

修士論文

かなた望遠鏡用  
可視近赤外同時カメラ HONIR の  
真空・駆動・光学系の立ち上げ

M086998 先本 清志

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

主査：川端弘治 副査：杉立徹

平成 22 年 2 月 10 日

# 目次

1	序論	1
1.1	東広島天文台とかなた望遠鏡	1
1.1.1	東広島天文台	1
1.1.2	かなた望遠鏡	1
1.1.3	観測装置群	2
1.2	可視赤外線同時カメラ HONIR	5
1.2.1	可視光装置と近赤外線装置	6
1.2.2	設計仕様	6
1.2.3	2009 年年度初頭の立ち上げ状況とその課題点	10
1.3	HONIR で目指すサイエンス	11
1.3.1	XRB	11
1.3.2	Blazar	12
1.3.3	低温度星	15
1.4	本研究の目的	16
2	装置筐体・真空槽	17
2.1	HONIR の真空槽	17
2.2	真空度	17
2.2.1	冷却を決める要因	17
2.2.2	真空到達度	19
2.3	真空保持性能	20
2.3.1	当初の状況	20
2.3.2	真空保持試験	20
2.3.3	ここまで結果と問題点整理	24
2.3.4	He リーク試験	25
2.3.5	真空漏れの原因と対策	27
2.4	冷却性能	28
3	冷却駆動系	29
3.1	設計仕様	29
3.2	駆動性能	29
3.2.1	2009 年度初頭の状況	29
3.2.2	モーターの改造	30
3.2.3	冷却駆動試験	30

3.2.4	モーターの改造と駆動試験	31
3.2.5	冷却駆動系のまとめ	31
4	光学系	32
4.1	設計仕様	32
4.2	光学性能	32
4.2.1	2009 年度初頭の状況	32
4.2.2	設計の再確認と現物調査	32
4.2.3	レンズ系の組み上げと偏芯測定	38
4.3	シャッター	39
4.3.1	要求性能	39
4.3.2	設計	39
4.3.3	シャッター制御系	41
5	まとめと今後	43
5.1	まとめ	43
5.1.1	2009 年 2 月の現状	43
5.1.2	課題の解決・達成状況	43
5.2	今後の課題と立ち上げスケジュール	44
6	謝辞	45
	APPENDIX. A HONIR シャッター設計図	46
	APPENDIX. B TRISPEC を用いた Blazar の偏光観測	56

## 図目次

0.1	真空ポンプタイプの He リークディテクタを用いたリーク試験の様子	1
0.2	真空冷却試験結果の見直し:横軸が時間、実線が真空度を、点線が温度を表している。冷却時の真空度が 1 桁改善した。	1
1.1	東広島天文台	1
1.2	かなた望遠鏡	2
1.3	TRISPEC	3
1.4	HOWPol	4
1.5	高速カメラ	5
1.6	HONIR の光学系	7
1.7	HPK CCD	8
1.8	VIRGO-2K	8

1.9	HONIR の統合制御概略図 . . . . .	10
1.10	XRБ の模式図 . . . . .	12
1.11	XRБ の近赤外線スペクトル ([13]) . . . . .	13
1.12	Blazar の模式図 . . . . .	13
1.13	Blazar の SED([14]) . . . . .	14
1.14	低温度星 (AGB star) . . . . .	15
2.1	HONIR の真空槽の設計図 . . . . .	18
2.2	HONIR の真空槽 . . . . .	19
2.3	真空度を定める要因 . . . . .	20
2.4	2009 年 2 月での真空度：真空冷却保持は二時間で 1Pa( $\cong 10^{-2}$ Torr) 上昇して るのでアウトガス量は $1.04 \times 10^{-6}$ Torr/s である。 . . . . .	21
2.5	真空試験セットアップ図 . . . . .	21
2.6	再現試験結果 . . . . .	22
2.7	入射口をアルミ板に変えての真空冷却試験:2009 年 2 月の試験と同様の真空到達 度であった。真空保持度は $7.667 \times 10^{-6}$ Torr で変化なし。 . . . . .	23
2.8	フランジ・コネクタ部調査後の真空冷却試験 . . . . .	23
2.9	モーターを外しての真空冷却試験 . . . . .	24
2.10	リーク試験のセットアップ図 . . . . .	25
2.11	リークディテクター . . . . .	26
2.12	He リーク試験の実際のセットアップの様子 . . . . .	26
2.13	2010 年 1 月の真空冷却試験 . . . . .	28
3.1	ホイール . . . . .	29
3.2	駆動機構の模式図 . . . . .	29
3.3	ステッピングモーター . . . . .	30
3.4	冷却対応ボールベアリング . . . . .	30
4.1	コリメーターレンズホルダー設計図 . . . . .	33
4.2	可視レンズホルダー設計図 . . . . .	34
4.3	レンズホルダー内のレンズ当てとレンズの模式図 . . . . .	36
4.4	レンズ当て設計のための模式図 . . . . .	37
4.5	レンズの傾きと偏芯 . . . . .	39
4.6	シャッター開閉方法 . . . . .	40
4.7	シャッターの開閉方法：続き . . . . .	40
4.8	アクチュエータの速度を示した図 . . . . .	41
APPENDIX. A.1	アクチュエーター・リニアガイドの基板 . . . . .	46
APPENDIX. A.2	遮光板 . . . . .	47
APPENDIX. A.3	リニアガイド台座 . . . . .	48
APPENDIX. A.4	シャッター筐体横板 A . . . . .	49

APPENDIX. A.5 シャッター筐体横板 B	50
APPENDIX. A.6 図 (APPENDIX. A.6) の穴の拡大図	51
APPENDIX. A.7 シャッター筐体基板 (HONIR 側)	52
APPENDIX. A.8 シャッター筐体横板 C(HONIR 側)	53
APPENDIX. A.9 シャッター筐体横板 D(HONIR 側)	54
APPENDIX. A.10 HONIR への固定板	55
APPENDIX. B.1 BL Lac の QU 平面上での時間変化	56
APPENDIX. B.2 BL Lac の光度曲線と偏光の時間変化	57

## 表目次

1.1 かなた望遠鏡の仕様	2
1.2 TRISPEC の仕様 (視野はかなた望遠鏡に付けた状態のもの)	3
1.3 HOWPol の仕様	4
1.4 高速カメラの仕様	5
1.5 HONIR と TRISPEC の検出器性能の比較	9
1.6 各装置の観測モードの比較	9
4.1 各レンズの光軸上の位置と各公差	35
4.2 レンズ間のレンズ当ての再計算値と設計図との比較	36
4.3 押さえリングの最大押さえ距離	37

## 概要

東広島天文台の「かなた」望遠鏡では、ブラックホール連星などの突発性天体の観測を重点的に行う体制がとられている。突発性天体の研究においてはできるだけ一度の観測で多くの情報を引き出すことが求められる。天体の温度・元素組成・磁場構造などの物理パラメーターを調べるためには、撮像観測の他、偏光観測や分光観測も必要である。放射機構の特定のためには、できるだけ多くの波長帯で観測することも重要である。そこで東広島天文台ではかなた望遠鏡の仕様に最適化した可視近赤外同時カメラ HONIR の開発を進めている。HONIR は可視光と近赤外線の方で同時に撮像・分光モードに加え偏光測定機能を実装した観測装置である。読み出しシステムは国立天文台が開発した MESSIA5 を用いており、検出器は大盤の完全空乏層型 CCD、および HgCdTe アレイ VIRGO-2K を用いている。検出器ノイズやスカイバックグラウンドを低くおさえ、高感度の観測を行うことが可能である。

私はこの HONIR の開発において真空系、駆動系、および光学系の立ち上げを担当した。本研究の目的は HONIR を長期運用のできる観測装置として立ち上げることである。真空系は実験室で真空槽のみでは目標性能 ( $\sim 10^{-6}$ Torr) を満たしていたが、必要なコンポーネントを入れた状態ではアウトガス又はリークが見られた。そこで、各種真空保持試験・He リーク試験を行い、真空漏れの箇所を突き止め、対策をほどこし改善させた。駆動系については冷却モーター・温度センサーユニットの新規作成、シャッターの設計を行った。モーターは常温用のパルスモーターを冷却用に改造して組み込み、問題なく動作することを確認した。シャッターは HONIR の広い視野を損なうことなく、且つ露出ムラが発生しないものを設計して加工業者へ発注した。納品次第組み上げて、制御系の整備を行う予定である。光学系は赤外チャンネルの試験観測時に、収差も大きい状態であることが判明していたので、レンズ系の偏芯調査やホルダーの設計・加工状況の再調査を行い、収差の原因を突き止めた。新しいホルダーが納品次第組み上げて、光学試験を行う予定である。これにより次年度中に 2 バンド同時撮像が開始できる目途が立てられたと考えている。



図 0.1 真空ポンプタイプの He リークディテクタを用いたリーク試験の様子

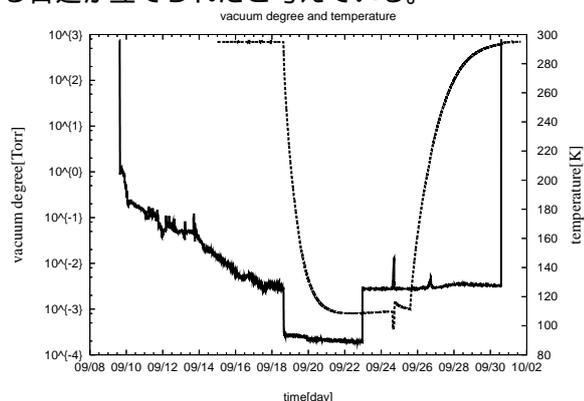


図 0.2 真空冷却試験結果の見直し:横軸が時間、実線が真空度を、点線が温度を表している。冷却時の真空度が 1 桁改善した。

# 1 序論

## 1.1 東広島天文台とかなた望遠鏡

### 1.1.1 東広島天文台

東広島天文台は広島大学宇宙科学センター附属の研究施設である。2003年から2004年にかけて東広島市周辺の四ヶ所でシーイング調査を行ったところ、東広島天文台が建設されたのは福成寺地区は国内でも有数の良いシーイング環境を有していることが判明した(Rバンド平均値 $1.1''$ FWHM)。そこで、ここを天文台建設地と決定し、国立天文台からすばる望遠鏡搭載装置のシミュレーターとして用いられていた望遠鏡を2006年に移設して、目的に合わせた独自の改造を施して観測研究を行なっている。大学から車で20分程度のところにあり、アクセスしやすいことも利点である。図(1.1)に東広島天文台の写真を載せる。



図 1.1 東広島天文台

### 1.1.2 かなた望遠鏡

東広島天文台では、突発天体の即時観測やジェット天体のモニター観測などを主たる研究対象にしており、そのためには高速で動き且つ精度良く天体を追尾をする望遠鏡が求められる。国立天文台の赤外シミュレーターはもともと方位高度とも速度が $1$ 度/秒しかなかったが、方位速度 $5$ 度/秒、高度速度 $2$ 度/秒で動くように改造を施して東広島天文台に移設した。この駆動速度は $1\text{m}$ 級の望遠鏡としては世界最速レベルである。この望遠鏡には公募により「かなた」の愛称が付けられた。図 1.2 にかなた望遠鏡の写真を、表 1.1 にかなたの仕様を示す。



図 1.2 かなた望遠鏡

表 1.1 かなた望遠鏡の仕様

光学系	リッチー・クレティアン系
主鏡の有効径	1500mm
主鏡材	ULE(超低膨張ガラス)
合成 F 値と焦点距離 f	F=12.2, f=18300mm
視野	15'
架台	経緯台
総重量	約 17 トン

### 1.1.3 観測装置群

かなた望遠鏡にはカセグレン焦点、第一ナスミス焦点、第二ナスミス焦点それぞれ1つずつ観測装置を取り付けることができる。現在は TRISPEC・HOWPol・高速カメラがそれぞれの焦点に取り付けられている。

#### ・ TRISPEC

名古屋大学大学院理学研究科 Z 研グループが 8.2m すばる望遠鏡や 3.6mUKIRT で用いるために開発した可視近赤外線同時撮像装置 (Triple-Range Imager and SPECTrograph) である。この装置の特徴は 3 つの波長帯で同時に撮像ができることである。また偏光撮像・分光撮像・偏光分光撮

像も行うことができる。図 1.3 に TRISPEC の写真を示す。



図 1.3 TRISPEC

表 1.2 TRISPEC の仕様 (視野はかなた望遠鏡に付けた状態のもの)

波長域	0.45-2.5 $\mu$ m
視野	撮像 : 7' $\times$ 1.7' 偏光 : 7' $\times$ 1.7' 分光 : 7' $\times$ 3.3" 偏光分光 : 3.3" $\times$ 1.7'
フィルター	B, V, R, I, J, H, $K_s$ , K, L', $H_2$

・HOWPol

広島大学宇宙科学センターがかなた望遠鏡の機動性を活かしガンマ線バーストなどの突発天体の即時偏光観測を目的として開発した一露出型広視野偏光撮像装置 (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) である。この装置は可視の波長帯で直線偏光パラメータの導出が一露出で可能な偏光素子を用いており、同時性の保たれた偏光情報を数十秒の短いタイムステップで得ることができる。さらに測光精度 0.02 等を達成しており、観測モードは広視野撮像、偏光撮像 (広視野型、狭視野型)、分光撮像、偏光分光撮像がある。図 1.4 に HOWPol の写真を、表 1.2 に HOWPol の仕様

を示す。

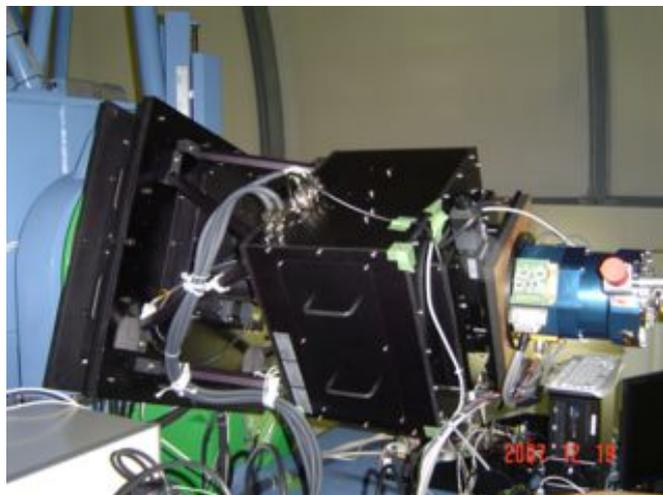


図 1.4 HOWPol

表 1.3 HOWPol の仕様

波長	0.45-1.1 $\mu$ m
視野	撮像：15'×15' 広視野偏光：7'×7' 狭視野偏光：15'×1' 分光：2.3''×15' 偏光分光：2.3''×1'
フィルター	B,V,R,I,Z',H- $\alpha$
偏光素子	Wedged double Wollaston Prism 広視野 (six calsite blocks) 狭視野 (six magnesium fluoride blocks and two fused silica wedges)
偏光分光素子	低分散グリズム (透過型回折格子と 420g/mm,BK7 プリズム頂角 26.7°) 中分散グリズム (VPH 回折格子と ZnSe プリズム) を予定

・高速カメラ

広島大学と京都大学が共同開発をした装置で、かなた望遠鏡の第 2 ナスミス焦点に常設されている。高速読み出しが可能な CCD を搭載することで、最高で 35.8 frame/s の撮像・分光撮像を可能とし、可視光の短時間変動を追うことに特化した装置である。光学系は HOWPol と同等の設計になっている。図 1.5 に高速カメラの写真を、表 1.3 に高速カメラの仕様を示す。



図 1.5 高速カメラ

表 1.4 高速カメラの仕様

波長	0.4 $\mu$ m-1 $\mu$ m
ピクセル数	512 × 512
視野	高速測光:2.6'×2.6' 高速分光:2.6'×2.2"
ピクセルスケール (Opt)	0.32 " /pix
1pixel のサイズ	16 $\mu$ m×16 $\mu$ m
Frame/s	最大 35.8 frames/s(ピンニングなし)
撮像時間	27.1msec-10sec
分光素子	グリズム:430-690nm(R=150), プリズム:400-800nm(R=9-73)

## 1.2 可視赤外線同時カメラ HONIR

可視赤外線同時カメラ (Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) は本論文のテーマとなっている装置であり、広島大学がかなた望遠鏡専用装置として 2006 年より開発・立ち上げを行っている。

### 1.2.1 可視光装置と近赤外線装置

光学望遠鏡を用いて地上観測は、地表まで届く可視光か赤外線の波長帯が主である。観測装置は検出器および観測方法の違いから、可視光装置と近赤外線装置の2種類に大別することができ、さらに装置の目的によっては撮像・偏光撮像・分光撮像に特化されて作られることが多い。まず、可視光装置と近赤外線装置の大きな違いは、装置全体の冷却の要・不要である。

#### ・可視光撮像装置

可視光領域での主たる検出器はシリコンで構成された CCD(Charged Couple Device) である。CCD は内部光電効果により蓄積した電荷を読み出す仕組みであり、読み出しには一定の時間を要するためその間は遮光の必要性があり、シャッターを設ける必要がある。CCD は暗電流と電荷の転送効率の観点からおよそ 170K が最適温度であり、真空容器を用いて冷却をして用いる必要がある。ただし、装置全体を冷やす必要はなく、筐体は赤外装置に比べるとシンプルである。また背景光も少ないため、観測方法も割と単純である

#### ・近赤外線撮像装置

近赤外線検出器は HgCdTe や InSb が使われ、最適温度は HgCdTe が 70-90K で InSb が 30-40K である。装置全体が常温では無視できないほどの近赤外線放射を出してしまうので、冷やす必要がある。光学素子や駆動系を含めた装置のほぼ全体を冷やす必要があることから大型の装置になりやすい。また、望遠鏡周辺および大気による背景赤外線が強く、微弱な天体光を捕らえるために望遠鏡を小刻みに振るなどの複雑な観測法が求められる。さらに赤外波長域で偏光撮像・分光撮像をするためには可視域とは異なる光学素子などが必要となるため、すべてを行える装置をつくらうとすると大型で複雑な装置になり、且つ観測法も入り組んだものになる。

### 1.2.2 設計仕様

HONIR は現在かなた望遠鏡の現主力装置である TRISPEC の後継機として広島大学宇宙科学センターが独自に開発しているものである。HONIR の特徴として以下の点が挙げられる。

- 可視 1 素子・近赤外 2 素子の検出器を有する多色撮像装置である
- 偏光撮像モード、分光撮像モード、偏光分光撮像モードを搭載している
- TRISPEC と比較し広視野且つ高感度での観測が可能である

HONIR の光学系を図 (1.6) に載せる。

HONIR の特徴の一つとして可視 1 バンド・近赤外 2 バンドの合計 3 つの波長帯にわたって同時撮像が可能である点が挙げられる。それを実現させているのが、ダイクロイックミラーである。ダイクロイックミラーとは誘電体の多層膜などの薄膜を鏡面に形成させることで特定の波長帯を反射させ、それ以外の波長帯は透過させることのできる鏡のことである。これを可視と近赤外を分離す

