

かなた望遠鏡用
可視近赤外同時カメラ HONIR の
撮像モードの性能評価

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・可視赤外天文学研究室
M103150 原尾 達也
主査:吉田道利 副査:小嶋康史

2012年2月10日

概要

広島大学附属施設の東広島天文台に設置されている「かなた」望遠鏡は機動力に優れており、ガンマ線バーストなどの突発的天体を観測するのに適している。また突発天体は観測機会が限られており、多バンド同時観測や素早い多モード(測光、分光、偏光)の切り替え観測が重要となってくる。我々はかなた望遠鏡の主力装置として可視近赤外同時カメラ HONIR の開発を行ってきた。HONIR は可視光と近赤外線と同時に撮像、さらに分光と偏光を行うことができ、これまで設置されてきた TRISPEC に比べ広視野となっている。またピクセルスケールが星像サイズとマッチした設計となっているので、バックグラウンドノイズが軽減され限界等級が深くなっている。

私はこの HONIR の開発において、主に光学シャッターの立ち上げを担当し、また 2011 年 10 月から 2012 年 1 月にかけて行った試験観測において、撮像モードにおける装置性能全般の評価を担当した。光学シャッターについては制御ソフトウェアを開発し、各種の駆動の試験を行い安定性に問題ないことを確認した。試験観測ではシャッターの露光時間のキャリブレーションと駆動の安定性、フラットフィールドの安定性、標準星等の観測による大気減光(図 3.33)と装置効率の測定、および視野内の収差の測定(図 2)等を行った。シャッターは短時間露出モードと長時間露出モードの 2 つのモードがあり、別々にキャリブレーションを行うことで 0.3s ~ 500s までの広い露出時間での直線性からのズレが 3% 以内に収まるようにした。また、望遠鏡の反射率込みの装置効率は I バンドではほぼ仕様通りの 20% であったが、近赤外のバンドでは仕様のほぼ半分の約 10% という結果となった。ただし、この近赤外の効率については検出器の電荷変換効率の不定性の影響が含まれていることに留意を要する。また最良星像サイズは可視では 1.7、近赤外では 0.9 が得られ通常の観測には十分な結像性能が得られたが視野中心から離れるにつれ、特にコマ収差が強まり、今後の調整項目に挙げられる。

以上のことから、HONIR は可視・近赤外 2 バンド同時撮像装置としてはすでに十分な性能を持っており、調整を加えることで更に限界等級が上がると結論づけられる。

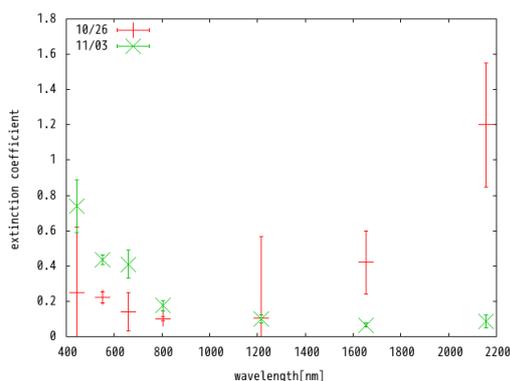


図 1: 各バンドの大気の大気減光係数 (単位 等級 /airmass)

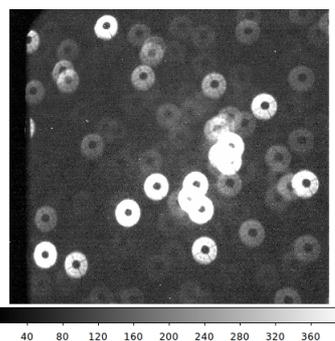


図 2: 収差の様子を特定するためのオフフォーカスで撮像した星団。星ごとに主鏡像と副鏡の影が写っている。

目次

第 1 章	序論	7
1.1	東広島天文台	7
1.1.1	東広島天文台	7
1.1.2	かなた望遠鏡	7
1.1.3	観測装置	7
1.2	可視近赤外同時カメラ HONIR	11
1.2.1	HONIR について	11
1.2.2	真空・冷却系	12
1.2.3	光学系	13
1.2.4	検出器系	15
1.2.5	駆動・制御系	17
1.2.6	HONIR での研究対象	18
1.2.7	開発の歴史と進捗	19
1.3	本研究の目的	21
第 2 章	光学シャッターの開発	22
2.1	ハードウェア及びソフトウェア	22
2.1.1	仕様	22
2.1.2	要求性能	24
2.1.3	制御機構	24
2.1.4	制御プログラムの開発	24
2.1.5	露光開始・終了位置の算出	25
2.2	駆動安定試験	27
2.2.1	速度、加速度の安定性	27
2.2.2	姿勢の変化に対する駆動の安定性	31
2.2.3	全体の動作の安定性	31
第 3 章	撮像モードの性能評価	33
3.1	HONIR の撮像モード	33
3.1.1	検出器及びフィルター	33
3.1.2	設計仕様	33
3.2	試験観測	34
3.2.1	試験項目とその目的	34
3.2.2	実施内容	35
3.3	光学収差	35

