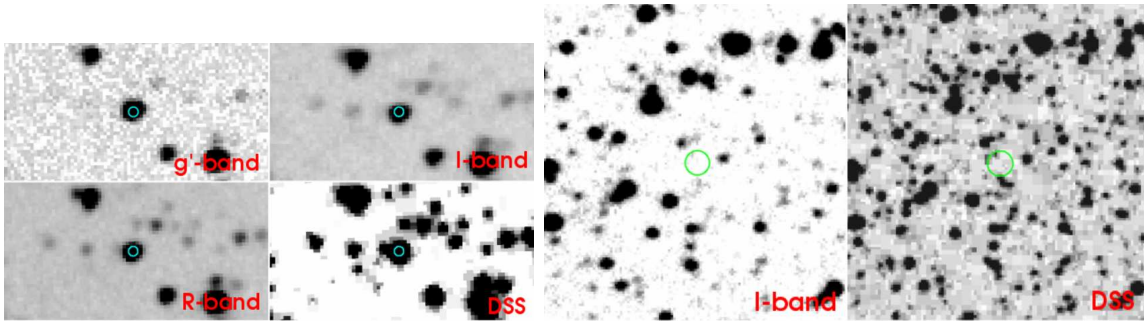


図 A.6: 左:GRB070616 の画像。右:GRB070917 の画像。

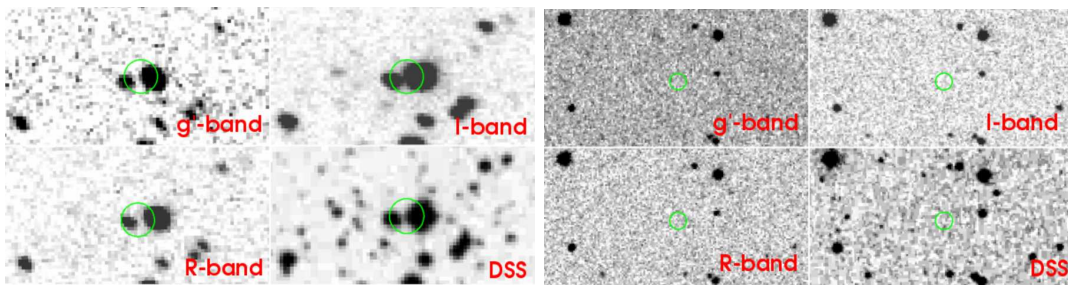


図 A.7: 左:GRB071003 の画像。右:GRB071025 の画像。

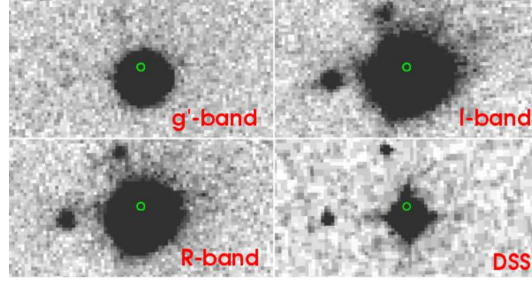


図 A.8: GRB071028 の画像。

## A.2 限界等級を見積もったGRBの光度曲線

限界等級を見積もったGRBの光度曲線を記す。プロットしているデータ点は、我々のデータ点、GCNに投稿されていたRバンドの点、GCNに投稿されていた特筆すべきデータ点、である。

