ガンマ線バースト追尾観測システムの 開発とCCDカメラの性能評価

埼玉大学 理学部物理学科 田代研究室 04RP019 菅佐原たか子 指導教官 田代信 教授 日本学術振興会特別研究員 浦田裕次

平成 20 年 3 月 7 日

概 要

ガンマ線バーストは、宇宙のある方向から、突如として莫大な量のガン マ線が降り注ぐ現象である。発見当初は謎の現象であったが、X線天文衛 星の発達により、その研究はここ 20年余りの間に飛躍的に進んでいる。 特に、残光と呼ばれる現象が見つかってからは,ガンマ線バーストの発生 位置、距離を正確に割り出せるようになり、宇宙遠方で1日に1回程は起 こる現象であることがわかった。

HETE-2、Swift により、ガンマ線バーストの発生直後からの観測が可 能となった。ガンマ線バーストは、発生後、急速に減光してしまうため、 発生直後の迅速な観測が重要となってくる。この発生直後の様子を捉える には、衛星からの速報を受けたら、すぐにその位置に向き、連続した追尾 観測が可能な望遠鏡が必要である。そこで現在開発中なのが、市販の小型 望遠鏡と冷却 CCD カメラを用いて、発生直後の GRB を可視光残光を捉 え、追尾観測するシステムである。このシステムは、東京大学木曽観測所 に設置の予定である。

今回、卒業研究にあたり、このシステムで使う CCD カメラの性能を調 べ、そこから運用する際に適切だと思われるフローチャートの作成を行っ た。CCD カメラは、天体画像を撮る際に一般的によく用いられているも のであるが、熱によって発生する雑音に敏感であるということから、冷却 して使用する。ノイズをなるべく抑えるための温度、適切な運用体制を作 り出すには、CCD の性質を知っておく必要がある。性能評価の実験を調 べた上で、運用におけるフローチャートを作成した。

目 次

第1章	ガンマ線バーストとは	6
1.1	ガンマ線バーストの歴史	6
1.2	ガンマ線バーストの残光	8
1.3	可視光フラッシュ........................	10
1.4	ガンマ線バーストの種類と起源天体	10
1.5	ガンマ線バーストと遠方宇宙	13
箆2音	ガンマ線バースト追知測システムの閉発	15
和4年 91	いていたが、ストに転用システムの用光	15
2.1	 011 可相米 可相米 可相米 司相米 明の 市 更性 	15
	2.1.1 91777000単安任 ····································	15
<u></u>	2.1.2 垣観測の重安任 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	17
2.2	GND 地工観測の天秋 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	17
	2.2.1 GND 日勤但尼主述员 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	17
<u>•</u> ••	2.2.2 WIDGEI	10
2.3	水のられる相反・ンステム	18
2.4	開先中のシステム慨妄	20
第3章	CCD カメラ	21
3.1	CCD カメラとは	21
	3.1.1 CCD カメラの検出の原理	21
	3.1.2 動作・電荷転送	22
	3.1.3 転送方式	23
3.2	CCD カメラの冷却	24
3.3	ノイズ	25
3.4	CCD カメラ ST-9XE のスペック	26
<i></i>		
第4章		27
4.1		27
	4.1.1 CCD カメラの冷却限界	27
	4.1.2 CCD カメラの冷却時間	28
4.2	dark frame の解析	32
	4.2.1 dark count の温度依存性	32

	4.2.2 dark count の積分時間依存性 3
	4.2.3 dark count の安定性 3
4.3	hot pixel、dead pixel の解析
	$4.3.1 \text{hot pixel} \dots \dots$
	4.3.2 dead pixel
4.4	light count linearity
4.5	CCD カメラの結露とその除去 4
	4.5.1 冷却と乾燥剤 4
	4.5.2 乾燥剤の再生 4
	4.5.3 CCD チップ面の清掃
	4.5.4 除去作業の結果とまとめ
4.6	性能評価のまとめとフローチャート 4

第5章 今後の課題

図目次

1.1	BATSE 観測装置が捉えたガンマ線バーストの到来方向	7
1.2	GRB030329/SN2003dhの可視光スペクトル。GRB030329	
	の可視光残光が減光するにつれて、付随する SN2003dh の	
	成分が顕著に見えてきた。	8
1.3	BeppoSAX が捉えた GRB970228 の X 線残光。左はバース	
	ト 8 時間後、右は 3 日後。	9
1.4	GRB970228の可視光残光。左はバースト当日、右は8日後	10
1.5	ROTSE が捉えた可視光フラッシュ。上の段の真ん中の図	
	において、急に増光し、その後、時間が経つにつれ、減光	
	していく様子が捉えられている。..............	11
1.6	CGRO 搭載 BATSE 観測装置が捉えた 1234 例の GRB の	
	継続時間 (T_{90}) 分布。 2 秒を堺に 2 つに分かれていることが	
	わかる。	12
1.7	ハッブル望遠鏡が捉えた GRB050709 の可視光残光 (図中	
	の黄色の円の中)。	12
1.8	TAROT(口径 25cm) が捉えた GRB050904 の可視光残光	
	(図の赤い円の真ん中)。現在発見されている中で、最も遠	
	くに位置する GRB(z=6.3)[14]	13
1.9	GRB050904の可視光 (I-band、赤)とX線 (0.5-10ev、黒)	
	の light curve。 prompt emission の終わりと afterglow への	
	移り変わりが示されている。点線は、残光の続きを推定し	
	たもの。[14]	13
1.10	上は ROTSE-III(口径 45cm) が捉えた発生後 19 秒の画像。	
	下は VLT(口径 8m) が捉えた残光で、左が 2.6 日後、15.5	
	日後の画像。	14
1.11	GRB060927の可視光・X 線の light curve。可視光とX 線	
	では、振るまいが異なることがわかる。	14

2.1	下は、X 線、可視光、電波のスペクトルの時間経過の変化	
	を示したもの。時間が経過するとともに、スペクトルは、	
	低周波数側に移りながら減光しているのがわかる。上の図	
	はあ、下の時間に依存するスペクトルから求めたフラック	
	スによる横軸時間(日)の光度曲線。	16
2.2	GRB の光度曲線。単純なベキ乗ではなく、急激な減光から	
	緩やかな減光となり、-1乗で減光していく。	16
2.3	WIDGET	18
2.4	105cm Schmidt 望遠鏡	18
2.5	GCN の模式図	19
2.6	WIDGET、Shnidt 望遠鏡、follow-up 望遠鏡の観測可能領	
	域の模式図。follow-up 望遠鏡の設置により、新たに、図の	
	青い部分の観測が可能となる。	19
2.7	CCD カメラ ST-9XE	20
2.8	MEADE LX90-30	20
3.1	ST-9XE の量子効率のグラフ	22
3.2	Interline 型	23
3.3	Frame transfer $\underline{\square}$	24
3.4	Full frame transfer $\underline{\Psi}$	24
4.1	宇時のセットマップ	<u> </u>
4.1	実験のビットアック ····································	20
4.2		20
4.5		30
4.4	、 一 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	91
15	ノ。 ····································	31 20
4.0	dark frame の回家	ა∠ აა
4.0		ა ექ
4.1		34 96
4.8	dark count の時間批行性	30
4.9		31
4.10	10 枚の dark frame C dark count、 温度の クフノ	38
4.11	not pixel。周りよりも多く電流が流れるにの、日い点として見ます。	20
1 10		39
4.12	パマ 4 二 10 []、 有分 時 60 [sec] の 時 に お け る ヒ ク セ ル	40
1.10		40
4.13		40
4.14	冷却温度-10[]、積分時間 2[sec] の時のビクセルのヒスト	
	グラム	41

4.15	light count linearity	42
4.16	CCD カメラの裏側。ファンの左に見える円形が乾燥剤が	
	入っているシリンダー	44
4.17	結露した CCD カメラ。周辺部が結露している。画像の下	
	の黒い部分は、チップ面の下に位置する鏡によってできる	
	影。	44
4.18	結露を取り除いた時の画像。下に写っている黒い部分は、	
	影の部分。	46
4.19	CCD のフローチャート	48

