

ガンマ線バースト残光望遠鏡の自動観測システム
および解析パイプラインの開発

下川辺 隆史

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

2007年 2月

Abstract

Gamma-ray bursts (GRBs) are the most luminous events known in the Universe since the Big Bang. They are often followed by an optical emission, called afterglow, which lasts for one day typically.

We have developed an automatic observation system with an analysis pipeline that permits to observe early optical afterglows of GRBs and determine their redshifts quickly. The purpose of our observations is to clarify the physical mechanism of GRBs. Using the fact that some of them can originate near the farthest edges of the observable universe, we also study the unknown early universe.

Our observation system has been designed to observe afterglows of GRBs automatically. This system can respond to notifications distributed by the Gamma-Ray Burst Coordinate Network (GCN), which provides information about the GRB coordinates detected by various satellites. After receiving a GCN notice, our telescope immediately slews to the GRB position and then starts to take simultaneously three color bands images.

The analysis pipeline is an automatic system that processes images taken with the multiband telescope and transfers them to a database. Its obtained products are the images with the world coordinate system (WCS), which is the relationship between sky coordinates and image pixels, and the determination of the photometric measurements. All this processing can help us to detect GRB afterglows rapidly and without human intervention. We can easily access all of the observation data of the database through a web service, which provides information of them and displays them as thumbnail images.

The effectiveness of our system for observing GRB afterglows has been demonstrated by the detection of the afterglow of GRB061121 and its photometric magnitudes in three different bands.

目次

第1章	はじめに	7
1.1	ガンマ線バースト	7
1.1.1	ガンマ線バーストとは	7
1.1.2	ガンマ線バーストの光学残光	7
1.1.3	HETE-2 衛星と残光観測による進展	9
1.2	ガンマ線バーストと原始宇宙探査	11
1.2.1	ガンマ線バーストと原始宇宙における星形成	11
1.2.2	ガンマ線バーストによる宇宙論的観測	12
1.2.3	高赤方偏移ガンマ線バーストの観測	12
第2章	MITSuME プロジェクト	15
2.1	MITSuME プロジェクトとは	15
2.2	観測システムの概要	16
2.3	明野 50cm 望遠鏡	18
2.3.1	望遠鏡の仕様	18
2.3.2	検出器	18
2.3.3	監視システム	20
2.4	GCN 情報 WEB ページ	22
第3章	自動観測システム	24
3.1	自動観測システムの設計	24
3.2	自動観測制御ソフトウェアの概要	27
3.3	望遠鏡の制御	29
3.3.1	望遠鏡制御の概要	29
3.3.2	望遠鏡制御の階層構造	30
3.4	CCD カメラの制御	37
3.5	ガンマ線バーストの自動観測	38

3.5.1	ガンマ線バースト位置情報の取得	38
3.5.2	自動観測の流れ	38
3.5.3	ガンマ線バーストの重要度	40
3.6	一晩の観測の流れ	40
3.7	気象モニタからのデータ取得	43
3.8	望遠鏡導入の補正関数の決定	43
3.8.1	データ取得のための観測	44
3.8.2	補正関数	44
3.8.3	補正パラメータ	46
3.9	ディザリング	46
3.10	遠隔操作による手動観測	49
第4章	解析パイプライン	52
4.1	解析パイプラインの概要	52
4.2	依存ソフトウェア	53
4.3	FITS	55
4.4	WCSの決定	55
4.5	測光	58
4.6	ゼロ点の計測	62
4.7	画像のクオリティの決定	63
4.8	限界等級	68
4.9	データベースへの登録と検索	69
第5章	残光観測実績	72
5.1	GRB060923A	72
5.2	GRB061019	73
5.3	GRB061121	74
5.4	GRB061222A	74
5.5	GRB061222B	75
5.6	GRB070129	76
第6章	まとめ	78

付録 A 付録	79
A.1 望遠鏡制御	79
A.1.1 シリアル通信コマンド	79
A.1.2 ATLAS 2000 シリアル通信用コマンド	80
A.1.3 望遠鏡ステータスファイル	84
A.1.4 気象情報 ASCII ファイルの形式	84
A.1.5 TPoint で使用されるポインティングデータファイル	85
A.2 CCD カメラの制御コマンド	85
A.3 FITS ヘッダー	88
A.4 等級エラー <i>MERR</i> の導出	90

目 次

1.1	ガンマ線バーストを発見したアメリカの軍事衛星 Vela	8
1.2	コンプトンガンマ線天文台とガンマ線バーストの天球上分布	8
1.3	BeopSAX 衛星と GRB970228 の X 線残光	9
1.4	GRB970228 の可視光残光	9
1.5	ホスト銀河と GRB970228	10
1.6	打ち上げ前の HETE-2 衛星。	10
1.7	GRB030329 残光のスペクトル変化	11
1.8	原始宇宙の歴史	13
1.9	赤方偏移に対する相対的なガンマ線バーストの発生率	13
1.10	Swift 衛星とガンマ線バーストの検出確率	14
2.1	MITSuME 望遠鏡の観測可能な波長帯	16
2.2	残光観測全体の流れ	16
2.3	明野 50cm 望遠鏡とドーム	18
2.4	三色同時撮像カメラ	20
2.5	監視カメラの映像	21
2.6	視野カメラの WEB ページ	21
2.7	GCN 情報 WEB ページ	23
3.1	telcon におけるクライアントサーバモデル	27
3.2	telcon の内部構造	28
3.3	ATLAS 2000	29
3.4	望遠鏡制御の階層構造の概略図	30
3.5	一晩の観測の流れ	42
3.6	ディザリング観測の概念図	48
3.7	ディザリングを用いた観測と用いなかった観測の画像の比較	50
3.8	遠隔操作による手動観測を行うためのユーザインターフェース	51

4.1	解析パイプラインの概略図	53
4.2	FITS イメージ	56
4.3	WCS 決定の概念図	57
4.4	WCS の決定精度	59
4.5	Aperture、Annulus の選択方法	60
4.6	天体だけの星像と天体以外を含んだ全ての像の PSF FWHM の比較	61
4.7	ゼロ点の算出	63
4.8	FITS 画像の有効領域におけるカウント値のヒストグラム	64
4.9	スカイレベルの時間的变化	66
4.10	‘WCSMATCH’ の時間的变化	67
4.11	限界等級の測定	69
4.12	データベース概念図	70
4.13	データベース検索画面。	70
4.14	QL 画像のサムネイル表示	71
4.15	ムービー表示機能	71
5.1	GRB060923A	73
5.2	GRB061019	74
5.3	GRB061121	75
5.4	GRB061222A	75
5.5	GRB061222B	76
5.6	GRB070129	77

表 目 次

2.1	明野 50cm 望遠鏡の仕様	19
2.2	Apogee 社製 冷却 CCD カメラ Alta U6 の仕様	19
3.1	ドームを開くことが可能な条件	33
3.2	キャップを開くことが可能な条件	33
3.3	望遠鏡のステータスファイルへの出力項目。このステータスファイルは望遠鏡の情報に加え、気象情報をもつ。	35
3.4	GCN データ形式	39
3.5	ガンマ線バーストの重要度 I_0 。	41
3.6	明野 50cm 望遠鏡で測定している気象情報。	43
3.7	補正パラメータ	47
3.8	ディザリングを用いた観測と用いなかった観測による限界等級、PSF FWHM(最頻値)、スカイレベルの標準偏差の比較。	49
4.1	WCS の書き込みによって追記される FITS ヘッダー。	58
4.2	ゼロ点の計測によって追記される FITS ヘッダー。	63
5.1	明野における残光観測結果	72
A.1	シリアル通信用コマンド一覧 1	81
A.2	シリアル通信用コマンド一覧 2	82
A.3	シリアル通信用コマンド一覧 3	83
A.4	CCD 制御コマンド 1	86
A.5	CCD 制御コマンド 2	86
A.6	CCD 制御コマンド 3	87
A.7	CCD 制御コマンド 4	87

第1章 はじめに

1.1 ガンマ線バースト

1.1.1 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バーストは、宇宙のある一点から 50keV – 300keV のエネルギーをもつ X 線、 γ 線が爆発的に放射される現象で、ビッグバンについて宇宙でもっとも規模の大きい爆発現象と考えられている。バーストの継続時間は平均的には数秒から数十秒ほどであるが、そのフラックスは 1cm^2 あたり 100counts 以上となる。

ガンマ線バーストは、1967年に地上における核実験を監視するアメリカの監視衛星 Vela (図 1.1) によって偶然発見された (Klebsadel, Strong & Olson 1973)。しかし、ガンマ線バーストを観測するため打ち上げられた当時の観測器機にはバーストの発生位置を詳細に決定するだけの精度がなく、1980年代にはこの問題に対して大きな進展は見られなかった。その後、1991年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文台 (CGRO) に搭載された BATSE (Burst And Transient Experiment) の観測によって、ガンマ線バーストの発生頻度が全天で1日1回程度であること、バーストの発生位置が全天球上で当局的な分布をしていることが明らかになった (Meegan et al. 1992、図 1.2)。

1.1.2 ガンマ線バーストの光学残光

1997年、イタリア、オランダの共同で打ち上げた X 線 γ 線天文衛星 BeppoSAX は、搭載した X 線望遠鏡によってガンマ線バーストに伴う数日間継続する X 線放射を発見した (Costa et al. 1997、図 1.3)。残光である。さらに、地上望遠鏡の観測により X 線残光の発見された位置に可視光領域での残光も発見された (van Paradijs et al. 1997、図 1.4)。この観測によってガンマ線バーストは数日間かけて減光する X 線から電波まで広がる残光を伴うことがわかった。このバーストが発生してから半年後に、ハッブル宇宙望遠鏡はバーストの残光の近傍に淡くひろがった銀河を発見した (図 1.5)。残光の位置と銀河の中心が異なっていることから、ガンマ線バーストは活動銀河核起源ではなく銀河に付随する現象

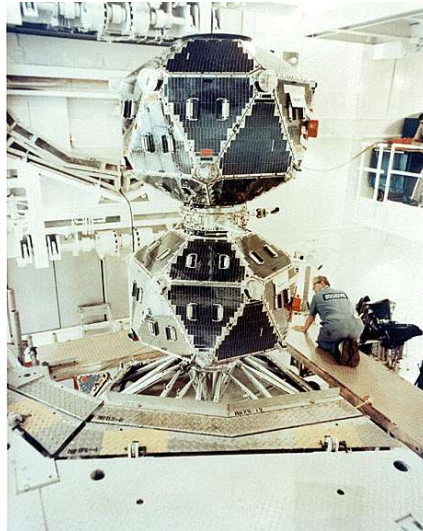


図 1.1: ガンマ線バーストを発見したアメリカの軍事衛星 Vela

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

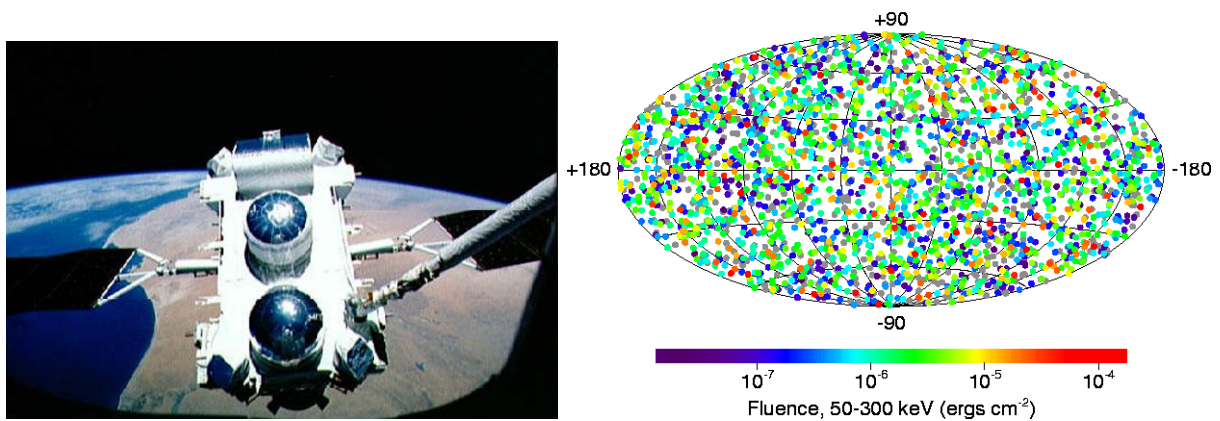


図 1.2: 左図：コンプトンガンマ線天文台 (CGRO)。右図：CGRO に搭載された BATSE 検出器の観測による 2704 個のガンマ線バーストの天球上分布。全天に一様に分布していることがわかる。

であると考えられるようになった。また、この X 線残光の発見以降、ガンマ線バーストの可視光残光の分光観測が行われ、ガンマ線バーストは数十から数百億光年の宇宙論的遠方の銀河で発生する爆発現象であったことが確立した。

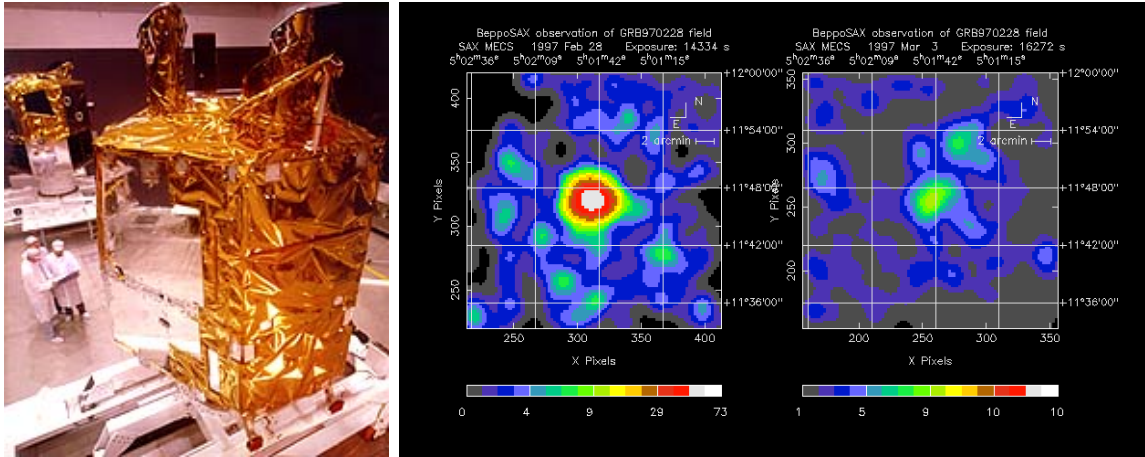


図 1.3: 左図：イタリア、オランダの X 線 γ 線天文衛星 BeppoSAX。右図：BeppoSAX によって発見されたガンマ線バースト GRB970228 の X 線対応天体 (残光)。左が発生約 8 時間後、右が発生約 3 日後に観測されたもの。X 線源が減光していることが捉えられた。

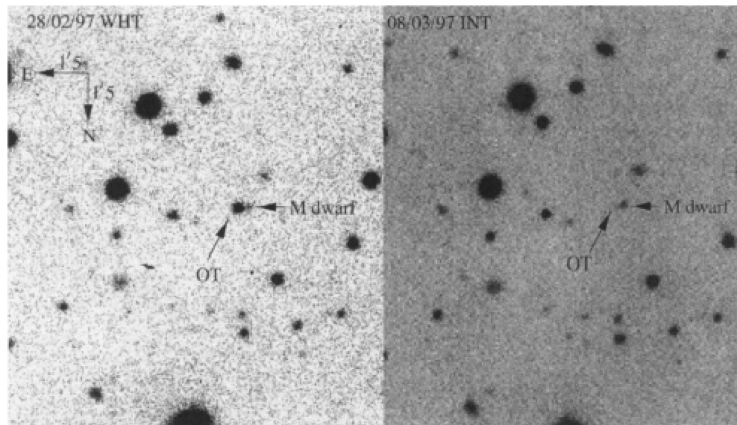


図 1.4: GRB970228 の可視光残光の観測。左がバースト発生約 21 時間、右が発生約 9 日後に観測されたもの。図中の OT が残光を表す。可視光残光が X 線同様減光している。

1.1.3 HETE-2 衛星と残光観測による進展

BeppoSAX による観測から残光観測がガンマ線バーストを探る上で非常に有効な手段であることが示された。しかし、残光の明るさは時間とともに急激に減光するため、バースト発生後直後から望遠鏡を向けて追観測をする必要がある。日本、アメリカ、フランスが共同で開発した HETE-2 (High Energy Transient Explorer-2) 衛星は、このような要求に応えるために打ち上げられたガンマ線バースト観測衛星である。HETE-2 は、ガンマ線バーストの発生を常時監視しており、バーストを捉えると機上で即時にこの位置決定す

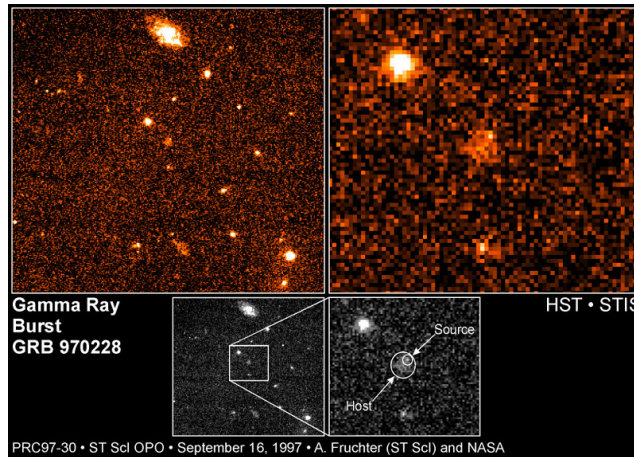


図 1.5: ハッブル宇宙望遠鏡による発生から約半年後の GRB970228 の観測。右下図の Source で表されるガンマ線バースト可視光残光が Host で表される銀河に付随していることがわかる。

ることができ、この位置をインターネットを通して全世界に速報する。HETE-2 の登場によって、バーストの位置速報ネットワーク GCN(The Gamma ray bursts Coordinates Network) が構築、全世界に残光観測の体制が確立され、残光観測によるガンマ線バーストの研究が進展した。



図 1.6: 打ち上げ前の HETE-2 衛星。

中でも HETE-2 が発見した GRB030329 は、HETE-2 観測史上最大級の明るさのガンマ線バーストであり、世界中の数十の望遠鏡により綿密かつ連続的な追観測が行われた。可視光残光の最大光度は 13 等級に達し、我々東工大は最速の測光観測行うことに成功した (Sato et al. 2003)。一カ月間、6 回におよぶ Hjorth による VLT(Very Large Telescope) による分光観測の結果、時間の経過とともに、ガンマ線バースト残光で典型的なスペクトル

である幕型から超新星爆発を示すスペクトルが現れてくることを発見した (Hjorth et al. 2003、図 1.7)。このスペクトルの構造は、Ic 型超新星爆発の特徴を持ち、ガンマ線バーストが大質量星の超新星爆発と関連性があることが明らかになった。

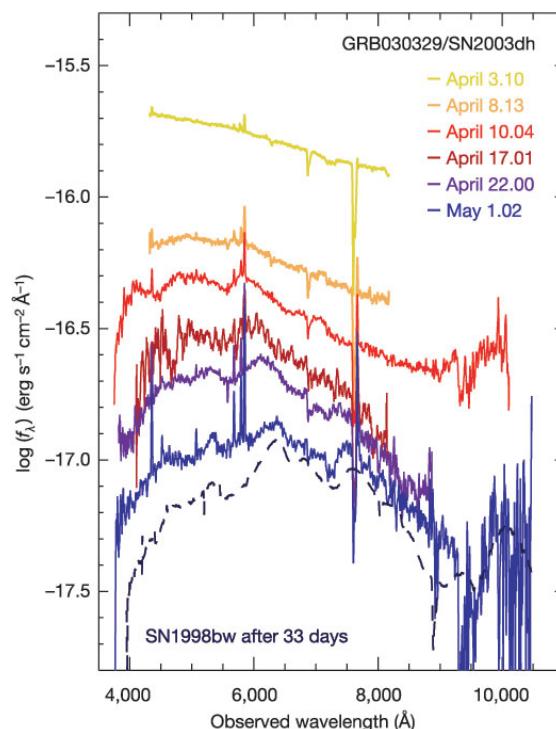


図 1.7: VLT で観測された GRB030329 残光のスペクトル変化。ガンマ線バースト残光に典型的なスペクトルから超新星爆発にみられる構造が時間と共に現れてきている。

1.2 ガンマ線バーストと原始宇宙探査

1.2.1 ガンマ線バーストと原始宇宙における星形成

ガンマ線バーストは大質量星の超新星爆発と関連性があることから、高赤方偏移で発生することが期待できる。これは、ガンマ線バーストが高エネルギー現象として興味深いだけでなく、原始宇宙の探査に利用できることを意味している。

ガンマ線バーストが恒星と関連していると考えると、 $z \sim 10$ の高赤方偏移のガンマ線バーストを検出することは、その古き時代の宇宙に恒星が存在していたことを意味する。ガンマ線バーストの発生率は星が生成される割合に比例すると考えられるため、ガンマ線バーストの発生頻度を調べることによって星形成率がどのように変化したかを知ることが

できる。また最も古い世代の星(種族 III)がいつ誕生したかという謎を解くことができると期待できる。

1.2.2 ガンマ線バーストによる宇宙論的観測

ガンマ線バーストは初期天体形成論と関連して議論される宇宙の再電離に関する情報を我々にもたらす有力な手段となる。

赤方偏移 $z \sim 1100$ で陽子と電子は再結合し、宇宙の晴れ上がりとなった。宇宙背景放射はそのときに発せられた光である。この時代以降、宇宙は暗黒時代に入りクェーサーが観測される $z \sim 10$ までの間は観測されていない領域となっている。

ガンマ線バーストは、このような $z \sim 10$ を越える領域を探查することが可能である。これまで遠方の宇宙をみる有力な手段であったクェーサーと比較すると多くの利点がある。恒星の重力破壊によって起こるガンマ線バーストはクェーサーのような銀河が形成される遙か以前の宇宙でも起こりうる。このため、ガンマ線バーストを用いることで、より昔の赤方偏移 $z \sim 20$ まで観測が可能になる。次に、その明るさである。高赤方偏移のガンマ線バーストとその早期残光はクェーサーの 100-1000 倍の明るさにまで達するため、高分散分光などの精密な測定をすることが可能である。

強力なガンマ線バーストの残光は、視線上に分布する星間物質の分布を知ることのできる重要な手がかりともなりうる。分光観測で金属や Lyman- α 吸収線の分布を調べることによって、宇宙における金属合成がどのように行われてきたかを知ることができる。また、吸収線の分布を調べることにより宇宙の大規模構造の探查も可能である。

1.2.3 高赤方偏移ガンマ線バーストの観測

ガンマ線バーストを利用して、宇宙初期の星形成について探查するためには、高赤方偏移のガンマ線バーストを観測しなければならない。高赤方偏移のガンマ線バーストの発生率は図 1.9 のように遠方ほど多いと考えられている。したがって、これをどのように残光観測までつなげて行くかが焦点となる。

2004 年、ガンマ線バーストの観測を目的とした大型衛星 Swift が打ち上げられた(図 1.10)。Swift 衛星は、バーストを検出する BAT(Burst Alert Telescope) とその残光の追観測を行う XRT(X-ray Telescope)、UVOT(Ultraviolet/Optical Telescope) をもつ。自ら追観測を行うことで秒角精度で即時に位置決めが可能となる。HETE-2 衛星と同様、Swift 衛星は検出したガンマ線バーストの位置情報を GCN を通じて世界へ通報する。

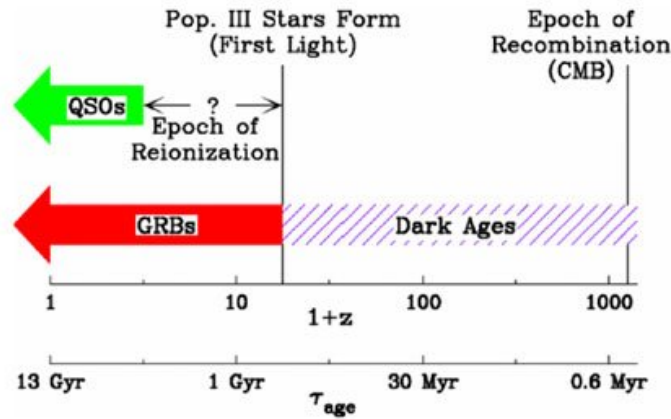


図 1.8: 原始宇宙の歴史。ガンマ線バーストを使うことによって赤方偏移 $z \sim 20$ の原始宇宙を探查することができる。(Lamb and Reichart 2000)

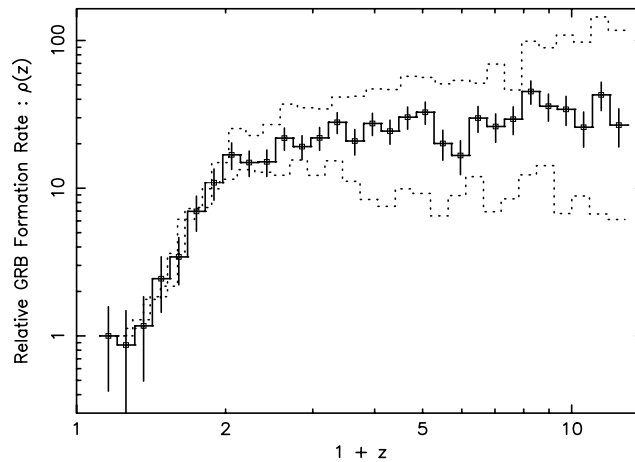


図 1.9: 赤方偏移 z に対する相対的なガンマ線バーストの発生率の推定例。 $z \sim 2$ に向かって発生率が高くなると推定されている。(Yonetoku et al. 2004)

