# かなた望遠鏡用1露出型偏光撮像器HOWPolの 器械偏光に関する研究

広島大学 理学部 物理科学科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B082871 高木 勝俊

主查:川端 弘治

副查: 栗木 雅夫

2012年2月10日

概要

かなた望遠鏡を用いた観測研究の目標の1つに、ガンマ線バースト (GRB) という宇宙 で最も明るい爆発現象の初期残光の可視偏光データ取得がある。2009年より運用を開始 した HOWPol は通常 2-4 回撮像が必要なところを1回で偏光データが得られる、時間変 動の激しい天体の観測に特化した偏光観測装置であるが、ナスミス焦点に取り付けられて いるため第3鏡反射による器械偏光のキャリブレーションが必要である。

本研究では、多バンド観測や視野中心から外れた天 体の偏光観測に必要な、ストークスパラメータQ,U の時角依存性とその長期変化、波長依存性、および視 野内の位置依存性を求めた。このうちストークスパ ラメータ(Q,U)の時角依存性は右図のようになり、2 年前に求められている依存性とほぼ一致した。また、 波長依存性では一露出型Rバンドで3.8%、Iバンドで 4.4%、Vバンドで2.8%の器械偏光を示すことが分かっ た。これらにより、新たに観測できたガンマ線バース ト:GRB111228Aなどの一般的な観測データのキャリ ブレーションが可能となった。



目 次

第1章	序章	6
1.1	東広島天文台とかなた望遠鏡	6
	1.1.1 観測装置	8
1.2	ガンマ線バースト	9
1.3	ガンマ線バーストの偏光観測	11
1.4	本研究の目的	12
第2章	HOWPol	13
2.1	基本仕様	13
2.2	構成	14
	2.2.1 筐体	14
	2.2.2 光学系	14
	2.2.3 検出器系	15
	2.2.4 駆動制御系	17
2.3	観測モード	20
	2.3.1 撮像観測モード	20
	2.3.2 偏光観測モード	20
	2.3.3 分光観測モード	21
	2.3.4 GRB 自動観測モード	21
第3章	偏光観測に特有なキャリブレーション項目	<b>23</b>
3.1	偏光観測とその目的	23
	3.1.1 偏光とストークスパラメータ	23
	3.1.2 偏光観測の目的	24
3.2	キャリブレーション項目	24
	3.2.1 器械偏光	24
	3.2.2 器械消偏光	25
	3.2.3 方位角原点	25
3.3	HOWPol におけるストークスパラメータの導出	25
	3.3.1 半波長板回転型観測法	25
	3.3.2 1 露出型観測法	28
3.4	HOWPol による偏光観測における主な誤差要因	29

第4章	器械偏光のキャリブレーション	30
4.1	調査項目	30
4.2	解析方法	30
	4.2.1 1次処理	31
	4.2.2 アパーチャー測光	32
4.3	観測	33
4.4	結果	34
	4.4.1 波長依存性	34
	4.4.2 時角依存性	35
	4.4.3 視野内の位置依存性	37
4.5	考察	42
	4.5.1 誤差要因	42
	4.5.2 器械偏光の新しい補正法	43
4.6	GRB111228A	44
	4.6.1 観測	44
	4.6.2 解析	45

# 第5章 まとめと今後

図目次

1.1	かなた望遠鏡	. 6
1.2	東広島天文台	. 7
1.3	TRISPEC	. 8
1.4	HONIR	. 8
1.5	HOWPol	. 9
1.6	高速カメラ	. 9
1.7	BATSE が取得した GRB 発生源全天マップ	. 9
1.8	GRB970228のX線残光。左が発生直後で右が発生から8時間後。	. 10
1.9	long GRB の一般的な X 線光度曲線	. 11
1.10	GRB の一般モデル (2008 年度上原修士論文)	. 11
0.1		14
2.1	HOW POL 0 例 囲 凶	. 14
2.2	元子示の概念図	. 10 16
2.3 9.4	) ユ y = に 取 y 1 () 04 (COD111998 A 仕) () (COD111998 A 仕) ()	. 10 16
2.4 9.5	nOWF01 生画像の例 (GRD111228A 竹丸)	. 10
2.0 0.6	伏悦到マムク	. 17
2.0		. 17
2.1	20元用 × ヘク	. 17
2.8		. 1/
2.9	ノイルター返回田禄	. 10
2.10	シンクルワオフストンフリズム慨忌凶	. 19
2.11	ダブルワオブストンフリズム慨忌凶	. 19
2.12	伏倪野田ダブルウオブストンブリズム	. 20
2.13	広税到用ダブルウオブストンフリスム	. 20
2.14	クリヘム	. 20
2.15	<b>撤隊モートで待ら40る土画隊</b>	. 21
3.1	$Q,U \geq P, \theta$ の関係	. 24
3.2	カセグレン焦点とナスミス焦点	. 25
3.3	偏光観測の概念図:半波長板使用	. 26
3.4	偏光観測の概念図:1 露出型	. 28
4.1	HOWPolで撮った生画像の一部	. 31
4.2	生画像に乗るノイズ	. 31

4.3	フラット割り概念図	32
4.4	1次処理前と後の画像の比較	32
4.5	アパーチャー測光概念図	33
4.6	無偏光標準星 HD14069	34
4.7	R バンド OUT	35
4.8	R バンド chip0	35
4.9	Rバンド chip1	35
4.10	I バンド OUT	35
4.11	I バンド chip0	35
4.12	I バンド chip1	35
4.13	V バンド OUT	35
4.14	V バンド chip0	35
4.15	V バンド chip1	35
4.16	R バンド OUT	37
4.17	R バンド chip0	37
4.18	Rバンド chip1	37
4.19	I バンド OUT	37
4.20	I バンド chip0	37
4.21	I バンド chip1	37
4.22	V バンド OUT	37
4.23	V バンド chip0	37
4.24	V バンド chip1	37
4.25	視野内の位置の定義1	38
4.26	視野内の位置の定義2	40
4.27	横軸がKの誤差、縦軸がPの誤差。赤がR、緑がV、青がIバンド	42
4.28	横軸が時角、縦軸がKの誤差。赤がchip0、緑がchip1から得られる値。	43
4.29	横軸が方位角、縦軸がKの誤差.......................	43
4.30	横軸が高度、縦軸がKの誤差	43
4.31	GRB111228A	44
4.32	GRB111228A Swift 光度曲線。赤が WTmode で緑が PCmode。	45
4.33	GRB111228A かなた光度曲線	46
4.34	GRB111228A 偏光度時間変化	47
4.35	GRB111228A QU 時間変化	47
4.36	GRB111228A QU 平面	48

表目次

1.1	かなた望遠鏡の仕様	7
$2.1 \\ 2.2$	基本仕様 (設計値)	13 15
4.1	器械偏光の波長依存性と QU 平面上での円の原点	34
4.2	11月16日と12月14日のデータ	39
4.3	1月17日のデータ	41
4.4	GRB111228A 観測モード	45
4.5	GRB 撮像の CCD 上の位置により生じる器械偏光 (通常の撮像モード)	46

# 第1章 序章

# 1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡

かなた望遠鏡(図1.1)は、広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台(図1.2)に設置 された、可視光・近赤外線で観測すること目的とした光学望遠鏡である。もともと1994年 に赤外シミュレータとして国立天文台の三鷹キャンパスに設置され、すばる望遠鏡に取り 付ける観測装置や鏡の試験をするために使われてきた。そして2004年、その役割を終え たことを受けて本格的な天文・宇宙研究へ有効に活用することを掲げて広島大学が譲り受 けた。それ以降、宇宙科学センターではガンマ線バーストのような高エネルギー宇宙現象 の解明に向けかなた望遠鏡を使い人工衛星の観測と連携した多波長観測を行っている。



図 1.1: かなた望遠鏡

かなた望遠鏡の主鏡の口径1.5mは国内最大級であり、高い集光力をもつ。また、東広 島天文台に移設する際に望遠鏡の架台部分を改造したことで任意の天体に対して50秒以 内で指向可能な高い駆動性能をもっている。この駆動性能は口径1.5mクラス以内の望遠 鏡としては世界最高水準である。世界にはかなた望遠鏡より高い駆動性能をもつガンマ線 バースト専用の光学望遠鏡が存在するが、その大部分が0.5m以下の小口望遠鏡である。 小口径の望遠鏡は、その口径ゆえに十分な光量が確保できないために分光観測や偏光観 測をすることができず、ガンマ線バーストの即時観測は測光観測しかできない。しかし、 かなた望遠鏡は偏光観測や分光観測をするには十分な口径があり、しかも広島大学所有の