第1章 ガンマ線バーストとは

ガンマ線バースト (GRB) とは、宇宙のある方向からガンマ線が莫大な 量で、非常に短い間に降り注ぐ現象である。そのエネルギーは、10⁵¹~ 10⁵³erg で、超新星爆発時に発生するエネルギーの 10~1000 倍にもなり、 ビッグバンを除くとするならば、宇宙における最大の爆発現象である。ガ ンマ線バーストの発見から 40 年余り経つが、未だに謎が尽きない天体で ある。

1.1 ガンマ線バーストの歴史

ガンマ線バーストは、1967年アメリカの核実験監視衛星 VELA によっ て偶然発見された。発見当時は、なぜこれほどの量のガンマ線が宇宙の 1点から降り注いでいるのか、我々の太陽系のすぐ近くで起こっているの か、それとも銀河スケールでの現象なのかがわからず、その正体について は長い間謎に包まれたままであった。それというのも、ガンマ線による位 置測定は難しい上、この現象は、突発的に起こる現象であり、非常に短い 間で減光し消えてしまうため、起源天体の同定が困難であったからであ る。

ガンマ線バーストの研究が飛躍的に進んだのは、1990年代からである。 1991年に打ち上げられたコンプトン・ガンマ線観測衛星に搭載された BATSE検出器によって、この現象は宇宙のどこかで毎日約1回程は発生 し、その発生場所は等方的であること、また、同じ場所で繰り返し起こる 現象ではないことがわかった。

GRB研究の2回目の飛躍はイタリア-オランダのX線天文衛星 BeppoSAX によって、1997年の2月28日に発生したGRB970228の残光が捉えられ たことである。この残光の発見より分角精度での位置測定が可能となっ た。はたして、その場所に可視光望遠鏡を向けたところ、減光する未知の 天体と母銀河が発見され、赤方偏移により、距離が計算された。その結果、 GRB が宇宙論的遠方で起こる現象であることがはじめて明らかとなった。

GRB は急激に減光してしまうため、その詳細を知るには、発生後すばやく観測装置をその位置に向けなくてはならない。GRB 発生をすばやく地



図 1.1: BATSE 観測装置が捉えたガンマ線バーストの到来方向

上に発信するために、2000年10月9日に日本のとアメリカ・フランスとが 共同開発したHETE-2衛星が打ち上げられた。HETE-2は、ガンマ線バー スト発生直後、機上処理によりその位置を決定し、即座に地上に発信する ことが可能である。GRB発生の情報は専用の地上受信局から、インター ネットを通じて全世界の研究者に送られる。HETE-2により、GRB030329 が発生後73分で世界中の科学者に送られ、この迅速かつ高精度な位置決 定により、X線のみならず、可視光、電波での残光観測にリアルタイムで 成功した。このGRB030329の光度曲線とスペクトルの解析から、ある種 のGRBが、大質量星の超新星爆発によって起こるという観測的な証拠が 初めて得られた。

2004年に打ち上げられた Swift によって、位置測定精度は、より高精度 となり、バースト発生直後 20~70 秒に 1~4分角で特定できるようになっ た。これにより、GRB 発生直後から、詳細に残光の様子を捉えることが 可能となった。この Swift 衛星の最大の特徴は、衛星が'自分で'追観測を 行うことである。また、2005年5月9日、それまで継続時間が短く、観測 することが困難であった Short GRB の残光が捉えることに成功した。さ らに、地上における観測では、衛星からの速報を受け、GRB の発生方向 にすぐに向ける専用の望遠鏡による追観測がされるようになり、1つの望 遠鏡のみならず、観測のネットワーク化も進んできている。今後、GLAST や MAXI などの次世代の衛星が打ち上がることでさらに詳しい状況がわ かるようになることが期待される。

このように、GRBの研究については、過去20年で劇的に進歩したもの であるといえる。宇宙遠方で起こるGRBの謎を解明することは、宇宙初 期の状態について知ることであり、現在の宇宙物理学の謎の解明に役に立 つだろう。



図 1.2: GRB030329/SN2003dhの可視光スペクトル。GRB030329の可視 光残光が減光するにつれて、付随する SN2003dh の成分が顕著に見えて きた。

1.2 ガンマ線バーストの残光

前章で述べたように、ガンマ線バーストには、残光と呼ばれる現象がある。これは GRB 発生後に X 線から電波までのあらゆる波長で観測される 現象で、BeppoSAX によって、GRB970228 で初めて捉えられた。

GRB970228 では、BeppoSAXのX線望遠鏡がバースト発生の位置に向けられ、その位置に未知のX線天体を発見した。その後に行われた可視光での観測により、X線天体の位置に可視光で減光する天体が発見された。 これらの残光の特徴は、その強度が時間のベキ乗(*t*⁻¹)で急速に減光し



図 1.3: BeppoSAX が捉えた GRB970228 の X 線残光。左はバースト 8 時 間後、右は 3 日後。

ていくことである。時間のベキ乗で減光する現象は、さまざまな天体の中 でも特異な現象である。

残光の発見は GRB の研究に大きな進展を与えた。これにより、ガンマ 線バーストの位置が正確に決定できるようになり、対応する天体も同定で きるようになったからである。多くのガンマ線バーストについて、母銀河 が発見され、可視分光観測により母銀河の赤方偏移が決定できるように なった。

可視光残光はすべての GRB で捉えられているわけではない。Swift 衛星 に搭載されている X 線望遠鏡では、ほぼすべての X 線残光が捉えられて いるにも関わらずである。可視光残光は、Swift で年間約 100 個の GRB が受かっているが、そのうちの 50 %に残光が発見され、25 % が赤方偏移 が分かっている。可視光残光が捉えられない原因としては、

- 高赤方偏移しているために、銀河間水素のライマン線吸収で、可視 光では見えない
- ガンマ線バーストの母銀河は、星形成が活発な銀河である場合が多く、母銀河で強く吸収を受けてしまう
- 極めて早い段階で急激な減衰が起こるため、可視光残光が暗い

の3つが考えられる。それぞれがどのくらいの割合で存在しているかについては、まだはっきりとした確証はない。そのメカニズムについても謎が 多い。今後の観測に期待される。



図 1.4: GRB970228 の可視光残光。左はバースト当日、右は8日後

1.3 可視光フラッシュ

可視光フラッシュは GRB990123 で初めて捉えられた。これはバースト 発生後、急激に明るくなる現象である。GRB990123 では、バースト発生 後 22 秒から観測が始まり、その約 50 秒後に約 9 等級に増光し、その後急 激に減光した。その後の観測からこの GRB は、*z* = 1.6 という高赤方偏 移で起こったことが明らかとなった。この可視光フラッシュは、観測例が 少なく、どのバーストでも起きることなのかは、はっきりとしていない。 GRB990123 は、バーストの中でも明るい方であったが、バーストの明る さと可視光フラッシュの相関も不明である。観測データが少ないため、こ の現象については、発生直後からの連続した観測が重要であり、今後の観 測体制の充実に期待される。

1.4 ガンマ線バーストの種類と起源天体

ガンマ線バーストの継続時間は、図 1.6 で示されるように、2 つに種類 に分けられる。一般に、継続時間 2 秒以上のものを Long GRB、2 秒以下 のものを Short GRB と呼んでいる、

この中で詳細な観測が進んでいるのは、Long GRB である。Short GRB は、継続時間が2秒と短く、検出される光子数も Long GRB に比べ、相 対的に少ないからである。このため、残光が捉えにくく、起源や母銀河も 分からなかった。また、BeppoSAX は、Short GRB を検出しにくい装置 であったため、Short GRB の研究が進むには、観測装置の進歩を待たね ばならなかった。