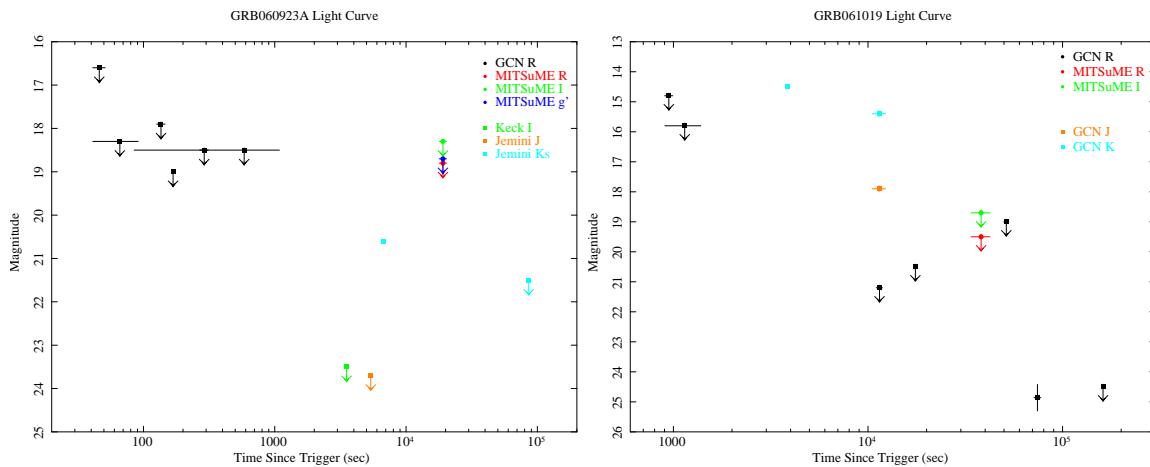


図 A.9: 左:GRB060923A の光度曲線。右:GRB061019 の光度曲線。

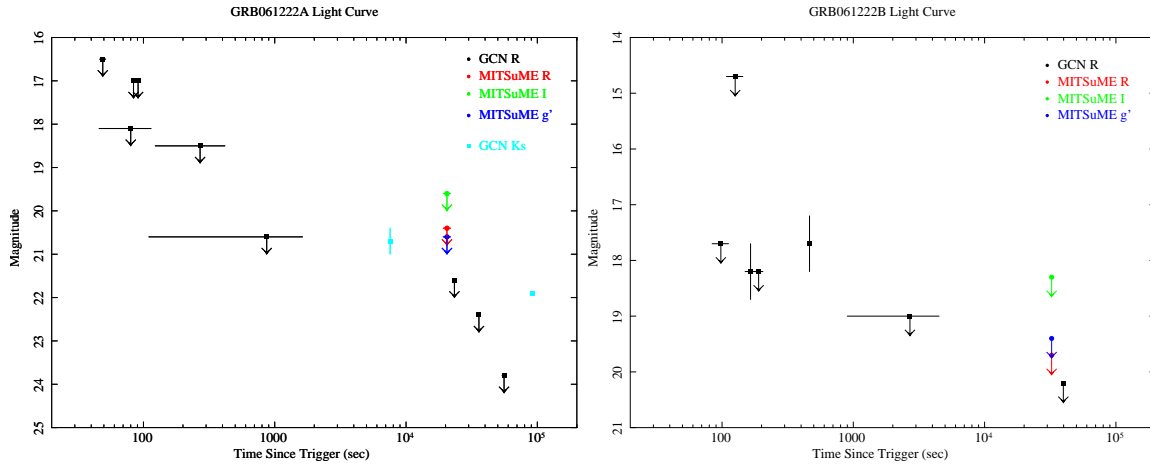


図 A.10: 左:GRB061222A の光度曲線。右:GRB061222B の光度曲線。

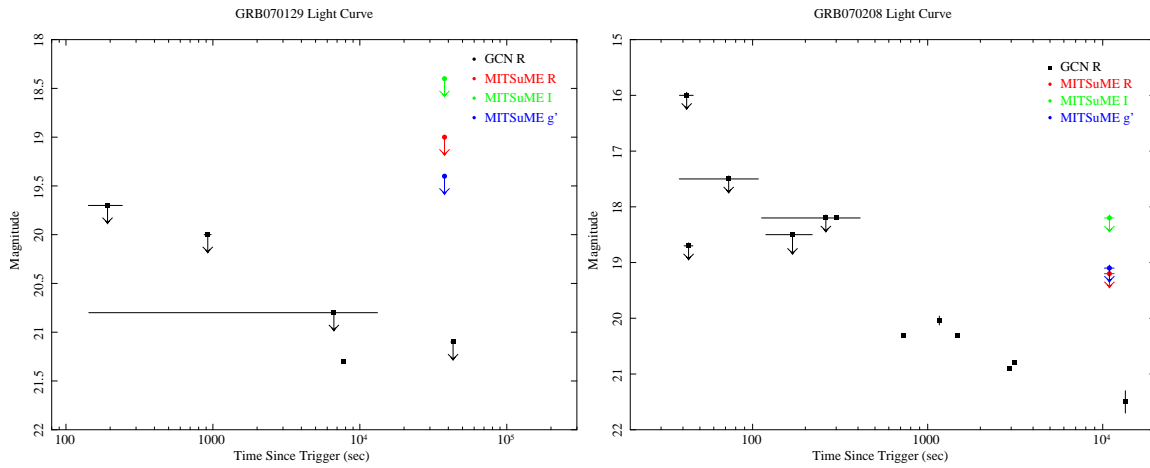


図 A.11: 左:GRB070129 の光度曲線。右:GRB070208 の光度曲線。

