# 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

広島大学大学院理学研究科 物理科学専攻博士課程前期2年 M075195 田中祐行 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 主査:山下卓也 副査:石川健一

2009年2月10日

#### 概要

かなた望遠鏡では、ガンマ線バーストのような突発的で激しい時間変動を示す天体の即時観測 による高エネルギー宇宙現象の研究を推進している。GRB は、発生後すぐに暗くなり観測が困難 になる。かなた望遠鏡は、GRB 発生のアラートに即座に反応し 50 秒以内で指向可能な駆動性能 を持っている。これを利用して GRB の初期の偏光観測を行い、その時間変動から GRB ジェット の磁場構造を解明する目的で開発されたのが1露出型偏光撮像装置 HOWPol である。通常の偏光 観測では、半波長板とウォラストンプリズムを用いており、1 組の直線偏光データを得るために二 回以上の露出が必要になる。HOWPol ではダブルウォラストンプリズムという素子を使用するこ とで、一回の露出で4方位の偏光データを得ることができる。これにより同時性の保たれた偏光 データセットを得ることができ、GRB の偏光の変動を追うことができる。

私は本研究において HOWPolの筐体及び駆動機構や制御系の組み上げ、制御ソフトウエアの開 ・発、ファーストライト観測を行い、それに引き続く試験観測を通じて装置の性能評価を主導して 行った。筐体および駆動機構の組み立ては、温度変化による伸縮や重力方向などにによらずスムー ズに動くよう注意して行った。機構同士が干渉するなどの不具合が見つかった箇所は、追加工し て組み立てた。駆動機構の配線作業および制御ソフトウエアの開発が完了した後、望遠鏡に取り 付けて調整を行い、ファーストライト観測を行った。検出器は浜松ホトニクスと国立天文台で新 しく開発された赤外域の量子効率が大幅に改善された完全空乏型 CCD を用いている。-100 制御 下での読み出しノイズは約5 e-、電荷変換効率は 2.19 e-/ADU であった。リニアリティもカウン ト 50000ADU 以下でずれが1%以下と非常に良い性能であることが確認された。光学系による歪 曲収差はほぼ設計どおりであり、2次式による補正のみで15分角 視野全面にわたり0.5ピクセ ル以下の精度で補正が可能である。また検出効率もほぼ設計どおりで、100秒露出したときの限界 等級 (測光精度 0.02 等) は、R バンドで 18.5 等、V バンドで 18.0 等などとなっている。HOWPol はナスミス焦点に取り付けているので、第3鏡での90°反射による数%の器械偏光が発生する。 GRB の偏光観測を行う場合この器械偏光は無視することができず、精度よく求めて補正する必要 がある。無偏光標準星の観測で得られた HOWPolの器械偏光は約4%あり望遠鏡位置で変化する ものの、第3鏡での反射による依存性のみでほぼ説明できる。これにより、任意の天体に対して 0.3%以下の精度での偏光観測ができることが確認され、通常観測にも問題なく利用できることが わかった。

# 目 次

第1章	イントロダクション	6
1.1	東広島天文台とかなた望遠鏡・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1.2	ガンマ線バースト	7
	1.2.1 ガンマ線バーストの偏光	7
1.3	本研究の目的	8
第2章	1 露出型偏光撮像装置 HOWPol	9
2.1	観測モードと要求仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
2.2	表置筐体	10
2.3	光学系	10
	2.3.1 再結合光学系	10
	2.3.2 焦点マスク	12
	2.3.3 較正用半波長板	12
	2.3.4 シングルウォラストンプリズム	12
	2.3.5 フィルター	14
	2.3.6 光学瞳	14
	2.3.7 ダブルウォラストンプリズム	15
	2.3.8 グリズム	18
	2.3.9 瞳確認用レンズ	20
2.4	検出器	20
	2.4.1 完全空乏型 CCD	20
	2.4.2 デュワーと冷却機構	21
第3章	駆動制御系の立ち上げ	<b>22</b>
3.1	駆動機構の構成	22
	3.1.1 焦点マスクターレット	22
	3.1.2 偏光較正光学系用 X ステージ	23
	3.1.3 フィルターターレット	24
	3.1.4 シャッター	24
	3.1.5 プリズム用 XY ステージ	25
	3.1.6 検出器ステージ	25
3.2	駆動機構の立ち上げ....................................	25
3.3	制御系の構成	29
3.4	制御ソフトウエアの開発	30
<b>弗</b> 4草		32
4.1		32
4.2	検出器の評価	32

	4.2.1 読み出しノイズと電荷変換効率	33		
	4.2.2 リニアリティ	33		
4.3	光学性能	34		
	4.3.1 視野位置とローテータ回転軸	34		
	4.3.2 フラットフィールド	36		
	4.3.3 歪曲収差	36		
4.4	撮像モード・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37		
	4.4.1 <b>結像性能</b>	37		
	4.4.2 測光較正と変換式	38		
	4.4.3 装置効率と限界等級	40		
4.5	偏光撮像モード	40		
	4.5.1 広視野モードと狭視野モード	40		
	4.5.2 器械偏光	42		
	4.5.3 器械消偏光	44		
	4.5.4 偏光較正法と観測性能	44		
第5章	考察とまとめ	46		
5.1	設計目標の達成度....................................	46		
5.2	期待されるガンマ線バースト即時観測の頻度と観測精度・・・・・・・・・・・・・・・	46		
5.3	まとめ	47		
Appen	dix. A	49		
Appen	Appendix. B 5			

# 図目次

1.1	東広島天文台
1.2	かなた望遠鏡・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.3	ガンマ線バースト想像図 (2009 上原) 7
2.1	装置全体図
2.2	再結像光学系概観図
2.3	<b>狭視野偏光モード用マスク</b>
2.4	広視野偏光モード用マスク
2.5	シングルウォラストンプリズムによる常光・異常光分割の図 13
2.6	フィルター透過曲線
2.7	<b>絞り部概観図</b>
2.8	ダブルウォラストンプリズム16
2.9	偏光撮像モードでの視野
2.10	広視野用ダブルウォラストンプリズム17
2.11	M74を広視野用ダブルウォラストンプリズムを用いて得た画像。 17
2.12	スポットダイアグラム (広視野) 18
2.13	狭視野用ダブルウォラストンプリズム
2.14	狭視野用プリズムによる取得画像
2.15	スポットダイアグラム (狭視野)19
2.16	VPH グリズム 20
2.17	量子効率
2.18	デュワーに取り付けられた CCD。真ん中のギャップは 1mm 21
3.1	センサーの写真及び位置決め精度のグラフ
3.2	マスクターレット・プリロード機構
3.3	マスクターレット概観図
3.4	偏光較正光学用 X ステージ
3.5	フィルターターレット慨観図24
3.6	プリズム用ステージ概観図
3.7	フィルターターレット
3.8	プリズム用 XY ステージ
3.9	マスクターレット、トーラス、偏光較正光学用 X ステージ
3.10	<b>筐体、プリズム用</b> XY <b>ステージ、光学瞳</b>
3.11	XY ステージの移動可能な領域
3.12	XY ステージとナスミスローテータの回転角の関係
3.13	検出器用ステージ
3.14	HOWPol で使用したモータドライバとコントローラボード 29
3.15	配線済みのモータドライバとコントローラボード

3.16	<b>取り付け作業中の</b> HOWPol	30
3.17	<b>取り付けの完了した</b> HOWPol	30
3.18	HOWPol 制御用に開発したソフトウエア	31
4.1	オーバースキャン領域	32
4.2	カウント 分散の関係グラフ	33
4.3	リニアリティの測定結果	34
4.4	視野の方角	35
4.5	ローテータの回転中心	35
4.6	M6 を撮像した画像	36
4.7	格子状マスク	37
4.8	オリオン星雲 (V,R,Z バンド三色合成)	38
4.9		38
4.10		38
4.11	限界等級 B バンド	41
4.12	限界等級 V バンド	41
4.13	限界等級 R バンド	41
4.14	限界等級 I バンド	41
4.15	Q-Uの関係のグラフ	43
4.16	時角 $H$ と $Q,U$ のグラフ	45
A.1	HOWPol <b>制御系ブロック図</b>	49
B.1	制御ケーブル設計図1....................................	50
B.2	制御ケーブル設計図 2	51
B.3	制御ケーブル設計図3	52

# 表目次

2.1	基本仕様 (設計値)	9
2.2	観測モードと光学素子	9
2.3	光学系設計仕様	11
2.4	半波長板仕様表	13
2.5	フィルター仕様表....................................	14
3.1	制御系設計表	29
4.1	各領域のピクセル位置	32
4.2	標準星の明るさ (カタログ値)	39
4.3	標準星の実測値とカタログ値との差............................	39
4.4	限界等級 (BVR バンド 100 秒露出、I バンド 50 秒露出)	40
4.5	観測した無偏光標準星	42
4.6	HD18803	43
5.1	設計目標の達成度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46

# 第1章 イントロダクション

### 1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡

かなた望遠鏡は広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台に設置された、口径 1.5 mの可視 赤外望遠鏡である。もともとは「赤外シミュレータ」という名前で国立天文台三鷹構内で使用さ れ、国立天文台ハワイ観測所にあるすばる望遠鏡で使用する観測装置の開発・評価に役立ってき た。しかし、すばる望遠鏡の第一期観測装置開発がすべて終了し、需要が減ってきたことも考慮さ れ、本格的な天文・宇宙研究へ有効に活用する計画を提案した広島大学へ 2004 年に移管された。 東広島天文台は、2003 年に大学近郊において行われたシーイング調査において、全国的に見ても トップレベルの観測に適した環境を有した福成寺付近の山頂に建設された。広島大学東広島キャ ンパスから車で約 20 分の位置にあり、アクセスも良い。



図 1.1: 東広島天文台



図 1.2: かなた望遠鏡

宇宙科学センターではかなた望遠鏡を用いて主としてガンマ線バーストなどの激しく変動する 天体の即時観測による高エネルギー宇宙現象の研究を推進している。ガンマ線バーストは発生後 すぐに劇的に光度が減少し、観測が困難になるため、発生後にできるだけ早く望遠鏡を向け観測 を開始する必要がある。かなた望遠鏡は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 秒以内で試行可能な駆動性能を実現している。かなた望遠鏡よ りも高い駆動性能を持つ望遠鏡は世界にも多数存在するが、その多くが 0.5m 以下の小口径望遠鏡 であり、かなた望遠鏡の駆動性能は口径 1.5m クラスの望遠鏡では世界最高水準である。小口径望 遠鏡によるガンマ線バーストの即時観測も行われているが、口径が小さいために十分な光量を集 めることができない。そのため、十分な光量を必要とする偏光観測や分光観測を行うことは難し く、ガンマ線バーストの即時観測は測光モードしか行えていないのが現状である。かなた望遠鏡 は他のガンマ線バースト専用望遠鏡に比べて大きな口径を有しており、可視で 14~16 等の明るい ガンマ線バーストに関しては、測光観測以外に偏光観測が可能な光量を集めることができる。