Short GRB の残光は、Swift 衛星により、GRB050509B で初めて捉えら



図 1.5: ROTSE が捉えた可視光フラッシュ。上の段の真ん中の図において、急に増光し、その後、時間が経つにつれ、減光していく様子が捉えられている。

れた。その後、この年だけでも、GRB050709、GRB050724と3つの残光 を捉えることに成功している。

Long GRB の起源の1つは、Ic 型と呼ばれる大質量星の超新星爆発であ るとされる。これは極超新星 (hypernova) と呼ばれるもので、通常の超新 星爆発とは異なり、爆発前に水素の外層を吹き飛ばした星の最期の姿であ り、その後に恒星質量のブラックホールが形成されると考えられている。 もっとも、すべての Long GRB について超新星爆発の成分が見つかってい るわけではない。比較的明るい GRB でも、超新星のような残光が見つか らない場合もあり、起源の1つではあるが、すべてを説明できていない。 Short GRB の起源については、連星中性子星が合体説がある。これは、 互いに公転している中性子星が合体することで、ブラックホ - ルができ、 そこから吹き出すジェットを見ているという説である。しかし、継続時間 が 100 秒以上という Short GRB があることがわかり、単純な連星中性子 星では、このような長い継続時間を出すことができないとされ、ブッラク



図 1.6: CGRO 搭載 BATSE 観測装置が捉えた 1234 例の GRB の継続時 間 (T₉₀)分布。2 秒を堺に 2 つに分かれていることがわかる。

ホールと中性子星の合体という説も出てきた。ブッラクホールが中性子星 を合体前に破壊するので長い継続時間を出せるということである。

また、X線フラッシュ(X-Ray Flash) という現象も確認されている (X線 過剰ガンマ線バースト (X-Ray Rich GRB) ともいう)。これはガンマ線を 出さないという点を除けば、ガンマ線バーストと非常によく似た現象であ り、同じ起源ではないかと考えられている。この発生機構については、ま だ不明な点が多いが、ガンマ線バーストのジェットを横から見たものとい う説がある。ジェットを横から見ると、青方偏移が弱まるため、ガンマ線 ではまく、X線として観測されるということである。



図 1.7: ハッブル望遠鏡が捉えた GRB050709 の可視光残光 (図中の黄色の 円の中)。

1.5 ガンマ線バーストと遠方宇宙

1.1 でも述べた通り、ガンマ線バーストは宇宙遠方で起こる現象である。 つまり、GRB は宇宙初期の状態を示すものだといえる。その研究は、高 エネルギー物理学のみならず、宇宙論などの研究にも応用できる。初期の 宇宙を示す重要な指標となりうるのだ。

では、現在までにどれくらい遠方の GRB が観測されているのだろうか。 ここでは、2 つの遠方の GRB を挙げる。

GRB050904 は、2005 年 9 月 4 日 01:51:44(UT) に Swift/BAT で検出さ れた。すぐさま地上に速報され、TAROT(25cm) がアラートから 5 秒後 に観測を開始した。すばる望遠鏡の分光観測により、赤方偏移は *z* = 6.29 と判明した。これは、現在のところ最も遠方での GRB である。







れている。点線は、残光の続きを推 定したもの。[14]

GRB060927 の赤方偏移は z = 5.47 で、2 番目に遠いところで発生した GRB である。可視光の残光は、バースト発生後、20 秒後から検出された。この GRB は、日本でも観測され、木曽の Schmidt 望遠鏡 (105cm)が、発生後 1214 秒から観測を行い、19 等級の残光を観測している。



図 1.10: 上は ROTSE-Ⅲ(口径 45cm) が捉えた発生後 19 秒の画像。下は _{図 1}

が捉えた発生後 19 秒の画像。トは VLT(口径 8m)が捉えた残光で、左が 2.6 日後、15.5 日後の画像。 振るまいが異なることがわかる。

これら遠方の GRB の可視光閃光は、地上の小型望遠鏡 ~ 大型望遠鏡 で捉えられている。地上における GRB 追尾観測の重要性については、次 章で述べる。宇宙遠方を観測することは、太古の宇宙を見ていることに他 ならず、我々は GRB 観測を通して、様々な事実を知ることができるので ある。

第2章 ガンマ線バースト追観測シス テムの開発

2.1 設置の目的

我々が開発を進めている追跡望遠鏡は、長野県木曽町にある東京大学木 曽観測所に設置を予定している。ここには現在、WIDGET や口径 105cm の Schmidt 望遠鏡などが設置されている。GRB の観測には、バースト発 生直後からの多波長での観測が必要である。X 線領域での観測は、Swift をはじめとする X 線天文衛星の役割であるが、可視光での観測となると、 地上の望遠鏡の出番となる。この場所に設置することの利点として、この 2 つの装置と合わせて、数時間から数日での観測が可能となることが挙げ られる。また、同じサイトにあるということで、補正なしでの同時プロッ トが可能である。

2.1.1 可視光観測の重要性

GRB 自体は短時間で終わってしまうが、X 線や可視光、電波などの残 光は数時間から数週間にわたって続く。GRB の観測には、衛星による X 線での観測も重要であるが、地上における可視光観測も重要である。なぜ なら、可視光による残光観測は、GRB の発生位置、赤方偏移を与え、放 射機構、中心天体の謎を解く手がかりとなるからである。

2.1.2 追観測の重要性

ガンマ線バーストの謎に迫るには、発生直後にすぐさま望遠鏡を向け観 測を開始しなければならない。それと同時にバーストを追尾して観測する 必要がある。HETE-2以前には、早期の観測が困難であった。BeppoSAX はバースト発生後、地上にデータを送ってから、解析を行い位置を決定し ていたため、位置情報を各地の天文台に通報するのに、5~6時間かかっ てしまっていた。このタイムラグのため、残光の減光は単純なべキ乗によ るものと思われてきた。

しかし、HETE-2やSwiftが打ち上がり、バースト発生後の迅速な追跡



図 2.1: 下は、X 線、可視光、電波のスペクトルの時間経過の変化を示したもの。時間が経過するとともに、スペクトルは、低周波数側に移りながら減光しているのがわかる。上の図はあ、下の時間に依存するスペクトルから求めたフラックスによる横軸時間(日)の光度曲線。



図 2.2: GRB の光度曲線。単純なベキ乗ではなく、急激な減光から緩やか な減光となり、-1乗で減光していく。

観測が可能となってくると、可視光残光が単純なベキ乗ではなく、複雑な 構造となることが観測から明らかとなってきた。一般に、ガンマ線バース トの光度曲線は、およそ0.1日後を堺に変化するという特徴を持つ。この 変化は、急激な減光していたものが穏やかな減光へと変わるというもので ある。似たような振る舞いはX線でも、Swiftによる観測から見られる。 このような観測結果を説明するためのGRBの中心エンジンや放射機構に ついての理論的な解釈もされている。この光度曲線の振る舞いを捉えるた めには、バースト発生直後からの連続的な追観測が必要である。

2.2 GRB 地上観測の実状

2.2.1 GRB 自動追尾望遠鏡

前節で述べたように、GRB は発生直後からの観測が必要である。初期 残光を捉えるのは、小型の望遠鏡である。表 2.1 は、主な追尾望遠鏡であ る。これらの望遠鏡は、限界等級は大型の望遠鏡に及ばないが、GRB 発 生のアラートを受信後、すぐにその方向を向くことができ、初期の残光を 捉えられる。1.5 でも述べたように、小型の望遠鏡でも遠方の GRB の残 光を捉えることに成功している。

望遠鏡(設置場所)	口径	視野	観測した主な GRB
TAROT (フランス)	25cm	1.86 °× 1.86 °	GRB050904,GRB060111B
ROTSE-III (オーストラリア)	45cm	1.85 °× 1.85 °	GRB050401,GRB060927
$MASTER (\square \flat 7)$	20cm	40 °× 25 °	GRB030329
RAPTOR (アメリカ)	40cm	4 °×4 °	GRB041219A,GRB050820A
REM (チリ)	60cm	10 × 10	GRB060115

表 2.1: 主な GRB 追尾望遠鏡

2.2.2 WIDGET

WIDGET(WIDefild telescope for GRB Early Timing)とは、ガンマ線 バーストを発生前、その直後から可視光で捉えることを目的とした広視野 の望遠鏡である。理化学研究所・牧島宇宙放射研究所と埼玉大学・田代研 究室が中心に開発を行い、2004年6月に、山梨県の東京大学宇宙線研究 所明野観測所に設置された。2005年11月には、東京大学木曽観測所に移 設され、モニター観測を連続して行っている。WIDGET は、62°×62° という全天の10分の1を覆う視野を持つ。Swift/BAT の視野は、90°× 120°なので、1/6をカバーできることになる。このような広い範囲を常 時監視することによって、ガンマ線バースト発生と同時もしくは、発生前 の可視光閃光をも捉えることが可能である。

