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

広島大学理学研究科

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室博士課程前期2年 千代延真吾

2007年2月15日

概 要

広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台が狙う主なサイエンスにガンマ線バースト(GRB) の可視偏光を用いた物理現象の解明があげられる。GRBは宇宙最大規模の爆発現象であり、超新 星爆発のコア部などで発生した超高速のシェル同士ないしはシェルと星周物質との衝突による衝 撃波によって生み出されると推測されている。 最近のGRBの研究の進展には、ガンマ線より長 く輝く、X線や可視光、電波などの「残光」の観測が大きく寄与している。現在も世界中で多く の可視近赤外望遠鏡が残光の観測に活躍しているが、アラートに即座に反応して観測する1m超 の望遠鏡はまだ稀少で、しかも明るさ(エネルギー)を測るだけの機能しか持ち合わせていない のが現状である。東広島天文台に備えられた口径1.5m かなた望遠鏡では、GRBに特化した観測 システムを構築し、突発天体に対し「偏光」という新たな手法でサイエンスを行う計画を進めて いる。残光の偏光成分には衝撃波領域の幾何学や磁場構造に関する情報が含まれている可能性が 指摘されており、残光の偏光を観測することによって、これまでわからなかった GRBの星周構造 や磁場構造の解明が期待される。

広視野偏光撮像装置(HOWPol)は、かなた望遠鏡への装着を前提として突発天体用に開発が 進められている直線偏光装置である。本装置の最大の特徴は、偏光素子ダブルウォラストンプリ ズムの搭載である。偏光測定において、1点の偏光データは最低4方位の偏光成分の測定が必要 である。従来の偏光装置では、偏光情報を回転させる半波長板と2方位に分かれるウォラストン プリズムを組み合わせることにより4方位のデータを取得している。直線偏光を記述する全パラ メータを得るためには半波長板を回転させて1回あたり10秒オーダーのCCD読み出しを含む数 回の露光を行う必要があるので、激しい時間変動を示す天体に対しては十分な時間分解能を得ら れない。HOWPolで使用する素子は、ウォラストンプリズムを2つ組み合わせた素子であり、一 度の露光で4方位の情報を取得できる。これによって、GRBなどの変動スケールの短い天体に対 する、偏光観測が可能になる。

今回の研究では、HOWPolの器械系および駆動系の開発を行った。15分角視野にわたり直径0.6 秒の星像が得られる広視野撮像系の設計を基に光学素子の配置を決め、それらを完全リモート制 御しうる駆動系とそのステージ類、および筐体全体を、3D CAD SolidWorksを用いて独自に設計 した。開発要素としては以下の項目が挙げられる。

- 1. 公差 20 µ m 以内のダブルウォラストンプリズム位置決め精度
- 2. 偏光分光、偏光撮像モード対応のため、多数の素子・それに伴う駆動系の搭載
- 3. 光学調整およびメンテナンスのための内部アクセス容易化
- 4.素子切り替え時間と CCD 読み出し時間を同程度にすることによる観測効率向上

本装置はナスミス焦点に取り付けるため、第三鏡反射による非対称器械偏光の影響が避けられ ない。この器械偏光を正しく差し引くためには、偏光素子の位置決め精度を再結像光学系におけ る瞳像収差50 µ m の半分以下に抑える必要がある。これは、部品の選定、駆動法に対し特別に注 意することで実現している。また、有限要素法解析と併用して装置ジオメトリの最適化を行うこ とで、結像面でのたわみを最大 0.07mm に抑えた。これにより望遠鏡位置によらず初期の結像性 能が達成すると期待される。

本装置とかなた望遠鏡の高機動性との組み合わせで、GRBの極めて初期の残光を世界に先立って偏光観測することが可能になる。偏光測定精度は、可視Rバンド16等級の残光を10分露出した場合で0.2%である。

目 次

第1章	東広島天文台とガンマ線バースト	8
1.1	東広島天文台とかなた望遠鏡・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
1.2	ガンマ線バースト	10
第2章	広視野偏光撮像装置HOWPol	12
2.1	偏光で探るガンマ線バーストの物理...............................	12
2.2	偏光装置HOWPol	12
2.3	世界の偏光観測器と HOWPol のユニークさ	13
2.4	光学系と一露出型偏光計	14
	2.4.1 再結像光学系	14
	2.4.2 装置設置焦点に関して	16
	2.4.3 ウォラストンプリズムとストークスパラメータ	20
2.5	初期性能と要求される工作精度	21
2.6	本研究の目的	21
第3章	筐体および制御糸の設計 1921年 - 10月1日 - 10月11日 - 10月110日10000000000000000000000000000000	23
3.1	観測モードと光字糸レイアワト ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
3.2		23
	3.2.1 再結像光学系	23
	3.2.2 較正用半波長板	24
	3.2.3 フィルター	25
	3.2.4 ダブル・ウォラストンプリズム	26
	3.2.5 シングル・ウォラストンプリズム	27
	3.2.6 グリズム	27
	3.2.7 光学瞳	28
	3.2.8 瞳調整用レンズ	28
3.3	光学素子等の配置と駆動機構................................	29
3.4	筐体の設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
	3.4.1 SolidWorks \angle COSMOS Works	31
	3.4.2 筐体設計	31
3.5	制御系の設計	33
	3.5.1 マスクターレット	33
	3.5.2 半波長板・シングルウォラストンプリズム部	34
	3.5.3 フィルターターレット部	36
	3.5.4 光学瞳・シャッター部	37
	3.5.5 グリズム・ダブルウォラストンプリズム部	40

	 3.5.6 デュワー・検出器用焦点調整機構	41
第4章	デザインにおける性能評価	43
4.1	結像面のたわみ評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
	4.1.1 ナスミスローテータによる回転から要請される結像面変位許容値	43
	4.1.2 COSMOS WORKS による解析結果	45
4.2	筐体とトラスの応力評価	48
	4.2.1 筐体・トラスの許容応力	48
	4.2.2 COSMOS WORKS による解析結果	48
4.3	筐体のたわみを考慮した光学系の結像性能	50
第5章	まとめと今後の課題	54
第6章	謝辞	55
Appen	dix. A	57
A.1	モーター・直動機構の技術的計算	57
	A.1.1 位置決め時間と加減速時間	57
	A.1.2 平歯車における加速トルク	57
	A.1.3 直動機構における負荷トルク	59
	A.1.4 E - 9	60
	A.1.5 スライドガイド	61
	A.1.6 ボールねじ	61
A.2	グリズム・ダブルウォラストン用高精度リニアシステム...........	62
Appen	dix. B	65
Appen	dix. C	66
Appen	dix. D	73
D.1	ナスミス焦点における写野回転角	73
Appen	dix. E	75
E.1	レンズの Decenter と Tilt について	75
E.2	レンズセル内のレンズ傾き測定	75

図目次

1.1	東広島天文台に設置されたかなた望遠鏡	9
1.2	BATSE で発見された全天のガンマ線マップ	10
1.3	ガンマ線バースト模式図	11
2.1	CCD 量子効率	13
2.2	光路概観図	14
2.3	望遠鏡の焦点	18
2.4	ナスミス器械偏光グラフ	19
3.1	観測モード概観	23
3.2	半波長版....................................	24
3.3	フィルター透過曲線	25
3.4	狭視野用ダブルウォラストンプリズム..............................	27
3.5	VPH グリズム	28
3.6	各素子・装置の配置レイアウト	30
3.7	SolidWorks	31
3.8	滑節と剛節のトラス	32
3.9	マスクターレット・プリロード機構..............................	33
3.10	マスクターレット概観図	34
3.11	EE-SX91 位置決め精度のグラフ	35
3.12	半波長板・シングルウォラストンプリズム概観図	35
3.13	フィルターターレット概観図................................	36
3.14	フィルターターレット用モーターの周波数特性...............	37
3.15	フィルターターレット概観図 2	38
3.16	メレスグリオ 薄型シャッター	39
3.17	絞り部概観図	39
3.18	グリズム・ウォラストンプリズム部の外観図	40
3.19	モーター特性	41
4.1	たわみの模式図	43
4.2	ローテーター回転に伴う星像トレース模式図	44
4.3	ナスミス・インストゥルメント・ローテーター回転速度..........	44
4.4	回転と許容変位	45
4.5	モデルへの拘束と荷重	46
4.6	HOWPol 变位分布図	47
4.7	ひずみ-応力分布図	48

4.8	HOWPol 応力分布図	49
4.9	レイトレース・イメージ	50
4.10	焦点面スポット	51
4.11	80% Encircled Energy 半径	52
A.1	加減速時間	57
A.2	軸系の一例	58
A.3	AC 電源とDC 電源によるトルク特性の違い	60
A.4	スライドガイド SolidWorks による CG	61
B.1	HOWPol 簡易ブロック 図	65
C.1	HOWPol 前景	67
C.2	グリズム・ダブルウォラストンプリズム部	68
C.3	半波長版・シングルウォラストンプリズム部	69
C.4	フィルターターレット部	70
C.5	前方レンズセル	71
C.6	後方レンズセル	72
D.1	写野回転角	73
D.2	写野回転角	74
E.1	Tilt \succeq Decenter	75
E.2	レンズ傾き測定法....................................	76
E.3	測定作業時の様子....................................	76

表目次

1.1	かなた望遠鏡の仕様	9
2.1	HOWPol の基本性能	3
2.2	世界で使われている主な低分散偏光装置	4
2.3	仕様比較表	5
2.4	レンズ水平方向指定公差	7
2.5	レンズ面傾き指定公差 1	.8
2.6	レンズ偏芯指定公差 1	.8
2.7	各焦点の利点と欠点 1	9
3.1	半波長板仕様表	24
3.2	フィルター仕様表	25
3.3	ダブルウォラストンプリズムの特徴 2	6
3.4	素子・装置の配置表	9
4.1	変位量問い合わせ表 4	8
4.2	像広がり	3
A.1	モーター	60
A.2	HP_GW 用高精度リニアシステム(上部)6	53
A.3	HP_GW 用高精度リニアシステム (下部)6	4
E.1	レンズ偏芯測定値....................................	1

第1章 東広島天文台とガンマ線バースト

1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡

広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台は、広島大学東広島キャンパスから東南東約8km の位置にある福成寺付近の山中に建設された、アクセスの良い観測環境施設である。かなた望遠 鏡は、2006年に国立天文台からこの東広島天文台へ移設された口径1.5mの可視近赤外望遠鏡で ある。このかなた望遠鏡は、国立天文台ハワイ観測所にある大型光学赤外望遠鏡「すばる」で使 用する観測装置の開発・評価をする目的で国立天文台三鷹構内に建設されたものであるが、すば るの第一観測装置開発が全て終了した後、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移管されたという経緯がある。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環境を有したサ イト(福成寺)が確認^{†1}され、その後福成寺周辺へと移設準備が進められた。

かなた望遠鏡で狙う主な研究テーマは、ガンマ線バーストなど突発天体の即時観測による高エ ネルギー宇宙現象の解明である。これは、既に打ち上げられているガンマ線モニター Swift 衛星が ガンマ線バーストを検出した時にインターネット^{†2}を通じて発するアラートを受信して、天体の 座標を特定し、自動的に追尾観測することである。2007年にNASAから打ち上げられる次世代 ガンマ線衛星GLASTとも同様の連携を予定している。また、2005年に打ちあがったX線衛星 Suzaku などと連携して同時多波長観測を行い、宇宙におけるさまざまな物理現象の研究も推進し ていく。

ガンマ線バーストなどの突発天体は、その発生後から劇的に光度が減少し、観測が困難になる。 このため、これらの天体を観測するためには発生後にいち早く望遠鏡を向けることが要求される。 かなた望遠鏡はガンマ線バーストの観測に対応するため、移管された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機動性能を持つ。これは口径 1.5 mクラス の望遠鏡では世界最高水準の速度である。もちろん、世界にはかなた望遠鏡より高い駆動能力を 持つガンマ線バースト専用光学望遠鏡が多数存在するが、その大部分が 0.5m 以下の小口径望遠鏡 である。小口径の望遠鏡は、その口径ゆえに十分な光量を集めることができない。そのため、光 量を要求する分光観測・偏光観測などができず、ガンマ線バーストの即時観測は測光観測のみしか 行えていないのが現実である。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一回り 大きな口径を有しており、明るいバーストに関しては、測光観測以外に偏光観測が可能と見積も られる。このアドバンテージを生かし、東広島天文台では、偏光観測の可能な装置を開発し、突 発天体に対し「偏光」という新たな手法でこの現象を解き明かそうとしている。

^{†1}2004-2006年にかけて行われた調査で、典型的に 1.1秒角という良好な値を得ている

^{†2}Gamma-ray Burst Coordination Network(GCN)



図 1.1: 東広島天文台に設置されたかなた望遠鏡

中央に見えるのが 1.5m の主鏡である。色は青と緑色で広島大学の色をイメージしてある。 下に見える小さい円筒状のものは、口径 20cm のセレストロン製同架望遠鏡である。左右にあ る台がナスミス台。現在、片方には京都大学の高速カメラが設置してある。もう片方には、今 回開発する広視野偏光撮像装置 HOWPol が載る予定である