3.3.1	ザイデル収差	36
3.3.2	星像サイズの視野内位置依存性	38
3.3.3	デフォーカス像による収差の考察	40
3.4	シャッターの駆動安定性及びフラットフィールド	45
3.4.1	駆動中心と光学中心合わせ	45
3.4.2	駆動の温度依存性	47
3.4.3	露出時間の較正	49
3.5	大気減光及びスカイ輝度	51
3.6	総合効率	62
3.7	限界等級	64
第4章	まとめ	66

目次

1	各バンドの大気の減光係数 (単位 等級/airmass)	1
2	収差の様子を特定するためのオフフォーカスで撮像した星団。星ごとに主鏡像と副鏡の影が写っている。	1
1.1	東広島天文台	7
1.2	かなた望遠鏡	8
1.3	TRSPEC	9
1.4	HOWPol	10
1.5	高速カメラ	11
1.6	かなた望遠鏡に装着した HONIR	12
1.7	HONIR の真空槽 (1m × 1m × 0.7m)	13
1.8	HONIR の光学図	14
1.9	完全空乏層型 CCD	15
1.10	VIRGO-2K	16
1.11	Messia5 の DSP カード	17
1.12	トランジット観測の減光の様子	18
1.13	Blazar	19
1.14	T Tau 星	20
1.15	2011 年までの進捗	21
2.1	アクチュエーターの構造	23
2.2	アクチュエーターのコントローラー	23
2.3	制御の流れ	24
2.4	長時間露出モードでの露出方法	25
2.5	模式図	27
2.6	図 2.5 の G1 付近の拡大図	27
2.7	各加速度での速度	28
2.8	各速度での加速度	29
2.9	各速度での減速度	30
3.1	球面収差 (光路)	36
3.2	コマ収差 (光路)	36
3.3	非点収差 (光路)	37
3.4	像面収差 (光路)	37
3.5	歪曲収差 (樽型)	38
3.6	歪曲収差 (糸巻き型)	38

3.7	H- χ 星団	38
3.8	星像サイズの視野内依存性 (近赤外)	39
3.9	星像サイズの視野内依存性 (可視)	39
3.10	周辺星像の楕円の長軸の方向から算出した光学中心	40
3.11	星像サイズのノミナルな視野中心 (緑) 及び、星像の伸びから推算した光学中心 (赤) からの距離依存性 (可視)	41
3.12	$\Delta z = +3.0\text{mm}$ の時の視野左上での星像	41
3.13	図 3.12 と同じ状態での視野右上での星像	41
3.14	図 3.12 と同じ状態での視野中心での星像	42
3.15	図 3.12 と同じ状態での視野左下での星像	42
3.16	図 3.12 と同じ状態での視野右下での星像	42
3.17	r/a の Δz の依存性。可視 (opt), 近赤外 (ir) それぞれで 5 箇所の星像の平均値を示している。	43
3.18	e の Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。	44
3.19	x 方向の中心ズレの Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。	44
3.20	y 方向の中心ズレの Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。	45
3.21	シャッターの位置を固定して撮像したデータ	46
3.22	図 3.21 を縦に見たグラフ	46
3.23	シャッターが開く時の半値になるピクセル	47
3.24	シャッターが閉じる時の半値になるピクセル	48
3.25	短時間露出モードでの温度依存性	48
3.26	長時間露出モードでの温度依存性	49
3.27	設定露出時間と実際の露出時間	50
3.28	露光時間を校正した後の設定露出時間と実際の露出時間	51
3.29	500s 露出でのフラットフィールド	52
3.30	220s 露出	53
3.31	6.0s 露出	53
3.32	0.3s 露出	54
3.33	各バンドの大気減光	55
3.34	airmass による B バンドでのスカイ輝度の変化	55
3.35	airmass による V バンドでのスカイ輝度の変化	56
3.36	airmass による R バンドでのスカイ輝度の変化	56
3.37	airmass による I バンドでのスカイ輝度の変化	57
3.38	airmass による J バンドでのスカイ輝度の変化	57
3.39	airmass による H バンドでのスカイ輝度の変化	58
3.40	airmass による Ks バンドでのスカイ輝度の変化	58
3.41	月齢による B バンドでのスカイ輝度の変化	59
3.42	月齢による V バンドでのスカイ輝度の変化	59
3.43	月齢による R バンドでのスカイ輝度の変化	60
3.44	月齢による I バンドでのスカイ輝度の変化	60
3.45	月齢による J バンドでのスカイ輝度の変化	61
3.46	月齢による H バンドでのスカイ輝度の変化	61