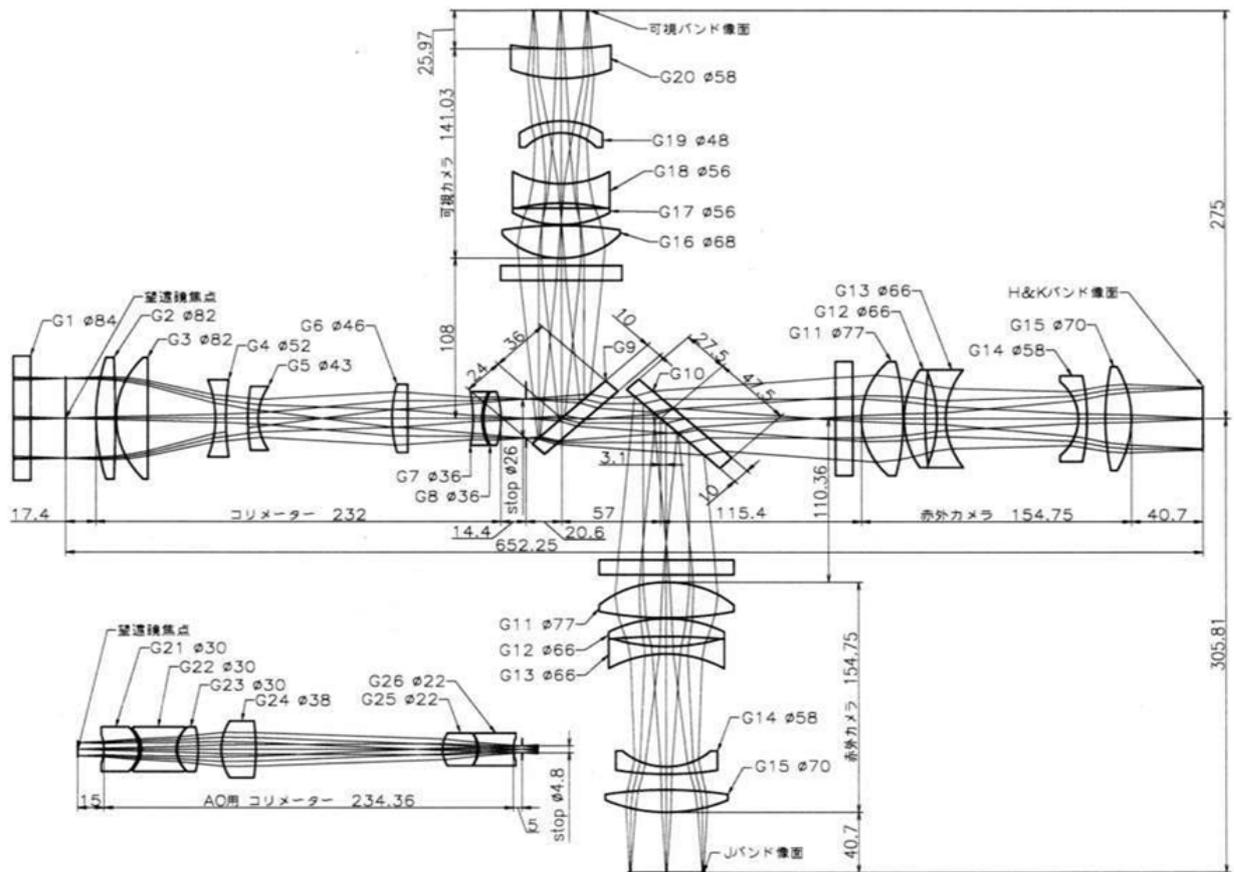


図 1.6 HONIR の光学系

るものと、近赤外を 2 つに分離するものの 2 つのダイクロイックミラーを用いて、それぞれの波長に感度がある検出器を設置することで 3 つの波長帯での観測が可能になる。用いる検出器は可視では浜松ホトニクスと国立天文台が共同開発をした完全空乏層型 CCD (HPK CCD)、赤外では米の Raytheon 社製の Virgo-2K である。赤外アレイは高価でこれまでに 1 つしか手に入っていないため、当面は可視 1 バンド、近赤外 1 バンドでの立ち上げとなる。HPK CCD と Virgo-2K の写真を図 1.7 と図 1.8 に、HONIR と TRISPEC の検出器との比較を表 1.4 に、各装置の観測モードの比較を表 1.5 にのせる。

表 1.5 で示したように、TRISPEC の検出器より大フォーマットであり、検出器ノイズが小さく、且つピクセルスケールも  $0.29''/\text{pix}$  と小さい。これによりスカイバックグラウンドの 1 ピクセルあたりのカウントが減少して相対的な感度が向上するほか、よりシャープな星像を得ることも出来る。

次に統合制御系の概略図を図 (1.9) に載せる。

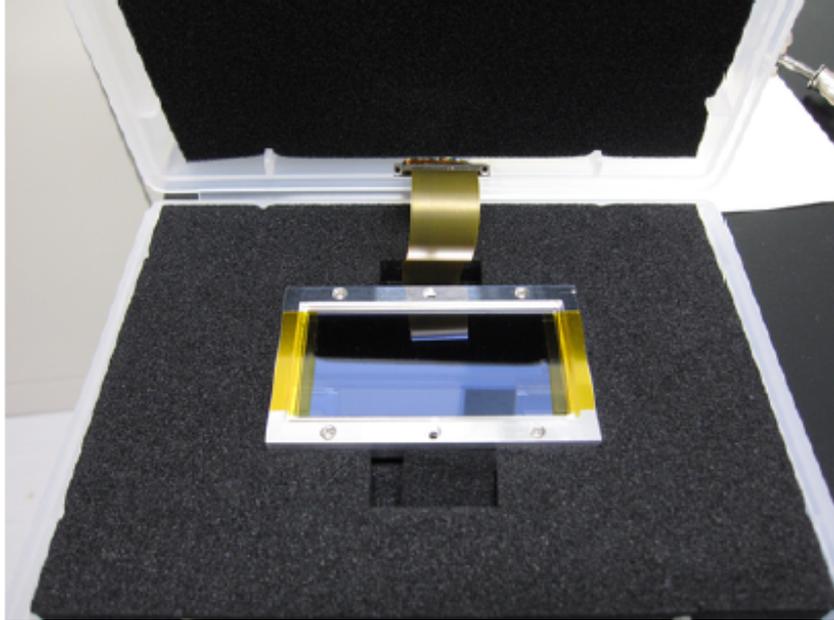


图 1.7 HPK CCD

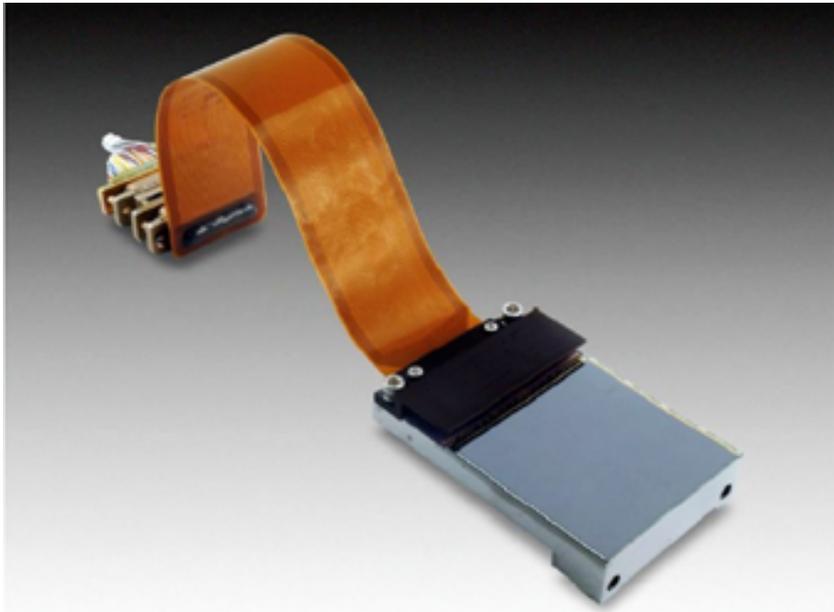


图 1.8 VIRGO-2K

表 1.5 HONIR と TRISPEC の検出器性能の比較

装置	TRISPEC	HONIR
ピクセル数 (Opt)	512 × 512	2048 × 2048
(IR1)	256 × 256	2048 × 2048
視野	7 分角	10 分角
ピクセルスケール (Opt)	0.82 "/pix	0.29 "/pix
	1.64 "/pix	0.29 "/pix
読み出しシステム	MESSIA3	MESSIA5

表 1.6 各装置の観測モードの比較

装置	HONIR	TRISPEC	HOWPol	高速カメラ
撮像	○	○	○	○
高速撮像	×	×	×	○
多色撮像	○	○	×	×
偏光撮像	○	○	○	×
分光撮像	○	○	○	○
偏光分光撮像	○	○	×(現状)	×

HONIR で制御が必要となるのは、主に検出器コントローラと検出器の温度制御システム、真空槽の温度モニターシステムおよび真空度計測システム、露出時間制御のためのシャッター制御、そしてフィルターやプリズム等の光学系の交換のためのホイール制御である。VIRGO-2K の冷却温度は 80K、HPK CCD は 170 K が量子効率と電荷転送効率および暗電流の観点から最適な温度とされているため、ヒーターを用いた温度制御が必要となる。検出器コントローラについては 2009 年初頭までにほぼ完成している（宮本久嗣 2009 年広島大修士論文 [1]）。また、赤外線は常温の物体からも放射されるため装置全体を 80K 程度に冷却する必要があり、真空槽の光学定盤や駆動系を常に温度モニターする必要がある。また、可視光検出器である CCD の露出時間はシャッターに依存するので検出器読み出しの際はシャッター制御も行う必要がある。そして、撮像観測や分光観測・偏光観測の際のフィルターやスリット・プリズム・グリズム・ウォラストンプリズムの交換などに用いるホイールの駆動のためのモータの制御も必要となる。これらの制御について、検出器・温度コントローラ・温度モニター・真空モニター・シャッターは検出器制御 PC である Linux マシンからシリアル通信での制御を、モータは制御マシンである WindowsPC に対して検出器マシンからソケット通信による制御を行う必要がある。よって、観測効率向上のため、これら全ての制御は検出器制御 PC である Linux マシンにより統合的に行い、利便性を高める構成とする。

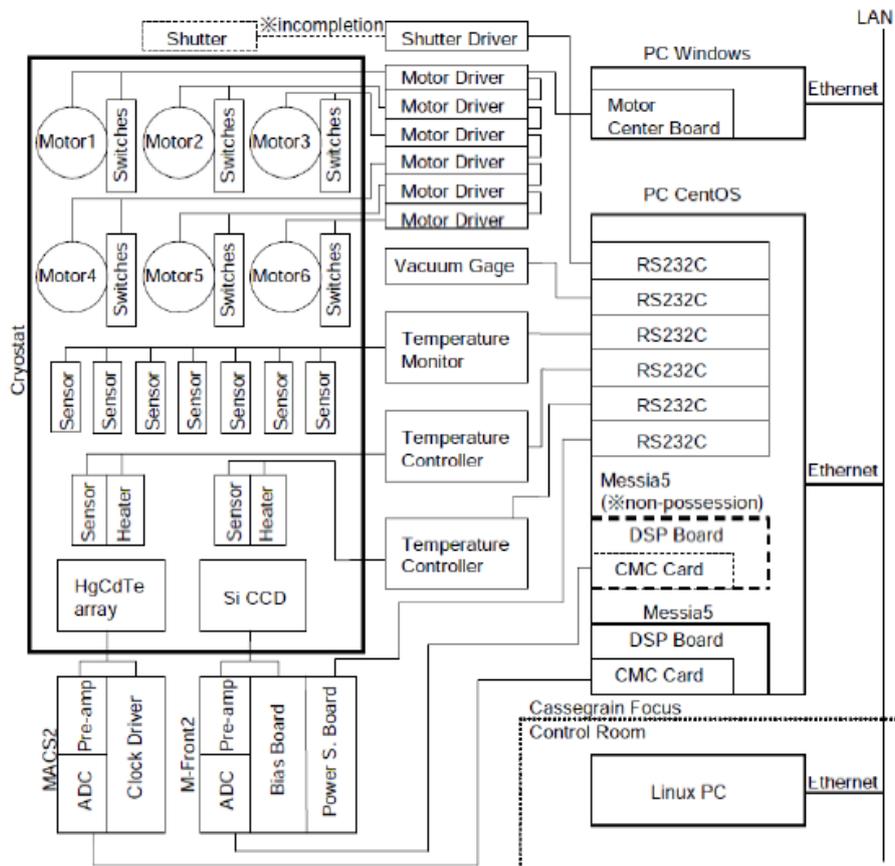


図 1.9 HONIR の統合制御概略図

### 1.2.3 2009 年年度初頭の立ち上げ状況とその課題点

我々は 2006 年から HONIR の開発・立ち上げを進めている。その中で、検出器及び検出器コントローラーの開発・立ち上げは順調に進み、2009 年初頭までにほぼ出来上がった ([1])。2009 年 2 月には赤外線 1 バンドのみの試験観測を行い、望遠鏡搭載時の検出器などの有用な情報を得て性能評価を行った。2009 年 2 月までの立ち上げは、主に前任者の大学院生によって行なわれた ([1])。ここで 2009 年 4 月頃の立ち上げ状況とその試験観測から出てきた課題点を光学系・冷却駆動系・真空系に分けそれぞれについて整理しておく。

光学系は図 1.6 からわかるように 4 つのレンズ群に分かれている。入射光を平行光にするコーリメーターレンズ群 1 個は全バンド共通で、それ以外に可視光を結像させるための可視レンズ群 1 個、近赤外光を結像させるための近赤外レンズ群 2 個がある。近赤外検出器は今のところ Virgo-2K のみであるので、現状ではコーリメーターレンズ群・可視レンズ群・近赤外レンズ群 1 の三つと、可視光と近赤外光を分けるダイクロイックミラー一つが装着される。これらのレンズ群を組み込んで 2009 年 2 月試験観測が行われた。その結果、以下のような問題があることが判明した。

- 取得した画像の星像の平均半値幅が 3'' 程度 (目標値は 1'' 程度)
- 検出器の量子効率が 3% と非常に低い (設計値は ~ 15%)

星像の半値幅が悪いのはレンズの調整がうまくいっていないこと、検出器の量子効率が悪いのはダイクロイックミラーの透過率、収差は光軸と検出器の軸が合っていないことやレンズホルダーの調整不足が原因に挙げられる。

また冷却駆動系でも問題があった。駆動系はステッピングモーターとカウンタギアを用いて各種フィルターホイール・瞳ホイール・スリットホイールを駆動させる構成となっている ([1]???)。試験観測の時点で、以下の問題が明らかになっていた。

- 改造モーターの異常発熱によるモーターの故障
- 冷却モーターの不具合による動作不良

異常発熱に関しては、真空下で常に電流が流れている状態が原因であると考えられる。対策としてはモーターの励磁 ON/OFF コマンドを用いて、使っていない時に電源を切ることによって解決することができる。動かないモーターの原因は改造時の部どまりの悪さ (スペース調整の困難さ) にあると考えられるが、実際に分解して原因を解明しつつ新規の改造モーターを作成する必要がある。

真空系は真空層単体での真空試験においては  $\sim 10^{-6}$  Torr が安定的に達成あされるという良い結果を残していたが、各種コンポーネント装着後の試験観測では、真空漏れがひどく真空ポンプでずっと真空引きをしながらでないと試験継続が難しい状況であった。HONIR は長期運用を目的とした装置であるので、この原因を解明し対処する必要がある。

### 1.3 HONIR で目指すサイエンス

HONIR は TRISPEC より高感度高精度で可視近赤外線同時撮像・偏光撮像・分光撮像ができる装置である。限界等級は TRISPEC に比べひと声 3 等下がるため観測できる対象は飛躍的に増えて研究の幅が広がる。本節では、HONIR によって観測が可能となる天体について述べる。

#### 1.3.1 XRB

XRB とは主星がコンパクト星 (ブラックホールか中性子星) で伴星が普通の恒星の連星系であり、伴星の質量によって次のように大別される。

- High Mass X-ray Binary (HMXB) → 伴星が高質量星の場合
- Low Mass X-ray Binary (LMXB) → 伴星が低質量星の場合

HMXB は伴星の質量が大きいため、可視光領域で見てもほぼ伴星の放射が卓越しておりコンパクト星の情報を得ることが難しい。LMXB は可視光で降着円盤成分が卓越してくるので、コンパクト星周辺の構造を探れる可能性がある。XRB は降着円盤の活動度によって状態を分けることがで

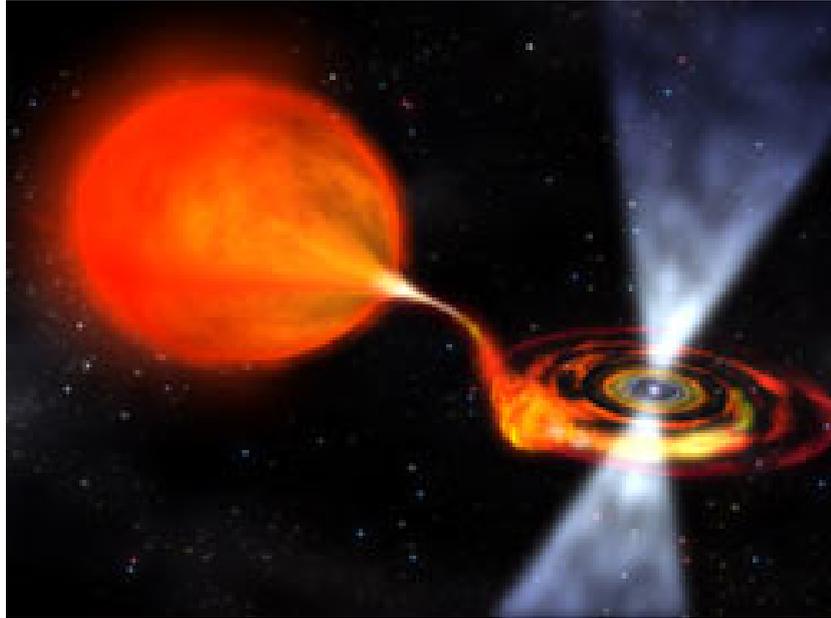


図 1.10 XRB の模式図

き、

- Low/hard 状態

光度が低く伴星からの質量降着率が小さいときに観測され、主星から非常に離れた所に光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤を形成していると考えられている状態である。

- High/soft 状態

質量降着率が高いときに観測され、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤を形成していると考えられる状態である。

放射機構としては可視光領域では LMXB は降着円盤成分が増えて近年 Low/hard 状態において、近赤外線領域でジェットが観測され、偏光の波長依存性から放射機構はシンクロトロン放射であると指摘されている (Shabaz et al.2008)。電波に比べ近赤外領域はファラデー回転を受けにくく XRB の磁場構造の情報を持ったまま観測することができる。そこで HONIR を用いて Low/hard 状態で近赤外ジェットを持つ天体の統計を増やすことによって XRB におけるジェットの物理、特に磁場構造に制限をつけることができると考えている。図 (1.11)

### 1.3.2 Blazar

銀河全体の放射をはるかに凌ぐ中心核の放射が存在し、その中心核を活動銀河核 (Active Galactic Nuclei:AGN) と呼ぶ。AGN にはジェットを持つ天体もあり、そのジェットを視線方向から見ている天体と考えられるのが Blazar である。Blazar は電波から  $\gamma$  線までの幅広い放射を

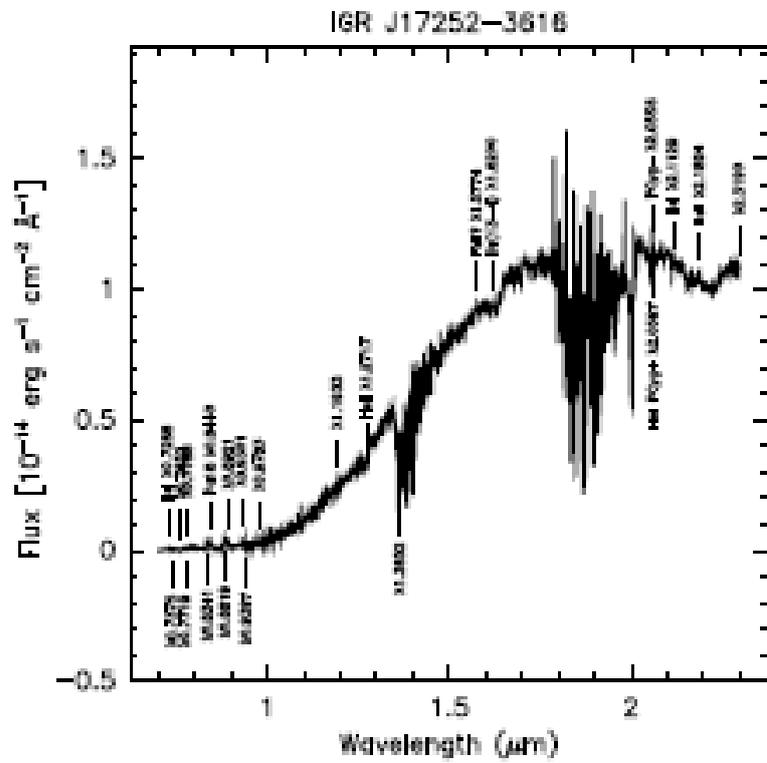


図 1.11 XRB の近赤外線スペクトル ([13])