図 1.2: 東広島天文台

望遠鏡なので他の観測に縛られることなく突発天体に対して柔軟に対応できるという利 点がある。これらの利点を活かし、東広島天文台では突発天体の即時観測を行っている。 特に発生後から急激に減光してしまうガンマ線バーストの可視光観測では、人工衛星から のアラート (GCN)を受けたときに即座に天体の座標を特定し、自動的に指向・追尾観測 を開始できるシステムを用いている (2006 年度上原卒業論文)。さらに広島大学は 2008 年 に打ち上げられたガンマ線衛星 Fermi とも連携した観測を行っており、ガンマ線バースト の即時観測体制は強化されつつある。しかし未だに発生直後の偏光観測については例が少 ない。偏光撮像器 HOWPol はガンマ線バーストの初期残光の偏光を観測することを大き な目標としている。

項目	仕様				
光学系	リッチー・クレティアン光学系				
主鏡	有効径 1540mm/主鏡の F 比=2.0				
焦点モード	カセグレン焦点 (F/12.0)・ナスミス焦点 (F/12.0)				
焦点面スケール	カセグレン 11.15 秒角/mm ・ナスミス 11.15 秒角/mm				
焦点距離	焦点距離 18,501.7mm				
分解能	1 " FWHM				
視野	15 分角 φ				
最大駆動速度	5 /sec (方位角) 2 /sec (高度軸)				
最大化速度	$1/\sec^2$				
架台	経緯台方式				

表 1.1: かなた望遠鏡の仕様

### 1.1.1 観測装置

東広島天文台では高エネルギー天体の観測に特化した観測装置が開発され、かなた望遠 鏡に取り付けて観測が行われている。現在、観測装置はカセグレン焦点に1つ、ナスミス 焦点に2つ取り付けられている。

カセグレン焦点には、以前は可視赤外線同時撮像分光装置「TRISPEC(Triple Range Imager and SPECtrograph)」(図1.3)という名古屋大学で開発された装置が取り付けられ ていた。これは可視1バンド、赤外2バンドの同時撮像・分光・偏光観測を行うことができ たが、現在は検出器読み出し部、及び光学系駆動部の故障により使われていない。この後継 機として可視赤外線同時撮像カメラ「HONIR(Hiroshima Optical Near-InfraRed camera)」 (図1.4)を広島大学が独自に開発中である。これは可視・赤外線の同時3バンドでの撮像・ 分光・偏光観測が可能なもので、完成するとTRISPECに比べて大幅な感度・精度の向上 が期待できる。

ナスミス焦点には、高速分光器(図1.6)と一露出型広視野偏光撮像器「HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter)」(図1.5)が取り付けられている。高速分光器はブラックホール連星や激変星などの短時間変動がある星の観測が目的で、最大で35.8 frame/sec の撮像観測と分光観測が可能である。HOWPolは広視野でかつ、1回の露出で偏光撮像を 行うことができる検出器であり、本研究で取り上げる装置である。HOWPol の性能や仕様については第二章で取り上げる。



図 1.3: TRISPEC



図 1.4: HONIR





図 1.5: HOWPol

図 1.6: 高速カメラ

# 1.2 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとはガンマ線領域において、0.1 秒から数百秒の間明るく輝く宇宙最 大規模の爆発現象である。この天体ははじめ、1967年に核実験衛星によって偶然発見さ れた。その研究によりガンマ線バーストは1日に1回程度の頻度で検出され、宇宙の中で ありふれた現象であることが分かってきたが、短時間で消えてしまうために追観測がで きず、その正体はしばらく謎のままであった。また当時の観測精度では位置を特定するこ とは困難で、発見から20年程度は発生源が太陽系内なのか、銀河系内なのか、銀河系外 なのかすら分からなかった。1980年台後半に打ち上げられたガンマ線バーストモニター BATSE 衛星によって、図1.7に示した全天マップが得られた。もし銀河系内に存在する なら発生源は銀河面に沿って分布することが期待されるが、ランダムに分布していること からガンマ線バーストは銀河系外のものであるか、又は太陽系のこと近傍に付随した現象 であることが分かった。



図 1.7: BATSE が取得した GRB 発生源全天マップ

1990年代になり、ガンマ線以外の波長域(X線、可視光、電波等)でもガンマ線バースト

に付随して明るく光る「残光」が発見された。最初の発見はX線観測衛星「BeppoSAX」 によるGRB970228であり、X線では発生から8時間経過した後に、可視光では発生から 3日経過した後でも光っていることが確認された(図 1.8)。さらにその可視光分光解析か らGRB母銀河の赤方偏移がz=0.835(約 69 億光年)であることが分かり、宇宙論的な距離 で発生していることが初めて確定した。



図 1.8: GRB970228のX線残光。左が発生直後で右が発生から8時間後。

ただしそのような遠方で発生しているとすると、バースト固有の光度は極めて大きくな ければならないことになる。そのような莫大なエネルギーをどのような機構で発生させて いるかは議論が収束しなかった。この原因のひとつは、ガンマ線バーストが予測不可能な 突発天体でありバーストが極めて短時間で観測に限界があることによる。そのため観測衛 星でバーストを捕えても可視光望遠鏡で残光の観測を開始することは難しい。この状況 を大きく打開したのが2004年に打ち上げられたガンマ線バースト専用観測衛星 Swift で ある。Swift はガンマ線バーストを検出するとすぐにその座標を割り出し、地上のネット ワークにその情報を配信する役割を果たしている。この即時アラートによって全世界の観 測所でバースト直後から観測可能な環境を構築することが可能になり、残光のより早い観 測が可能になった。これによって long GRB 初期の X 線残光の振舞い (t<sup>-3</sup> の急な減光と t<sup>-0.5</sup> の平な減光) や X 線フレア (図 1.9) 等、それまでの予想と違うものが発見された。こ の原因については現在もよくわかっていない。

GRB は T90(ガンマ線バーストのフォトンの 90%が到来する時間)の個数分布が2秒よ り長いものと短いものに大別することができ、前者を long GRB、後者を short GRB と呼 ぶ。long GRB のスペクトルは低エネルギー側にピークがあるのに対し、short GRB は高 エネルギー側にピークがあるので、long GRB と short GRB は発生起源が違うものだと言 われている。

long GRBの発生起源の最も有力な説は、ブラックホールの発生に伴ってできた火の玉



図 1.9: long GRB の一般的な X 線光度曲線

から相対論的な速さの電子・陽電子プラズマのシェルが複数放出され、この速度差をもった シェルが合体し内部衝撃波を起こしガンマ線を放射するという「火の玉」モデル(図1.10) で、さらに合体したシェルが星間物質に衝突して外部衝撃波を起こすことによりX線から 電波までにわたる残光を放射すると考えられている。一方 short GRBの発生起源は、中 性子星同士の合体やブラックホールと中性子星の連星の合体によって起こると考えられて いる。ただし long GRB も short GRB にもこれらのモデルに当てはまらない GRB も観測 されており、未だに結論は出ていない。



図 1.10: GRB の一般モデル (2008 年度上原修士論文)

# 1.3 ガンマ線バーストの偏光観測

ガンマ線バーストはプロンプト放射、残光ともにシンクロトロン放射が有力な発光機構 であり、観測される光は多かれ少なかれ偏光していることが期待される。この偏光を測る ことができれば輻射領域の磁場構造や周辺の幾構造も推定可能となる。

ガンマ線バーストの残光の偏光観測例はいまだに稀少である。爆発から数時間経過して から捕えられた例はあるが、光度曲線が特異なものばかりで爆発モデルの制限までには 至っていない。これは偏光観測装置を取り付けている望遠鏡が少ないためである。ガンマ 線バースト専用の小型望遠鏡はいくつかあるがこれでは十分な光量を確保できず、撮像は 測光に限られている。またガンマ線バーストは位置誤差が大きいことも初期残光の偏光観 測が難しいことの理由の1つである。

そこで我々の観測チームでは、バーストから数分~数十分といったごく初期の残光を偏光 観測することを目標としている。広い視野を持ち一回の露出で偏光撮像が可能なHOWPol によって発生起源の解明が期待される。

## **1.4**本研究の目的

上に述べたように、かなた望遠鏡では高エネルギー宇宙現象の解明を第一目標に掲げて 観測研究が進められている。さらに我々は偏光という新しい手法でガンマ線バースト現象 の解明を目指して、GCNからのアラートを受けてHOWPolによる自動観測を開始するシ ステムも整えている。

本研究の目的は 2009 年に運用を開始した HOWPol において、試験観測によって得ら れるデータから主に第3 鏡による器械偏光のキャリブレーションを行い、HOWPol で得 たデータから正しい偏光の値を導出することを可能にすることである。前任者の小松氏 (2011 小松修士論文) により、R バンド (中心波長 0.65µm) の時角依存性の詳細なデータが 得られたが、一般的な観測に対応するためには、これ以外に別バンドでの器械偏光を知る 必要があるほか、視野内の位置に対する依存性も知らなくてはならない。本研究では R バ ンドの器械偏光の3年間に亘る安定性のほか、これら2項目について調査して、HOWPol における一般的な偏光観測に対する器械偏光のキャリブレーション法を確立させ、その安 定性を評価する。