項目	仕様		
光学系	リッチ・カセグレン光学系		
主鏡	有効径 1500mm/主鏡のF比=2.0		
焦点モード	カセグレン焦点 (F/12.2)・ナスミス焦点 (F/12.2)		
焦点面スケール	カセグレン 11.25 秒角/mm ・ナスミス 11.25 秒角/mm		
焦点距離	焦点距離 18,300mm		
分解能	1 "FWHM		
視野	15		
最大駆動速度	1°/sec 以上		
最大化速度	0.5 °/sec2 以上		
架台	経緯台方式		

表 1.1: かなた望遠鏡の仕様

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1973年に、核実検監視衛星によって偶然発見された。その後の研究 で、ガンマ線バーストは1日に1回程度の頻度で検出され、宇宙の中で決して珍しくない、あり ふれた現象であることがわかってきたが、その招待はしばらく謎とされてきた。発見から約20年 の間はこの現象が太陽系内で起こっているのか、銀河系の中の現象なのか、その発生源すらも特 定できなかったが、1980年代後半に打ち上げられたガンマ線バーストモニター BATSE^{†3}衛星の 取得した全天のガンマ線バーストマップから、この天体が銀河系外のもの(少なくとも天の川の ディスクから離れて存在するもの)であるという可能性が高いことがわかった。



図 1.2: BATSE で発見された全天のガンマ線マップ

1991年に打ち上げられた BATSE 衛星により、ガンマ線バーストが天球全体にわたってランダムに分布していることを発見した。これにより、ガンマ線バーストは系外のものであることが予想される。

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 した爆発現象(「残光」と呼ばれる)が報告された。1997年には、GRB970508の残光をハワイ島 マウナケア山頂のケック II 望遠鏡が観測し、その可視スペクトル解析で赤方偏移 0.835 という値 を得た。この結果、バースト源は数十億光年という宇宙論的遠方にあることがわかった。

そのような遠方での現象であるにも関らず地球から明るく見えることは、爆発のエネルギーが 非常に大きいことを意味する。ガンマ線バーストの見かけの爆発エネルギーは、超新星のそれを 上回る場合もあり、どのような機構でその巨大なエネルギーが解放されたのか、またガンマ線バー ストとその残光現象の正体は何か、などの謎は完全には解明されてはいないが、現在いくつかの モデルによって説明されようとしている。研究の進んでいない最も大きな原因は、ガンマ線バー ストが予測できない突発現象で、しかも爆発の持続期間が極めて短いという点にある。上述した ように、ガンマ線バーストそのものの持続時間は非常に短く、その一瞬を観測衛星が捕らえて、情 報を GCN を用いて地上の観測者に送り、可視光による残光観測が開始される。残光現象もバース

^{†3}Burst And Transient Source Experiment



図 1.3: ガンマ線バースト模式図

ガンマ線バースト母天体の模式図。ガンマ線バーストの多くは、重い恒星がその一生を終 えて崩壊し、その中心にブラックホールが生まれる際に、超高速・超高温のプラズマ流(ジェッ ト)が放出されてそのジェットが衝撃波を生むことにより発生するのではないかと考えられて いる。

ト同様に持続時間が短く、一カ所の観測所による観測では現象の全体像を把握することは不可能 である。そこで活躍した衛星が2004年に打ち上げられたガンマ線バーストモニター衛星 Swift で ある。Swift はガンマ線バースト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。このの即時アラートによって、全世界の観測所でバース ト発生直後から観測可能な環境を構築することが可能になった。東広島天文台も、GCNのアラー とをソケット通信で受信している。

ガンマ線バーストの放射メカニズムについては、最近の研究でいくつかのモデルが提唱されて いるが、それらのモデルの中で特に有力とされているモデルが「火の玉モデル」である。このモ デルはまず、何らかの原因でコンパクトな領域内に超高エネルギーの火の玉ができた後、光速に 近い速さで膨張するいくつかのシェル状のプラズマ流が外へ向かって流れ出す。このシェル同士 が衝突することでガンマ線を放射し、それがガンマ線バーストになって観測されているという描 像である。この星間ガスとシェルとの衝撃波面から放射される光が残光として観測され、シェル の減速とともに暗くなっていくと考えられている。現在では膨張シェルは等方的ではなくジェット 状であるとする説が有力である。このモデルによって、残光が時間のべきで減光していく性質等 が説明される。最初の火の玉を生み出すものは依然明らかにはなってはいないが、大質量星の崩 壊や中性子星の合体等の説が有力である。また、極超新星が母天体のひとつであることは観測的 に確立している。

第2章 広視野偏光撮像装置HOWPol

2.1 偏光で探るガンマ線バーストの物理

これまでのガンマ線バーストに関する可視光からの典型的なアプローチとしては、バースト直 後に世界中で観測に適した緯度経度帯にある小型のガンマ線バースト専用望遠鏡がその天体に向 けられ、測光が行われるというものである。その結果の速報がGCNへ流されることも多い。そし て、比較的明るい残光が見つかったガンマ線バーストに対しては、大型の望遠鏡で測光ないしは 分光を用いて詳細に観測される場合もある。ガンマ線バーストの初期残光に対する可視光観測が 「測光」という観測手段に限られている理由は、「分光」や「偏光」を観測するにはある程度の光 量が必要で、ガンマ線バースト専用の小型望遠鏡にはそこまでの集光力はないためである。この ため、バースト初期残光に隠れている情報は制限されている。ガンマ線バーストの偏光成分には、 衝撃波領域の幾何学や磁場構造に関する情報が含まれている可能性が指摘されている[4]。近年で 最も明るかったガンマ線バースト、GRB030329を偏光観測した Greiner らは、残光の偏光成分の 時間的発展から、衝撃波面内側に起こる乱流と結びつけてガンマ線バーストの磁場構造を議論し ているが、爆発から10時間以上経過してからの観測であるため、データの意味するところは不明 なままである。[13]。バースト後数分~数十分といったごく初期の残光を偏光観測することによっ て、これまでわからなかった GRB の星周構造や磁場構造の解明が期待される。

2.2 偏光装置HOWPol

広視野偏光撮像装置 HOWPol^{†1}は、広島大学宇宙科学センターで開発を進めている突発天体に 特化して開発を進めている偏光観測装置である。全長はおよそ1m、重量約 200kg の装置となる予 定であり、かなた望遠鏡のナスミス焦点に今後数年にわたり常設される予定である。本格的な偏光 装置は通常、ナスミス焦点に取り付けることはないが、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つ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、偏光装置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 (詳細は 2.5 で説明)。また、検出器には浜松ホトニクスで開発が進められた完全空乏型 CCD を搭 載する予定である。この CCD は長波長域での感度に優れ、1000-1100nm では従来の CCD の 2 倍 以上の感度を持っていることが特徴である (図 2.1)。表 2.1 に、HOWPol の基本仕様を明記して おく。

^{†1}Hiroshima One-shot Wide field Polarimeter

項目			
視野			
検出部	完全空乏型CCD(浜松ホトニクス社製)2k x 4k x 2		
検出波長領域	4500 - 11000 (可視域)		
モード	撮像モード、偏光モード、簡易分光モード		
フィルタ	広帯 域 (B,V,Rc,lc,z')、各種狭帯域		
限界等級	測光モード (10min exp.S/N=50)20.0mag		
	偏光モード (10min exp;δP=0.2%)16.4mag		

表 2.1: HOWPol の基本性能



図 2.1: CCD 量子効率

2.3 世界の偏光観測器とHOWPolのユニークさ

ここで、天文分野における世界の主要な偏光装置を紹介する。日本国内においては、国立天文台 岡山天体物理観測所(口径1.8m)で使われている装置 HBS^{†2}がある。HBS は国立天文台や東北大 学などのメンバーの開発した低分散偏光分光撮像装置で、1997 年から国立天文台堂平観測所にて 共同利用観測が始められ、現在は岡山観測所にて利用されている。岡山観測所は共同利用機関で あり、あらかじめ決められたスケジュールが運用がなされているほか、HBS のほかに KOOLS^{†3}や ISLE のようなカセグレン焦点用装置があり、HBS を使用する際には、他の観測装置と交換してカ セグレンに取り付けなければならない。HBS と同様に、他の偏光装置も多くが運用スケジュール の決められた共同観測所に設置してあり、偏光装置が常時設置された観測所はほとんどないと言っ てよい。これは、即時観測が必要なガンマ線バーストなどの突発天体に対して、偏光観測が対応 していないことになる。ガンマ線バーストの偏光観測に関しては、世界的に見ても HOWPol とか

^{†2}Henkou Bunkou Sokkou

 $^{^{\}dagger 3}\mathrm{Kyoto}\text{-}\mathrm{Okayama}$ Optical Low-dispersion Spectrograph

装置名	観測モード	観測所	望遠鏡口径	常時搭載	即時対応
HOWPol	偏光分光	東広島天文台	1.5	可能	不可
HBS	偏光分光	岡山天体物理観測所	$1.8\mathrm{m}$	不可	不可
HiVIS		AEOS Telescope	$3.67\mathrm{m}$	不可	不可
FOCAS	偏光分光	すばる望遠鏡	$8.2\mathrm{m}$	不可	不可
FORS	偏光分光	VLT	8.2m x4	一台のみ可	不可
ESPaDOnS	偏光分光	CFHT	$3.4\mathrm{m}$	不可	不可
HPol	偏光分光	Wisconsin 大学	0.91	可	不可

表 2.2: 世界で使われている主な低分散偏光装置

2.4 光学系と一露出型偏光計

2.4.1 再結像光学系

HOWPolで要求される光学系仕様を表??で記すが、この条件をすべて満たす再結像光学系の自前での設計は困難であるため、われわれはレンズ系設計業者である(株)レンズ屋に設計を依頼した。レンズ屋でされた設計値を併せて表 2.3 に載せておく。またその光学設計概観図を図 2.2 に載せる。



図 2.2: 光路概観図

図??において、左側が望遠鏡本体側になっており、F値(焦点距離望遠鏡の口径)12.2の収束 光の天体光が入ってくる。一般に、可視近赤外の分光装置はコリメーター、カメラの2種類のレ ンズ群で構成される。望遠鏡焦点の後に平行光を作るレンズ群がコリメータレンズで、図では第 I群、第II群がそれに該当する。また、平行にした光を再び再結像させるレンズ群がカメラレン ズで、図でIII群、第IV群がそれに該当する。平行光の中には広帯域フィルター・狭帯域フィル

	項目	仕様	設計値
	····································	赤外シミュレーター	
	刈豕 呈尾蜆	R C 鏡 D=1540mm F/12.2	
	仕様波長域	$450 < \lambda < 1100$ nm	
绐	視野	15 分角	
<u>7</u> 4		1 画素 15 μ m ²	
条	使用CCD	画素数 2k x 4k x 2	
件		受光サイズ 61mm ²	
	望遠鏡焦点から結像面ま	780mm 以下(できれば 750-	748.63mm
	での距離	760mm)	
	合成F値	6.1~9.15(最適は6.9)	6.9
	平行光部	175mm 以上(できれば200mm 以	266.1mm
		E)	
	瞳像直径	33mm 以内 (できれば 31mm	23.9mm
		以内)	
	$400 < \lambda < 450$ nm 透過率	30%以上(できれは40%以上)単	25mm
			2004
	450< λ <1100nm 透過 率	45%以上(でされは60%以上)単	38%
*			140
 	カメラレンス焦点距離	150~250mm 柱度	148mm
与タ	80%Encircled Energy	0.6 秒用以下	0.6 秒用 プリブノのわいたさ
示	$(450 < \lambda < 1100 \text{nm})$	(じされは 0.4 秒用以下	ノリスムのないとさ
1+	倪野王山		
	亚に北辺へほんオス美ス	(mm 厚 10 頃科 BK / 奴 VDU グリブム	
	平门元部へ挿八りる系士	VFn クリスム ウュニストンプリブル	
	ディフトーション		2 10%
	5121-232	3/0以内 相野 75 magging 2 に対する時間の	$\frac{2.4}{0}$
	瞳像の収差	1951 T. Jarcsset に対する理相の 80% Engine lod 百谷が 30 μm 以	450 × 1100mm
			C 02 µ III
		(450 < <1100 nm)	$600 < \lambda < 1000$ nm
			7 32 II m
			~ ⁰ ² P ^{III}

表 2.3: 仕様比較表

ター、シングルウォラストンプリズム、半波長板(reterder)、シャッター、ダブルウォラストンプ リズムといった光学素子等が入る。各素子の詳細は第3章にゆだねるとする。

平行光中に光学素子を配置する理由は、最終的に結像する像のムラを低減させるためである。光 学素子は、真空中に配置するわけではないため、その表面に塵や埃が微細ながらも付着する。普 通であれば、この塵や埃は焦点面でうっすらと影を落とし、測定結果にわずかながら影響を与え る。平行光中に素子を置く事で、その塵埃の像がぼけが最大になり、そのムラを最小限に抑える ことができる。

また、このような再結像型の光学系ではある点に瞳像^{†4}ができる。瞳面に映る像は望遠鏡の主鏡 像である。つまり、天体の光によって照らされた望遠鏡の鏡の像が映る。この面は望遠鏡焦点面 の任意の位置にある天体像ビームが一様に通るという非常に特殊な面である。瞳像では通常、強 い波長依存性を示すが、HOWPolでは450-1050nmの白色光に対し収差50 µ m以下に抑えた良 好な瞳像が形成される。この面にはHOWPolの最も重要な光学素子であるダブルウォラストンプ リズムを設置する。表??では、各レンズに対する光学設計上の配置公差を示す。設計上の良好な 光学性能を得るためには、最も厳しいもので傾き公差30秒偏芯公差10 µ m となっており、レン ズホルダーの設計、組み込みには注意を要する。