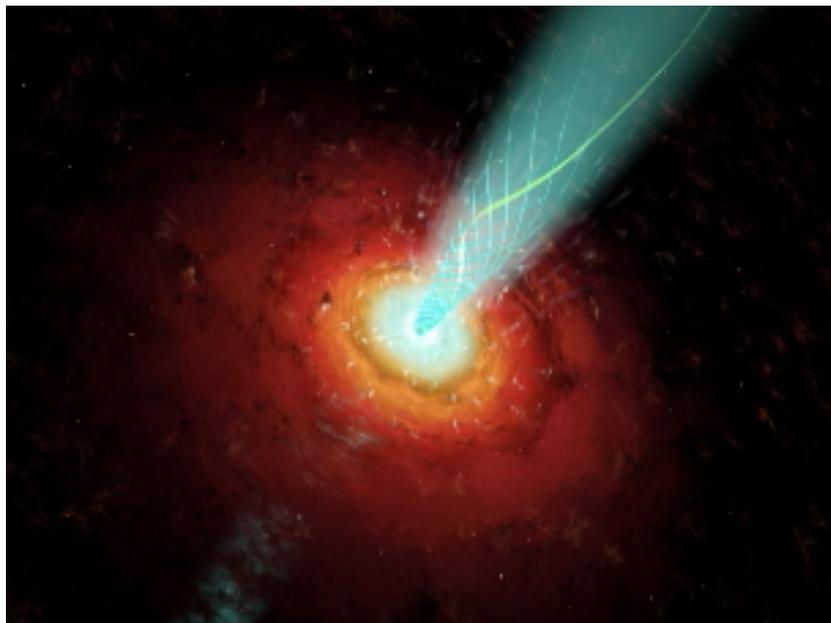


図 1.12 Blazar の模式図

し、電波から紫外線まではシンクロトロン放射、X線から $\gamma$ 線まではシンクロトロン放射の光子を種光子とした自己シンクロトロンコンプトン放射と考えられている。可視・近赤外線領域ではシンクロトロン放射による直線偏光が受かっており、ジェットの本元の何らかの磁場構造を反映しているものと考えられる。例えば、BL Lac という天体が可視光では多波長フレアに伴い連続的な偏光方位角の変化がとらえられたので、磁場が螺旋構造をしているというモデルが示唆されている (Macher et al.2009)。よって磁場構造などの物理パラメータを得る上で、偏光観測は非常に有効な観測手段である。

我々は上記のような現象や Blazar の統計的性質、数ヶ月スケールおよび数週間スケールの増光現象の発生機構を調べるために、かなた望遠鏡と TRISPEC を用いて偏光モニター観測を行っている。しかし、TRISPEC は可視光の偏光精度に比べ近赤外光での偏光精度が悪く、S/N の良いデータはほぼ可視光 1 バンドの偏光データしか得られていない。そこで HONIR を用いて、可視 1 バンド近赤外 1 バンド同時に S/N の良い偏光データを得ることにより、より正確に Blazar の磁場構造に制限をつけることができると考えている。図 (1.13) に Blazar の SED を載せる。

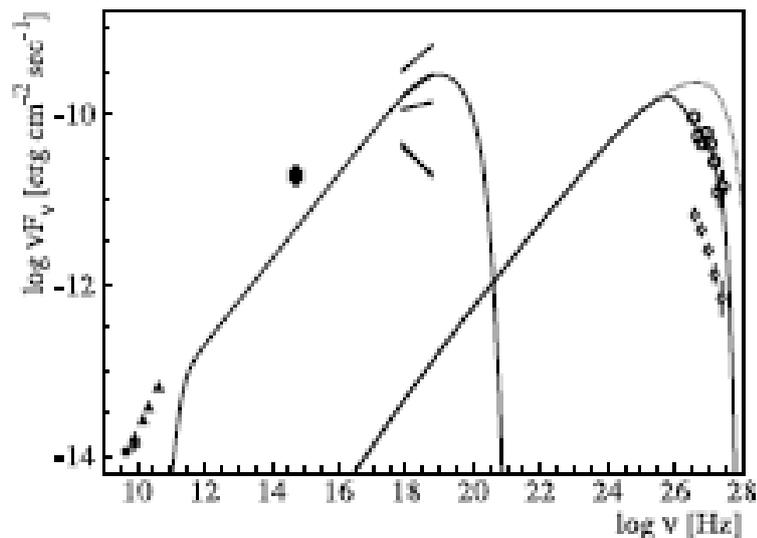


図 1.13 Blazar の SED([14])

私も修士 1 年の時代は、かなた望遠鏡と TRISPEC を用いたブレーザー BL Lac の継続的な偏光観測を行ってきた (APPENDIX. B 参照)。HONIR を用いると、赤外での観測効率が飛躍的に向上することから、より詳細な観測研究が可能になると期待している。

### 1.3.3 低温度星

星からの放射を黒体放射と見なすと、輻射のピーク波長は星の表面温度に反比例し、これをウィーンの変位則と呼ぶ。以下の式で表される。

$$\lambda_{peak} = \frac{2898}{T} \quad (1.1)$$

ここで  $T$  は天体の表面温度 (K)、 $\lambda_{peak}(\mu\text{m})$  は輻射のピーク波長である。

この表面温度が 3000K 以下の天体を低温度星と呼び、ピーク波長は近赤外線領域となる。こういった天体は銀河系内に数多く存在し、特に銀河中心領域に多く存在している。銀河中心は大質量星などの星形成活動が活発であり、赤色巨星や白色矮星・中性子星・ブラックホールなどの連星系も多く存在するが、銀河円盤には星間塵(ダスト)が多く存在するため、銀河中心方向から届く光は星間塵の強い吸収を受ける。この吸収の強さは星間塵の大きさと同程度である可視～紫外線域で最大となる。例えば可視光では銀河中心付近から光は 1 兆分の 1 に弱められる。等級の定義は  $M = -2.5 \log F$  なので、等級に換算すると 30 等にもおよぶ。一方、近赤外線領域では、可視光領域に比べ減光を受けにくく  $2.2\mu\text{m}$  では  $0.5\mu\text{m}$  の吸収の  $\frac{1}{10}$  となる。星間塵によって等比級数的に減光が起こることと等級の定義から、等級に換算すると 3 等程度になり、近赤外域ではこういった天体の観測にも有利である。図 (1.14) に低温度星のスペクトルの例を挙げる。

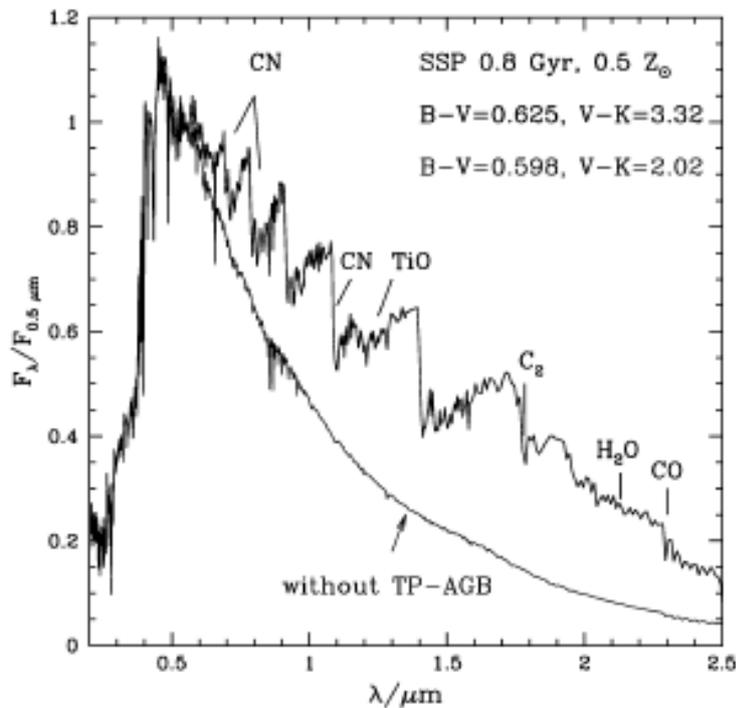


図 1.14 低温度星 (AGB star)

## 1.4 本研究の目的

先に述べたように、可視・赤外線同時観測を可能とし、且つ様々な観測モードを搭載した観測装置は、本質的に大型で複雑な装置にならざるを得ず、開発には時間を要する。まず長期運用の観点から、熱伝導を抑えるために高真空状態 ( $\sim 10^{-6}$ Torr 程度) を数ヶ月間保たなくてはならない。また精度良く効率的に多色観測するためには、光学系を調整して設計仕様通りの性能を達成させるとともに、駆動機構も安定的に駆動するよう改良・調整する必要がある。これまで検出器は可視と赤外と別々に駆動させていたが、効率的に観測するためには両者を同時にコントロールするシステムの開発も要求される。偏光撮像や分光撮像などの観測モードを実現するには、専用の光学素子も必要になる。私が前任者より開発を引き継いだ時点では、これら様々な課題が残されている状況であった。

本研究の目的は、X線連星 (XRB) や Blazar などの突発的現象を示す高エネルギー天体の多色偏光モニター観測や近赤外線において、かなた望遠鏡のフレキシビリティとも併せてユニークな競争力を有しうる本装置 HONIR の立ち上げを進めることである。第二章では真空容器の最高到達真空度および真空保持に関して解決状況を述べる。第三章ではモーターの駆動や駆動機構に関して述べる。第四章では光学系の設計仕様と問題点の解決状況、シャッターの設計について述べる。第五章で本研究をまとめる。

## 2 装置筐体・真空槽

### 2.1 HONIR の真空槽

図 (2.1) に HONIR の真空槽の設計図を、図 (2.2) に HONIR の真空槽の写真を載せる。HONIR の真空槽は冷却シールド (低温側) と真空容器 (常温側) に分かれており、構造部からの熱伝導を抑えるためにガラスエポキシ樹脂を用いて冷却シールドを支えている。真空を作るために大気側と高真空側の間に O リングを用いて、真空引きをした時に密閉される仕組みである。以下にこの真空槽で重要となる点は、

- 高真空状態 ( $\sim 10^{-6}$ Torr) を長期間保持する
- 赤外線の輻射を無視できるレベルの低温 ( $\sim 80$ K) にする必要あり

の 2 点であり、ある程度の真空を保った状態で冷却をする必要がある。そのためには外部からの熱流入も抑えなければならない。熱輻射による熱流入を抑えるためには一般に、冷却シールドと真空槽の間にインシュレーターを挟むことで可能となる。本装置では冷却シールド外壁にはスーパーインシュレーターを用いて熱伝導を抑える。ただし上手に貼らないと真空槽と接触してしまい、外部からの熱伝導がきいてくる可能性がある。冷却シールド内壁は赤外線に対する吸収を有効にするために、ニッペノバ 500 アストロブラック (日本ペイント社) という特別な塗料を用いて塗装を施している。検出器系・駆動系などへ電気を供給するためにケーブルを通す必要があり、そのために円の穴を真空槽に開けフランジとハーメチックコネクタを用いて外部のエレキなどと通じさせている。ケーブルは熱伝導を抑えるために不用意に芯線が太いものは使わず、且つ被覆がアウトガスの少ない素材のものを用いた。

### 2.2 真空度

#### 2.2.1 冷却を決める要因

真空槽には、赤外線検出器の最適動作温度および熱背景輻射を抑えるため  $\sim 80$ K に冷却する必要がある。そのため熱流入も抑える必要がある。熱流入には、構造部からの熱伝導・気体分子からの熱伝導・熱放射の三つが考えられる。

#### ・構造部からの熱伝導

外部は常に常温で内部は低温となっているため構造上熱伝導は避けられない。これを最小限に抑えるために、装置外部と装置内部を熱伝導を抑える素材を用いる。

#### ・気体分子からの熱伝導

熱とは気体分子の運動であるため内部に気体分子が充満していると、気体分子によって装置外部から装置内部へ熱が伝わってしまう。よって気体分子による熱流入が無視できるほどの真空状態



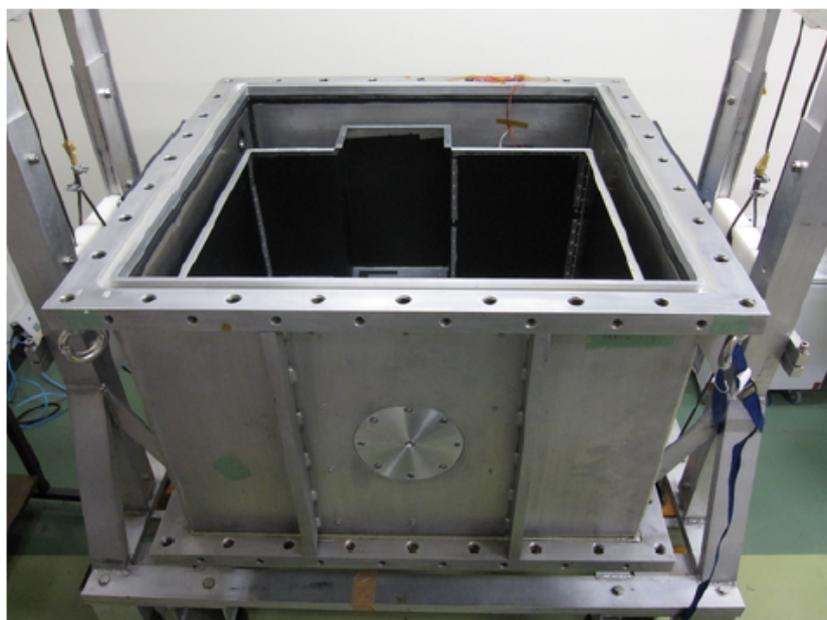


図 2.2 HONIR の真空槽

( $10^{-6}$ Torr) を保持しなければならない。

#### ・熱放射

常温である装置外部からの熱輻射が装置内部の壁に吸収されておこる熱流入である。

これらの熱流入を抑えるため HONIR では、冷却ボックスと真空を分け、スーパーインシュレーター、赤外線輻射を吸収する特殊な塗料を用いるなどの工夫を行なっている。これにより熱流入は冷凍機性能で充分カバーできる程度に抑えられる。

#### 2.2.2 真空到達度

真空度を決める要因にはどれだけシールされているか、漏れ箇所があるか、内部のアウトガス量に依存する。

HONIR に限らず真空装置は真空側と大気圧側を O リングを用いてシールをする。もちろん完全にシールをすることはできず、大気中の分子が小さい気体は、O リングから回り込んで内部に入ってしまう。この漏れ・内部からのアウトガスと真空ポンプから排気が平衡状態となった時点で最高真空度に到達する。

#### ・アウトガス

常温大気圧下では圧力のためにガスが付着しているが、低圧下になるとそのガスが放出される。そのガスは内部部品によるもの・真空槽内壁によるもの・真空槽内部によるもの・シール材からのものが考えられる。

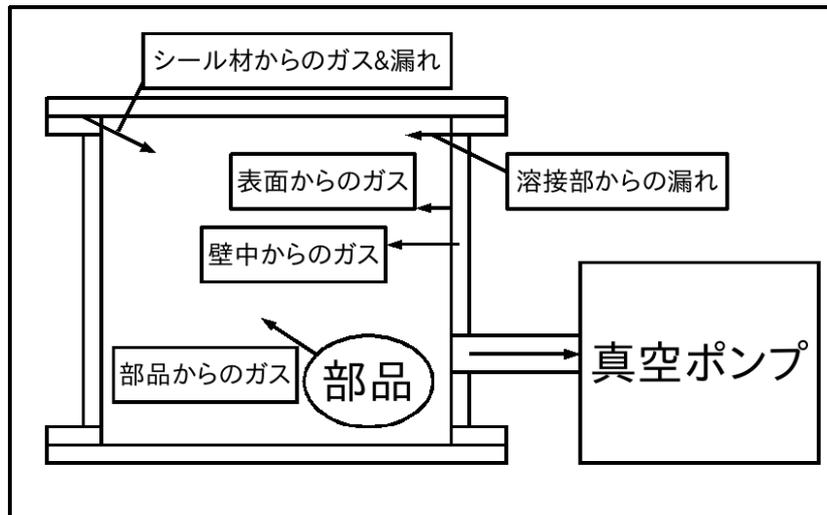


図 2.3 真空度を定める要因

・真空漏れ

しっかりとシール、溶接されていなければ、そこから漏れが生じる。

以上の二点から装置自体の真空の到達度が決まる。

## 2.3 真空保持性能

### 2.3.1 当初の状況

2009年2月に赤外線の時点での最大到達真空度は $10^{-3}$ Torr程度であり目標の $10^{-6}$ Torrまでは程遠い状況であった。以前の真空槽のみの試験では $10^{-6}$ Torrを達成していたが、その後のコネクタやフランジなどをつける段階で傷やアウトガス源、真空容器からの漏れ・シール不全が原因となって目標性能を達成できていなかった可能性が考えられる。

### 2.3.2 真空保持試験

まずアウトガス・真空漏れのどちらが原因になっているのか調べた。真空槽のみの試験時と試験観測時で異なっているのは、コネクタ・フランジ類の有無と真空槽の内容物である。真空漏れの可能性としては前者、アウトガス源としては後者が考えられる。そこで真空度が悪い原因を絞るために特定の場所に絞り、調査と対処の後に真空引き後真空保持試験を行った。真空保持試験のセットアップ図を図(2.5)に示す。今回調査したのは以下の場所である。

- 各場所のOリングとその接触面
- 各場所の汚れ等
- 真空槽内部の各部品によるアウトガス

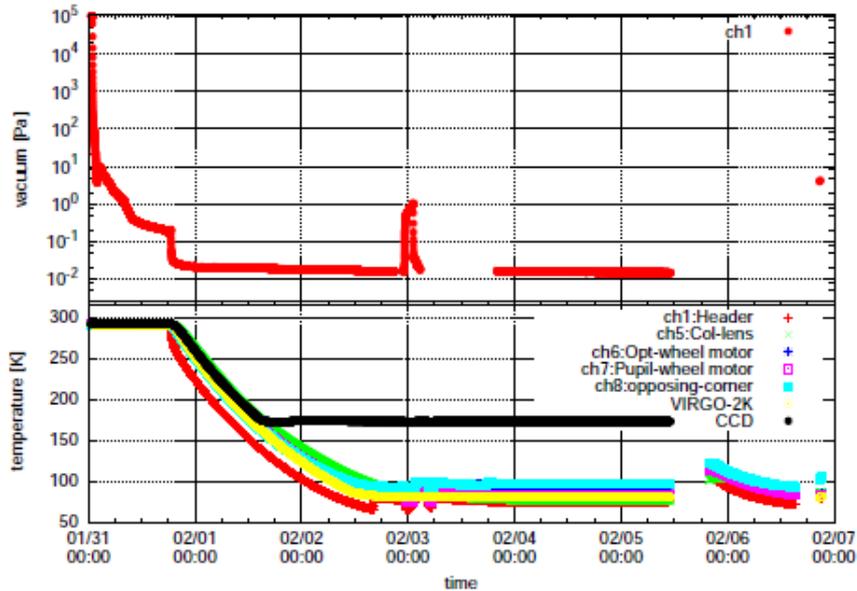


図 2.4 2009 年 2 月での真空度：真空冷却保持は二時間で 1Pa( $\cong 10^{-2}$ Torr) 上昇しているの  
でアウトガス量は  $1.04 \times 10^{-6}$  Torr/s である。