# 第2章 HOWPol

# 2.1 基本仕様

広視野偏光撮像器 HOWPol は突発天体に特化した偏光観測装置である。全長はおよそ 1m、重量は約 200kg であり、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けてある。通常の偏 光装置はカセグレン焦点に取り付けるが、突発天体の観測に伴う常時設置の必要性から本 装置はあえてナスミス焦点に取り付けてある。これから大型化していく望遠鏡ではカセ グレン焦点がなくなりナスミス焦点にのみ装置を取り付けることが検討される例もあり、 その意味でもナスミス焦点に取り付けた HOWPol がどれほどの性能を発揮できるかとい う点で注目されている。ただし、第3鏡を通して CCD で画像を生成するため、反射成分 により器械偏光が生じる。詳しい議論は 3.2 で述べる。

HOWPolの基本仕様は表2.1の通りである。

波長域	可視 450nm - 1100nm
観測モードと視野	撮像:15分φ
	広視野偏光撮像:7分×7分
	狭視野偏光撮像: 15 分×1 分
	分光:2.3 秒×15 分
フィルター	B,V,R,I,z'+Y, 偏光フィルター (青/赤), 減光フィルター
グリズム	低分散 (420/mm,R=400)
ウォラストンプリズム	広視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム
	狭視野用ウェッジ付きダブルウォラストンプリズム
	シングルウォラストンプリズム
CCD	完全空乏型 CCD 2k-4k × 2ヶ(浜松ホトニクス
	国立天文台),空乏層の厚さ 200 μ m
限界等級	撮像:R=19.2mag(10 分露出, 測光精度 0.02mag)
	偏光撮像: R=16.0mag(10 分露出, 偏光誤差 0.2%)

表 2.1: 基本仕様 (設計値)

# 2.2 構成

#### 2.2.1 筐体

図2.1はHOWPolの装置全体の断面図である。図の最も左側の板が望遠鏡のナスミス焦 点のローテータに装着されている天板で、そこから光が入ってくる。筐体本体は、天板か らトラス構造で支えられており、内部には偏光較正光学系用Xステージ(半波長板)、フィ ルターターレット2つ、瞳マスク、シャッター機構、プリズム用XYステージがある(赤い 部分)。次に焦点合わせ用の検出器ステージがあり、検出器デュワーが載っており(青い部 分)、焦点合わせ用のステージと絶縁板を介して固定されている。緑色の部分は左側がコ リメータレンズ系で右側がカメラレンズ系である。



図 2.1: HOWPol の断面図

### 2.2.2 光学系

HOWPolは(株)レンズ屋によって設計された瞳像の収差が極めて小さい再結像光学系 を採用している。この光学設計概念図は図 2.2 で、光学系の仕様は表 2.2 となっている。



図 2.2: 光学系の概念図

項目	設計値
望遠鏡焦点から結像面までの距離	748.63mm
合成F値	6.9
平行光部長	266.1mm
瞳像直径	$\phi$ 23.9mm
$560 < \lambda < 930$ nm 透過率	60%以上
$400 < \lambda < 450$ nm 透過率	25%以上
$450 < \lambda < 1100$ nm 透過率	38%以上
カメラレンズ焦点距離	148mm
80 % Encircled Energy	0.6 秒角
$(450 < \lambda < 1100 \text{nm})$	(視野前面 プリズム無い時)
歪曲収差	+ 2.4 %
	$500 < \lambda < 1100$ nm $\circlearrowright 52 \mu m$
瞳像の収差	$600 < \lambda < 1000$ nm

表 2.2: 光学系の仕様

図2.2において左側から入ってきた天体の光をコリメータレンズ群で平行光にして、カメ ラレンズ群の CCD によって再結合させるようになっている。平行光の中にはフィルター、 シングルウォラストンプリズム、ダブルウォラストンプリズム、半波長板、シャッターな どの光学素子が入る。これらの光学素子を駆動機構を用いて交換することで観測モードの 切り替えを行う。

#### 2.2.3 検出器系

HOWPolの検出器系は2k×4kの完全空乏型CCDを2枚並べて4k×4kとして使っている。このCCDはデュワー(図2.3)に入れられ、真空度10<sup>-5</sup> ~ 10<sup>-6</sup>Torr、温度約173K(-100 ℃)に保たれている。

図 2.4 に HOWPol の一露出型偏光モードで撮影された画像の例 (GRB111228A とその 付近)を示す。2 枚の CCD の間には 1mm ほどのギャップがあり、図の真ん中が白くなっ ているところがそれに対応する (図は chip0 と chip1 の画像を手動で位置合わせしたもの なので、位置関係は厳密にはこの図とは違う)。また、星像が全て横に4つに分かれて表 示されているのはウォラストンプリズムを用いた偏光観測モードであるためである。観測 モードの詳細については 2.3 で述べる。



図 2.3: デュワーに取り付けられた CCD



図 2.4: HOWPol 生画像の例 (GRB111228A 付近)

撮像モードでの限界等級は一番感度の高いRバンドの撮像で19.2等 (10 分露出、 $\Delta m = 0.02$ mag)、偏光撮像で16.0等 (10 分露出、 $\Delta P=0.2\%$ )である。ピクセルスケールは0.294 秒で、現在は通常2×2ビンで読み出しを行っている。かなた望遠鏡を介した星像の典型 的なサイズ (FWHM)は1.5秒角かそれ以上であり、ナイキスト・サンプリングよりは細か いため、2ビンの観測で特に問題はない。

#### 2.2.4 駆動制御系

#### 2.2.4.1 焦点マスク

望遠鏡の焦点位置に置く焦点マスクは視野を絞るためのもので、使用する観測モードに よって切り替える。焦点マスクには撮像用マスク、狭視野偏光用マスク、広視野偏光用マ スク、分光用マスク、歪曲収差の補正などに使用する格子状マスクがあり、ターレットが 回転することでいずれかのマスクが光路上に入るようになっている。



図 2.5: 狭視野マスク



図 2.6: 広視野マスク



図 2.7: 分光用マスク



図 2.8: 格子状マスク

#### 2.2.4.2 半波長板

HOWPolの偏光観測は、通常の偏光観測と同じように半波長板を入れて偏光データを 取得する方法もある。そのため、半波長板を光路上に出入りさせる機構として偏光較正光 学系用Xステージがある。そしてこれを回転させるステージがXステージである。

半波長板とは直交する2つの偏光成分に対し、片方の偏光成分の位相を相対的に半波 長分だけずらす素子である。偏光観測では天体の偏光情報を取得するために少なくとも4 方位の情報が必要である。これを実現させるには、ウォラストンプリズム以降の光学素子 を光軸に対して回転させることで実現するが、実際に内部構造やCCD検出部を回転させ ることは困難である。このため偏光装置では半波長板をウォラストンプリズムの前に配置 し、これを回転させることで天体偏光面を光軸に対して回転させる。この方法を用いれば 4方位のデータは半波長板のみを精度よく回転させることで得られ、装置全体の構造がシ ンプルになる。

#### 2.2.4.3 フィルター

フィルターは観測する波長を制限するものであり、フィルターターレットを回転させる ことでフィルターを選択して光路上に入れる。ターレットにはフィルターを5枚まで入れ ることができ、HOWPolにはこのターレットが2つある。いずれも装置内部のゴースト 回避のために10°傾けてある。

一方にはバンドパスフィルターが装着されており、ここで B,V,Rc,Ic,z'+Y の5種類の バンド(もしくは素通し)を選択できる。各バンドの透過率は表 2.9の通りである。もう一 方にはハルトマン板が2枚、ある方向に振動する光だけを通すことで100%偏光にする偏 光フィルター(青)、波長校正用の時に使う青いフィルター、そして約 640nm 以下の波長 をカットする R64 というフィルターが入っている。



図 2.9: フィルター透過曲線

#### 2.2.4.4 プリズム

プリズムは光を分割するものであり、プリズム用 XY ステージが X と Y のそれぞれの 方向に動くことで観測に使用するプリズムを選択することができる。現在、撮像用の素通 し以外に、狭視野偏光撮像用ダブルウォラストンプリズム、広視野偏光撮像用ダブルウォ ラストンプリズム、そしてグリズム (回折格子とプリズムを組み合わせた分散素子)が塔 載されている。

#### シングルウォラストンプリズム

ウォラストンプリズム (図 2.10) とは複屈折性をもつプリズムを複数個、光学軸をずら して接合させたものである。ランダム偏光の光をウォラストンプリズムに入射すると、互 いに垂直な直線偏光の成分である常光と異常光に分けることができる。HOWPol には偏 光分光観測のためにシングルウォラストンプリズムが塔載されている。ただし複数回の露 出が必要のため時間分解能は悪くなるが、偏光測定方法が確立されているので十分な精度 が期待できる。また、ダブルウォラストンプリズム観測の較正にも用いることができる。