2.4.2 装置設置焦点に関して

本装置をガンマ線バーストの観測に適するものにするには、装置の設置焦点の考察も重要なファ クターのひとつである。かなた望遠鏡などの経緯台式望遠鏡は、焦点に3種類の焦点を持ってい る。このうち、かなた望遠鏡で装置を設置可能な焦点はカセグレン焦点とナスミス焦点の2つで ある。図 2.3 にその焦点の位置を示す。

各焦点にはそれぞれ以下のような特徴がある。カセグレン焦点は、主鏡の後ろにあるため、望 遠鏡指向方向により大きく振られる。場合によっては、ほぼ真横になることも想定される。この ため、重い装置や機械精度を要求される装置を載せるには適さない。また、装置の大きさが、天 頂方向に望遠鏡が向いたときの姿勢時のカセグレンフランジから床までの距離に依存してしまう ので大きな装置を置く目的でも適さない。ただし、非常にアクセスしやすい場所にあり、装置交換 が容易なことはメリットである。それゆえ、目的のサイエンスにあわせてフレキシブルに装置の 交換が行える。また、この焦点に到達する光が通ってきた光路は、光軸に対して対称な主鏡、副 鏡で反射されて集められた光であるので、器械偏光の影響が非常に小さい。このため現存する多 くの偏光装置は、カセグレン焦点で用いられている。

これに対してナスミス焦点は、望遠鏡の指向方向に関係なく焦点が定まる。このため、カセグ レンに比べて装置を安定させて配置できるため、比較的大きな装置を取り付けることが可能であ る。また、アクセスの不便さから、装置交換の頻度は少なく、常設装置が鎮座しているケースが ほとんどである。また、高度の変化によって視野の方向が回転する現象が起こる。これは天体か らの光束を第三鏡で 90°はねることで起こる現象である。この回転については計算可能で、ナスミ ス焦点に取り付ける装置については、この視野回転をキャンセルするように逆に回転させる装置 を介して取り付ける。この回転機構をインストゥルメント・ローテータとよび、ナスミスフラン ジと装置との間に設置される。視野回転については、Appendix.D について触れている。

^{†4}ある離れた二つの天体(点源)を撮像するとする。この天体からやってきた光は、それぞれ違う光路を通り、焦点面に2つの点を作る。焦点を少しずらせば作成されたこれらの点はぼやける。ある面になると、2つのぼやけた天体像の輪郭が一致する場所がある。これが瞳である。

Surf	Radius	Thickness	Tol Min	Tol Max
6	Infinity	29.1	-0.1	0.1
7	144	10	-0.1	0.1
8	580	1	-0.1	0.1
9	131	8	-0.1	0.1
10	87.2	184.7	-0.2	0.2
11	271	8	-0.1	0.1
12	87.2	6.4	-0.05	0.05
13	94.5	24	-0.1	0.1
14	-165	128.1	-1	1
15	Infinity	7	-	-
16	Infinity	30	-	-
17	Infinity	50	-	-
18	Infinity	51	-	-
19	770	12	-0.1	0.1
20	-52.6	1.6017	-0.05	0.05
21	-41.8	5	-0.1	0.1
22	157	0.5	0.02	0.02
23	127	16	-0.1	0.1
24	-51.3	76.4	-0.05	0.05
25	180	10	-0.05	0.05
26	-180	61.8	-0.05	0.05
27	-58	5	-0.1	0.1
28	149	10.054	-	-

表 2.4: レンズ水平方向指定公差

Surf はレンズ・空気が接する面のことをさす。この番号は 2.2 のつけた番号の面と一致する。Radius はレンズ各面の曲率半径である。Thickness その面から次の面への距離を示す。Tol Min Max はそれぞれ光軸(水平)方向の指定交差を示す。

Surf	Tilt \mathbf{X}	Tilt X
7	0.05	0.05
8	0.05	0.05
9	0.017	0.017
10	0.017	0.017
11	0.017	0.017
12	0.0083	0.0083
13	0.0083	0.0083
14	0.017	0.017
20	0.017	0.017
21	0.017	0.017
22	0.0083	0.0083
23	0.0083	0.0083
24	0.017	0.017
25	0.017	0.017
26	0.017	0.017
27	0.017	0.017
28	0.017	0.017

Surf	Decenter X	Decenter Y
7,8	0.1	0.1
$9,\!10$	0.1	0.1
$11,\!12$	0.02	0.02
$13,\!14$	0.02	0.02
$19,\!20$	0.02	0.02
$21,\!22$	0.01	0.01
$23,\!24$	0.01	0.01
$25,\!26$	0.03	0.03
27,28	0.05	0.05

表 2.6: レンズ偏芯指定公差

表 2.5: レンズ面傾き指定公差



図 2.3: 望遠鏡の焦点

天体から来た光が主鏡、副鏡で反射され、主鏡の裏側で結ぶ焦点がカセグレン焦点。主鏡 の手前にある第三鏡(45度鏡)ではねられて望遠鏡横に結ぶ焦点がナスミス焦点である。各 焦点は、鏡を差し替えることで使用する焦点を入れ替える。かなた望遠鏡では、第三鏡はモー ターにより遠隔で操作できるようになっている。 ナスミス焦点に関して、もうひとつ重要なファクターがある。この焦点は第三鏡で一度反射されるが、この第三鏡は光軸に対して対称ではなく、鏡面反射による器械偏光が乗ることが知られている。また、この器械偏光は望遠鏡の硬度によって、その方向や大きさが変化する。ナスミス 焦点での器械偏光は E.Giro らによって実測されている。図 2.4 では、その実測された器械偏光グ ラフを示す [14]。



図 2.4: ナスミス器械偏光グラフ

この図では、横軸に望遠鏡指向方向の時角、縦軸にそれぞれナスミス器械偏光のストークス QU を示している。望遠鏡の位置によって、器械偏光が大きく変わっている様子がわかる。HOWPol で得られたデータは、そのときの望遠鏡方向によって器械偏光を差し引き、リダクションするこ とになる。

ここで、各焦点の利点と欠点を表 2.7 にまとめる。

表 2.7: 各焦点の利点と欠点

	カセグレン焦点	ナスミス焦点
最大積載	直径 1.2m x 高さ 1.4m、500kg	長さ 1.5m x 幅 2.0m x 高さ 1.0m、1000kg
利点	アクセスが容易で頻繁な装置交換に便利	望遠鏡高度によらず固定 安定した観測
	器械偏光が小さい	
欠点	望遠鏡高度によって傾く 装置剛性要	アクセスが不便 常備装置向き
	ローテーター 装置外寸・バランスに制限	非対称軸な光学系 詳細な偏光観測は困難

今回、開発した装置は突発天体であるガンマ線バーストの偏光観測に適したシステムにする必要がある。ガンマ線バーストは通常、1日に約1回のペースで起こっている。そのようなバーストの残光がかなた望遠鏡で観測可能(天体入り、天候等を考慮)な状況で、Swiftに捕らえられる頻度はつきに1回程度である。また、いつ大きなサイエンスに直結するようなバーストが発生し

てもおかしくはない。ガンマ線バーストの観測は、バースト後にいかに早く観測するかが大きな キーとなる。このため、他大学の利用希望が多く、装置交換の比較的多いカセグレン焦点よりも、 常設を見越したナスミス焦点への設置が適していると考えられる。ただし、ナスミス焦点には約 3%という大きな器械偏光が乗る。0.1%精度を必要とする偏光観測を行うにあたり、この値は無視 できない。このため、この偏光を正しく差し引くための配慮をしておく必要がある。

2.4.3 ウォラストンプリズムとストークスパラメータ

ウォラストンプリズムは、2つ、ないしは3つの接合された複屈折性を持つ結晶のプリズムから なる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、常光・異常光と呼ばれ る互いに直行した方向に偏光した光に分けられる。

ある天体の偏光パラメータは、ストークス・パラメータと呼ばれるもので定義される。ストー クス・パラメータは以下のように定義する。

電場成分は一般的に

$$\epsilon_x(t) = E_x e^{-i\omega t + i\delta_1} \epsilon_y(t) = E_y e^{-i\omega t + i\delta_2}$$
(2.1)

とあらわされる。この ω のある範囲にわたる平均を用いて、2次元平面上の強度テンソル $T_{ij} \equiv \langle \epsilon_i \epsilon_j \rangle$ を定義すれば、この量が一般の電磁波の偏光の度合を表すことになる。ただし、i,j は偏光面上の2次元基底、x,y のどちらかをとる。この2x2テンソルの成分はエルミート行列になるので、パウリ行列、2x2の単位行列で一意的に展開できる。このように展開した値がストークスパラメータであり、具体的には以下の形をとる。

$$I = \langle E_x^2 + E_y^2 \rangle \tag{2.2}$$

$$Q = \langle E_x^2 - E_y^2 \rangle \tag{2.3}$$

$$U = \langle 2E_x E_y \cos(\delta_1 - \delta_2) \rangle \tag{2.4}$$

$$V = \langle 2E_x E_y \sin(\delta_1 - \delta_2) \rangle \tag{2.5}$$

I は電磁波の強度に比例するパラメータである。その他のパラメータが偏光状態を表すパラメー タである。たとえばパラメータVが0のとき、δ₁ とδ₂が等しいか、もしくは180°ずれている直線 偏光のどちらかである。

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。従来の偏光装置では、半波長板の回転と固定されたウォラストンプリズムを組みあわせることによって、波長板の方位角4方位それぞれで画像を取得し、ストークス・パラメーターを求める必要があった。しかし、この場合、オーバーヘッドタイム^{†5}も1方位ごとに必要になり、1点の観測に必要な時間は、オーバーヘッドタイムだけでも3分間以上かかることになる。ガンマ線バースト初期残光の観測においては、1分間程度の時間分解能が必要になるほか、より暗いフェーズまで観測するために観測

^{†5}検出器の読み出しや波長板の回転に伴う時間で数十~数分かかる。偏光測定では一露光(数秒~数分)ごとに波長 板を回転させる必要がある

効率を最大限にまで高めておく必要がある。これらの問題を解決するため、本装置の光学系には、 Oliva(1997,A&AS,**123**,589)が考案したウェッジ付き多素子偏光プリズムを用い、一露光で偏光測 定を行うことが可能な光学系を実現する。このプリズムは、2素子型のウォラストンプリズムで、 片方の素子の光学軸を45°回転させた状態で結合させ、おのおのプリズムの上面に適当なウェッジ 角を与えて入射光を4分割するものである。これにより、1露光で4方位の情報が取得できること になり、波長版を用いる必要もなくなる。

2.5 初期性能と要求される工作精度

本装置はナスミス焦点に配置されるよう設計される偏光装置である。偏光装置は普通、カセグレン たい取り付けるのが一般的である。この理由は、カセグレン焦点が天体光を望遠鏡の主鏡・副 鏡に対して光軸対称に反射して光を集めるため、カセグレンにつけられる装置瞳像の器械偏光^{†6}は 光軸中心に対し一様に対称になるからである。このため、器械偏光を見積もることで天体領域か らの偏光を見積もることが容易になる。しかし、ナスミス焦点は上で述べたように第三鏡で天体 光を 90°反射させるため、ここで器械偏光は非対称な器械偏光が付加される。

シングルウォラストンプリズムをナスミス焦点に用いる場合、器械偏光は第3強での反射成分 のみを考慮すればよい。というのは、素子全面を使って光を2つに分割するため、基本的に、分 割された常光・異常光それぞれの器械偏光の付加は等しくなる。このため、図**のように、よ くモデル化された器械偏光を特に問題なく差し引くことが可能である。しかし、ダブルウォラス トンプリズムの場合は、瞳像を半分に分割している。このため、理想的に器械偏光を差し引くた めには、瞳像中心に対し、ダブルウォラストンプリズムの中心を一定精度(瞳像収差の数分の一) で合わせこむ必要がある。可視光の偏光観測では、偏光パラメータの偏光度度 P が 0.1%以下の観 測が必要になる。素子が中心から外れた場合、素子内の各ウォラストンプリズムに入射する光の 強度比が変わり、軸対称から外れることで器械偏光が互いに打ち消しあわなくなり、器械偏光が 大きくなることが懸念される。現実の装置では、誤差0で素子の中心をあわせることは不可能で ある。しかし、瞳像はレンズを通過する際、または鏡の影響などで多少の収差を持った像ができ ている。この瞳像のぼけは450-1100nmの波長域で0.052mm程度であることが計算されている。 このため、瞳像中心から0.052mmの幅では、瞳中心の情報が入っているものと仮定し、その範囲 内でダブルウォラストンプリズムの中心を合わせることができれば、問題ないとする。

また、同素子の光軸に対する公差は、結局、素子中心に瞳中心の情報が入るような公差に収め ればよく、装置内の F 値が 12 程度であるので、26 μ m ×12 = 600 μ m の範囲で収めればよい。 通常の金属加工の公差は 0.1mm(100 μ m) 程度であるので、光軸方向に対しては、特別な設計・ 調整を加える必要はない。