3.47 月齢による K _s バンドでのスカイ輝度の変化	62
3.48 設計効率を観測された総合効率	64

表 目 次

1.1	かなた望遠鏡の主な諸元	8
1.2	TRISPEC の仕様	9
1.3	HOWPol の仕様	10
1.4	高速カメラ	11
1.5	完全空乏型 CCD の仕様	15
1.6	VIRGO-2K の仕様	16
2.1	アクチュエーターの仕様	23
2.2	露出位置	27
2.3	各加速度での速度	28
2.4	各速度での加速度 ($v = 550 \sim 570$ [mm/s])	28
2.5	各速度での加速度 ($v = 580 \sim 610$ [mm/s])	29
2.6	各速度での減速度 ($v = 550 \sim 570$ [mm/s])	29
2.7	各速度での減速度 ($v = 580 \sim 610$ [mm/s])	30
2.8	置き方を変化させたときの動作の平均時間と標準偏差	31
2.9	各露出時間での動作終了時間	32
3.1	装着されている可視フィルターの仕様	33
3.2	装着されている近赤外フィルターの仕様	33
3.3	設計仕様	34
3.4	大気減光を補正した装置効率 (望遠鏡込み)	62
3.5	装置効率の設計値 (望遠鏡の反射率込み)	63
3.6	R バンドでの限界等級	64
3.7	K _s バンドでの限界等級	64
3.8	HONIR と TRISPEC の限界等級	65

第1章 序論

1.1 東広島天文台

1.1.1 東広島天文台

東広島天文台は東広島市当局や国立天文台などの協力により建設された、広島大学宇宙科学センターの附属施設である(図 1.1)。観測研究基盤を整備し、すばる望遠鏡に搭載する装置のシュミレーターとして使われていた望遠鏡(赤外シュミレーター)を東広島天文台に移設し観測装置などの立ち上げを行い2006年10月より本格的な観測を始めた。また、東広島天文台は大学から車で約20分と簡単にアクセスできる。



図 1.1: 東広島天文台

1.1.2 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は元々国立天文台三鷹キャンパスで赤外シュミレーターとして、すばる望遠鏡搭載装置のシュミレーターとして運用されていた。広島大学はこの望遠鏡を東広島天文台に移設し、公募によりかなた望遠鏡と名付けられた。このかなた望遠鏡の主鏡は直径が1.5mあり国内最大級の大きさで、方位速度5度/s、高度速度2度/sで動くように改造を施しこの大きさの望遠鏡では世界最速レベルである。かなた望遠鏡の写真を図1.2に、主な諸元を表1.1に示す。

1.1.3 観測装置

かなた望遠鏡にはカセグレン焦点に1つ、ナスミス焦点に2つの観測装置を取り付けることができる。



図 1.2: かなた望遠鏡

光学系	リッチー・クレティアン光学系
主鏡の有効径	1540mm
主鏡材	ULE(超低膨張ガラス) 直径 1600mm 重量 983kg
合成 F 値と焦点距離 f	F=12.01, f=18300mm
視野	15 分角
焦点面スケール	11.15 秒角/mm
架台	経緯台 (トルク・モーターによるフリクションドライブ)
総重量	約 17t
搭載可能重量	カセグレン焦点:500kg, ナスミス焦点:1000kg

表 1.1: かなた望遠鏡の主な諸元

- TRISPEC

TRISPEC はすばる望遠鏡の観測装置の一つとして、名古屋大学大学院理学研究科のZ研グループが開発した可視近赤外同時カメラ (Triple-Range Imager and SPECtrograph) である。この装置の特徴はHONIRと同じく3つの波長帯で撮像、分光、偏光を行うことができることである。TRISPEC の写真を図 1.3、仕様を表 1.2 に示す ([1])。