図 2.10: シングルウォラストンプリズム概念図

ダブルウォラストンプリズム

ダブルウォラストンプリズム(図2.11)は2つのウォラストンプリズムを光学軸を45°回転して接合させたものである。それぞれのウォラストンプリズムに半分ずつ光が入るように接合部分に光を入射させることで0°、45°、90°、135°の直線偏光成分に分離することができる。ただし現在ウォラストンプリズムは真ん中から若干ずれたところで光を分離しており、CCD上で左側2つの星のカウントが右側2つのおよそ2倍となる位置になっている。

狭視野用ダブルウォラストンプリズム (図 2.12) と広視野用ダブルウォラストンプリズム (図 2.13) がある。



図 2.11: ダブルウォラストンプリズム概念図

グリズム

グリズム (図 2.14) は分光時に用いられ、プリズム単体に比べて高分解能なスペクトル が得られる。観測の目的に合わせて高分散型.低分散型のグリズムを選択するが、現在は





図 2.12: 狭視野用ダブルウォラストンプリ 図 2.13: 広視野用ダブルウォラストンプリ ズム ズム

低分散型  $(R = \lambda/\delta\lambda = 400)$  のもののみが実装されている。



図 2.14: グリズム

# 2.3 観測モード

### 2.3.1 撮像観測モード

単純な撮像観測を行うモードである。視野は15分  $\phi$ 。図2.15 に実際の撮像画像を示す。 縦方向に黒い線が短冊のようになっている部分はプリスキャン領域、オーバースキャン領 域と呼ばれるもので、読み出しによるバイアス値である。得られた画像から正確に測光を 行う場合にはこのバイアスを引く必要がある(詳しくは4.2.1 で述べる)。

### 2.3.2 偏光観測モード

偏光成分に分けて撮像観測を行うモードである。これには広視野偏光モードと狭視野偏 光モードがある。

広視野偏光モードでは位置誤差の大きなGRBの観測に主に用いる。視野は7分角  $\phi$  と 広いが、色収差が大きいので測光方法に注意する必要がある。一方、狭視野偏光モード



図 2.15: 撮像モードで得られる生画像

は位置が正確に決まっている天体に対して用いる。視野は1分角×5分角の短冊状と細い が、スカイを切り離すことができるため色収差が小さく精度の良いデータが得られる。本 研究で扱う偏光データは全て狭視野偏光モードで撮った。

偏光データは通常、半波長板を光路上に入れて4つの角度(0°、22,5°、45°、67.5°)で撮像する。ただしこれでは撮像を4回行う必要があり、GRBのごく初期の残光の偏光を追うのはかなり難しい。ところがHOWPolは1回の撮像で偏光データを得ることができる特殊な検出器であり、これによりGRBの初期残光の偏光を追うことがより可能となる。 両観測モードでの偏光データを得るための解析方法は3.3で述べる。

#### 2.3.3 分光観測モード

HOWPol で分光観測を行うモードである。約2.3 秒角のスリット幅に星を CCD 上で 移動させる必要があるが、前任者である小松氏が分光露出を開始するまでのプログラム (howspec)を開発し、素早く分光観測を開始することができるようになった (2010 年度小 松修士論文)。さらに、2010 年度佐藤卒業論文のオートガイダーによって長時間連続した 露出も可能になりつつある。

#### **2.3.4** GRB 自動観測モード

GRBの残光は長いときは数日間続くが、光度は時間のべき乗で急激に減少していく。 典型的なGRBの場合、可視残光の指数は-1から-2程度となっている。このように急激に 減少していくので、特に偏光観測の場合は限界等級の制限もあって、一刻も早い観測が必 要となる。 GRB 観測専用衛星「Swift」塔載の BAT(Burst Alert Telescope) は、GRB を検出する と GCN(Gamma-ray-burst Coordinate Network) に速報 (バースト UT、Ra·Dec など) を 流す。かなた望遠鏡及び HOWPol では、この GCN を受けたときの GRB の高度が 10° 以 上であれば即座にその方向へ望遠鏡を向けて一露出型の偏光観測を開始する。この自動観 測モードは 2006 年度上原卒業論文によって手がけられ、これによってアラートから最短 1 分程度で GRB の観測が開始できるようになった。

なおBAT での位置決定精度は約3分角であり、周りに多数の星があるとGRBの位置を 確認するのが大変難しい。Swift はBAT での観測開始後20~70秒以内にXRTとUVOT によってX線、紫外線、可視光での観測を開始する。XRT での観測では約90秒以内に 0.3~2.5秒角の精度で位置を決定することができるため、その後であれば狭視野偏光モー ドでの観測も期待できる。

# 第3章 偏光観測に特有なキャリブレー ション項目

## 3.1 偏光観測とその目的

## 3.1.1 偏光とストークスパラメータ

光は電磁波であり、電場・磁場は進行方向と垂直に振動する横波である。一般的に電場・ 磁場はあらゆる方向に振動しているが、ある特定の方向に強く振動している光のことを偏 光という。偏光には、直線偏光の他に円偏光があるが、本論文では直線偏光のみを扱い、 単に偏光といった場合には直線偏光を表すものとする。

偏光は通常、どのくらい偏光しているかを表す偏光度Pと、どの方向に偏光しているか を表す偏光方位角度θで記述する。このPとθは人間が認知しやすいパラメータではある がベクトル的に扱わなければならないので議論に煩雑さが残る。そこで1852年にストー クスが導入したストークスパラメータと呼ばれる4つの値(I,Q,U,V)を使用する。これら からPとθを求めるのもごく容易である。

ある光の電場の X 方向の振幅を  $\varepsilon_x$ 、Y 方向の振幅を  $\varepsilon_y$ 、位相差を  $\delta$  としたとき、ストー クスパラメータは

$$I = \langle \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 \rangle \tag{3.1}$$

$$Q = \langle \varepsilon_x^2 - \varepsilon_y^2 \rangle \tag{3.2}$$

$$U = 2\langle \varepsilon_x \varepsilon_y \cos \delta \rangle \tag{3.3}$$

$$V = 2\langle \varepsilon_x \varepsilon_y \sin \delta \rangle \tag{3.4}$$

ここでIは電磁波の強度に比例するパラメータ、Q,Uは直線偏光に関するパラメータ、V は円偏光に関するパラメータである。

これらストークスパラメータを求めることにより天体の固有偏光を議論する。偏光度 P と偏光方位角θは次のように表記できる。

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{3.5}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{3.6}$$

式 (3.5) と式 (3.6) より、横軸を  $\frac{Q}{7}$ 、縦軸を  $\frac{U}{7}$  とした QU 平面を考えることで Q,U と P, $\theta$ 

の関係を視覚的にも見出しやすい。つまり、図 3.1 で線分 OR の長さが偏光度 P で、この 線分と Q 軸のなす角度の半分が偏光方位角 θ となる。



図 3.1: Q,UとP, の関係

### **3.1.2** 偏光観測の目的

天体の偏光を探ることで天体周辺の磁場構造や天体周りの幾何学構造を知ることができ る。ただし偏光はガンマ線やX線では観測が難しいため、可視光での観測の重要性が非 常に大きくなる。

さらに、我々が目標としている GRB の初期残光の偏光は世界的に見ても稀なデータで あり、今後の観測が大いに期待される。

# 3.2 キャリブレーション項目

## 3.2.1 器械偏光

かなた望遠鏡では、天体からやってきた光を主鏡と副鏡で反射させた後、カセグレン焦 点にはそのまま光を、ナスミス焦点にはさらに第3鏡での反射を経て検出器で読み出しを 行う(図3.2)。ナスミス焦点における観測ではこの反射のために、無偏光の光を観測して もある程度の偏光度をもって観測される。この、装置内部によって起こる偏光のことを器 械偏光と呼ぶ。

主鏡と副鏡での反射は、その軸対称性のために互いに偏光が打ち消されて、カセグレン焦点中心での器械偏光は0.1%以下となる。それに対して第3鏡での反射は視野中心で3-4%程度の器械偏光を生む。また、視野中心以外では光の入射角が変わるためにさらに



図 3.2: カセグレン焦点とナスミス焦点

大きな器械偏光を生むことが予想される。また、観測する波長によっても器械偏光が変化 する可能性がある。これらを無偏光標準星 (Q=U=0) で調査する。

## 3.2.2 器械消偏光

器械消偏光とは直線偏光している光の一部がレンズ等の光学素子によって円偏光となる などして、検出される直線偏光の光子の数が減るというものである。これは前任者である 小松氏が、ほぼ100%の偏光を生じさせるフィルターやプリズムを通した観測を行なって すでに見積もられており、器械消偏光は無視できるほど小さいものであると結論が出てい る (2010 年度小松氏修士論文)。

## 3.2.3 方位角原点

偏光方位角は天球上で天の北極の方向を原点となるように表すが、器械系の方位角はその原点の取り方が観測方法によって変わってくる。この違いを解消するためオフセットをかける必要がある。これも前任者である小松氏が強偏光標準星を観測することで次のように結果が出ている(2010年度小松氏修士論文)。

補正すべき値 $\theta_0$ は、半波長板使用時:chip1 で 149.9±0.8°、chip0 で 102.2±0.8°、一露出型で 42.902±1.0°。