2.6本研究の目的

我々は 2005 年までに、15 分角視野にわたり直径 0.6 秒の星像が得られる広視野撮像系の光学設計を行った。この仕様及び設計仕様は表 2.3 にまとめた通りである。この光学設計に併せて、装置に用いるレンズ群の設計及び公差が決定された。この設計後、平行光学系部に実装する他の光学

^{†6}鏡の反射によって付加される天体領域から来る固有な偏光以外の偏光

素子の検討を経て、残すプロセスは、必要なレンズ群・光学素子等を、光学計算で得られた公差内 の精度でいかに配置するかという筐体・駆動系の設計・開発とその後の性能評価の2点となった。

本研究の目的は、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付ける偏光装置 HOWPol の筐体、及び駆動系の開発である。光学計算から得られた公差内に光学素子を配置し、どの望遠鏡姿勢に対しても公差内のたわみに押さえ込み、かつ測定モードをスムーズに切り替えることで、初めて本装置は最大のパフォーマンスを発揮する。最も厳しい公差は偏芯公差において±0.01mm である。この数値は通常の金属加工の工作精度が約0.1mm 程度であるから、この公差を実現するためには配慮が必要である。

第3章 筐体および制御系の設計

3.1 観測モードと光学系レイアウト

本装置の観測モードは偏光モードと簡易分光モードの2種類がある。簡易分光モード時には、半 波長板・シングルウォラストンプリズムとグリズムのペアが用いられ、偏光モード時はダブルウォ ラストンプリズムが用いられる。各観測モードの光学系概観は図3.1を参照。まずは、使用する光 学素子に関して記述しておく。



図 3.1: 観測モード概観

3.2 光学素子

3.2.1 再結像光学系

再結像光学系のレンズ9枚を固定するホルダーは前方のコリメーター系(4枚)と広報のカメラ 系(計5枚)にわけ、共同研究者により設計された。レンズの格納は公差程度に収まるように名 古屋大理学部Z研が所有するオートコリメーターを用いて我々の手で行った。詳細はAppecdix.E を参照のこと。

3.2.2 較正用半波長板

半波長板とは、直交する2つの偏光成分^{†1}に対し、片方の偏光成分のみ位相を半波長分だけずら 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、単純に偏光素子であるウォラストンプリズム以降の光学系を 天体光軸に対して回転することで実現する。しかし実際の装置では、内部の構造や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。この方法を用いるこ とで、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。HOWPolでの半波長板は、ウクライナのAstropribor 社製のものを用いる。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た、高周波数リップル のない新しいタイプの波長板である。



図 3.2: 半波長版

表 3.1: 半波長板仕様表

項目	内容	
材質	Birefringence polymer plate stack	
台材質	Fine annealed optical glass	
波長遅延	$\lambda/4, \lambda/2, \lambda/2.83$	
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	$< 5 \mathrm{arcsec}$	
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	

^{†1}常光、異常光

3.2.3 フィルター

フィルターは観測する光の波長を制限するもので、B,V,R,I,Z計5種類のフィルターを用いる。 光束および器械の制約から直径は60mmで厚さは7mm以内となっている。平行光中で用いるため、ゴーストの回避の目的で10°傾けている。各フィルターともに朝日分光(株)により製作された。仕様とは表A.1に載せ、納品済みフィルターの透過率-波長依存性を図3.3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	
R	AR*OG590(3mm) + 石英 (4mm)*SWP	
Ι	LWP*石英 $(2.5 \text{mm}) + \text{RG610}(2 \text{mm}) + $ 石英 (2.5mm) *SWP	
Ζ	LWP*石英 $(2.5 \text{mm}) + \text{RG695}(2 \text{mm}) + $ 石英 (2.5mm) *SWP	

表 3.2: フィルター仕様表

現在では上記のものに加えて、 H_{α} 、 $H_{\alpha_{-off}}$ 、[OIII]、 H_{β} 、 $H_{\beta_{-off}}$ のフィルターも製作予定である。



図 3.3: フィルター透過曲線

グラフの透過曲線は、光源からの光軸に対しフィルターを 10°傾けた時の透過効率になっている。

3.2.4 ダブル・ウォラストンプリズム

ウォラストンプリズムに求められる最低限の性能として、入射光を偏光面が互いに直行する2 つの偏光成分に分けることのできる機能を要請される。この性能は以下の項目で評価される。

・分離角の大きさ

・分離角の色依存性の小ささ

ガンマ線バーストのような突発的天体に対応した装置は、ある程度の広い視野をカバーする必要がある。これは、バーストした天体の位置情報を伝えるGCNの初期位置決定精度が3分角のオーダーの誤差を持っているためである。バースト天体を即時観測するためには、この誤差を許容できる視野が必要である。偏光素子において視野を広く取るためには、2つの分離光成分が重ならないようにウォラストンプリズムで分けられる常光、異常光の十分な分離角が必要になる。また、分離角の色依存性も注意したい項目である。色依存性が大きく、分離補正が行えなくなるので、広帯域フィルターを介して偏光素子を通した場合、像に伸びが生じる。この伸び具合は常光と異常光で伸び方が違い、データ解析時に障害となって現れる。一般的に結晶は分離角が大きいものほど色依存性も大きいので、最適なものを選ぶ必要がある。材料はMgF2を用いた。

ダブルウォラストンプリズムは、2素子型のウォラストンプリズムで、片方の素子の光学軸を 45°回転させた状態で結合させ、おのおのプリズムの上面に適当なウェッジ角を与えて入射光を4 分割するものである。これにより、半波長板無しで4方位の偏光パラメータを一度に得ることが できる。このウォラストンプリズムはOliva(1997)[12]を参考に独自に設計したものである。Oliva のオリジナルでは、短冊形の短編を4つ並べる配置がとられているが、視野を正方形にして2x2 に並べるためには、上面のウェッジによる角分散とウォラストンプリズムによる分離を直交させる 必要がある。

要求されるサイエンスにより、以下の2種類のダブルウォラストンプリズムを搭載する。

1. 広視野/点光源/波長領域限定

2. 狭視野一露出型/拡散光源対応

1. は、ガンマ線バースト天体初期残光のような位置精度3分角程度で激しい変動を示す天体向 けのものであり、2. はある程度拡がった天体に対応する素子である。各偏光素子の特徴は表3.3 に 記載する。

素子	視野 [arcmin]	色依存による視野中心のスポット重心差(異常光)[mm]
広視野型 拡散光源対応型	7x7(800-1000nm) 15 x 1 (450-1050nm)	$\Delta x:0.092 \ \Delta y:0.357 \ \Delta x:0 \ \Delta y:0.013$

表 3.3: ダブルウォラストンプリズムの特徴

これを見るとわかるとおり、広視野型のウォラストンプリズムは、常光異常光の伸びによる像 の収差を犠牲にしてデータ解析を困難にする代わりに視野を多く取って、突発天体に対応した設 計になっている。対して、拡散光源対応型は、視野の狭さを犠牲にする代わりにデータ解析の容 易さ、且つ偏光較正精度を高めた設計になっている。



図 3.4: 狭視野用ダブルウォラストンプリズム

HOWPol 専用に独自に開発した狭視野用ダブルウォラストンプリズム。製作は(株)光学 技研にて行った。 72×72 (mm)大のケースに入っており、M3のねじでマウントできるように なっている。材料はフッ化マグネシウム(MgF₂)と合成石英(fused silica)で、フッ化マグ ネシウムの色分散を合成石英が補償する構成になっている。

3.2.5 シングル・ウォラストンプリズム

本装置では、一露光型のダブルウォラストンプリズム以外に、将来的に偏光分光観測が可能に なるように従来型のシングルウォラストンプリズムも搭載する予定である。シングルウォラスト ンプリズムは複数回の露出が必要であるため、時間分解能は悪くなるが、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。また、ダブルウォラストンによる観測の較正に用いること もできると期待される。本品は2007年度以降に導入予定である。

3.2.6 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ある。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。本装置には、通常使われる透過型回折格 子ではなく、VPH^{†2}格子という回折効率の高い新しいタイプの格子を用いる。また、観測の目 的にあわせて高分散型・低分散型の2種類のグリズムを用意する。低分散グリズムはプリズムに BK7、VPH 格子 474本/mm の格子を入れる。高分散型は、プリズムに ZnSe を用い、VPH 格子 に 1579本/mm の格子を用いる。各グリズムの VPH 格子は、3mm 厚の BK7 製矩形板に 10 µ m 厚程度の VPH 格子(ゼラチン)が挟まれた状態にする。本品は 2007 年度以降に製作する予定で ある。(写真は SolidWorks による CG)

^{†2}Volume-Phase Holographic



図 3.5: VPH グリズム

3.2.7 光学瞳

主鏡は必ずしも理想の曲率で描かれているわけではなく、外円に行くに従い、理想曲線とずれ てくる。この誤差が光路に影響を与え、光束がわずかに膨らむ。この誤差が乱反射を起こし、結 像性能の低下に影響を与える可能性がある。また、主鏡や副鏡を通らずに直接やってくる光もあ る。結像性能の向上には、それらの光を遮断しておく必要もある。光学瞳は、瞳面に置いて装置 内の迷光が検出器に入ることを防ぐために置くパーツである。中心の貫通穴は23.9 で、これは 光学設計の瞳面23.9 に一致させている。この光学瞳を精度よく装置に配置することで、天体か ら来た光以外の光を除去できる。このパーツを高精度に配置させるため、XYステージで調整でき るような設計をした。現在の設計では、手動式のステージで調整できるようにしてあるが、筐体 のたわみの影響で観測中にリアルタイムに補正する必要も出てくることが予想される。このため、 将来的にシグマ光機(株)製の電動アクチュエーターでXYステージを駆動し、望遠鏡位置によっ て光学瞳位置を補正できるように、XYステージを固定する板にアクチュエーター用のスペースを とって設計を試みた。

3.2.8 瞳調整用レンズ

瞳を光軸に垂直な平面状に対して位置を合わせこむために、瞳調整用のレンズをおく。使用す るレンズは、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。レンズは、NIR II マ ルチコートでコーティングされている。焦点距離は35mm。このレンズは、このレンズの焦点の 位置に瞳面が来るように設置する。このように配置すると、瞳面像はレンズを通ることで平行光 になり、そのあとのカメラレンズ系で検出器面上で焦点を結ぶことになるので、瞳像を直接観察 することが可能である。瞳が理想的な位置とずれていた場合、瞳像(主鏡像)は、瞳に対して隠 れる。このことを目安に、瞳像と瞳が一致する場所を選んで瞳を調節する。

光学素子等の配置と駆動機構 3.3

HOWPolは偏光撮像モードのほか、偏光分光モードを搭載する。この2つのモードを実現する ため、上記の光学素子を表 3.4 のように配置する。

望遠鏡焦点から素 子・装置面までの距	素子・装置	駆動機構
_ 離 (mm)		
0	スリット・マスク	電動回転
294.2	半波長板	電動回転機構 + X
		ステージ
321.5	S ウォラストンプリ	X ステージ
	ズム	
401.5	フィルター 1	電動回転
437	フィルター 2	電動回転
483	シャッター	遠隔自動シャッタ
486.3	しぼり	手動XYステージ
492.35	W ウォラストンプ	高精度 XY ステー
	リズム ×2 + グリズ	ジ
	Д	

表 3.4: 素子・装置の配置表

スリット・マスクは、ターレットによる回転機構で交換する。半波長板とシングル・ウォラスト ンプリズムは2つ同時に使用するので、同じ直動機構の上に載せる。また、半波長板は単独で0°、 22.5°、45°、67.5°と回転させなければならないため、半波長板単独に自動回転ステージを用いて駆 動させる。フィルターは2つのターレット形式で交換する。絞りに関しては手動の XY ステージ で光軸に対し垂直な面上に微調節する機構にした。最後のダブルウォラストンプリズムに関して は、ターレット形式でなく、あえて XY 直動機構を取り入れた。これは、前述したダブルウォラス トンプリズムの瞳分割が理由に挙げられる。通常のターレット形式であると、一軸のみ自由度が 与えられている。装置全体は、望遠鏡の姿勢によってナスミスローテータによって回転する。装 置の自重によるたわみによっては、ダブルウォラストンプリズムの素子中心が瞳像とずれてしま う恐れがある。このため、XY 2軸の直動機構にして瞳中心に要請される精度±0.02mm で微調で きるようなシステムにした。各セクションの設計詳細については次章で述べることにする。



図 3.6: 各素子・装置の配置レイアウト

赤色に塗られている矩形が、配置されるべき素子・装置。下からスリット、半波長板、シングルウォラストンプリズム、フィルター1、フィルター2、シャッター、瞳、ダブルウォラストンプリズム(グリズム)となっている。緑色の矩形はレンズの入るレンズセルである。一番上の青い部分は検出部であり、観測時には CCD の熱励起によるノイズを抑えるため、内部を真空にし、冷却する。