図 1.10 右図は、高赤方偏移のガンマ線バーストが発生した場合の HETE-2 衛星、Swift 衛星によるバーストの検出確率を過去のバーストの特徴を基にシミュレーションしたものである。Swift 衛星は赤方偏移 $z \sim 20$ では、70% 程の確率で検出できることがわかる。高赤方偏移のガンマ線バーストが発生した場合、これを捉える可能性は十分にある。Swift 衛星は年間 100 個程度のガンマ線バーストの位置情報を地上に速報しており、ますますガンマ線バーストを観測する機会は増えていっていると言える。

現在までに観測された中で最遠方のガンマ線バーストは Swift 衛星によって発見された GRB050904 であり、赤方偏移 $z = 6.3$ である。これは、最遠方のクェーサーに匹敵する

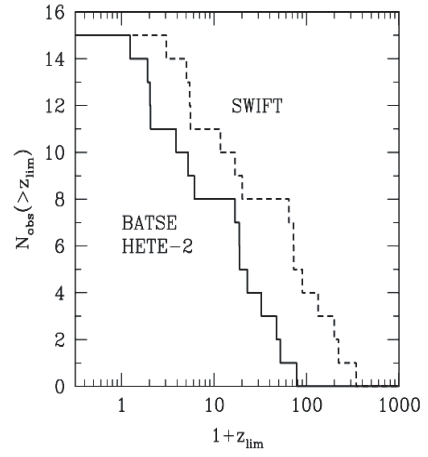
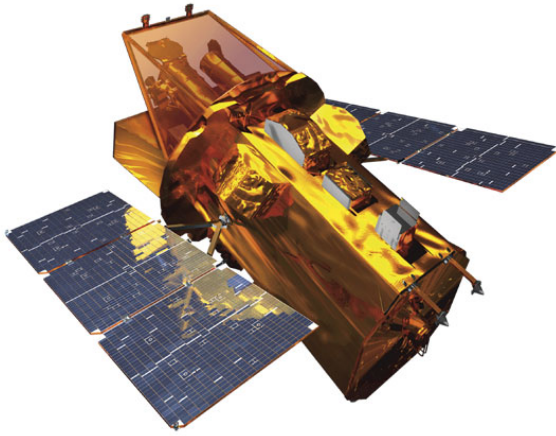


図 1.10: 左図：ガンマ線バースト観測衛星 Swift。右図：Swift 衛星による高赤方偏移ガンマ線バーストの検出確率。(Lamb and Reichart 2001)

距離であり、ガンマ線バーストを利用した初期宇宙の観測研究は現実的なものとなってきていることを物語っている。

第2章 MITSuME プロジェクト

2.1 MITSuME プロジェクトとは

MITSuME プロジェクトは、ガンマ線バーストの初期残光を可視光、近赤外バンドで同時多色撮像し、バーストの位置を高精度に決定し、残光の強度と色、そしてその時間変更を観測する。これによって、ガンマ線バーストの起源と放射機構を解明することを目指している。さらに、多色測光することによってガンマ線バーストの赤方偏移を決定することが可能であり、宇宙創成以来のガンマ線バースト発生率、すなわち大質量星の生成率、この歴史をひも解くことを目標としている。

MITSuME プロジェクトは、東京大学宇宙線研究所明野キャンパスに設置された 50cm 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、近赤外 91cm 望遠鏡の 3 台の望遠鏡を使用し、ガンマ線バースト残光を広い波長帯における同時測光を行う。3 台の望遠鏡により、波長帯 g' 、R、I、Z、J、H、K をカバーする。これによって、赤方偏移 $5 < z < 20$ の範囲で銀河間空間水素による吸収 (Lyman α 122nm) によって生じる連続スペクトルの短波長側のカットオフ (Lyman- α ブレーク) を用いることでその赤方偏移を粗い精度 ($\Delta z \sim 0.1$) で決定することが可能となる (図 2.1)。

バーストの発生直後から残光の観測を行うため、これらの望遠鏡は GCN を通してガンマ線バーストの位置速報を受信し、これに対応し自動観測を行えるよう開発を行っている。

自動観測して得られたデータは、さらに自動解析されることによって高精度でバーストの位置を決定する。GCN を通して受信する HETE-2 衛星、Swift 衛星からのバーストの位置情報は数分角のエラー範囲を持ち、我々の望遠鏡による観測でこの位置を数秒角と精度良く決定し、これを GCN を通し世界に通報することで、すばる望遠鏡などの視野の狭い大型望遠鏡での分光観測へつなげていく。

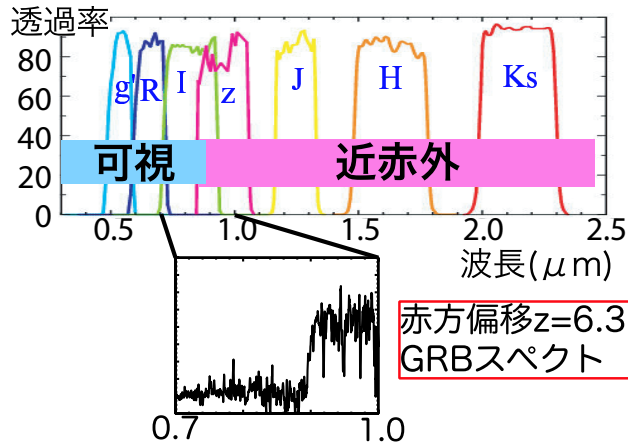


図 2.1: MITSuME プロジェクト 3 台の望遠鏡で観測が可能な波長帯。下図はすばる望遠鏡で観測された赤方偏移 $z = 6.3$ のスペクトル。 $z = 6.3$ のバーストを観測した場合、7 つの波長帯で Lyman- α ブレークを観測し、赤方偏移を決定できることがわかる。

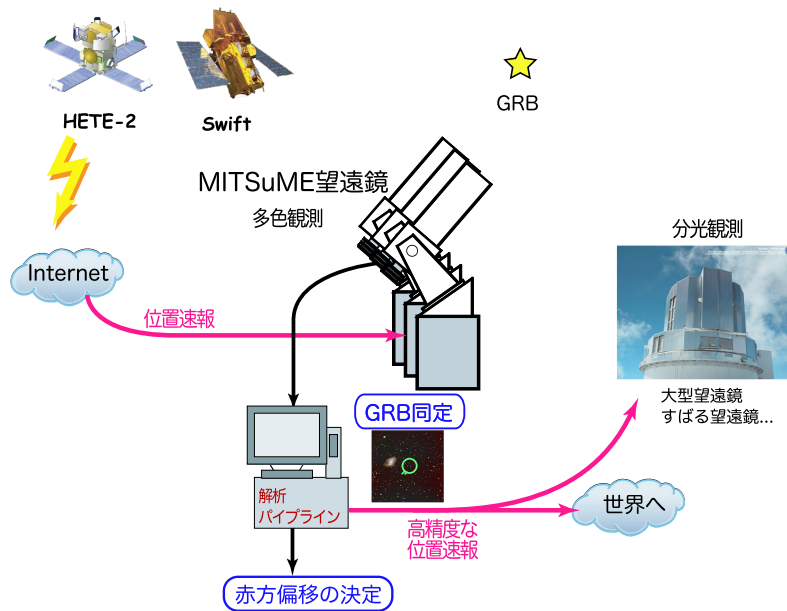


図 2.2: 残光観測全体の流れ。衛星からガンマ線バーストの位置速報を受信するとともに残光の観測を開始する。バーストを同定し、大型望遠鏡へ速報し、分光観測を行う。

2.2 観測システムの概要

2.1 で述べた MITSuME プロジェクトの目標を達成するため、本研究では、明野 50cm 望遠鏡による自動観測システム、自動画像解析システムの開発を行った。

いつ発生するか分からないガンマ線バーストを人手を使って発生直後から観測すること

は難しいため、人手を介入しない自動観測システムは有効な方法となる。

我々の観測から大型望遠鏡による分光観測へとつなげていくためには、観測のみをガンマ線バースト発生直後に行うだけでは不十分である。観測と同時に解析を開始し、即時にその位置を正確に特定しなければならず、これが可能となることで、大型望遠鏡でガンマ線バーストの早期観測を行うことが実現する。

このため、ガンマ線バーストの位置を即時に特定するために観測データを取得した直後から解析処理を自動的に行う。

明野 50cm 望遠鏡では、以上のようにガンマ線バーストを即時、無人で観測し、その位置を特定するためのシステムを開発している。

このシステムは、大きく分けて以下の3つの機能に分けることができる。

自動観測システム ガンマ線バースト発生した際に HETE-2 衛星、Swift 衛星からくる位置速報を GCN(GRB Coordinate Network) を通して受け取り、自動的に望遠鏡の視野中心にガンマ線バーストを導入するシステム。望遠鏡、ドームの制御、CCD カメラによる撮像などを行う。

解析パイプライン 観測した画像から自動的に天体を抜き出し、恒星カタログと照合することで、画像に天球座標の情報を書き込む。さらに、画像に対して測光を行う。以上の自動画像解析システムを解析パイプラインと呼ぶ。

データベース 取得した画像を効率的に検索、参照できるようデータベースへ登録する。データベースは web を利用することで、ユーザから簡単に検索することが可能であり、さらに、QL(Quick Look) 画像によるサムネール表示、複数枚の画像を利用したムービー機能といった、観測支援としての機能を提供する。また、SMOKA¹ への自動登録機能を持つ。

本研究で開発を行った自動観測システムについて第3章、解析パイプラインについて第4章で詳細に述べる。データベースは解析パイプラインと密接につながっているため、合わせて第4章で説明する。

¹Subaru Mitaka Okayama Kiso data Archive. 国立天文台が運営する日本における地上観測のデータアーカイブシステム。 <http://smoka.nao.ac.jp/index.ja.jsp>

2.3 明野 50cm 望遠鏡

本研究で使用した明野 50cm 可視望遠鏡、および検出器についてまとめる。

2.3.1 望遠鏡の仕様

明野 50cm 望遠鏡は、ガンマ線バースト残光観測用に設計したものである。可視光対応天体を探査するため、 $\sim 30^\circ$ の視野角をもつ。また、架台部はガンマ線バーストの位置速報に瞬時に対応し観測を開始することができるよう最速 $3^\circ/\text{sec}$ という高速導入が可能である。ドームは半径 2m の半球型であり、最速 40sec で 1 回転することが可能である。ドームのスリット位置は望遠鏡架台御用 PC によって鏡筒の指向方向と自動的に同期する仕組みとなっている。



図 2.3: 左図：明野 50cm 望遠鏡。カセグレン式反射望遠鏡。架台部はフォーク式赤道儀。右図：明野ドーム。

2.3.2 検出器

明野 50cm 望遠鏡では、三色同時に撮像するため、三色同時撮像カメラを開発し使用している。ダイクロイック・ミラーを使用することで単一の光学系を 3 つの光線に分割し三色同時に撮像することを可能としている。3 つに分割された光束は、標準的な測光システムに準ずるため、 R_c -Band、 I_c -Band (Johnson-Cousins)、 g' -Band (SDSS²) を通し 3 台の冷却 CCD カメラに導かれる。CCD カメラは Apogee 社製 Alta U6 を採用し、これを Linux PC と USB 接続することで使用している。

²Sloan Digital Sky Survey. <http://www.sdss.org/>

表 2.1: 明野 50cm 望遠鏡の仕様

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' ^a
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

^aチップサイズが 24.6mm の場合

表 2.2: Apogee 社製 冷却 CCD カメラ Alta U6 の仕様

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 ⁻
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

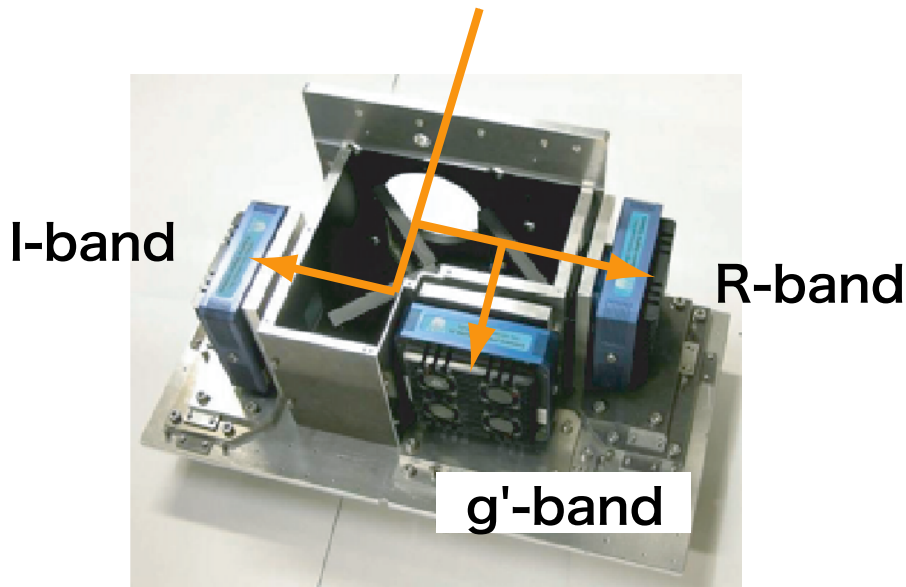


図 2.4: 三色同時撮像カメラ。内部に2枚のダイクロイック・ミラーを持ち光束(図中のオレンジ色のライン)を3方向へ分割する。3方向に分割された光は3台のCCDカメラに入射する。

2.3.3 監視システム

明野 50cm 望遠鏡による観測は、現地におけるキャリブレーション観測を除き、無人運用あるいは遠隔操作で行われる。現地における観測と違い、遠隔地からの観測では観測者の得られる情報は減り、また観測者が可能な行動に制限がかかる。この制限を可能な限り取り除くため、我々は様々な監視システムを設置している。

遠隔地の望遠鏡を操作するため、望遠鏡およびドームの動作を監視するカメラを設置している。ドーム内に3台、ドーム外に1台ある。この監視カメラの画像は大岡山キャンパスからWEBを通して常に見ることができるようになっている(図 2.5)。

大岡山からの遠隔操作による観測を行う場合、肉眼による天候確認ができない。このため、ドーム外に雨滴センサーを設置し、観測中にこれが雨滴を検知した場合、ドームを閉じる仕組みとなっている。また観測天域に雲がかかっているかどうかをリアルタイムに確認できるようにするため、鏡筒横に望遠鏡の視野を捉えるカメラを設置している。この映像はWEBから見ることができ(図 2.6)。このWEB上では、視野カメラの映像と伴に気象情報、望遠鏡の状態を閲覧できるようにしている。

この他に、計算機とドームスリットはUPS(Uninterruptible Power Supply、無停電電源装置)に接続することで、停電時にはシステムを安全に終了することが可能となっている。

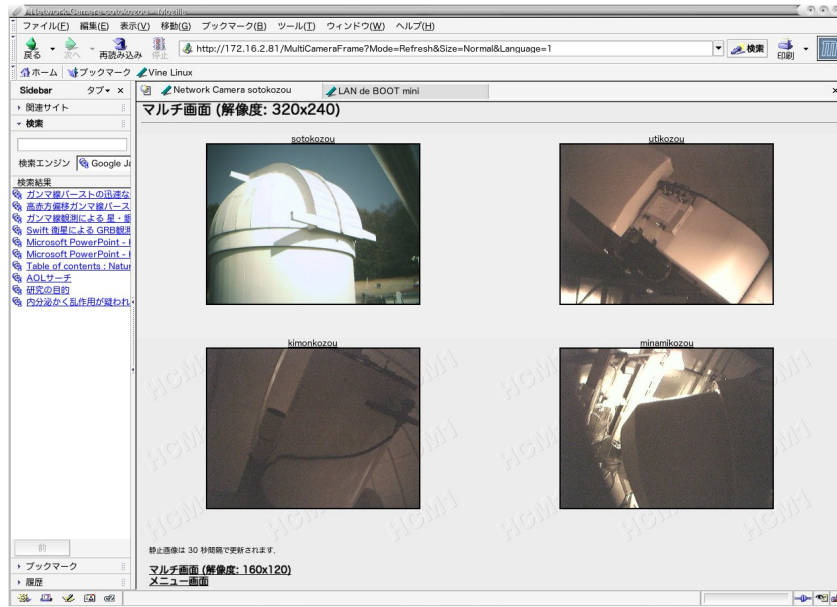


図 2.5: 監視カメラの映像。左上図：屋外カメラ。その他の図：屋内カメラ。

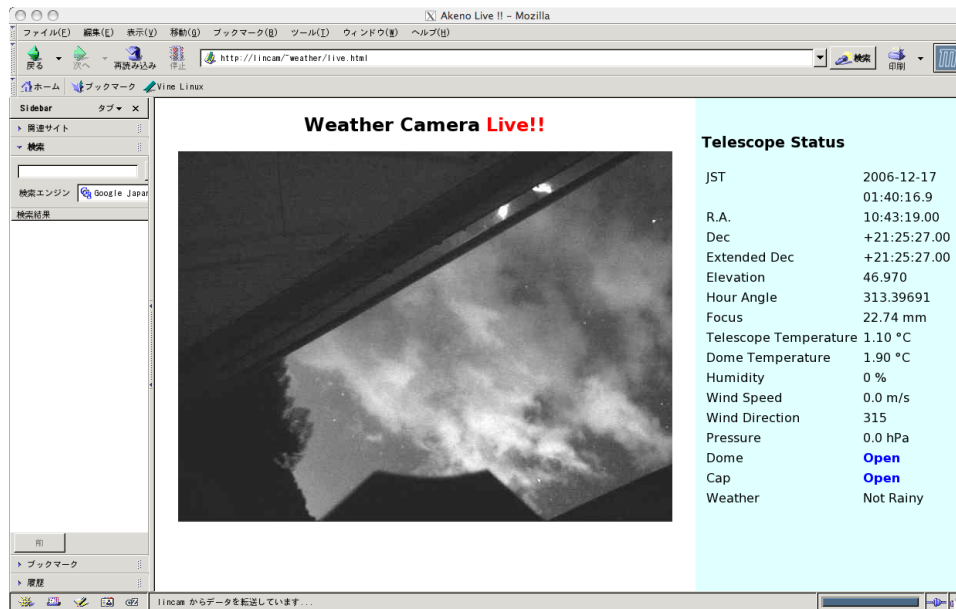


図 2.6: 視野カメラの WEB ページ。望遠鏡の視野を含む天域の映像をリアルタイムに表示する。明るい天体と雲が識別可能である。映像の右側には気象情報、望遠鏡の状態をリアルタイムで表示する。

また、CCD カメラ、ドーム内電灯、一部の計算機はネットワークを利用した遠隔操作によって電源の ON/OFF が可能となっている。

2.4 GCN 情報 WEB ページ

ガンマ線バースト発生時に、観測者がそのバーストの情報をすぐに取得できる必要がある。これは残光の即時発見には非常に重要となる。

我々は迅速に情報を取得できるよう、GCN を受信後自動的にそのバーストの情報を閲覧できる WEB ページを作成するようにしている (図 2.7)。この WEB ページには、バーストの座標情報、明野における Elevation Map³、Finding chart⁴、各種測光カタログへのリンクが自動的に作成され、アクセスできるようになっている。また、この WEB ページができると同時に観測者には GCN の情報がメールで送信されるようになっている。

³横軸に時刻、縦軸にバーストの高度をとった図。バーストの高度の時間的変化が一目でわかる。

⁴バーストを含む天域の過去の観測画像。過去の画像とバーストの画像を比較することで未同定天体を発見することが容易となる。

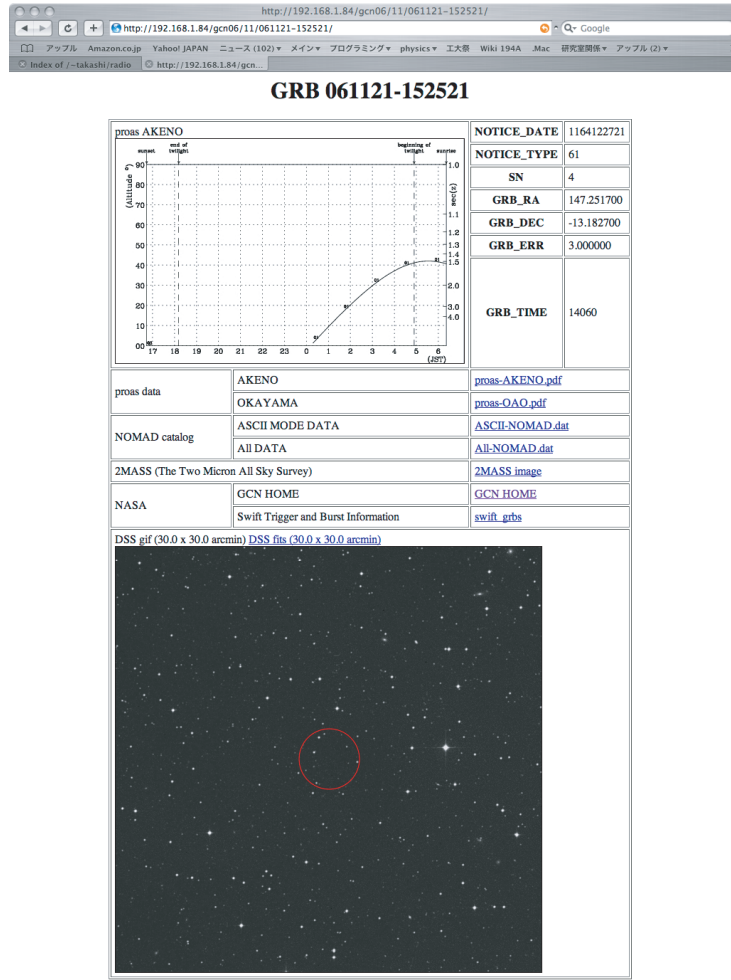


図 2.7: GCN 情報 WEB ページ。GCN を受信すると各ガンマ線バースト毎に自動的に WEB ページが作成される。図は GRB 061121 のページ。左上段: Elevation Map、右上段: 位置情報、中段: 各種測光カタログへのリンク、下段: Finding chart となっている。

第3章 自動観測システム

この章では、ガンマ線バーストの早期残光を観測するための自動観測システムについて述べる。この自動観測システムへの要求、それに応える設計とその実装について説明する。

3.1 自動観測システムの設計

自動観測システムのコアとなる制御ソフトウェア telcon について説明する。

telcon は、そもそも RIBOTS(理研美星 Optical Transient Seeker)、東工大 30cm 望遠鏡でガンマ線バーストを自動観測を行うために開発されたソフトウェアであり、明野 50cm 望遠鏡で使用できるよう改良したものである。明野 50cm 望遠鏡で使用されている telcon はソースコードの行数にして1万行程度のソフトウェアであるが、このうち、東工大 30cm 望遠鏡で使用していたコードを再利用している部分は100行以下である。このため、東工大 30cm 望遠鏡で使用していた telcon と目標は同じところにあるが、設計思想を含めプログラムとしてはかなり異なるものになっている。

明野 50cm 望遠鏡では、以下の項目に分けて telcon の設計を行った。

- 望遠鏡、三色同時撮像カメラの制御
- ガンマ線バースト自動観測への対応
- 遠隔操作への対応

以下では、上記が要求するところについて述べ、これを実現するにあたっての設計と実装方法について説明する。

望遠鏡、三色同時撮像カメラの制御

telcon に対し、第一に要求されるのは望遠鏡と三色同時撮像カメラを円滑に制御できることである。望遠鏡、三色同時撮像カメラを独立して制御できることはもちろんである

が、実際の天体観測ではこれらを連携して操作しなければならない。特にガンマ線バーストを観測する場合、望遠鏡とカメラの協調動作は重要であり、ガンマ線バーストを視野に入れるや否や三色同時撮像カメラによる撮像を開始できるような設計にしなければならない。協調動作を見通し良く実現するためには、望遠鏡制御部分の関数とカメラ制御部分の関数が独立された形で実装されていることが望ましい。

次に要求されることは、本研究の telcon は明野 50cm 望遠鏡による自動観測を目指して開発を行っているものだが、将来的に岡山 50cm 望遠鏡、岡山 91cm 望遠鏡、さらには東工大 30cm 望遠鏡での使用も視野に入れプログラムを開発することである。このため、最低限の変更で複数の望遠鏡を制御することが可能であり長期的に拡張、保守することも可能なプログラムにしていく必要がある。

最後は、CCD カメラ制御部分を CCD 台数の変更に対し柔軟性の高いプログラムとすることである。明野 50cm 望遠鏡では、三色同時撮像カメラを用いるため CCD カメラの台数は 3 台と決まっているが、ここで開発したプログラムを他の望遠鏡で使用することを考えた場合、使用する CCD カメラの台数の変更に対応しなければならない。

以上の要求から、独立性が高く階層化されたコンポーネントの組合せとして telcon を設計することが望ましいと思われる。このため、開発言語として C++ を採用し、オブジェクト指向に則り、望遠鏡、CCD 制御部分などプログラム内の各コンポーネントを独立したクラスおよびオブジェクトとして記述することとする。

ガンマ線バースト観測への対応

明野 50cm 望遠鏡は GCN に対応しガンマ線バースト残光を観測する。

早期残光を観測する望遠鏡の制御ソフトウェアを設計する上で考慮しなければならないことは、GCN からガンマ線バースト座標情報を取得したと同時に望遠鏡を導入し導入完了後にすぐに撮像を開始できることである。上で述べたように望遠鏡と CCD カメラの協調動作は必須であるが、GCN 情報にも即座に対応し他の器機を制御できる仕組みを持たせなければならない。

このような非同期イベントを互いに監視し協調動作させる方法としては、UNIX シグナル、プロセス間通信、スレッドを利用する方法などがあるが、telcon では、この中でもっともプログラム構造が単純となるスレッドを使用することにした。

スレッドとは、1つのプロセス内部において論理的に並列処理を行う単位をいう。スレッドは、内部に並列して処理するイベントを含んだプログラムを自然に表現することに向い

ており、telcon のように、望遠鏡の操作、CCD の操作、GCN の監視など、複数の処理が並列して走るプログラムの記述に適している。

特に telcon では、Linux 上で動作させることが要求されているため、POSIX(Portable Operating System Interface) で規定された Pthreads を利用する。Linux の GNU C ライブラリでは、LinuxThreads として実装されている。