# 3.3 HOWPolにおけるストークスパラメータの導出

#### 3.3.1 半波長板回転型観測法

まず、半波長板回転型についてストークスパラメータの導出方法を考える。



図 3.3: 偏光観測の概念図:半波長板使用

図 3.3 は天体からの光が大気の影響を受けてウォラストンプリズムに入射し、そこで分割される様子を表したものである。HOWPol ではダブルウォラストンプリズムを用いているが、図ではその半分のみを示している。つまり、CCD の chip0 と chip1 の片方どちらかを考えていると思えばよい。

天体からの光は大気である程度の吸収を受ける。この吸収量は時間に依存する関数となるので $\xi(t)$ とおく。そしてこの光は望遠鏡へ入り、第3鏡での反射を経てある角度 $\theta$ だけ回転した半波長板を通過し、ウォラストンプリズムへと入ったところで常光と異常光に分けられる (図では  $I_o(\theta)$  と  $I_e(\theta)$  に対応)。ここでプリズムによって分けられた光は、プリズムによってある効率  $k_o$  と  $k_e$  で減光する。そして CCD 上で検出される光の強度を  $I_o(\theta)$  と  $I_e(\theta)$  と表すとすると、

$$I_o(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \cos 4\theta + \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_o \xi(t)$$
(3.7)

$$I_e(\theta) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \cos 4\theta - \frac{U}{I} \sin 4\theta \right\} k_e \xi(t)$$
(3.8)

ここで角度θは0°、22.5°、45°、67.5°で撮像するので片方のchipに写る8つの光の強度は、

$$I_{o}(0^{\circ}) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_{o} \xi(t_{0^{\circ}})$$
(3.9)

$$I_e(0^{\circ}) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{0^{\circ}})$$
(3.10)

$$I_o(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{22.5^\circ})$$
(3.11)

$$I_e(22.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{22.5^\circ})$$
(3.12)

$$I_o(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{Q}{I} \right\} k_o \xi(t_{45^\circ})$$
(3.13)

$$I_e(45^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{Q}{I} \right\} k_e \xi(t_{45^\circ})$$
(3.14)

$$I_o(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 + \frac{U}{I} \right\} k_o \xi(t_{67.5^\circ})$$
(3.15)

$$I_e(67.5^\circ) = \frac{I}{2} \left\{ 1 - \frac{U}{I} \right\} k_e \xi(t_{67.5^\circ})$$
(3.16)

このうち0°と45°の式から天候に関する効率ξを消すことができて

$$\frac{I_e(0^{\circ})}{I_o(0^{\circ})} = \left(\frac{1-Q/I}{1+Q/I}\right)\frac{k_e}{k_o}$$
(3.17)

$$\frac{I_e(45^{\circ})}{I_o(45^{\circ})} = \left(\frac{1+Q/I}{1-Q/I}\right)\frac{k_e}{k_o}$$
(3.18)

同様に 22.5° と 67.5° の式から

$$\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} = \left(\frac{1 - U/I}{1 + U/I}\right) \frac{k_e}{k_o}$$
(3.19)

$$\frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{1+U/I}{1-U/I}\right)\frac{k_e}{k_o}$$
(3.20)

ここで

$$a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} / \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)}}$$
(3.21)

$$a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)}} / \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)}$$
(3.22)

というように $a_1$ と $a_2$ をおくと

$$a_1 = \frac{1 - Q/I}{1 + Q/I} \tag{3.23}$$

$$a_2 = \frac{1 - U/I}{1 + U/I} \tag{3.24}$$

と表すことができる。よって

$$I = \sum_{\theta} (I_o(\theta) + I_e(\theta))$$
(3.25)

$$\frac{Q}{I} = \frac{1-a_1}{1+a_1} \qquad \left(a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)}} / \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} \mathcal{O} \mathfrak{B}\right)$$
(3.26)

$$\frac{U}{I} = \frac{1-a_2}{1+a_2} \qquad \left(a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)}} / \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} \mathcal{O} \oplus\right)$$
(3.27)

となる。つまりストークスパラメータ Q,U は効率 k<sub>o</sub>,k<sub>e</sub> や大気の影響 ξ に依存しない関数 となることが分かる。ただし、半波長板回転型では4 フレームの撮像が必要となり、これ らの取得にかかる時間内の偏光の変化については求めることができないので注意が必要で ある。撮像時間が長い場合は時角が変わり、Q,U に影響が出るためである (詳しくは 4.4.1 の時角依存性を参照)。これが短時間のうちに連続的に撮像する必要がある GRB の初期 残光において、その偏光データ取得が難しい理由の1つでもある。

これ以後、ストークスパラメータは便宜上、2,5の値を用いて議論する。

ところで、プリズムの効率に関する値 $k_e$ と $k_o$ の値は、無偏光標準星 ( $\frac{Q}{T} = \frac{U}{T} = 0$ )次のようになる。

$$\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} \frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)} = \left(\frac{k_e}{k_o}\right)^4$$
(3.28)

つまり、相乗平均をとって次のように求められる。

$$\frac{k_e}{k_o} = \left(\frac{I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ)} \frac{I_e(22.5^\circ)}{I_o(22.5^\circ)} \frac{I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ)} \frac{I_e(67.5^\circ)}{I_o(67.5^\circ)}\right)^{\frac{1}{4}}$$
(3.29)

この値は次に述べる1露出型でのリダクションに必要である。つまり、突発出現したGRB を偏光撮像した時など1露出型で偏光撮像した場合は、必ずその直後に半波長板を入れた 撮像が必要である。

#### 3.3.2 1 露出型観測法

次に1露出型でのストークスパラメータの求め方を考える。



図 3.4: 偏光観測の概念図:1露出型

図 3.4 はその概念図で、半波長板回転型のときとは違って1 露出型ではダブルウォラス トンプリズムを使う。この場合、chip0 と1 に2 つずつの星が写されることになる。 天体からの光が大気の影響 $\xi$ を受けてプリズムへ光がやってくるのは半波長板回転型と同じである。ここで光はプリズムによって4つへと分けられ、これを左から $I_{1o}$ , $I_{1e}$ , $I_{0e}$ , $I_{0o}$ とおく。ただし、ここでもプリズムによる効率 $k_{1o}$ , $k_{1e}$ , $k_{0o}$ , $k_{0e}$ で減光している。

プリズムによって分けられる光の強度は、

$$I_{1o} = I(0^{\circ})k_{1o}\xi(t) \tag{3.30}$$

$$I_{1e} = I(90^{\circ})k_{1e}\xi(t) \tag{3.31}$$

$$I_{0o} = I(45^{\circ})k_{0o}\xi(t) \tag{3.32}$$

$$I_{0e} = I(135^{\circ})k_{0e}\xi(t) \tag{3.33}$$

と表すことができる。一方でQとUは、

$$\frac{Q}{I} = \frac{I(0^{\circ}) - I(90^{\circ})}{I(0^{\circ}) + I(90^{\circ})}$$
(3.34)

$$\frac{U}{I} = \frac{I(45^{\circ}) - I(135^{\circ})}{I(45^{\circ}) + I(135^{\circ})}$$
(3.35)

となるので、式 (3.30),(3.31,(3.32),(3.33) より

$$I = I_{1o} + I_{1e} + I_{0o} + I_{0e} (3.36)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{I_{1o}\left(\frac{k_{1e}}{k_{1o}}\right) - I_{1e}}{I_{1o}\left(\frac{k_{1e}}{k_{r}}\right) + I_{1e}}$$
(3.37)

$$\frac{U}{I} = \frac{I_{0o}\left(\frac{k_{0e}}{k_{0o}}\right) - I_{0e}}{I_{0o}\left(\frac{k_{0e}}{k_{0o}}\right) + I_{e}}$$
(3.38)

となる。この式に半波長板回転型で求めた k<sub>1e</sub>/k<sub>1o</sub>,k<sub>0e</sub>/k<sub>0o</sub> を代入すればよい。なおこれらのkの値は観測ごとに多少ばらつくことが知られており、このばらつきが半波長板回転型にはみられない器械偏光の誤差の主要因となる。

# 3.4 HOWPolによる偏光観測における主な誤差要因

1 露出型から導出される器械偏光の誤差要因は主に2つある。1つは星のカウントをポ ワソン分布と仮定したものによる統計誤差で、もう1つはプリズムの効率 k<sub>e</sub>/k<sub>o</sub>による誤 差である。

プリズムの効率 k<sub>e</sub>/k<sub>o</sub>とはそれぞれのウォラストンプリズムでの減光率を表すもので、 半波長板を入れて1セット測定したときに chip0 と chip1 それぞれから得られる値である。 小松修士論文では日によるプリズムの効率の値が示されており、chip0 側で最大 7%もの 変動があるようである。

また、小松修士論文では QU 平面上に表したときの器械偏光の原点 Q<sub>0</sub> と U<sub>0</sub> を 0 とみ なしている。無視できる程度には小さいが厳密には 0 ではないのでこれも議論の余地が ある。