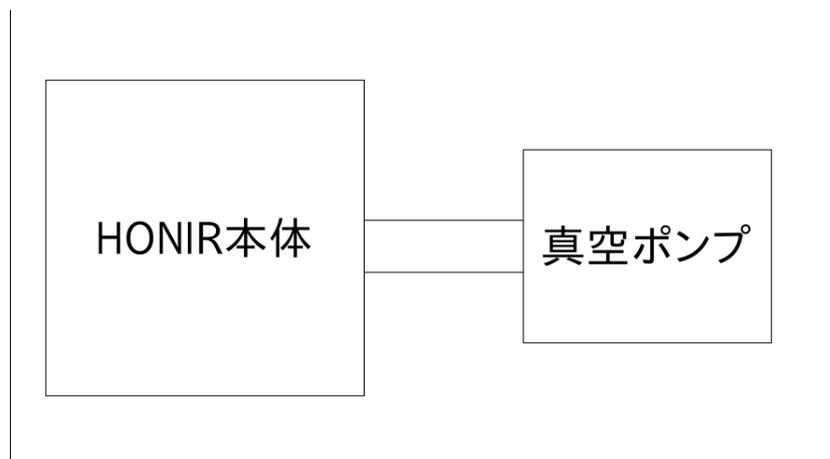


図 2.5 真空試験セットアップ図

まずレンズ系のみを外し再現試験を行った（内容物はホイール四種、検出器二種）。その結果を図 (2.6) にのせる。

再現試験の結果は最大到達真空度は  $10^{-3}$ Torr であり ( $1\text{Torr} \cong 10^{-2}\text{Pa}$ )、2009 年 2 月の試験観測の状況を再現した。再現試験以後に行った調査後の試験結果を以下の図 (2.6)・図 (2.7)・図 (2.8)・図 (2.9) に載せる。冷却状態での安定真空度が目標値 ( $\sim 10^{-6}$ ) を満たしているか、真空保持が十分なレベルかどうかをチェックする必要がある。

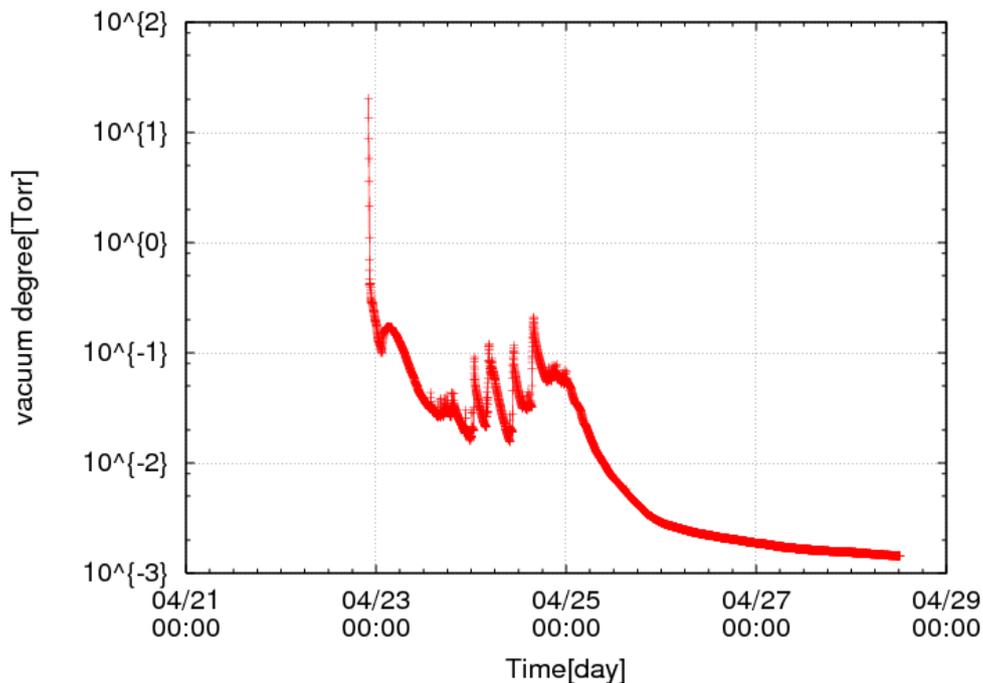


図 2.6 再現試験結果

・入射光口をアルミ板に変えての真空冷却試験

真空槽のみの試験では入射光口にアルミ板がはめられていたが、2009年2月以降は光を通すためフッ化カルシウムのウィンドウが用いられていた。このウィンドウが真空漏れの原因となっている可能性もあるので、ここをアルミ板に戻して試験を行った。その結果を図(2.7)に載せる。真空冷却を行ったが、真空度は  $3.4 \times 10^{-4}$  Torr でファクターで変化するのみに留まった。

・フランジやコネクタ部分の調査後の真空冷却試験

普通、真空容器では真空側と大気側はOリングのみでシールされており、HONIRで用いているフランジやハーメチックコネクタもOリングで真空側と大気側が接している。真空度が悪い原因としてOリングでのシールがうまくいっていない可能性があるため、Oリングでシールしてある箇所を数回に分けて調査・実験を行った。その調査の中でIR2のフランジのOリングが接触する面に、手で触ってはっきりとわかる大きな傷を発見した。そこを磨き材で手で触っても分からないレベルまで磨き、掃除ををして閉じた。その後の試験結果を図(2.8)に載せる。冷却時の最大真空到達度は  $1.66 \times 10^{-4}$  Torr で、ほぼ変化はみられなかった。途中で真空度が上がっているが、これはCCDの最適動作温度にするためにヒーターで170Kに温めたためだと考えられる。

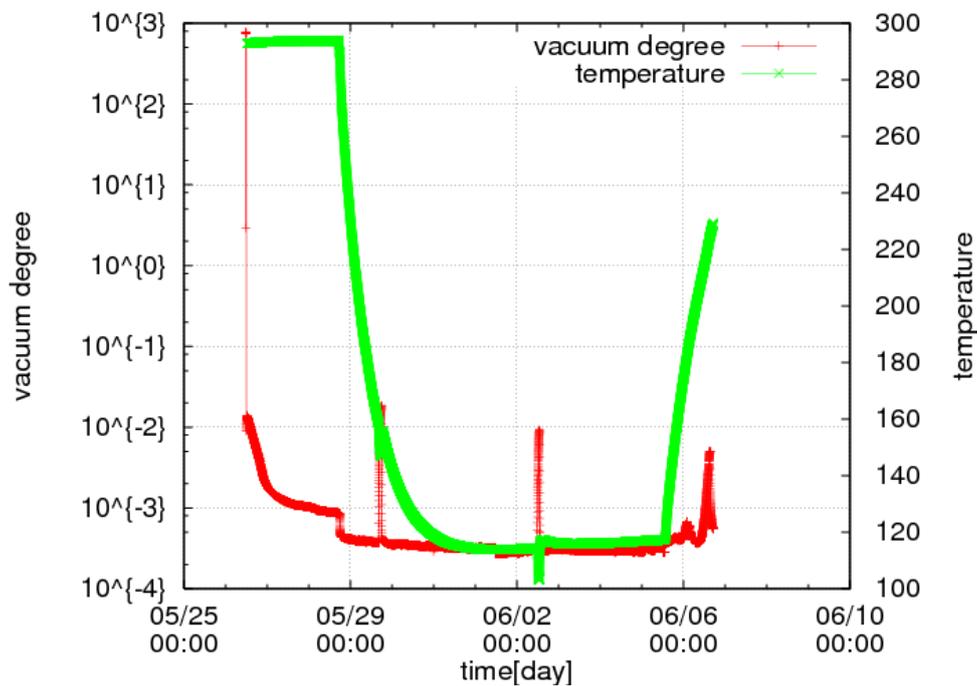


図 2.7 入射口をアルミ板に変えての真空冷却試験:2009 年 2 月の試験と同様の真空到達度であった。真空保持度は  $7.667 \times 10^{-6}$  Torr で変化なし。

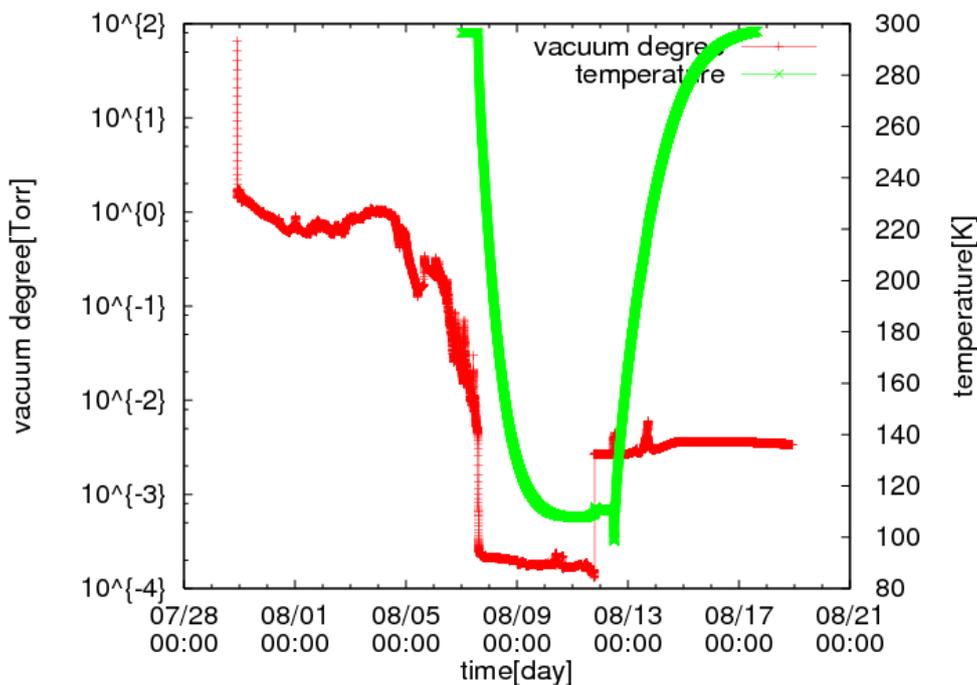


図 2.8 フランジ・コネクタ部調査後の真空冷却試験

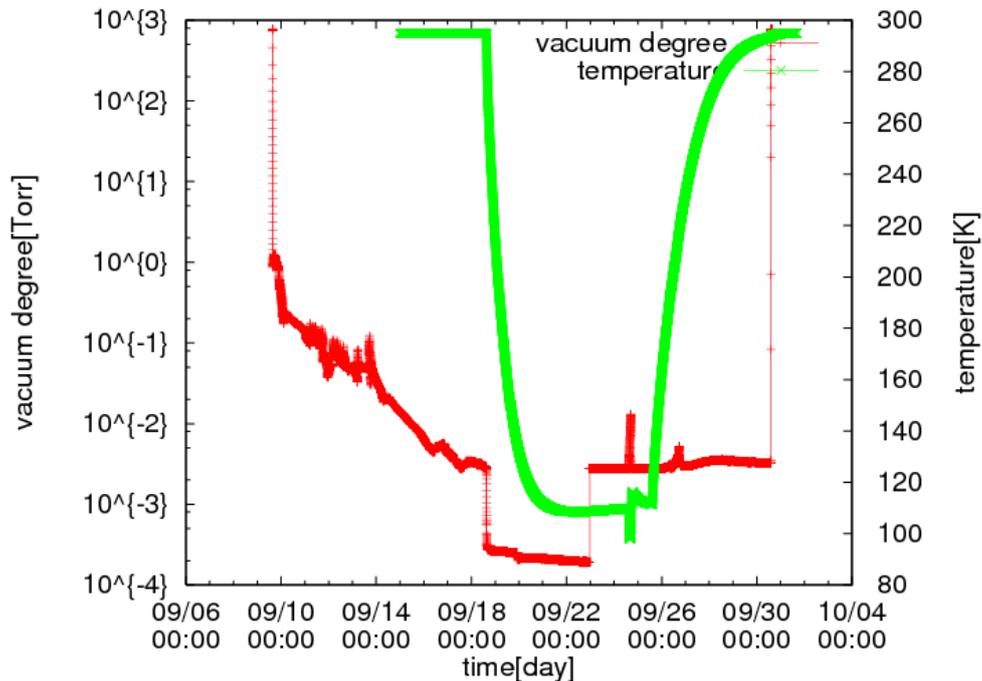


図 2.9 モーターを外しての真空冷却試験

・真空槽内の内容物を取り外しての真空冷却試験

真空槽内部の各部品にアウトガス源になっているものがないかを特定するために、部品を取り出して真空試験を行った。特に 2009 年 2 月の赤外線観測の試験の時に、冷却改造モーターからなんらかの噴出物が出た形跡があったので、モーターからのアウトガスがまず疑われた。そこでモーターのみをはずし、真空槽内部には可視と赤外線フィルターホイール、スリットホイール、腫ホイール、HPK CCD と VIRGO-2K のみの状態にして真空保持試験を行った。その結果を図 (2.9) に載せる。このように、最大真空到達度もアウトガス量は全く変化はみられなかったため、モーターが真空度を悪くしているアウトガス源ではないことがわかった。

2.3.3 ここまで結果と問題点整理

以上のように、真空度に効いてくるだろうと考えられるシール不良を調べるために、我々の手で対処できる各場所を調査し、不具合の可能性があると考えられる箇所について対処してみたが、これまでの所は到達真空度に大きな変化はみられなかった。この後 2 週間程度真空を引けばなしにしてみたが、真空度に変化はみられなかったため、アウトガスよりも真空漏れの方が疑われた。そこで再び念入りに調査したところ、IR2 のフランジ (ハーメチックコネクタのない方) と O リングとの接触面に深さ 0.20mm ほどの傷が二ヶ所ついていることがわかった。この傷のために O リングでうまくシールされず、微小の隙間ができたために真空度が悪くなったと考えて、その傷を手で触っても分からない程度まで減らすよう磨き、再試験を行った (図 (2.8))。その結果、期待ほどに

は真空度は良くなりほぼ変化は見られなかった。それ意外のシール不良の原因となるような傷などは目視では確認できなかった。またアウトガス源と考えられるものは上述のように、もはや原因となっているとは考えにくい。よって真空漏れが残された原因の主なものであり、リーク試験を行なって原因を特定することを考えた。

#### 2.3.4 He リーク試験

ここまでの調査、対処である程度の改善はみられたが、目標とする値にはまだ遠い状態であり、根本的な原因は特定できないままであった。そこで真空容器の真空漏れを検出するリークディテクターを用いて試験を行った。リークディテクターは特定のプローブガスに反応する検出器を用いて真空漏れを検出することができる。プローブガスは目的に応じて色々あるが、今回のような非常に微小な漏れを検出するには分子が小さいガスが向いている。また回りのガスと反応したり内部にガスが吸着するのも避けたいので、安定な元素である He を用いる。リーク試験のセットアップ図を図 (2.11) に載せる。

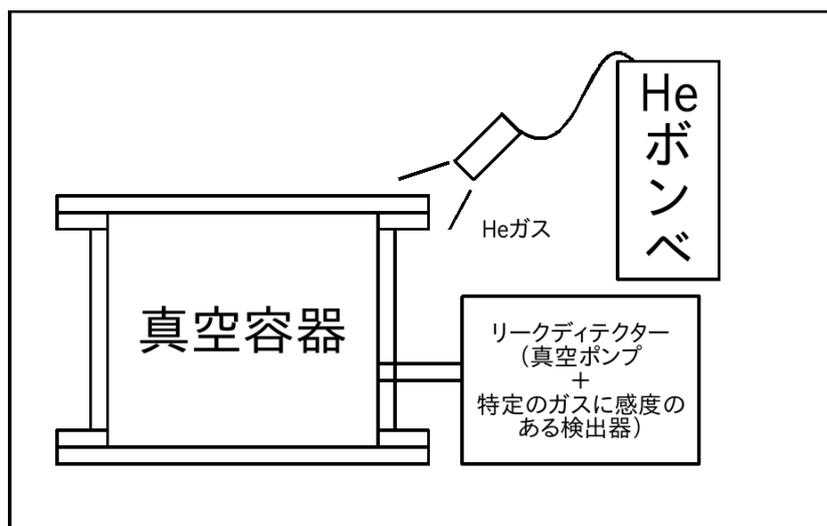


図 2.10 リーク試験のセットアップ図

##### ・試験方法

図 (2.11) の状態で真空引きを行い真空度が安定するのを待つ。真空度が安定してから HONIR の外部から真空漏れをしている可能性のある箇所へヘリウムガスを吹き付ける。HONIR 内部は高真空状態であるので、漏れている箇所に吹きつければ He は吸い込まれる。内部は常に真空引きをされている状態であるので、He はすぐに真空ポンプへと流れ込みリークディテクターでヘリウムを検知することで漏れ箇所を特定する。

本試験を行なうにあたり、以下の点に配慮して、誤認識がないようにした。

- He が室内に充満しないように換気を行なう
- He を吹きつけ量を一定にする
- 一度吹きつけて反応があった後はリーク量が落ち着くまで待つ



図 2.11 リークディテクター



図 2.12 He リーク試験の実際のセットアップの様子

実験に使うリークディテクターは ULBAC 社の HELIOT シリーズを用いて行った。用いたリークディテクターを図 (2.11) に、実際のセットアップの状況を図 (2.12) 載せる。He は分子が小さく HONIR レベルのサイズであると充分時間がたった後 O リングから回り込んで内部に He が入ってしまう可能性があるので、大気の状態でも大気中の He が回り込み He リーク量はあるレベルで一定となる。もし実験室空間内に He が充満していたら、O リングから回り込む量が増える。また吹きつける量が多ければ多いほど O リングから回り込む He 量も増え、リーク量を誤認識してしまう可能性がある。リーク量が基準値まで落ち着かないと正確なリーク量を測定することはできない。よって以上の事に配慮が必要となる。

### 2.3.5 真空漏れの原因と対策

この試験では IR2 の検出器や温度センサーなどのケーブルがつながっているハーメチックコネクタとそれに隣接するフランジで、He リークディテクターがシャープに反応し、ここで真空漏れが発生している可能性が高いことがわかった。また、再現性もあり、これらが真空漏れを起こしている箇所であるとほぼ断定できた。それぞれが原因であることを確かめるためにビニール袋で覆いシリコンテープなどで密閉した状態で、他の場所に吹きつけてみたがまったく反応しなかったので、この2箇所のいずれか又は両方で漏れていると断定した。ハーメチックコネクタのみ・フランジのみでもそれぞれシャープに反応し、それぞれの He リーク量は、

- IR2 ハーメチックコネクタ → リーク量  $1.4 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
- IR2 フランジ → リーク量  $2.3 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

であった。何も吹きつけていない時の安定リーク量は  $2.0 \times 10^{-9} \text{Torr}$  である。フランジは以前対処した傷が存在するものであった。その傷を爪でチェックしてみる何とかその凹凸が確認できるレベルで、ノギスで測ると深さは 0.20mm 前後程度の深さがあった。対策としてさらに磨き剤を使い、爪でチェックしても確認できないレベルまで磨きグリースを多めに塗り閉じた。ハーメチックコネクタに関しては、再度チェックしたが、やはり O リング自体にもその接触面にも気になるような傷はなかったため掃除を行い再度閉じた。今後の対策としては O リングの幅を変えたものと交換をすることが挙げられるが、解決しない場合はハーメチックコネクタ自身の問題となり交換をしなければならない。その対処後の He リーク試験では、安定リーク量は  $4.2 \times 10^{-10} \text{Torr}$  という値であり、それぞれのリーク量は

- IR2 ハーメチックコネクタ → リーク量  $4.3 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
- IR2 フランジ → リーク量  $1.3 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

となり、どちらも一桁は下がっておりある程度改善されたことがわかる。もちろん完全に密閉することは困難であり、フランジ起源かハーメチックコネクタ起源は完全には分離できていない可能性はある。そのためにあやまったリーク量を出しているかもしれない、再度リーク試験を行なう必要がある。