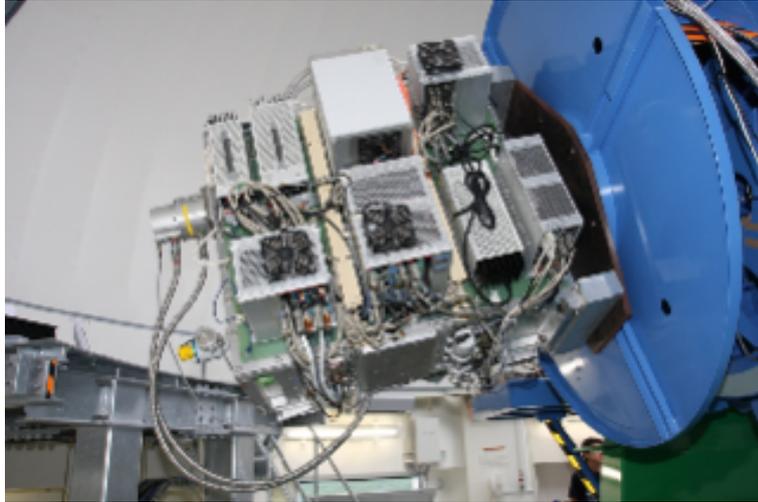


図 1.3: TRISPEC

	opt	IR1	IR2
検出器 (ピクセル数)	CCD(512 × 512)	InSb(256 × 256)	InSn(256 × 256)
視野	7 × 7	7 × 7	7 × 7
ピクセルスケール	0.82 /pix	1.65 /pix	1.65 /pix
波長帯	0.46 ~ 0.90 μ m	0.90 ~ 1.8 μ m	1.85 ~ 2.5 μ m
フィルター	B,V,R,I	J,H	Ks,K,H_2

表 1.2: TRISPEC の仕様

- HOWPol

この装置は、宇宙科学センターが独自に開発した装置でナスミス焦点に常設されている。HOWPol は一露出型広視野偏光撮像装置 (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) の略名で、一回の露出で直線偏光のパラメーターが導出可能な偏光素子を使用している。かなた望遠鏡のフレキシビリティを利用しガンマ線バーストなどの突発天体を即座に偏光観測し、また一回の露出で偏光観測ができるため同時性の保たれた偏光観測を行うことができる。この HOWPol の偏光観測は広視野と狭視野、そして広視野撮像、分光、偏光分光の観測モードを備えている。HOWPol の写真を図 1.4、仕様を表 1.3 に示す。

- 高速カメラ第 2 ナスミス焦点に設置されており、広島大学と京都大学が共同で開発し

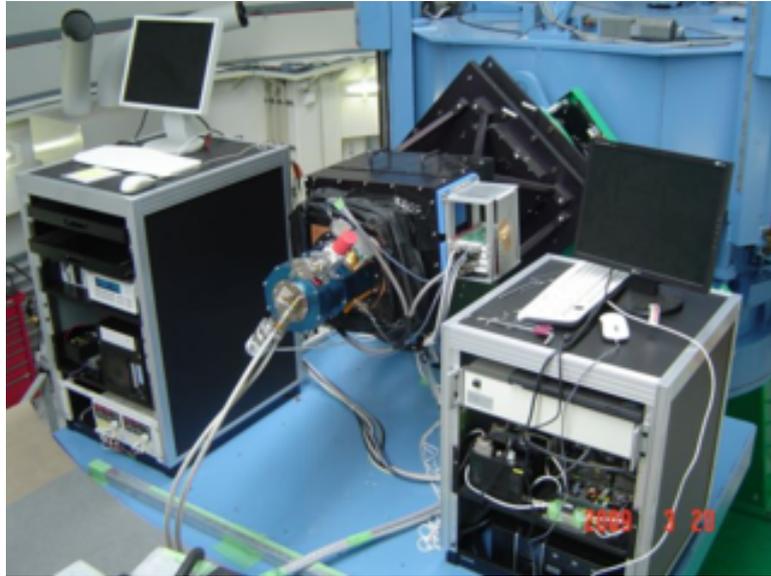


図 1.4: HOWPol

波長帯	0.45 ~ 1.1 μ m (B, V, R, I, z')
視野	広視野撮像: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
偏光素子	Wedged double Wollaston Prism 広視野:six rutile blocks 狭視野:six magnesium fluoride blocks and two fused silica wedges
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 °)