これらの点についても今日、追観測を行って再評価を行うこととする。

# 第4章 器械偏光のキャリブレーション

# 4.1 調査項目

第3鏡由来の器械偏光を見積もり、任意の観測においてその偏光キャリブレーションを 行うために調査すべき項目は以下の通りである。

- 光学的性質
  - (i) 波長依存性
  - (ii) 視野内依存性
- 安定性
  - (iii) 時角に対する安定性
  - (iv) 再現性

(i) は観測するバンドに依存する器械偏光の変化についてである。GRB 観測モードでは Rc バンドのみでの偏光観測であるが、他の多くの天体では多バンドでの観測が必要とな るため、Rc バンド以外での器械偏光の導出も必要である。

(ii) は HOWPol の CCD の中心付近と外側ではレンズへの入射角が違うために装置の対称性が変わり、器械偏光に違いが出ることを指す。

(iii)は望遠鏡を向いている方向に依存する器械偏光の変化についてである。

(iv) はカセグレン焦点とナスミス焦点での観測を切り替える時や第3鏡を動かす時、メ ンテナンスのために取り外したりした時の器械偏光の再現性についてである。

前任者小松氏での 2010 年度修士論文では (iii) の時角依存性について調べられ、ストークスパラメータの時角依存性モデルが調べられた。また、そのときの観測バンドは Rc バンドのみであった。

私は小松氏のキャリブレーションのより一般化を目指して、時角依存モデルの長期変化 と安定性、Rcバンドに加えてIバンドとVバンドでの器械偏光の大きさ、そして視野内 の位置依存性について調査した。これ以外の器械消偏光、及び方位角原点については小松 氏により調査が済んでおり、今回は確認だけすることとした。

## 4.2 解析方法

画像解析には可視光画像解析ソフト「IRAF」を用いた。

## 4.2.1 1次処理

図 4.1 は HOWPol で撮った生画像を一部トリミングしたものである。右側では全体的 に明るく表示されているのに対し左側では暗く表示されており、画像全体を通して視野内 の場所で感度に差があることが見てとれる。生画像にはこういったノイズや感度差がある ため (図 4.2)、そのままデータ解析しても正しい結果は得られない。そこで、これらをな くすために1次処理を行う。



図 4.1: HOWPol で撮った生画像の一部



図 4.2: 生画像に乗るノイズ

HOWPolの画像の1次処理の手順は次の通りである。

- バイアス引き
- フラット割り

バイアスとは読み出しの際に付加される、電圧に伴うカウントのことで、0秒積分の 画像ないしはプリスキャン領域とオーバースキャン領域(図で言うと縦の黒い線)のカウ ントにより求めることができる。HOWPolの場合、画像処理ソフト「IRAF」用に書かれた「howossub.cl」を使うことでこのスキャン領域、つまりバイアスを引いた画像を作ることができる。

そしてフラット割り (図 4.3) とは、視野内での感度ムラ、光学系での光量損失、装置内 でのゴミなどの影響を補正するためのものである。ドームに取り付けられたフラット板 に一様な強さの光源を投影した画像で、上のダーク・バイアス引きした画像を割ってやれ ば、CCD の感度ムラを補正することができる。



図 4.3: フラット割り概念図

以上により1次作業は完了となる。図4.4に1次処理前と後の画像の比較を載せる。



図 4.4:1次処理前と後の画像の比較

## 4.2.2 アパーチャー測光

1次処理した後は、測光と呼ばれる処理を行う。ここではその測光方法を説明する。

本研究での測光は全てアパーチャー測光(概念図4.5)で行った。アパーチャー測光とは、 ある半径内のカウント値を全て足しあげる測光方法である。ただしオブジェクトの明る さにはスカイの値も足されてしまっているため、この値を差し引く必要がある。IRAFの phot タスクは、アパーチャー測光半径とスカイ領域の内半径と外半径を指定することで オブジェクト位置のスカイ値を内挿で求め自動的に差し引いて、オブジェクトのカウント の積分値を算出してくれるのでこれを用いた。全ての画像でウォラストンプリズムで4つ に分割された光をそれぞれアパーチャー測光によってカウントを求めた。



図 4.5: アパーチャー測光概念図

## 4.3 観測

器械偏光の調査には無偏光標準星を用いた。前述のようにストークスパラメータQ=U=0 である無偏光標準星の光から偏光 (Q≠0 and/or U≠0) が検出されれば、それがそのまま 器械偏光の値になるためである。無偏光標準星には HD14069 を用いた。

無偏光標準星 HD14069(図 4.6)

- $\cdot$  Ra, Dec 2:16:45.20 +07:41:11.0
- $\cdot$  9.0mag for V band
- · 観測期間:2011/11/16-2012/01/17

この星を上記の期間内で、時角依存性とその長期変化、波長依存性、視野内の位置依存性について調べた。



図 4.6: 無偏光標準星 HD14069

## 4.4 結果

#### 4.4.1 波長依存性

光の反射・屈折などは一般に波長依存性をもつため、観測するバンドによっても器械偏 光は変化すると考えられる。そこで、狭視野偏光撮像モードの視野中心で R,I,V バンドそ れぞれで器械偏光を求めた。

これらの偏光データを QU 平面上にプロットすると、器械偏光の主たる原因が第3鏡の 反射のみである場合、データ点は円を描く。この円をフィットすることにより、器械偏光 の大きさ (=円の半径)を求めるが、この円の中心は必ずしも原点に来ないことが考えられ るので、原点 (*Q*<sub>0</sub>,*U*<sub>0</sub>) も同時にフィッティングによって求めた。図 4.7~4.15 はこの円のプ ロットである。

器械偏光の値と QU 平面プロットの円の原点は表 4.1 の通りである。原点座標の誤差は いずれも 0.01%程度である。

バンド	撮像モード	偏光度 (%)	QU 平面上での円の原点 (%,%)			
	一露出型	$3.53\pm0.29$	(-0.02, -0.10)			
R	半波長板回転型 chip0	$3.65\pm0.18$	$(0.02\ , 0.02)$			
	半波長板回転型 chip1	$3.94\pm0.17$	$(0.10\ , 0.00)$			
	一露出型	$4.36 \pm 0.20$	(-0.09, -0.07)			
Ι	半波長板回転型 chip0	$4.27\pm0.16$	$(0.01\ , 0.09)$			
	半波長板回転型 chip1	$4.48\pm0.15$	$(0.10 \ , -0.04)$			
	一露出型	$2.56 \pm 0.24$	(-0.24, 0.11)			
V	半波長板回転型 chip0	$2.74\pm0.19$	$(0.00\ ,\ 0.05)$			
	半波長板回転型 chip1	$3.11\pm0.14$	(0.20 , -0.07)			

表 4.1: 器械偏光の波長依存性と QU 平面上での円の原点



## 4.4.2 時角依存性

#### 4.4.2.1 モデル関数

第3鏡由来の器械偏光が望遠鏡の方向にどう依存しているかについては、既に小松修論 によってモデルが確立されている。器械偏光は望遠鏡の方位角方向には依存せず、高度軸 方向にのみ依存する。これを定式化したものが次の式である。

$$\theta = -\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sin HA}{\tan \phi \cos \delta - \sin \delta \cos HA}$$
(4.1)

$$Q = P \sin \{2(\theta - \theta_0)\} + Q_0$$
(4.2)

$$U = P \cos \{2(\theta - \theta_0)\} + U_0 \tag{4.3}$$

$$\theta_0 = \theta_{Noffset} - \theta_N + C \tag{4.4}$$

HA = 時角(観測地の子午線を通過してから経過した時間)

- $\phi = 観測地の緯度 = 34.377222^{\circ}$
- $\delta =$ 天体の Dec.
- $\theta_{Noffset} = 観測した時のナスミスローテータのオフセット$
- $\theta_N = \text{CCD}$ 上で上が北になるナスミスローテータのオフセット = -62.9°

(2011年冬期)

式 (4.1) より、ある観測地で天体を観測しているとき、 $\phi$ と $\delta$ は定数となり、 $\theta$ は時角 HA だけの関数となる。この $\theta$ を式 (4.2) や式 (4.3) に代入して Q と U を得ることができ る。なお、時角とは、天体がその観測地の子午線を通過してから地方恒星時で何時間経 過したか、つまり天体と子午線との角距離を時間単位に変換したもので、地方恒星時を LST、天体の赤経を RA とすれば HA = LST - RAとなる。

小松修士論文では、R バンドにおいて  $Q_0$  と  $U_0$  は 0 であると仮定してグラフをフィッ ティングし、各パラメータ  $P, \theta_0$  を求めた。各パラメータ値は

1 露出型の場合: P=3.93±0.07%, C=0.3±0.4°半波長板回転型 chip0 の場合: P=3.83±0.11%, C=-53.7±0.5°半波長板回転型 chip1 の場合: P=3.74±0.16%, C=79.5±0.3°