## 2.4 冷却性能

He リーク試験で改善が見られたので、再度 IR2 フランジを磨き、IR2 のハーメチックコネクタの O リングを幅の太いものに交換して微少なホコリや傷はシールできるよう配慮し、真空冷却試験を行った。その結果を図 (2.13) に載せる。

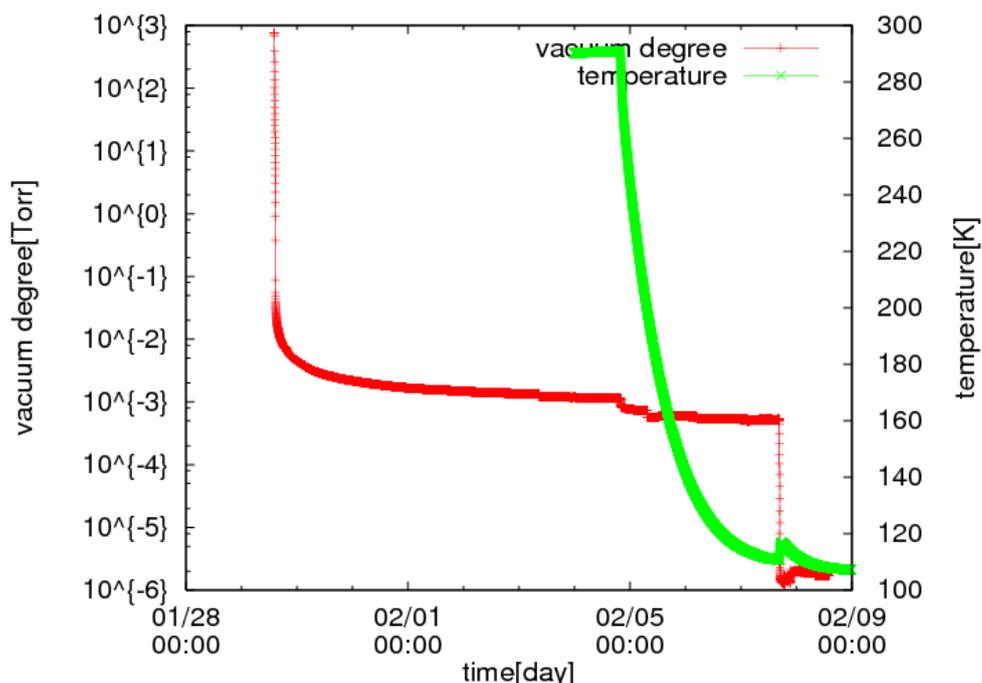


図 2.13 2010 年 1 月の真空冷却試験

真空度は冷却していない状態で今までよりも早く  $1.6 \times 10^{-3}$ Torr 程度まで下がった。その後冷却を開始したが  $5.6 \times 10^{-4}$ Torr で期待ほどには真空度はよくならなかった。そこで問題となる IR2 のフランジにアルコールを吹きつけて、真空の悪化度をみることにした。もし、シール不良ならば中にアルコールが吸い込まれすぐに気化し真空度は悪化することを期待して行ったテストである。アルコールは IR2 コネクタが付いているフランジ部分と IR2 のフランジのみの 2 カ所の O リング周辺に全体的に吹きつけた。しかし、真空度は悪化せず、逆に真空度が急激に上がり、2 桁も改善された。真空度はその後も  $1.9 \times 10^{-6}$ Torr の値を保持しており、目標の真空度を達成している。これは吹きつけたアルコールがうまく極微小なシール不良部を覆い、その部分が狭いため表面張力が効いて蒸発もしにくく、長時間にわたりシール剤として働いたと考えている。原因の完全特定まではもう一歩であるが、場所はほぼ特定されており、フランジ部分の再調査・対処を行うことで問題解決に至るであろうと考えている。

### 3 冷却駆動系

#### 3.1 設計仕様

HONIR の冷却駆動系は、可視フィルターホイール・赤外線フィルターホイール・瞳ホイール・スリットホイールの四つの各種光学素子交換機構に分かれている。どのホイールも常温用のステップモーターを冷却対応に改造を施し、ギアを通して光学素子が搭載されたホイールギアがかみあい回転する仕組みとなっている。冷却専用モーターも市販されてはいるが非常に高価であるため、我々は名古屋大学で実績のあったこの改造方法を採用した。瞳ホイールは光学素子が 12 種、その他のホイールは 8 種入るスロット設計である。モーターは Portescap 社製のもので、これを日本パルスモーター社提供の Motionnet を用いて制御している [1]。実際のホイールとホイール駆動の模式図を図 (3.1) と図 (3.2) に載せておく。



図 3.1 ホイール

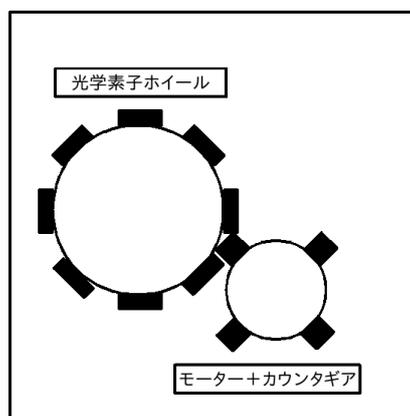


図 3.2 駆動機構の模式図

#### 3.2 駆動性能

##### 3.2.1 2009 年度初頭の状況

2009 年度初頭の時点で、以下の問題があることが判明していた。

- 冷却改造モーターの不具合のため動作不良が起きた
- 常に電流がかかっている状況が続いたためモーターが故障
- 温度センサーの読み出し異常

以上の問題を解決する必要がある。



図 3.3 ステッピングモーター



図 3.4 冷却対応ボールベアリング

### 3.2.2 モーターの改造

用いるモーターは Portescap 社のステッピングモーターで、適正駆動温度は室温である。その写真を図 (3.3) に載せる。

モーター内部のベアリングに油がつけられており、常温で滑らかに駆動する設計となっている。このまま低温にした場合、油が固まってしまい動かない。そのため低温下でも駆動するように改造を施す必要がある。冷却対応改造として、図 (3.4) のフッ素加工を施した冷却対応ボールベアリングと本来のボールベアリングを交換することで低温下での駆動を可能にする。またモーター内部のボールベアリングと磁石の距離には決められた適正距離があり、その適正距離にするためにシムを用いて位置を調整する必要がある。しかし完全に改造がうまくいくわけではなく、部留まりはさほど良くはない。今回はこの冷却改造モーターを現在必要な数だけ新規作成をし、2009 年 2 月の試験で故障したモーターと交換をした。

### 3.2.3 冷却駆動試験

駆動試験は Motionnet 社提供のプログラムと自前の Linux 用サーバプログラムを用いて行った。

- 常温・・・駆動コマンドを打った後、目視と駆動音の確認で行なう
- 低温・・・駆動コマンドを打った後、駆動音とパルス数で確認を行なう

常温状態での試験は装置のふたを開けて行なうことができるが、80K に冷却した状態での試験は装置を密閉し、真空引き・冷却する必要がある。ホイールを一周させるパルス数は各ホイールできまっており、赤外・可視ホイールが 3200 パルス、その他のホイールが 2400 パルスである。パルス数の決定方法は何回か実験を行い最適値を決めた。パルス数の確認はモーター付属のソフト EZlink を用いて、パルス数と原点検知の確認また以上のことで駆動試験を行った。ただし一点注意が必要で、それは実験中以外の時はモーターの電源を切っておくことである。なぜなら、2009 年 2 月の試験の時のように電流を流したままにするとモーターが故障するためである。

### 3.2.4 モーターの改造と駆動試験

光学素子交換機能の立ち上げのために、2009年2月の時点で故障していた冷却改造モーターの交換品として、新たな改造モーターを自前で作成した。まず常温ですべてのホイールの駆動を目視と音で確認し、新規作成したモーター、以前作成したモーターがしっかり機能していることがわかった。また目視であるが各光学素子が入るスロットのうち特定のスロットへの交換がうまくいくかをチェックし、目標のスロットに交換されていることを確認した。その後、本体に装着して、真空冷却試験中にモーターの駆動試験を行った。中が見えないため、音とEZlinkのスイッチモニターを用いて駆動の様子を判断した。これにより、すべてのホイールが問題なく駆動することを確認した。今後、人工光や試験観測時に光学素子が正常に動作するかどうかを見ることで、より正確な試験を行うことになる。

### 3.2.5 冷却駆動系のまとめ

今回は駆動系の調整、モーター改造の他に、温度モニターのための温度センサーユニットの新規作成も行った。温度センサーは白金抵抗を用いており、温度センサー自体に結線をし各種ホイールとコールドボックス(冷却シールド内部)の内壁にカシュトンテープで貼っていた。それでは不安定であり、しっかりとしたユニットを作らなければならない。そこでアルミ板に温度センサーを接着剤を用いて固定し、結線し熱縮チューブで絶縁したものをユニットとして用いることにした。このユニットをホイールにネジ止めし、温度モニターをする。この新規作成ユニットによってコールドボックス・ホイールの温度モニターが可能となった。

駆動系の最大の問題点は、冷却下でのモーターの正常な動作である。HONIRに用いるモーターは常温モーターを改造したものであり、真空冷却下での動作が保証されておらず想定外の問題が起こる可能性がある。実際に2009年2月の冷却駆動試験において、真空下になったために熱伝導が悪くなり異常発熱を起しモーター内部のコイル回りの接着剤が溶け軸が歪み、磁石とのバランスが悪くなりモーターが動かなくなるという事態が起きた。これはMotionnet内にレジスタの設定を変更することでモーター励磁ON/OFF制御で対策が可能である。この機能の組み込みや、より信頼性の高いプログラムに改良する必要がある。

## 4 光学系

### 4.1 設計仕様

HONIR の光学系は図 (1.6) のとおりである。HONIR はコリメーターレンズ群・可視レンズ群・赤外レンズ群、フィルターやプリズムなどの光学素子が入るホイール、波長を分けるダイクロイックミラー、HPK CCD と VIRGO-2K の検出器が成分である。ダイクロイックミラーで可視・近赤外に分けレンズ群で結像させフィルターやプリズムなどを用いて必要な天体の情報を得るような仕組みになっている。精度良くデータを得るにはレンズ群の調整が必要となってくる。また可視検出器の読み出し性質上シャッターが必要となるが、内部には設置するスペースがないため HONIR の外部に置かなくてはならない。さらに有口径 85φ 以上をカバーし開口ムラの無い大型のシャッターが必要となる。

### 4.2 光学性能

#### 4.2.1 2009 年度初頭の状況

2009 年の 2 月の赤外線チャンネルの試験観測でわかった問題は以下のとおりである。

- 星像サイズが平均 3 秒角 (目標値 ~ 1 秒角)
- 収差が大きい
- 検出器の量子効率が 3% (設計値は ~ 15%)

以上の問題点を解決する必要がある。また HONIR の立ち上げ目標のためにはシャッターの設計・作成が必要不可欠である。

#### 4.2.2 設計の再確認と現物調査

2009 年 2 月の光学試験後に HONIR を常温・大気圧に戻し、シーイングが悪かった原因を調べるためにレンズホルダーの調査を行った。各レンズホルダーをチェックしてみると、レンズ搭載前の試験ではガタはなくしっかりと押さえられていたが、全てのホルダーがレンズを押さえきれていないことが判明した。この原因を解明するために、設計の再確認を行った。

図 (4.1) と図 (4.2) にコリメーターレンズホルダーと可視レンズホルダーの設計図を載せる。

各ホルダー内のレンズ間の距離はレンズの製作を依頼した (株) レンズ屋によって精密に決められており、その仕様の通り設計されていることを私自身も再確認した。図 (4.1) のようにレンズはホルダー内の端と押さえリングで固定されており、主として光軸方向の力で保持される。レンズは縁 1mm を当てるようにしレンズ当てや押さえリングが設計されており、傾きなどに抑制が効くようになっている。また光軸に垂直な方向にシフト (偏芯) に関してはネジで固定することによって調整することができる。一部の公差が厳しいレンズに対しては、M3 のイモネジによる調整機構をつけてある。表 (4.1) に各レンズの光軸上の位置と各公差を載せる。

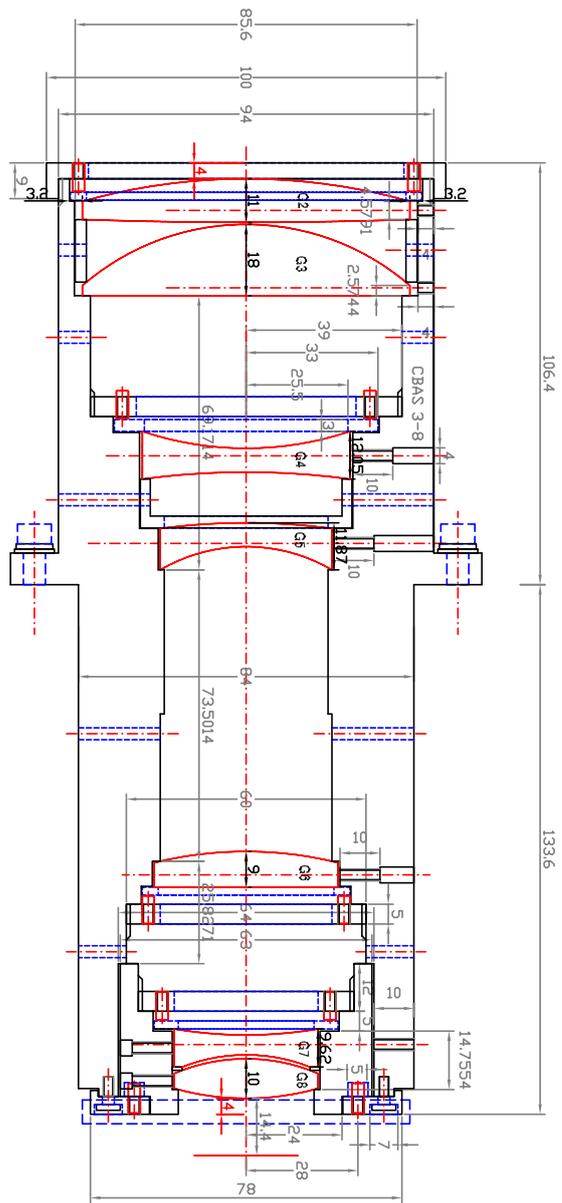


図 4.1 コリメーターレンズホルダー設計図

DATE	2008/3/23
ファイル名	Coll_layout

図名	コリメーター	図番	C0-00
製図者	山下卓也	尺度	1/1

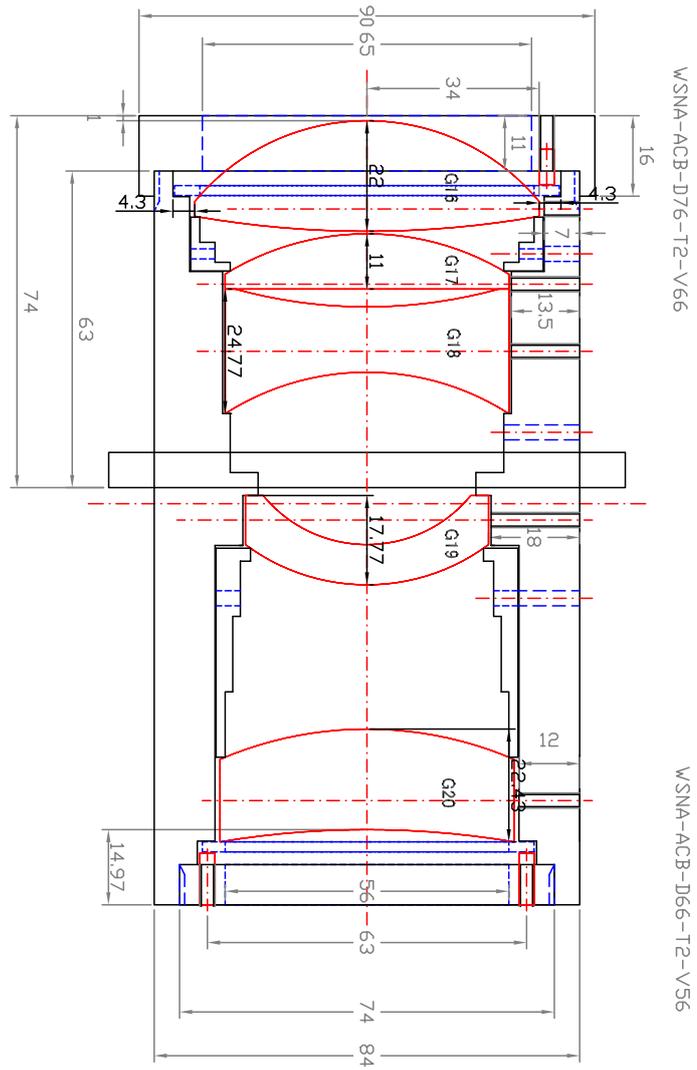


図 4.2 可視レンズホルダー設計図

DATE	2008/9/27	図名	可視カメラ	図番	□C-00
ファイル名	□C_Layout	製図者	山下 卓也	尺度	1/1

表 4.1 各レンズの光軸上の位置と各公差

レンズ	面間隔	次のレンズ面までの間隔	面間隔の公差	シフトの公差	傾きの公差
G2	11.00	0.50	±0.1	±0.05	3'
G3	18.00	38.50	±0.1	±0.05	3'
G4	6.00	12.80	±0.1	±0.05	3'
G5	6.00	76.90	±0.1	±0.03	1'
G6	9.00	37.30	±0.1	±0.03	1'
G7	5.00	1.00	±0.03	±0.03	1'
G8	10.00	なし	なし	±0.03	1'
G11	24.00	0.50	±0.1	±0.05	1'
G12	12.00	6.751	±0.1	±0.03	1'
G13	5.00	76.00	±0.1	±0.1	1'
G14	5.00	10.50	±0.1	±0.1	1'
G15	15.00	なし	なし	±0.1	3'
G16	22.00	0.50	±0.05	±0.05	1'
G17	11.00	3.53	±0.03	±0.03	1'
G18	13.00	34.30	±0.1	±0.1	1'
G19	8.00	28.70	±0.03	±0.1	1'
G20	10.00	なし	なし	±0.1	3'

それぞれのレンズホルダーを真空槽から取り出し、何がシーイングを悪くしているのかをチェックした。その結果、いずれのレンズホルダーにも押さえ不良が見つかった。赤外レンズホルダー・可視レンズホルダーは当初 M3 のプランジャ (バネ) 付きネジで閉めていたがうまく閉まらない可能性があることがわかっていたので、M4 のプランジャ付きネジに対応した押さえリングを新規作成し交換した。赤外レンズホルダーはこの新規押さえリングでしっかりと固定でき、押さえ不良は改善した。可視レンズホルダーは押さえリングの交換では改善しなかったため、内部に問題があることになる。以下でその原因について幾何学的に説明する。

ホルダーはレンズを光軸方向へ押さえることと光軸に対して垂直な方向をネジで固定しているので、レンズの自由度はほぼ面間隔とシフトである。内部がカタカタなるという原因は、シフトではなく面間隔であると考えられる。図 (4.3) にレンズ屋で決められた面間隔を保ちつのに必要なレンズ当ての光軸方向の長さを決めるために考える模式図を載せる。

ここで  $a$  は直径、 $R$  は曲率半径を表している。レンズ当ての設計を行なうには  $c$  と  $d$  の値を求める必要がある。それぞれの計算を行なうには、図 (4.4) より