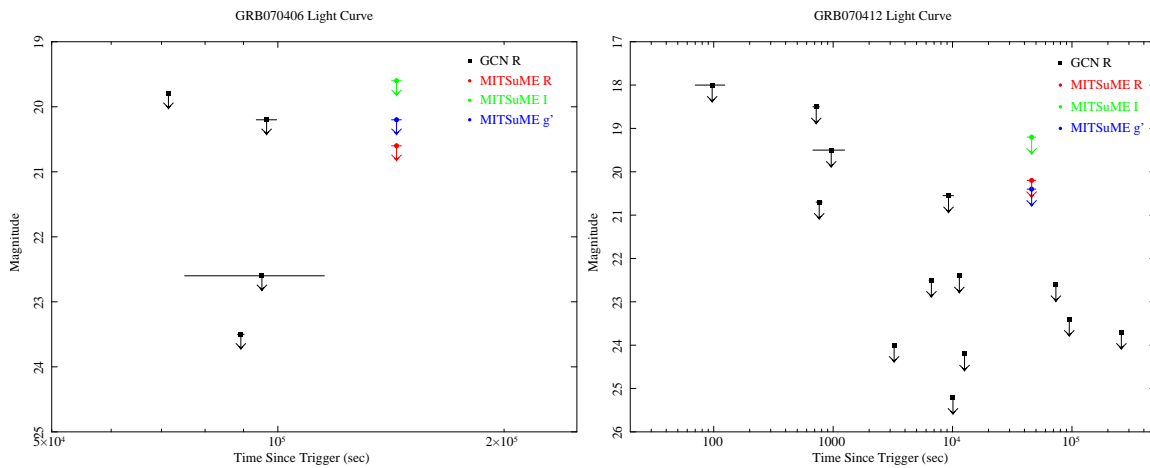


図 A.12: 左:GRB070406 の光度曲線。右:GRB070412 の光度曲線。

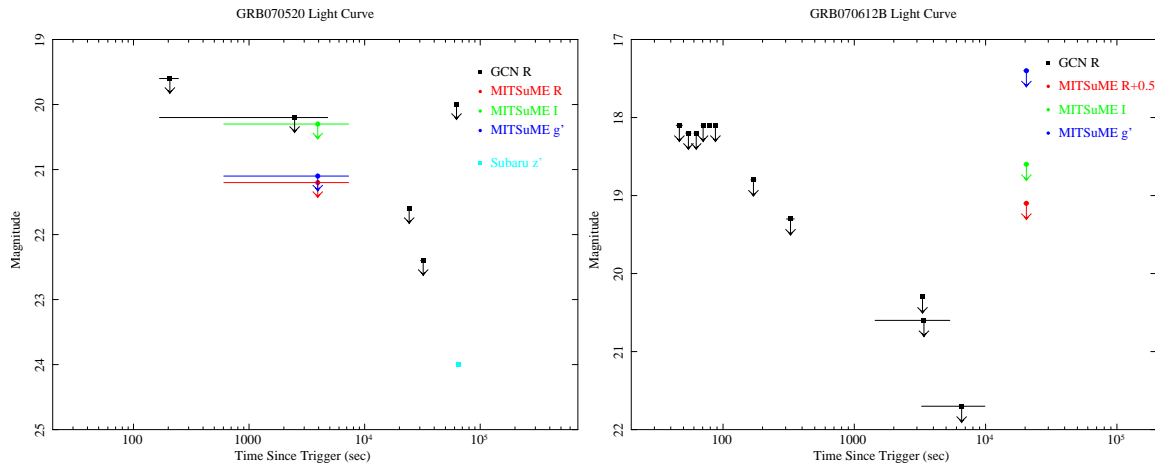


図 A.13: 左:GRB070520 の光度曲線。右:GRB070612B の光度曲線。

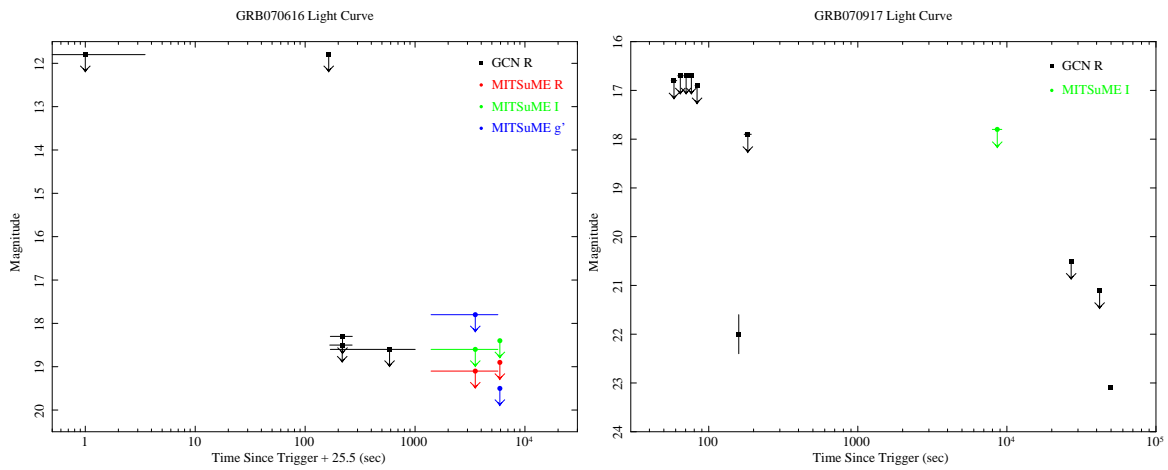


図 A.14: 左:GRB070616 の光度曲線。右:GRB070917 の光度曲線。