またかなた望遠鏡は、ガンマ線バースト探索衛星 Swift と連携しており、Swift 衛星がガンマ線 バーストを検出した際にインターネット (GCN) を通する発したアラートを受信して、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 (上原 2007)。さら に、2008年にNASAから打ち上げられ、広島大学も開発に貢献したガンマ線衛星 Fermi とも連携 した観測を推進しており、ガンマ線バーストの即時観測体制は強化されつつある。以上の高い駆 動性能、即時観測システムなどの利点を生かして、東広島天文台では、偏光即時観測の可能な装 置を開発し、ガンマ線バーストなどの偏光を観測することで高エネルギー宇宙現象を解明しよう としている。本研究で開発してきた1露出型偏光撮像装置 HOWPol がその装置である。

# 1.2 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは 0.1 秒から数百秒の間、強力なガンマ線が放出される宇宙最大規模の爆発 現象である。ガンマ線バーストではガンマ線のほかに X 線、可視光、電波などのより長い波長域 の光(残光)も付随して見られる。バーストは宇宙論的遠方で発生していることが分かっているが、 そのような遠方で起きているとすると、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 とになり、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完全には解決さ れていない。この原因は、ガンマ線バーストが予測不可能な突発天体であり、バーストの持続時間 が極めて短いところにある。そのため観測衛星によってバーストが捕えられても、地上の観測所 が可視光による残光の観測を始めるころには、対応する天体は見つからなくなってしまう。この 状態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観測衛星 Swift である。ガ ンマ線バーストが発生すると、Swift 衛星は即座にガンマ線の飛来方向を割り出し、その座標など の情報をインターネットを通じて地上に配信している。この即時アラートを受けることによって、 全世界の観測所でガンマ線バースト発生数十秒後から観測を開始することが可能になった。東広 島天文台も、この即時アラートをソケット通信で受信しており、バースト直後の残光の可視光観 測が可能になっている。

ガンマ線バースト起源の現在の最も有力な説は、大質量の恒星が一生を終えるときに爆発を起 こし、超高速のジェットを放出し、そのジェットが地球に向いているときに、ガンマ線バーストと して観測されるのではないかという説である。



図 1.3: ガンマ線バースト想像図 (2009 上原)

#### 1.2.1 ガンマ線バーストの偏光

方向の揃った磁場が存在すると、シンクロトロン放射により偏光が放出される。ガンマ線バー ストの偏光成分を観測することでジェットの磁場構造や星周構造の情報が得られる可能性がある。 現在のガンマ線バーストの可視光での観測は、主に小口径望遠鏡によって行われている。その結 果の速報がGCN へ流さ、比較的明るい残光を示すガンマ線バーストが見つかった場合には、大型の望遠鏡でフォローアップ観測が行われる場合もある。しかし小口径望遠鏡では十分な光量を集められないため、初期の残光に対してはこれまで測光観測しか行えない状況で、偏光観測は遅々として行われていない。かなた望遠鏡の駆動力によりバースト発生後即座に天体に指向し、ガンマ線バースト発生後、数分~数十分といった初期残光の偏光をHOWPolによって精度良く観測することで、これまで分らなかったガンマ線バースト現象の解明が期待される。

## **1.3**本研究の目的

上で述べたように、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、かなた望遠鏡の高い駆動能力を生かして即座に観測を開始す る1露出型偏光撮像装置 HOWPol の開発を進めてきた。

本研究の目的は、1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の駆動系および制御系を立ち上げ、通常観測 を行えるようにすることである。すなわち、前任者により設計・製作まで進められていた HOWPol の筐体及び駆動機構や制御系を組み上げ、ファーストライト観測を行うとともに、それに引き続 く試験観測を通じて装置の性能評価を行い、ガンマ線バーストの観測研究に十分な性能を備えて いることを確認することが目標となる。

# 第2章 1露出型偏光撮像装置HOWPol

# 2.1 観測モードと要求仕様

HOWPolの観測モードには、偏光撮像モード、偏光分光モード、撮像モードがある。偏光撮像 モードでは、1回の露出で直線偏光パラメータを得るためにダブルウォラストンプリズムが用い られる。求めるサイエンスに応じて広視野用と狭視野用を使い分ける。広視野用は主にガンマ線 バーストのような位置誤差の大きい未同定天体に対して用いる。逆に狭視野用は位置のはっきり 分かっている天体に対して用いる。偏光分光モードでは半波長板、シングルウォラストンプリズ ム、グリズムが用いられる。グリズムをダブルウォラストンプリズムと同じ機構に載せるので、半 波長板とシングルウォラストンプリズムは別の独立した機構に載せる。それぞれの HOWPol で行 うサイエンスから要求される仕様は表 2.1 のとおりである。また、観測モードと使用する光学素子 の表を 2.2 に記載する。

表	2.1:	基本仕様	(設計値)
---	------	------	-------

波長域	可視 450nm - 1100nm
	│ 撮像:15 <b>分</b>
	広視野偏光撮像:7 分 × 7 分
観測モードと視野	│ 狭視野偏光撮像:15 分 × 1 分
	分光: 2.3 秒×15 分
	偏光分光:2.3 秒 × 1 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 (474/mm,R=610), 高分散 (1579/mm,R=2300)
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 $: R=16.0 mag(10$ 分露出, 偏光誤差 $0.2\%)$

表 2.2: 観測モードと光学素子

観測モード	マスク	フィルター	プリズム/グリズム
撮像	15 <b>分</b>	B, V, R, I, z'+Y	なし
偏光撮像	7分×7分	B, V, R, I, $z'+Y$ ,	広視野ダブルウォラストンプリズム
	15 分×1 分	偏光フィルター (青、赤)	狭視野ダブルウォラストンプリズム
偏光分光	2.3 秒幅×1分長	B, V, R, I, z'+Y	シングルウォラストンプリズム
			低分散グリズム、高分散グリズム
分光	2.3 秒幅×15 分長	オーダーカットフィルター	低分散グリズム、高分散グリズム

## 2.2 装置筐体

図 2.1 は装置全体の断面図である。図の最も左側の板が望遠鏡に装着される天板である。天板には、焦点マスクを交換する機構が置かれている。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、フィルターターレット 2ヶ、プリズム用 XY ステージの光学素子交換機構が収められている。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いる。図の赤色の部分が各種光学素子交換機構である。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。青い部分が検出器デュワーであり、デュワーは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。装置の全長は約 1m、重さが約200kg である。



#### 図 2.1: 装置全体図

### 2.3 光学系

#### 2.3.1 再結合光学系

この装置は、ウォラストンプリズムの要請から瞳像の収差が極めて少ない再結像光学系を採用 している。この要請を満たす再結像光学系の設計は自前では困難なため、(株)レンズ屋に設計を 依頼した。要求される光学系仕様とレンズ屋でされた設計値を表 2.4 に載せる。また光学系の設計 概観図を図 2.2 に載せる。

図 2.2 の左側が望遠鏡側、右側が検出器側になっている。図では左端が望遠鏡焦点となってお り、焦点マスクが入る。一般に、可視赤外の分光装置は2種類のレンズ群で構成され、望遠鏡から 入ってきた光は、コリメータレンズ群(図の 群、 群)によって平行になる。そして、平行にした 光をカメラレンズ群(図の 群、 群)によって再結合させる。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、半波長板、シャッター、ダブルウォラストンプリズム、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。



図 2.2: 再結像光学系概観図

# 表 2.3: 光学系設計仕様

11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日	
項口 安小江派 政府區	
望遠鏡焦点から結像面までの距離 780mm 以下 748.63mm	
合成 F 値 6.1 ~ 9.15(最適は 6.9) 6.9	
平行光部 175mm 以上 266.1mm	
<b>瞳像直径</b> 33mm 以内 23.9mm	
400 < < 450nm 透過率     30%以上     25%以上	
450 < < 1100nm 透過率 45%以上 38%以上	
カメラレンズ焦点距離 150~250mm 程度 148mm	
80%Encircled Energy(450 < < 1100nm) 0.6 秒角以下 0.6 秒角 (視野全面 プリズム無い)	時)
<b>歪曲収差</b> 3%以内 + 2.4%	
視野 7.5arcsec2 に対する 500 < < 1100nm で 52 µ m	
瞳像の収差                  瞳像の 80%Encircled 直径   600 < 1000nm で 32 µ m	
が 30 µ m 以下	

#### 2.3.2 焦点マスク

望遠鏡の焦点位置で、それぞれの観測モードに応じた焦点マスクを置く。焦点マスクには、撮像用マスク(15分)、狭視野偏光マスク(15分×1分)、広視野偏光マスク(7分×7分)、分光用スリット(2.3 ×1)、歪曲収差の補正などに使用する格子状に穴の開いたマスク(50µm孔、5×5個、15mm間隔)がある。これらのマスクは主に金属(アルミニウムやリン青銅)で出来ているが、偏光分光用スリットだけはフッ素雲母で出来ている。これは導電性によって発生する器械偏光の悪影響を避けるためである。





図 2.3: 狭視野偏光モード用マスク

図 2.4: 広視野偏光モード用マスク

#### 2.3.3 較正用半波長板

半波長板とは直行する2つの偏光成分に対して、片方の偏光成分のみ位相を半波長分だけずら す複屈折素子である。半波長板を回転させると、偏光方位角を2回転させることができる。偏 光観測において、1組の直線偏光パラメータ(I,Q,U)を取得するためには、少なくとも4方位の偏 光の情報が必要となる。そこで通常の偏光観測ではウォラストンプリズムと組み合わせて、半波 長板を半波長板を0、22.5、45、67.5°と回転させることで、0、45、90、135°の4方位の偏光の 情報を2セット得る方法がとられる。

HOWPolにおいて半波長板は、ダブルウォラストンプリズムでの偏光観測の較正用として使用 している。また、将来的に偏光分光観測にも使用する予定である。本装置の半波長板は、ウクラ イナの Astropribor 社製の物を用いた。同材質層で貼り合わせることによって広帯域に渡って半波 長になるよう設計されており、高周波数リップルのない新しいタイプの波長板である。シングル ウォラストンプリズムの出し入れのためのXステージに搭載され、さらに 回転ステージに載せ られていて回転させることが出来る。