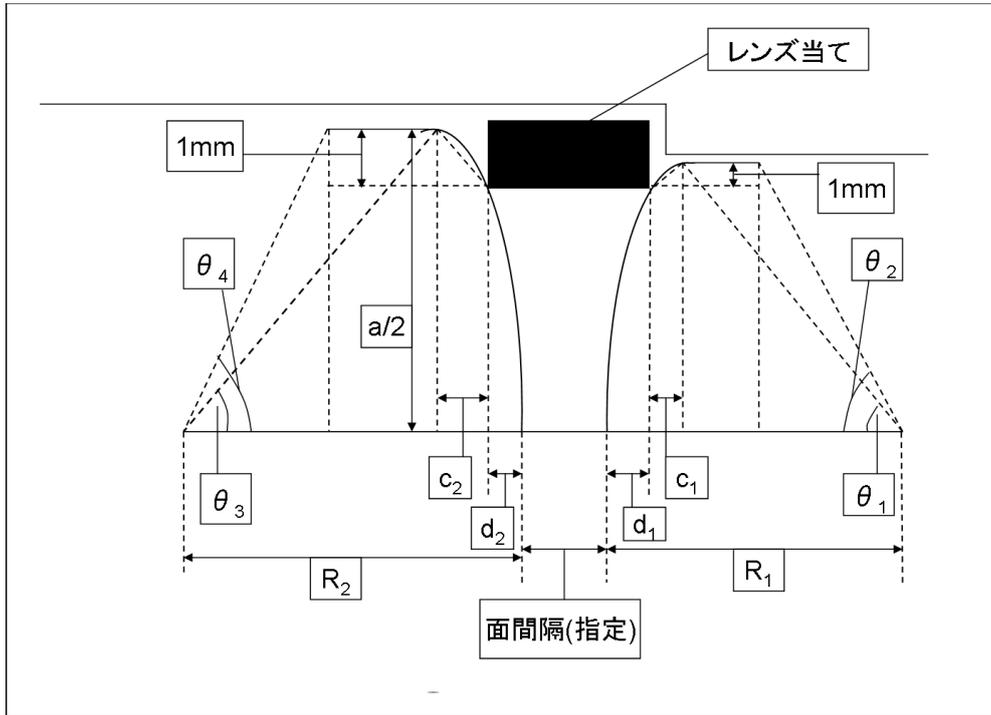


図 4.3 レンズホルダー内のレンズ当てとレンズの模式図

$$c = \sqrt{R^2 - (a - b)^2} - \sqrt{R^2 - a^2} \quad (4.1)$$

$$d = R(1 - \sqrt{R^2 - a^2}/R) - c \quad (4.2)$$

で求められる。各レンズごとの面間隔は常温・低温でそれぞれ決められているが、HONIR のレンズホルダーの設計では常温での値を用いている。設計が正しいことを再確認するため、私も常温での値を基にしてレンズ当ての設計値の再計算を行なってみた。今回再計算を行ったレンズ当ては、表 (4.2) に再計算結果と設計図の値を載せる。

表 4.2 レンズ間のレンズ当ての再計算値と設計図との比較

	再計算値	設計図の値
G2 と G3 の間	15.75	15.75
G4 と G5 の間	12.33	12.33
G7 と G8 の間	0.76	0.76
G16 と G17 の間	10.71	10.71
G19 と G20 の間	41.56	41.56

再計算値は元の設計図と全く同じであったので、設計どおりにホルダー及びこれらの部品が作成

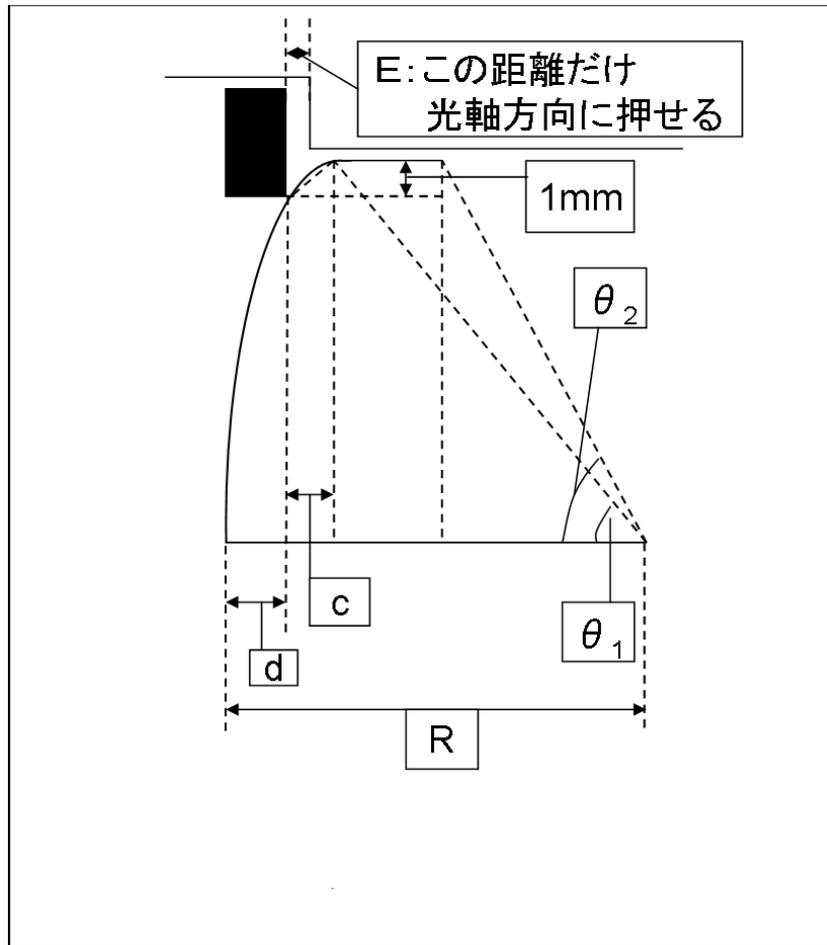


図 4.4 レンズ当て設計のための模式図

されているならば問題はないはずである。他に考えられるとするならば、レンズ当てで押さえきれ  
ていない可能性がある。もしレンズ当ての角が面取りされていれば、図(4.4)のEの分だけ光軸方  
向に動かせるため、その面取りの大きさによって押さえきれかどうかが決まる。コリメーターレ  
ンズホルダー内でこれに関係する箇所として G2 レンズと G4 レンズと G6 レンズと G7 レンズ、  
可視レンズホルダーは G16 レンズと G20 レンズが挙げられる。AutoCAD 上の設計図から、これ  
らの箇所の E の大きさを測定した。表(4.3)にその結果をまとめる。その結果例えば 0.5mm 程度  
でも面取りしてある場合にはレンズを押さえきれない場所があることが判明した。

表 4.3 押さえリングの最大押さえ距離

レンズ	G2	G4	G6	G7	G16	G20
E	0.18	0.28	0.20	0.53	0.20	0.16

そこでコリメーターレンズホルダーと可視レンズホルダーについて、すべてのレンズおよびレンズ当てを外して調べることにした。レンズホルダー一部のイモネジについてはゆるみ止めで固めてあったため、外すのに手間取った。確認したところ G7 以外のレンズ当てに光軸方向に対して 0.5mm 程度の面取りがしてあり、これが押さえきれていない原因であることがわかった。そこで対策としてレンズホルダーと全てのレンズ当てを再設計し、加工業者へ発注した。もとの設計と変えたのは以下の点である。

- レンズ当て・・・レンズに当たる面は面取りをしない設計にする
- レンズホルダー・・・レンズ当てに面取りがしてあっても問題ないように E の長さを大きくするために、レンズホルダーの対応する面を深くする。

2009 年 12 月末にはこれらの部品が納品され、超音波洗浄を行いレンズを組み上げる準備が整った。

#### 4.2.3 レンズ系の組み上げと偏芯測定

レンズの固定に関わる誤差は 3 種類あり、シフト (光軸に対して垂直方向の誤差 = 偏芯)・面間隔・傾きである。球面レンズであるので傾きは偏芯と同値となる。面間隔はレンズ当ての工作精度の指定で決まる。よって調整は偏芯のみで行なうことになる。偏芯はレンズあたり 3 つのイモネジによって調整する。実際にはオートコリメーターを用いて偏芯測定しながらイモネジを調整することで各誤差をレンズ屋指定の公差内におさめることができる。

**偏芯** レンズの面はある曲率半径を持っており、レンズが傾いていたとしても同じ曲率を持っているためレンズが傾いていたとしても区別がつかない。レンズが傾いたことにより、図 (4.5) のように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になる。

よって偏芯を測定したとしても、傾きによるものなのか、偏芯によるものなのか区別は難しい。我々はオートコリメーターで測定される軸ズレを偏芯によるものと仮定して調整を行う。

**組み上げと偏芯測定** 押さえリングの交換でガタが改善した赤外レンズホルダーがどれだけズレているか確認するために偏芯測定を行った。しかし、真空槽に組み込む以前に調整した値とほぼ変わらなかった。これで試験観測のときにシーイングが悪かった原因は残るコリメーターレンズ群にあることになる。

再製作したコリメーターレンズホルダーと可視レンズホルダーへのレンズの組み上げを行なった。しかし作業中の手違いにより、一部レンズを破損してしまい、新規作成のため 2010 年 3 月頃まで中断せざるをえなかった。作業はそれ以降になるが、手による組み上げはホルダー内の幅の問題によりとまっている状態である。安全にレンズをホルダー内に組み込むためのツールを製作する必要がある。その条件はホルダー内へ入り込むことと安全に固定でき垂直に下ろせることであり、このツールを作ることが今後の課題である。

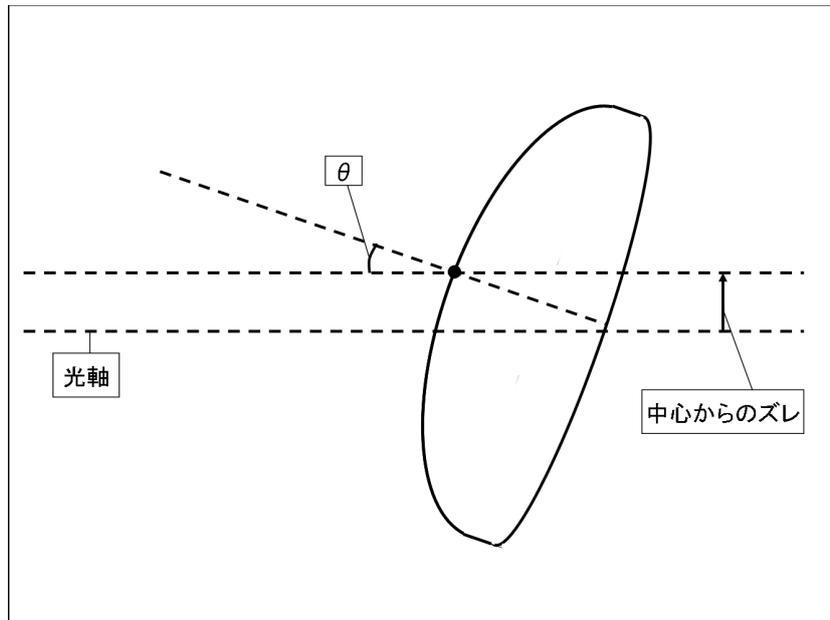


図 4.5 レンズの傾きと偏芯

## 4.3 シャッター

### 4.3.1 要求性能

可視光で観測を行なうためには読み出しに数秒から 20 秒程度かかるため、その間入射光をカットするために、必ずシャッターが必要となる。HONIR の場合、以下の点を満たしている必要がある。

- 偏光観測のために半波長板を入射光近くに置く必要があるため、それとカップルした設計にすること
- 視野を広く保つために口径 85φ 以上の大口径であること
- 0.3 秒程度で開閉できること

以上のような点を満たしている大口径の市販シャッターは探したが見つからなかった。また市販されているシャッターは行って戻ってくるようなタイプが多く、収束光中で用いる場合には露光ムラができてしまう可能性がある。そこで、我々は以上の点を満たしたシャッターを自作することにした。

### 4.3.2 設計

開閉方法 まずは感度ムラをなくすために、図 (4.6)・図 (4.7) のような開閉方法をとることにした。

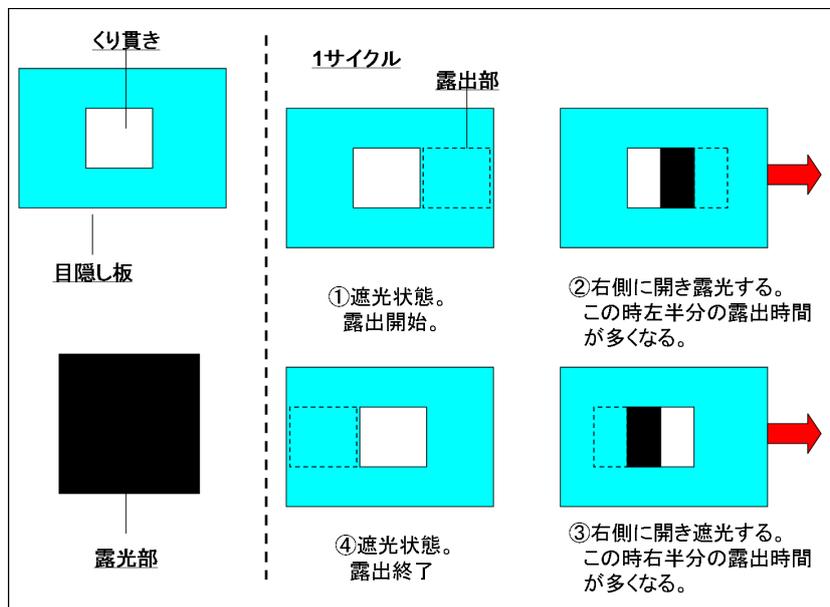


図 4.6 シャッター開閉方法

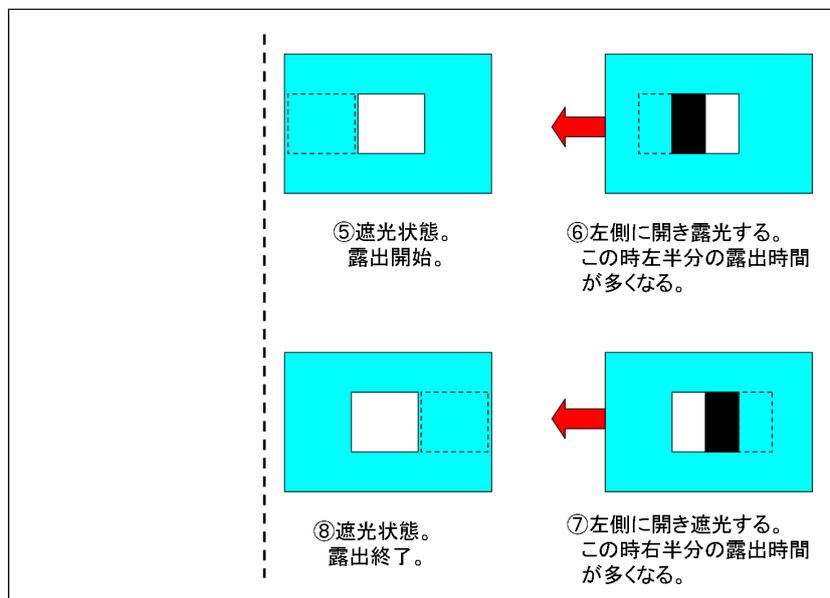


図 4.7 シャッターの開閉方法：続き

図 (4.6)・図 (4.7) のように特定方向に対してスライドさせることで、検出器上での露光ムラを解消することができる。ただし、これを実現するには等速で開き初めて閉じ終わらねばならない。

目隠し板の寸法 HONIR の入射光での光束の径が  $85\phi$ 、かなた望遠鏡の合成 F 比が 12 である。また搭載予定位置は HONIR とかなた望遠鏡カセグレン焦点台の間であり、TRISPEC の半波長板を内部に収めつつ最小のサイズにするには、本体から 130mm 程度の高さでシャッターを動かせば良い。F 比が 12(cm) であるので、一辺 100mm の正方形のくり抜きを持った目隠し板があれば充分である。また加減速の大きさから 27mm 程度で等速に達するので、以上を考慮して寸法を決めた。

スライド機構 上記の開閉方法をするために、スライド機構として SUS 社のアクチュエータとリニアガイドを用いる。アクチュエータはサーボモーターを動力としており加減速一定となるように設計されているので (図 (4.8))、上記の開閉方法で露光ムラをなくすことができる。我々が用いるアクチュエータは加減速を 0.3G で行い速度 400 mm/s で駆動する。補助としてリニアガイドを付けることによって、スムーズな動作を可能とする。

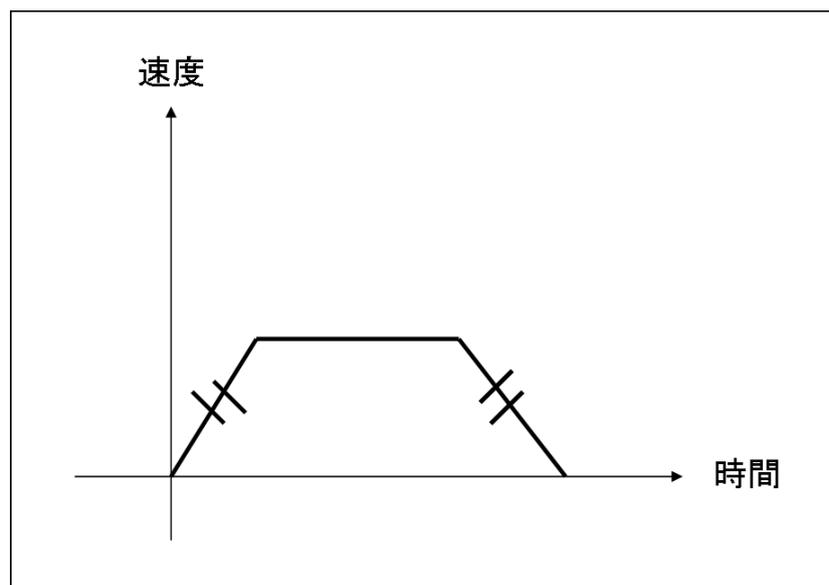


図 4.8 アクチュエータの速度を示した図

以上のような仕様を持つシャッター機構を独自に設計した (APPENDIX. A 参照)。

#### 4.3.3 シャッター制御系

シャッター制御は AVR マイコンとシャッターボード (参考文献 [1]) を用いて行なう予定である。精度良く露出時間を決めることができ、露出キャンセル機能を実装させることが可能である。ただし、シャッタードライバは露出中でもキャンセルコマンド以外の文字列を受け取った場合でもプログラムが動いてしまうため、露出時間のズレが生じてしまう可能性がある。現在はシャッター制御

中にハードウェアからの命令を発しないようにしている。この状態は観測者の視点から見ると、合理的ではないため今後改良をする必要がある。またシャッターが納品されたらこれらの回路を次第組み上げ、プログラム作成・書き込みを行わなくてはならない。

## 5 まとめと今後

### 5.1 まとめ

#### 5.1.1 2009年2月の現状

私は本研究で2009年4月より東広島天文台が開発中のかなた望遠鏡用装置 HONIR の真空・駆動・光学系の立ち上げに携わってきた。その前の一年間は主に既存の装置 (TRISPEC) を用いたブレーザーの観測的研究を行っていたが、その研究ステージをひとまわり高めるため、より感度の良い HONIR の開発に興味を持ち、研究内容に移した。HONIR は可視・近赤外線の同時撮像ができる装置であり、撮像の他、偏光撮像モード、分光撮像モード、偏光分光撮像モードを実装することができる世界的にもユニークな装置である。読み出しシステムは MESSIA5 を、検出器は HgCdTe アレイ VIRGO-2K、大盤の完全空乏層型 CCD を用いており、検出器ノイズやスカイバックグラウンドを低く抑え高感度の観測が可能である。HONIR は長期運用を目的としており、高真空状態 ( $\sim 10^{-6}$ Torr) を数ヶ月間維持しなくてはならない。また精度の良い可視・近赤外線同時観測のために光学系の精密な調整や同時撮像システムの開発が必要となる。以上の事から HONIR のような可視・近赤外撮像装置は一般に大型で複雑であるため開発は非常に難しい。2009年度初頭での HONIR 開発の課題として、