表 1.3: HOWPol の仕様

た装置で、高速読み出しが可能な CCD を用いている。これにより最高で 35.8frame/s の撮像、分光を可能にしており、短時間での時間変動を追うことができる。高速カメラの写真を図 1.5 に、仕様を表 1.4 に示す。



図 1.5: 高速カメラ

波長帯	0.4 ~ 1.0 μ m
ピクセル数	512 × 512
ピクセルスケール	0.32 /pix
1 ピクセルのサイズ	16 μ m × 16 μ m
視野	高速測光:2.6 × 2.6 高速分光:2.6 × 2.2
frame/s	MAX:35.8frames/s(ピンニングなし)
撮像時間	27.1ms ~ 10s
分光素子	グリズム:430-690nm(R=150) プリズム:400-800nm(R=9-73)

表 1.4: 高速カメラ

1.2 可視近赤外同時カメラ HONIR

1.2.1 HONIR について

可視近赤外同時カメラ HONIR(Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) は広島大学がかなた望遠鏡カセグレン焦点専用装置として、2006 年から開発、立ち上げを行なっている(図 1.6)。可視 1 素子、近赤外 2 素子の合計 3 素子の同時観測が可能な装置となっている。今までカセグレン焦点に設置されていた TRISPEC との主な相違点について下記に示す。

- 検出器のフォーマットが TRISPEC は可視は 512 × 512 で近赤外は 256 × 256 と小さかった。しかし、HONIR は可視、近赤外の検出器のフォーマットが 2048 × 2048 と大

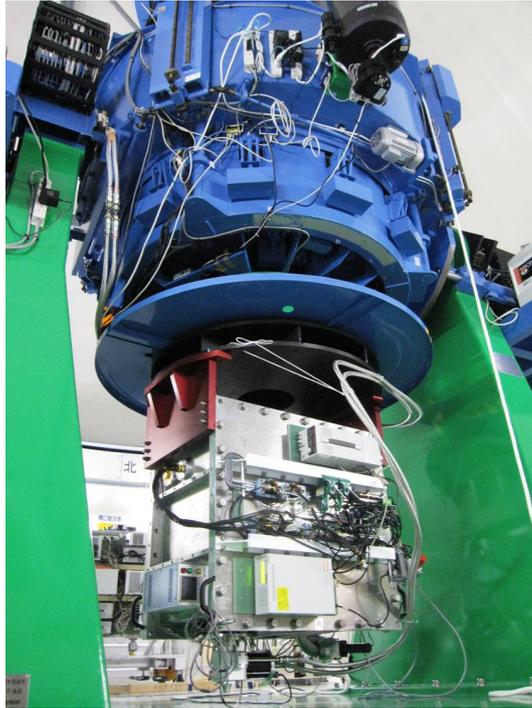


図 1.6: かなた望遠鏡に装着した HONIR

きくなり、視野が TRISPEC は 7 分角だったのが 10 分角へと広くなり、面積として約 2 倍となった。

- 検出器のピクセルスケールが可視 $0.82 \text{ } \mu\text{m}/\text{pix}$ 、近赤外 $1.65 \text{ } \mu\text{m}/\text{pix}$ から可視、近赤外共に $0.29 \text{ } \mu\text{m}/\text{pix}$ となり、1 ピクセルあたりに落ち込むスカイバックグラウンドが減少し、東広島天文台のシーイング 1 とマッチした観測が可能となる。それによりアンダーサンプリングを防ぎ測光精度が上昇する。
- 読み出しシステムが TRISPEC は Messia3 を用いているが HONIR は Messia5 を用いており、データ転送時間が早く観測効率が上昇する。

1.2.2 真空・冷却系

HONIR の真空槽を図 1.7 に示す。真空槽は外側の真空容器と内側の冷却シールドに分かれており、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。コネクタなどの部分は O リングを用いて真空槽を密閉するようになっている。HONIR は高真空を維持し、且つ赤外線の熱輻射を無視できる温度まで冷却する必要がある。ある程度真空を保ったまま冷却をするには、外部からの熱流入も抑えなければならない。熱流入を抑えるために一般的に用いられるのがインシュレーターである。HONIR にも冷却シールドの周りはスーパーインシュレーターを張り、熱流入を抑えている。冷却シールドの内壁は外部からの赤外線を吸収を有効にさせるために、ニッペノバ 500 アストロブラック (日本ペイント社) という塗料を塗っている。また、検出器系や駆動系に電力を供給するためのケーブルがあるため、フランジとハーメチックコネクタを用いて外部に通じさせている。そのため、