この WIDGET によって、発生直後のデータを得て、その後を follow-up 望遠鏡で観測することができると、今まで捉えることが難しかった、発生 直後からの追観測が可能となる。



☑ 2.3: WIDGET

図 2.4: 105cm Schmidt 望遠鏡

2.3 求められる精度・システム

では、求められる精度及びシステムとはどのようなものであろうか。

現在、GRB 発生の一報は GCN(The Gamma-ray bursts Coordination Network)によって、衛星から地上の各観測所へ送られる。この情報を基に地上の望遠鏡はバースト発生の位置に向くのである。その精度は3分角以内である。つまり、望遠鏡を向けた時、視野がその誤差の範囲に入っていないといけないのである。また、連続した観測を可能にするために、GRB 天体を捕捉しつづけなくてはならない。次に追尾している時間も重要である。地上で観測する場合、GRB 発生のアラートを受け、まず専用の小型望遠鏡が十数秒から数分単位で観測を開始し、数分くらいから大型望遠鏡となっている。

我々の開発中のシステムとしては、まず WIDGET によって発生前、発 生直後の閃光を、その後を追跡望遠鏡がカバーし、さらに木曽観測所の Schmidt 望遠鏡が向くという観測体制が考えられる。さらに、GRB には、 precursor と呼ばれるメインのバースト前に起こる 線の放射がある場合 があり、これが BAT で捉えられたのならば、バースト発生前からの観測 をすることもできる。

以上のことを考えると、GRBの観測が可能な時間、位置であるならば、 発生後数秒で望遠鏡をその位置に向け、観測が不可能な高度になるまで、 追観測を続けるのが望ましいだろう。具体的には、GCNを受け、その位 置に向けた時に、Swiftのエラーサークルの3分角が、その視野に導入で きなくてはならない。追尾精度としては、望遠鏡の視野が35×35分角な ので、最低でも、Schmidtなどの大型望遠鏡が観測を始めるまでは追尾で



図 2.5: GCN の模式図 3

図 2.6: WIDGET、Shnidt 望遠鏡、 follow-up 望遠鏡の観測可能領域の模 式図。follow-up 望遠鏡の設置により、 新たに、図の青い部分の観測が可能 となる。

きるようにしたい。その時間を10分とすると、追尾精度は10分間で17.5 分角以内と考えられる。.

2.4 開発中のシステム概要

望遠鏡は MEADE 社製 LX90-30 を、CCD カメラは SBIG 社製 ST-9XE を使用する。これらの装置は、汎用性がり、比較的安価であることから、 設置しやすいといえる。システムは PC によって制御され、観測開始時刻 になったら小屋を開け、CCD カメラの準備をし、観測終了時刻となった ら小屋を閉めるという一連の作業を自動化して行う。GRB が発生してい なくても観測は続け、アラートを受信したらすぐにその方向を向き、追尾 する。

現在進行中の計画では、望遠鏡・CCDの制御には、それぞれ別々のPC を使用し、観測時間の開始・終了は、プログラム上で、太陽高度を計算す ることで判断する。小屋の開閉に使うプログラムは、WIDGETで使われ ているのと同じのもを使用する。

口径 [mm]	焦点距離 [mm]	口径比	分解能	導入速度
304.8 3048		f/10	0.38	4.5 °/sec

表 2.2: MEADE LX90-30 のスペック



図 2.7: CCD カメラ ST-9XE



☑ 2.8: MEADE LX90-30

第3章 CCDカメラ

CCD カメラは、天体撮影に最もよく使われるカメラである。性能の実験については次章で調べることにして、この章では CCD の一般論について述べる。

3.1 CCD カメラとは

CCD とは、Charge Coupled Device の略称であり、光を検出する複数 の超小型画素 (pixel) を 1 次元もしくは 2 次元に配置した光検出素子のこ とである。電荷を結合しながら転送するイメージセンサーであり、電荷結 合素子とも呼ばれる。

CCD は近赤外域の波長に対し敏感であり、また、光子を電子に変換す る効率が高く、受光面に当たった電子に対し、変換される光子の数が比例 する。そのため、CCD カメラは淡い光を捉える天体の撮影に適している。

3.1.1 CCD カメラの検出の原理

CCD は受光面に光が当たると、光子が電子に変換される。1 個の光子 に対し、何個の電子を発生することができるかを表す確率を量子効率とい い、ST-9XE のピークは 600[nm] で 67 パーセントである。CCD カメラ ST-9XE の量子効率のグラフは、図 3.1 となる。

半導体は電子がつまっている充満帯と、電子のない伝導帯が禁止帯をはさ んで位置している。この禁止帯を電子が飛び越えるにはエネルギーが必要 であり、それは物質によって異なる。CCDのチップには、Siが使われが、 これは、Siのバンドギャップが1.14[eV]であり、光子(1.1~1.4[eV],300~ 1100[nm])が簡単に吸収されるためである。このエネルギー帯域において は、図 3.1 より、電子に変換されることがわかる。

また、近赤外域は、 2.5×10^3 から 700[nm] であるので、CCD は近赤外域に敏感であるといえる。

CCD は半導体素子であり、pn 接合型をしている。この接合では、p から n の向きには電流は流れるが、n から p の方向には流れない。この性質を



図 3.1: ST-9XE の量子効率のグラフ

利用し、逆バイアスをかけると、接合部分において伝導帯の電荷が追い出 され、空乏層領域が生じる。光子が入射すると、空乏層に吸収され、充満 帯から電子が励起し、電子・生孔対ができ、伝導帯に電子が供給される。 この電荷を集めて、入射光子を検出するのが、CCDカメラの検出の原理 である。

3.1.2 動作·電荷転送

CCD が受光して、電荷信号を検出するまでの段階は次のようになる。

1. 電荷生成

光子が受光面に当たると、光電効果により自由電子が伝導帯にたた き出されて、光電子が発生する。

2. 電荷蓄積

生成した光電子は、画素内に集積される。画素間は、ゲートと呼ば れる堰で、1つ1つ仕切られている。

3. 電荷転送

ー定時間後、集積された電子は、規定された信号(垂直転送クロック)にしたっがて、転送レジスタという電子の転送エリアに流し込まれる。

4. 電荷検出 転送レジスタに流し込まれた電子は、光量読み取りレジスタに転送 される。そこで、先頭から規定された信号(水平転送クロック)によ り電圧に変換され、内蔵のアンプで増幅され出力される。つまり、ア ナログ信号がデジタル信号に変換され、電圧で測定されるのである。

CCD の電荷の転送はバケツリレーに例えられる。バケツの中身は、一 定時間後、隣りのバケツに移すということを繰り返す。1つ1つのピクセ ルに貯った電荷は、電圧をかけることで、移動していくのである。

3.1.3 転送方式

発生した電荷は、読み出し口に向かってバケツリレー式に送られる。この転送には、各ピクセルに電圧をかけることで行われる。その後転送される。この転送のしかたで、CCDはいくつかに分けられる。

• Interline 型 (IL 型)

電荷の転送専用経路を持っているため、露出終了後すぐに撮像エリ アの電荷を転送回路に流せる。欠点は、受光面に被るように転送通 路を設けてあるために、開口率が悪く、30%程度しか入射した光を 利用できない。



図 3.2: Interline 型

• Frame trnsfer(FT 型)

受光エリアと転送エリアを持っているため、受光エリアの画像を高 速に転送エリアに送り、その後読み出すため、動画の撮影ができる。 開口率は100%。ただし、受光エリアと転送エリアは同じような構 造となっているため、画素数を大きく取ろうとすると、チップ面積 が増大し、コストが高く付く。 Full frame transfer(FFT型) FT型の転送エリアも受光エリアとしたもの。ピクセルにたまった電荷の転送途中には遮光しておく必要があるが、FT型と同じピクセル数を実現するためには、その半分のサイズで済む。