### 2.3.4 シングルウォラストンプリズム

ウォラストンプリズムは、方解石などの複屈折性を持つ結晶のプリズムを2つないし3つを結晶 軸をずらして接合させた偏光プリズムである。ウォラストンプリズムに垂直に入射した光は、そ の偏光の方向によってプリズム内での屈折率が違うため常光・異常光と呼ばれる互いに直行した 方向に偏光した2つの光に分割される。

本装置では、半波長板の回転と組み合わせることで、ダブルウォラストンプリズムによる偏光 観測の較正に用いる。また、将来的にグリズムが準備できしだい偏光分光観測に用いることも可 能である。シングルウォラストンプリズムでの観測は複数回の露出が必要になるため、時間分解

項目	内容	
材質	Birefringence polymer plate stack	
台材質	Fine annealed optical glass	
波長遅延	$\lambda/2$	
波長遅延精度	$\pm\lambda/100$	
面精度	$40 \cdot 20$ scratch - dig	
光軸に対する偏差	< 5  arcsec	
許容温度	$-20 \sim +50$	
Antireflection	Broadband, multilayer coating	
Coating	R < 1% per surface	
直径	$50 \mathrm{mm}$	
実効直径	45  mm	

表 2.4: 半波長板仕様表



図 2.5: シングルウォラストンプリズムによる常光・異常光分割の図

能が悪くなり同時性が失われるが、偏光測定法が確立されており、精度も見込むことができる。この結晶には分離角の色依存性が少ない MgF2 を用い、3素子型のものを採用した。半波長板と同じ X ステージに乗っており、光路中に出し入れが出来るようになっている。

#### 2.3.5 フィルター

天体からやってくる光は様々な波長の光が混ざっている。そこで観測する光の波長を制限する ためにフィルターを使用する。HOWPolでは表 2.2 のような構成で B,V,R,I,z'+Y の5 種類のバン ドのフィルターを使用する。作製は (株)朝日分光に依頼した。そのほかに、減光フィルターや偏 光フィルターも使用している。減光フィルターは、入ってきた光を一定の減光率で暗くするもので ある。露出時間を限界まで短くしてもカウントが飽和してしまうような明るい天体に対して使用 して、露出時間を長くすることができる。使用している減光フィルターの減光率は、1/100(ND2) である。偏光フィルターはある方向に振動する光だけを通すことで 100%偏光にするフィルターで ある。HOWPolには 2 種類の偏光フィルター (青・赤)を使用する。青は 700nm より短い波長の 光を 100%偏光にする。赤は 600-900nm の波長の光を 100%偏光にする。それぞれ対応する波長域 以外の光も一部通過させるが、偏光度は悪くなる。

光束および器械の制約から、これらのフィルターの直径は 60mm で厚さは 7mm 以内となって いる。平行光中で用いるため、フィルターどうしでの多重反射によるゴーストを回避する目的で 10°傾けて取り付けている。フィルターの仕様を表 2.2 に、フィルターの透過率 波長依存性のグ ラフを図 2.6 に示す。

バンド	フィルター仕様
В	LWP*石英 (2mm) + BG40(2mm) + SWP-2*石英 (3mm)*SWP-1
V	AR*GG495(2mm) + 石英 (2mm)*SWP-2 + 石英 (3mm)*SWP-1
$\mathbf{R}$	AR*OG590(3mm) + 石英 (4mm)*SWP
Ι	LWP*石英 $(2.5 \text{mm}) + \text{RG610}(2 \text{mm}) + $ 石英 $(2.5 \text{mm})$ *SWP
z'+Y	LWP*石英 $(2.5 \text{mm})$ + RG695 $(2 \text{mm})$ + 石英 $(2.5 \text{mm})$ *SWP
偏光 (青)	400-700nm
偏光 (赤)	600-900 nm
ND2	可視域透過率 1%

表 2.5: フィルター仕様表

#### 2.3.6 光学瞳

光学瞳は、装置内部の迷光が検出器に入らないように瞳面に設置する。主鏡はその外円に行く に従い、理想曲線とのずれが生じており、必ずしも理想の曲率になっているわけではない。このた めに光路がずれて、光束がわずかに膨らむ。この誤差が乱反射を起こし、結像性能を低下させる 可能性がある。また、主鏡から HOWPol 検出器までの光路を通らずに直接やってくる光もある。 それらの光を遮断し結像性能を向上させるために光学瞳を置く。

図 2.2 の瞳の位置での光束の直径は設計上 23.9 と計算されているため、光学瞳のしぼりもこれと同じ 23.9 に設計した。この光学瞳を瞳面での望遠鏡の主鏡像に精度よく合わせることで余分な光りを除くことができる。必要とされる精度は、0.05mm で瞳面における収差等による光束縁



図 2.6: フィルター透過曲線

のボケの半分程度の大きさである。この調整を容易に行えるように、手動式の XY ステージに載せている。



図 2.7: 絞**り**部概観図

## 2.3.7 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は、二つのウォラストンプリズムを光学軸を45°回転させて結合 させたものである。プリズムの上面には適当なウェッジ角を与えプリズムから出てきた光が干渉し ないようにしている。このプリズムは瞳像をちょうど半分に分割するように瞳像の位置に置かれ、 入射光を0、45、90、135°の4方向の偏光成分に分割することができる(図2.8)。一般的な半波長 板とウォラストンプリズムの組み合わせでの偏光観測は、半波長板を回転させながら、2回以上の 露出が必要になり1組の直線偏光パラメータを得るために時間がかかってしまい、さらに測定デー タの同時性が失われる。そこで HOWPol では、Oliva(1997)が考案したウェッジ付きダブルウォラ ストンプリズムを使用することで、1回の露出での偏光データを取得できるようにする。これによ り同時性の保たれた偏光データを取得でき、時間変動の激しい天体の偏光観測が可能になる。



#### 図 2.8: ダブルウォラストンプリズム

ストークスパラメータ

天体の偏光情報はストークスパラメータを用いて表す。入射した光のストークスパラメータは、 I、Q/I、U/I は次の式で表せられる。

$$\begin{split} &I=i(0)+i(90)=i(45)+i(135),\\ &\frac{Q}{I}=\frac{i(0)-i(90)}{i(0)+i(90)},\\ &\frac{U}{I}=\frac{i(45)-i(135)}{i(45)+i(135)}, \end{split}$$

ここで、i()は の向きに偏光した光の強度である。実測においては、i()は光のプリズムの 中での効率 k を用いて、k()i()に置き換えてストークスパラメータを求めなければならない。 この k は半波長板とシングルウォラストンプリズムを用いた較正データから求めることができる。 また、上記のストークスパラメータを使ってある天体の偏光度や偏光方位角を求めることができ る。P が偏光度、 が偏光方位角である。

$$\begin{split} P &= \sqrt{(\frac{Q}{I})^2 + (\frac{U}{I})^2} \\ &= \frac{1}{2}tan^{-1}(\frac{U}{Q}), \end{split}$$

要求されるサイエンスにより、広視野用と狭視野用の2種類のダブルウォラストンプリズムを 搭載している。図2.9は各ウォラストンプリズムを使用して偏光撮像したときの視野である。赤の 視野が広視野用のプリズム、青が狭視野用のプリズム、緑がシングルウォラストンプリズムを使 用したときの視野である。

広視野用ダブルウォラストンプリズム

広視野型のダブルウォラストンプリズム (図 2.10) は、ガンマ線バーストの初期残光のような 位置の誤差が3 程度の未同定天体をカバーするように7×7分角の視野を持つようにに設計さ れた。広視野型では正方形の視野を2×2 に並べるために大きな分離角が必要になる。そこで  $|n_e - n_o| > 0.15$ の大きな複屈折をもっている方解石 ( $CaCO_3$ )を使用したプリズムの作成を(株) 日東光器に依頼した。図 2.11 はダブルウォラストンプリズムを用いて撮られた画像である。



図 2.9: 偏光撮像モードでの視野





図 2.10: 広視野用ダブルウォラストンプリズム

写真はHOWPolに使用されている広視野用ダブルウォ ラストンプリズムである。寸法は40 × 40 × 28.8(高図 2.11: M74 を広視野用ダブルウォラストンプ さ)mm である。像の歪みを減らすために半分のプリ リズムを用いて得た画像。 ズムあたり3つの方解石を接合して作られている。 分離角が大きいウォラストンプリズムは、複屈折性の色依存性による色収差の大きさが欠点になる。図 2.14 から 8000 ~10000 の点光源の像が CCD 上で約 250  $\mu$  m(=5)伸びているのがわかる。どの天体に対しても低分散 ( $\lambda/\Delta\lambda \simeq 20-40$ )なイメージを得る。したがって広視野型のダブルウォラストンプリズムは、ガンマ線バーストの初期残光のような大きな位置誤差 ( $\simeq 0.3$  ~3)のある点光源にだけ利用する。なおこのプリズムは結晶中に低温下の利用によるヒビが入ったため、2009 年 1 月現在は利用を見合わせている。



図 2.12: スポットダイアグラム (広視野)

広視野用プリズムの片方のプリズムによって作られた視野の五か所での常光のスポットダイアグラムであ る。青が 8000 、緑が 9000 、赤が 10000 に対応する。5 つの正方形の大きさはそれぞれ 400 × 400 µ m である。

#### 狭視野用ダブルウォラストンプリズム

HOWPolのメインターゲットはガンマ線バーストの初期残光であるが、その期待される頻度は ーヵ月に一回程度である。そこで位置のはっきりと分かっている天体に対して、より精度の高い 偏光観測も行えるように、狭視野型のダブルウォラストンプリズムを作成した(図 2.13)。この素 子では短冊型の狭い視野にして分離角を小さくする代わりに、1 µ m 未満の非常に低い色収差に して像の伸びを出来る限り抑えた。さらに色収差を最小にするために石英ガラスのウェッジが導入 されている。このプリズムは反射星雲や彗星のようなある程度広がった天体にも使用できる。作 製は光学技研社に依頼した。図 2.14 に狭視野用ダブルウォラストンプリズムを用いて得られた画 像を示す。

2.3.8 グリズム

グリズムとは、回折格子 (グレーティング) とプリズムを組み合わせた分散素子で、HOWPol で は偏光分光観測に用いる。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。HOWPol では VPH グレーティングを 2 つのプリズムで挟んだ VPH グリズムを 2 種類使用する。低分散グ リズム ( $\lambda/\Delta\lambda \simeq 600$ ) には 474mm<sup>-1</sup> の VPH グレーティングを二つの BK7 プリズムで挟んだも のを使用する。中分散 ( $\lambda/\Delta\lambda \simeq 2300$ ) には 1579mm<sup>-1</sup> の VPH グレーティングを二つの ZnSe プ