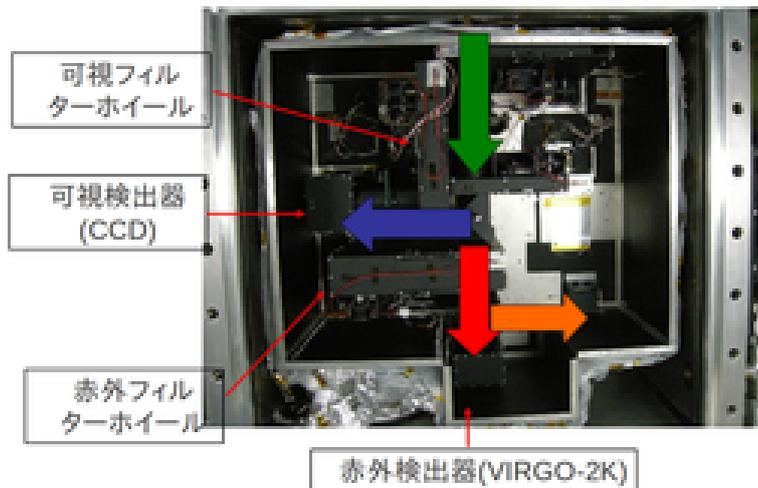


図 1.7: HONIR の真空槽 (1m × 1m × 0.7m)

ケーブルは熱伝導を抑えるために不必要に太くなく、被膜がアウトガスの少ない素材のものを用いた。更に、モレキュラーシーブを用いることで分子を吸着させ、高真空維持が期待できる。

1.2.3 光学系

HONIR の光学図を図 1.8 に示す。HONIR の特徴はまず可視 1 バンド、近赤外 2 バンドの同時観測が可能なことである。これはダイクロイックミラーを用いることで可能となっている。ダイクロイックミラーとは誘電体の多層膜などを鏡面に形成することにより、特定の波長のみを反射させその他の波長を透過させるミラーである。このダイクロイックミラーを用いて可視と近赤外を分け、さらに近赤外を 2 つに分けることで、それぞれの波長に感度のある検出器を用いて 3 バンドで高感度な観測を行うことができる。

まず望遠鏡焦点面に収束した光をコリメータレンズ群で平行光にし、最初のダイクロイックミラーで可視と近赤外に分離し、可視光はそのままカメラレンズで検出器に再結像させる。近赤外に分離された光は次のダイクロイックミラーで J バンド域 (1.15 ~ 1.35 μm) と H,Ks バンド域 (1.5 ~ 2.4 μm) に分離し、それぞれのカメラレンズで検出器に再結像させる。これにより 3 バンド同時の観測が可能となっている。しかし、現在は近赤外は 1 素子しかないため 2 つ目のダイクロイックミラーは使用しておらず、近赤外 1 素子で J~Ks バンドまでをカバーしている。

ホイールに関しては、望遠鏡焦点面にスリットホイール、ヒトミの位置にヒトミホイール、最初のダイクロイックミラーの可視側のすぐ後と 2 つ目のダイクロイックミラーの両側のすぐ後にフィルターホイールとプリズムホイールを設置している。スリットホイールは分光観測を行うときに、ヒトミホイールは検出器に入るバックグラウンド放射をカットするマスク