- 高真空状態 ( $\sim 10^{-6}$ Torr) の実現
- 駆動系の冷却下での駆動
- レンズ系の調査と調整
- シャッターの設計と製作
- 同時撮像システムの構築

などが挙げられる。本研究の最終目的は、HONIR を長期運用のできる多色撮像装置として立ち上げることである。検出器系はほぼ立ち上がっていたが、まだ真空・駆動・光学系は上述のように完成にはほど遠い状況であった。

#### 5.1.2 課題の解決・達成状況

各系ごとの達成状況を以下にまとめる。

##### ・真空槽

当初は冷却しても真空度は  $10^{-4}$ Torr より下がらず、真空保持も良くなく二時間程度で望遠鏡を天頂方向きで止めて真空引きをしなければ観測が続けられないような状況であった。この原因は真空漏れかアウトガスのどちらかであり、その原因を突きとめるため真空漏れをしていると覆われる箇所の調査・対処、およびアウトガス源の調査を行う真空冷却試験を行った。IR2 のフランジに Oリング接触面に真空漏れの原因だと考えられる大きな傷を発見し、手で触っても分からないレベル

まで磨きあげることで対処した。その後の試験でも真空度には思うような変化は見られなかったため、機材を借りて He リーク試験を行った。その試験により IR2 のフランジ・ハーメチックコネクタから微小な真空漏れをしていることを突きとめた。傷のあったフランジに関しては爪で確認しても分からないレベルまでさらに磨きあげ、ハーメチックコネクタの O リングを幅の太いものに変えた。IR2 フランジへのアルコールの吹き付けにより真空度は目標値である  $10^{-6}$  Torr を達成することが出来、原因となっている箇所を完全に特定できたと考えている。これは高真空でなければ効いてこないほどの微小な漏れが存在をしており、内部は低温低圧のためアルコールが気化せずその漏れを塞いだと考えられる。

#### ・冷却駆動系

常温用のモーターを冷却用に改造して新規モーターを作成した。また温度センサーユニットの作成を作成した。これらを本体に組み込んで冷却下で必要なすべてのホイールが問題なく駆動すること、及び温度モニターを可能とした。

#### ・光学系

赤外レンズホルダーは外側の新規押さえリングと交換する事で押さえ不良は改善され、その後レンズの偏芯測定を行いすべてのレンズが指定される公差以内におさまっていることがわかった。レンズホルダーの設計の調査と現物の調査により、レンズ当てに 0. 数 mm 以上面取りがしてあるためレンズを押さえ不良があることが判明した。可視レンズホルダーとコリメーターレンズホルダーと各レンズ当ての再設計を行い、面取りしてあっても問題なく押さえることができるようにした。その後の組み込みの際に一部レンズが破損したため、調整は送れたが 2010 年 3 月には再開できる見込みである。また露出ムラを失すようなシャッターの設計を行った。これは近日中に業者へ発注する予定である。

以上のようにそれぞれの問題を解決し、今年中には可視・近赤外同時撮像の立ち上げの目途がたつたと考えられる。

## 5.2 今後の課題と立ち上げスケジュール

今後必要となる立ち上げの課題は、

- IR2 フランジの対処し、真空冷却試験
- レンズを垂直にレンズホルダーに投入するための治具の製作とレンズの組み上げ・偏芯測定
- 冷却しての光学試験
- ダイクロイックミラーの透過率調査
- シャッターの製作とプログラム作成
- 可視・近赤外線同時撮像システムの構築

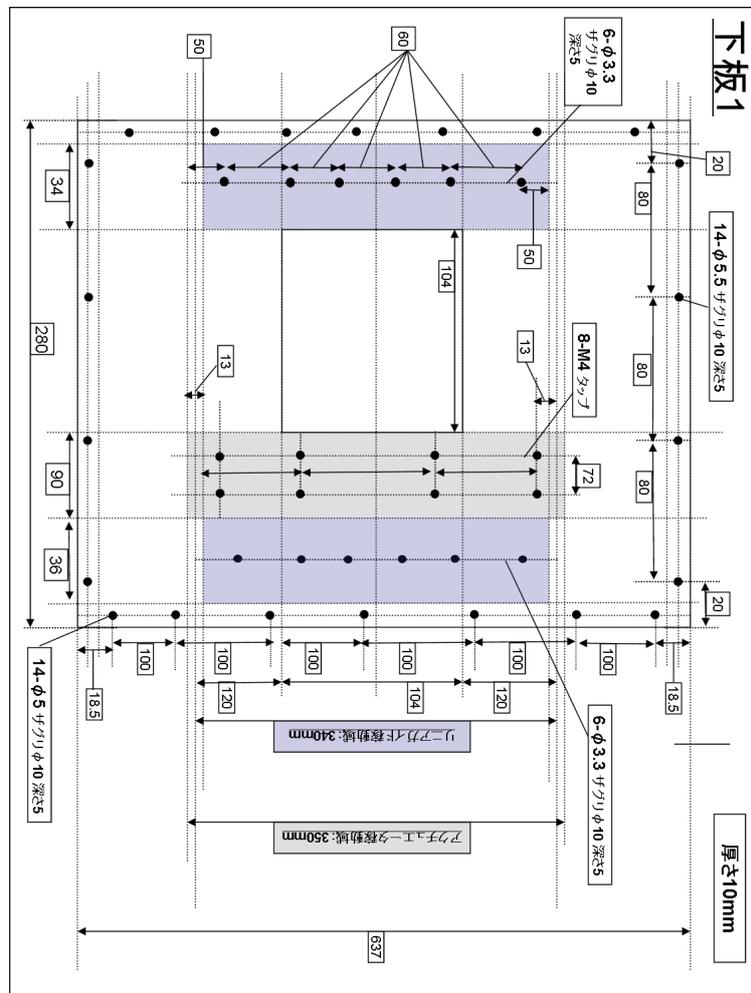
が挙げられる。今年中に以上のことをやり遂げ、来年初頭にかなたに搭載して同時撮像の試験観測を行ないたい。

## 6 謝辞

本装置の立ち上げに当たって、まず、このような機会を与えてくださっ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へ深く感謝します。本研究室にきて初めて開発に携わり、まったく進め方のわからなくて戸惑いながらもなんとか本論文を書き上げることができました。特に川端先生には知識の乏しく理解力が悪い私に、丁寧に根気強く御指導していただきました。本当に有難うございました。また国立天文台に異動された HONIR の設計者、及び前指導者である山下先生、開発前任者である本研究室卒業生の宮本さんには HONIR についてだけではなく開発で用いる道具や検出器などに関して獅童していただきました。植村先生には M1 の時に大変お世話になりました。天文学をまったく知らない私に、論文の検索方法・研究の進め方など研究者としてやっていく方法や必要な心構えを教えていただきました。深澤先生をはじめとした高エネルギー宇宙の先生方にも、気にかけていただき有難うございました。その他の方にもお世話になりました。山中さん、笹田さん、京産大へ異動された新井さんには観測でお世話になりました。料理の味濃くてすみません。観測に戻るまでにスキルを上げておきたいと思います。永江さんには特に学振で川端先生が出張でいない中、かわりに指導していただき有難うございました。出せたのは永江さんのおかげです。また外部から来た私に分け隔てなく接してくれた同じ M2 のみんなのおかげで、この二年間を乗り切ることができたと思います。まだアウェー感は抜けきらないですが、これからも壁を作らないようにして頑張る研究していこうと思います。池尻くんは卒業しますが、広島が地元なのでいつでも研究室にこれるとしますので、近いうちに是非 M 2 だけで飲みましょう。最後に私の論文執筆や HONIR の開発にご協力いただいた方、私に関わってくださったすべての人に厚くお礼を申しあげ、中小口径望遠鏡のこれからの未来と HONIR の完成、東広島天文台の活躍を祈願しつつ、私の修士論文を締めくくらせていただきたいと思います。本当に有難うございました。

APPENDIX. A

HONIR シャッター設計図



☒ APPENDIX. A.1

アクチュエーター・リニアガイドの基板

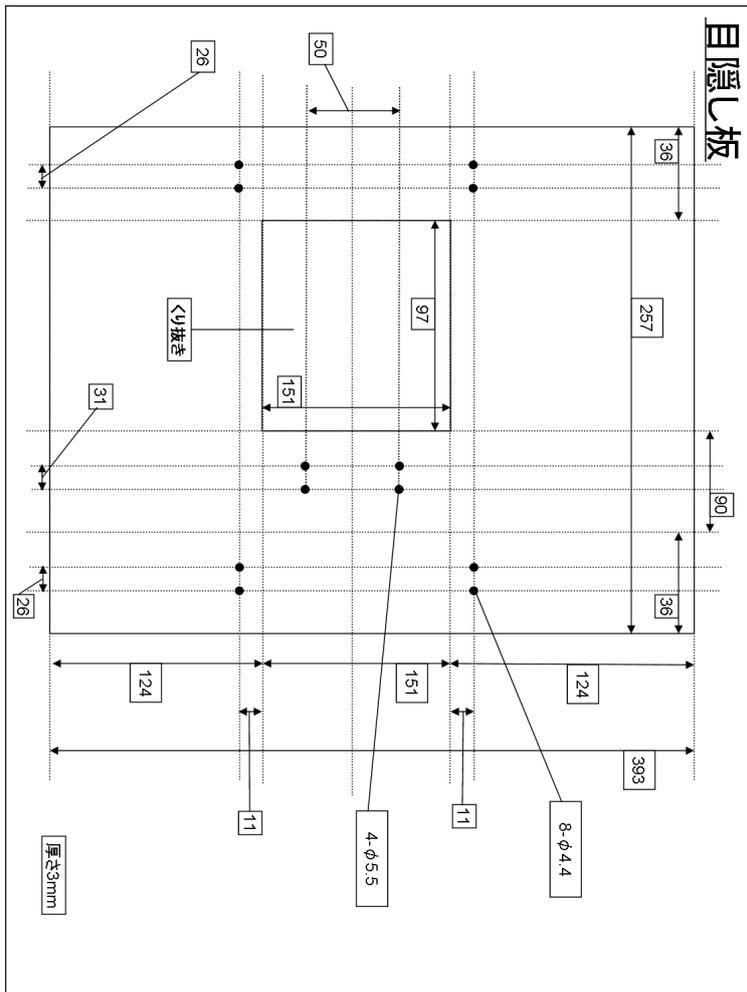
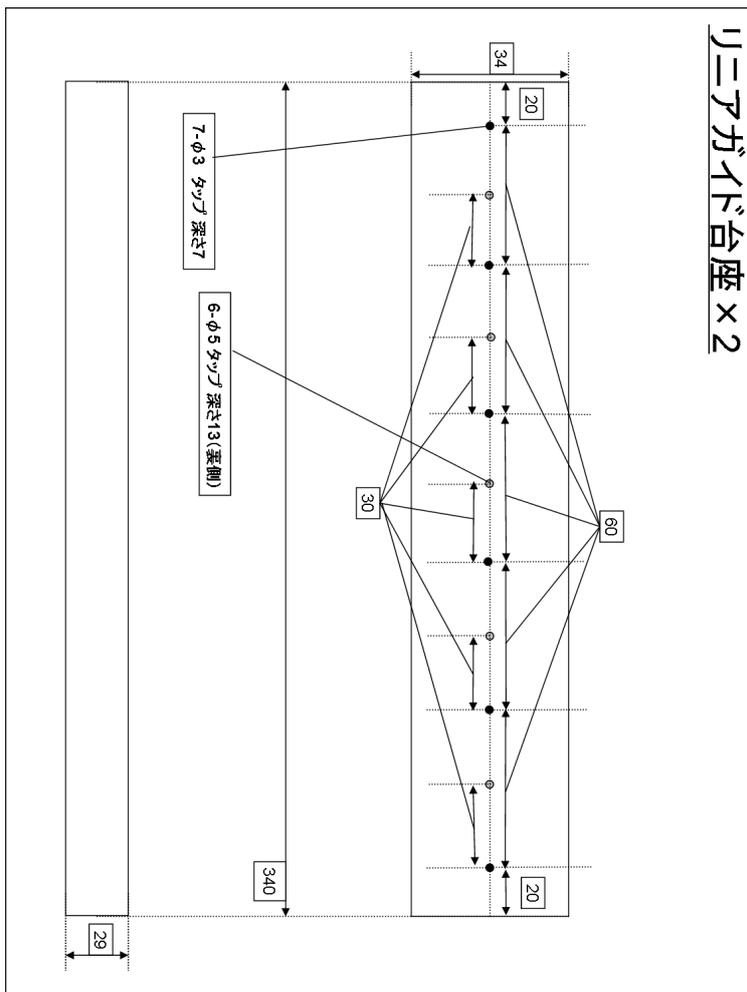


図 APPENDIX. A.2

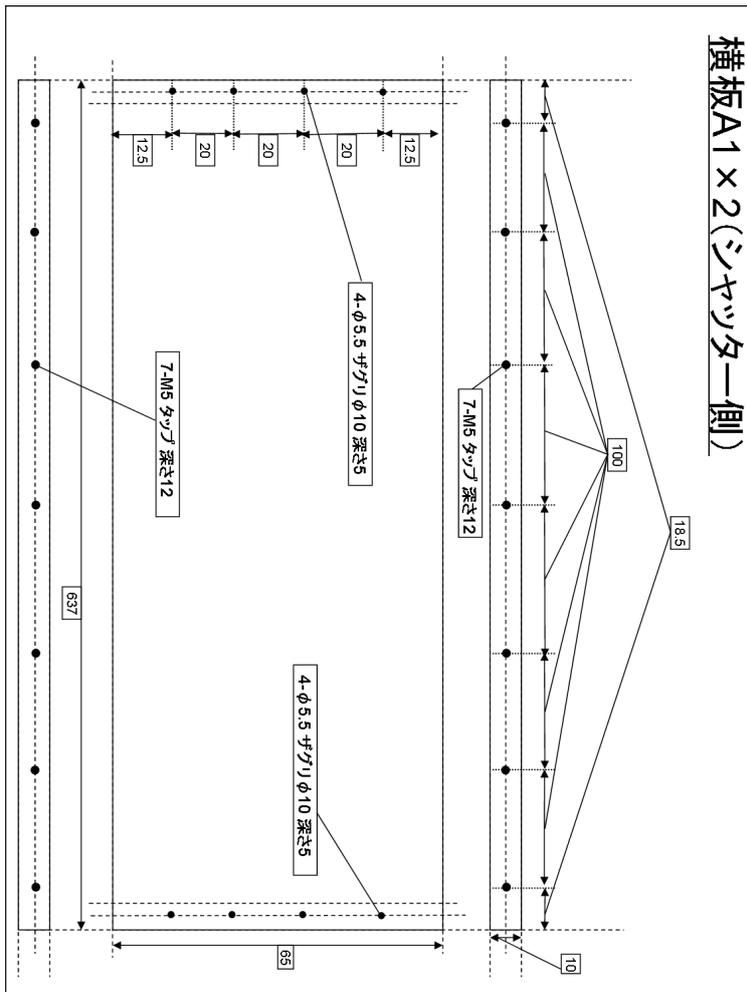
遮光板

リニアガイド台座×2



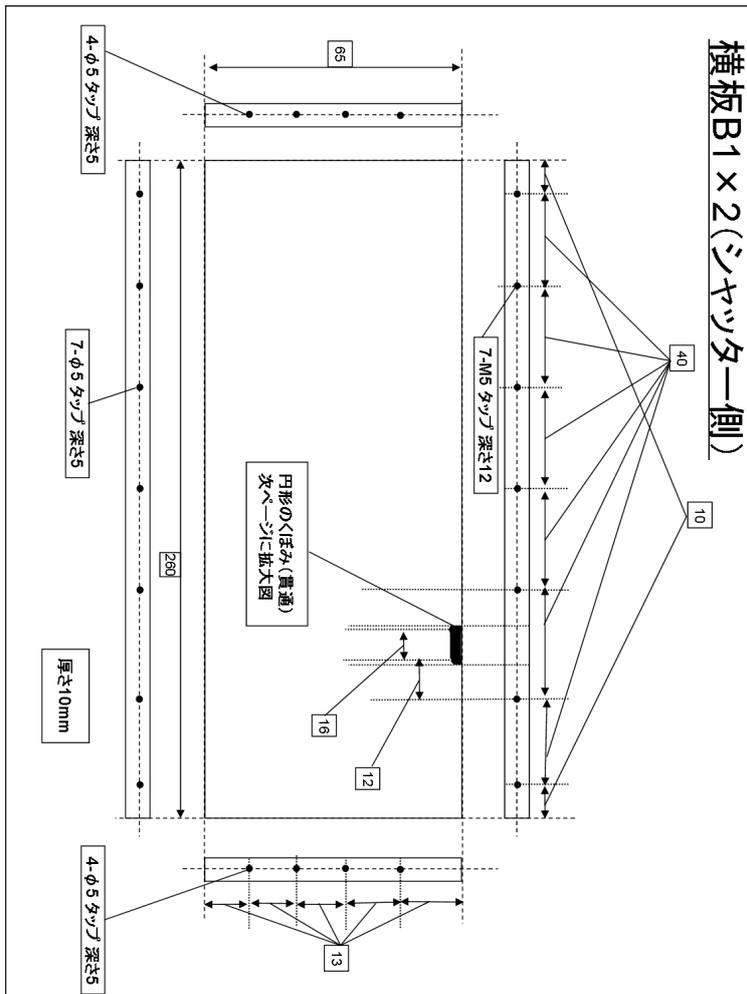
☒ APPENDIX. A.3

リニアガイド台座



☒ APPENDIX. A.4

シャッター筐体横板 A



☒ APPENDIX. A.5

シャッター筐体横板 B

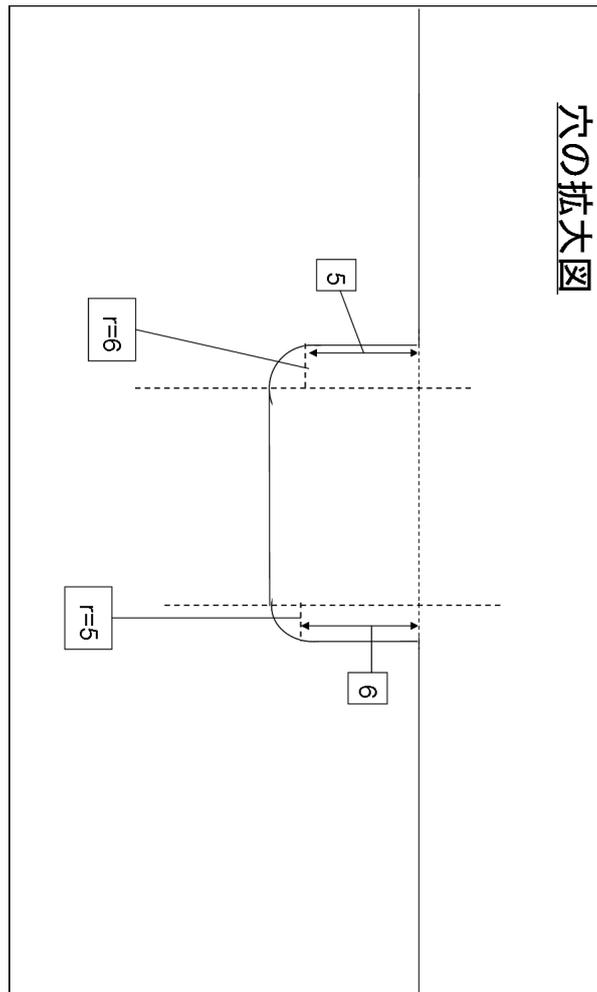


図 APPENDIX. A.6

図 (APPENDIX. A.6) の穴の拡大図

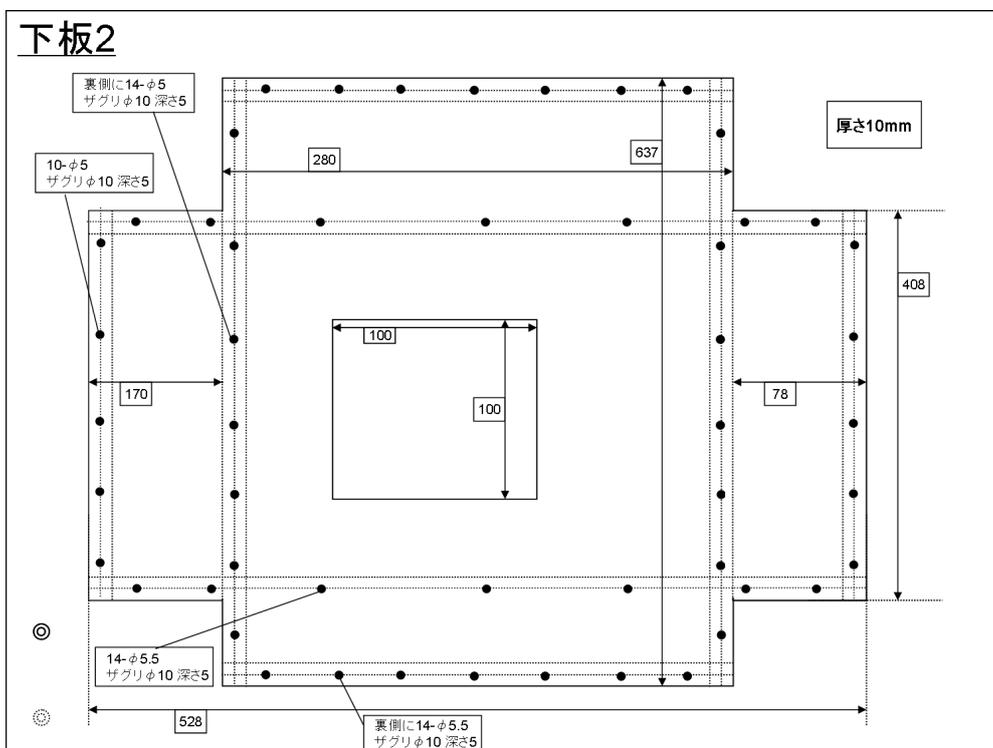


図 APPENDIX. A.7

シャッター筐体基板 (HONIR 側)