3.4 筐体の設計

3.4.1 SolidWorks & COSMOS Works

設計のモデリングには、SolidWorks2006を用いた。SolidWorks は、ミドルレンジの 3DCAD ソフトウェアであり、Windows マシンで動作する^{†3}。ミスミなど大手部品販売メーカーの多くで は、自ら販売している部品すべてを SolidWorks に準拠した様式でデータ化してあるものを公開 している。このため、既製品の部品は自分で作らなくとも、これらのデータをダウンロードして SolidWorks上で組み立てればよいので、作業効率の非常に高いソフトウェアである。また、この ソフトウェアでは、各パーツに対し材料の指定ができる上、それを基にした質量計算、単一パー ツのみ応力・変位計算ができる。

応力解析などには、COSMOS Works2006 を用いた。COSMOS Works は SolidWorks 用のアド オンソフトウェアであり、SolidWorks に付随している簡易解析ツールよりも複雑な計算をするこ とが可能である。

なお、COSMOS Works は現在広島大学宇宙科学センターで保有していないため、応力・変位 解析は共同研究グループである名古屋大学近赤外天文学研究室(Z研)にて行った。図 A.4 は SolidWorks のスナップショットである。



☑ 3.7: SolidWorks

3.4.2 筐体設計

本装置はナスミス焦点に取り付ける装置である。本装置の筐体に求められる大きな要請は以下の数点である。

- ・完全な遮光と内部の保護
- ・ 自重によるたわみを抑える

^{†3}ある程度高速な CPU、メモリとグラフィックボードを積む必要がある

・ 組み立てた後、光学素子調整のため、装置内部へのアクセスを容易化する

・ 再組み立ての精度を 0.010mm にする。

わずかな迷光でも、数分~数十分露光する場合にはその光がノイズとして現れ、S/N比に影響 を与える。このことから、装置の筐体には迷光が入らないよう十分配慮して設計する必要がある。

2つ目の項目について、自重によるたわみを抑えることは、レンズなどの光学系の配置を理想的 な設計に近づける目的がある。光学設計から著しく変位してしまった場合、結像性能に大きな影 響が出る。装置の持つキャパシティを十分に出すためには重要な項目である。

3つ目のアクセス容易化は、装置を組み立てた後のメンテナンスを考慮している。実験室で装置 を組み立て、調整をしても、実験室の状態と実際かなた望遠鏡のフランジに取り付けた状態とで は、装置に入射する光の質など、環境が違う。また、長年ナスミス台での常設を想定されて開発 するものであるため、何か不都合があった場合に、実験室まで装置を持ち運んで分解・調整といっ たことはなるべく避けたい。このため、ナスミス台へ設置された状態で内部のメンテナンスがで きるように工夫する必要がある。

筐体全体を支える天板と筐体本体をつなぐ構造はトラスで構成する。トラスとは、三角形の構 成を基本とし、節点をピンとした構造体である。この構造による利点として、モーメント・せん 断力が発生しないことが挙げられる。本来のトラス節は滑節になっているが、本装置のトラス節 はねじ止めの剛体である。このため、本来のトラス構造に比べてモーメントが発生するが、以下 の近似で剛節のトラス構造も滑節と考えることが可能である。

図 3.8 のようなはりを考える。左図は両端が滑節で、右図は固定支持(剛節)である。両端の支持の水平距離をLに固定したまま δ だけ下にずらす。滑節の場合、図のように"はり"に曲げモーメントやせん断力は発生せずに"はり"が伸びる。 θ の変化は、十分小さく伸びた量が $\sin\theta \times \delta$ とみなせる。この伸びによる"はり"の抗力 F_c は $F_c = ES\delta\sin\theta/L$ となる。ただし、S は断面積、E はヤング率である。



図 3.8: 滑節と剛節のトラス

剛節の場合は、はりの伸びに加えて曲げが発生する。曲げによる抗力を考える。点線 M のとこ ろでは、曲げモーメントが働いておらず、ここを境に 2 本の方持ちばりだが、M のところで作用 と反作用がつりあうので、曲げによる抗力は方持ち "ばり "を $\delta \sin \theta/2$ だけ曲げるときの力 F_b は 簡単に $Fb = (2/L)^3 EI\delta \sin \theta/2$ になる。"はり "にヤング率 E、外形 R、内径 r のパイプを使用し たとしてそれぞれの抗力の鉛直成分を比較すると、

$$\frac{F_c}{F_b} = \frac{ES\delta\sin^2\theta/L}{12EI/L^3\delta\sin\theta\cos\theta} = \frac{SL^2\tan\theta}{12I} = \frac{\pi(R^2 - r^2)/4L^2\tan\theta}{12\pi(R^4 - r^4)/64} = \frac{4L^2\tan\theta}{3(R^2 + r^2)}$$
(3.1)

となる。HOWPol におけるはりの典型的な寸法として、 $L \sim 270 \text{ mm}$ 、外径、内径 ~ 8mm とする。 $\tan \theta$ は一般的に 0.1 ~ 10 であるので、 $\frac{F_c}{F_b}$ は 150 ~ 15000 となり、支える力は引っ張り(または圧縮)力のみいえる。したがって、剛節もかたさの議論では滑節と近似できる。

3.5 制御系の設計

本セクションでは、角光学阻止を固定ないしは駆動する気候の設計について詳しく述べる。な お、設計にあたり用いた駆動機構の技術的計算は Appendix.A で記述する。.

3.5.1 マスクターレット

マスクターレットは、HOWPolの最も望遠鏡側に位置するセクションで、偏光観測のための視 野絞り、及び分光のためのスリットの出し入れが役割になる。スリットはスリット幅 0.2mm であ る。基本的に駆動機構はボールねじによる直動機構よりもターレットなどの回転駆動のほうが簡 単に作ることができる。これは、直動機構温度差で各部品が数十ミクロンほど伸縮を起こし、そ れによって部品間のかみ合いが若干悪くなるが、回転機構はその影響を受けにくいという点があ るためである。回転機構のギアの噛み合わせには、その動作を円滑にするために若干の遊びを入 れて設計してある。この遊びが、温度伸縮を吸収する。

ただし、精密な位置あわせが必要な場合、この遊び分がその装置の位置決め精度を低下させる 原因になる。このため、被回転部品に対して常にある一定のトルクをかけ、モーターとギアを常 に密着させることで精度のよい位置決めを行うことが可能になる。この力をプリロードという。



図 3.9: マスクターレット・プリロード機構

本装置のマスクターレットでは、スリットの最小幅 0.2mm であることから、その4分の1程度 (0.05mm 程度)の位置決め精度が必要になる。ギアの遊びはこれよりも大きい。また、スリット を使って実際に分光をする際の観測時間はおよそ典型的に最大 30分と見積もっている。この間、 天体の位置・時刻によっては、ナスミス台のインストゥルメント・ローテータが大きく移動し、マ スクターレットにかかる重力の変化によって勝手にターレットが回るということも想定される。ス リットは観測中は結像面におけるスポット増の半分程度(~25 µ m)のずれしか許されないので、 マスクターレットにはプリロード機構もあわせて設計して取り付ける必要がある。本装置のマス クターレットでは、図 3.9 のような機構を設計し、プリロードをかける。プリロードのかかるタイ ミングは、スリットのセットされるべき位置よりわずかに手前でスプリングによるプリロードが かかり始めるように設計してある。

以下、設計したマスクターレットの概観図を載せる。



図 3.10: マスクターレット概観図

また、このターレット回転角の原点合わせ用センサには、OMRONのフォトマイクロセンサ EE-SX91シリーズを使用した。このマイクロセンサはコード末端がコネクタ式になっており、脱 着が容易なため、メンテナンスに有利である。また、位置決めの精度が0.020mmと、マスクター レットに必要な分解能を有していることから選定した。ただし、本光センサーの使用波長は950nm である。これはCCDの感度領域であるため、観測時にはセンサーの電源を落とし、光を出さな いよう配慮する必要がある。このため、センサーの電源はPC制御可能なリレーを用いて供給し、 プログラミングによって能率よく使用する必要がある。なお、本セクションを含めたすべてのフォ トマイクロセンサは、すべて OMRON 製の同じ製品を用いており、PC制御、エレクトロニクス 面において取り扱いを容易にしている。

3.5.2 半波長板・シングルウォラストンプリズム部

スリットの次に光が通るセクションが、半波長板とシングル・ウォラストンプリズム部である。 本装置には分光素子であるグリズム(プリズムとグレーティングを一緒にした素子)とダブルウォ ラストンプリズムを同じセクションに集めているため、グリズムとウォラストンプリズムを両方 同時に使うことはできない。このため、偏光分光モード時には一露光型以外にもうひとつ別のウォ ラストンプリズムを配置させ、偏光分光に対応させる。また、ダブルウォラストンプリズムの較



図 3.11: EE-SX91 位置決め精度のグラフ

正用の意味もこめて、従来型のシングルウォラストンプリズムを偏光素子に採用している。従来 型であると、同時に2方位の観測しか行えないため、半波長板と組み合わせることで、4方位の 測定を可能にしている。

偏光分光モードの場合、シングル・ウォラストンプリズムと半波長板は必ず同時に使用する。また、この二つは偏光分光モード時以外では使用しないため、スペースの削減を考えて同じリニア ステージに乗せてセッティングを行えるように設計した。以下の図は、半波長板・シングルウォラ ストンプリズムセクションの概観図である。



図 3.12: 半波長板・シングルウォラストンプリズム概観図

半波長板は22.5°ステップで回転させることが要請されている事項である。また、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、回転角の位置決め精度は0.15°以内が要求され る。回転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、要求を満たしている。

3.5.3 フィルターターレット部

フィルターターレットは、HOWPol の中央に位置するセクションで、狭帯域・広帯域フィルター の交換をする役割がある。ターレットは2枚装備し、各5枚、計10枚のフィルターを搭載可能に してある。

以下、そのフィルターターレットセクションの外観図を載せる。



図 3.13: フィルターターレット概観図

フィルターは、光軸に対し10°傾けて取り付ける。これは、フィルターの表面どうしで反射した 光が同じ光路を往復して、強いゴーストを生じる可能性を減らすためである。

シャフトとフィルターターレットはシャフトホルダーを介して固定してあり、ボールベアリン グはシャフト両端に設置してある。マスクターレットと同様に、軸受けにアンギュラ球軸受けを 用いることで、アキシャル方向とスラスト方向の両方をベアリングで固定し、円滑に動作できる 設計になっている。

また、フィルターターレットの回転精度に関しては、平行光上に位置するため、フィルターの 縁で光をケラない限り、精度に関して問題はない。フィルター交換にかける時間は、オーバーヘッ ド時間を最小限にするため、CCDの読み出しでいる最中に次の測定に移ると想定する。CCD 面全体の読み出し時間は約8秒である。ある一部分の領域のみを転送して読み込む部分読み出し モードでは、それよりも速く読み出しが行われると予想できるため、最長5秒をフィルター交換 に当てる時間とする。

フィルターターレットは、位置決めの精度を良くするため、常に同じ方向に回転させる予定で ある。このため、フィルター交換にかかる時間は、回転方向とは反対側に隣り合ったフィルターへ の交換時に最長となる。フィルターは円を6分割するように配置されているため、ターレットは 5/6 回転で 5 秒の位置決め時間とする。位置決めのための回転速度-時間分布は、マスクターレットと同様に一般的な台形型で計算する。被回転体は、フィルターターレット本体とそれに伴って回転するシャフト類と、ガラス製のフィルター 5 枚を装着した場合を想定する。この被回転体の 慣性モーメントは、SolidWorks上で計算し、計算に組み込んだ。このような仮定の元で得られた フィルターターレット用モーターに必要な加速トルクは、0.096[N/m]、回転数は平均 110rpm 程 度になる。モーターは、オリエンタルモーター製のステッピングモーターを選定した。モーター の周波数 - トルク特性と駆動系の必要トルクとの関係は図 3.15 のようになっている。このグラフ から、モーターのトルクは足りている。



図 3.14: フィルターターレット用モーターの周波数特性

グラフ上の線は、モーターのトルクを表す。グラフ左下の赤矩形で描かれている領域は、 計算によって得られた、この系での回転速度-負荷トルク領域である。この領域がモーターの トルク範囲内に収まっていれば、この系はトルク的に問題はない。上記のグラフはその範囲に 納まっているため、問題ないとした。

このほか、フィルターターレットはメンテナンスが容易になるように、脱着式とした。これは、 HOWPol 装置全体が3つのセクションに分割されており、すべてのセクションに対してアクセス を容易にするには、中央のセクションであるフィルターターレットセクションを抜いて作業でき るようにした方式が、アクセスが容易であると考えたためである。また、フィルターの位置決め 精度は上にも述べたように、ホルダー縁が光をケラない程度であれば問題なく、特に入念な調整 を必要としているわけではないため、脱着式にするのに最も適したセクションであったことも理 由にあげられる。

3.5.4 光学瞳・シャッター部

光学瞳は、瞳面に置いて装置内の迷光が検出器に入ることを防ぐために置くパーツである。図 2.2より、瞳の場所で光束の直径は23.9 と最小になる。この瞳に計算から予想される光束直径と 同じ大きさの絞りを置くことで、余分な光をシャットアウトするよう設計した。また、必要な光も ケラないために、精度0.05mm(瞳面における収差等による光束縁のボケの半分程度の大きさ)で



図 3.15: フィルターターレット概観図 2

フィルターターレットの脱着しているイメージ。ガイドレールには無給湯式ガイドレール を使用している。レールの潤滑材にはモリブデンが含まれているため、スムーズに脱着できる。 また、フィルターターレットの固定には 6-M6 タップを用いて固定する仕様になっている。