遠隔操作への対応

明野 50cm 望遠鏡は東工大大岡山キャンパスから離れた東大宇宙線研明野観測所に設置されている。このため、遠隔操作による観測が可能でなければならない。最終的な目標は前に述べたようにガンマ線バースト残光の自動観測を行うことであるが、キャリブレーション観測やガンマ線バースト以外の天体を観測することを考慮し、telcon は遠隔操作による観測を行う機能を提供しなければならない。

セクション 3.3 で説明するが、我々のシステムでは、遠隔操作は架台制御 PC にインストールされた Windows 2000 上で動作するプログラム ATLAS 2000 を使用して行うことが可能である。しかし、ATLAS 2000 を使用し観測すると、telcon による自動観測と ATLAS 2000 を使用した遠隔操作観測の 2 系統で制御ができることとなり、観測器機を telcon によって一元管理することができずこれらを協調動作させることが非常に困難になる。そこで、明野 50cm 望遠鏡用 telcon では、ガンマ線バーストに対応した自動観測モードの他に、遠隔操作による観測のためのユーザインターフェースを提供することとした。

遠隔操作を実現する方法としては、クライアントサーバモデルを採用した。クライアントサーバモデルとは、処理を要求するクライアントといわれるプログラムとクライアントからの要求を受けて処理を行うサーバというプログラムの 2 つに分するモデルである。この手法は、Web システム、mail システムなど多くのプログラムで利用されている。

telcon で、クライアントサーバモデルを用いる大きな利点は、望遠鏡、CCD カメラなど全ての器機は、サーバである telcon を通して制御され、全ての観測器機の制御を一元管理することが可能な点である。また、サーバである telcon が複数のクライアントからの接続を可能にすることによって、複数のユーザによって同時に観測を行うことができる。

以上の要件を満たすために、明野 50cm 望遠鏡を制御する telcon は、次の方針で開発を行うこととした。

- オブジェクト指向の導入。C++ を利用しオブジェクト指向を利用することで、望遠

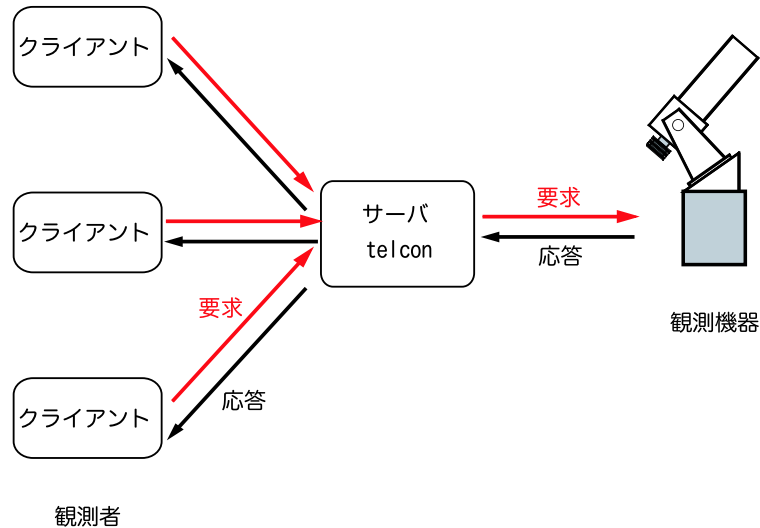


図 3.1: telcon におけるクライアントサーバモデルの概略図。サーバプログラムである telcon のみが望遠鏡、CCD カメラなどの観測器機を制御する。遠隔操作による観測をする場合、クライアントはサーバである telcon を通して観測器機を制御することになる。

鏡、CCD カメラなど各コンポーネントの独立性を高めたプログラムとすることが可能であり、保守性、拡張性に優れた設計が可能となる。

- スレッドを利用することで、非同期イベント、協調動作を実現する。
- ガンマ線バースト自動観測モードの他に、遠隔操作による観測を可能とする機能をクライアントサーバモデルによって実現する。

3.2 自動観測制御ソフトウェアの概要

ここでは開発した自動観測制御ソフトウェア telcon の内部構成について説明する。

図 3.2 に示すように telcon は望遠鏡制御、CCD 制御、GCN 監視などの複数のコンポーネントからできておりこれらを協調動作させることにより観測を行う。telcon プログラム内では、C++ のクラスから生成されたオブジェクトとして実装されている。

図 3.2 の各コンポーネントについて説明する。

望遠鏡制御コンポーネントは架台制御 PC と通信し、望遠鏡、ドーム、キャップを制御する。他のコンポーネントが観測器機にコマンドを送る場合、望遠鏡制御コンポーネントが提供する関数を呼び出すことで、その関数に対応したコマンドが架台制御 PC へ送信され、望遠鏡へ渡される。

CCD 制御コンポーネントは、3 台の CCD に対応するため、3 つのオブジェクトからできている。CCD へのコマンドはこのコンポーネントを仲介し、CCD 制御コンピュータへ送信される。

自動観測制御コンポーネントは GCN 監視から GCN 情報を渡されると、それに基づき、CCD 制御、望遠鏡制御に命令を送りガンマ線バースト残光の観測を開始する。この処理に加え、観測前後のドームの開閉、キャップの開閉など観測のために必要な毎晩のルーチン作業を行う。

GCN 監視コンポーネントは GCN 情報を監視し、これを受け取ると自動観測制御に知らせる。GCN 情報は、GCN 受信 PC を経由して受け取る。

遠隔操作インターフェースコンポーネントは、クライアント PC で動作するクライアントソフトウェアと通信を行い、望遠鏡制御、CCD 制御へのコマンドを受け付ける。

気象監視コンポーネントは、気象モニタ用 PC から気象情報を取得する。天候を監視し、必要があれば望遠鏡制御へ命令を送信する。例えば、雨天の場合はドームを閉じる命令を送信することになる。

telcon は以上の 6 種類のコンポーネントからできており、これらがお互いに協調動作することで観測器機を制御している。

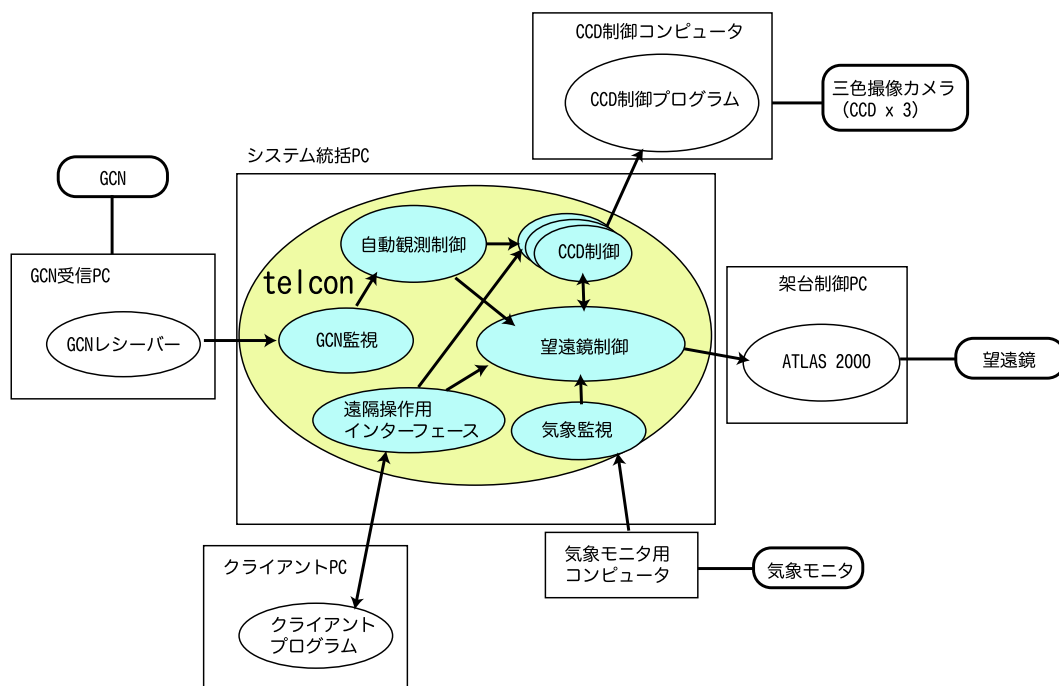


図 3.2: telcon の内部構造。

3.3 望遠鏡の制御

ここでは telcon による望遠鏡の制御について説明する。

3.3.1 望遠鏡制御の概要

telcon による望遠鏡の制御は架台制御 PC を通して行われる。

架台制御 PC には、Windows 2000 上で動作するプログラム ATLAS 2000 が入っており、ATLAS 2000 が架台制御 PC に接続されたインターフェースボックスを通して架台を制御する。

ATLAS 2000 は、図 3.3 のような Graphical User Interface(GUI) をもつ。ALTAS 2000 による望遠鏡の制御は、図 3.3 の GUI を使用方法とシリアル通信を使用する方法が提供されている。

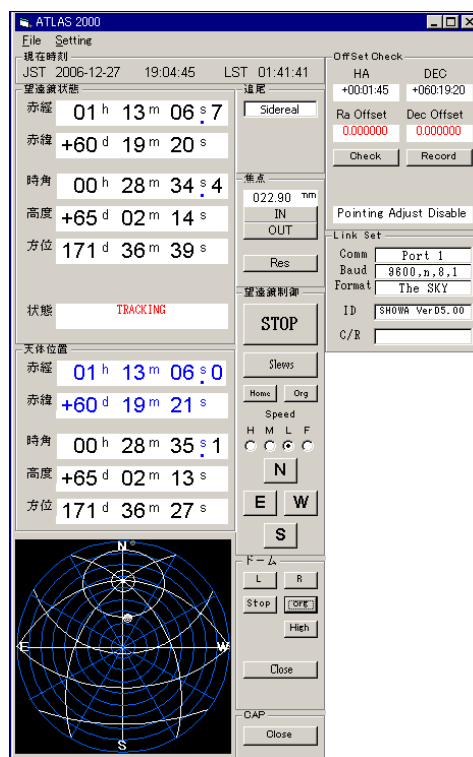


図 3.3: ATLAS 2000 の GUI。架台制御 PC にインストールされている。

telcon では、シリアル通信を使用し ATLAS 2000 にコマンドを送信しそこから望遠鏡を制御する方式を採用している。そもそも ATLAS 2000 の GUI は人間による操作を前提

に作られているため、外部から別のプログラムで操作し自動観測を行うことは非常に難しい。

3.3.2 望遠鏡制御の階層構造

telcon では、望遠鏡制御を行うプログラム部分で階層構造を設けている。

階層構造の概要を図 3.4 に示す。望遠鏡制御部分は、コマンド層、補正関数層、バッファ層、シリアル通信層から構成されている。コマンド層が telcon 内部で使用している高水準な関数を提供する層であり、自動観測制御など他のコンポーネントはこの階層にアクセスする。シリアル通信層は ATLAS 2000 との通信を担う。

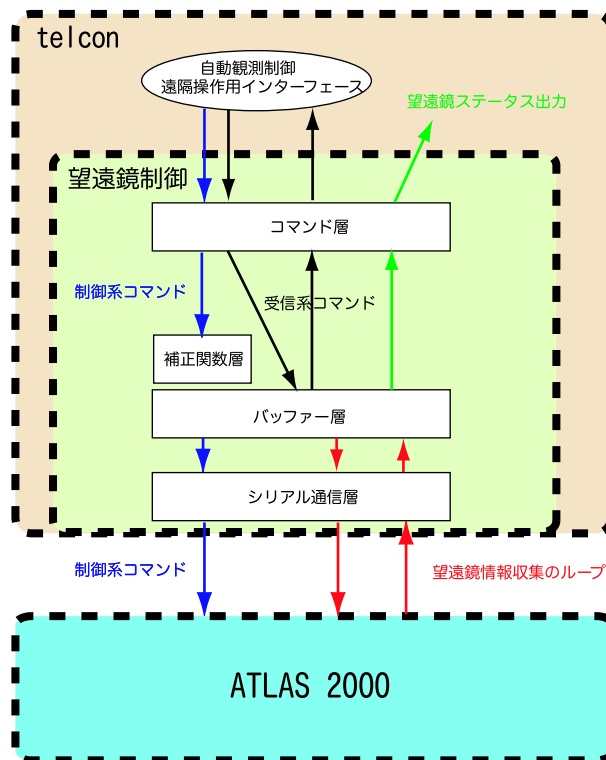


図 3.4: 望遠鏡制御の階層構造の概略図。上部が自動・手動観測のための高水準な関数を提供する層で、最下部で直接望遠鏡を制御することが可能な低水準な関数を提供する。矢印は各層間の通信を表し、黒、青、緑、赤はそれぞれ非同期に通信が行われる。

このような階層構造を設けることの利点としては、以下を挙げることができる。

- ATLAS 2000 のシリアル通信コマンドと telcon が内部で使用する関数の分離。将来的に、岡山望遠鏡やその他の望遠鏡への移植することを考えており、階層構造を設けることで、シリアル通信層の変更のみで移植することが可能となる。

- シリアル通信による全体の通信速度低下の影響の防止。ソケット通信と比較するとシリアル通信の通信速度は遅い。このため、シリアル通信と他の通信を非同期に行わせることによって、telcon と望遠鏡間の通信速度を全体として高速化することが可能である。

この階層構造により通信速度が高速化されたことによって、ディザリングの機能を telcon は提供することが可能となった。ディザリングに関しては、3.9 を参照して欲しい。

次に、具体的に各階層の役割について説明する。

コマンド層

コマンド層は、望遠鏡を制御するコンポーネントの階層のうち、もっとも上位の階層である。

コマンド層の役割は、ATLAS 2000 が提供する望遠鏡を制御する複雑なシリアルコマンドを簡潔な関数として提供することである。自動観測制御、遠隔操作用インターフェースのコンポーネントは必ずこの階層で提供されている関数を用いて望遠鏡を操作する。

一例を挙げれば、指定した赤経 (alpha)、赤緯 (delta) を望遠鏡の視野に導入する場合、

```
int goTo(double alpha, double delta);
```

という関数を使用すればよい。

コマンド層で提供されている関数は2つに分類することができる。制御系コマンドと受信系コマンドである (図 3.4 参照)。

制御系コマンドとは、望遠鏡、ドーム、キャップなどを操作するコマンドをいう。このカテゴリーに含まれる関数には、望遠鏡の移動・停止コマンド、望遠鏡移動スピード変更コマンド、ドーム開閉コマンド、キャップ開閉コマンド、フォーカス値設定コマンドがある。

受信系コマンドとは、望遠鏡の現在の指向方向、雨滴センサーの値などを取得するコマンドをいい、制御系コマンドのように観測器機に対して操作を行わない。このカテゴリーに含まれる関数は、望遠鏡の赤経・赤緯・方位角・仰角・時角の取得コマンド、望遠鏡のスピード取得コマンド、ドーム開閉状態取得コマンド、キャップ開閉状態取得コマンド、雨滴センサーの値取得コマンド、フォーカス値の取得コマンドがある。

コマンド層は、関数を提供するだけでなく、望遠鏡へ送信されるコマンド、望遠鏡の出力する値を監視している。これはユーザによる不正な操作による観測器機の故障などを

未然に防ぐためである。コマンド層が監視している値とそれに対する対応は以下の通りである。

望遠鏡の仰角 望遠鏡の仰角が 10 度以下になると ATLAS 2000 により望遠鏡が停止される。これをソフトウェアリミットと呼ぶ。何かしらの原因によってソフトウェアリミットが ATLAS 2000 によってかからず望遠鏡の仰角が 0 度以下とになった場合には望遠鏡に取り付けられた傾斜センサーが作動し緊急停止する。これをハードウェアリミットと呼ぶ。ハードウェアリミット状態になると現地作業によって復旧する必要がある。telcon では、これらを未然に防ぐため、望遠鏡の仰角が 15 度よりも低くなる座標を視野に導入しようとするエラーとし、導入しない。また、恒星を追尾したことによって、望遠鏡の仰角が 15 度以下になった場合は、望遠鏡をホームポジション¹へ向ける。

ドームの開閉 ドームは観測時に開け、観測を行わないときに閉じているのが基本的な動作である。特に日中はドーム、キャップともに開いていると望遠鏡の反射鏡により火災が発生する可能性があるので十分注意しなければならない。我々は遠隔操作を行っているため、現地で観測を行うシステムよりもこの点に関しては注意を払う必要がある。ドームを開く条件を表 3.1 にまとめる。時刻 (JST)12h-24h においてドームを開くことを許可する太陽高度が 20° となっている。観測前にドーム内の気温と外気温を等しくし、空気の対流が起こらないようにするため、観測数時間前の日没前にドームを開ける必要がある。これに対応するためである。また、雨天時は、ドームをただちに閉じなければならない。

キャップの開閉 キャップの開閉もドームの開閉とほぼ同じである。異なる点としては、観測数時間前から開ける必要がないことと、天候に左右されないことである。表 3.2 にまとめる。

この他に、コマンド層はバッファ層から望遠鏡のステータス情報と気象モニターから気象情報を収集し、これらをファイルに書き出している。この処理は図 3.4 では緑色の矢印として表されている。望遠鏡ステータスの書き出しは、コマンド送受信とは独立しているため、この処理は他の処理に影響されることなく常に行われる。バッファ層から得られる望遠鏡のステータスの詳細についてはバッファ層の項で述べる。気象モニターから得られる気象情報に関しては、3.7 で説明する。

¹ホームポジションとは望遠鏡の指向方向が天頂を向いた位置である。

表 3.1: ドームを開くことが可能な条件。時刻、太陽高度、キャップの状態、天候の条件が満たされた場合に telcon はドームを開くことを許可する。条件中の”-” は、その項目がドームを開ける際の条件とならないことを意味している。例えば、一行目は時刻 (JST) が 0h-24h で、キャップが閉じており、天候が晴れの場合、太陽高度に関わらずドームを開けることを許可することを表している。telcon は、条件を満たさない時にドームを開くコマンドが送られてもそれを実行しない。

時刻 (JST)	太陽高度	キャップの状態	天候
0h - 24h	-	閉	晴
0h - 12h	< 0	-	晴
12h- 24h	< 20	-	晴

表 3.2: キャップを開くことが可能な条件。時刻、太陽高度、キャップの状態、天候の条件が満たされた場合に telcon はキャップを開くことを許可する。条件中の”-” は、その項目がキャップを開ける際の条件とならないことを意味している。例えば、一行目は時刻 (JST) が 0h-24h で、ドームが閉じている場合、天候、太陽高度に関わらずキャップを開けることを許可することを表している。telcon は、条件を満たさない時にキャップを開くコマンドが送られてもそれを実行しない。

時刻 (JST)	太陽高度	ドームの状態	天候
0h - 24h	-	閉	-
0h - 24h	< 0	-	-

CCD 撮像時にこの出力ファイルに書かれた望遠鏡情報、気象情報が FITS ヘッダー作成に使用される (FITS ヘッダーについては 4.3 参照)。

出力項目は表 3.3 の通りである。コマンド層は、この望遠鏡のステータスを通常約 10 秒間隔でファイルへと追記していく。ただし、望遠鏡が導入中あるいはフォーカスを変更中は約 1 秒間隔で追記されていく。これは CCD カメラへ変更をリアルタイムで反映させるためである。出力ファイルの例は A.1.3 を参照して頂きたい。

補正関数層

天体観測では対象天体を高精度で視野の中心へ導入しなければならない。このため、望遠鏡の機械軸と地球自転軸を平行に合わせなければならない。しかし、実際には、架台の設置精度に限界があり、このずれをソフトウェア的に補正しなければ、高精度の導入は期待できない。

補正関数層では、コマンド層から送られてきた望遠鏡の導入コマンドの赤経値、赤緯値を補正関数を通すことで正しい値へ修正し、これを ATLAS 2000 へ送信させる。

ここで実装されている補正関数に関する詳細は 3.8 で述べる。

バッファ層

バッファ層は、その名の通り、望遠鏡と telcon の間でデータをやり取りする際にシリアル通信と telcon 内部通信の転送速度の差を補うためにデータを一時的に保存しておく記憶領域である。

コマンド層から望遠鏡へ送られる制御系コマンドでは以下の値がバッファ層に保存される。保存後、これらのコマンドは、シリアル通信層を通過して ATLAS 2000 へ送信される。

- 望遠鏡導入の赤経値、赤緯値。
- ドームの開閉コマンド。
- ドームの回転コマンド。左、右回転、停止の 3 コマンドが保存される。
- 望遠鏡の移動コマンド。東・西・南・北へ移動、停止、恒星追尾中、導入中、原点合わせ中、ホームポジションへ移動中、の 9 コマンドのうち何が実行されているかが保存される。

表 3.3: 望遠鏡のステータスファイルへの出力項目。このステータスファイルは望遠鏡の情報に加え、気象情報をもつ。

カラム	項目内容	フォーマット例	備考
1	データ形式	1	現在データ形式は1種類のみで、常に1。データ形式を追加する際に利用。
2	観測者	TAKASHI	
3	年月日	2007-01-18	UT(Universal Time、世界時)
4	時刻 JST	09:00:15.491000	JST(Japan Standard Time、日本標準時)
5	地方恒星時	17:00:18.30	明野(東経 138.4806°)における地方恒星時
6	時刻 UT	00:00:15.491000	UT(Universal Time、世界時)
7	時刻 MJD	54118.00018	MJD(Modified Julian Day、修正ユリウス日)
9	赤経値	16:58:19.00	
10	赤緯値	+88:05:37.00	
11	拡張赤緯値	+88:05:37.00	望遠鏡が北極越えた場合、90度より大きい値を示す。
12	天頂距離	52.32268952	単位：度。
13	sec(z)	1.636089083	z :天頂距離。天頂距離の secant
15	時角	0.5434974967	単位：度。
20	epoch	2000.0	
27	フォーカス値	22.7	
32	望遠鏡の温度	276.65	単位：K
33	ドーム開閉状態	0	0：閉、1：開。
34	気温	276.95	単位：K
35	湿度	66	単位：%
36	キャップ開閉状態	0	0：閉、1：開、2：開閉中。
37	雨滴センサー	0	0：雨天、1：雨天以外。
38	風速	2.7	単位：m/s
39	風向き	22.5	北を0度とし東を90度とし360度で表記。
40	圧力	919.7	単位：hPa
8,21,22	(未使用)	0	
14,16-19	(未使用)	00	
23-26,28-31	(未使用)	00	

- 望遠鏡の移動速度。4段階で移動速度が保存される。
- フォーカスの移動コマンド。フォーカス IN/OUT、停止が保存される。

バッファ層はコマンド層からくる受信系コマンドの要求に即時に対応できるよう、常に ATLAS 2000 と通信し望遠鏡に関する情報を収集する (図 3.4 の赤線)。

これによって、受信系コマンドは、バッファ層にアクセスすることで必要な値を取得することが可能となり、全体のレスポンスの向上につながっている。

この情報収集は受信系コマンドの要求とは非同期に行われる。

バッファ層が望遠鏡から情報収集して得る値は次の通りである。

- 望遠鏡が示す赤経値、赤緯値、拡張赤緯値。
- フォーカスの値。
- キャップの開閉状態。
- ドームの開閉状態。
- 雨滴センサーの状態。

これらの値は 2.0 秒毎に更新される。ただし、望遠鏡が導入中の場合、赤経値、赤緯値、拡張赤緯値が優先的に 0.1 秒毎に更新される。また、フォーカスの変更が行われた場合、ただちにその値を更新する。

シリアル通信層

シリアル通信層は、上位の望遠鏡の制御系コマンド、バッファ層によるコマンドをシリアル通信のコマンド形式に変更して送信する。

シリアル通信コマンドの詳細については A.1.2 を参照してほしい。

ATLAS 2000 によって提供されているコマンドは、戻り値から送信コマンドを判別することができないため、コマンドとその戻り値が一対一対応となることを保証する仕組みが必要となる。制御系コマンドとバッファ層による情報収集が非同期にシリアル通信へとコマンドを送信するため、互いに割り込み割り込まれる関係にある。このような中で適切に送受信が行えるよう、全てのコマンドは前のコマンドが送受信中の場合には送信を一時停止し、前のコマンドが終了後に送受信を開始する。コード内ではセマフォを利用しこれを実現している。

3.4 CCDカメラの制御

telcon による CCD カメラの制御について説明する。

三色同時撮像カメラは3台の CCD カメラをもち、これらの CCD カメラは CCD カメラ制御用 PC にそれぞれ USB 2.0 で接続されている。CCD カメラの仕様については、セクション 2.3.2 を参照していただきたい。

CCD カメラ制御 PC は Linux で動作し、CCD 制御サーバソフトウェア altad が3台の CCD カメラを制御する。CCD カメラへのコマンドは CCD 制御クライアントソフトウェア altac、altacfg から altad を通し CCD カメラへ渡される。telcon は altac、altacfg を利用し CCD カメラの制御を行っている。

altad は、オブジェクトフレーム、ダークフレーム、バイアスフレームの撮像が可能である。

オブジェクトフレームとは対象天体を撮像した画像を指し、ダークフレームはシャッターを閉じたまま適当な時間積分して得られた画像を指し、バイアスフレームはシャッターを閉じたまま 0 秒積分して得られた画像を指す。ダークフレーム、バイアスフレームはオブジェクトフレームの周辺減光やピクセル毎の感度むらを補正する一時処理に必要となる画像である。

この他には、CCD の冷却温度の設定、冷却速度の設定などを行うことが可能となっている。

altac、altacfg で利用できるコマンドの詳細については A.2 を参照してほしい。

CCD の制御部分の構造は単純であり、telcon は自動的に画像ファイル名を連番ファイルとしたり、3台が必ず同時に撮像されたりするような簡単な仕組みを提供している。