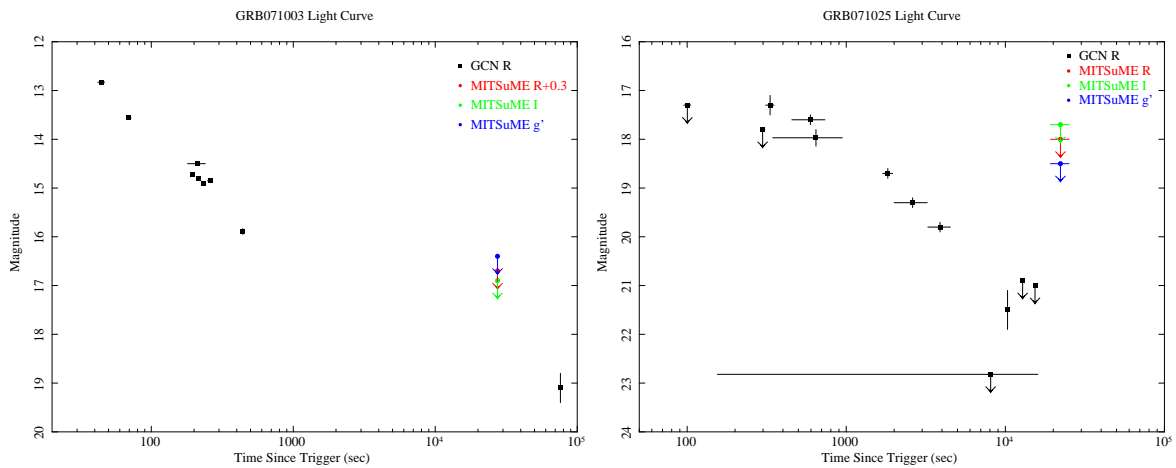


図 A.15: 左:GRB071003 の光度曲線。右:GRB071025 の光度曲線。



## 付録B 小惑星の確認

第 4.3.1 章において、新天体検出ソフトウェアの動作テストをする際に使用した天体が小惑星であることの確認をした。

1989kb を撮像した図 B.1 の画像では、周りの恒星は同じ座標にあるが、赤丸で括った 1989kb は 16 分間で 15 秒角移動している。この天体が小惑星であることがわかる。