追跡望遠鏡で使用する CCD チップは、Full frame transfer である。CCD から読み出されたアナログデータは、AD コンバーターによりデジタル化 され、16bit に変換される。これによって、明るさの段階として区別され る。単位は ADU(Analog to Degital Unit)。



図 3.3: Frame transfer 型

図 3.4: Full frame transfer 型

3.2 CCD カメラの冷却

CCD は、近赤外域に敏感であることは、3.1.1 で述べた。本体やその周辺から発生する熱によっても電荷が生成される。これを暗電流という。入射した光子からエネルギーをもらうことの他に、充満帯の電子が熱によって励起する。つまり、光が入ってこなくても、暗電流が流れるのである。これによって、その情報が読み出せれてしまい、ノイズとなる。暗電流が多くなるとノイズも多くなり、画像はざらざらとしたものになる。暗電流は、熱によって伝導帯に励起した電子が原因なので、電子が励起される確率は、温度に依存し、その個数は Boltzmann 因子 *exp*(-*E*_g/2*k*_B*T*) に比例する。このように暗電流は熱に依存するものなので、これを減らすために、CCD カメラを冷却する必要がある。

CCD の冷却には、ペルチェ素子を用いる。ペルチェ素子は、半導体を

組み合わせて作る一種のヒートポンプであり、ペルチェ効果によって冷却 する。ペルチェ効果とは、熱電効果の1つで、異なる金属を接合し電圧を かけることで、接合点で熱の吸収・放出が起こる効果であり、電圧から温 度差をつくり出す。この効果は可逆的なものであり、電流の向きを変える と、発熱・吸熱も逆になる。

3.3 ノイズ

CCD は光子を電子に変換して検出器内に蓄え、最終的には電圧として 読み出す。そのため、それぞれのピクセルに蓄積された電荷量をどれだけ 正確に測定できるかが重要になってくる。しかし、CCD にはノイズが存 在しているため、ノイズがどれくらいであるかも考慮しなければならな い。

CCD のノイズとしては次の5つが挙げられる。

- 読み出しノイズ CCD 検出器のアンプ自体から発生するランダムなノイズと、CCD をコントロールする電気回路から発生するノイズを含めたもの。
- 2. 暗電流によるノイズ
 3.2 で述べた暗電流によって生じるノイズ。データ解析の際に暗電 流の差し引きを行ったとしても残る成分。ノイズは暗電流によって 生じる電荷量の平方根に等しい。
- 画面上の不均一性によるノイズ 画像の不均一を補正するために、フラットフィールデイングという 処理を行うが、その処理を行っても残るノイズ。
- 転送効率によるノイズ CCDの電荷転送効率は電荷量に依存するため、それによって生じる ノイズ。半導体中の電子の移動度は温度依存性を持つため、低温側 で電荷転送が悪くなる。半導体にドープされた不純物によるトラッ プも、電荷量が少ないと転送効率を下げる原因となる。
- 5. 信号電荷そのものによって生じるノイズ 蓄積された電荷量の平方根に比例する統計的なノイズ。

以上のノイズのうち、5番目のものは原理的に避けられないものである。 1~4 までのノイズの値が、5のノイズと比較して十分に小さいのが理想 的な状態である。ノイズの全くない検出器は、存在しないので、いかにノ イズを少なくするかが重要となってくる。

3.4 CCD カメラ ST-9XE のスペック

追跡望遠鏡に使う CCD カメラ ST-9XE のスペックは以下のようになる。

ST-9XE CCD イメージングチップ	Kodak KAF-0261E-NABG
オートガイドチップ	TI 社 TC-237
チップ寸法	10.2 × 10.2mm
画素数	262,144 pixel
画素サイズ	$20 \times 20 \mu$
暗電流	4e/pixel 0 において
シャッター	電子制御高速回転式
A/D 変換	16bit
A/D Gain	$2.2e^{-}/\mathrm{ADU}$
読み取りノイズ	$15e^{-}\mathrm{RMS}$
AD 変換速度	420,000 pixel/sec
フレーム転送型	FFT 型
フレーム転送時間	1[sec] 以下
冷却装置	1段ペルチェ素子、冷却ファン
最大外気温より35 まで冷却可	

表 3.1: ST-9XE のスペック

第4章 CCDカメラの性能評価実験

我々が開発中のシステムでは、CCDの動作は全てプログラムで制御される。このプログラムを作成するためには、CCDカメラの動作・性能を 把握していなければならない。ここでは、CCDカメラの性能を調べる実験を行った。

4.1 CCDの冷却時間と温度の揺らぎ

3.2 で述べたように、CCD カメラは暗電流によるノイズを小さくする ために、本体を冷却する必要がある。冷却にかかる時間および、冷却限界 について調べた。

4.1.1 CCD カメラの冷却限界

CCD カメラ ST-9XE は、内蔵されているペルチェ素子と冷却ファンに よって、冷却する。冷却は外気温によると考えられ、冷却の限界値が存在 する。そこで、外気温より、どれくらいまで冷却できるかについて調べた。 実験のセットアップは、図 4.1 のようになる。CCD カメラを 専用の USB ケーブルでパソコンにつなぎ、制御には、CCDOPS という Windows の ソフトで行う (図 4.2)。冷却限界を調べるには、設定温度を冷却限界より 低いと思われる値にして冷却を行う。今回は –15 に設定した。また、設 定温度と冷却効率について、いくつか温度、今回は –9 –11 –12 に設定した測定した日の実験室の室温は 25 。冷却を始める前の CCD の温度は 22.24 であった。CCD の温度が外気温よりのやや低いが、こ れは内蔵されているファンが、電源を入れると回り出すため、外気温より 低くなったと考えられる。

冷却限界は、-15 に対して -13.12 まで温度が下がった。また、そ れぞれの設定温度に対する冷却効率は、表 4.1 となった。 まず、冷却限 界だが、設定温度を -15 に設定すると、-13.12 まで冷却することが できた。これは、冷却前の CCD の温度よりも -35.12 低いので、メー カーの仕様 (表 3.1)を確認できたといえる。メーカーの仕様によると、冷





図 4.1: 実験のセットアップ

义	4.2:	CCD	カメラ	制御ソ	フ	۲	CC-
D	OPS	の画面					

設定温度[]]	冷却温度[]	冷却効率 [%]	
-9	$-8.96 \sim -9.37$	81 ~ 84	
-11	$-10.62 \sim -11.03$	90 ~ 97	
-12	$-11.87 \sim -11.03$	94 ~ 97	

表 4.1: 冷却温度とそのときの冷却効率

却限界は外気温より -35 であるが、実際に運用する際は、冷却効率 90 %までとする。なぜなら、冷却効率 100 %で運用すると、ちょっとした外気温の変化でも冷却温度が変わってしまい、暗電流によるノイズの値が安定しないからである。

次に、冷却効率が90%となるときの外気温からの冷却限界について調べ る。冷却温度をいくつか設定し、その時の冷却効率を調べた。 冷却効率 が90%となるのは、外気温より-35 のときが冷却効率100%なので、 外気温より-32 である。冷却開始時のCCDの温度は22.24 であった ので、約-11~-10 くらいまで冷却できると考えられる。設定温度と 冷却効率は表 4.1 の通りになった。表より、設定温度-11 で冷却効率 90%となることがわかる。

4.1.2 CCD カメラの冷却時間

観測を始める前に、CCDカメラは冷却しなくてはならない。そこで、 冷却にかかる時間、また、設定温度が低い時と高い時での違いはないかに ついて調べた。 実験は設定温度を -5、-10、-15、-20 とし、それぞれにおいて冷 却時間と温度の変化を見た。4.1.1 より、外気温より -35 以下には冷や せないことがわかったので、設定温度が -5、-10 のときは室温からそ のまま冷却し、-15、-20 の時は、恒温槽を用いて、まず CCD の冷却 をせずに、15分かけて 5 ずつ冷やしていき、0 になったら CCD の冷 却を開始した。この際は、恒温槽の外から湿気が入らないように、コー ド類を入れる穴を緩衝材などを使ってふさぐ。また、実験が終わった後は CCD の冷却を切ると同時に、ドアを閉めたまま恒温槽のスイッチを切り、 ゆっくりと温度が上昇するようにした。