CCD カメラ制御コマンドのうち、ガンマ線バーストを観測する上で重要となってくるのは、撮像を途中でキャンセルすることができる 'Abort' コマンドを提供している点である。明野 50cm 望遠鏡はガンマ線バーストを観測していない時は、キャリブレーション観測あるいは一般の天体を観測する。このため、ガンマ線バースト発生時に他天体の観測を行っている可能性がある。'Abort' コマンドが提供されていることによって、ガンマ線バーストが発生した場合、直前の観測をすべて中止しただちにガンマ線バーストの撮像を開始することが可能となっている。

3.5 ガンマ線バーストの自動観測

次に、telcon によるガンマ線バーストの自動観測の方法について述べる。

3.5.1 ガンマ線バースト位置情報の取得

我々は、大岡山に設置された GCN²受信 PC を用いて NASA ゴダード宇宙飛行センターとソケット通信を行い GCN を受信し、この情報を明野へ送信し、これをもとに明野 50cm 望遠鏡の導入を行っている。

我々は、GCN 受信 PC で取得した GCN データを以下の形式で明野へ送信している。

```
NOTICE_DATE 1166183089
NOTICE_TYPE 61
SN          3
GRB_RA     240.23
GRB_DEC    30.0
GRB_ERR    0.072000
GRB_TIME   14060
RATE_SIG   18.46
IMAGE_SIG  0.00
COMMENTS   SWIFT GRB POSITION
SOLN_STATUS 1
```

それぞれのキーワードが示す値は表 3.4 の通りである。

3.5.2 自動観測の流れ

自動観測開始から残光観測までのシステムの流れは次の通りである。

1. 東工大大岡山キャンパス内に設置された GCN 受信 PC が NASA からの GCN をソケット通信を用いて接続し、パケットを監視する。
2. 新たな GCN が送られて来た場合、GCN 受信 PC で動作しているプログラム `gcn_receiver` が明野に設置されたシステム統括 PC へ上で示した形式の GCN 情報を送信する。
3. telcon は `gcn_receiver` によって送られて来る GCN 情報をもとに望遠鏡の視野中心にバーストを導入する。

²The Gamma ray bursts Coordinates Network。Swift、HETE、INTEGRAL などの衛星が検出したバーストの位置情報を発生直後に即時に GRB コミュニティーに知らせる。

表 3.4: GCN データ形式

キーワード	
NOTICE_DATE	バースト検出時刻。1970/01/01 00:00:00 UTC からの経過秒 (UNIX 時) で表記。
NOTICE_TYPE	GCN のパケット形式番号。GRB を検出した衛星、検出器によって決まる。 現在使用している形式： HETE による位置情報 (43) Swift BAT による位置情報 (61) Swift XRT による位置情報 (67)
SN	各日に起こった GRB のシリアル番号。
GRB_RA	GRB の赤経。単位：degree。
GRB_DEC	GRB の赤緯。単位：degree。
GRB_ERR	エラーサークルの半径。単位：arcmin。
GRB_TIME	バースト発生日。TJD(Truncated Julian Day) で表記。
RATE_SIG	GRB 検出した rate trigger の S/N。
IMAGE_SIG	GRB 検出した image trigger の S/N。
COMMENTS	コメント
SOLN_STATUS	検出されたソースの種類番号。以下の値を取る。 0x001 : Point source 0x002 : Definite GRB 0x004 : Interesting source 0x008 : Known source 0x010 : Image trigger 0x020 : Definitely not a GRB 0x040 : Probably not a GRB. High BG 0x080 : Probably not a GRB. Low S/N 0x100 : Known source 0x200 : Definite XRB 0x400 : Definite AGN 0x800 : Unidentified

4. 導入終了と同時に、CCD 制御 PC を通して CCD の撮像を開始し、バーストが観測可能な高度にある限り、これを撮像し続ける。

GCN 受信時にガンマ線バースト以外の天体を撮像していた場合であっても、そのタスクはその時点で終了され、ガンマ線バーストの撮像が最優先されるようになっている。

3.5.3 ガンマ線バーストの重要度

ガンマ線バーストは一日に一回程度発生するため、一晩に 2 つ発生することがある。このような複数個のガンマ線バーストに対応するため、ガンマ線バースト毎に「重要度」を計算し、この値が大きいガンマ線バーストから観測するようにしている。

ガンマ線バーストの重要度は

$$I = \frac{I_0}{t - t_0} - \frac{I_0}{2} \quad (3.1)$$

にしたがって観測される。

上式のうち I_0 は表 3.5 に従って加算され計算される。例えば、`SOLN_STATUS = 0x002`、`RATE_SIG = 13.37`、`IMAGE_SIG = 7.21`、月との離隔が 10 度である場合、 I_0 は、

$$I_0 = +2 + 2 + 1 + 0 = 5$$

となる。

ガンマ線バースト残光の明るさは、典型的には時間に反比例することを考慮して、重要度 I も時間に反比例し減衰していくと都合がよい。上式のうち、 t は重要度の計算を行った時刻 (単位:MJD)、 t_0 はバーストの発生時刻 (単位:MJD) とする。これによって、発生から時間が経過するほど、ガンマ線バーストの重要度 I は減少することになる。

`telcon` は、ガンマ線バーストが地平線よりも上にあり、かつ重要度 I がもっとも高いガンマ線バーストから優先して観測を行うこととしている。

3.6 一晩の観測の流れ

ガンマ線バーストを自動観測する上で、望遠鏡をガンマ線バーストに向ける機能のみを自動化するだけでは不十分である。ガンマ線バーストを観測するための準備として、ドームの開閉、キャップの開閉、キャリブレーションで使用するダークフレームの撮像などを自動化する必要がある。

表 3.5: ガンマ線バーストの重要度 I_0 。

項目	条件	重要度 (加算)
SOLN.STATUS	0x001 : Point source	+1
	0x002 : Definite GRB	+2
	0x004 : Interesting source	+1
	0x008 : Known source	+1
	0x010 : Imaging trigger	+1
	その他	+0
RATE.SIG	$RATE.SIG \leq 3$	+0
	$3 < RATE.SIG \leq 5$	+1
	$RATE.SIG > 5$	+2
IMAGE.SIG	$IMAGE.SIG \leq 7$	+0
	$IMAGE.SIG > 7$	+1
月との離隔 θ	$\theta < 20^\circ$	+0
	$20^\circ \leq \theta < 30^\circ$	+1
	$\theta \geq 30^\circ$	+2

このため telcon では、自動観測制御コンポーネントがこれらの毎日のルーチ的な作業を自動的に行う。

一晩の観測が telcon によってどのように管理されているか図 3.5 にまとめる。夕刻、太陽高度 θ_{sun} が $\theta_{sun} < 15^\circ$ になると、ドームを開き、CCD の冷却、望遠鏡をホームポジションへ向ける。日没前からドームを開くことでドーム内の気温を外気温と同じにしている。続いて、 $\theta_{sun} < 10^\circ$ となった段階でダークフレームの撮像を行う。ダークフレームはキャリブレーションを行うために必要となるため、必ず毎日の観測開始前に撮像される。 $\theta_{sun} < 0^\circ$ 、すなわち日没になると観測を開始できる状態となる。晴天の場合、GCN への対応と共に自動観測、手動観測が行える。これに対して、雨天の場合は、GCN の確認のみ行っている。観測を続け、明け方、 $\theta_{sun} > -5^\circ$ となると、telcon はドーム、キャップを閉じ、CCD の冷却温度を上げ、望遠鏡をホームポジションへ移動し、観測を終了する。

一晩の観測の流れを telcon が管理することは、ガンマ線バーストの自動観測においては必須である。また、手動で遠隔操作によって観測する上でもこのような仕組みは効果的で、遠隔操作でキャリブレーション観測などを行った場合も観測者は観測終了まで立ち会う必要がなくなる。

将来的には、この観測スケジュールの中にフォーカス合わせを入れ、観測開始時点ではフォーカスまでもが合っている状態にしたいと考えている。

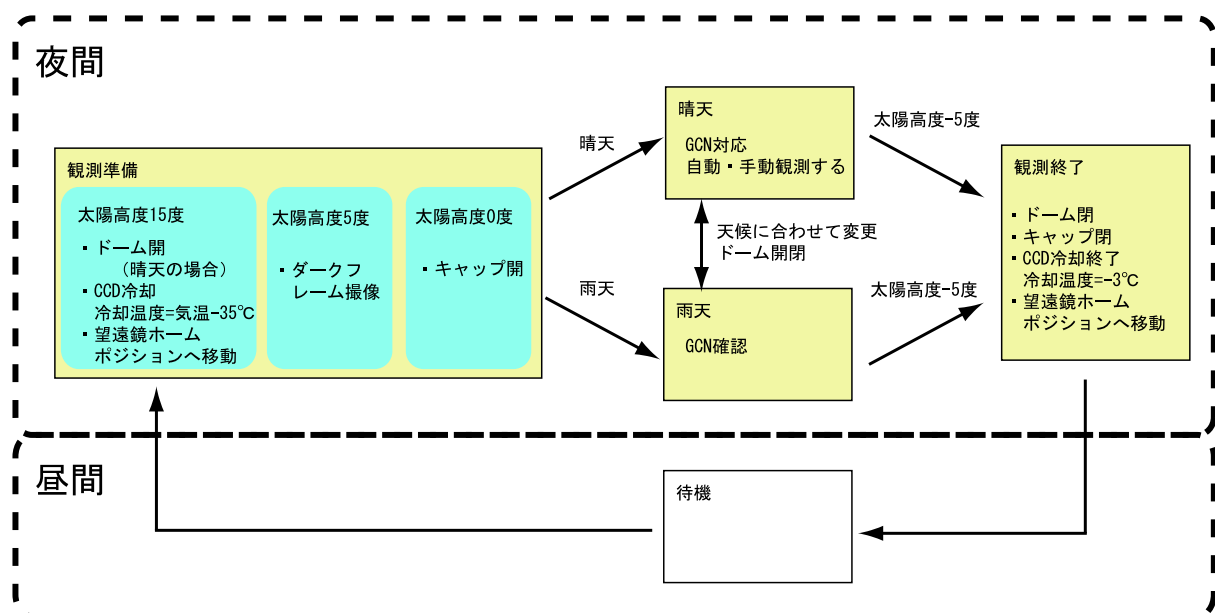


図 3.5: 一晩の観測の流れ。

3.7 気象モニタからのデータ取得

観測時の気象情報は観測条件という理由から取得すべきであることはもちろんであるが、ベストフォーカス、シーイングなど観測条件の様々なパラメータと気温、湿度などの気象パラメータの相関を調べるためにも、これらの気象情報を撮像データとともに保存することが重要となってくる。

我々は気象情報を測定するために Weather Monitor II を使用している。Weather Monitor II を利用し、時刻、室内気温、鏡筒温度、室内湿度、風速、風向、気圧を測定している。これらのパラメータの測定範囲について表 3.6 にまとめる。

表 3.6: 明野 50cm 望遠鏡で測定している気象情報。

パラメータ	範囲	備考
時刻		
室内気温	0 – 60°C	
鏡筒気温	–45 – 60°C	屋外温度センサーを鏡筒に密着させ測定。
室内湿度	10 – 90%	
風速	0.0 – 56.0m/s	
風向	16 方位	
気圧	880.0 – 1080.0hPa	

Weather Monitor II で測定されたデータは、RS-232C ケーブルで接続された Windows PC 上で動作する WeatherLink を利用して読み出される。データは 1 分毎に WeatherLink によって読み出され、そのデータをスクリプトを利用し整形し ASCII 形式で蓄積している。telcon は、この ASCII データを読み取ることで気象情報を取得している。

気象データの ASCII ファイルの形式は A.1.4 を参照してほしい。

3.8 望遠鏡導入の補正関数の決定

ここでは telcon 内部で使われている望遠鏡の視野導入の補正関数について説明する。

望遠鏡を用いて天体観測する際に、架台の特性を理解することは非常に重要である。これは、望遠鏡の光学性能を最大限に引き出すためには光学系の分解能と同じ制度で架台を制御しなければならないからである。

特に対象天体を高い精度で望遠鏡の視野中心に入れることは天体観測では不可欠であり、この導入精度を上げるためには架台の設置精度、すなわち望遠鏡の機械軸と地球自転軸を平行に合わせる極軸合わせの精度を向上する必要がある。しかし、実際には一度設置した架台を精度良く機械的に調整することは困難であるため、導入精度を向上するためにはソフトウェア的に補正を行う必要がある。

我々は望遠鏡の機械特性を反映した座標の補正式を決定するために TPoint³を使用した。TPoint は望遠鏡のメカニカルモデルに基づき補正式を求めることが可能である。また、天体の高度、気温、気圧、湿度、観測波長に依存した大気差についても考慮される。

3.8.1 データ取得のための観測

観測可能な全天域を赤経方向 1h、赤緯方向 10° 毎に導入し撮像を行った。フレーム毎の露出時間は 30 秒とした。これは大気によるゆらぎを平均化するためである。

導入座標の補正式を求めるため、架台から得られる望遠鏡の未補正の赤経、赤緯と撮像して得られた画像から求められる実際の視野中心の赤経、赤緯を取得した。撮像した画像を解析パイプライン(第 4 章参照)に通すことで、恒星カタログ USNO-2.0 A と比較を行い WCS(4.4 参照) を決定し、視野中心 $(x, y) = (512, 512)$ を鏡筒の指向方向とした。

ここでは、赤経、赤緯の値を取得しているが、機械特性、設置位置の補正式は赤経、赤緯ではなく、観測時刻に依存しない時角、赤緯をパラメータとして表される。このため、TPoint による補正式の決定の際には、観測時の地方恒星時を利用して赤経、赤緯から時角、赤緯に変換を行って利用している。

TPoint に渡しているデータフォーマットは A.1.5 を参照されたい。

3.8.2 補正関数

一般的な赤道儀において、恒星の導入は赤道儀のメカニカルモデルに基づく基本器差補正式と経験的な補正項によって補正される。

基本器差補正式

基本器差補正式は、赤道儀のメカニカルモデルに基づき以下の係数を持つ。

IH : 赤経軸エンコーダゼロ点エラー

³<http://www.tpssoft.demon.co.uk/>

ID :赤緯軸エンコーダゼロ点エラー

NP :赤経・赤緯軸の軸非直交性

CH :赤経方向のコリメーションエラー

ME :極軸の elevation 方向のずれ

MA :極軸の azimuth 方向のずれ

HCES :赤経軸センタリングエラーの sin 成分

HCEC :赤経軸センタリングエラーの cos 成分

DCES :赤緯軸センタリングエラーの sin 成分

DCEC :赤緯軸センタリングエラーの cos 成分

DAF : 赤緯軸のたわみ

時角の補正項 Δh 、赤緯の補正項 $\Delta\delta$ は、架台を通して得られる望遠鏡の時角 h_0 、赤緯 δ_0 と画像から得られる実際の視野中心の時角 h 、赤緯 δ を用いて

$$h = h_0 + \Delta h \quad (3.2)$$

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta \quad (3.3)$$

と定義される。

上のパラメータを用いて時角、赤緯の基本器差補正式は、

$$\begin{aligned} \Delta h = & IH + NP \tan \delta_0 + CH \sec \delta_0 + ME \sin h_0 \tan \delta_0 - MA \cos h_0 \tan \delta_0 \\ & + HCES \sin h_0 + HCEC \cos h_0 - DAF(\cos \phi \cos h_0 + \sin \phi \tan \delta_0) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\Delta\delta = ID + ME \cos h_0 + MA \sin h_0 + DCES \sin \delta_0 + DCEC \cos \delta_0 \quad (3.5)$$

ここで、 ϕ は観測地点の緯度である。

経験的補正項

明野 50cm 望遠鏡の場合、上の基本器差補正式だけでは完全に望遠鏡を補正することができず座標導入精度が上がらないため、以下の経験的な補正項 $\Delta h'$ 、 $\Delta\delta'$ を加え、さらに補正を行った。これによって、

$$h = h_0 + \Delta h + \Delta h' \quad (3.6)$$

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta + \Delta\delta' \quad (3.7)$$

となる。

以下の経験的な補正值は現在のデータから試行錯誤の結果求めたものであり、一般にどのような式で補正することができるかは決まっておらず、式はそれぞれの望遠鏡に依存する。

$$\Delta h' = HHSH \sin h_0 + HHCD^3 \cos 3\delta_0 + HHCH^3 \cos 3h_0 + HSSH^3 \sin 3h_0 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta \delta' = & HDSD2 \sin 2\delta_0 + HDCD2 \cos 2\delta_0 + HDSH2CD \sin 2h_0 \cos \delta_0 \\ & + HDCH4SD \cos 4h_0 \sin \delta_0 + HDCH4CD \cos 4h_0 \cos \delta_0 + HDCH2SD \cos 2h_0 \sin \delta_0 \\ & + HDCH2CD \cos 2h_0 \cos \delta_0 + HDSH2SD \sin 2h_0 \sin \delta_0 + HDSH3SD \sin 3h_0 \sin \delta_0 \\ & + DSHSDiv \sin h_0 \sin 4\delta_0 + HDSH4CD \sin 4h_0 \cos \delta_0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

なお、上の式で係数の命名は Tpoint の命名規則に従っている。

3.8.3 補正パラメータ

3.8.1 で得られたデータから 3.8.2 の基本器差補正式および経験的な補正項を用いて補正パラメータを求めた。

はじめに基本器差補正式のみを用いフィッティングを行い、パラメータ $IH, ID, NP, CH, ME, MA, HCES, HCEC, DCES, DCEC, DAF$ を求めた。次に、これらのパラメータを固定し、経験的な補正項を加えフィッティングを行った。得られた値は 3.7 の通りである。

3.9 ディザリング

ここでは telcon の提供する機能に 1 つであるディザリングについて説明する。

ディザリングとは、1 回の撮像ごとに観測流域を数十秒角程度シフトさせながら観測する手法である。これを行うことで、CCD チップ上のバッドピクセルの影響を除去することや、望遠鏡のトラッキングの影響によって画像上に現れるパターンを低減することが可能である。またディザリングを行って撮像したオブジェクトフレームは、若干のシフト量があるため同じ画像からスカイフラットを作成することができる。このスカイフラットは観測領域と同じ領域から作成したフラットとなるため、観測領域のスカイレベルの大局的な傾きを表現することができ、他の領域で別途作成したスカイフラットと比較して優れている。

表 3.7: 補正パラメータ。左は基本器差補正式のみでフィッティングを行った結果。右は、左の基本器差補正項の結果を固定値にし経験的な補正項でさらに補正しフィッティングした結果。*HCEC* をフリーパラメータとすると収束しないため、*HCEC* = 0 で固定した。

パラメータ	基本器差補正式による値 [arcsec]	基本器差補正式 (固定) + 経験的な補正項による値 [arcsec]
<i>IH</i>	+1957.81 ± 44.505	+1957.81 (fixed)
<i>ID</i>	-1081.99 ± 40.199	-1081.99 (fixed)
<i>NP</i>	-934.97 ± 29.809	-934.97 (fixed)
<i>CH</i>	-98.37 ± 41.202	-98.37 (fixed)
<i>ME</i>	-201.34 ± 10.278	-201.34 (fixed)
<i>MA</i>	-91.41 ± 8.548	-91.41 (fixed)
<i>HCES</i>	-9.01 ± 14.574	-9.01 (fixed)
<i>HCEC</i>	0(fixed)	0(fixed)
<i>DCES</i>	+34.63 ± 26.282	+34.63 (fixed)
<i>DCEC</i>	+134.15 ± 41.712	+134.15 (fixed)
<i>DAF</i>	+10.29 ± 36.730	+10.29 (fixed)
<i>HSH</i>		-0.6449 ± 11.41380
<i>HHCD3</i>		-16.5286 ± 10.44905
<i>HHCH3</i>		-38.8376 ± 10.70235
<i>HSH3</i>		-4.7316 ± 11.06265
<i>HSD2</i>		+4.4864 ± 8.13663
<i>HD2</i>		-0.8253 ± 8.35167
<i>HSDH2CD</i>		+28.4408 ± 11.41465
<i>HDCH4SD</i>		+16.0643 ± 13.24295
<i>HDCHACD</i>		+15.1672 ± 13.37232
<i>HDCH2SD</i>		-25.4093 ± 13.00944
<i>HDCH2CD</i>		+45.5670 ± 14.22094
<i>HSDH2SD</i>		+24.4080 ± 13.40649
<i>HSDH3SD</i>		-16.4549 ± 11.93628
<i>HSDHSD4</i>		+14.7747 ± 11.27689
<i>HSDHACD</i>		+47.0232 ± 10.97191

我々の観測では、シフト量を 50pixels (81.5arcsec に対応) とし、観測対象天体の座標を中心に 9 点を巡回しながら撮像を続ける。シフト量はセルフフラットを作成する際に 9 枚のフレームで同一天体が重ならない最小の移動量として決めている。図 3.6 にディザリング観測の概念図を示す。

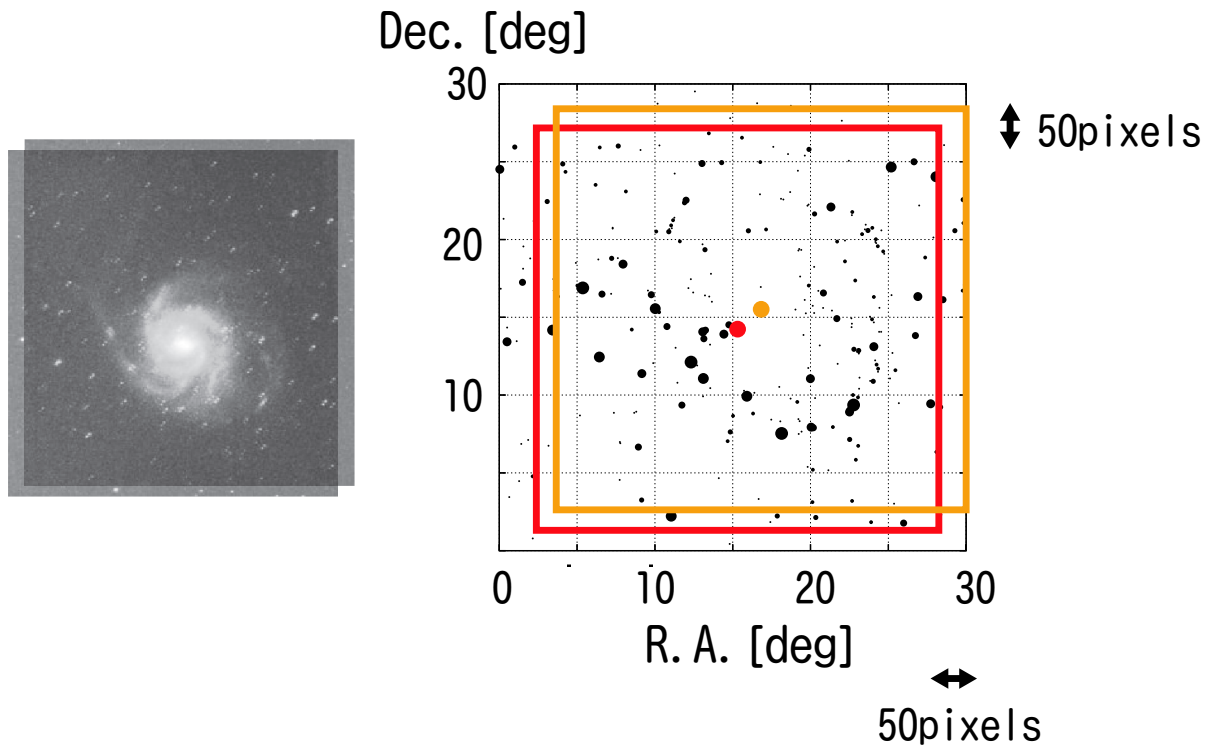


図 3.6: ディザリング観測の概念図。左図：実際にディザリングを行って撮像した 2 枚の画像を重ねた合わせたもの。右図：左図の観測領域をカタログ上に示したもの。2 枚の画像が 50pixels シフトされ撮像されていることがわかる。ここでは 2 枚しか表されていないが、実際の観測では、50pixels ずつシフトした 9 枚の画像が得られる。

ディザリング観測による限界等級、全ての星像の PSF(Point Spread Function, 点像分布関数) の FWHM(Full Width at Half Maximum) の最頻値、スカイレベルの標準偏差への影響を調べた。試験に利用した天域は赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (02:00:13, +09:59:00)$ を中心とした領域で、露出時間 60 秒とし、ディザリングを行った場合と行わなかった場合、それぞれ 20 枚撮像する。リダクション⁴の後、画像を重ね合わせ 20 分積分した画像に対して上記 3 つの値を求める。求めた結果は、表 3.8 の通りである。ディザリングを行うことによって限界等級が 0.2 等級深くなっていることがわかる。また、PSF FWHM やスカイ

⁴周辺減光やピクセル毎の感度むらを補正する処理。

レベルの標準偏差がディザリングによって小さくなっており、画質が向上していることがわかる。

表 3.8: ディザリングを用いた観測と用いなかった観測による限界等級、PSF FWHM(最頻値)、スカイレベルの標準偏差の比較。

限界等級 [Mag]			
BAND	g'	R_c	I_c
ディザリングあり	20.8	20.7	19.7
ディザリングなし	20.6	20.5	19.5

PSF FWHM(最頻値) [pixels]			
BAND	g'	R_c	I_c
ディザリングあり	2.7	2.5	3.4
ディザリングなし	2.8	2.6	3.2

スカイレベルの標準偏差 [counts]			
BAND	g'	R_c	I_c
ディザリングあり	1.44	3.30	2.42
ディザリングなし	1.77	4.02	2.98

図 3.7 はディザリングを用いた観測とディザリングを用いなかった観測で得られた画像を比較したものである。ディザリングを用いた観測で得られた画像の方が明らかに滑らかになっていることがわかる。

このようにディザリング観測が行えることによって画質が向上し、より深い天体まで観測することが可能となる。ガンマ線バーストのように比較的暗い天体の観測ではこの効果は非常に大きい。