図 2.13: 狭視野用ダブルウォラストンプリズム

図 2.14: 狭視野用プリズムによる取得画像

写真は狭視野用ダブルウォラストンプリズムである。 寸法は  $42 \times 42 \times 30.8$ (高さ)mm である。半分のプリ 狭視野用マスク及びダブルウォラストンプリズムを用 ズムあたり MgF2 を 3 素子接合して作られており、石 いて得られた画像である。天体の光が 4 つに分割され 英ガラスのウェッジつきである。 ているのがわかる。視野は 14.5 × 1 と 6.3 × 1



図 2.15: スポットダイアグラム (狭視野)

狭視野用プリズムの片方のプリズムによって作られた視野の五か所での常光のスポットダイアグラムである。青が 4500 、緑が 7500 、赤が 10500 に対応する。5 つの正方形の大きさはそれぞれ 150 × 150 μ m である。広視野型より広い波長域でも収差による像の伸びがかなり小さくなることがわかる。

リズムで挟んだものを使用する。どちらも頂角は 20°に設計されている。図は SolidWorks による CG である。グリズムは 2009 年 1 月現在はまだ作製されていない。2009 年秋頃に搭載予定である。



図 2.16: VPH グリズム

#### 2.3.9 瞳確認用レンズ

瞳が理想的な位置にあるか確認し、調整をするために瞳確認用レンズを使用する。瞳確認用レ ンズは、このレンズの焦点の位置に瞳面が来るように設置する。そうすることで、瞳面像がレン ズを通って平行光になり、カメラレンズ系を通って検出器で焦点を結ぶことになるので、瞳面像 を直接観察することが可能になる。瞳が理想の位置とずれていると、瞳像は瞳に対して隠れてし まう。これを目安に、瞳像と瞳が一致する場所を探しながら瞳が載った XY ステージの調整をす る。HOWPol で使用したレンズは、エドモンド・オプティクス社製のアクロマートレンズである。 NIR II マルチコートでコーティングされており、焦点距離は 35mm である。

#### 2.4 検出器

#### 2.4.1 完全空乏型 CCD

HOWPol の検出器には、200 µ m の厚さの空乏層により近赤外域まで量子効率が大幅に改善 した、完全空乏型 CCD (国立天文台、浜松ホトニクス;Miyazaki et al.2006) 2k × 4k を 2 枚用い る。CCD の制御は国立天文台で開発された Messia5 と M-front2(Nakaya et al.2006) を用いて行 う。CCD 一枚あたり 2048 × 4096pix であり、二つ並べることで 4096 × 4096pix として使用する。 1pix=15 µ m=0.3 である。1 枚の CCD あたり 4 つのポートで読み出しを行う。CCD の読み出 し時間は 1 × 1bin 読み出しで ~ 23 秒、2 × 2bin 読み出しで ~ 9 秒であった。通常の観測時は 1 × 1bin で読み出しをし、ガンマ線バーストの観測時には 2 × 2bin 読み出しを使用する。図 2.17 が HOWPol で使用されている完全空乏型 CCD の量子効率のグラフである。800mm ~ 1000mm あた りの量子効率が向上していることがわかる。これにより、銀河面に埋もれた赤化の大きな天体や、 赤方偏移の大きな天体に対しても有利に観測ができる。



図 2.17: 量子効率

## 2.4.2 デュワーと冷却機構

検出器を入れるデュワーはNAOJ標準デュワーが使用されている。デュワー内は真空引きがされ ており、約10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>Torrの真空度になっている。CCDの冷却には観測に影響を与えないように、 振動の少ないCryo Tigar 冷凍機を使用している。しかし、CCDの目標の冷却温度は173K(-100 )であるが、この冷凍機の到達温度は約100Kであるため、温度制御をかける必要がある。そこ で、温度コントローラを用いてヒーターの出力をCCDを約173K(-100)に制御している。ま た、真空度や温度情報はシリアル通信によりMessia5でモニターしている。



図 2.18: デュワーに取り付けられた CCD。真ん中のギャップは 1mm

# 第3章 駆動制御系の立ち上げ

#### **3.1** 駆動機構の構成

HOWPolの観測モードには、偏光撮像モード、偏光分光モード、撮像モードがある。それらの モード切り替えをスムーズに行うための駆動機構の構成について以下で説明する。本制御系の設 計は前任者の千代延真吾氏(広島大学修士論文)が行ったが、私はそれを引き継ぎ、納品された部 品を組み上げ調整し、必要に応じて追加工、追加発注するなどして実際の観測に用いられるよう 立ち上げた後、制御ソフトウエアを作製して遠隔からでも確実に操作できるようにした。

HOWPolの駆動機構には焦点マスクターレット、半波長板およびシングルウォラストンプリズムを移動させるための偏光較正光学系用Xステージ、フィルターターレット2個、シャッター、プリズム用XYステージ、焦点合わせ用検出器ステージがある。全ての駆動機構においてステージのリミット情報やターレットの原点情報を取得するためマイクロフォトセンサーが使用されている。このセンサーの使用波長は950nm であり CCD の感度領域であるため、観測時にはセンサーの電源を off にする必要がある。そのため、センサーの電源供給は PC 制御可能なリレーを用いて行うことにした。フォトセンサーには、すべて OMRON の EE-SX911-C1 J-R シリーズを使用した。



図 3.1: センサーの写真及び位置決め精度のグラフ

#### 3.1.1 焦点マスクターレット

焦点マスクターレットは、最も望遠鏡側に位置しており天板に設置されている。マスクターレットでは、狭視野偏光用マスク、広視野偏光用マスク、撮像用マスク、分光用スリット、格子状に穴の開いたマスクの全部で5種類のマスクの交換を回転機構により行う。このマスクターレットにおいて、最も小さい位置決めの精度が必要になるのは分光に使用されるスリットである。スリット幅が0.2mm であることから、その4分の1程度(0.05mm)の位置決め精度が必要になる。しかし

これはギア同士の遊びの幅よりも小さい値であり、マスクターレットにかかる重力方向の変化に より勝手にターレットが回転してしまい、マスクが要求する精度より大きく動いてしまう可能性 がある。そこで、プリロード機構を使用することにした。これはターレットに対して一定のトル クをかけギアを密着させることで、マスク位置を保持し再現性を良くする。しかし、素子交換の ときに時計と逆方向にターレットを回転させてしまうとプリロード機構が壊れてしまうので、常 に順方向に回すようにするなどの注意が必要である。



図 3.2: マスクターレット・プリロード機構

各マスク位置でちょうどプリロード機構にひっかかる ようにすることで、ターレットに一定のトルクがかけ られ、マスク位置を保持することができる。



図 3.3: マスクターレット概観図

#### 3.1.2 偏光較正光学系用 X ステージ

焦点マスクの次に光が通るセッションとして、偏光較正光学系用 X ステージがある。偏光分光 観測用のグリズムが、ダブルウォラストンプリズムと同じ機構に搭載するようにしたため、半波 長板とシングルウォラストンプリズムは別の機構に乗せる必要がある。そして偏光分光観測及び 偏光較正観測時は、半波長板とシングルウォラストンプリズムは必ず同時に使用するため、二つ を同じステージに乗せ光路中に出し入れするようにした。図 3.3 は偏光較正光学系用 X ステージ の概観図である。



図 3.4: 偏光較正光学用 X ステージ

また半波長板は回転させる必要があるので、X ステージ上に 回転ステージを取り付け、半波 長板を回転させることにした。半波長板は 22.5 °ずつ回転させて使用する。例えば、10%の偏光 度を持つ天体に対し、0.1%の偏光精度を要求すると、0.15 °以内の回転角の位置決め精度が必要 になる。そこで 回転ステージには既製品のシグマ光機自動回転ステージを用いた。このステー ジの回転精度は0.02 °であり十分な位置決め精度を持っている。

3.1.3 フィルターターレット

フィルターの交換機構には2ヶのフィルターターレットを使用する。1つのターレットに最大5枚、 計10枚のフィルターを搭載できる。2枚のフィルターの表面どうしの反射により、強いゴーストが 生じる可能性を減らすために、フィルターは光軸に対して10°傾けて取り付ける。現在 HOWPol では片方のフィルターに狭帯域・広帯域フィルター(B、V、R、I、Z'+Y)が搭載され、もう片方 のフィルターに減光フィルター、偏光フィルター(青、赤)が搭載されている。フィルターターレッ トの位置決め精度は、ターレットが平行光上に位置するため、フィルターの縁で光りをケラない ように注意するだけでよい。

また、フィルターターレットは筺体内部およびフィルターターレット自身のメンテナンスが簡 単になるように脱着式となっている。フィルターターレットは筺体内のセッションのちょうど中 央のセッションにあたり、ここを引き抜いて作業する方法が一番メンテナンスが簡単な方法であ ることから、フィルターターレットを脱着式にした。



図 3.5: フィルターターレット慨観図

#### 3.1.4 シャッター

シャッターはメレスグリオ製の薄型自動シャッターを用いた。露出中以外はシャッターが開かな いように、シャッターの開閉ロジックはノ マリークローズを選定した。シャッターを開けるとき は電気制御により開き、閉じるときはバネの力によって閉じる。これにより、露出中にエレクト ロニクス系にエラーが生じ、シャッターの制御がうまくできなくなってもシャッターは自動的に閉 まる。このため、露出時間超過によるサチレーションが起こらなくなり、貴重な取得データを失 うリスクを減らすことができる。また、シャッターの開閉は CCD の読み出しと連動する必要があ るので、CCD 制御用の PC から制御するようにした。

### 3.1.5 プリズム用 XY ステージ

このセッションはダブルウォラストンプリズム及びグリズムを交換する役割を持つ。ダブルウォ ラストンプリズムは、瞳像を2つのウォラストンプリズムで分割するため、器械偏光の付加が等 しくなくなる。このため理想的に器械偏光を差し引こうとすると、ダブルウォラストンプリズム の中心と瞳像の中心を一定の精度で合わせる必要がある。現実の装置において、誤差が0で中心 同士を合わせることは不可能である。しかし、瞳像は主鏡のたわみなどの影響で、0.052mm 程度 のぼけが生じる。このため、瞳像中心から0.026mm くらいの幅に中心の情報が入っているものと 仮定し、その範囲でダブルウォラストンプリズムの中心を合わせればよい。そこでターレット形 式ではなく XY ステージによる移動形式にした。ターレット形式では自由度が 回転方向しかな く、± 0.026mm の精度で位置合わせをするのは困難である。そこで精密な XY ステージを使用す ることで、両軸の位置分解能を± 0.026mm 以内に抑えることにした。図 3.5 にプリズム及びグリ ズム交換用ステージの概観図を載せる。