設定温度に対する温度の揺らぎは表 4.2、冷却時間と温度のグラフは図 4.3 のようになる。

設定温度[]	冷却温度[]
-5	$-5.23 \sim -4.82$
-10	$-10.20 \sim -9.79$
-15	$-15.23 \sim -14.81$
-20	$-20.42 \sim -19.98$

表 4.2: 設定温度と冷却温度の揺らぎ

図 4.3 からもわかるように、まず始めに急激に冷却が進み、それから およそ 5 分程で、設定温度になることがわかる。その後、設定温度付近で 揺らぐ。また、設定温度の違いによる冷却時間の差はなかった。

CCDの冷却がこのような振舞いをするのは、その冷却がペルチェ効果に よるものであるからと考えられる。最初の急激な冷却は、冷却開始後から 素子を流れる電流が増え、冷却効率が100%となるためである。設定温度 付近では、その温度に合わせるために、流れる電流の量を調整するため、 グラフにみられるような温度の揺らぎが生じると考えられる。

この結果から、冷却は設定温度になるまで約5分、その後は揺らぐこと がわかった。温度の揺らぎの範囲は、設定温度によって異なるが、それに よるノイズレベルが安定しているようであれば、解析には支障がないと判 断できる。

また、縦軸に経過時間の対数、横軸に温度の逆数のグラフを書くと、 図 4.4 となる。ここでは、冷却開始直後に急激に温度が下がる時のみ、グ ラフ化した。このグラフの傾きから、冷却の時定数を求めると、表 4.3 と なる。



図 4.3: 冷却時間と温度のグラフ



図 4.4: 冷却直後における縦軸時間の対数、横軸温度の逆数のグラフ。

設定温度[]	時定数 [sec ⁻¹]
-5	1346 ± 99.32
-10	1244 ± 152.4
-15	1513 ± 665.9
-20	1269 ± 587.9

表 4.3: それぞれの冷却温度での時定数



図 4.5: dark frame の画像

4.2 dark frameの解析

dark frame とは、シャッターを閉じたまま、光が入らない状態で撮った 画像である。光が入っていなくても、熱による暗電流のため、電子が生 成されるので、その電子が読み出されて輝度情報となる。つまり、dark frame には、熱によるノイズが含まれていることになり、対象となる天体 画像と同じ冷却温度・積分時間での dark frame を撮り、天体の画像から 引くことで、ノイズを減らすことができる。dark count とは、暗電流に よって生じるノイズを表す値である。

bias frame とは、シャッターを閉じたまま、積分時間を0秒として撮っ た画像である。この画像には、読み出しノイズ、bias を含む。bias とは、 信号が入力されていないときに、AD コンバーターへの入力信号が0と ならないよう持ち上げる電圧のことを指す。 この bais を示すものを bias count という。

これら光を入れないで撮影したものに対し、シャッターを開いて撮った 画像を light frame といい、その明るさを示すものが、light count である。 dark frame には、dark count の他、bias count も含む。厳密には、light frame から dark frame、bias frame を引くのが正確な解析のしかたである が、実際に運用する冷却温度の範囲では、bias 値は dark count に比べ小 さいので、撮影した light frame から dark frame を引けばよい。

4.2.1 dark count の温度依存性

dark count は暗電流によるものであるから、CCD カメラ本体を冷却していけば、値は小さくなるはずである。これを確かめるために、冷却温度



図 4.6: 積分時間 60 秒のときの dark count の温度依存性

に対する dark count の値の変化を、積分時間が 60 秒の時で調べた。

実験方法は、冷却温度 5、0、-5、-10、-15、-20 において、それぞ れ 10 枚ずつ dark frame を取得し、IRAF の imcombain というコマンド を用いて、10 枚の画像の平均値を取る。これを横軸を温度、縦軸を dark count として、グラフに表す。

積分時間が60秒でのdark countの温度依存のグラフは、図4.6となる。 図において、白丸は平均値を、黒丸は標準偏差を表したものである。

図 4.6 からもわかるように、冷却温度を低くしていくと、dark count の値 は指数関数的に減少し、その振る舞いは平均値でも標準偏差でも変わりな い。これは CCD が半導体素子であり、電子が励起する個数が Boltzmann 因子 $exp(-E_g/2k_BT)$ に比例するためである。

また、-15 と-20 を比べてみると、値がほぼ変わらないことから、 この CCD においては、-15 以下まで冷却できれば、暗電流によるノイ ズを小さくできることを示している。-15 以下では、温度には依存しな いノイズが表れてくると考えられる。CCD のノイズについては 3.3 で述 べたが、温度に依存するノイズの他に、検出器自体から生じるもの、転送 によって生じるものなどがある。これらノイズの値は、一定であり、暗電 流によるノイズに比べ、無視できるほど小さいのならば、暗電流によるノ イズが支配的となる。おそらくこのために、-15 以下で dark count の



図 4.7: 縦軸 log(ADU)、横軸 1/T のグラフ。

値が安定すると考えられる。

また、横軸を温度の逆数、縦軸を $\log(ADU)$ にとると、図 4.7 となる。 この傾きが -1.87×10^6 から E_q を求めると、1.6[eV] となる。

4.2.2 dark count の積分時間依存性

CCD カメラにおいて、入射してきた光子1つは電子1つに変換される。 つまり、光子の数と電子の数には線型性がある。シャッターの露光時間を 増やすと、入ってくる光子の数も増えるので、積分時間に比例して count 値は増加する。

これを確かめるために、冷却温度 -5、-10、-15 において、積分時 間を 60,90,120,180,300 秒で dark frame を取得し、dark count の積分時間 依存性について調べた。また、-15 の時は、積分時間を 1~10 秒まで 1 秒ずつで画像を取得し、count が小さい時も同様の振る舞いをするか調べ た。解析には、4.2.1 と同様に IRAF を用いた。

dark count の時間依存のグラフは、図 4.8 となる。上の図は、冷却温度 が -5, -10, -15 それぞれにおける、積分時間 60、90、120、180、300 秒での dark count の変化を表したものであり、下図は -15 における、 積分時間が 1 ~ 10 秒での dark count の変化を表したものである。

図 4.8 の上のグラフより、比較的長い積分時間では、線型性は保たれていることがわかる。また、冷却温度が低くなると、傾き、すなわち dark count の増加が緩やかになる。暗電流は温度に依存するものであるので、

発生する暗電流の量が少なくなるために、このような結果となると考えら れる。

次に、比較的短い積分時間での dark count の値については、見てみる。 ここでは、積分時間が長い時に比べ、値が1直線上に並ぶわけではない が、dark count の誤差が count 値の平方根に比例することを考慮すると、 線型性が保たれているといえる。誤差には、電荷の量が関係していると思 われる。4.2.1 でも述べたが、このため、電荷量が少ない領域、すなわち、 積分時間の短い領域では、誤差が大きくなってしまうのではないかと考え られる。

また、このグラフから単位時間・単位ピクセル当たりの暗電流の値を求める ことができる。グラフの傾きの単位が [ADU/sec]、Gain が 2.2 $[e^-/ADU]$ であるから、暗電流を求めると、表 4.4 となる。.