3.10 遠隔操作による手動観測

最後に、遠隔操作による手動観測について紹介する。

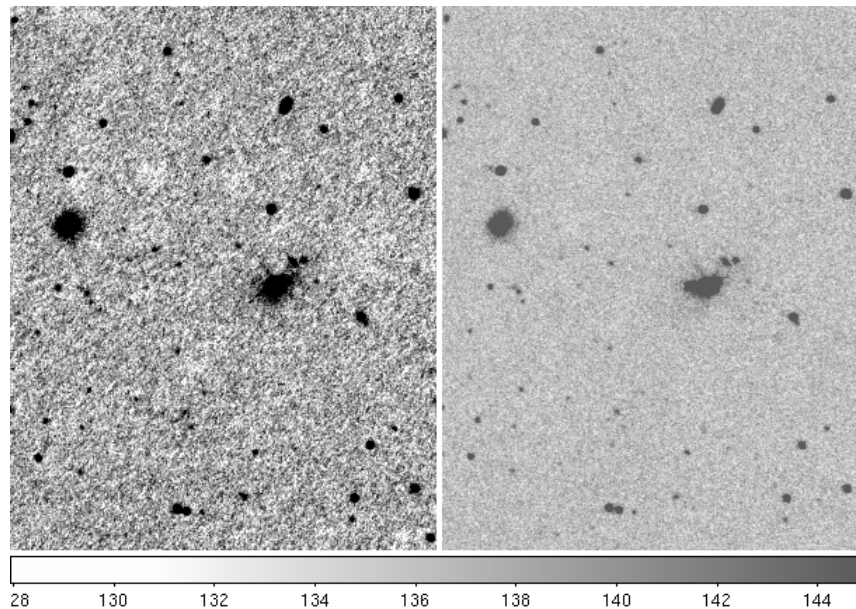


図 3.7: デザリング用いた観測と用いなかった観測の画像の比較。左図：デザリングなし。右図：デザリングあり。

telcon は、図 3.2 に示したようにクライアントソフトウェアを使用することで、遠隔操作インターフェースに接続し、望遠鏡、三色同時撮像カメラを操作することが可能となっている。自動観測で行える観測器機の操作は全てクライアントソフトウェアによっても行うことができる。

クライアントソフトウェアはコマンドラインソフトウェアとして提供しており、Linux 端末から操作することが可能である。

この機能は、遠隔地からガンマ線バースト以外の天体を観測する場合に有効であるだけではない。将来的に観測者が様々な自動観測を計画する際に、有効なユーザインターフェースとなると考えている。観測スケジューリングを行うソフトウェアを別に開発し、クライアントソフトウェアを通して telcon を操作することで、自由度の高いさまざまな自動観測計画を立てることが可能である。

我々は、ガンマ線バーストの自動観測の他に、変光星の定常観測、超新星の探査などを計画しており、このクライアントソフトウェアを多いに活用し、計画を実現していきたいと考えている。



```
takashi@HAL: /home/takashi
ファイル(E) 編集(E) 表示(V) 端末(T) 移動(G) ヘルプ(H)
[takashi@HAL takashi]$
[takashi@HAL takashi]$
[takashi@HAL takashi]$
[takashi@HAL takashi]$
[takashi@HAL takashi]$
[takashi@HAL takashi]$ ctu takashi linmaster 8005
CTU (Common Telcon Utility) 0.3.1 2006/11/26
telcon>
cancel      ccd      focus    load      perl      target    weather
cap         dome     help     logout    sun       telescope
telcon> telescope
azimuth     elevation  move      position  speed     temperature
dec         gohome    org       ra        status    tracking
decext      goto      pointto  setspeed  stop
telcon> telescope position
telcon> [ 2007/02/08 09:31:12 ] Telescope RA : 284.000 = 18:56:00
[ 2007/02/08 09:31:12 ] Telescope Dec : 35.000 = +35:00:00
[ 2007/02/08 09:31:12 ] Telescope Dec : 35.000 = +35:00:00
[ 2007/02/08 09:31:12 ] Telescope Az : 330.917 = +330:55:01
[ 2007/02/08 09:31:12 ] Telescope Elv : 89.108 = +89:06:29
Executed : telescope position
telcon>
telcon> 
```

図 3.8: 遠隔操作による手動観測を行うためのユーザインターフェース。望遠鏡、ドーム、CCD カメラなどすべての観測器機を操作するコマンドを持つ。

第4章 解析パイプライン

この章では、おもに解析パイプラインについて述べる。現在は解析パイプラインの一環に含まれていない処理のうち、将来的に取り入れていく予定である解析処理についてもこの章で取り上げる。また、解析パイプラインと密な関係にあるデータベースについても説明する。

4.1 解析パイプラインの概要

ガンマ線バースト残光は時間と共に急激に減光するため、その残光の位置を即時に決定しさらに残光を測光するためには観測のみを自動化するだけでは不十分であり、そのデータ解析も自動化することが重要となる。

我々は観測データを自動的に観測直後から解析するシステムとして解析パイプラインを開発した。解析パイプラインによって、観測データは明野にて複数の処理を受け、大岡山キャンパスに設置されたデータベースへと登録されていく。解析パイプラインを通過することで観測直後に得られるの RAW データは、短時間の間に、天球座標、等級の原点であるゼロ点の値が付加され、ガンマ線バースト残光の特定および測光をすぐに行える状態のデータとなる。ここで行われる処理は、大きく分けて、WCS(World Coordinates System)の決定、測光、ゼロ点の計測、画像のクオリティの決定に分けられる。処理の流れの概念図を図 4.1 に示す。処理の詳細については後述する。

解析パイプラインは、基本的なデータ解析には対応したものの高度化する余地が残されている。現在、データ解析は画像毎に行われており、複数の画像を用いた解析は行われていない。将来的には、複数の画像を用いて解析することによって、1枚の画像からだけでは正確に特定することが難しいガンマ線バーストのような未同定天体の即時特定を行いたい。

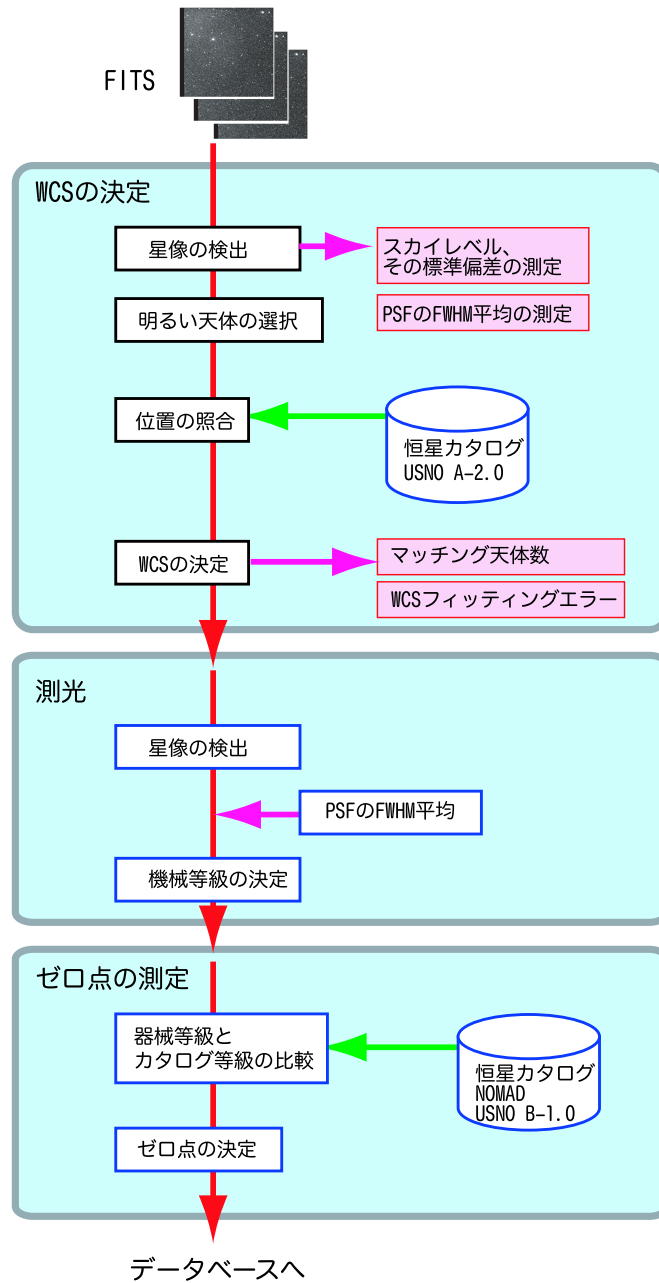


図 4.1: 解析パイプラインの概略図。観測によって得られた FITS 画像は WCS の決定、測光、ゼロ点の測定の処理を順に施される。通過中にスカイレベルなど画像のクオリティの指標となる値が計算される。解析パイプラインを通過した FITS 画像はデータベースへと登録される。

4.2 依存ソフトウェア

解析パイプラインは、天文学業界で標準的に用いられているソフトウェアを連携させ、自動的に処理させることで実現されている。データ解析エンジン部分を独自開発すること

なく標準的ソフトウェアを用いている。これは、開発時間を短縮するだけでなく、業界標準のソフトウェアで解析することで解析パイプラインの処理に対する科学的信頼性を高めることができる。

解析パイプラインで使用している天文学関連のソフトウェアを以下に挙げる。

IRAF(The Image Reduction and Analysis Facility) NOAO (the National Optical Astronomy Observatory) で開発されている天文解析用のソフトウェアパッケージ。光赤外分野の標準的ソフトウェア。解析パイプラインでは、測光する際に用いている。

WCSTools Package Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (SAO の TDC (Telescope Data Center)) が公開している WCS 情報を操作するツール。プログラム集とライブラリ集からなっている。これらのルーチンは ds9、skycat でも使用されている。解析パイプラインでは、WCS の決定に使用している。

SExtractor TERAPIX が公開している画像から星像を検出するソフトウェア。個々について恒星か銀河かの判定なども行う。解析パイプラインでは、撮像した画像から天体を検出するために使用している。

この他、GNU/Linux の環境で提供されている標準的なソフトウェアに依存している。

解析パイプラインでは、WCS を決定する際に恒星カタログを使用している。以下が使用している恒星カタログである。

USNO-A 2.0 U.S. Naval Observatory (USNO) によって公開されている 5 億個の恒星の情報をもったカタログ。解析パイプラインでは、WCSTools によって WCS を決定する際の参照先として使用している。

USNO-B 1.0 USNO によって公開されている 10 億個の恒星の情報をもったカタログ。解析パイプラインでは、I バンドでゼロ点を決定する際の参照先として使用している。

NOMAD USNO によって公開されている 11 億個の恒星の情報をもったカタログ。Naval Observatory Merged Astrometric Dataset。可視光をカバーした Hipparcos、Tycho-2、UCAC2、Yellow-Blue 6、USNO-B カタログと近赤外用の 2MASS カタログを合わせたカタログ。解析パイプラインでは、V、R、 g' バンドでゼロ点を決定する際の参照先として使用している。なお、このカタログは WEB¹ から利用できる。

¹<http://www.nofs.navy.mil/>

4.3 FITS

我々は天体画像のデータ形式として FITS(The Flexible Image Transport System) フォーマットを利用している。FITS は、天体のイメージデータ、天体スペクトルのデータ、X線観測のイベントデータなど天文分野で使われる多くのデータを扱うことができる汎用のフォーマットである。

FITS は、ASCII テキストで書かれたヘッダー部分とバイナリデータ部分からなっており、我々の観測では、FITS ヘッダーに観測時刻、天球座標、露出時間、気温などの観測時の情報が保存され、バイナリデータとして 2 次元イメージが保存される。解析パイプライン処理の結果得られた情報に関する FITS ヘッダーに追記し、イメージとともに記録されるようしている。

我々の観測データについてまとめる。

2 次元イメージは、天体が撮像されている有効領域は $1024 \times 1024 \text{ pixel}^2$ であり、視野が $28 \times 28 \text{ arcmin}^2$ 程度であることから、1 pixel は 1.63 秒角に対応する。キャリブレーション用データとして有効領域の他にオーバースキャン領域 ($1024 \times 50 \text{ pixel}^2$) を取得している。図 4.3 のようになっている。65536 階調 (16bit) で表現されている。このため 1 画像あたりのデータ量は 2MB となる。

FITS ヘッダーには観測条件が保存されている。望遠鏡の視野中心の赤経、赤緯、観測開始時刻、露出時間、観測バンドなどデータ解析に直接関係する項目に加え、観測時の気温、湿度、圧力などの気象データが合わせて記録されている。解析パイプラインを通過することによって得られた情報も合わせて FITS ヘッダーへ記録される。我々の観測データの FITS ヘッダーの項目と形式についての詳細は付録 A.3 で説明する。

4.4 WCS の決定

解析パイプラインの第一段階として、FITS に対して WCS(World Coordinates System) の決定を行っている。

WCS とは、実際の天球座標とデータ配列の間の対応関係を表現する方法である。我々が扱う 2 次元イメージに関して限定すれば、イメージの (x, y) 座標と天球の赤道座標 (赤経、赤緯) (α, δ) の変換式を求めることに相当する。WCS の決定は、解析パイプラインの処理のうち特に重要度は高く、ガンマ線バーストの位置を高精度に決定するためには座標

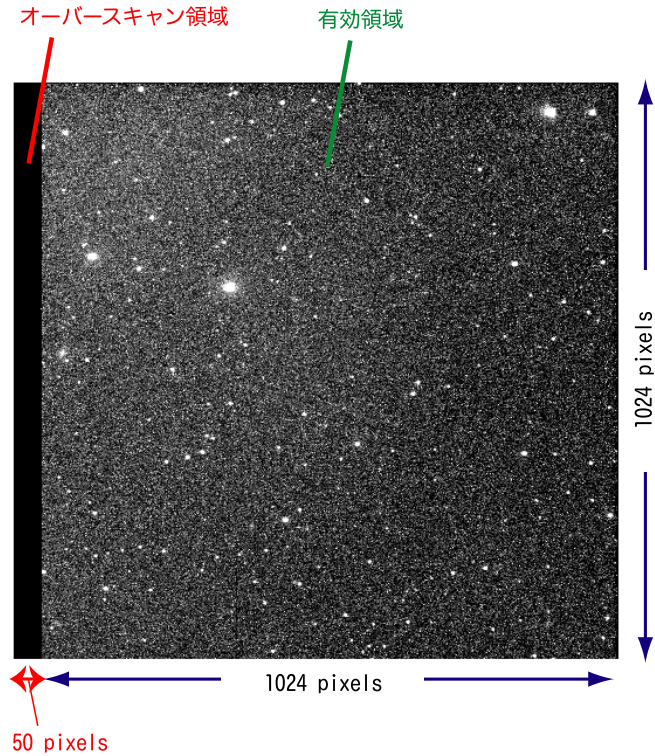


図 4.2: FITS イメージ。天域を撮像した有効領域とオーバーキャン領域からなっている。決定は非常に重要となってくる。ここで求められた WCS は FITS ヘッダーへ書き込まれ、次の処理へと渡される。

WCS の計算は、FITS から検出した星像と既存の恒星カタログを比較することによって行われる。検出した複数の星像の FITS 上での (x, y) とそれに対応した天体のカタログ上での (α, δ) を対応づけることで求められる。

このため、解析パイプラインでは、まず初めに SExtractor を利用し、以下の 2 つの条件をみたす全ての星像を FITS イメージ上から検出している。

- 2次元イメージの有効領域で $2 < x < 1022$ かつ $2 < y < 1022$ 領域内。画像の境界付近では正しい形状で星像が認識されないおそれがあるため除外する。
- CCD 出力値 (ADC) が線型性を保つ $0 \leq counts[ADC] \leq 55000$ の範囲の値を示す星像。

検出した星像のうち、明るい星像を 50 天体選択し、この 50 天体を恒星カタログ USNO A-2.0 に照合して求めた WCS の書き込みを行っている。照合に利用する 50 天体は画像全体から明るい天体を選択するのではなく、画像を $3 \times 3 = 9$ セクションに分け、各セクションから均等に天体を選択されるようにしている。無造作に画像全体から明るい天体を選択

した場合、ある特定の領域から偏って照合天体を選択される可能性があり、これによって WCS の決定精度の低下が起こる可能性がある。これを防ぐため均等に星像が選択されるように処理している。

WCS の決定は、すべてのカタログを参照することではなく、FITS ヘッダー ‘RA’ (赤経)、 ‘DEC’ (赤緯) の値を利用して、その周辺の領域から対応天体を検索する。撮像時に架台から得られた赤経、赤緯の値を補正関数で補正した補正赤経、補正赤緯の値を ‘RA’ (赤経)、 ‘DEC’ (赤緯) に記録されている。この ‘RA’ (赤経)、 ‘DEC’ (赤緯) の値が実際の視野中心の赤経、赤緯から大幅にずれた場合、WCS の決定に失敗することが予想されるが、これに関してはグリッドサーチをすることで対応領域を探す仕組みがあり、これを利用している。このグリッドサーチの仕組みに関しては下川辺卒論 2005 を参照して頂きたい。

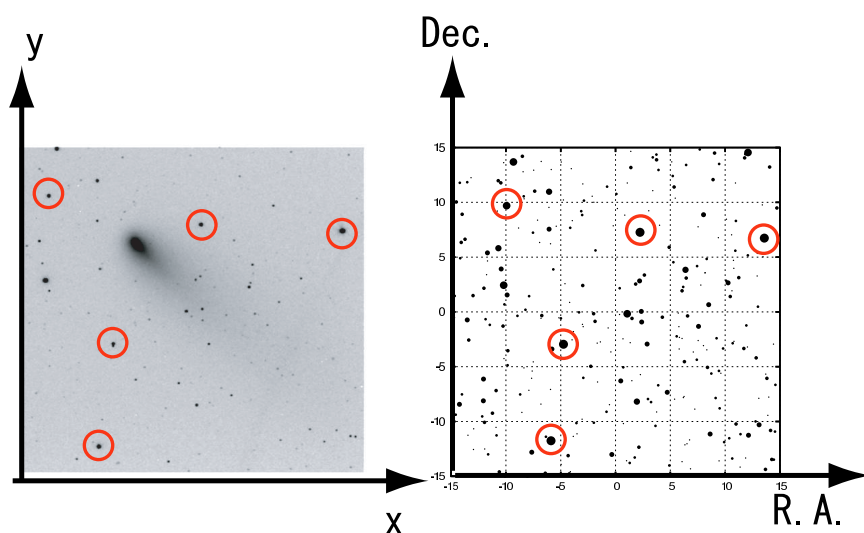


図 4.3: WCS 決定の概念図。左図が FITS 画像、右図がカタログを表す。50 天体を選択 (図中の赤丸) し、これをもとに画像の赤経、赤緯を決定する。

WCS の決定の結果として、表 4.1 に示したキーワードと値が FITS ヘッダーに追記される。

解析パイプラインによって処理された FITS ファイルの WCS の決定精度について評価する。

WCS の決定精度を評価する場合、(1) カatalogの参照領域が正しいか (2) 精度良く WCS が決定ができていないか、に注意しなければならない。無作為に選んだ複数の FITS ファイルに対して、図 4.4 は横軸にマッチングした天体数 ‘WCSMATCH’、縦軸に WCS の決定精度を表す ‘WCSSEP’ を取ったグラフである。図から $WCSMATCH < 10$ では $WCSSEP > 1.5$ と

表 4.1: WCS の書き込みによって追記される FITS ヘッダー。

ヘッダーキーワード	値の例	内容
WCSNREF	50	WCS を書き込む際に照合に利用した天体数。解析パイプラインでは、常に 50 天体を利用している
WCSMATCH	37	WCS を書き込む際にカタログと照合し対応付けすることができた天体数。常に 'WCSNREF' 以下の値を取る。
WCSSEP	0.553	WCS のフィッティングエラー。カタログ座標からのずれを秒角で示している。

なっていることがわかり、マッチング天体数が少ないため WCS の決定精度が悪いことがわかる。このように 'WCSMATCH' が小さくなると急速に 'WCSSEP' の精度が悪くなる原因は、雲が視野内にあり星像が検出できていないこと、カタログの参照領域が間違っていることが考えられる。したがって、 $WCSMATCH < 10$ で $WCSSEP < 1.5$ を示すような FITS ファイルもあるが、これらは間違ったカタログ領域を参照し偶然少ないマッチング天体数で精度良く WCS が決まってしまったように表面上見えるだけと考えるべきである。

したがって、(1) を判断する場合、 $WCSMATCH \geq 10$ であることで判断することが可能であり、これを満たした画像に対し (2) を評価することとなる。図 4.4 から参照領域が正しい画像に関しては $WCSSEP \sim 1 \text{arcsec}$ 程度で WCS の決定に成功していることがわかる。

なお、WCS の計算は約 1 秒程度で行われる。

4.5 測光

解析パイプラインの第二段階では、画像中の全ての星像に対して測光を行う。第二段階に行う測光は、第三段階でゼロ点を求めるために必要となる。

測光は IRAF の phot コマンドを利用して行う。画像から検出した星像の PSF(Point Spread Function, 点像分布関数) の FWHM(Full Width at Half Maximum) の平均値を測光のフォアグラウンド、バックグラウンド領域を選択する基準として利用している。平均の FWHM を $FWHM$ とすれば、天体からの光を抽出する領域である Aperture サイズは $FWHM \times 1.6$ 、バックグラウンドとなるスカイレベルを評価する領域である Annulus として、内径が $FWHM \times 1.75$ 、そこから外側に $FWHM \times 2.0$ の円環領域を利用している。

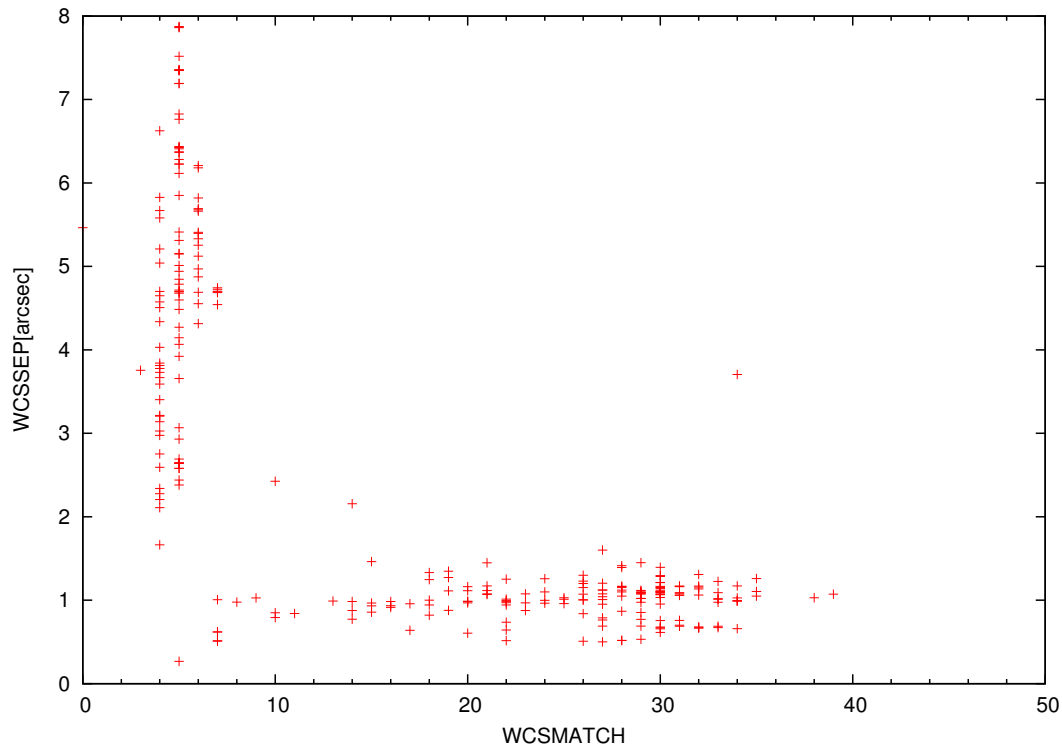


図 4.4: WCS の決定精度を表す。横軸はカタログとの照合でマッチングした天体数、縦軸は WCS の書き込み精度を表す。各データ点が 1 枚の FITS 画像を表している。

FWHM と Aperture、Annulus の関係は図 4.5 の通りである。

ここで利用している平均の FWHM は 4.4 で SExtractor を利用して全ての星像を検出する際に合わせて算出している。ここで注意しなければならないのは、SExtractor を利用して検出した星像は必ずしも天体とは限らないという点である。例えば、バッドピクセル、宇宙線など天体以外の星像に似た像を含んでいる可能性が高い。図 4.6 は像の FWHM のヒストグラムであり、緑ラインが天体以外も含んだ全ての像、赤ラインがカタログとマッチングした星像 (すなわち、天体のみ) を表したものである。これから分かるように、二つの分布はほぼ同じであり、星像の FWHM の平均を求める際に全ての星像 (赤ライン) から FWHM の平均を求め代用できることがわかる。天体のみから求めた FWHM ではなく、全ての星像から求めた FWHM を代用する利点は、カタログ参照を行う必要がなく、計算時間を短縮することができるためである。計算時間短縮のため解析パイプラインでは全ての天体以外を含んだ像 (図 4.6 の緑ラインに相当) から平均の FWHM を算出している。この値は FITS ヘッダー ‘FWHM-AVG’ として保存される。

IRAF の phot コマンドでは、シグナルとして評価されるのは、Aperture 内のカウントから Annulus 領域で評価したバックグラウンドを Aperture の面積に規格化して差し引いた