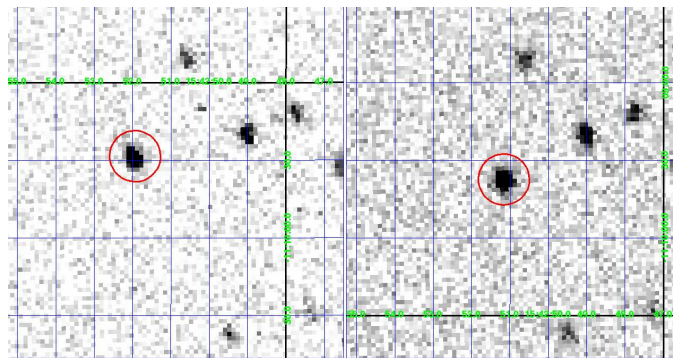


図 B.1: 1989kb が時間とともに移動している様子。赤丸内の天体が小惑星 1989kb。回りの恒星は同じ座標にあるが、1989kb は 16 分間で 15 秒角ほど移動している。

図 B.2 に載せた kalypso の場合、赤丸で括った kalypso のみ、17 分間で 8 秒角移動している。この天体が確かに小惑星であることが分かる。

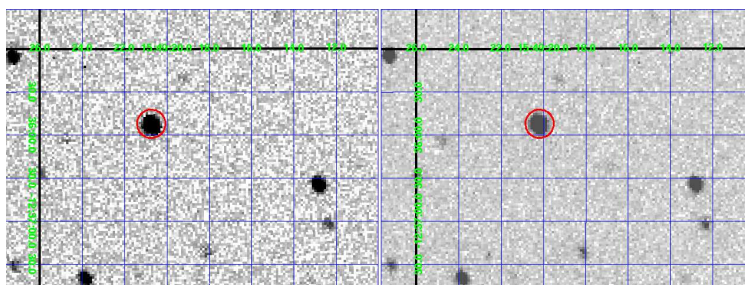


図 B.2: kalypso が時間とともに移動している様子。赤丸内の天体が小惑星 kalypso。kalypso は 17 分間で 8 秒角ほど移動しているが周りの恒星は静止している。

図 B.3 に、時間をおいて撮像した montague の画像を記す。赤丸で括った montague は 24 分間で 7 秒角移動しているが周りの天体は同じ座標にいる。この天体が確かに小惑星であることが分かる。

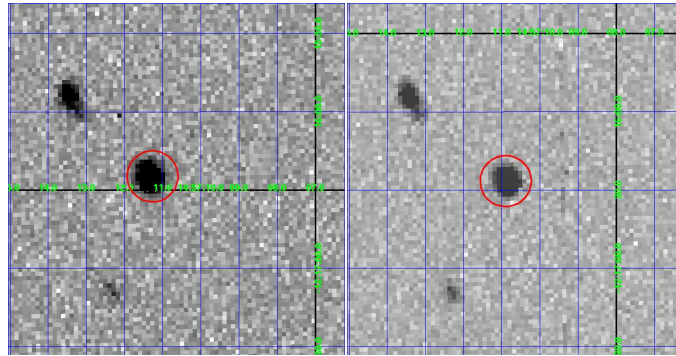


図 B.3: montague が時間とともに移動している様子。赤丸内の天体が小惑星 montague。画像中では montague のみが移動している。その移動距離は 24 分間で 7 秒角。

# 参考文献

- [1] 下川辺隆史 卒業論文 2006
- [2] 下川辺隆史 卒業論文 2005
- [3] 森由希 卒業論文 2008
- [4] 谷津陽一 修士論文 2005
- [5] 佐藤理江 修士論文 2004
- [6] YAGI, Masafumi すばるデータ講習会資料だったもの  
(Suprime-Cam 用解析マニュアル)
- [7] 美濃和 陽典 すばる IRCS 撮像データ解析マニュアル
- [8] 青木 和光 すばる/HDS データ解析講習会資料 IRAF を用いたスペクトル解析
- [9] 玉川氏、2007 年 GRB 京都 発表資料  
[http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/ioka/workshop/grb/20070116\\_grb\\_kyoto\\_tamagawa.ppt](http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/ioka/workshop/grb/20070116_grb_kyoto_tamagawa.ppt)
- [10] 上原 岳士 卒業論文 2006
- [11] 柳澤 顕史 MITSuME 標準星 2005
- [12] 河合 誠之、青木賢太郎、戸谷 友則、2006、天文月報、100、17
- [13] 横尾武夫 “新・宇宙を解く”
- [14] Klebesadel, Strong & Olson 1973
- [15] Costa et al., 1997, Nature, . 387. , 783
- [16] van Paradijs, J. et al., 1997, Nature, 386, 686