設定温度[]	dark current $[e^-/\text{sec/pixel}]$
-5	6.983 ± 0.129
-10	4.006 ± 0.211
-15	2.427 ± 0.081

表 4.4: 単位時間・単位ピクセル当たりの暗電流



dark count vs integral time

図 4.8: dark count の時間依存性

4.2.3 dark count の安定性

dark count が温度に依存することは、4.2.1の結果からわかった。次に問題となるのが、その値が安定しているかということである。そこで、dark frame を連続して撮り、dark count の値の安定性を調べた。

解析の方法は、冷却温度 - 10 、積分時間 5[sec] で、連続して 100 枚 撮る。これを縦軸に dark count、横軸にフレームの枚数としてグラフに する。合わせて、温度の変化を見た。また同じ温度、同じ積分時間で、1 枚ずつ撮った画像についてもグラフ化してみた。

図 4.9 より、dark count は、約 90~180 くらいの幅で揺らぎがあること がわかる。平均を取ると、124.3[ADU] となる。温度については、グラフ にしていないが、100 枚すべての画像において、-9.78 であった。1 枚 ずつ撮った画像については、図 4.10 となる。

図 4.9 より、揺らぎを考えると、平均が 124.3[ADU] に対し、上が +40, 下が -30 程度と、やや広がりがあるといえる。しかし、count 値のバラツ キが時間が経つにつれて、大きく変わる、つまり、上下にずれるわけでは ない。この時の温度が一定であったことを考えると、これくらいの count 値の揺らぎを持つと考えられる。



stability (-10[°C],5[sec])

図 4.9: dark count の安定性

図 4.10 のように、1 枚ずつ撮ったものも合わせてグラフにしたのは、 CCD のソフトウェア上の問題で、温度が正しく記録されないのではない かと考えたからである。単純な比較はできないが、温度の変化による dark count の変化を見ることはできる。その結果が図 4.9 である。上と下のグ ラフを見てみると、3 枚目の画像のように、count が小さくなった時に、 温度が低くなるものもあるが、すべてではない。また、統計を考えると少 ないため、こお設定温度での揺らぎとも言えてしまう。

今回の結果からでは、dark count のこの冷却温度における揺らぎと推 dark coumt vs number of frame (-10[°C], 5[sec])



図 4.10: 10 枚の dark frame と dark count、温度のグラフ 定される。したがって、運用の際には、観測開始前と後で dark frame を

撮ればよいと考えられる。ただし、この結果は温度がほぼ一定であると考 えられる実験室でのことなので、実際に運用する前に、もう一度検証する 必要があるだろう。

4.3 hot pixel、dead pixelの解析

CCD の格子の欠陥などによる、ピクセルレベルでの不良として、hot pixel,dead pixel が挙げられる。hot pixel とは、光の入射がなくても、周 辺のピクセルに比べて際立って多く発生する暗電流によって、画像上に白 く表れるピクセルである。それに対し、光が入射してもほとんど反応しな いピクセルが dead pixel である。これらは CCD の製造過程によってでき る欠陥であり、1pixel ごとの観測が重要となってくる天体観測において、 その位置が不明のまま使用することは、大きな間違いを犯すかもしれな い。そこで、これらのピクセルの位置を調べた。

4.3.1 hot pixel



図 4.11: hot pixel。周りよりも多く電流が流れるため、白い点として見 える。

hot pixel の解析には、dark frame を用いる。冷却温度 -10 、積分時 間 60[sec] の dark frame を使用した。まずは、fits ファイルのデータをテ キスト化する。画像の平均をとると、199.7[ADU] であったので、平均値 の 2 倍の値のピクセルを取り出し、ヒストグラムを作成した。ヒストグラ ムは、図 4.12 となる。ヒストグラムの分布から、10 枚中 6 枚で、count 値 が 10000[ADU] 以上となる pixel を取り出した。

該当する pixel は 1 つだけであった。位置は、(x,y)=(433,80) で値は 56455[ADU] であった。その位置を図 4.13 に示す。

この pixel は、他の温度、積分時間でも見られたため、hot pixel である と考えられる。



図 4.12: 冷却温度 -10[]、積分時間 60[sec] の時におけるピクセルのヒ ストグラム



図 4.13: hot pixel の位置

4.3.2 dead pixel

dead pixelの解析には、light frameを用いる。ここでは、冷却時間-10 、積分時間 2[sec] の画像を用いた。解析の方法は、hot pixel の時と同 じで、fit ファイルをテキスト化し、ヒストグラムを作成した。それが図 4.14 である。

この画像の count の平均値は 28224、最小値は 19146 である。最小値は 平均値の 67 %程度であった。dead pixel は、光にほとんど反応しないピ クセルであるから、このチップには、dead pixel は存在しないと考えられ る。



図 4.14: 冷却温度-10]、積分時間 2[sec] の時のピクセルのヒストグラム

4.4 light count linearity

CCD カメラでは、入射した光子と変換される電子には線型性がある。 しかし、この線型性がずっと続いていくわけではない。CCD において、光 の明るさは16bit で表される。露光を続けるとある明るさまでは linearity を保つが、それ以上となると、一定の値となり、linearity は崩れてしまう。 ここでは、入射してくる光子に対して、どこまで線型性が保たれているか 調べた。

実験の方法は、冷却温度を-10 にし、積分時間を1秒ずつ増やしてい き、light frame を取得した。この際、実験室の光をそのまま入れるので は、光が強く、サチレーションしてしまうため、CCDカメラの保護レンズ の上に紙を数枚を置いて、入ってくる光を弱めた。実験は、2回にわたっ て行い、1回目は、、count が約10000[ADU] から1秒ずつ積分時間を増や していき、pixel が飽和するまでを測定し、2回目は count が1000[ADU] から始めた。得られた light frame から dark frame を引く画像処理を行っ た後、それぞれの画像のメディアンを撮った。

実験の結果は、1回目が図4.15の上図、2回目が下図となる。

図 4.15 の上の図より、65000[ADU] を越えたあたりで、linearity が崩れ、 その後の値は一定となっている。つまり、count が 64000[ADU] までは、 linearity が保たれているといえる。

図 4.15 より、count が低い時でも、線型性は保たれていると考えられる。 しかし、5000[ADU] 以下については、線型性からのずれが見られる。こ



☑ 4.15: light count linearity

れらの誤差の原因としては、本来 light frame の解析には、光源には、発 光ダイオード (LED) など絞った光を入射するのが望ましい。蛍光灯など の光は広がった光源なので、周辺減光がおきてしまう。また、紙の置きか たひとつでも明るさは十分に変わってしまう可能性がある。

linearity については、今の段階では、5000~64000[ADU] まで、保たれ ていると考えられる。しかし、count が 50000[ADU] 以下の振るまい、光 源が点源でないことを考慮すると、検証の必要がある。これについては、 明るさのわかっている標準星を使い、linearity を確かめるべきであろう。.

4.5 CCD カメラの結露とその除去

CCDの性能を調べる実験を行っていたところ、CCDのチップ面に結露 ができていることに気が付いた。結露がついたままでは、きれいな画像を 撮ることができないので、これを除去する作業を行った。

4.5.1 冷却と乾燥剤

現在、実験に使用している ST-9XE は、CCD チップ面の結露を防ぐた めに、CCD カメラ本体に乾燥剤が装填されている。この乾燥剤は、CCD チップがあるチェンバー内の湿気を吸い、結露の発生を抑えている。乾燥 剤は、冷却を繰り返すなどにより、効果が徐々に薄れていくので、再生作 業を行う必要がある。





図 4.17: 結露した CCD カメラ。周辺 部が結露している。画像の下の黒い

図 4.16: CCD カメラの裏側。ファン 部分は、チップ面の下に位置する鏡 の左に見える円形が乾燥剤が入ってによってできる影。 いるシリンダー

4.5.2 乾燥剤の再生

乾燥剤の再生には、乾燥剤の入ったシリンダーを熱を加えて、乾燥剤が 吸収した水分をとばす必要がある。これには、トースターを用いた。シリ ンダーを直接熱すると、乾燥剤を熱しすぎて必要以上に水分を飛ばしてし まい、再生が効かなくなってしまうので、一度、トースターを空炊きして から余熱でシリンダーをベーキングするようにして、加熱した。 再生方法は、960W で 10~15 分空炊きしてからシリンダーを入れ、し ばらくそのままの状態で置いておくという作業を数回繰り返した。加熱が 終わったら、シリンダーが十分に冷えていることを確認し、CCD カメラ に装着した。

結露はかなりひどい状態だったので、再生した乾燥剤を CCD に装填し てカメラを冷却し、チャンバー内の湿気を十分吸い取ってから、また再生 するという作業を繰り返すことにした。この作業でもなかなか湿気が取れ なかったので、再生した乾燥剤を CCD に装填してしばらくおいておき、 乾燥剤をいれたプラスチックのケースにカメラごと入れ、CCD カメラ自 体を乾燥した状態においた。