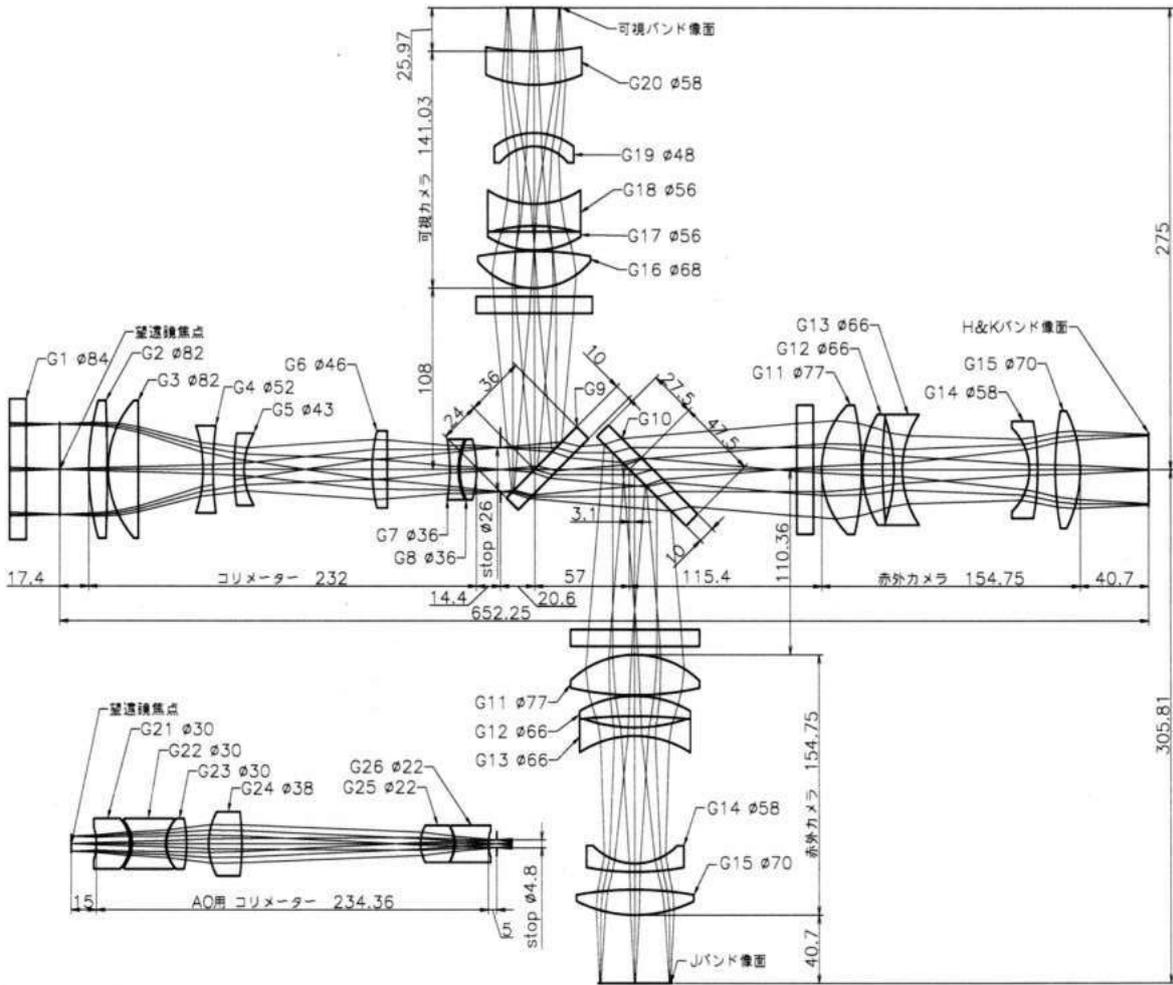


図 1.8: HONIR の光学図

として、フィルターホイールはそれぞれの観測するバンドの切り替えに、プリズムホイールは偏光観測を行うときに使用する。

1.2.4 検出器系

HONIR で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行った完全空乏層型 CCD(図 1.9)、近赤外ではアメリカの Raytheon 社製の VIRGO-2K(図 1.10) を 1 つ 使用している。赤外アレイは高価なためまだ 1 つしか実装されていないため、可視、近赤外 共に 1 素子で開発、立ち上げを行なってきた。また、可視、近赤外の検出器 (完全空乏層型 CCD と VIRGO-2K) の性能を表 1.5、1.6 に示す。