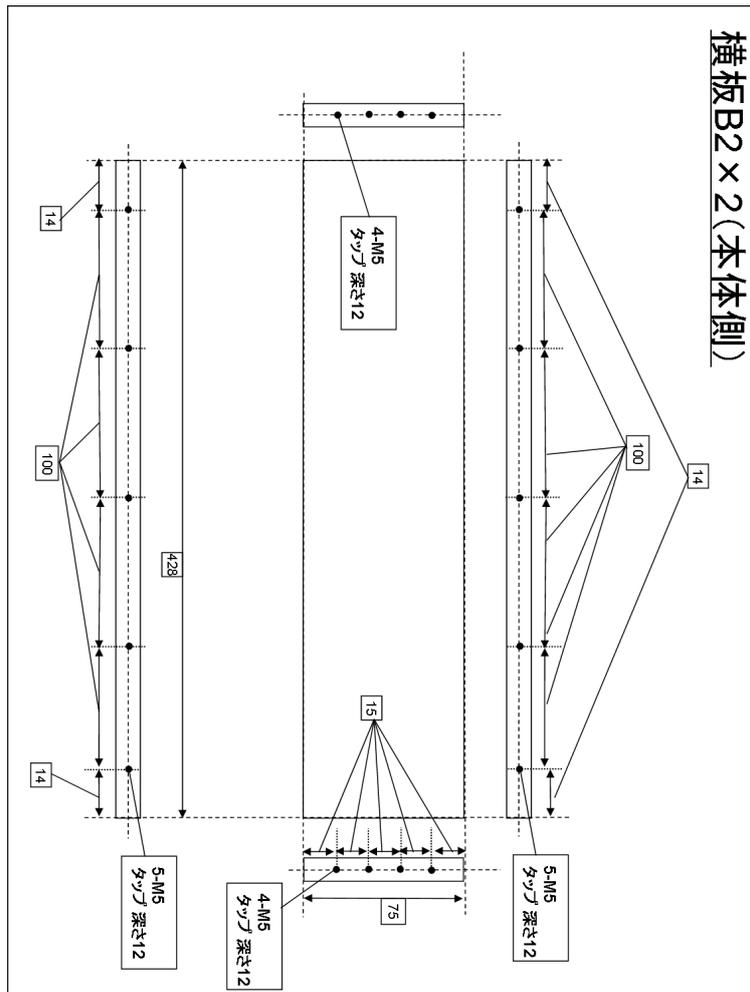


図 APPENDIX. A.8

シャッター筐体横板 C(HONIR 側)

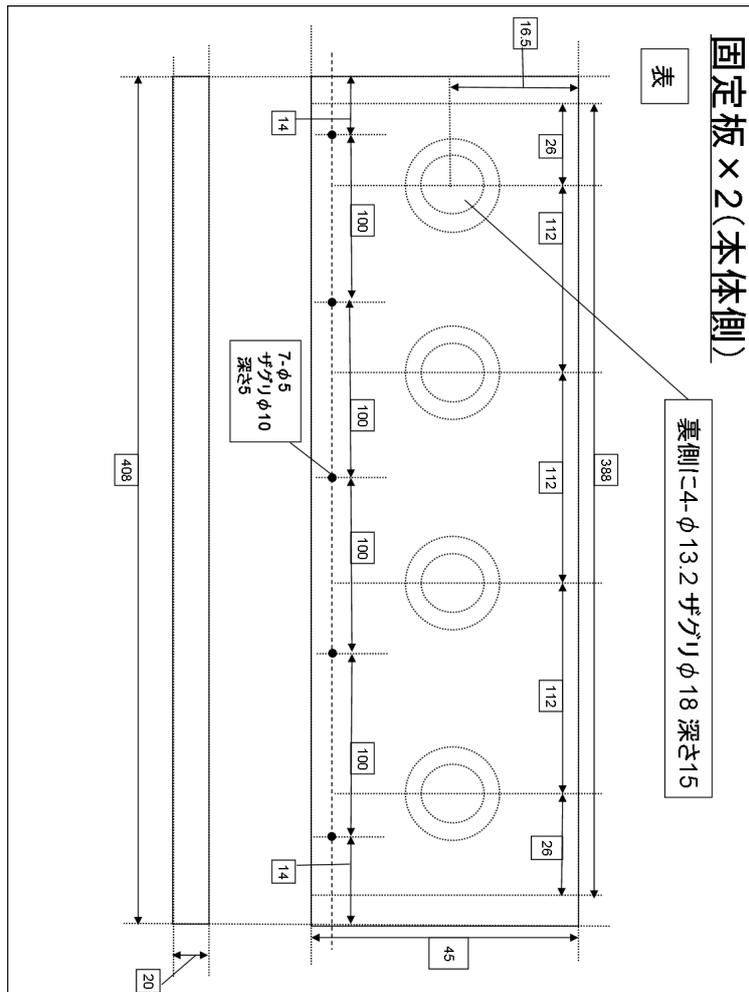


図 APPENDIX. A.9

シャッター筐体横板 D(HONIR 側)

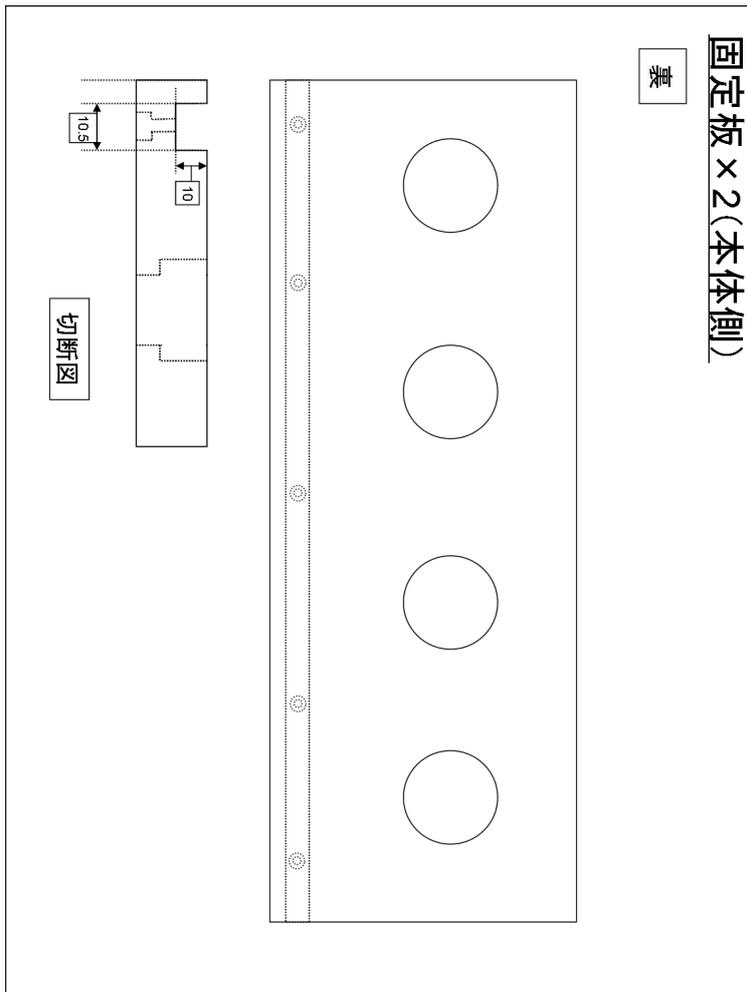


図 APPENDIX. A.10

HONIR への固定板

## APPENDIX. B TRISPEC を用いた Blazar の偏光観測

今日までに時間的に密で長期間の Blazar の偏光観測はほとんど行なわれたことがない。Blazar の典型的な可視の明るさは 16 等であり、精度良く且つ長期的に偏光観測を行なうには主鏡口径が 1m 以上の望遠鏡に偏光装置が常設されている必要がある。「かなた」望遠鏡は口径 1.5m の主鏡を持ち、それに常時搭載されている TRISPEC は一度に可視・近赤外の波長帯で偏光撮像観測ができるため極めて有利である。我々は 2008 年 6 月から 2009 年 2 月まで Blazar の代表格である BL Lac を今までに例が見られないほど密な多色偏光観測を行なった。

偏光を表すパラメータとして光の強度の次元を持つストークスパラメータ  $Q$  と  $U$  を使い、プロットしたものが図 (APPENDIX. B.1) である。観測した結果、予想通り生データのままでは光度と偏光度に明らかな相関関係は見られなかったが、平均偏光成分を生データからベクトル的に差し引いて変動成分のみを抽出してプロットしたのが図 (APPENDIX. B.2) である。この変動成分に注目すると、可視でのフレアに付随して偏光度も同様に変動している期間がみられた。このような手法を、HONIR を用いて行う赤外線観測にも拡張し、多バンドで観測することで、Blazar ジェットの輻射機構に対してさらに研究を進めることができるようになることを期待している。

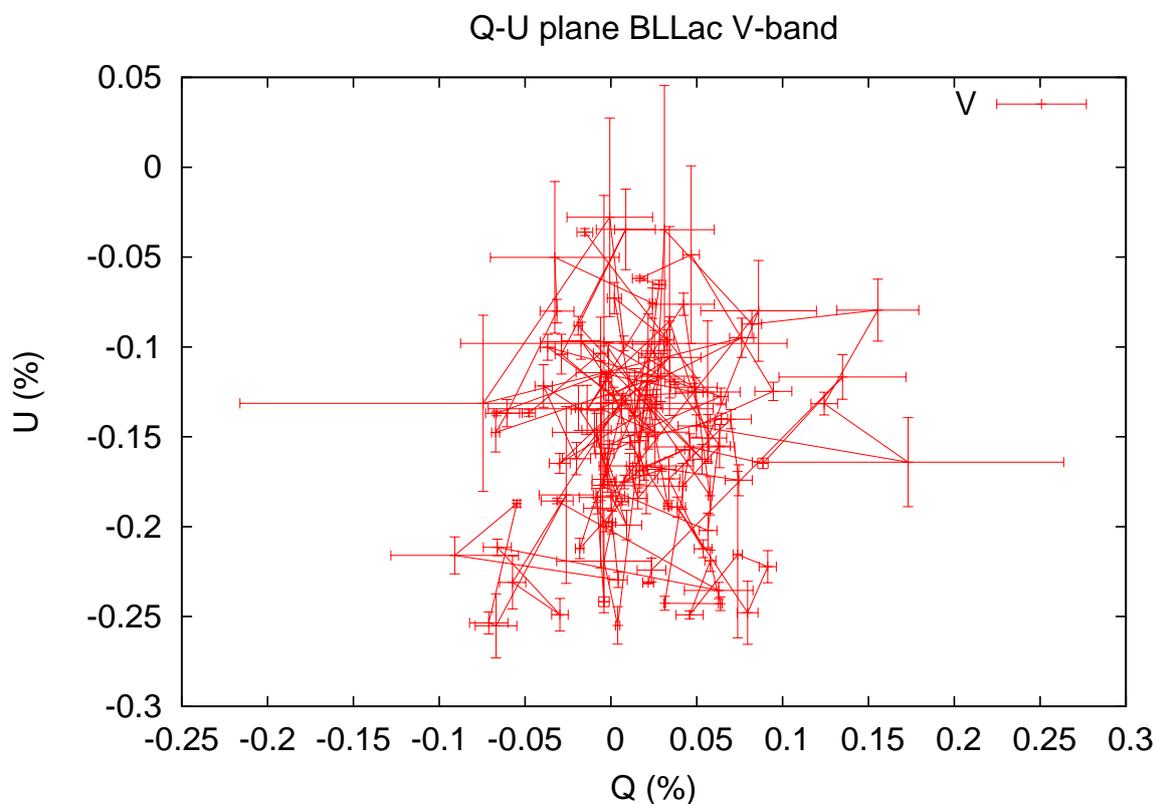


図 APPENDIX. B.1

BL Lac の QU 平面上での時間変化

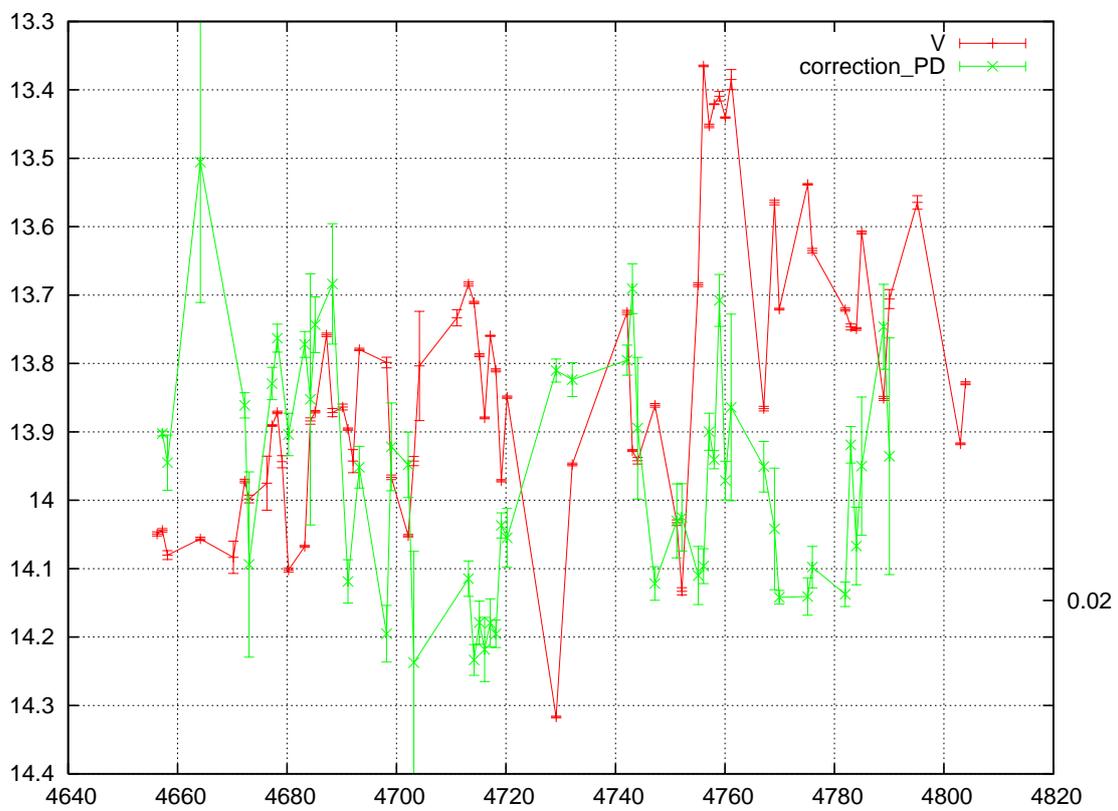


図 APPENDIX. B.2

BL Lac の光度曲線と偏光の時間変化

## 参考文献

- [1] 宮本久嗣 「かなた望遠鏡「可視近赤外線同時撮像カメラ」の開発」広島大学 修士論文 2009
- [2] 堀越源一 「真空技術」 東京大学出版会 1977
- [3] 千代延真吾 「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 修士論文 2007
- [4] シリーズ現代の天文学 第 15 巻 「宇宙の観測 I-光・赤外天文学-」 日本評論社 2007
- [5] シリーズ現代の天文学 第 5 巻 「銀河 II」 日本評論社 2007
- [6] シリーズ現代の天文学 第 6 巻 「星間物質と星形勢」 日本評論社 2008
- [7] 福江純 「輝くブラックホール降着円盤-降着円盤の観測と理論-」 プレアデス出版 2007
- [8] (株) レンズ屋 「可視赤外カメラ (HU05) 設計報告書」 2006
- [9] 渡邊誠 「可視近赤外同時撮像分光器 TRISPEC の開発と 2 型 Seyfert 銀河の偏光分光観測」  
名古屋大学 Z 研 博士論文 2003
- [10] 長嶋千恵 「近赤外 3 色同時サーベイ用カメラ SIRIUS の開発と SIRIUS によるプレアデス  
星団の褐色矮星探査」 名古屋大学 Z 研 博士論文 2003
- [11] 「ミスミ FA 用部品 カタログ 2006」
- [12] Watanabe et al. 2005 PASP,117,870
- [13] Chaty et al. 2008 A&A 484,783
- [14] Kwawczynski et al. 2004 AJ,601,151
- [15] Claudia et al. 2006 Proceeding IAU Symposium No.241,
- [16] Uemura et al. 2004 PASJ,56,823
- [17] Maraston et al. 2002 astron.soc,333,575
- [18] Matthew&Paul et al. 2000 AJ,541,66
- [19] Serkowski et al. 1975 AJ,196,261
- [20] Chaty er al. 2003 Astron.soc,346,689
- [21] Corbel&Fender et al. 2002 AJ,573,1.000
- [22] Fender et al. 2001 Astron.coc,322,31
- [23] Fender et al. 2004 Astron.soc,355,1105
- [24] Homan et al. 2005 AJ,624,295
- [25] Dubus et al. 2006 A&A,458,591
- [26] Liu et al. 2001 A&A,368,1021
- [27] Migliari&Fender et al. 2005 arXive:astro-ph0510698v1
- [28] Markoff et al. 2001 A&A,372,I.25
- [29] Paizis et al. 2009 A&A no.5972
- [30] Russell et al. 2008 Astron.soc,387,713
- [31] Shahbaz et al. 2008 AJ,672,510

- [32] Shahbaz&Fender&Watson&Btien et al. 2008 AJ,672,510
- [33] Arai et al. 2009 PASJ
- [34] Uemura et al. 2009 PASJ
- [35] Villata et al. 2002 A&A,390,407
- [36] Villata et al. 2004 A&A,421,103
- [37] Villata et al. 2004 A&A,424,497
- [38] Albert et al. 2007 AJ,669,862
- [39] Raiteri et al. 2003 A&A,402,151
- [40] Orienti&Dallacasa et al. 2008 A&A,479,409
- [41] Pushkarev et al. 2005 Astron.soc,356,859