あわせこむ必要がある。これを可能とするため、MISUMI 社製の薄型 XY ステージを用いて絞り をあわせこむことが可能にした。

シャッターにはメレスグリオ製の薄型自動シャッターを用いた。口径 23.9 をカバーし、遠隔 操作可能なシャッターは現時点ではこの製品以外に見つからなかったためである。また、必要のな いときに露光をしないために、シャッターの開閉ロジックはノーマリークローズを選定した。これ により、万が一露光時にエレクトロニクス系にエラーが起こり、シャッターに正常な信号が行かな くなったとしても、シャッターは自動的に閉まるため、露光時間超過によるサチレーションが起こ りにくく、光を失うリスクを減らすことができる。



図 3.16: メレスグリオ 薄型シャッター



図 3.17: 絞**り**部概観図

3.5.5 グリズム・ダブルウォラストンプリズム部

このセクションで要請される項目は以下のようになっている。

・ダブルウォラストンプリズムはその素子中心と瞳像中心を2分するように配置する。

この許される公差は± 0.02mm とする

・ グリズム最大 2 個、ダブルウォラストンプリズム最大 2 個を配置できるような構造 にする。

・ 位置決め時間は 20 秒^{†4}を目安とする。

グリズム、ウォラストンプリズムのケースの大きさは 72mm(W) x 72mm(H) の大きさである。 これらの素子をターレット形式にすると大きくスペースを取られ、筐体が一回り大きくなり、全体 のバランスが悪くなってしまう。また、ターレット形式は軸が 方向の軸ひとつであるため、ウォ ラストンプリズムの合わせこみを±0.02mm 以内で抑えるには、角度に関して精密な位置わせが 必要である。また、たとえこの精度であわせこめたとしても、装置の姿勢によっては筐体自重に よるたわみにより、回転方向のみでは補償困難なずれが生じてしまう可能性がある。それらを解 決するために、精密な XY ステージを設計することで以上の問題を解決した。XY ステージである と、駆動装置はターレットに比べて光軸に対しシンメトリーなレイアウトで構築できるため、ス ペースを最小限にとどめることができる。軸はXY方向の2軸で遠隔制御を行い、各軸の位置決 め分解能を±0.02mm 以内に抑えることができれば、コンピューター制御で0.02mm の位置決め をすることは可能である。

以下に設計した本セクションの外観図を載せる。



図 3.18: グリズム・ウォラストンプリズム部の外観図

位置決め分解能に大きく関与する項目は次の3つである。

・ボールねじ、モーターの仕様上の分解能

・ボールねじ・スライドガイドに使われるボールベアリングのラジアル隙間

^{†4}ガンマ線バースト対応時の望遠鏡焦点の切り替え時間

以下、項目別に分けて各項目について検討していく。

・ボールねじ、モーターの仕様上の分解能

設計に用いた直動部品は、精級ボールねじと精級スライドガイドを用いた。ボールねじを使用する直動機構は、大きな減速比を得られるため、数値上では非常に細かい位置分解能が得られる。位置分解能はボールねじのリード *L*[mm] と、モーターのステップ角 *s*[deg] を使って、単純に *L*/360/*s*[mm] とあらわせる。グリズム・ダブルウォラストンセクションに用いたボールねじはリード 2 で、モーターのステップ角は 0.36[deg/step] である。よって、数値上の分解能は 0.020mm である。

・ボールねじ・スライドガイドに使われるボールベアリングの内部隙間

転がり玉軸受の内部すきまは、寿命、振動、音響、発熱等軸受の性能に大きく影響 する。従って、用途に応じた適切なすきまを選ぶことが、重要になる。すきまの種類 としては、ラジアルすきま、アキシアルすきま、角すきまがある。このセクションに 採用したボールねじ、スライドガイドは、いずれもボールに対して与圧のかかった製 品を使用している。これによって、ボールに常に圧力がかかった状態になり、ひずみ が起きず、滑らかな動作が可能になる。その代わり、耐久性は落ちる。

最後に、各直動装置の駆動に選定するモーターのトルク特性と、系の必要トルクをグラフに示 す。以下のグラフから、モーターのトルクは十分足りており、設計どおりの駆動が期待できる。



図 3.19: モーター特性

左グラフは HP_GW 上部モーターの、右グラフは HP_GW 下部モーターのトルクと要請され る必要トルクである。赤矩形内が必要トルクになり、モーター自身のトルク内に入っているの で、トルクに関しては問題がない

3.5.6 デュワー・検出器用焦点調整機構

デュワーは完全空乏型 CCD を搭載する真空冷却装置である。重さ約 15kg、大きさ約 300mm x 500mm(H) となっている。このセクションで要請されている項目は以下のとおりである。

・デュワーの焦点合わせ用ステージ(ストロークは10mm)

・十分な遮光性

焦点調整用ステージは、重量物を扱い、且つ微細な駆動精度を要するため、シグマ光機(株)の 搬用のステージを改造することで電動駆動のステージを実現した。また、微弱な電圧を扱う検出 部を望遠鏡側から来る電気的なノイズから遮断するために、デュワーと自動ステージの間に厚さ 20mmのベークライト板をかませた。アクリル板がデュワーの重さに耐えられるように、デュワー からの止めねじにはヘリサートを介して止められる設計をした。遮光に関しては、ナベル(株)に 依頼して特注で蛇腹を作成した。調整用に10mm ほどステージが動くため、通常の金属製の箱で は遮光することが不可能である。蛇腹を用いることで、光軸方向の動きにも対応した遮光が可能 になる。

第4章 デザインにおける性能評価

4.1 結像面のたわみ評価

すべてのパーツが理想的に組み上げられた場合でも、自重によるたわみは結像性能へ影響を及 ぼす。そのため、設計したモデルにおいて結像面で自重によるたわみがどれほどのものであるか を計算することは重要である。また、このたわみが著しく大きい場合、筐体の厚みやトラスの太 さなどひとつずつ検証していかなくてはならない。以下のセクションでは、結像面のたわみがど の程度許されるかを検証する。

4.1.1 ナスミスローテータによる回転から要請される結像面変位許容値

光学レンズが理想的に配置されたとして、筐体は光学レンズに対して独立にたわむと仮定する。 このとき、検出器は筐体に対して固定されているとする。筐体はナスミスス・インストゥルメン ト・ローテータフランジに対して固定されている。このため、筐体のたわみはフランジ側を中心 に傾く方向でたわみが生じると考えられる。ここで、図4.1のように単純にθだけ傾くとする。



図 4.1: たわみの模式図

このたわみによって検出器の位置が理想的な位置からxだけずれるとする。たわみによる傾き θ は非常に小さいので、xは以下のように近似できる。

$$x = D\tan\theta \tag{4.1}$$

Dは、ナスミスローテーターフランジ面から再結像光学系焦点面までの距離である。この状態で、望遠鏡が視野中心にある天体を追尾することでローテーターが回転する。ローテーターが一周ほど回転したとき、その間に検出器に落ちる星像イメージが描くトレースは半径 x の円を描くと考えられる(図 4.2 参照)。

実際の観測では、露光時間は大きく見積もって最大 30 分程度である。ナスミスローテータの回転速度はターゲット天体の赤緯によってきまる。これは、天球に対し球面三角法を適用することによって計算することができる。計算されたローテータの速度は図 4.3 のグラフで示す。







図 4.3: ナスミス・インストゥルメント・ローテーター回転速度

このグラフでは、天体の赤緯が0°、40°、60°、80°の時を代表にとってローテーターの回転速度を 示している。天体赤緯40°の時に時角0で大きく回転しているのは、経緯台式望遠鏡の座標軸におけ る特異点近くを0時付近に通過するためである。40°を無視すると、多くとも*dP/dt*が20[arcsec/s] 程度の速度で回転している様子がわかる。他のプロットされていない赤緯に関して、この速度よ り大きくなることが考えられるが、ここでは20[arcsec/s]を回転速度の典型値とおく。このように 仮定をおくと、30分の露光で約10°ほどローテーターは回転する。この間、検出器に落ちる星像 は、半径 x の円周上を10°ほどトレースする。

ここで、東広島天文台のシーイングは典型的に1秒角と測定されている。本装置検出器撮像面ス ケールは、0.29arcsec/pixel で、1 ピクセル15 μ m である。このことから、星像は装置検出器上 の 3x3 ピクセル(45x45 μ m)で結像される。このことから、良好なイメージを撮像するには、露 光時間内で検出器上に結ぶ星像イメージの移動が、45 μ m²の領域内に抑えられれば問題はない。



図 4.4: 回転と許容変位

以上の仮定で許される結像面の変位は、 $x \tan 10^{\circ} < 45$ で、単純におよそ 250 µ m 程度と計算 される(図4.4 参照)。今の仮定では光学レンズ系と筐体が独立に設置されているとし、筐体のみ が傾くと仮定していたが、実際の装置ではレンズ系は筐体に固定されており、一緒にたわんでい くものと予想される。しかし、レンズ系がわずかに動くことによって結像面が動いてしまうため、 厳密な計算は難しい。しかし、その場合の結像面と検出器面とのずれは、筐体と光学レンズ系が 独立と考えたものよりは小さくなる。よって、筐体と光学レンズ系が独立であると仮定して得ら れた、筐体のたわみによる結像面変位の数値は、アッパーリミットとして考えることができ、こ の数値よりも小さい変位であれば問題はない。

4.1.2 COSMOS WORKS による解析結果

・ 有限要素法

トラスはりの選定は COSMOS Works2003 で、有限要素法を用いて計算すること により選定した。有限要素法は、計算対象のモデルを微小なメッシュで切り、その節 どうしに成り立つ連立方程式を解くことにより、自重や荷重などによるモデルの変位 を解析的に求める手法である。

・ モデル

本解析に用いたモデルは、図 4.5 で示したモデルである。このモデルは、開発し たパーツを組み上げたモデルではなく、装置全体を一体物とみなしたモデルである。 COSMOS WORKS では、パーツを組み上げたアセンブル形式の解析も可能であるが、 アセンブル形式にすると、形状が複雑になり、メッシュをうまく作ることができない。 また、仮にメッシュを作成できたとしても、非常に多くの要素を持ったモデルになる。 要素が多ければ、それだけ計算するマトリクスも多くなり、計算に時間がかかる。各 パーツがボルトでしっかりと固定されていた場合、剛体とみなして問題はない。ここ では、構造の単純である天板、トラス部、筐体、焦点合わせステージと検出器を一体 物とみなし、モデルとした。また、内部の構造については、その重量分を上面の板に 荷重として加えることで再現した。



図 4.5: モデルへの拘束と荷重

解析条件は図 4.5 を参照しながら説明する。図中中央の赤の矢印が、重力方向を示 している。紫色の矢印は、内部の重量分を荷重として加える方向である。荷重は重力 と同じ方向に加わるので、重力方向と同じ方向へ加えている。緑色の矢印は、拘束条 件である。左の8箇所(円状のもので、図ではそのうち5つが見える)はフランジに取 り付けるボルトによる拘束である。もう一種類ほど、下の面に対して拘束がある。本 装置は左の天板を介して装置を取り付けるわけであるが、図のような重力方向に力を 加えると、天板の上部は装置側に引っ張られるように力を受けるが、半分から下の部 分はフランジの面と天板の面に摩擦が生じ、ほとんど動かない。COSMOS WORKS での面に対する拘束方法は、選択した面全体で拘束条件を定義し、下半分を拘束など という領域を限定した拘束方法はできないため、下の面を拘束するという方法で上記 の状態を再現することにした。

なお。材料の選定はA6061(アルミ材)を使用している。装置に実際使用した材

料は A5052 材であるが、Solid Works 上に A5052 のプロパティが定義されていないこと、また、A5052 と A6061 の材質特性が近い値をとっていることから、A6061 で解析を行った。

解析結果

上記の解析条件で解析を行った結果を図 4.6 に示す。この図は、重力方向の光軸を 通る面で切った断面図である。内部に柱のように見える部分は、内部の構造を一部残 したものである。これは、このパーツをモデルに組み込んだときと組み込んでいない ときで大きく結果が変わった(ファクター 1.5 程度)ことから、装置自重に対する支 えとして大きな役割を果たしていると考え、解析時にモデルへ加えたものである。他 のパーツについては、ほとんど影響はなかったため、上記で述べたように、計算の簡 略化のため削除し、その重量分は筐体上の板に荷重をかけている。



図 4.6: HOWPol 变位分布図

図中に示した 印は、その場所で変位量を測定したことを意味し、表 4.1 で対応した番号と、その場所の変位量を示している。中央からやや右のあたりから図の左端にかけて、赤の矩形で囲まれている領域があるが、これは断面図を描く際、切断する面を指定するためのアプリケーションの描画であり、論文の内容には一切関係はない。右上の色グラフは、本来ならば色グラフの右側に対応する変位量が記述されるはずだが、PCの搭載するグラフィックボードとアプリケーションとの相性が悪く、表示できなかったものである。

#11 は CCD 検出器面上付近の点である。この点の位置は数値入力できず、マウスによるクリックのみで位置が決められるため、正確に CCD 面上に点を打つことはできなかった。これを見ると、CCD 面上の変位はおよそ 54 µ m と推定できる。これは、ナスミスローテータの回転から得られる許容誤差より小さく、問題はないとした。