ところで、ナスミスローテータのオフセットは測定中は変化させていないので $\theta_{Noffset} - \theta_N = 0$ となる。つまり式 (4.2) と式 (4.3) は次のように表すことができる。

$$Q = P \sin \{2(\theta - C)\} + Q_0$$
(4.5)

$$U = P \cos \{2(\theta - C)\} + U_0 \tag{4.6}$$

この式に、表 4.1 に示した P,Q<sub>0</sub>,U<sub>0</sub> を用いてフィッティングする。

#### 4.4.2.2 安定性

フィッティング結果を次に示す。ただし、定数Cは次の値でフィッティングした。

1 露出型の場合 : C=54.4° 半波長板回転型 chip0 の場合 : C=1.7° 半波長板回転型 chip1 の場合 : C=136.4°

違うが、全て小松修論値に55°程度ずつ足した値となっており、装置全体の安定性が確認できた。



## 4.4.3 視野内の位置依存性

偏光は、通常は背景スカイの影響を抑えるため狭視野マスクを入れて撮像するが、GRB などの位置誤差の大きな天体の撮像では狭視野マスク内に入らない恐れがあるためマス クを入れずにでの偏光観測を行うことが多い。この場合、視野内のどの位置に天体がある かによって偏光度と偏光方位角が変化する。可能性が高い。ここでは様々な視野内位置で 無偏光標準星を撮って求めた器械偏光の値を示す。

まず、11月16日と12月14日に撮ったデータを示す。

視野内の位置の定義を図 4.25 に示す。視野中心部を 11 番とし、そこから南北方向に 340pix(約 3.28 分角) ごと、東西方向に 290pix(約 2.83 分角) ごとに天体を移動させて R バ ンドー露出型で4 枚ずつ撮像した。なお、この観測モードを選んだのは GRB モードと同 じだからである。



図 4.25: 視野内の位置の定義1

それぞれの位置でのストークスパラメータ Q/I,U/I,P,θ の値を表 4.2 に示す。星像の座 標は 4 つのうち一番左を選んだ。

		11月16日				12月1	4日		
位置	Chip,(X,Y)	Q/I(%)	U/I(%)	P(%)	$\theta(^{\circ})$	Q/I(%)	U/I(%)	P(%)	$\theta(^{\circ})$
1	1,(750,1440)	14.82	2.63	15.05	5.04	14.96	3.55	15.37	6.67
2	1,(750,1100)	11.72	3.76	12.31	8.90	11.93	4.91	12.91	11.19
3	1,(750,760)	8.91	2.75	9.33	8.58	9.16	3.88	9.95	11.47
4	1,(480,1780)	9.04	3.57	9.72	10.76	18.45	0.35	18.45	0.55
5	1,(480,1440)	2.70	1.35	3.02	13.27	2.79	2.03	3.45	17.99
6	1,(480,1100)	0.94	1.58	1.83	29.65	1.21	2.95	3.19	33.84
7	1,(480,760)	-0.86	0.96	1.29	65.95	-0.38	2.08	2.11	50.14
8	1,(480,420)	29.13	11.47	31.31	10.74	11.86	0.0054	11.86	0.013
9	1,(190,1780)	7.08	-7.43	10.26	156.80	1.02	-3.04	3.21	144.30
10	1,(190,1440)	0.50	-0.58	0.77	155.44	0.45	-0.52	0.69	155.26
11	1,(190,1100)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1,(190,760)	-0.51	-0.48	0.70	111.70	-0.32	-0.62	0.70	121.13
13	1,(190,420)	11.87	-15.75	19.73	153.50	-0.76	-2.97	3.06	127.79
14	0,(70,420)	-13.09	-29.92	32.66	123.18	-13.38	-31.23	33.98	123.41
15	0,(70,760)	-2.35	-1.24	2.66	103.92	-2.47	-1.50	2.89	105.65
16	0,(70,1100)	-1.56	-0.66	1.69	101.41	-1.84	-0.95	2.07	103.63
17	0,(70,1440)	-0.94	-1.70	1.94	120.52	-0.68	-10.36	10.38	133.11
18	0,(70,1780)	-12.26	-33.81	35.96	125.03	-11.79	-33.40	35.42	125.28
19	0,(320,760)	-4.59	-9.02	10.12	121.50	-4.57	-1.57	4.83	99.51
20	0,(320,1100)	-2.64	-8.16	8.58	126.04	-2.13	-7.72	8.00	127.30
21	0,(320,1440)	-0.46	-9.11	9.12	133.54	1.31	-5.05	5.21	127.71

表 4.2: 11 月 16 日と 12 月 14 日のデータ

この結果から、視野の中心から離れた位置(特に1,3,4,8,14,18,19,21番)では最大30%を も超える偏光度が検出されることが分かった。これはマスク無しでの撮像なので、スカイ を切り分けていないためフラット4偏光成分による段差の影響を受けているために生じて いることが判った。

なお、このデータでは全ての撮像に40分程度かかっているため、その間のストーク スパラメータの変化までは追うことができないことに注意する。どちらの観測日も時角 がおよそ+02:00~+2:40の間で撮像し、この間の視野中心でのストークスパラメータは Q/I:0.4%,U/I:0.8%程度の変動がある。

次に1月17日の結果を載せる。



図 4.26: 視野内の位置の定義 2

この日は、X,Y それぞれのより細かい依存性を求めるため、視野中心からほぼ1分(約103pix)間隔で東西南北方向の視野端付近までのデータを得た。時角はおよそ+1:34~+2:18の間で撮像し、Q/I:0.5%,U/I:0.8%程度の変動がある。表4.3に結果を示す。これは、4.4.2.2で求めた視野中心の器械偏光は補正してある。なお、位置6番は望遠鏡操作ミスのため観測できなかった。

位置	Chip,(X,Y)	Q/I(%)	U/I(%)	P(%)	$\theta(^{\circ})$
1	1,(180,1750)	-0.22	-2.80	2.80	132.74
2	1,(180,1650)	-0.48	-1.39	1.47	125.55
3	1,(180,1550)	0.14	-0.27	0.30	148.36
4	1,(180,1450)	0.035	-0.65	0.65	136.56
5	1,(180,1350)	-0.51	0.12	0.52	83.43
6	1,(180,1250)	?	?	?	?
7	1,(180,1150)	-0.43	-0.35	0.56	109.68
8	1,(180,1050)	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1,(180,950)	-0.14	0.77	0.78	50.14
10	1,(180,850)	-0.63	0.96	1.15	61.59
11	1,(180,750)	-0.82	-0.13	0.83	94.47
12	1,(180,650)	-0.73	-0.42	0.85	104.94
13	1,(180,550)	-1.19	-0.89	1.49	108.30
14	1,(180,450)	-1.48	-6.69	6.85	128.77
15	1,(880,1050)	28.70	14.56	32.18	13.45
16	1,(780,1050)	6.26	4.60	7.77	18.14
17	1,(680,1050)	6.65	3.67	7.59	14.44
18	1,(580,1050)	3.02	3.36	4.52	24.00
19	1,(480,1050)	-0.34	3.57	3.59	47.75
20	1,(410,1050)	-0.089	2.81	2.81	45.91
21	1,(290,1050)	-0.75	2.43	2.54	53.60
22	1,(40,1050)	-1.83	-0.26	1.85	94.04
23	0,(30,1120)	-2.51	1.19	2.78	77.31
24	0,(70,1120)	-2.44	-0.34	2.47	93.99
25	0,(170,1120)	-0.92	-7.12	7.18	131.33
26	0,(270,1120)	-0.94	-7.16	7.23	131.26
27	0,(370,1120)	-1.30	-3.64	3.86	125.18
28	0, (470, 1120)	-9.07	-30.47	31.79	126.71

表 4.3: 1月 17日のデータ

ここで、今回使ったフラットについて、見かけの器械偏光が生じる理由を説明する。

1月17日の結果より、視野中心と南北方向においては器械偏光は小さく、半径 r $\leq$ 5'で p<1%、r=6'でも p<1.5%に留まることがわかった。光学系は軸対称であることを考慮す ると、HOWPolの光学系内部で生じる器械偏光は直径10'の視野内で1%以下と小さいこ とが示された。

一方で、東西方向については、rが大きくなるにつれて器械偏光が増えていることが分かる。このことと、南北方向での器械偏光が小さかったことは、4 偏光成分の分離(分離方向は東西)によるフラットパターンの変化の影響によって、見かけ上器械偏光が生じて

いると考えられる。このことから、今回と同じようなフラットを用いて撮る場合は、観測 位置に応じて器械偏光を求め補正しなくてはならない。

## 4.5 考察

#### 4.5.1 誤差要因

3.4 で述べたように、一露出型から導出される器械偏光の誤差の要因の1つはプリズムの効率 K のばらつきである。このばらつき dK が大きいほど偏光度 P の誤差 dP も大きくなる。