- [17] Metzger et al., 1997 , Nature, 387, 878
- [18] K. Z. Stanek et al., 2003, ApJ, 591, L17
- [19] J. Hjorth et al., 2003, Nature 423, 847
- [20] Kawabata et al., 2003, ApJ, 593, 19
- [21] B. Paczyński and G. Xu, 1994, ApJ, 427, 708
- [22] M. J. Rees and P. Meszaros, 1994, ApJ, 430, L93
- [23] R. Sato et al., 2003, ApJ, 599, 9
- [24] Rhoads et al., 1997, ApJ, 487, 1
- [25] Rhoads et al., 1999, ApJ, 525, 737
- [26] R. Sari, T. Piran and J. P. Halpern, 1999, ApJ, 519, L17
- [27] D. Frail et al., 1997, Nature 389, 261
- [28] F. A. Harrison et al., 1999, ApJ, 523, L121
- [29] Liang et al., ApJ, 2008, 674:000-000
- [30] B. Zhang, S. Kobayashi and P. Meszaros, 2003, ApJ, 595, 950
- [31] Harrison et al., 2005, Nature, 435, 178
- [32] Rykoff et al., 2005, ApJ, 631, 121
- [33] Akerlof et al., 1999, Nature, 398, 400
- [34] Uemura et al., 2003, Astron. Soc. Japan, 55, 31
- [35] Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: WMAP  
<http://map.gsfc.nasa.gov/index.html>
- [36] Kawai N., Kosugi G., Aoki K., et al., 2006, Nature, 440, 184
- [37] Malesani et al., 2007, GCN Circ., 6972

- [38] Bloom et al., 2007, GCN Circ., 6980
- [39] Rykoff et al., 2007, GCN Circ., 6497
- [40] D.B. Fox, A. Rau, & E.O. Ofek et al., 2006, GCN Circ., 5597
- [41] Hattori et al., 2007, GCN Circ. 6441
- [42] Page et al., 2006, GCN Circ., 5823
- [43] Yost et al., 2006, GCN Circ., 5824
- [44] Grupe et al., 2007, GCN Circ., 6805
- [45] Klotz et al., 2007, GCN Circ., 6806
- [46] Schaefer et al., 2007, GCN circ., 6948
- [47] Holland et al., 2007, GCN Circ., 6949
- [48] Jakobsson et al., 2007, GCN Circ., 6952
- [49] Xin et al., 2007, GCN Circ., 6956
- [50] Lee et al., 2007, GCN Circ., 6970
- [51] Updike et al., 2007, GCN Circ., 6979
- [52] Hentunen et al., 2007, GCN Circ., 6981
- [53] Hara et al., 2007, GCN Circ., 7006
- [54] Ishimura et al., 2007, GCN Circ., 7026
- [55] Perri et al., 2007, GCN Circ., 7059
- [56] Jakobsson et al., 2007, GCN Circ., 7076
- [57] Yoshida et al., 2007, GCN Circ., 7091
- [58] Yuan et al., 2007, GCN Circ., 7061
- [59] Koltz et al., 2007, GCN Circ., 7065