図 3.6: プリズム用ステージ概観図

#### 3.1.6 検出器ステージ

このセッションの役割は、CCDの搭載されたデュワーを焦点に対して前後させて焦点合わせを 行うことである。このステージはデュワーの重さ約15kgに耐えられ、且つ微細な駆動精度を必要 とする。そこで、(株)シグマ光機のステージを改造することで、電動駆動のステージを作製した。 横置きに耐えられるように側面にスプリングを取り付けた(後述)。望遠鏡側からくる電気的ノイズ から、微弱な電圧を扱う検出器を絶縁するために、デュワーとステージの間に厚さ20mmのベー クライト板を挿入した。また(株)ナベルに依頼して特注で遮光用の蛇腹を作製したが、ステージ のモータ部分に干渉して取り付けられないことが分かったので、現在は暗幕をステージを包み込 むように張り付けて遮光をしている。

#### **3.2 駆動機構の立ち上げ**

組み立ては、温度変化による伸縮や重力方向などによらずスムーズに動くよう注意して行った。 また機構同士が干渉するなどの不具合が見つかった箇所は、追加工して組み立てた。筐体及び駆 動機構の組上げ途中の様子を図 3.7~図 3.10 に示す。

フィルターターレットやマスクターレットのターレット機構の組み立てでは、モータとギアの かみ合わせ部分が密着しすぎないように、もしくは離れすぎないように適度な遊びができるよう に注意して組み上げた。フィルターターレットの組み立て途中の様子が図 3.7 に載せてある。

プリズム用 XY ステージや偏光較正光学用 X ステージは、2本のレールの上に乗った状態で駆動する。これらを組み立てるときは、2本のレールが平行になりスムーズにステージが駆動するように注意した。装置全体を組みむときも、これらの機構がスムーズに駆動するかを調べながら行った。図 3.8 はプリズム用 XY ステージの組み立ての様子である。



図 3.7: フィルターターレット



図 3.8: プリズム用 XY ステージ





図 3.9: マスクターレット、トーラス、偏光較正 図 3.10: 筐体、プリズム用 XY ステージ、光学瞳

プリズム用 XY ステージにおいては、いくつかの問題点が見られた。一つ目は XY ステージの 駆動可能な領域である。設計では XY 両軸ともマイナスのリミットからプラスのリミットまでが 駆動可能なはずだったが、X 軸がマイナス又はプラスのリミットに近い位置に移動すると、Y ス テージの乗っているスライドがコリメータレンズ系と干渉してしまい動かなくなるという問題が 生じた。この箇所は、部品を削るなどの追加工が不可能なため、プリズム交換の時は、その干渉 する区間を避け"H"の文字の様な動かし方が必要になった(図 3.11)。



図 3.11: XY ステージの移動可能な領域

もう一つの問題点は X 軸のモータのトルクである。XY ステージの構成は、まず X 軸方向にス ライドするステージがあり、その上に Y 軸方向にスライドするステージが乗っている。XY ステー ジが水平に置かれた状況での動作試験では正常に動作したが、装置全体を組み上げ望遠鏡に取り 付けた時の動作試験では、X 軸モータに多少の空回りが見られた。特にこの不具合は、望遠鏡に 取り付けた後1年が経過した 2009 年1月頃より顕著になった。X 軸が地面に垂直で Y ステージを 持ち上げる状態の時に顕著であり、リミットからリミットまでの出力パルス数も安定しなかった。 X 軸が地面に垂直でも、Y ステージを下に降ろす方向に駆動する場合は、空回りしている様子はな く、リミットからリミットまでの出力パルス数も安定していた。よってこの不具合の原因は X 軸 のモータのトルクが不足しているためであると判断した。2009 年1月現在は、X 軸の角度により X 軸のプラスとマイナスのリミットの上に来る方を原点として、原点から下に降ろすようにして プリズムまたはグリズムを光路中に挿入するようにしている(図 3.12)。つまりナスミスローテー タが、 - 90 ° < 90 °の時は X 軸がプラスのリミットに原点をとり、 <-90 °、90 ° < の 時は X 軸がマイナスのリミットに原点をとる。将来的には、X 軸のモータをさらにトルクの強い ものに交換する必要がある。

検出器ステージに対しても追加工を加えた。このステージはデュワーの重さに耐えられる設計 になっているが、横にすることを推定した設計値ではなかったため、望遠鏡に取り付けて横になっ た時にデュワーの重さにステージが引っ張られてデュワーくことが分かった。そこで、ステージ の4か所に均等に力が加わるように加工をしてバネを取り付けた。バネの力で引っ張ることでデュ ワーが傾かないようになっている (図 3.13)。



図 3.12: XY ステージとナスミスローテータの回転角の関係



図 3.13: 検出器用ステージ

# 3.3 制御系の構成

HOWPOIでは上記した駆動機構をステッピングモータで動かすことにより観測モードの切り替えを行う。表 3.1 のようにオリエンタルモータ製のモータ 8 個と OMRON のフォトセンサー 16 個を使用している。8 個のモータそれぞれに独立したモータドライバを持っており、コンテック製の4 軸同時制御ボード 2 ヶを介して 1 つの PC で制御する。全モータが同時に動かせることにより、観測モード切り替えが短時間で行える。フォトセンサーも同様に4 軸同時制御ボードを介して制御する。またシャッターの開閉の制御は CCD を制御する PC により行う。

駆動機構名	光学素子	駆動種類	モータ数	センサー数
マスクターレット	スリット、マスク	回転機構	1	1
偏光較正光学系用 X ステージ	半波長板	X ステージ	1	3
	シングルウォラストンプリズム			
半波長板の転ステージ	半波長板	回転機構	1	1
フィルターターレット	フィルター	回転機構	2	2
シャッター		TTL 信号同期		
光学瞳(しぼり)		手動 XY ステージ		
プリズム用 XY ステージ	ダブルウォラストンプリズム	高精度 XY ステージ	2	6
	グリズム			
焦点合わせ用検出器ステージ	検出器	高精度 Z ステージ	1	3

表 3.1: 制御系設計表





図 3.14: HOWPol で使用したモータドライバと コントローラボード

図 3.15: 配線済みのモータドライバとコントロー ラボード

図 3.14 に HOWPol で使用したモータドライバとコントローラボードの写真を載せる。写真の 左側がモータドライバである。下からフィルターターレット用 2ヶ、真中が XY ステージ用と X ス テージ用、上がマスクターレット用、半波長板回転ステージ用、検出器ステージ用である。写真 の右上がコンテックの4軸同時制御ボードで、右下がノイズフィルタとスイッチング電源である。 ノイズフィルタはモータドライバで指定されたものをしている。モータによって電源がACとDC の両方あるのでスイッチング電源によりAC100VからDC24Vに変換する。これらのモータドラ イバやコントローラボードと、駆動機構を繋ぐケーブル等の作成や配線作業のほとんどは、私が 主導して行った。図3.15が配線後のモータドライバとボードである。また表3.2にそれぞれの駆 動機構のモータとモータドライバについて記載する。

HOWPolの制御系のブロック図を Appendix に記載する。筐体内部のモータやフォトセンサー のケーブルは一か所に集められ、5つのコネクタを通じて外に出ていく。マスクターレットのケー ブルは一度筐体内部に入り、他と同じようにコネクタから外に出る。筐体外部のコネクタからは3 本のケーブルにまとめられ、モータドライバ及びボードに接続される。筐体内部やモータドライ バ~ボード間のケーブルは自分で作製した。筐体~モータドライバ及びボード間のケーブルはミ スミに作製を依頼した。その設計図は Appendix に記載する。

制御系の配線が完了した後、望遠鏡に取り付けた (図 3.16、図 3.17)



図 3.16: 取り付け作業中の HOWPol



図 3.17: 取り付けの完了した HOWPol

## 3.4 制御ソフトウエアの開発

HOWPolの駆動機構を制御するためのソフトウエアは、コンテックのコントローラボードにあ らかじめ与えられていたサンプルプログラムを参考にして開発した。Visual C++を用いた GUI 操作をベースにしたソフトウエアで制御する。動かすだけのプログラムやステータスを表示する だけのプログラムなどを参考に図 3.18 のようなソフトウエアを開発した。

開発したソフトウエアの説明をする。まずのボタンにより駆動させる機構を選択する。HOWPol では8個のモータを使用しているので8個のボタンがある。次にに現在位置からの移動させるパ ルス数を入力する。パルス数がそのまま移動距離として考えれる。そしてのボタンでCW方向 もしくはCCW方向に駆動させる。リミットセンサーのステータスや動作ステータス、またセン サーのON、OFFの情報も表示するようになっている。また原点合わせをして原点の総出力パル ス数を0に設定しておくと、総出力パルス数がそのまま現在位置になる。X ステージならば駆動

	②動かすパルス数 を入力	牧
	MOVE	
<ol> <li>①動かす モータを選 択</li> <li>③動作命令 を出す</li> </ol>	Motion C MT DeviceName AXIS_02 C HWX Distance 1000 [pulse] C HWrot FTI CW CCW センサー C FT2 STOP ORIGIN ALMクリア C GWY Limit Status - LIM ORG +LIM ALM センサー C Z 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Status 総出カパルス数 Outpulse Count [pulse] カウントクリア Outpulse Status Move Status HELP
	Error Code : 10H Click HELP and Refer to Return Code Error Function : SmcGetStopPosition	EXIT

図 3.18: HOWPol 制御用に開発したソフトウエア

可能範囲の端から端まで、ターレットならば一周するまでに必要なパルス数は決まっていて、何 度往復させてもその値はほぼ一定のはずである。つまりXステージならばどちらかの端を、ター レットならばある点を原点とすることで、そこからのパルス数を現在位置情報と考えることがで きる。

通常の観測時ならば、このソフトウエアで光学素子の交換を行っていても支障はないが、ガン マ線バーストのように即時観測を始めたい場合、一つ一つの駆動機構をボタン操作で制御してい たのでは時間がかかってしまう。そこで、このプログラムをベースにソケット通信で文字列として コマンドを送ることで駆動するようなソフトウエアに改造した。あらかじめ HOWPol 側の PC で サーバープログラムを立ち上げておく。クライアント側からサーバー側に命令を送り、サーバー 側は命令通りの制御を行い、ある文字列をクライアント側に返す。クライアント側は文字列を表 示し、そのプログラムは終了する。このクライアント側のプログラムを組み合わせて、それぞれ の観測モードへの切り替えのシェルを組みむ。これにより、ガンマ線バースト発生時にはアラー トに対応して自動的に偏光観測モードになるようにコマンドを送信し、モード切り替え可能な構 成になる。