位置	URES(mm)	Z(mm)
1	2.821e-002	118.6
2	2.865e-002	206.92
3	2.900e-002	296.61
4	3.739e-002	368.37
5	4.108e-002	451.17
6	4.373e-002	526.38
7	4.510e-002	542.25
8	4.738e-002	663.68
9	4.938e-002	700.25
10	5.184 e-002	745.1
11	5.401 e- 002	782.36

表 4.1: 変位量問い合わせ表

4.2 筐体とトラスの応力評価

4.2.1 筐体・トラスの許容応力

このセクションでは、設計したトラスで破壊が起こらないかを確認する目的で、トラス棒にか かる応力の解析を行った。ここで検証する引張り強さについて、説明をしておく。

・引張り強さ

引張り強さとは、材料を引っ張り、破断する強さのことを言う。材料によって、この扱い方は違う。炭素鋼では、引っ張っていくとある程度のところで材料が伸び、戻らなくなり、この地点(降 伏点)からさらに引っ張ると、破断する。アルミニウムなどの場合は、降伏点が存在せず、引っ張 ると伸びが起こらずに破断する。トラスで用いた材料はジュラルミンで、アルミニウム合金であ る。このことから、材料がどこまで耐えられるかを議論する場合には引っ張り強さで議論するこ とが望ましい。



図 4.7: ひずみ-応力分布図

4.2.2 COSMOS WORKS による解析結果

4.8 は応力分布を示す。解析条件は、変位解析で行ったものと同様の条件で行った。



図 4.8: HOWPol 応力分布図

これを見ると、トラス棒にかかる応力は、典型的に $30 \times 10^6 [N/m^2]$ である。ジュラルミンの典型 的な引っ張り強さは、におよそ $400 \times 10^6 [N/m^2]$ [16] であることから、トラスは十分な強度を持っ ているといえる。

4.3 筐体のたわみを考慮した光学系の結像性能

§4.1 では、装置全体の変位解析を行った。この結果により、再結像光学系の各レンズの変位、傾きを予想することができる。この理想からのずれを再結像光学系を光学設計ソフトである ZEMAX で反映させ、筐体の変位がどの程度、結像性能に影響するかを調べた。また、レンズは 2007 年の 1月30日から2月3日にかけて名古屋大Z研にて行ったレンズセル組み上げ後の測定結果もパラメーターに含めた。ZEMAX では、無限遠からの平行光を望遠鏡の鏡、測定値を反映させた装置 再結像光学系を通過させることで得られる焦点面のスポットを見た(図4.9参照)。図4.10 は、焦点面でのスポットダイアグラムをあらわしたものである。上下ある図のうち、上の図は、レンズ セル系、筐体のたわみがまったくない状態を想定したもので、下の図は、レンズセル系、筐体のたわみがまったくない状態を想定したもので、下の図は、レンズセル系、筐体の たわみなどのずれを加えたものである。それぞれ4つのスポットダイアグラムが描かれているが、各左上の図は、視野中心に光源を入れた場合、右上、左下、右下の図はそれぞれ光源を視野の横端、縦端、斜め端(視野は直径15分角で、スポットは中心から7.5分角離れた場所)においたときに得られるスポットダイアグラムである。



図 4.9: レイトレース・イメージ

図 4.11 の上図は、たわみなし、レンズ組み立て誤差なしの場合の 0.45-1.05 μ m 白色光における 80% Encircled Energy 半径^{†1}、下図が筐体たわみ、レンズ組み立て公差をいれたものである。

^{†1}点像の中心(非対称の点像の場合は重心)を中心としたある半径の円内に含まれる光量。点像の全光量を1として 正規化して用いる。





図 4.10: 焦点面スポット



図 4.11: 80% Encircled Energy 半径

この得られたスポットの評価には、東広島天文台のシーイングサイズ・望遠鏡の持つ像の広が りと比較することで検討する。東広島天文台の典型的なシーイングは1秒角である。また、望 遠鏡本体にも、鏡面が理想的な曲面からわずかにずれていることや、副鏡の軸が光軸と理想的に 合っていないことから生じる望遠鏡固有の像の広がりがある。かなた望遠鏡固有の像の広がりは 望遠鏡の初期調整作業で計測されており、直径0.64[arcsec]([17]を参考)である。これらの値は Point-Spread-Functionであるので、その総和は、それぞれの自乗和の平方根をとればよい。また、 HOWPok 装置の持つ像の広がりである Encircled Energy 半径は FWHM に対応する75.8%の半 径をとる。この装置が東広島天文台で動作した場合、以上の計算から総合的に得られる像の広が りは、

$$spread = \sqrt{1.0^2 + 0.64^2 + 78\%} encircled$$
 (4.2)

となる。表 4.2 に、計算された像の広がりを示す。計算した条件は、望遠鏡固有の像広がり、東 広島天文台のシーイングを含めることは前提として、HOWPol 装置のたわみ、レンズセル組み立 て誤差を含めたもの、含めないもので行った。入射する点源は視野中心、縦端の 2 種類で行った。

条件	広がり [arcsec]
視野中心・たわみ無	1.295
縦端・たわみ無	1.324
視野中心・たわみ有	1.298
縦端・たわみ有	1.325

表 4.2: 像広がり

この結果から、たわみ量、レンズの誤差があったとしても、結像性能はの劣化は1%未満に抑え られていることがわかる。このことから、観測的に見ても非常に良好なデータが取れることが期 待できそうである。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けられる広視野偏光撮像装置 HOWPol の筐 体、及び光学素子等交換のための駆動装置開発を行った。3DCAD Solid Works を用いてモデ リングした HOWPol を、COSMOS Works による有限要素法を使い、変位解析、応力解析などを 行った。この結果、筐体のたわみが CCD 結像面で約 50 µ m のたわみを起こした。この数値は、 天体追尾の望遠鏡位置変化によるナスミスローテーター回転から要請される範囲内に収まること がわかった。また、再結像光学系を組み上げ、各レンズの面傾きを測定した結果と、筐体の予想さ れるたわみ量を取り込んだ光学系を ZEMAX 上で再現することで、装置の結像性能を予測した。 この結果、筐体たわみ、レンズセル組み上げ誤差による結像性能の劣化が 1%未満という良好な値 を得ることができた。

現在、広島市内の金属加工業者によって本装置のパーツが加工されつつある。全パーツは2月 中旬から下旬に納品される予定である。今後の予定として、パーツが納品され次第、組み立て業 者と共に装置の組み立て、駆動装置の調整を共同で行っていく。また、較正し終わった装置の筐 体にテーパーピンを打つことで、繰り返し分解し組み立てても、10 µ m の誤差内の組み立てが可 能なようにする。

第6章 謝辞

本装置の開発研究に当たって、まず、このような本格的な装置開発の機会を下さりました、川 端先生をはじめとする広島大学宇宙科学センターの皆様に感謝したいと思います。また、名古屋 大学 Z 研 D3 の上原万里子様、同研究室教授の佐藤修二氏、ならびに助手の栗田三樹夫氏には、装 置開発に必要なノウハウ、COSMOSWorksの使い方などを丁寧に教えていただきました。また、 金属加工技術、設計におきましては、名古屋大金属加工室の河合秀利さんに非常にお世話になり ました。

参考文献

- [1] 仙波 正荘『JIS 使い方シリーズ 新版 歯車伝導機構設計のポイント』(日本規格協会,1988)
- [2] 上原 麻里子『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)
- [3] 栗田 光樹夫『望遠鏡架台の構造解析とその応用』(名古屋大学 博士論文 2004)
- [4] 永江 修 (広島大学 修士論文 2005)
- [5] 川端 弘治 『HOWPol ウォラストンプリズム光学設計報告書』(2005)
- [6] 川端 弘治『赤外シミュレータ観測装置計画』(2004)
- [7] 永田 レンズ屋(株)[®]HU01 光学設計報告書』(2005)
- [8] 山下泰正『経緯代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)
- [9] 『ミスミ FA用部品 カタログ 2006』(ミスミ,2006)
- [10] ORIENTAL MOTOR ²⁰⁰⁵ 年度 オリエンタルモーターカタログ』(2005)
- [11] 創造的設計研究会『実践機械設計 II 中上級編』(工業調査会 2004)
- [12] Oliva et.al, A&AS, 123, 589 (1997)
- [13] Jochen Greiner et.al, Astro-ph/0311282 (2003)
- [14] Giro, E., Bonoli, C., Leone, F., Molinari, E., Pernechele, C., & Zacchei, A.2003, procspie, 4843, 456
- [15] アルミニウム材料の特性データベース http://metal.matdb.jp/jaa-db/(社団法人日本アル ミニウム協会 2001)
- [16] 平田 宏一 『もの作りのための機械設計工学』 http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/design/ (2002)
- [17] 新井 彰ほか『2006 年岡山ユーザーズミーティング年誌』

Appendix. A

A.1 モーター・直動機構の技術的計算

本装置では、光学素子の駆動方式には、ターレットに対しては平歯車、直動機構に対してはボー ルねじを採用している。このセクションでは、これらの部品選定における技術計算について記し ておく。

A.1.1 位置決め時間と加減速時間

ある駆動システムを設計する際に、その駆動系を駆動させるための駆動力を計算する必要があ る。この計算には、加速し始めてから位置決め完了する間の位置決め時間と、加速する時間、定 速で駆動させる時間、減速する時間を決める必要がある。本装置の各セクションで使用する駆動 機構の加減速時間は、図A.1 で記すように、

加(減)速時間 = 0.25 × 位置決め時間

としている。0.25 は機械設計で典型的にとられる値である。



図 A.1: 加減速時間

A.1.2 平歯車における加速トルク

本装置ではターレット形式の回転駆動は平歯車でかみ合わせている。ここでは、平歯車の初期 駆動にかかるトルク(加速トルク)の計算に触れる。

あるモーターに、2つの平歯車が連結されている系を考える。この系の停止状態から負荷トル



図 A.2: 軸系の一例

ク T_L をかけたままで始動させるとする。モーターから発生するトルク T_M と、平歯車を動かすの に必要なトルク T_{L1} との差 $(T_M - T_{L1})$ が大きく、また、この計の完成が小さいほどこの系の定格 回転数に達するまでの時間 t(s) は短い。その関係は

$$t = \frac{\Sigma[GD^2](n_1 - n_0)}{375(T_M - T_{L1})} \tag{A.1}$$

ここで、 n_1 は加速された後の子歯車の定格回転数、 n_0 は加速される前の子歯車の回転数 (rpm) である。通常、 n_0 は 0 である。 T_M はモーターの持つトルクである。モーターの種類に応じてトルクー回転数特性があるが、ここではその平均のトルクを示す。

 T_{L1} は子歯車が n_0 回転で稼動するために必要なトルク T_L をモーター軸へ換算したトルクで、この減速装置の減速比をiとすれば、 $T_{L1} = T_L/i$ である。

 $\Sigma[GD^2]$ はモーターに連動する平歯車などの $[GD^2]^{\dagger 1}$ を自身の中心軸からモーターの回転軸へ変換した $[GD^2]$ を合算したものである。 $[GD^2]$ の値は各歯車メーカーのカタログに記載されている値である。

今回開発するマスクターレット、フィルターターレットのように、オーダーメイドによる歯車の [GD²] はカタログがないためその値は取得できないが、その部品の慣性モーメントを計算する ことにより、その [GD²] を求めることができる。設計した部品の慣性モーメントは、SolidWorks 上で部品をモデリングした後、材料のプロパティー(密度)を設定することにより、部品の慣性 モーメントをコンピューター上で計算した。

慣性モーメントと[GD²]との関係式は以下のようになる。

$$[GD^2] = 4gI \tag{A.2}$$

gは重力加速度、Iは慣性モーメントである。

モーターと平歯車が減速比 i で連結された系を考え、平歯車の $[GD^2]$ を $[GD^2]_L$ とする。平歯車の $[GD^2]$ を平歯車中心軸からモーター軸へ変換した $[GD^2]$ である $[GD^2]_{L1}$ は、以下の式で与えられる。

^{†1}慣性モーメント*I*を実際の機械設計に使いやすいようアレンジしたもの

$$[GD^2]_{L1} = [GD^2]_L \times \frac{1}{i^2}$$
(A.3)

また、始動時にモーターにかかる入力トルクの最大値 T_{STmax} は、

$$T_{STmax} = (T_M - T_L 1) \times \frac{[GD^2]_{L1} + [GD^2]_{L1}}{[GD^2]_M + [GD^2]_{L1}} + T_{L1}$$
(A.4)

である。選定するモーターのトルクは、常にのこの起動時にかかる加速トルクよりも上回らな ければならない。

A.1.3 直動機構における負荷トルク

ボールねじの直動駆動におけるモーターに必要な負荷トルクは次式であらわされる。

$$T = \frac{PL}{2\pi\eta} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{cm}) \tag{A.5}$$

ここで、T は負荷トルク、P は軸方向の外部荷重、L はボールねじのリード(ピッチ) η はボールねじの効率で、力学的モデルの解析で、以下のようにかける。

$$\eta = \frac{1 - \mu \tan \beta}{1 + \mu / \tan \beta} \tag{A.6}$$

摩擦係数を μ 、ボールねじのリード角を β とした。

ボールねじによるワークの定速移動中における、モーター出力軸にかかる定速トルク*T*₁は以下のようにあらわせる。

$$T_1 = T + T_P \frac{3P_L - P}{3P_L} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{cm}) \tag{A.7}$$