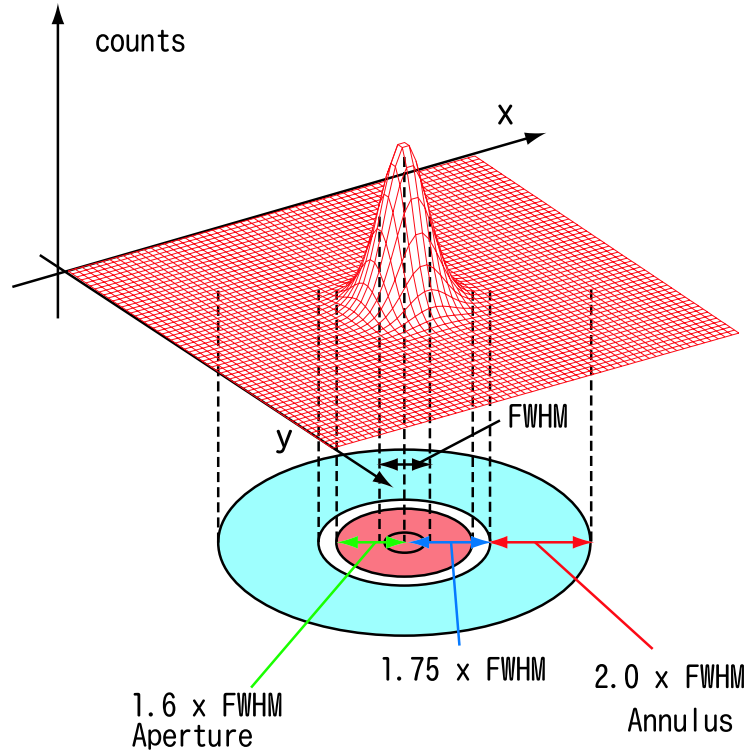


図 4.5: Aperture、Annulus の選択方法。縦軸は CCD のカウント、xy 平面は CCD の pixels を表す。PSF FWHM の 1.6 倍の半径を持つ赤色円領域を Aperture、PSF FWHM の 1.75 倍の内径を持ち PSF FWHM の 2.0 倍の幅を持つ青色円環領域を Annulus とする。Aperture 内の全カウントから Annulus で測定したバックグラウンドを面積を考慮して差し引いて星像からのカウントとする。

値である。したがって、シグナル $Signal$ は、Aperture 内の総カウント数を SUM [counts]、面積を $AREA$ [pixels²] とし、Annulus 内の総カウント数を $MSKY$ [counts]、とすれば、

$$Signal = SUM - AREA \cdot MSKY \text{ counts} \quad (4.1)$$

と与えられる。

シグナルの計算の不確定性は、シグナルの統計的なゆらぎとバックグラウンドの統計的なゆらぎが寄与する。したがって、シグナルの不確定性、すなわちノイズは、

$$Noise = \sqrt{\frac{SUM - AREA \cdot MSKY}{GAIN} + AREA \cdot STDEV^2 + \frac{AREA^2 \cdot STDEV^2}{NSKY}} \quad (4.2)$$

と表せる。

ここで、 $GAIN$ [electrons/ADU] は CCD のゲイン (入力される電子数と CCD 出力カウントの変換係数)、 $NSKY$ [pixels²] は Annulus 領域の面積、 $STDEV$ [counts] は Annulus 領域

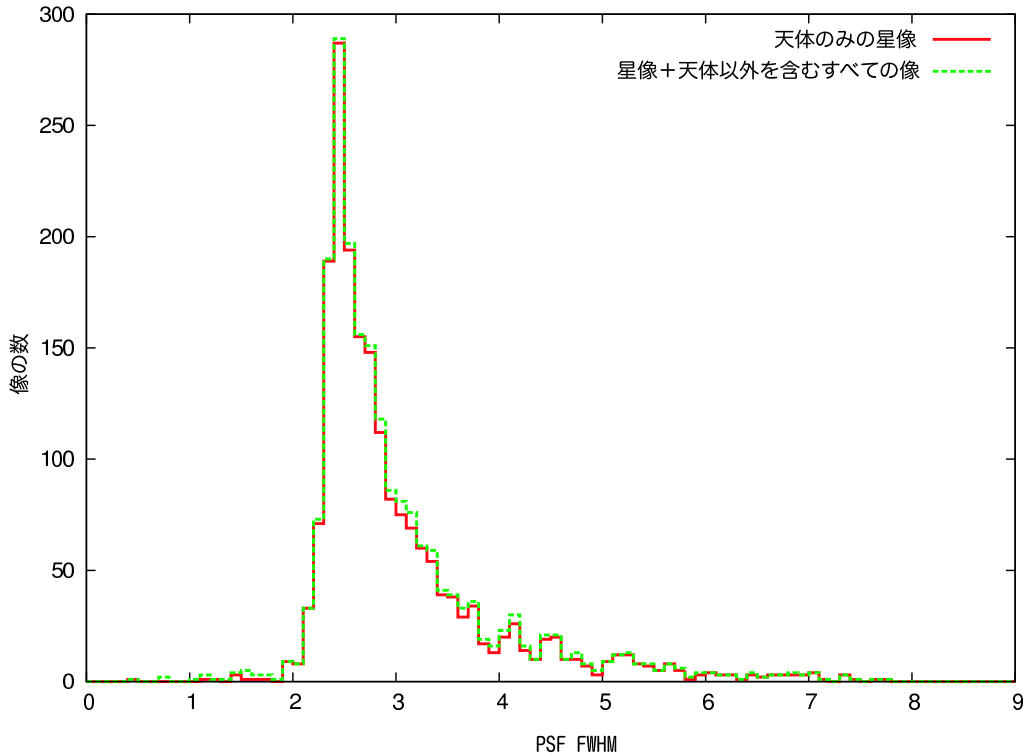


図 4.6: 天体のみの星像と天体以外を含んだ全ての像の PSF FWHM の比較。赤色が天体のみの星像を表し、緑色が星像に加え天体以外の像を含んだすべての像を表す。赤色と緑色で分布がほぼ同じことがわかる。

で求められたバックグラウンドのゆらぎを表す。上式で、根号内で、第一項目から順に、電子数の統計的なゆらぎ、Aperture 領域のバックグラウンドに起因するゆらぎ、Annulus 領域でバックグラウンドを見積もる時に生じるゆらぎを表す。

IRAF の phot コマンドでは、以上で説明した *Signal*、*Noise* を用いて等級 *MAG* とそのエラー *MERR* を以下のように計算される。

$$MAG = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{Signal}{EXPTIME} \right) + ZMAG \quad (4.3)$$

$$MERR = 1.0857 \frac{Noise}{Signal} \quad (4.4)$$

上記の式で、*EXPTIME*[sec] は露出時間を表し、*ZMAG* はゼロ点を表す。これからわかるようにゼロ点は、1[ADU/s] となる天体の等級を表す値である。式 (4.4) の右辺にかかる係数 1.0857 はカウントを等級に変換する際に現れる係数である。この値の導出については付録 A.4 を参照してほしい。

ゼロ点はシグナルから等級に変換する際の基準点とみることができ、この値は一枚の FITS を解析するだけでは決定することはできない。解析パイプラインでは既存の恒星カ

カタログ USNO-B 1.0、NOMAD カタログと比較することでゼロ点の値を算出している。これについては、セクション 4.6 で説明する。

この段階では、ゼロ点による補正を行うことができないため、ゼロ点の値を $ZMAG = 0$ とし、

$$MAG_{inst} = -\frac{5}{2} \log \left(\frac{Signal}{EXPTIME} \right) \quad (4.5)$$

として器械等級 MAG_{inst} を定義する。

この二段階目では、以上の方法で画像から検出されたすべての星像に対して器械等級 MAG_{inst} を測定し、この器械等級を用いてセクション 4.6 でゼロ点の計測を行う。この二段階目に要する計算時間は 1 秒である。

4.6 ゼロ点の計測

解析パイプラインの第三段階として、ゼロ点の計測を行う。

ゼロ点は式 (4.3) で定義され、これは、恒星カタログ USNO-B 1.0、NOMAD に記載されている等級をカタログ等級として MAG_{cat} と定義すれば、式 (4.5) で表される器械等級を用いて

$$MAG_{cat} = MAG_{inst} + ZMAG$$

として表せ、

$$ZMAG = MAG_{cat} - MAG_{inst} \quad (4.6)$$

として求めることができる。

カタログ等級 MAG_{cat} としては、V バンド、R バンドは NOMAD カタログを利用し、I バンドは USNO B-1.0 を利用する。g' バンドは既存のカタログでは提供されていないため、NOMAD カタログに記載された B バンド、V バンドの値を変換式

$$g' = V + 0.54(B - V) - 0.07 \quad (4.7)$$

を利用して g' バンドのカタログ等級を求めている。

解析パイプラインでは、ゼロ点を計測するためセクション 4.4 で SExtractor によって検出した星像と上記のカタログを照合し、カタログとマッチした星像に関して、縦軸に器械等級、横軸にカタログ等級を取りフィッティングを行いゼロ点を求めている。図 4.7 のように、データ点は傾き 1 の直線にほぼ乗る。完全に傾き 1 の直線に載らない理由は、カタログ等級は 0.3 等級程度の誤差があること、カタログが作成された時点から天体の光度に変化があるためと考えられる。

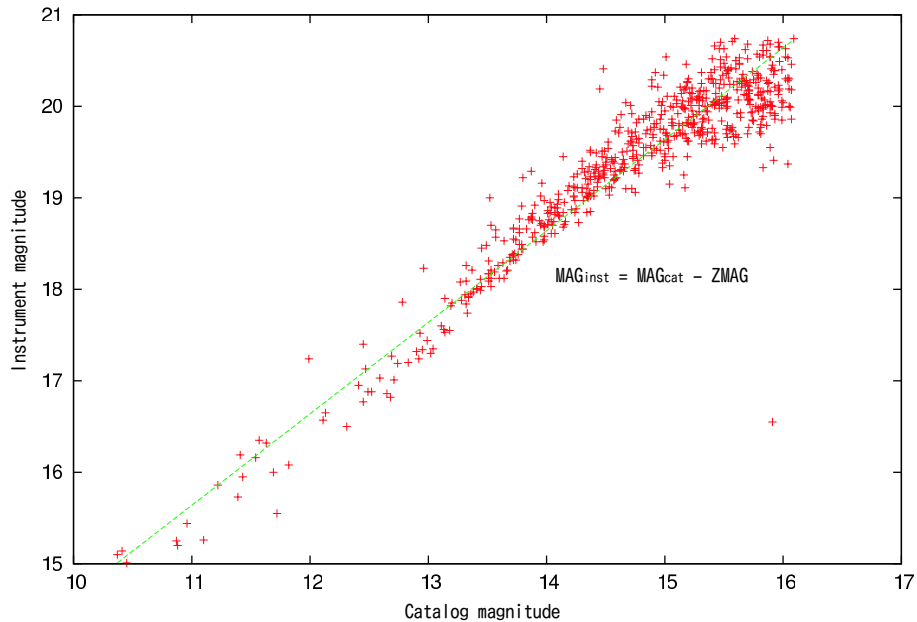


図 4.7: ゼロ点の算出。縦軸：器械等級、横軸：カタログ等級とすると、 y 切片の逆符号がゼロ点 $ZMAG$ となる。緑直線は傾き 1 の直線を表している。

このゼロ点の計算の過程で、表 4.2 のキーワードと値が FITS ヘッダーに追加される。

表 4.2: ゼロ点の計測によって追記される FITS ヘッダー。

ヘッダーキーワード	値の例	内容
ZERO-PT	4.640	フィッティングによって求められたゼロ点。

解析パイプラインを通過するとすべての画像に対してゼロ点 $ZMAG$ が決定する。 $ZMAG$ が求まることによって、式 (4.3) から画像上のすべての星像はゼロ点の補正された正しい等級として測光することが可能となる。すなわち、画像上にガンマ線バースト残光が受かっている場合、これを測光することが可能となる。

4.7 画像のクオリティの決定

解析パイプラインでは、WCS の書き込み、測光、ゼロ点の測定の一連の処理の過程の中で、観測データのクオリティの指標となるさまざまな値を計算し、これを FITS ヘッダー

に保存している。

画像のクオリティの指標の一つとして、スカイレベルの測定を行っている。

スカイレベルとは、星像のない領域のカウントをいい、月光や街からの夜光によって決まる。また、望遠鏡視野内に薄雲や霧がかかることで夜光が反射し、スカイレベルは大幅に上昇する。

自動解析を行う上では、視野内に雲がかかっているかどうかを数値的に判断できることが重要となってくる。また、手動で解析する際も大量の画像に対して天気の状態を数値的に判断できることは非常に有効である。

スカイレベルは、FITS イメージの有効領域内の pixels のカウント値の最頻値としている。これはカウント値ごとの pixel の個数分布を調べた場合、個数分布は星像のないスカイバックグラウンドレベルを示す pixel で最大となると考えられるためである。図 4.8 は、一枚の FITS イメージの有効領域における各カウント値の pixel 数の分布について示したものである。これからわかるように、最頻値は 1600 カウント付近にあり、これがスカイバックグラウンドを示していると考えて良い。

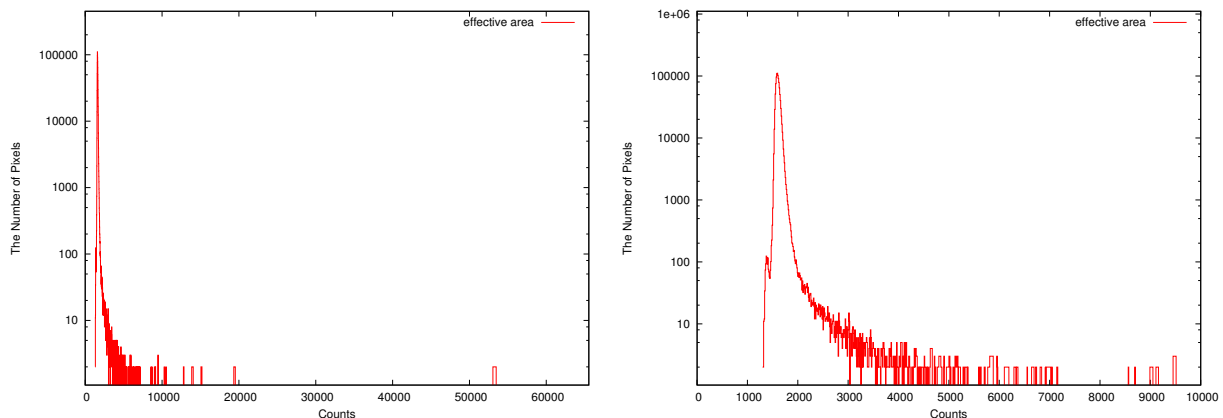


図 4.8: 左図：FITS 画像の有効領域におけるカウント値のヒストグラム。カウント値の範囲は 0-65535、10 カウント毎に 1bin としている。最頻値がスカイレベルを表していると考えられる。右図：左図の拡大図。

一枚の FITS 画像のスカイレベルを利用するだけでは、その画像の天候を決定するのは困難である。雲だけではなく、月光や観測天体の高度などによっても変化するスカイレベルは、一般にその絶対値がどのような天候を示しているかを知ることは難しく、その時間的な変化を追わなければ各画像の天候状態を知ることは難しい。

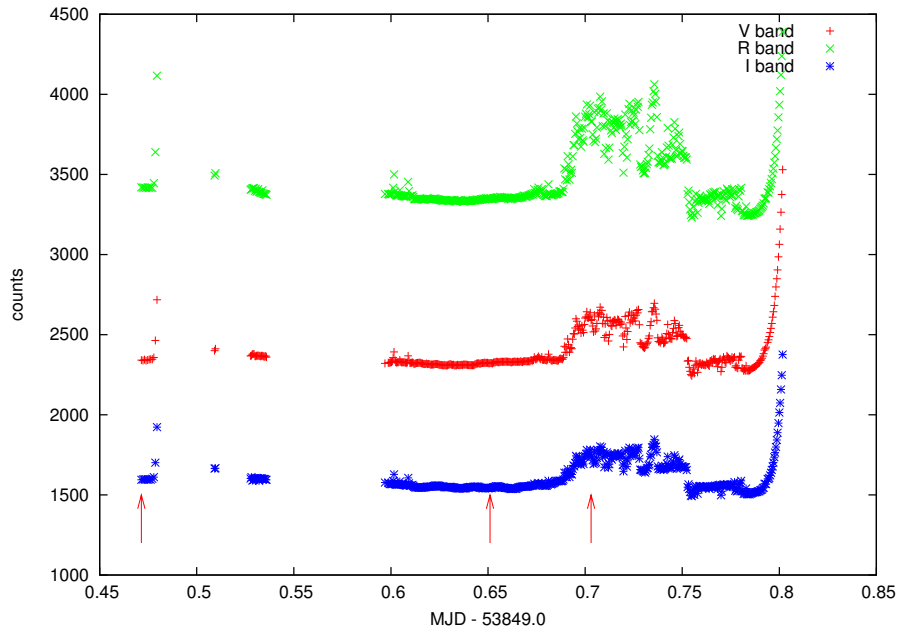
ここで、スカイレベルを用いて天候の変化を知ることのできる一例を図 4.9 に示す。この図は、 $\text{MJD} - 53849.0 = 0.45$ (JST 午後 19 時 48 分) から $\text{MJD} - 53849.0 = 0.85$ (JST 午前 5 時 24 分) までのある日の一晩のスカイレベルの時間的变化を示したものである。 $0.7 < \text{MJD} - 53849 < 0.75$ でスカイレベルが他の時間帯よりも相対的に高い値を示しているが、これは観測視野内に雲が入り、夜光が雲に反射したことによってスカイレベルが上昇したことを表している。データのクオリティとしては低いことを示している。また、 $\text{MJD} - 53849 > 0.79$ でスカイレベルが急激に上昇していつていることがわかる。これは、日の出によってスカイレベルが上昇したことを示している。

さらに、スカイレベルと合わせて、いくつかの値を画像のクオリティの指標として利用している。

その一つとしては、セクション 4.4 で述べた FITS キーワード ‘WCSMATCH’ である。これは、WCS を書き込む際にカタログと照合し対応付けすることができた天体の個数を示している。天候が悪く曇っている場合、イメージ上から星像を正しく検出することは難しく、多くの場合、カタログとの照合に失敗する。一般に WCS の決定に成功した場合は 10 以上の値を示すが、観測視野が雲に覆われた場合、‘WCSMATCH’ は 5 程度の小さな値を示すと考えられる (セクション 4.4 参照)。しかしながら、‘WCSMATCH’ はカタログとの照合の程度を示しているに過ぎないため、その数は少ないとはいえ、必ずしも ‘WCSMATCH’ の値が小さくなる原因が天候にあるとは限らないことに注意しなければならない。望遠鏡の導入精度が悪く照合に利用したカタログが実際の観測領域とが大きくことなった場合や、観測領域に対応したカタログ自体がない場合なども ‘WCSMATCH’ の値は小さくなる。²

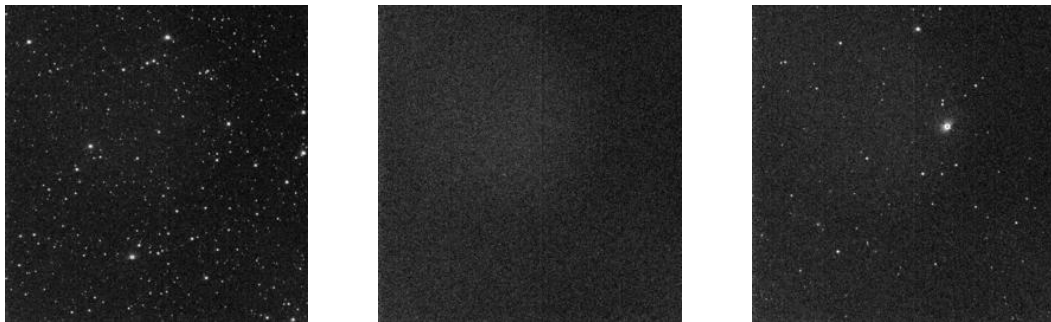
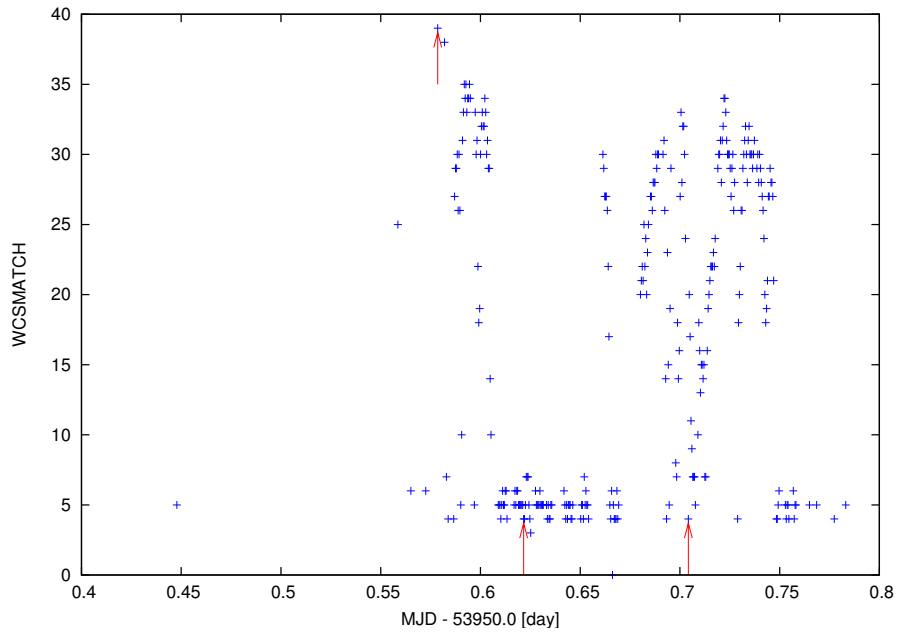
ある一晩の観測における ‘WCSMATCH’ の時間変化を図 4.10 に示す。‘WCSMATCH’ は、一晩の観測の間に $3 \leq \text{WCSMATCH} \leq 39$ の間を変化する。これは多くの場合上述したように視野内に雲が入るかどうかにより画像内の照合に使用した星像の個数が変化したと考えることができる。図 4.10 下段の (a)、(b) の観測が典型的である。(a) は $\text{WCSMATCH} = 34$ でありこの画像は多くの星像が写っていることが見て分かる。これに対して (b) は $\text{WCSMATCH} = 4$ であり視野内に星像は見付けられず、曇っていることがわかる。しかし、(c) の観測画像は典型的な結果から外れる。この画像に関しては、解析パイプラインの処理の結果として $\text{WCSMATCH} = 4$ となったものの画像上にはかなりの星像があり、天候以外の原因が WCS のマッチングを悪くしたと考えられる。

²カタログとの照合が失敗した場合でも ‘WCSMATCH’ の値は必ずしも 0 になるとは限らない。これは、参照領域が一致しない場合でも、数個の星像が参照領域に強制的に対応付けられてしまうためである。



(a)MJD - 53849.0 = 0.472 (b)MJD - 53849.0 = 0.651 (c)MJD - 53849.0 = 0.703

図 4.9: 上段:スカイレベルの時間的变化。縦軸はカウント値、横軸は (MJD - 53849.0)。ある一晚の観測におけるスカイレベルの変化を表している。赤、緑、青がそれぞれ V バンド、R バンド、I バンドを表す。MJD - 53849.0 = 0.625 が JST 午前 0 時に相当する。下段: 左から (a)MJD - 53849.0 = 0.472、(b)MJD - 53849.0 = 0.651、(c)MJD - 53849.0 = 0.703 での I バンドの観測画像。上段グラフの赤矢印にて撮像された画像。(c) は視野内に雲が入っていることがわかる。



(a)MJD - 53950.0 = 0.579 (b)MJD - 53950.0 = 0.622 (c)MJD - 53950.0 = 0.704

‘WCSMATCH’ = 34

‘WCSMATCH’ = 4

‘WCSMATCH’ = 4

図 4.10: 上段: Iバンドにおける FITS キーワード ‘WCSMATCH’ の時間的变化。ある一晚の観測を表している。下段: 左から (a)MJD - 53950.0 = 0.579、(b)MJD - 53950.0 = 0.622、(c)MJD - 53950.0 = 0.704 での Iバンドの観測画像。上段グラフの赤矢印時刻にて撮像された画像。(c) は視野内にかなりの天体がある にも関わらず、‘WCSMATCH’ の値が小さい ことがわかる。

以上のように、画像のクオリティを決める取組みとしてはスカイレベルの測定、WCSのマッチング天体数を利用しているが、これらの値は単独で画像のクオリティを決めることは難しく、総合的に活用し決定していくことが必要であることがわかる。

解析パイプライン上では、これらの値についての計算は行っているもののこの値を活用し画像のクオリティを自動的に決定することは行っておらず、そのクオリティの判断は観測者に任せている。将来的に、ガンマ線バーストの自動検出を行うためにはクオリティの低い画像を除外するという処理が必須となるため、画像のクオリティの指標を総合的に使用する方法について検討していかなければならない。

4.8 限界等級

限界等級測定の自動化の取組みについて説明する。

現在、限界等級の測定は解析パイプラインに組み込まれていないが、限界等級自動算出ルーチンは開発した。

将来的にガンマ線バーストを自動的に検出する場合、解析パイプライン上で各画像の限界等級を求めることが必要となってくる。

まず、限界等級を定義する。

限界を決定するために一般に用いられる値はS/N比 (Signal to Noise Ratio) である。これは言葉の通り、検出されたシグナルとノイズの比率である。シグナルとノイズの定義はそれぞれセクション 4.5 で示した式 (4.1)、式 (4.2) であり、等級の誤差を表す式 (4.4) を用いることで、

$$S/N = \frac{Signal}{Noise} = \frac{1.0857}{MERR} \quad (4.8)$$

と表すことができる。

我々は限界等級を $S/N = 3$ となる天体の明るさと定義する。

限界等級を求めるため次の処理を行う。セクション 4.5、4.6 で述べた測光、ゼロ点の計測を行うことによって、FITS 画像上の全ての星像のゼロ点を補正した等級を知ることができる。ある画像に関して、ゼロ点を補正した等級とS/Nを比較すると図 4.11 が得られる。