4.5.3 CCD チップ面の清掃

結露が乾燥剤の再生だけでは取れなかったので、一度チェンバー内に 溜った空気を追い出すために、カメラのプレートを開け、清掃することに した。

CCD カメラの前面プレートを外すと、中の空気は出ていくが、新たに 湿気が入ってきてしまうと困るので、清掃には、ドラフトチェンバーを使 用した。ドラフトチェンバー内の空気が外気に比べて特別に乾燥している わけではないが、使用したドラフトチェンバーには、上から空気を送るこ とができるので、その空気で中に溜った空気を追い出し、新たな湿気が入 るのを防いだ。

清掃は、CCD カメラの前面プレートを開け、ガスブローでゴミを取り 除き、エタノールを染み込ませたキムワイプで CCD チップ面及び前面プ レートの保護ガラスを拭いた。

4.5.4 除去作業の結果とまとめ

乾燥剤の再生と CCD チップ面の清掃により、結露の大部分を取り除く ことができた。結露を取り除いた時の画像が、図 4.18 である。 結露は ほとんど取り除くことができたが、完全にチェンバー内が乾燥した状態に 保たれたわけではなく、冷却直後はうっすらと曇ってしまう。乾燥剤の性 質として、温度が低い時は湿気を吸収するが、逆に温度が高い時は湿気を 放出するという性質を持っていることも関係していると考えられる。

屋外で運用する以上は、結露について何らかの対策をとらなくてはなら ないし、結露しにくいような運用が必要となる。年に1回くらいの乾燥剤 の再生をする必要があることを別にすると、冷却のやり方を工夫すること ができる。急激に冷却すると、結露が生じやすく,それを取り除くまでの



図 4.18: 結露を取り除いた時の画像。下に写っている黒い部分は、影の 部分。

かなりの時間がかかる。しかし、段階ごとの冷却、例えば、ある温度に冷 却してから 10 分間そのままにしておいてから、冷却すると結露が生じに くいし、生じたとしても、急激に冷却するよりも速い時間で結露をとるこ とができる。よって、段階的に冷却することが運用体制として適切である と考えられる。

4.6 性能評価のまとめとフローチャート

以下にこれまでの CCD の性能評価実験についてまとめる。 冷却について

- CCD が安定して冷却できるのは、外気温より −32 まで。
- 設定温度までの冷却時間は約5分、それ以降は設定温度付近をある 幅をもって揺らぐ。
- dark count は温度の低下とともに、指数関数的に減少し、-15 以 降は頭打ちとなる。
- dark count の値は、ある幅をもって揺らぐが、温度の急激な変化の ない限り、安定である。
- 結露を防ぐためには、段階的に冷却し、乾燥剤の湿気の吸収スピードに合わせる。

Linearity について

• dark count、light count は積分時間に対して、線型性を持つ。

pixel について

• hot pixel は1つ存在し、daed pixel は見つからなかった。

また、以上の結果から CCD の運用の方針は以下のようになる。

- 木曽のデータから運用温度を考えると、
 夏:-10、、冬:-20
- 昼間は、CCDを0 に保ち、5 ずつ段階的に温度を冷却していくとすると、4 段階の冷却が必要となる。さらに、結露を避けるため、それぞれの温度において10分ずつ、その温度のまま、しばらくおいておく。
- dark frameを観測開始時と終了時に、積分時間5秒で10枚ずつ撮る。

また、天体の観測が可能となるのは、太陽高度が –12°以下 (薄明終了 時)である。日没直後では、まだ空が明るく、かつ、観測時間を長く確保 するには、この高度が適切だと考えた。

以上のことを考慮して、CCDの運用のフローチャートを考えると、図 4.19 となる。CCDの冷却、画像を撮るなどの動作の開始を決めるのは、 太陽高度で判断することにした。 CCDの観測準備の開始は、太陽高度 が3°以下とした。これは、画像を撮り始める時間を太陽高度を-12°と した時、ここでCCDの冷却が終わり、dark frame が撮り終わるまでの時 間から逆算した結果である。観測時間を限られた中でも勢一杯撮るには、 観測可能な太陽高度となったらすぐに開始しなくてはならない。ただし、 結露を防ぐためには、段階的な冷却が必要である。主に、冷却にかかる時 間を考慮して、この値を出した。

light frame の積分時間は、WIDGET の運用体制を参考にした。これに よって、短い時間での明るさの変動を捉えることができる。 もちろん、 この運用体制は、現在わかっているデータに基づいたものであり、今後も 改良・改善する必要があるだろう。



図 4.19: CCD のフローチャート

第5章 今後の課題

今回、行った性能評価実験は、実験室で行ったものであるから、木曽に 移設するまでに、実際に望遠鏡に CCD カメラを取り付けて、運用試験を 行う必要がある。その試験では、

木曽に装置を設置してからの課題として、以下の事項が挙げられる。

- 1. 測光精度
- 2. 位置測定精度
- 3. 初期運用を経て、システム全体における性能評価、および改良

1は、GRBの可視光残光で予想される減光を精度よく測定するために、 微小な変化を捉えられるかどうか調査することである。2は、天球という 球面を CCD カメラという平面に投射した際の歪みがないか、あるとした らどれくらいかを数値化することである。3は、シムテムを稼働させ、そ の成果が我々の予想通りに動いてくれるかを評価することである。これに よって、不備な点があれば、改善していかなくてはならない。また、不備 がなかったとしても、改良が可能であれば、改良することが、観測装置を 扱う上では重要であろう。

謝辞

卒業研究にあたっては、多くの方々にお世話になりました。宇宙につい て研究したいと、ずっと思っていたはいたものの、知識がほとんど知識が ない状態だったので、先輩方の研究をしている様子を見て、研究室に入っ た当初は、本当にやっていけるか、かなり不安がありました。何やらわか らないことだらけで、研究室のみなさまには、ご迷惑をおかけしました。 また、いろいろと教えてくださり、ありがとうございました。田代先生、 寺田先生には、実験でつまずいた時にいろいろアドバイスをいただきま した。浦田さんには、望遠鏡の使い方から、実験の解析について、基本的 なことから教えていただきました。恩田さん、小高さんには、GRB につ いて、WIDGET について、わからなかったことを丁寧に教えてもらいま した。本当にありがとうございました。また、岩切君は、共同実験者とし て、私が見逃してしまったことを指摘してくれたり、手伝ったりしてもら い、心強かったです。5月には、初めて行った木曽は、いろいろなトラブ ルにみまわれながらも、私にとっては、貴重な経験となりました。理研の 玉川先生、くわはらさんにも、お世話になりました。本当に、いろいろな 方に助けてもらい、ここまでやってこれたと思います。感謝の気持ちで一 杯です。

まだまだ、知識が不足していて、実験屋としての、観測屋としても、未 熟者であるので、これからも努力していこうと思います。

関連図書

- [1] 浦田裕次 『ガンマ線バーストの可視光追観測システムの開発』東京
 理科大学 修士論文 (2001 年度)
- [2] 恩田香織 『ガンマ線バースト可視光閃光観測システム WIDGET の
 性能評価 』東京理科大学 卒業論文 (2004 年度)
- [3] くわはらまこと 『超高視野望遠鏡に用いる冷却 CCD カメラの性能評 価と GRB050408 の観測結果 』東京理科大学 卒業論文 (2005 年度)
- [4] 岩切渉 『ガンマ線バースト早期可視光追観測システムの開発』 埼玉 大学 卒業論文 (2007 年度)
- [5] 上原岳士 『ガンマ線バースト多波長即時解析システムの構築と GRB061121の観測』広島大学 卒業論文 (2006 年度)
- [6] 小山勝二・嶺重慎 編集 『ブラックホールと高エネルギー現象』 日本 評論社
- [7] 上野宗孝 『CCD 解体新書』 天文月報 1995 年 12 月、1996 年 1 月、4 月、5 月、9 月
- [8] 浦田裕次 『東アジア・ガンマ線バースト追観測網の構築とその成果』 天文月報 2006 年 10 月
- [9] Steve B. Howell ^PHandbook of CCD Astronomy
- [10] M.Boer at al 2006, ApJ
- [11] A.E.RuIZ-VELASCO at el. 2007, ApJ
- [12] http://hete2.riken.jp:611/widget/
- [13] http://cosmic.riken.jp/grb/widget/
- [14] http://tarot.ops-hp.fr/