# 第4章 試験観測と性能評価

# 4.1 地上実験および試験観測の内訳

## 4.2 検出器の評価

読み出しノイズ、電荷変換効率、リニアリティを求めて検出器の評価を行った。CCDの各ピク セルに蓄えられた電荷を読みだすときに発生する電気的なノイズを読み出しノイズと言う。また 何個の電荷光電子で1カウントに変換するかを電荷変換効率と言う。なお、画像解析にはIRAFを 用いた。バイアスレベル補正には、ポートごとのオーバースキャン領域を用いた。オーバースキャ ン領域及びプリスキャン領域はビニングなしの場合、次のようになっている(図4.1)。オーバース キャン領域の平均カウントは、~500カウントである。それぞれのポートのオーバースキャン領 域、プリスキャン領域、データ領域を表4.1に示す。



図 4.1: オーバースキャン領域

表 4.1: 各領域のピクセル位置

	プリスキャン領域	データ領域	オーバースキャン領域
ポート1	1:8	9:520	521:536
ポート 2	1065:1072	553:1064	537:552
ポート 3	1073:1080	1081:1592	1593:1608
ポート 4	2137:2144	1625:2136	1609:1624

#### 4.2.1 読み出しノイズと電荷変換効率

20 枚連続でバイアスを撮像して、読み出しノイズを求めた。20 枚の画像を平均化したときの、ピクセルあたりのカウントの標準偏差の値が記録されている画像を作成した。そして、ある 10 × 10 ピクセルの領域の標準偏差を求めて読み出しノイズとした。結果、読み出しノイズは 5.11(ADU) であった。

フィルターの直前に人工光源を置き、カウントが飽和しない程度の露出時間で撮像した画像を 10枚用意した。そして、その10枚の画像を各ピクセルごとに平均化して一枚の画像を作成した。 また、平均化したときのピクセルごとの分散の値の画像を作成した。画像中のカウント数の小さ なピクセルから大きなピクセルまでの適当な領域を選択して、その領域における平均のカウント 数を横軸に、分散の値を縦軸にとったグラフを作成した(図 4.1)。



平均のカウント数(ADU)

図 4.2: カウント 分散の関係グラフ

1 つのピクセルに N( $e^-$ ) の電荷がたまった場合、その誤差はポアソン分布に従うため  $\sigma_N = \sqrt{N}$ と表せれる。また、カウント数が C(ADU) の場合、その誤差は  $\sigma_c$  である。電荷の変換効率が  $g(e^-/ADU)$  であるとすると、電荷数とその誤差は  $N = g * c \ge \sigma_N = g * \sigma_c$  で表せれる。この二 つの式と  $\sigma_N = \sqrt{N}$  であることから  $c = g * \sigma_c^2$ を導き出せる。つまり C と  $\sigma_c^2$ を XY にプロット してグラフを作成すると、傾き gの直線になる。

カウント-分散のグラフを y = ax + b でフィットして、そのフィットした関数の傾きの逆数を電荷変換効率とした。 $a = 0.4493 \pm 0.0053$  であり、電荷変換効率が 2.23 ± 0.0011 と求まった。

#### 4.2.2 リニアリティ

CCDの露出時間とカウント数の関係がリニアからどれだけずれているかの評価を行った。CCD はリニアリティが良い光電素子として知られているが、リニアリティがずれると高い精度の観測が 難しくなるため、通常リニアリティが保障された範囲でのみ観測を行う必要がある。電荷変換効率 の時と同様に、フィルターの直前に人工光源を置き、露出時間を少しずつ長くしながらカウント が飽和するまでの、シャッターを開けた場合と、シャッターを閉じた場合 (ダーク画像)の両方の画像を取得した。それぞれの画像に対してオーバースキャン領域のカウントを利用してバイアスの差し引きを行い、各露出時間に対して、シャッターを開けて露出した画像からシャッターを閉じた画像を引いた。そしてピーク周辺の 10 × 10 ピクセルのカウントの中央値をカウント数とし、横軸に露出時間、縦軸にカウント数のグラフを作った。50 秒露出した画像はカウントが 65000ADUを超え飽和していたため、0.2 秒から 35 秒の画像におけるカウントを y = a(x - b) でフィットして、カウントとフィットした直線がどれだけずれているかを調べた (図 4.2)。

結果、チップ0、1 ともにカウントが飽和した点を除いて、リニアリティからのずれが 1%以下 と非常にいい結果が得られた。y = a(x - b)でフィットした理由は、シャッターの開閉ロジックを ノーマリークローズにしたためである。シャッターが開くときは電磁石によるものだが、閉じると きがバネの力で閉じるため時間差が生じて、シャッターの開いている時間ががわずかに長くなる。 しかし、その時間差も 0.014 秒と小さいので通常の観測において問題になることはないが、詳細 な測光観測を行う場合は考慮する必要がある。



図 4.3: リニアリティの測定結果

## 4.3 光学性能

#### 4.3.1 視野位置とローテータ回転軸

経緯台の望遠鏡では、望遠鏡の方位角や高度の変化によって視野が回転する。そのため、この視 野の回転をキャンセルし、常に同じ位置に同じ方角が来るように装置を取り付けているナスミス 又はカセグレンのインストゥルメントローテータが設けられる。装置とその取り付け方によって方 位角の原点は異なるが、データ解析をする上では、常に画像上で上の方角を北にすることが望ま しく、そのために画像の上を常に北にするために必要なローテータのオフセットの角度を求めた。

望遠鏡を赤緯方向に適当なオフセット分だけ動かし、ある一つの星が視野の中心付近と視野の 端に写った画像を取得する。2枚の画像に写ったその星の座標を読みこみ、そこから2つの座標を 結ぶ直線と、画像での上下を結ぶ直線との角度を求める。ここで求めた角度をローテータの回転 角度のオフセットとして使用する。以上の観測からローテータ回転角度のオフセットは-48.8 °と いう結果を得た。よって以後の観測時にはナスミスのローテータをオフセットとして-48.8 °を与 えて観測を行った。



図 4.4: 視野の方角

また、ナスミスのローテータを回転させながら露出することで、視野内でのナスミスローテー タの回転中心を求めた。ローテータを回転したときの星の軌道上の適当な3点の座標を読み、こ の3点を通る円の中心を求めることで、ローテータ回転中心の座標を求めた(図4.3)。ローテータ 中心は通常望遠鏡の光学軸としてのリファレンスにされるため、ここを視野中心として扱うと都 合がよい。ローテータ回転中心はチップ1の(11、2134)ピクセルと求まった。チップ0とチップ 1を合成した画像での回転中心は(1722.83、1734.07)ピクセルである。



図 4.5: ローテータの回転中心

#### 4.3.2 フラットフィールド

CCD には1ピクセルごとにわずかながら感度むらが存在する。さらに、HOWPol で使用して いる CCD は1枚につき4つのポートで読み出しを行っている。そのため、それぞれのポートごと でもムラが生じて、バイアスの差し引きをしただけでは、図4.5のようにポートごとに明るさの 違う画像ができてしまう。それらの感度ムラを補正してやるために、フラット板に均等な明るさ の光を当てて撮像し、フラット画像を作成した。HOWPol には撮像モードや偏光撮像モードがあ り、それぞれのバンドフィルターごとにフラット画像を撮像した。



図 4.6: M6 を撮像した画像

M6を撮像した画像に対してバイアスの差し引きを行った画像。各ポートごとに感度ムラがあり、4つ短冊 状のムラになっているのがわかる。

#### 4.3.3 歪曲収差

天体からやってきた光はHOWPolのレンズ系によって歪曲収差が生じてしまい、視野中心からの距離が大きくなるほどずれは大きくなる。これによりCCDに写った天体の位置が本来の位置からずれてしまう。正確な位置情報が必要な、アストロメトリ観測やディザリング観測を行うために歪曲収差を補正を行った。この歪曲収差は視野中心からの距離の2次式により補正できる。ここでは視野中心と補正式を求めた。

観測方法及び求め方について説明する。まず、焦点マスクを5×5個(15mm間隔)の格子状に 穴のあいたマスクに交換して撮像する。図の右側がマスク上でのイメージ、左側がCCD上でのイ メージである。マスクの縦の5つの穴が、CCDの縦の軸に対してだいたい平行になるように調整 して撮像した。

初めは 5 × 5 の穴の中心の点が視野中心と重なっていると仮定して考える。そしてマスク上で の視野中心から各点までの距離を横軸にとり、CCD上での視野中心から各点までの距離を縦軸に とり、グラフを作成する。そうすると、このグラフは視野中心からの距離により歪曲収差が大き



図 4.7: 格子状マスク

くなっているため、右上がりで下に凸の関数となる。最終的に我々は $Y = ax^2 + bx$ という2次関数で十分な精度で表せることが分かったので、フィット関数にはこの2次関数を用いた。

次に視野中心が先ほどの位置から数ピクセル分ずらした位置にあると仮定して、CCD 上および マスク上での視野中心から各点までの距離のグラフを作成して二次関数でフィットする。この作業 を繰り返してフィットした関数とグラフとの残差<sup>2</sup>の値が一番小さくなるところを探す。その点 を視野中心とし、その時フィットした関数を歪曲収差の補正に使用する関数とする。

結果、視野中心はチップ1の(18.23、2164.4) ピクセルの位置にあることがわかった。この値は ローテータの回転中心の値(11、2134) ピクセルとほとんど一致している。また、チップ0とチッ プ1の画像を合成して一枚の画像にしたときの視野中心は(1730.06、1764.47) ピクセルであった。 マスク上および CCD 上での視野中心からの距離の関数は以下のように与えられた。

 $r' = 0.0005029 \times r^2 + 0.565436 \times r$ 

ここで r'は CCD 上での視野中心からの距離 (mm)、r はマスク上での視野中心からの距離 (mm) である。歪曲収差は約2.24%とほぼ設計値 (2.4%)通りであり、2次関数による補正のみで15分角 視野全面にわたって0.5 ピクセル以下の精度で補正が可能となった。このような補正を行うこと で、1 視野よりも広い天体像に対しても望遠鏡の位置をずらして撮った複数フレームの合成が可能 となる。そのようにして得たオリオン星雲の視野16.9 × 14.6 画像を図4.7 に示す。

### 4.4 撮像モード

撮像モード時の結像性能や光学性能の評価について説明する。

#### 4.4.1 結像性能

図 4.8 は 7 月 29 日に得たりょうけん座の球状星団 M3 の画像中の星像の 2 次元輝度分布の断面 図である。この図における半値幅は 3.87pix であり、ナチュラルシーイングとドーム内シーイン グ及び望遠鏡と HOWPol の結像性能のすべてが反映された結像性能 (シーイングサイズ) として 約 1.14 秒角 (3.87pix × 0.29 秒/pix) が達成されたことが分かった。