- [60] Chen et al., 2007, GCN Circ., 7067
- [61] Dintinjana et al., 2007, GCN Circ., 7078
- [62] Oates et al., 2007, GCN Circ., 7080
- [63] Chen et al., 2007, GCN Circ., 7083
- [64] Ishimura et al., 2007, GCN Circ., 7087
- [65] Greco et al., 2007,GCN Circ., 7089
- [66] Sposetti et al., 2007, GCN Circ., 7090
- [67] Stratta et al., 2007, GCN Report., 104.2
- [68] Cummings et al., 2007, GCN Circ., 7106
- [69] Pasquale et al., 2007,GCN Circ., 7116
- [70] Yoshida et al., 2007, GCN Circ., 7119
- [71] Cenko et al., 2007, GCN Circ., 7120
- [72] Page et al., 2008, GCN Report, 110.1
- [73] D'Elia et al., 2008, GCN Circ., 7162
- [74] Valenti et al., 2008, GCN Circ., 7171
- [75] Blondin et al., 2008, GCN Circ., 7173
- [76] Malesani et al., 2008, GCN Circ., 7184
- [77] Marion et al., 2008, GCN Circ., 7188
- [78] Prieto et al., 2008, GCN Circ., 7189
- [79] Modjaz et al., 2008, GCN Circ., 7212
- [80] Markwardt et al., 2008, GCN Circ., 7250
- [81] Li et al., 2008, GCN Circ., 7251

- [82] Oates et al., 2008, GCN Circ., 7253
- [83] Page et al., 2006, GCN Circ., 5823
- [84] Yost et al., 2006, GCN Circ., 5824
- [85] Gehrels et al., 2006, GCN Circ., 5839
- [86] Page et al., 2006, ApJ, 663, 125
- [87] Schlegel et al., 1998, ApJ, 500, 525
- [88] Fukugita et al., 1996, ApJ, 111, 4
- [89] Uemura et al., 2007
- [90] Page et al., 2006, GCN Report, 15.2
- [91] Ghirlanda et al., 2004, ApJ, 616, 331
- [92] Amati et al., 2002, A&A, 390, 81
- [93] Smith et al., 2002, AJ, 123, 2121
- [94] IRAF Project Home Page, IRAF  
<http://iraf.noao.edu/>
- [95] Terapix, SExtractor  
[http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id\\_rubrique=91/](http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id_rubrique=91/)
- [96] WCSTOOLS: Image World Coordinate System Utilities  
<http://tdc-www.harvard.edu/software/wcstools/>
- [97] U.S. Naval Observatory, USNO-B1.0 Catalog  
<http://www.usno.navy.mil/>
- [98] United States Naval Observatory Flagstaff Station, NOMAD catalog  
<http://www.nofs.navy.mil/>
- [99] The STScI Digitized Sky Survey (DSS)  
[http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\\_form](http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form)

- [100] Greisen, E. W. Representations of World Coordinates in FITS (WCS I) 2002
- [101] Calabretta, M. R. Representations of World Coordinates in FITS (WCS II) 2002
- [102] IRAF Programming Group “A Reference Guide to the IRAF/DAOPHOT Package”  
1994
- [103] Lindsey Elspeth Davis “A User’s Guide to the IRAF Apphot Package” 1989
- [104] E. Bertin “SEXTRACTOR v2.3 User’s manual”

# 謝辞

この論文を執筆するための2年間の研究生活では、多くの方々に本当にお世話になりました。河合先生には、この研究を通して本当にたくさんの貴重な経験をさせて頂きました。不出来な学生であったにもかかわらず、最後まで見守ってくださったことに感謝しております。岡山天体物理観測所の吉田所長には、GRBの測光から望遠鏡の仕組みや天文の知識についてご教示下さりありがとうございました。この論文は、吉田所長の助言が無ければ完成させることが出来なかったと思います。谷津さん、下川辺さんには、研究のいろはを一から教えて頂きました。お二人のご指導により、充実した研究室生活を送れたのだと切に思っております。ニコラス君、工藤君、森さんと共に、このMITSuME望遠鏡をより素晴らしいものに仕上げることが出来たことを嬉しく思っております。ありがとうございました。有元さんは、学会等の発表前練習に長時間つき合ってくださいました。鋭い適切なアドバイスには、とても勇気付けられました。金井さんには、研究室に入ったばかりの時期に、色々なことを教えて頂きました。どんな些細なことにも親切に対応して下さる金井さんの隣の席で研究出来たお蔭で、修士1年の研究生活を安心して送ることが出来ました。同じ学年の田中君、津布久君、木山君、三枝君、東ヶ崎君をはじめ、研究室の皆のおかげで楽しい毎日を送ることが出来ました。ありがとうございました。最後に、本研究を支えて下さった全ての人に感謝を致します。