図 4.27: 横軸がKの誤差、縦軸がPの誤差。赤がR、緑がV、青がIバンド

図 4.27 は観測期間中、半波長板回転型で観測した全データを、横軸Kの誤差、縦軸P の誤差で表したもので、赤がRバンド、緑がVバンド、青がIバンドである。この図から 正の相関があることは明らかであり、ではどの条件でdKが大きくなるのかを考察する。

図 4.28 は横軸が時角、縦軸が K の誤差、赤が chip0 側から、緑が chip1 側から得られる データのプロットである。時角依存性モデルでは、時角が 0 付近で Q,U が大きく変動す るため K の誤差も大きくなると予想されるが、この図から K の誤差は時角に依存しない ことが分かった。



図 4.28: 横軸が時角、縦軸がKの誤差。赤が chip0、緑が chip1 から得られる値。

図 4.29 は横軸が望遠鏡の方位方向角度、縦軸が K の誤差、図 4.30 は横軸が望遠鏡の高度方向角度、縦軸が K の誤差でプロットしたものである。この結果からも、望遠鏡の特定の向きによって誤差が特に大きくなるという結論には至らない。よって dK が大きくなる原因について有意な傾向は見出すことができなかった。



図 4.29: 横軸が方位角、縦軸がKの誤差

図 4.30: 横軸が高度、縦軸がKの誤差

## 4.5.2 器械偏光の新しい補正法

本研究での調査を経て、偏光撮像時に推奨されるキャリブレーション方法を考えたの で、ここで説明する。

まず、狭視野の偏光撮像では、視野中心(星像のy座標が1050-1150程度)に移動させて 撮像することを推奨する。この場合の器械偏光の補正方法は、式4.1~式4.4から求めた ストークスパラメータQ/I,U/Iをそれぞれ差し引けばよい。特にナスミスローテータのオ フセット変えてない場合は式4.5と式4.6からストークスパラメータを求めればよい。

次にマスクを用いない場合の撮像は、中心から離れるほど器械偏光の影響が大きいこと に注意する。特にGRBの残光観測では、対応天体が確認できた場合はなるべく視野中心 から3<sup>\*</sup>以内にターゲットを置いてデータを得ること、及び自動観測モードが終了した後 にCCD上の同じ座標に無偏光標準星を移動させて、そこで得たデータから器械偏光をダ イレクトに求めるのがよい。マスクを用いない観測では視野内の位置(特に東西方向)に よって、フラットフィールド補正の不完全性の影響を受けて器械偏光が大きく変化するこ とが分かったため、この方法を提案する。

## 4.6 GRB111228A

#### 4.6.1 観測

2011年12月28日の観測中にGRBアラートが起こり、GRB111228A(図4.31)に対して 自動観測モードが発動した。

そこで、今回考え出した方法を用いてキャリブレーションを行い、稀少な GRB 残光の 偏光観測データの解析を行ってみた。かなた望遠鏡での観測は BAT の trigger から 162 秒 後に開始され、全て偏光撮像モードで撮像した。GCN によれば

BAT trigger	:	UT 15:54:43
RA	=	$10h \ 00' \ 16.08''$
DEC	=	+18d 17' 52.1"
z	=	$0.7156 \pm 0.0005$

である。



図 4.31: GRB111228A

かなた望遠鏡での残光の偏光観測は次の表 4.4 に示す観測モードで、全て一露出型で撮像した。

BAT trigger からの時間 [s]	焦点マスク	観測バンド	露出時間 [s]	撮像枚数	解析枚数
200-5600	Imaging	R	30,60,300	22	9
6600-11000	NFPol	NONE	300	16	14
12000-15000	NFPol	R	300	12	3

表 4.4: GRB111228A 観測モード

200-5600s での撮像は露出時間が短い等の理由で4つの星像全てを検出できた訳ではないため、偏光の解析は22枚中4つとも検出できた9枚(2400-5600s)のみで行った。ただし、200-800sの画像でも星像4つのうち片側2つは見えているため測光は可能である。また、一露出型での撮像は片側2つでQまたはUを求めることができるため、この時間に撮れたデータで200-800s での偏光度の lower limit も決めることができる。

## 4.6.2 解析

まず、Swift での光度曲線を図 4.32 に示す。



図 4.32: GRB111228A Swift 光度曲線。赤がWTmode で緑がPCmode。

横軸が BAT trigger が起こってからの時間 [s] で、縦軸が Flux[erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>] である。 350~6000s では減光が異様に緩やかであることが分かる。

これと比較して、かなたでの光度曲線を図 4.33 に示す。これから、可視の光度曲線も X線と類似し、200 杪付近から 5000 杪付近まで非常に緩やかな減光を示した後、急激な 減光へと以降したことが分る。



図 4.33: GRB111228A かなた光度曲線

次に偏光データを解析する。

4.5.2 で述べた通り、位置 (特に横方向)によって器械偏光が大きく変化するので、CCD 上の同じ座標に無偏光標準星を移動させて器械偏光の値を後日改めて取得した。その結果 を表 4.5 に載せる。この器械偏光の値を差し引いたデータで以降の解析を行う。

BAT trigger からの時間 [s]	Chip,(X,Y)	Q/I(%)	U/I(%)	P(%)	$ heta(^\circ)$
200-600	1,(210,1110)	-3.06	-1.47	3.39	102.87
2400-4000	1,(570,1120)	-10.27	-3.07	10.72	98.32
4600-5600	1,(450,1120)	-14.16	-1.20	14.21	92.42

表 4.5: GRB 撮像の CCD 上の位置により生じる器械偏光 (通常の撮像モード)

GRB 残光の偏光度の時間変化は図 4.34 の通りである。また、QU の時間変化は図 4.35 の通りである。偏光度は  $P_{real} = \sqrt{P^2 - (\sigma_p)^2}$  として求めた (Serkowski 1958; Patat and Romaniello 2006)。また、それに伴って、図 4.35 と QU 平面にプロットした図 4.36 では、Q,U それぞれの値は  $P_{real}/P$  倍したものである。これを見ると、データ点は半径 10%の円内に留まっており、10%を超える大きな偏光は示さなかったようである。



図 4.34: GRB111228A 偏光度時間変化



図 4.35: GRB111228A QU 時間変化



図 4.36: GRB111228A QU平面

# 第5章 まとめと今後

東広島天文台で開発された一露出型偏光撮像器 HOWPol は、ナスミス焦点に取り付け られているために偏光撮像時のキャリブレーション方法が確立していない。

前任者小松氏によって時角依存性モデル・器械消偏光・方位角原点の調査が行われたが、 いずれも調査した観測バンドはRバンドのみであった。私はそれに続いてさらに一般的 な観測に適用できるように、Rバンド以外にもVバンドとIバンドでの調査、視野内の位 置に依存する器械偏光の調査をした。

このキャリブレーションをするために無偏光標準星を約2ヶ月間観測した。狭視野マスク の視野中心での器械偏光はRバンド:一露出型で3.53%、半波長板回転型 chip0 で3.65%、 chip1 で3.94%、Iバンド:一露出型で4.36%、半分波長板回転型 chip0 で4.27%、chip1 で 4.48%、Vバンド:一露出型で2.56%、半波長板回転型 chip0 で2.74%、chip1 で 3.11%の偏 光度が生じることが分かった(表)。また、QU 平面上に観測データをプロットして QU 平 面上での原点を見積もり、これらから時角依存性モデルの再現性を確認した。マスクを 入れない通常の撮像モードでの偏光撮像では、中心から離れた位置では、特に横方向に 30%程度という大きな器械偏光を生じることが分かった。これは中心付近ではフラットが 4枚重なっているが、視野の端ではこれが1枚や2枚になっているためである。

さらに観測中、GRB111228Aにおいて自動観測モードが作動し、200-15000sの残光デー タが取得できた。特に2400-13000sでは偏光データを得ることにも成功し、非常に貴重な 観測結果が得られたといえる。

参考文献

- [1] 小松 智之 2010 年度 修士論文 「かなた望遠鏡用 1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の 観測システムの開発と偏光キャリブレーション」 (広島大学)
- [2] 田中 祐行 2008 年度 修士論文 「かなた望遠鏡用1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の 開発と性能評価」(広島大学)
- [3] 千代延 真吾 2006 年度 修士論文 「かなた望遠鏡用1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の筐体及び駆動機構の開発」 (広島大学)
- [4] 上原 岳士 2011 年度 博士論文 「Multi-wavelength Study of Gamma-Ray Burst Afterglows」(広島大学)
- [5] 上原 岳士 2008 年度 修士論文 「かなた望遠鏡を用いた X 線フレアを伴うガンマ線 バースト残光の時間変動スペクトルの研究」(広島大学)
- [6] 上原 岳士 2006 年度 卒業論文 「ガンマ線バーストの多波長即時解析システムの構築 と GRB061121 の観測」(広島大学)
- [7] 「LINEAR POLARIZATION PROPER MOTION IN THE AFTRGLOW OF BEAMED GAMMA-RAY BURSTS」 1999 RE'EM SARI et al