ボールねじによるワークの加速中における、モーター出力軸にかかる加速トルク*T*₂は以下のようにあらわせる。

$$T_2 = J_M \omega (\mathbf{N} \cdot \mathbf{cm}^2) \tag{A.8}$$

ここで、 J_M は

$$J_M = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + M(\frac{L^2}{2\pi})(\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$$
(A.9)

モーターの出力軸にかかる総トルクは、A.7とA.8の和で書けて、

$$T_M = T_1 + T_2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{cm}^2) \tag{A.10}$$

である。

表 A.1: モーター

モーター種類	型番	使用セクション	電源
ステップ	AS46AA	マスクターレット	AC
ステップ	ASC36AK	半波長板&Sウォラストンプリズム	DC
		ダブルウォラストンプリズム	
ステップ TH ギヤード	ASC34AK-T7.2	マスクターレット	
5 相パルス	PM5****	焦点合わせ用 Z 軸ステージ	AC

A.1.4 モーター

本装置のモーターには以下の4種類のオリエンタルモーター製パルスモーターを用いている。パ ルスモーターは、電圧の周波数によって回転速度を調節できるモーターである。今回用いた ス テップモーターは、内部にローター位置検出センサーを持っている。これにより、仮に入力され たパルスに対して一時的にトルクが足りず、モーターが回転しない場合が発生しても、内部セン サーがこれを感知し、再びローターを回転させるようにドライバの方へ働きかけるので、脱調^{†2}を 防ぐことができる。また、パルスモーターはモーター自身に保持力があるため、モーター停止時 にハンチング^{†3}を起こさない。これは、観測時に安定した露光をするためには不可欠である。焦点 合わせ用の5相パルスモーターは通常のパルスモーターである。(この2軸ステージは、シグマ光 機(株)に外注した特注モデルであり、業者が選定したモデルである)

使用している電源には AC 電源と DC 電源の 2 種類がある。電源の違いは、周波数ートルク特性に差が現れる。



図 A.3: AC 電源と DC 電源による トルク特性の 違い

図 A.3 から、DC 電源モーターは低周波数のほうでトルクが高く、高周波数に行くとトルクが 落ちる。AC 電源モーターのほうが広周波数にわたって安定したトルク特性が出ている。したがっ て、安定した高機動性を求めるのであれば AC 電源のモーターが適している。しかし、モーター ラインナップ上で AC 電源モデルのサイズは、小さいもので 42mm であり、DC 電源モーターの

^{†2}パルスモーターが入力パルスに同期しなくなった状態

^{†3}モーター停止時のローターぶれ

最小サイズが 28mm サイズであった。本装置は光学設計で定められた限られたスペースで駆動系 を入れなければならず、また、実際にすべての箇所に 42mm 厚のモーターを入れることはスペー ス上設計不可能であったため、28mm サイズの DC 電源を適宜用いることにした。グリズム・ダ ブルウォラストンプリズムセクションに対しては、突発天体観測中にこれらの素子を入れ替える ことはないため、ある程度低速で動作させても問題はない。このため、低周波でしか安定した稼 動を示さない DC モーターでも問題ないとした^{†4}。また、スリット・マスクターレットセクション に対しては内部にギヤーの組み込まれた速度比の変えることのできるモーターを用いている。こ のモーターは通常の DC モーターに比べて若干大きいが、トルク特性が安定しているため、高速 な運転が可能である。

各セクションの各モーターに必要なトルクと、使用したモーターのトルク特性の関係は、次章 のセクション別詳細で記す。

A.1.5 スライドガイド

スライドガイドは、直動機構のレールである。レールとブロックの接点にはボールベアリング が組み込まれており、円滑な動きをすることが可能である。また、シャフトガイドに比べて比較 的重い荷重にも耐える。



図 A.4: スライドガイド SolidWorks による CG

左はスライドガイドの CG である。右図は使用したミニチュアスライドガイド精級グレードの走り平行度曲線のグラフである。

HOWPol で用いたスライドガイドは、ミスミ(株)製のミニチュアスライドガイド(与圧品) を採用している。特に、精度を要求されているグリズム・ダブルウォラストンプリズム部の直動 機構には同シリーズの精級グレードを採用している。

A.1.6 ボールねじ

ボールねじは、直動機構に用いられる部品で、モーターで回転させることにより、直動移動を 可能にする。ボールねじの選定は、動作させるテーブルと、その上に載るワークの質量によって

^{†4}仮選定時には以上の理由から DC モーターを選定したが、実際のトルクは必要トルクに対して十分余裕のあるもの であり、ダブルウォラストンプリズム・グリズムセクションは高速な位置決めも可能である。

ボールねじ本体にかかる荷重がボールねじの定格荷重範囲内に収まるかで判断する。ボールねじ にかかる荷重(座屈荷重)は、オイラーの式によって計算できる。

$$P_k = \frac{n\pi^2 EI}{l^2} \tag{A.11}$$

$P_k: 座屈を起こし始める荷重$

- l:荷重作用点距離 E:ヤング率 (2.06 × 10⁴ N/mm²)
- 1:ねじ谷径断面の最小2次モーメント (mm⁴)
- $l = \frac{\pi}{64} d^4$
- d:ねじ軸谷径 (mm)
- n:ボールねじの支持方法で定まる定数

A.2 グリズム・ダブルウォラストン用高精度リニアシステム

入力事項		単位
テーブルワークの総質量	2.5	kg
摺動面の摩擦係数	0.05	
ボールねじの効率	0.9	
与圧ナットの内部摩擦係数	0.3	
ボールねじの軸径	10	mm
ボールねじの全長	238	mm
ボールねじの材料	7900	鉄
ボールねじのピッチ	2	mm
分解能	0.01	mm/step
送り量	95	mm
モーターのローター慣性モーメント	0.0000027	kg m2
モーターのステップ角	0.36	deg
動作角度	90	deg
位置決め時間	10	sec

表 A.2: HP_GW 用高精度リニアシステム(上部)

計算結果		
必要分解能	1.8	deg
加速時間	2.5	sec
動作パルス数	47500	palse
運転パルス速度	6333.333333	Hz
運転速度	1900	r/min
軸方向荷重	21.35402808	Ν
与圧荷重	7.118009359	Ν
負荷トルク	0.008236338	N•m
ボールねじ慣性モーメント	1.84495 E-06	kg m2
テーブルワーク慣性モーメント	2.5356E-07	kg m2
全慣性モーメント	2.09851E-06	kg m2
加速トルク	0.000381705	N m
必要トルク	0.017236086	N m

入力事項		単位
テーブルワークの総質量	5	kg
摺動面の摩擦係数	0.05	
ボールねじの効率	0.9	
与圧ナットの内部摩擦係数	0.3	
ボールねじの軸径	12	mm
ボールねじの全長	224	mm
ボールねじの材料	7900	鉄
ボールねじのピッチ	2	mm
分解能	0.01	mm/step
送り量	95	mm
モーターのローター慣性モーメント	0.0000027	kg m2
モーターのステップ角	0.36	deg
動作角度	90	deg
位置決め時間	10	sec

表 A.3: HP_GW 用高精度リニアシステム(下部)

計算結果		
必要分解能	1.8	deg
加速時間	2.5	sec
動作パルス数	47500	palse
運転パルス速度	6333.333333	Hz
運転速度	1900	r/min
軸方向荷重	42.70805616	Ν
与圧荷重	14.23601872	Ν
負荷トルク	0.016472676	N•m
ボールねじ慣性モーメント	3.60064 E-06	kg m2
テーブルワーク慣性モーメント	5.0712E-07	kg m2
全慣性モーメント	4.10776 E-06	kg m2
加速トルク	0.000541535	N m
必要トルク	0.03402842	N m

Appendix. B



図 B.1: HOWPol 簡易ブロック図

Appendix. C

このセクションでは、開発した装置の設計図のうち、全体像のわかる各セクションの概観図を 載せる。全設計図は別冊の「広視野偏光撮像装置 HOWPOL 設計図面」を参照のこと。



図 C.1: HOWPol 前景



図 C.2: グリズム・ダブルウォラストンプリズム部



図 C.3: 半波長版・シングルウォラストンプリズム部



図 C.4: フィルターターレット部



図 C.5: 前方レンズセル


図 C.6: 後方レンズセル

Appendix. D

D.1 ナスミス焦点における写野回転角

経緯台では、転調の方向が鏡筒に対して固定されているので、望遠鏡が天体を追尾することに よって、方角が鏡筒に対して回転する。系偉大では、地平座標系で駆動される。天球上の赤道座 標、時角 H、方位角 A、天頂距離 z との座標変換は、次式で与えられている。

 $\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H$ $\tan A = -\sin H / (\cos \phi \tan \delta - \sin \phi \cos H)$ $\tan p = -\sin H / (\tan \phi \cos \delta - \sin \delta \cos H)$



図 D.1: 写野回転角

ここで、 *φ* は観測地の緯度である。 *p* は天体から天頂と天の北極とを見込む角度で、これが写野 回転角である。経緯台の駆動速度は、次式で与えられる。

 $dz/dH = \cos \delta \sin p$ $dA/dH = \cos \delta \cos p / \sin z$ $dp/dH = \cos \phi \cos A / \sin z$

ナスミス焦点では、天体との間に鏡が3枚入る。このため、像面を後方から見た写野は天球を 外から見たようになる。ナスミス焦点では、天頂距離を変えると天頂の方向が回転する。しかし、 方位角によって天頂の方向が変わることはない。

ナスミスローテータの角度の原点を水平、左の方向に取る。ナスミスローテータの写野回転角 *P*は、東ナスミスで P = z + p、西ナスミスで、 $P = \pi - z + p$ となる。





Appendix. E

この章では、2007年1月31日から2月3日にかけて行ったレンズセルくみ上げについて記述 する。

E.1 レンズの Decenter と Tilt について

レンズの各面はある曲率でできている。このため、レンズ面1枚が傾いたとしても、その面は 結局同じ曲率であるので、光学上ではレンズは傾いたことにならない。ただし、傾いたことによ リ、光学上で、レンズ面の中心が光軸に垂直な面に対して平行移動したことと同義になる。この平 行移動量 (Decenter) はレンズ面の曲率半径 R、傾き (Tilt) のを定義すると、Rのとあらわせる。ま た、この平行移動量からみたレンズ面の傾きも同様である。つまり、レンズ面1枚のみでは、レ ンズ面傾きと平行移動量を区別することはできない。



 \boxtimes E.1: Tilt \succeq Decenter

E.2 レンズセル内のレンズ傾き測定

述べたように、レンズ面1枚では、傾きと平行移動量を区別することはできない。よって光学 設計で与えられたレンズ面傾き指定公差と平行移動量指定公差は同義なものである。今回の測定 では、レンズセルにレンズをいれた後、レンズの傾きのみを計測することによって再結像光学系 の調整・評価を行うことにした。レンズの面傾き測定は、以下のようにして行う。図E.2を参照し てほしい。

まず左の図から説明する。測定したいレンズ面に左から平行光を入射させる。この間に、調整 用のレンズを挟み、測定したいレンズ面の曲率にフィットする光波面を形成させるような地点に調



図 E.2: レンズ傾き測定法

整用レンズを置く。このようにすることで、入射した平行光は測定するレンズ面で反射され、入 射した時の光路をたどり、戻る。ここで、レンズを入射光軸に対して回転させても、反射した光 は常に同じ光路を通る。ここで、レンズ面傾きが起こっていた場合の図が右図である。同じよう に平行光を入射させると、返ってくる平行光は、レンズ面傾きによって角度を持つ。この後、測 定するレンズを入射光軸に対して回転させると、平行光は入射光軸に対してある半径の円で回転 をする。この半径をオートコリメーターで測定することでレンズ面の傾きを知ることができる。

レンズセルの構造は Appendix.C を参照のこと。この図面で気づくことは、複数のレンズをまたいで測定する必要のあるレンズも含まれているということだ。測定するレンズの前面にレンズが入っていた場合、光学計算ソフト ZEMAX でレンズ面をシミュレートし、測定するレンズ面で 最適な光波面が形成されるような調整レンズ位置をあらかじめ計算し、測定に望んだ。



図 E.3: 測定作業時の様子

測定した結果は、表 E.1 にのせる。

レンズ番号	曲率半径	指定公差 tilt[arcmin]	測定 tilt
G1 表	144.00	3'	0.9
G1 裏	580.00	3'	
G2 表	131.00	1'	2.3
G2 裏	87.20	1'	1.7
G3 表	271.00	1'	0.9
G3 裏	87.20	0.5'	0.2
G4 表	94.50	0.5'	0.8
G4 裏	-165.00	1'	1.0
G5 表	770.00	1'	—
G5 裏	-52.00	1'	1.5
G6 表	-41.00	0.5'	1.5
G6 裏	157.00	0.5'	0.4
G7 表	127.00	1'	0.4
G7 裏	-51.30	1'	1.0
G8 表	180.00	1'	0.5
G8 裏	-180.00	1'	
G9 表	-58.00	1'	1.4
G9 裏	149.00	1'	1.5

表 E.1: レンズ偏芯測定値