図 4.8: オリオン星雲 (V,R,Z バンド三色合成)

図 4.9 は M3 を撮像したときの、視野の中心からの距離と星像の大きさをグラフにしたものであ る。視野の中心から外側に向けて星像のサイズが大きくなっている傾向がみられるが、視野の端 である 1500 ピクセル付近でも最小値から 1 ピクセルほどのずれに納まっている。



**×** 4.9:



#### 4.4.2 測光較正と変換式

同じ天体を観測しても、観測装置が変わると天体の等級が変わることがある。それは観測装置 によってフィルターや検出器の種類などの波長特性が異なっているため、波長(色)に対する装置 の総合感度特性が異なるためである。このため同じ等級の天体を同じバンドで撮像しても天体の 色によって明るかったり暗かったりしてしまう。これらの等級の色依存性の補正を行うための変 換係数の導出を行った。各バンドでの変換式は以下のように与えられる。  $B = B_0 + B' + C_{BV}(B' - V') + A_B$   $V = V_0 + V' + C_{VR}(V' - R') + A_V$   $R = R_0 + R' + C_{VI}(V' - I') + A_R$  $I = I_0 + I' + C_{RI}(R' - I') + A_I$ 

ここで、B',V',R',I'は、Aは各バンドの大気吸収である。 $B_0,V_0,R_0,I_0$ は機器等級で、 $C_{BV},C_{VR},C_{VI},C_{RI}$ は色変換係数である。

 $B' = -2.5 log_{10} N_B$   $V' = -2.5 log_{10} N_V$   $R' = -2.5 log_{10} N_R$  $I' = -2.5 log_{10} N_I$ 

であり、N は各バンドの1秒あたりのカウント数 (ADU) である。バンドごとの明るさの分かっている標準星の等級を基準にして、この変換式に当てはめて色変換係数を求める。

基準となる標準星として PG1657+078(Landolt 1991,AJ,104,340) を選び、B,V,R バンドを 100 秒間、I バンドを 50 秒間露出で撮像をした。PG1657+078 には 4 つの標準星があり、この 4 つの 星に対してそれぞれのバンドで測光を行った。測光で得られた結果から変換式を用いて各バンド の機器等級と色変換係数を求めた。

$$\begin{split} B_0 &= 21.41 \pm 0.038, \ C_{BV} = 0.251962 \pm 0.02581 \\ V_0 &= 22.77 \pm 0.014, \ C_{VR} = 0.038177 \pm 0.02084 \\ R_0 &= 23.11 \pm 0.010, \ C_{VI} = 0.000526 \pm 0.01261 \\ I_0 &= 22.96 \pm 0.003, \ C_{RI} = -0.0002 \pm 0.01587 \end{split}$$

標準星の各バンドの等級を表 4.1 に記す。また求めた機器等級と色変換係数を使って標準星のカ タログ値との差は表 4.2 のようになった。これから変換式は 0.01 等の精度で補正できることがわ かった。

天体名			В	V	R	Ι
PG1657+078	16 59 32	$+07 \ 43 \ 31$	14.866	15.015	15.078	15.115
PG1657+078B	16 59 32	$+07 \ 42 \ 11$	15.429	14.721	14.304	13.883
PG1657+078A	16 59 33	$+07 \ 42 \ 25$	15.102	14.033	13.460	12.920
PG1657+078C	16 59 35	$+07 \ 42 \ 26$	16.065	15.225	14.704	14.258

表 4.2: 標準星の明るさ (カタログ値)

表 4.3: 標準星の実測値とカタログ値との差

天体名	В	V	R	Ι
PG1657+078	-0.004	0.003	-0.002	0.001
PG1657+078B	-0.001	0.011	-0.011	0.005
PG1657+078A	0.004	0.007	-0.007	0.008
PG1657+078C	-0.027	-0.008	0.011	-0.005

#### 4.4.3 装置効率と限界等級

装置の検出効率については 4.4.2 章の標準星のデータを使用して求めた。m 等の天体から波長 []の光が 1.5m 望遠鏡にやってくると期待される光子数は 1 あたり以下の式で表せる (Massey et al.1998, ApJ, 328, 315)。

# $N = \frac{4.5E10}{10} \times 10^{-(m/2.5)} \times 1.5^2$

この式を使用して各バンドについて PG1657+078 の4 つの標準星から来ていると期待される光 子数を計算した。カウント数を計算から出てきた光子数でわることで効率を出した。計算の際の 波長は各フィルターの中心波長を代入した。計算の結果、装置の検出効率は以下のようになった。 これらの値は設計値にかなり近く、書記通りの結果が得られたことになる。

- B=7.5%
- V = 20.4%
- R = 30.0%
- I=27.7%

ある天体を観測したい時に、必要な測光精度に対して露出時間を見積もるためには限界等級を 知る必要がある。装置の限界等級は、PG1657+078の周りに写っていたすべての星を測光して求 めた。各バンドに対して横軸に等級を縦軸にその等級の誤差をとったグラフを作成した(図4.9~ 4.12)。グラフから100秒露出したときの限界等級は、測光精度0.02等を限界とした場合ではBバ ンドで17.3等、Vバンドで18.0等、Rバンドで18.5等、50秒露出したときのIバンドの限界等 級(測光精度0.02等)は17.5等となった。また限界を0.1等とした場合は、それぞれ18.7、19.5、 19.7、19.0等となった。結果を表にまとめる。

バンド	測光精度 0.02 等	測光精度 0.1 等
В	17.3	18.7
V	18.0	19.5
R	18.5	19.7
Ι	17.5	19.0

表 4.4: 限界等級 (BVR バンド 100 秒露出、I バンド 50 秒露出)

#### 4.5 偏光撮像モード

HOWPolの主な観測モードである偏光撮像モードの性能評価の結果を記す。

#### 4.5.1 広視野モードと狭視野モード

偏光撮像モードには広視野モードと狭視野モードの2種類の観測モードがある。広視野モード は、ガンマ線バーストなどの大きな位置誤差のある天体に対して用いる。また、色収差が大きい ため点光源に対して用いる。狭視野モードは、位置のはっきりとわかっている天体に対して用い





図 4.12: 限界等級 V バンド





図 4.14: 限界等級 I バンド

る。また、色収差が小さいので反射星雲や彗星のようなある程度広がった天体に対しても偏光観 測が可能である。これらの偏光観測を通じて、偏光度を精度よく(偏光度で0.1%の精度)求めるに は、天体の光りが望遠鏡や観測装置などを通ってきたことによって生じる器械偏光や器械消偏光 を精度よく見つもり、補正する必要がある。

#### 4.5.2 器械偏光

無偏光の光でも望遠鏡や観測装置を通ることで光学系の不完全性(非軸対称性、格子アノマリー等)によって偏光する。これを器械偏光という。カセグレン焦点での器械偏光は、光軸対称に反射して光を集めるため通常は0.1%以下である。しかしHOWPolが取り付けられているナスミス焦点では、第3鏡での90°反射により3-5%の器械偏光が付加される。0.1%オーダーの精度で偏光度を求めるためには、この第3鏡による器械偏光を補正しなければならない。

かなた望遠鏡の器械偏光度は、副鏡及び第3鏡に反射防止膜(*SiO*<sub>2</sub>)を施した状態でのシミュレーションにより3~4%と予想されている。また、望遠鏡の高度によって第3鏡が回転するため、第3鏡の反射により発生する器械偏光は望遠鏡の高度が変化すると偏光方位角も回転する。そこで様々な高度の無偏光標準星を偏光モードで撮像して器械偏光度と、その偏光方位角が高度によって変化する様子を確かめた。

広視野偏光モードによる偏光観測の結果を表4.5 に記す。バイアスの差し引き、フラット画像での割り算などの一次処理を施し、4 つに分けられた天体の光のカウントをそれぞれ測定した。ds9 上で左上、左下、右上、右下の順番にI(0°)、I(90°)、I(45°)、I(135°)としてQ/I、U/I、P(偏 光度)、PA(偏光方位角)を求めた。PA は求まった値からナスミスのローテータ回転角度を差し引 き補正を施した。表に載せたデータは2008年7月29日に撮られたデータである。11月以降に行っ た観測では、偏光度と偏光方位角の値が7月29日のデータと大きく異なっていた。そこで、広視 野用のダブルウォラストンプリズムをチェックするとかなりヒビが入っていた。広視野用のウォラ ストンプリズムは熱膨張係数が軸方向で大きく異なる方解石で作成したため、温度変化に弱い。そ のため試験観測の間に、プリズムにヒビが入り結晶内での屈折率が変化し、まともなデータが得 られなくなったと考えられる。また、プリズム用XYステージのX軸の不調によりプリズムの位 置精度が悪くなったため、瞳像の中心とプリズムの中心がずれていた可能性もある。ただ、プリ ズムを HOWPol に搭載して間もない7月29日の段階では、プリズムにヒビが入っていなかった ため、広視野用ダブルウォラストンプリズムによる広視野偏光観測によって、第3鏡の反射によ る器械偏光度が~4%であり、高度のみの偏光方位角依存性が確かめられたといってよい。

標準星	高度	方位角	ローテータ	Q/I	U/I	Р	PA
HD103095	23 °	-120 °	40 °	0.0087	-0.0184	2.04%	-72.35 °
HD155886	29 °	0 °	-29 °	-0.0449	-0.0139	4.70%	-52.41 °
HD144579	70 °	-111 °	26 °	0.0070	0.0362	3.69%	12.50 °
HD154345	74 °	-148 °	66 °	-0.0243	0.0390	4.59%	-5.00 °
HD165908	85°	27 °	-111 °	-0.0433	0.0051	4.35%	17.62 °

表 4.5: 観測した無偏光標準星

次に狭視野偏光モードの偏光観測について説明する。狭視野モードでは、第3鏡の反射による 望遠鏡の高度依存成分以外の微小な器械偏光成分の存在を確かめるために、同じ無偏光標準星を 毎回同じ高度のあたりで観測を行った。観測した天体は HD18803 であり、表 4.6 にこの天体の情報を記す。

表	4.6:	HD18803
· レヘ	<b>1</b> .0.	TTD T0000

名前	赤経	赤緯	V 等級
HD18803	$03 \ 02 \ 26.0$	$+26 \ 36 \ 33$	6.2 等

天体が南中する時間に 11 月 5 日から 11 月 26 日まで 8 夜、観測を行った。画像に一次処理を 施した後、4 つに分割された光を左から順番に I(0 °)、I(90 °)、I(45 °)、I(135 °) として測光し、 Q/I、U/I、P(偏光度)、PA(偏光方位角)を求めた。Q を横軸に U を縦軸にとったグラフを作成し たところ図 4.15 の様な傾向が見られた。