フィッティングは、式 (4.1)、式 (4.2)、式 (4.3) から求められる

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{Signal}{Noise}\right) &= \log(Signal) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{Signal}{GAIN} + AREA \cdot STDEV^2 + \frac{AREA^2 \cdot STDEV^2}{NSKY}\right) \\ &= -\frac{2}{5} \cdot MAG + A - \frac{1}{2} \log\left(\frac{10^{-\frac{2}{5} \cdot MAG + A}}{GAIN} + B\right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

を使用している。ただし、上式で $A = \frac{2}{5} ZMAG + \log(EXPTIME)$ 、 $B = AREA \cdot STDEV^2 + \frac{AREA^2 \cdot STDEV^2}{NSKY}$ を表す。

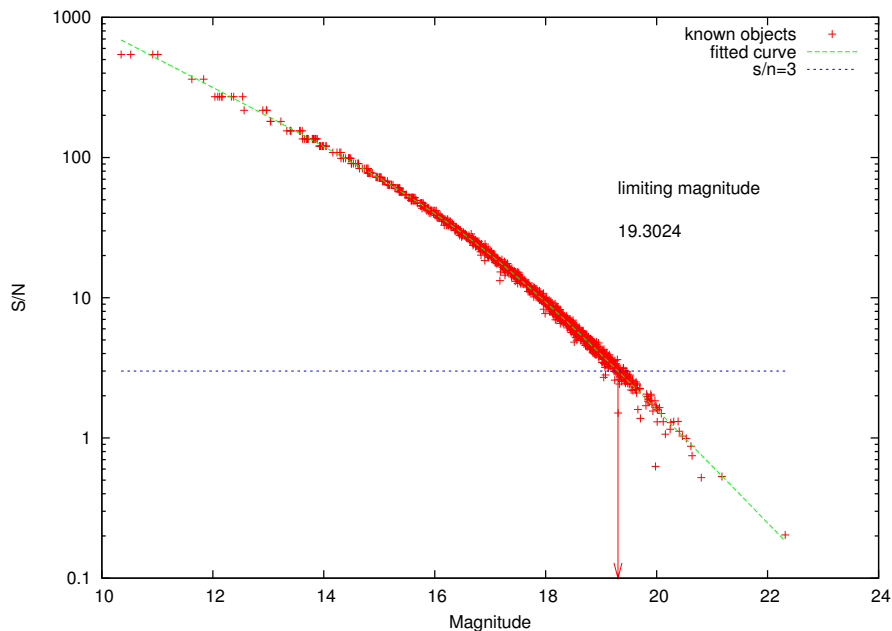


図 4.11: 限界等級の測定。横軸：ゼロ点で補正した等級、縦軸：S/N。限界等級の基準を S/N=3 としている。この場合、限界等級は 19.3 となる。

4.9 データベースへの登録と検索

我々は一晩の観測で最大 8000 枚³程度のデータを取得することとなる。観測データは膨大な情報が含まれており、過去に得られたデータを含め大量のデータを活用していくためには、FITS データを一括管理し、その情報に効率的にアクセスするデータベースが必要となってくる。このため我々は MITSuME プロジェクト専用のデータベースサーバを東

³露出時間を 30 秒で一晩に 10 時間観測した場合のデータ量。

工大大岡山キャンパス内に設置している。岡山 50cm 望遠鏡、明野 50cm 望遠鏡で取得した観測データは、解析パイプラインを通過し、リアルタイムにこのデータベースへ登録され管理される。

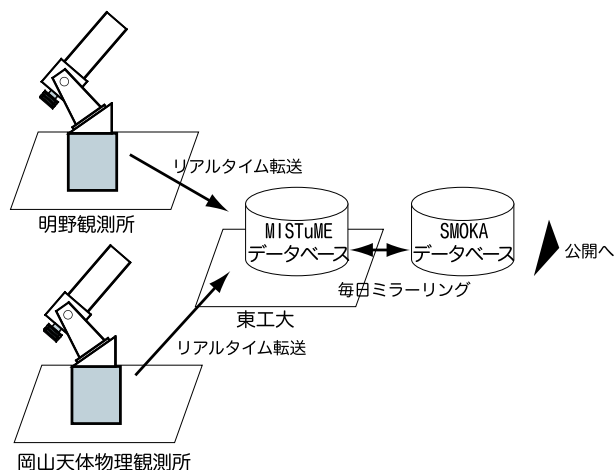


図 4.12: データベース概念図

データベースは、登録された FITS の FITS ヘッダーの全てのキーワードをカラムとして保持し、WEB による検索機能を提供している。この検索機能を利用することによって、特定の座標や日時などで起こったガンマ線バーストをはじめ、過去の全ての FITS およびそのヘッダーへ WEB からアクセスすることが可能となっている。

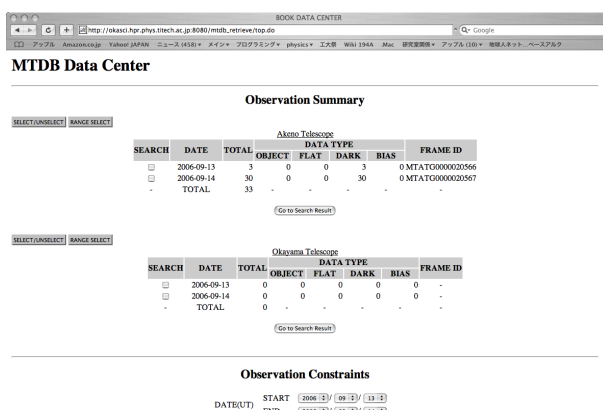


図 4.13: データベース検索画面。

データベースは検索機能の他にいくつかの観測者を支援するツールをもっている。まず、一つ目として QL(Quick Look) 画像のサムネイル表示に対応している。サムネイル表示の利点は、その言葉の通り、個々の FITS ファイルを見ることなく、WEB ブラウ

ザ上で一括して得られた画像を閲覧することができる点である。これは、現在の観測天体や視野内の天候状態を知る上で非常に効率的な方法である。

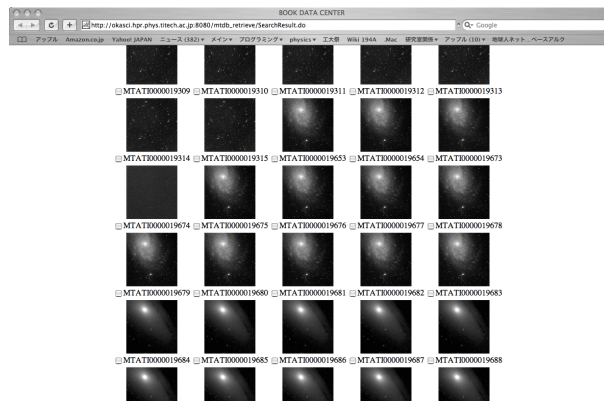


図 4.14: QL 画像のサムネイル表示

二つ目として、QL 画像のムービー表示機能がある。これは、QL 画像を連続描画することによって連続して得られた画像を見ることができるものであり、ガンマ線バーストなどの突発天体や、時間的に変光する天体の検出には大変有効な機能である。

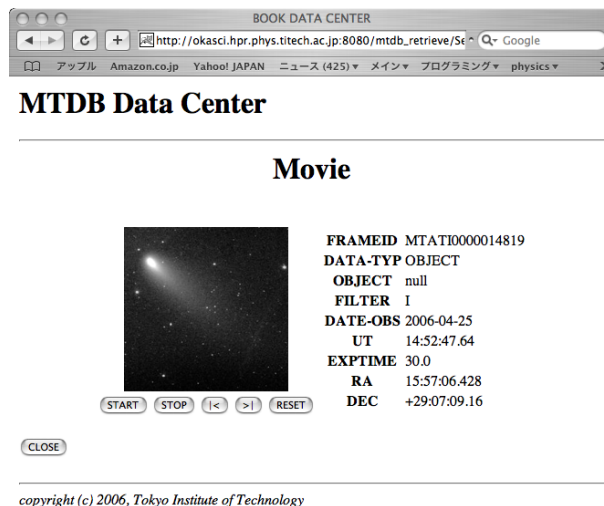


図 4.15: ムービー表示機能

データベースに登録されたデータは国立天文台が運営する SMOKA へ毎日ミラーリングされる。これによって、我々の観測データは、東工大、国立天文台双方で保管されることとなり、保存の安全性を高めている。また、SMOKA を通じて広く公開する予定となっている。

第5章 残光観測実績

この章では、本研究で開発した自動観測システム (第3章)、解析パイプライン (第4章) によって行ったガンマ線バースト残光の観測についてまとめる。

自動観測、解析パイプライン、データベースが本格的に稼働した 2006 年 9 月から 2007 年 1 月までの観測結果を表 5.1 にまとめる。

表 5.1: 明野における残光観測結果。上段：可視光残光を検出したイベント。下段：可視光残光を検出することができず、限界等級が決定したイベント。表には悪天候、器機不具合のため観測できなかったイベントは掲載していない。

イベント	衛星トリガー 時刻 (UT)	明野観測 開始 (UT)	積分時間	等級		
				I_c	R_c	g'
GRB061121	15:22:29	17:36:34	60sec × 24	18.2 ± 0.1	18.9 ± 0.1	19.1 ± 0.2

イベント	衛星トリガー 時刻 (UT)	明野観測 開始 (UT)	積分時間	限界等級		
				I_c	R_c	g'
GRB060923A	5:12:15	10:10:19	30sec × 42	18.3	18.8	18.7
GRB061019	4:19:06	13:43:36	30sec × 165	18.7	19.5	(観測なし)
GRB061222A	3:28:52	8:48:53	60sec × 36	19.6	20.4	20.6
GRB061222B	4:11:02	12:52:28	60sec × 29	18.3	19.7	19.4
GRB070129	23:35:10	9:44:12 (翌日)	60sec × 25	18.4	19.0	19.4

5.1 GRB060923A

GRB060923A は、2006 年 9 月 23 日 5:12:15 UT に Swift 衛星 BAT によって検出されたイベントである。発生座標は、赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (16^h 58^m 30^s, +12^\circ 22' 45'')$ である。我々

は、イベントが観測可能な高度に昇った発生から約5時間20分後に観測を開始した。

明野望遠鏡で撮像した21分積分した画像は図5.1である。対応天体は検出することはできなかった。観測画像はDSS¹と比較している。

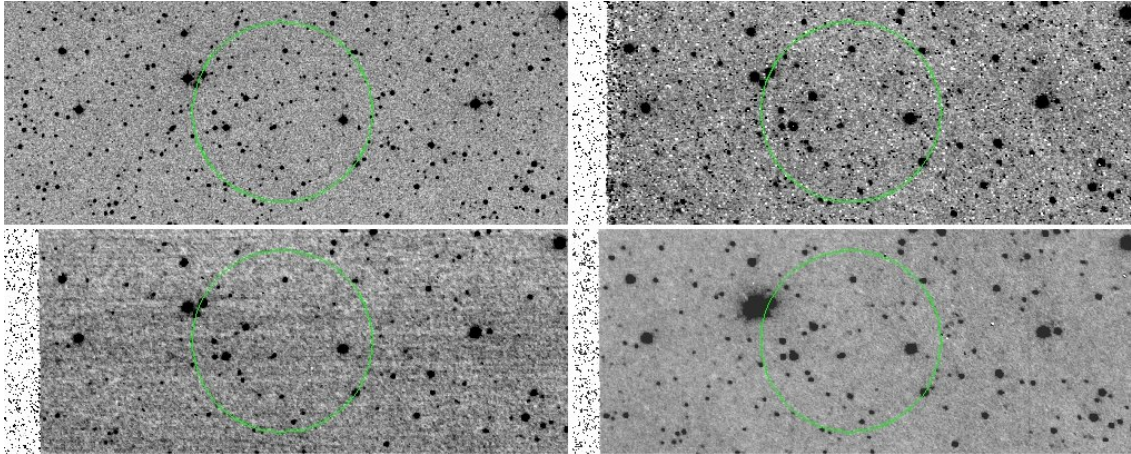


図 5.1: GRB060923A。左上図:DSS。右上図: g' バンド、左下図: R_c バンド、右下図: I_c バンドの観測。図中の緑円はSwift衛星BAT検出器のエラーサークル(3分角)。可視対応天体は発見できなかった。

5.2 GRB061019

GRB061019は、2006年10月19日4:19:06 UTにSwift衛星BATによって検出されたイベントである。発生座標は、赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (06^h 06^m 28^s, +29^\circ 34' 21'')$ である。我々は、発生から約9時間20分後のイベントが観測可能な高度となった時点から観測を開始した。

明野望遠鏡で撮像した82.5分積分した画像は図5.2である。対応天体は検出することはできなかった。この残光の可視光観測について発生3時間20分後にIバンドで20.2等級という報告があるため、明野で観測を開始した時点ではすでに限界等級以下となっており検出することができなかったと考えられる。なお、 g' バンドはフォーカスの調整に失敗したため、解析が可能な画像を取得することができなかった。

¹Digitized Sky Survey。サーベイ観測した画像が公開されている。

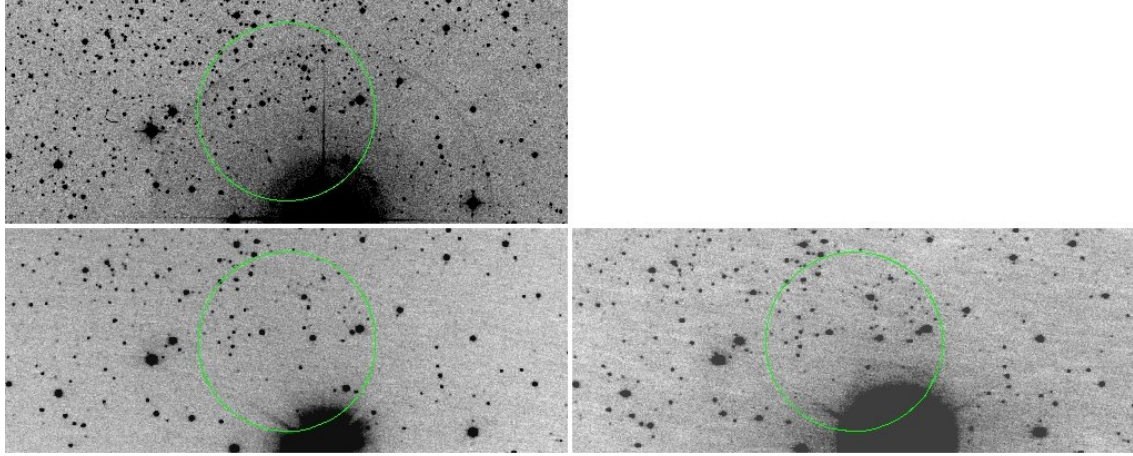


図 5.2: GRB061019。左上図:DSS。左下図: R_c バンド、右下図: I_c バンドの観測。 g' バンドの観測は行っていない。図中の緑円は Swift 衛星 BAT 検出器のエラーサークル (3 分角)。可視対応天体は発見できなかった。

5.3 GRB061121

GRB061121 は、2006 年 11 月 21 日 15:22:29 UT に Swift 衛星 BAT によって検出されたイベントである。座標は、発生直後の可視残光観測から赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (09^h 48^m 54.5^s, -13^\circ 11' 46.4'')$ に同定された。我々は、発生から約 2 時間 10 分後から観測を開始した。望遠鏡に実装された補正関数の精度が高くなかったため導入に失敗し、観測可能時刻から約 1 時間程遅れたの観測開始となった。

明野望遠鏡で撮像した 24 分積分した画像は図 5.3 である。GCN に報告された座標に可視光対応天体を発見した。等級は、 I_c, R_c, g' バンドの順に、 $18.2 \pm 0.1, 18.9 \pm 0.1, 19.1 \pm 0.2$ であった。

5.4 GRB061222A

GRB061222A は、2006 年 12 月 22 日 3:28:52 UT に Swift 衛星 BAT によって検出されたイベントである。座標は赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (23^h 52^m 58^s, +46^\circ 31' 34'')$ であった。我々は、日没となった発生から約 5 時間 20 分後から観測を開始した。

明野望遠鏡で撮像した 36 分積分した画像は図 5.4 である。このバーストは可視残光の検出報告はなく、明野でも検出することはできなかった。

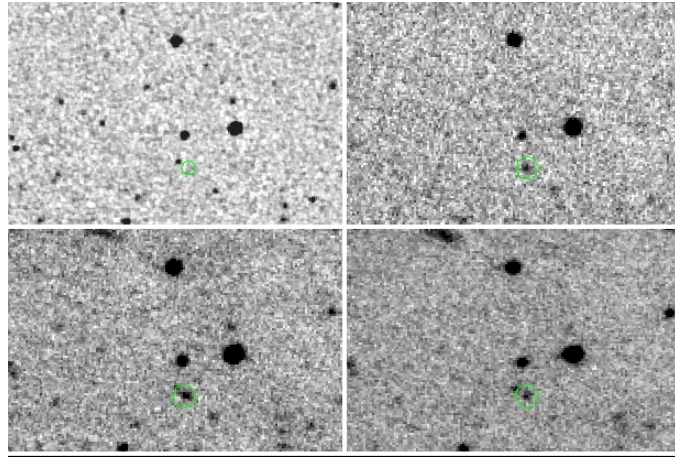


図 5.3: GRB061121。左上図:DSS。右上図： g' バンド、左下図： R_c バンド、右下図： I_c バンドの観測。図中の緑円内の天体が残光。DSS 画像にはないことからバーストであることがわかる。

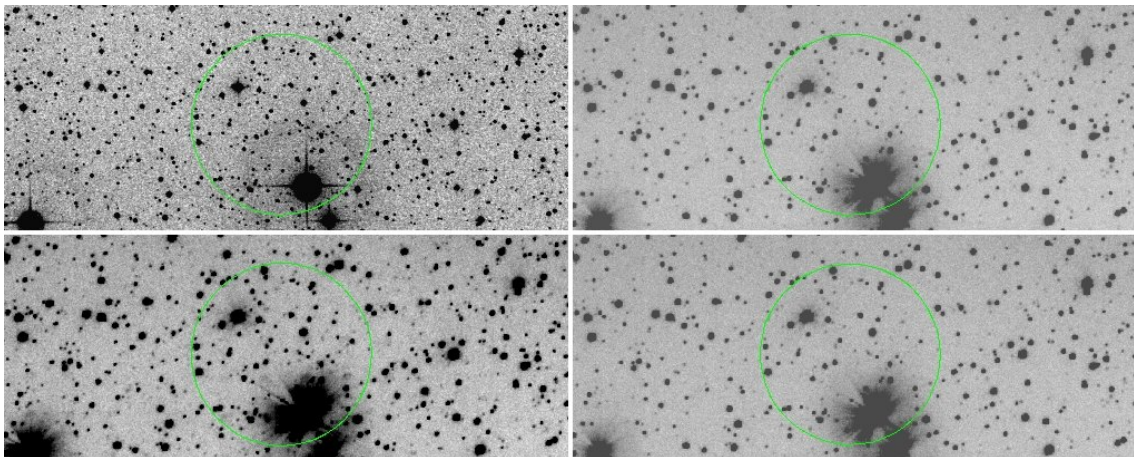


図 5.4: GRB061222A。左上図:DSS。右上図： g' バンド、左下図： R_c バンド、右下図： I_c バンドの観測。図中の緑円が Swift BAT のエラーサークル (3 分角)。可視光対応天体は検出されなかった。

5.5 GRB061222B

GRB061222B は、2006 年 12 月 22 日 4:11:02 UT に Swift 衛星 BAT によって検出されたイベントである。座標は赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (07^h 01^m 26^s, -25^\circ 51' 19'')$ であった。我々は、観測可能な高度となった発生から約 8 時間 40 分後から観測を開始した。発生約 7 分後に R バンドの観測で 17.7 等級で残光を検出したという報告があった。

明野望遠鏡で撮像した 29 分積分した画像は図 5.5 である。明野では可視光対応天体を

検出することはできなかった。観測した時点ですでに限界等級を下回ったものと考えられる。

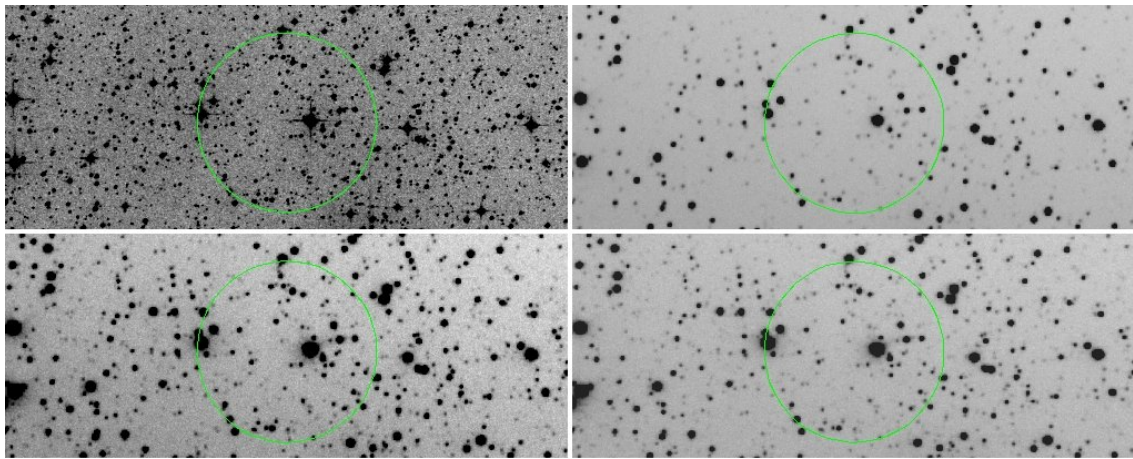


図 5.5: GRB061222B。左上図:DSS。右上図： g' バンド、左下図： R_c バンド、右下図： I_c バンドの観測。図中の緑円が Swift BAT のエラーサークル (3 分角)。可視光対応天体は検出されなかった。

5.6 GRB070129

GRB070129 は、2007 年 1 月 29 日 23:35:10 UT に Swift 衛星 BAT によって検出されたイベントである。座標は赤経、赤緯 $(\alpha, \delta) = (02^h 28^m 03^s, +11^\circ 41' 51'')$ であった。このバーストは日本時間で昼間に発生したため、我々は日没後に観測を開始した。発生から、10 時間程度経過していた。

明野望遠鏡で撮像した 25 分積分した画像は図 5.6 である。明野では可視光対応天体を検出することはできなかった。発生から約 2 時間 10 分後に R バンドで 21.3 等級で検出したという報告があることから、我々が観測を行った時点ではすでに限界等級以下となってしまうと考えられる。

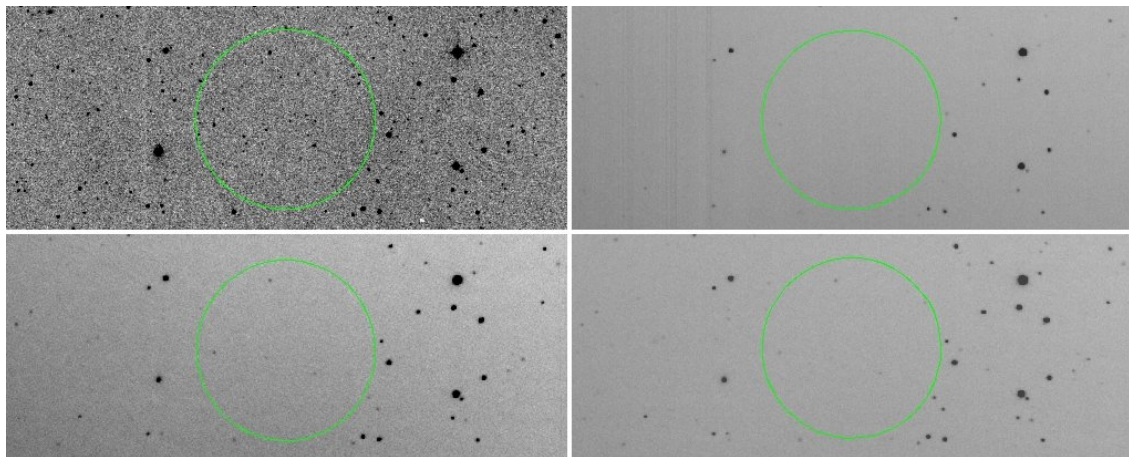


図 5.6: GRB070129。左上図:DSS。右上図： g' バンド、左下図： R_c バンド、右下図： I_c バンドの観測。図中の緑円が Swift BAT のエラーサークル (3 分角)。可視光対応天体は検出されなかった。

第6章 まとめ

我々は、2台の可視望遠鏡と1台の近赤外望遠鏡を利用して、ガンマ線バーストの初期残光を多色同時に観測することでガンマ線バーストの放射機構を解明しようとしている。また、その赤方偏移を決定し、ガンマ線バースト残光を利用した初期宇宙探査をしようとしている。

本研究では、明野 50cm 望遠鏡においてガンマ線バースト残光の自動観測システムと解析パイプラインの開発を行った。

自動観測システムはガンマ線バースト位置速報ネットワーク GCN に対応し、急速に減光するガンマ線バースト残光を発生直後から無人で観測することを目的として開発した。我々が開発したシステムは望遠鏡、三色同時撮像カメラなどの観測器機の個別の操作を行えることはもちろん、これらの器機を協調動作させることも可能となっている。協調動作が可能なことによりディザリングの機能を実現し、これによって限界等級が深くなるなど観測データの質の向上にもつながっている。

解析パイプラインの開発では、WCS の決定、測光、ゼロ点の決定の自動化に成功した。また、画像のクオリティの判定や限界等級の測定などの自動化も行った。我々のすべての観測データは解析パイプラインによって処理されデータベースへと登録される。これによって、データを一括管理することが可能となり、効率的な運用が行えるようになった。

我々は、自動観測システムと解析パイプラインを使用し、GRB061121 の残光の検出に成功した。このことは、我々のシステムがガンマ線バースト残光の観測システムとして問題なく機能することを示した。

今後は、自動観測システム、解析パイプラインを岡山望遠鏡へ移植し、すべての望遠鏡にて残光の自動観測を行いたいと考えている。また、将来的には、解析パイプラインを高度化し、自動的に画像からガンマ線バーストを同定できるシステムにしていきたいと考えている。発生直後にその位置を同定することで、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡による分光観測へとつなげていきたいと考えている。

付録A 付録

A.1 望遠鏡制御

A.1.1 シリアル通信コマンド

シリアル通信を用いた ATLAS 2000 とのコマンドの送受信は以下のように行うことができる。以下は完全なプログラムとなっていない。

```
const char *serPort="/dev/ttyS0";

int fd;
if ( (fd = open(serPort, O_RDWR | O_NOCTTY | O_NONBLOCK )) == -1) {
    printf("Serial Port Open Error\n");
    return -1;
}

struct termios tty_termios; /* test_termio; */
tcgetattr(fd, &tty_termios);

/* initialize serial port */

tty_termios.c_iflag = 0x2000;
tty_termios.c_oflag = 0x1800;
tty_termios.c_cflag = 0x8bd;
tty_termios.c_lflag = 0x0;
tty_termios.c_line = 0;
cfsetospeed(&tty_termios, B9600);
cfsetispeed(&tty_termios, B9600);
tcsetattr(fd, TCSANOW, &tty_termios);

/* query status */

cout << q_status << "\n";
write(fd, q_status, strlen(q_status));

//sleep(1);

int ret;
char tmpretval[128];
do{
```

```

    usleep(interval);
    ret = read(fd, tmpretval , 128);
    cout << "ret : " << ret << "\n";
    if( ret == -1 ){
        cerr << "ERROR : Serial Port read, FD : " << fd << "\n";
            interval = interval * 2;
        cerr << "ERROR : Retry after " << interval << " usec...\n";
    }
}while(ret<0);

close(fd);

```

A.1.2 ATLAS 2000 シリアル通信用コマンド

ATLAS 2000 がシリアル通信に対して提供するコマンドについてまとめる。表 A.1、表 A.2、表 A.3、に表したコマンドを telcon は実装している。

特殊な使用方法であるシリアル通信コマンドについて説明する。

望遠鏡導入の手順 まず、‘:Sd’、‘:Sr’ コマンドによって導入座標を指定し、‘:MS#’l コマンドで指定座標に望遠鏡を導入する。

望遠鏡の原点検出 ‘:ORGt#’ コマンドで原点検出を行っていない(戻り値 : 0)であることを確認し、‘:OrgT#’ コマンドで原点検出を行う。原点検出中であるかどうかは、‘:ORGt#’ コマンドで確認することができる。

ドームの原点検出 ‘:ORGd#’ コマンドで原点検出を行っていない(戻り値 : 0)であることを確認し、‘:OrgD#’ コマンドで原点検出を行う。原点検出中であるかどうかは、‘:ORGd#’ コマンドで確認することができる。

最後、シリアル通信コマンドに関する注意点について説明する。

- 望遠鏡の仰角がある値よりも小さくなった場合、傾斜センサーが作動し望遠鏡は停止する。この状態をソフトウェアリミットと呼ぶ。このとき、全てのコマンドは、戻り値 : 9 を返す。
- 戻り値が 2 文字以上の場合、‘dd.dd#’ などのように戻り値の最後に ‘#’ がつき、1 文字の戻り値の場合、‘1’ のように最後に ‘#’ が付かない。
- 複数のコマンドを同時に送信することができる。例えば、‘:GR#:GD#’ として送信すると、赤経、赤緯の値を取得できる。

表 A.1: シリアル通信用コマンド一覧 1

コマンド	戻り値	コマンド内容
:HM#	0 : 移動終了, 1 : 移動中	ホームポジションに移動する。
:Qn#	1 : 正常終了, 8 : エラー	北移動を停止
:Qs#	1 : 正常終了, 8 : エラー	南移動を停止
:Qe#	1 : 正常終了, 8 : エラー	東移動を停止
:Qw#	1 : 正常終了, 8 : エラー	西移動を停止
:Q#	1 : 正常終了, 8 : エラー	自動導入を停止
:CM#	0 : エラー, 1 : 正常終了	現在の目標データを望遠鏡へプリ セットする。
:GR#	HH:MM:SS# : 値 (00:00:00-23:59:59)	赤経の値を得る
:GD#	sDD:MM:SS# : 値 (-90:00:00+90:00:00)	赤緯の値を得る
:GDa#	sDDD:MM:SS# : 値 (-180:00:00+180:00:00)	拡張赤緯の値を得る
:GA#	sDD:MM:SS# : 値 (-90:00:00+90:00:00)	高度角の値を得る
:GZ#	DDD:MM:SS# : 値 (000:00:00-359:59:59)	方向角の値を得る
:GH#	HH:MM:SS# : 値 (00:00:00-23:59:59)	時角を得る

表 A.2: シリアル通信用コマンド一覧 2

コマンド	戻り値	コマンド内容
:Mn#	1 : 正常終了, 8 : エラー	北に一定時間移動 (:Qn#で停止)
:Ms#	1 : 正常終了, 8 : エラー	南に一定時間移動 (:Qs#で停止)
:Me#	1 : 正常終了, 8 : エラー	東に一定時間移動 (:Qe#で停止)
:Mw#	1 : 正常終了, 8 : エラー	西に一定時間移動 (:Qw#で停止)
:MS#	0 : 導入開始/終了, 1 : 目標が地平より下, 8 : エラー	設定された対象天体に移動
:RG#	1 : 正常終了, 8 : エラー	スピードをガイドに変更
:RC#	1 : 正常終了, 8 : エラー	スピードをコントロールに変更
:RM#	1 : 正常終了, 8 : エラー	スピードをミドルに変更
:RS#	1 : 正常終了, 8 : エラー	スピードをスルーに変更
:SrHH:MM:SS#	0 : エラー, 1 : 正常終了	対象天体の赤経を引数 HH:MM:SS に設定
:SdsDD:MM:SS#	0 : エラー, 1 : 正常終了	対象天体の赤緯を引数 sDD:MM:SS に設定

表 A.3: シリアル通信用コマンド一覧 3

コマンド	戻り値	コマンド内容
:Cpo#	0 : 正常終了, 1 : 実行済み, 8 : エラー	望遠鏡のキャップを開ける。
:Cpc#	0 : 正常終了, 1 : 実行済み, 8 : エラー	望遠鏡のキャップを閉じる。
:Dsh#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドーム回転速度を高速にする。
:Dsl#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドーム回転速度を低速にする。
:DoQ#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドームの回転を停止する。
:Foi#	1 : 正常終了, 8 : エラー	フォーカスを IN に移動する。
:Foo#	1 : 正常終了, 8 : エラー	フォーカスを OUT に移動する。
:FoQ#	1 : 正常終了, 8 : エラー	フォーカスの移動を停止する
:Gcp#	0 : 閉, 1 : 開, 2 : 移動中, 8 : エラー	キャップの開閉状態を取得する。
:OrgF#	0 : エラー, 1 : 正常終了	フォーカスの原点を検出する。
:MFZZ9.99#	0 : エラー, 1 : 正常終了	引数 ZZ9.99 (範囲 0-136.00) に指定された位置にフォーカスを移動する。
:GF#	ZZ9.99# : 値 (0-136.00), 8 : エラー	フォーカスの値を取得する。
:GS#	0 : 閉, 1 : 開, 8 : エラー	ドームの開閉状態を取得する。
:DoL#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドームを左に回転。:DoQ#で停止。
:DoR#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドームを右に回転。:DoQ#で停止。
:Doo#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドームスリットを開ける。
:Doc#	1 : 正常終了, 8 : エラー	ドームスリットを閉じる。
:GW#	0 : 雨, 1 : 雨以外, 8 : エラー	雨滴センサーの状態を取得する。
:ORGt#	0 : 機能あり, 1 : 原点検出中, 8 : 機能なし	望遠鏡の原点検出機能を確認する。
:OrgT#	0 : エラー, 1 : 正常終了	望遠鏡の原点を検出する。
:ORGd#	0 : 機能あり, 1 : 原点検出中, 8 : 機能なし	ドームの原点検出機能を確認する。
:OrgD#	0 : エラー, 1 : 正常終了	ドームの原点を検出する。

- ATLAS 2000 がコマンドを受信後、戻り値を生成するまで、300msec 程度の時間がかかる。このため、シリアル通信を通してコマンドを送信し戻り値を取得する場合、送信後、300msec 程度の時間待機してから戻り値を取得しにいくことが必要である。

A.1.3 望遠鏡ステータスファイル

望遠鏡ステータスの出力フォーマットは次の通りである。フォーマット中の記号”\”は改行せず次の行へ続くことを表し、実際には文字”\”はファイルへは出力されない。

コラムのデータ内容に関しては、表 3.3 を参照してほしい。

```

1 AKENO 2007-01-18 09:00:4.380000 17:00:7.16 00:00:4.380000 \
54118.00005 0 16:57:58.00 +88:05:37.00 +88:05:37.00 \
52.32262656 1.636086754 00 0.5381565028 00 00 00 00 \
2000.0 0 0 00 00 00 00 22.7 00 00 00 00 \
276.65 0 276.95 0 0 1 0 157.5 0
1 AKENO 2007-01-18 09:00:15.491000 17:00:18.30 00:00:15.491000 \
54118.00018 0 16:58:8.00 +88:05:37.00 +88:05:37.00 \
52.32265863 1.63608794 00 0.5429082437 00 00 00 00 \
2000.0 0 0 00 00 00 00 22.7 00 00 00 00 \
276.65 0 276.95 0 0 1 0 157.5 0
1 AKENO 2007-01-18 09:00:26.602000 17:00:29.44 00:00:26.602000 \
54118.00031 0 16:58:19.00 +88:05:37.00 +88:05:37.00 \
52.32268952 1.636089083 00 0.5434974967 00 00 00 00 \
2000.0 0 0 00 00 00 00 22.7 00 00 00 00 \
276.65 0 276.95 0 0 1 0 157.5 0

```

A.1.4 気象情報 ASCII ファイルの形式

Weather Monitor II で測定されたデータを WeahterLink を利用し読み出し、以下の形式で保存している。

```

#Log monitored by WeatherLink and summarized by weatherlog.pl
#date time      Ttel  Trm   dir   speed  hum   baro
#(JST)          (C)   (C)   dir   (m/s) (%)  (hPa)
06/08/11 9:00 28.3  27.8  WNW   0.0   63   910.0
06/08/11 9:01 28.3  27.8  WNW   0.0   63   910.0
06/08/11 9:02 28.4  27.8  WNW   0.4   62   910.0
06/08/11 9:03 28.4  27.9  WNW   0.0   62   910.0
06/08/11 9:04 28.4  27.9  NNW   0.4   62   910.0
06/08/11 9:05 28.5  27.9  W     0.0   62   910.0
06/08/11 9:06 28.5  27.9  W     0.0   62   909.9
06/08/11 9:07 28.6  28.0  W     0.0   62   910.0
06/08/11 9:08 28.6  28.0  W     0.0   62   909.9
06/08/11 9:09 28.6  28.1  W     0.0   62   910.0
(以下、省略)

```

左コラムから、日付 (JST)、時刻 (JST)、鏡筒温度、ドーム内気温、風向、風速、ドーム内湿度、圧力となっている。

A.1.5 TPoint で使用されるポインティングデータファイル

TPoint で使用されるポインティングデータのフォーマットは以下の通りである。

```
Akeno Telescope 2006 12 12
: EQUAT
+35 47 11.8 2006 10 31 17.6 900.0 900.0 0.50 0.830

22 49 37.49 +64 20 46.69 22 49 22.00 +64 41 11.00 22 37 28.9
21 44 52.76 +69 42 08.87 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 47 21.6
21 44 52.56 +69 42 08.18 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 48 31.4
21 44 52.39 +69 42 08.51 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 49 40.6
21 44 52.38 +69 42 08.54 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 50 50.1
21 44 52.20 +69 42 09.13 21 43 37.00 +70 02 28.00 22 52 00.1
21 44 52.19 +69 42 08.77 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 53 09.6
21 44 52.24 +69 42 08.58 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 54 17.7
21 44 52.26 +69 42 08.69 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 55 26.4
21 44 52.34 +69 42 08.79 21 43 38.00 +70 02 28.00 22 56 36.3
(以下、省略)
```

1 行目 キャプション。80 文字目までが使用される。

2 行目 オプション。明野 50cm 望遠鏡では、架台が赤道儀であることを表す ‘: EQUAT’ を指定する。

3 行目 パラメータ。各パラメータは’ ’ で区切られ、左から 3 パラメータは観測地点の経度 (°, ', ")、次の 3 パラメータは観測日 UTC(*yyyy, mm, dd*) を表し、以下 1 パラメータずつ、気温 (°C)、気圧 (hPa)、観測地点の高度 (m)、相対湿度 (範囲: 0-1、初期値 0.5)、観測波長 (μm) を表している。

4 行目-最終行 赤経、赤緯の対応と地方恒星時。左から、6 パラメータは、画像解析から得られた真の赤経 ($hh^hmm^mss.ss^s$)、赤緯 ($dd^\circ mm' ss.ss''$)、次の 6 パラメータが望遠鏡の未補正の赤経 ($hh^hmm^mss.ss^s$)、赤緯 ($dd^\circ mm' ss.ss''$) を表し、最後の 3 パラメータは観測時の地方恒星時 ($hh^hmm^mss.ss^s$) を表している。

A.2 CCD カメラの制御コマンド

表、表、表、表に CCD カメラの制御コマンドをまとめる。これらのコマンドは telcon 内部から呼び出される。

表 A.4: CCD 制御コマンド 1。以下の形式で使用する。

`altac -p server port Command`

コマンド名	引数	コマンド内容
ResetSystem	(なし)	カメラのリセットを行う。
Expose	t (露出時間 [秒])	オブジェクトフレームの撮像
Bias	(なし)	バイアスフレームの撮像
Dark	t (露出時間 [秒])	ダークフレームの撮像
Flat	t (露出時間 [秒])	フラットフレームの撮像
Abort	n (保存なし:n=0、保存あり:n=1)	フラットフレームの撮像
SaveTo	file (ファイル名)	FITS 形式で保存する。

表 A.5: CCD 制御コマンド 2。以下の形式で使用する。

`altacfg -p server port Command`

コマンド名	引数	コマンド内容
InitDefaults	(なし)	デフォルトの設定のロード
InitDriver	n (デバイス番号:n = 0, 1, 2, ...)	デバイスの初期化
SetFilter	filter (フィルタ名)	フィルタ名の設定
SetFilter	(なし)	フィルタ名の取得
SetObject	name (オブジェクト名)	オブジェクト名の設定
SetObject	(なし)	オブジェクトの取得
SetPubFlag	flag (flag:ON/OFF)	公開フラグの設定
SetPubFlag	(なし)	公開フラグの取得
SetPubTime	n (専有期間 [日])	専有期間の設定
SetPubTime	(なし)	専有期間の取得

表 A.6: CCD 制御コマンド 3。以下の形式で使用する。

```
altacfg -p server port -r Command
```

コマンド名	戻り値	コマンド内容
ImagingStatus	-2: DataError, -1: PatternError, 0: Idle, 1: Exposing, 2: ImagingActive, 3: ImageReady(Done), 4: Flushing, 5: WaitingOnTrigger, 6: ConnectionError	カメラのステータス
CoolerStatus	0: Off, 1: RampingToSetPoint, 2: AtSetPoint, 3: Revision	クーラーステータス
ShutterStatus	0:Close, 1:Open	シャッターステータス
CoolerEnable	0:Unenable, 1:Enable	クーラーステータス
CoolerSetPoint	温度 (°C)	クーラーの設定温度
TempCCD	温度 (°C)	現在の CCD の温度
TempHeatsink	温度 (°C)	現在のヒートシンクの温度
FanMode	0:Off, 1:Low, 2:Medium 3:High	ファンモード
CameraMode	0=Normal, 1=TDI, 2=Test, 3=Ext.Tig., 4=Ext. Shut.	現在のカメラモード

表 A.7: CCD 制御コマンド 4。以下の形式で使用する。

```
altacfg -p server port -w Command
```

コマンド名	引数	コマンド内容
CoolerEnable	0:Unenable, 1:Enable	クーラーの冷却を ON/OFF する。
CoolerSetPoint	温度 (°C)	クーラーの温度を設定
FanMode	0:Off, 1:Low, 2:Medium 3:High	ファンの強弱を設定
CameraMode	0=Normal, 1=TDI, 2=Test, 3=Ext.Tig., 4=Ext. Shut.	カメラモードを設定

A.3 FITS ヘッダー

明野 50cm 望遠鏡で使用されている FITS ヘッダーの例を示す。

以下では、'keyword = value / comment' の順で並んでいる。それぞれのキーワードが何を表している値なのかは comment で記述されている。

```
SIMPLE = T / file does conform to FITS standard
BITPIX = 16 / number of bits per data pixel
NAXIS = 2 / number of data axes
NAXIS1 = 1074 / length of data axis 1
NAXIS2 = 1024 / length of data axis 2
EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H
BZERO = 32768 / offset data range to that of unsigned short
BSCALE = 1 / default scaling factor
DATA-TYP= 'OBJECT ' / Object,Dark,Bias,etc
OBJECT = 'FOCUS ' / Name of Object
FILTER = 'I ' / Filter type.
OBSERVAT= 'TITECH ' / Observatory Site
ORIGIN = 'NINS ' / Institution generating data
TELESCOP= 'TIT-OAO-GRB50CM' / Telescope Name
FOC-POS = 'CASSEGRAIN' / Position of the instrument focus unit
DETECTOR= 'Apogee_U6' / CCD Camera
CAM-ID = 'A5464 ' / Camera serial number
CREATOR = 'Altad: Version 4.10 [6, 14, 2006]' / Data-taking program
LATITUDE= '35:47 ' / [deg North] Telescope Latitude
LONGITUD= '138.30 ' / [deg East] Telescope Longitude
ALTITUDE= 900.0 / [m] Heights above sea level
DATE-OBS= '2006-08-15' / [yyyy-mm-dd] Observation start date
UT = '17:25:16.28' / [HH:MM:SS.SS] Universal Time at start
JST = '02:25:16.28' / [HH:MM:SS.SS] Japan Standard Time at start
LST = '00:11:12.8' / [HH:MM:SS.S] Local Sidereal Time at start
JD = 2453963.225883 / [day] Julian Date at the start
MJD = 53962.725883 / [day] MJD at the start of the exposure
PUB-TIME= '2007-08-15' / [yyyy-mm-dd] Date of Publication
PUB-FLAG= 'On ' / On : public, Off : private
EXPTIME = 30.000 / [sec] Exposure time
DET-TMP = 270.29 / [Kelvin] CCD temperature
SET-TMP = 270.15 / [Kelvin] Set CCD temperature
HS-TMP = 297.34 / [Kelvin] Heatsink temperature
TECOOLER= 'ON ' / Camera Cooler state
FANMODE = 2 / Fan Mode 0:OFF, 1:Low, 2:Medium, 3:High
GAIN = 1.35 / [e-/ADU] CCD gain
RONOISE = 9.02 / [e-] CCD read out noise
DETPXSZ1= 24.0 / [um] Detector pixel size in axis 1
DETPXSZ2= 24.0 / [um] Detector pixel size in axis 2
EFP-MIN1= 51 / [pixel] Start X pos. of effective area
EFP-RNG1= 1024 / [pixel] X Range of effective area
EFP-MIN2= 1 / [pixel] Start Y pos. of effective area
EFP-RNG2= 1024 / [pixel] Y Range of effective area
WRA = '20:42:39.624' / [HH:MM:SS.S] Object RA at EQUINOX
WDEC = '+00:20:32.14' / [dd:mm:ss] Object DEC at EQUINOX
DECEXT = '+00:34:5.00' / [ddd:mm:ss] Extended DEC
HA = -20.5283813 / [hour] Object HA at EQUINOX
```

```

WEQUINOX=          2000.0 / Equinox of coordinates
ZD      =          60.091 / [deg] Zenith Distance at exposure start time
SECZ    =           2.006 / Secant of ZD at exposure start time
AIRMASS =          1.99997 / Airmass at exposure start time
OBSERVER= 'AKENO   '    / Names of the Observers
INSTRUME= 'TCAM    '    / Name of instrument
RA-VAL  =           0 / [count] Encoder value of RA
DEC-VAL  =           0 / [count] Encoder value of DEC
FOC-VAL  =          22.220 / [mm] Value of FOCUS
TEL-TMP  =          294.0 / [deg] Telescope Tube Temperature
OBJ-NUM  =           0 / Local Catalog Number
OBJ-NAME= '00      '    / Local Catalog Name
OBJ-RA   = '00     '    / [HH:MM:SS.S] Local Catalog RA
OBJ-DEC  = '00     '    / [dd:mm:ss] Local Catalog DEC
OBJ-EPCH=          2000.00 / Local Catalog Epoch
OBJ-MURA=          0.0 / [arcsec/yr] Local Catalog Proper Motion in RA
OBJ-MUDC=          0.0 / [arcsec/yr] Local Catalog Proper Motion in DEC
OUT-HUM  =          74.0 / [%] Humidity measured outside of dome
OUT-PRS  =          904.4 / [hPa] Atmospheric Pressure outside of dome
OUT-TMP  =          295.8 / [%] Temperature measured outside of dome
OUT-WND  =           0.0 / [m/s] Wind Speed
OUT-WNDD=          157.5 / [deg] Wind Direction (North=0, East=90)
FRAMEID  = 'MTATI0000019296' / Image sequential number.
HISTORY  Copy of image MTATI0000019296.fits rotated 180 degrees
WEPOCH  =           2000
RADECSYS= 'FK5     '    ,
BG-LEVEL=          1215.00
PEDLEVEL=          1050.00
BG-RMS   =           10.701
CRPIX1   =           537.5000
CRPIX2   =           512.5000
CRVAL1   =          310.554396213
CRVAL2   =           0.242145260
CTYPE1   = 'RA---TAN'
CTYPE2   = 'DEC--TAN'
CD1_1    =          -0.000452778325
CD1_2    =           0.000003741341
CD2_1    =           0.000003295963
CD2_2    =           0.000455625615
WCSRFCAT= 'ua2     '    ,
WCSIMCAT= 'MTATI0000019296.cat'
WCSMATCH=           33
WCSNREF  =           50
WCSTOL  =           7.0000
RA       = '20:42:13.055'
DEC      = '+00:14:31.72'
EQUINOX  =           2000
SECPIX1  =           1.6300
SECPIX2  =           1.6403
WCSSEP   =           0.826
IMWCS    = '3.5.7, 5 October 2004, Doug Mink (dmink@cfa.harvard.edu)'
EPOCH    =           2000
FWHM-AVG=           3.397
ZERO-PT  =          -0.000
END

```

A.4 等級エラー $MERR$ の導出

$Noise/Signal$ から $MERR$ に変換は、

$$MERR = 1.0857 \frac{Noise}{Signal}$$

で行われる。これを導出する。

カウント c の場合の等級を m とすると、

$$m = -\frac{5}{2} \log(c) + z \quad (\text{A.1})$$

と表すことができる。ここで z はゼロ点である。

カウント c のエラーを Δc 、等級 m エラーを Δm とすれば、

$$m + \Delta m = -\frac{5}{2} \log(c + \Delta c) + z \quad (\text{A.2})$$

と表すことができる。2式より、

$$\begin{aligned} \Delta m &= -\frac{5}{2} \log\left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) \\ &= -\frac{5}{2} \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right)}{\ln 10} \\ &\simeq -\frac{5}{2} \frac{\frac{\Delta c}{c}}{\ln 10} \\ &\simeq -1.0857 \frac{\Delta c}{c} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。

関連図書

- [1] 谷津陽一 修士論文 2005
- [2] 佐藤理江 修士論文 2004
- [3] 横尾武夫 “新・宇宙を解く”
- [4] 天体情報処理研究会 “FITS の手引き 第 5 章”
- [5] 下川辺隆史 卒業論文 2005
- [6] Klebsadel, Strong & Olson 1973
- [7] Meegan et al. 1992
- [8] van Paradijs et al. 1997
- [9] Lamb and Reichart 2000
- [10] Lamb and Reichart 2001
- [11] Smith et al. 2002
- [12] Costa et al. 1997
- [13] Yonetoku et al. 2004
- [14] Sato et al. 2003
- [15] Greisen, E. W. Representations of World Coordinates in FITS (WCS I) 2002
- [16] Calabretta, M. R. Representations of World Coordinates in FITS (WCS II) 2002
- [17] IRAF Programming Group “A Reference Guide to the IRAF/DAOPHOT Package”
1994
- [18] Lindsey Elspeth Davis “A User’s Guide to the IRAF Apphot Package” 1989

[19] E. Bertin “SEXRTACTOR v2.3 User’s manual”

[20] Tpoint Software “TPOINT”

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方々にお世話になりました。指導教官の河合誠之先生には、ゼミやミーティングをはじめ、さまざまな相談にのっていただき、多くの指導をして頂きました。片岡淳助手には、的確なご指摘を頂きました。また、国立天文台岡山天体物理観測所の吉田道利所長、同観測所の柳澤顕史氏には、データ解析・処理方法など可視光観測に関する大変多くの指導をして頂きました。

研究室においても多くの方にお世話になりました。私が学部のところから、佐藤理江氏、谷津陽一氏には望遠鏡に関して一から教えて頂きました。小谷太郎氏には計算機やネットワークに関して様々なことを教えて頂きました。また、観測をする上で多くの協力をしてくださった石村拓人氏、Nicolas Vasquez 氏ありがとうございました。

研究に限らず、河合研究室、渡邊研究室の方々にはいろいろなことを教えて頂きました。ありがとうございました。