図 4.15: Q-U の関係のグラフ

グラフがある点を中心とした円を描いているとすると、以下のような式で表すことができる。

 $Q = Pcos(2\theta_{instr} + \theta_0) + Q_0$ 

 $U = Psin(2\theta_{instr} + \theta_0) + U_0$ 

 $\theta_{instr}$ は器械偏光の偏光方位角である。望遠鏡が真横 (高度 h=0°)を向いているときの、第3 鏡による器械偏光はナスミス台で見て縦方向に偏光している。ここを偏光方位角 0°とすると、  $\theta_{instr} = 0$ °である。望遠鏡が真上 (高度 h=90°)を向いているときは、 $\theta_{instr} = 90$ °である。つま り $\theta_{instr} = h$ と表せられる。また北の方向が常に同じ位置になるようにローテータが回転してい るため、theta<sub>instr</sub>も回転する。よって $\theta_{instr} = h - \theta_{ns}$ となる。ここで、h および $\theta_{ns}$ は時角 H の みの関数で表され、 $\theta_{instr}$ は

 $\theta_{instr}(H) = \cos^{-1}(\sin\phi \sin + \cos\phi \cos \ \cos H) - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\sin H/\tan\phi \cos \ -\sin \ \cos H)$ となり時角 H のみの関数となる。 $\phi$  は観測地の緯度、 は天体の赤緯である。よって、上記の Q の式と U の式の  $\theta_{instr}$  は  $\theta_{instr}(H)$  に置き換えられ、ある天体の Q と U が時角 H のみの関数で 表せれる。時角 H を横軸にとり、Q および U を縦軸にとったグラフを作成し、Q と U の 2 式で同 時にフィットすることでそれぞれのパラメータを求めた (図 4.16)。各パラメータは次に記す。  $P = -0.0432 \pm 0.0002$   $\theta_0 = 72.08 \circ \pm 0.25 \circ$   $Q_0 = 0.0094 \pm 0.0002$  $U_0 = 0.0069 \pm 0.0002$ 

 $Q_0$ 、 $U_0$ は任意の天体に対して常に付加される HOWPol の装置固有の器械偏光であると考えられる。この $Q_0$ 、 $U_0$ から求めた偏光度は 1.17%、偏光方位角は 18.14 °であることが分かった。第3 鏡による器械偏光以外にも約 1%の装置固有の器械偏光があることが分かった。またフィットした関数とデータ点との残差から、この時角 H での補正によって Q、U はそれぞれ 0.54%、0.63%の精度で求められることが分った。この補正だけでも、ブレーザーのような 1%以上の変動を示す天体の観測に使用できると思われる。さらに良い精度で観測を行うためには、同じフレームに写っている偏光度の分かっている天体を使ってさらなる補正を検討する必要がある。

#### 4.5.3 器械消偏光

レンズなどの光学系により偏光度100%の偏光を入射しても、直線偏光の一部が円偏光に変換される。円偏光に変換された偏光は直線偏光観測ではカウントできなくなり無偏光として扱われるため直線偏光度は減少する。これを器械消偏光と言う。これを求めるため強偏光星であるHD161056の光に偏光フィルターを入れて100%偏光にした状態で観測をした。そして上の偏光観測と同様に、カウントから偏光度を求めた。結果、偏光度は99.2%となり器械消偏光は0.8%と非常に小さいことが分かった。これは通常の偏光観測には問題はない値である。

#### 4.5.4 偏光較正法と観測性能

4.5.2 章で求めた器械偏光の式を用いて偏光較正を行う。器械座標での偏光を求めて、そのあと に器械偏光を差し引くことで、器械座標での星固有の偏光が求められる。しかしそこで出た偏光 はまだ偏光方位角の原点や方位角の方向が決まっていない。そこで強偏光星を同じようにしても とめた器械座標での偏光の値と、カタログから求めてきた値を見比べることで、偏光方位角の天 球状での原点や回転方向の正負を求めることができる。器械消偏光の補正を行うが、上の章で述 べたように約1%と小さいため問題になることはない。以上の較正により、天体固有の偏光を求め ることができる。



図 4.16:時角 H と Q,U のグラフ 横軸が時角 H、縦軸が Q または U である。黒の点が Q に赤の点が U に対応している。

# 第5章 考察とまとめ

## 5.1 設計目標の達成度

HOWPol の性能の設計値または予想値と実際の性能のまとめを表 5.1 に示す。検出器の読み出 しノイズは、11.3  $e^-$ で、電荷変換効率は  $2.22e^-/ADU$  であった。大気や望遠鏡による減光も考慮 した検出器の効率は、B=7.5%、V=20.4%、R=30.0%、I=27.7%と設計値よりやや低い値であっ た。100 秒露出したときの限界等級は、測光精度 0.02 等を限界とした場合では B バンドで 17.3 等、 V バンドで 18.0 等、R バンドで 18.5 等、50 秒露出したときの I バンドの限界等級 (測光精度 0.02 等) は 17.5 等となった。また限界を 0.1 等とした場合は、それぞれ 18.7、19.5、19.7、19.0 等となっ た。歪曲収差は 2.24%で 2 次式による補正のみで 0.5 ピクセル以下の精度で補正できる。第 3 鏡に よる器械偏光において、最大で 0.4% ほどの系統誤差があるが、偏光度は~4% であり、望遠鏡の高 度により偏光方位角が変化していることが確かめられた。

項目	設計値、予想値	実測値
読み出しノイズ	約 5e <sup>-</sup>	$11.3e^{-}$
電荷変換効率	$2.54e^-/ADU$	$2.22e^{-}/ADU$
装置検出効率		B=7.5%
		V=20.4%
		R=30.0%
		I=27.7%
限界等級	10 <b>分露出で</b>	100 秒露出:B=17.3(測光精度 0.02 等)、18.7(測光精度 0.1 等)
	R=19.2 等	100 秒露出: V=18.0(測光精度 0.02 等)、19.5(測光精度 0.1 等)
	(測光精度 0.02 等)	100 秒露出:R=18.5(測光精度 0.02 等)、19.7(測光精度 0.1 等)
		50 秒露出:I=17.5(測光精度 0.02 等)、19.0(測光精度 0.1 等)
歪曲収差	2.4%	2.24%
器械偏光	3~4%	~ 4%

表 5.1: 設計目標の達成度

# 5.2 期待されるガンマ線バースト即時観測の頻度と観測精度

ガンマ線バーストの初期残光に対する即時観測体制は整いつつあるが、HOWPol で観測でき るガンマ線バーストがどのくらいの頻度で起こり得るのかの考察をする。一年間に検出するガン マ線バーストの数は約 100 個である。そこに夜の時間、望遠鏡の高度が 20 °以上の領域、晴天 率を考慮して計算する。かなた望遠鏡で一年間に観測できるガンマ線バーストの数は、100 × <sup>10</sup>/<sub>24</sub> ×  $0.33 \times 0.8 = 11$  個となる。また、偏光度 0.2%以上の精度で観測するためには、読み出しや sky などのノイズを考慮すると 16 等よりも明るい必要がある。10 分間露出した場合、限界等級 16.0 等で 0.2%の精度が見込める。そのためバーストから 1000 秒後で 16.0 等より明るい天体の場合、 0.2%の精度で 1 点プロットすることができる。また、1 分間の露出で 0.2%の精度を得られる限界 等級は 14.2 等である。もし 14.2 等よりも明るいガンマ線バーストが発生した場合、1 分ごとにそ の変動をプロットすることができる。図 5.1 より、バーストから 1000 秒後に 16.0 等よりも明るい 確率は約 5%である。つまり 2 年間観測を続ければ 1 個くらいの頻度で、0.2%の精度でのガンマ線 バーストの偏光観測例を捕えることができそうである。14.2 等よりも明るいガンマ線バーストの 起こる確率は 1%以下であるため、10 年に 1 個くらいの頻度で偏光の時間変化を追えるような明 るいサンプルの観測を行うことができると見積もられる。

#### 5.3 まとめ

私は本研究で、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付ける1露出型偏光撮像装置の開発及び性 能評価を行った。前任者の千代延真吾氏の研究を引き継ぎ、納品された部品を必要に応じて追加 工を組み上げた。制御系の立ち上げや制御ソフトウエアの作成をして、遠隔操作で駆動系を制御 できる構成にした。ファーストライト後は試験観測を行い、装置の性能評価を行った。装置の性 能はほぼ設計どおりであり、通常観測に問題なく利用できることが分った。

# 参考文献

- [1] 千代延真吾 (広島大学 修士論文 2007)
- [2] 上原岳士 (広島大学 修士論文 2009)
- [3] 山下泰正「経緯台望遠鏡の写野回転補正に関する諸問題」(国立天文台報 vol.2,No.1 1993)
- [4] 上原麻理子「広視野グリズム分光撮像装置 (WFGS2)の開発」(名古屋大学 修士論文 2004)
- [5] landolt1991,AJ,104,340
- [6] Massey et al. 1998, Apj, 328, 315

# Appendix. A



図 A.1: HOWPol 制御系ブロック図

# Appendix. B



図 B.1: 制御ケーブル設計図1



ĝ	部品名	台룦껑뗥	督教
0	コネクタ	DC-37PF-N	1
0	7-1:	DC-C8-J13-F11R	1
3	ルーブル	EXTTYPE2SB AWC22 15P	1
9	七期髪田薩人	BVF0.3-3YE	19



図 B.2: 制御ケーブル設計図 2



御教	2	-	6	1	1	10	1	8	-	ŝ	-	ŝ
<u> 형요 같</u> 두	DA-15PF-N	DA-15SF-N	DA-C8-J10-F11R	EXTTYPE2SB AWG22 10P	EXTTYPE2SB AWG22 10P	BVF0.3-3YE	5557-10R-50PS	5556TLS	molex 51103-0500	molex 50351-8100	Tyco Electronics AMP 171822-5	Tyco Electronics AMP 170204-2
部品名	コネクタ(CN1,CN2)	=7-752(CN3)	オート	リバムーチ	るれチーチ	- 大款乗 王 森人	<i>んべいたい も</i> んまこ	コンタクト	<i>んべいたいを</i> 4キロ	オイダイト	ムベビウハタクチロ	12/2/1
NO.	0	0	6	0	9	0	6	8	6	¢	0	8



図 B.3: 制御ケーブル設計図 3