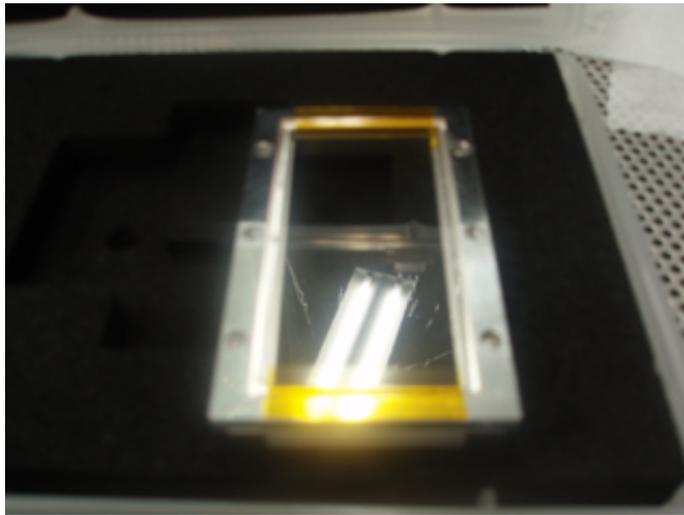


図 1.9: 完全空乏層型 CCD

	完全空乏層型 CCD
ピクセルサイズ	$15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$
ピクセルスケール	0.29 /pix
画素数	$2048 \times 4096 \text{ pixel}$
読み出しノイズ	$\leq 5 \text{ electrons rms}$
転送効率	≥ 0.999995
飽和電荷量	$\geq 100000 \text{ electrons}$
暗電流	$\leq 5 \text{ electrons/pixel/hour}$

表 1.5: 完全空乏型 CCD の仕様

データ取得システムは Messia5 を用いており、国立天文台で開発された CMC(Common Mezzanine Card) 規格の Mezzanine Card と Bitwire 社製の PCI バス用 DSP ボード Hammerhead(図 1.11) で構成されている。DSP ボードとホストコンピュータが PCI バスで繋がっており、DSP ボードのバススロットに CMC が接続されている。そして、CMC から可視、近赤外の検出器のアナログ回路にそれぞれ接続されている。

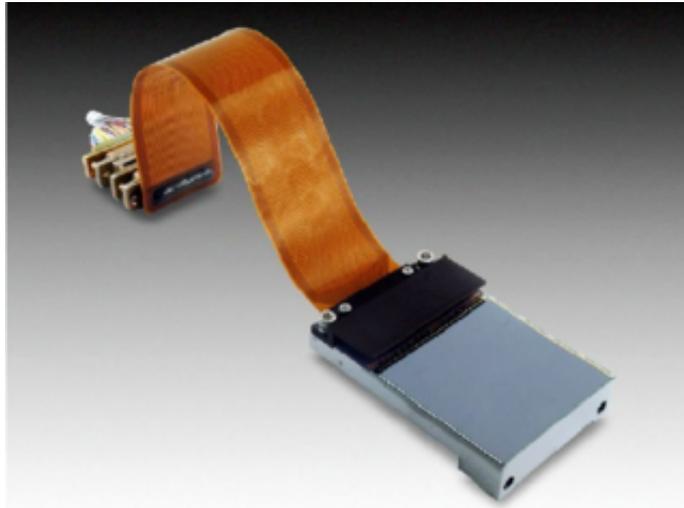


図 1.10: VIRGO-2K

	VIRGO-2K
ピクセルサイズ	$20 \mu m \times 20 \mu m$
ピクセルスケール	0.29 /pix
画素数	$2048 \times 2048 \text{ pixel}$
検出素子	HgCdTe
読み出しノイズ	$5 \sim 15 \text{ electrons/rms}$
飽和電荷量	$> 4 \times 10^5 \text{ electrons}$
暗電流	$< 1 \text{ electrons/s}$
有感度波長域	$0.9 \sim 2.5 \mu m$
量子効率	$> 70\% (1 \sim 2.4 \mu m)$
操作適正温度	80K

表 1.6: VIRGO-2K の仕様



図 1.11: Messia5 の DSP カード

近赤外の検出器のアナログ回路は名古屋大学で開発された汎用検出器回路 MACS2 を使用している。MACS2 はアイソレーションボード、クロックドライバボード、ADC ボードとプリアンプボードで構成されている。クロックドライバボードは指定したクロックパターンに基づき CMC で発生したクロックパターンに電圧値を定義し、検出器に印加させるバイアスを発生させて供給する。ADC ボードとプリアンプボードは検出器の弱い信号をプリアンプで増幅させ、ADC ボードでデジタル信号に変換し CMC に送る。VIRGO-2K は 4ch と 16ch 出力が可能だが、MACS2 が最大 4ch 読み出しが限界なため VIRGO-2K も 4ch 出力を用いているが、現在国立天文台で開発中の VIRGO-2K 専用エレキが完成すると 16ch 出力が可能となる。

可視の検出器のアナログ回路は国立天文台で開発された汎用検出器フロントエンドエレクトロニクス、MFront2 を使用している。MFront2 は電源ボード、インターフェースボード、バイアスボード、ADC ボード、プリアンプボードとスロット用のバックプレーンボードで構成されている。まず、クロックパターンが Messia5 からインターフェースボードを通じてバイアスボードに送られる。そして、バイアスボードで発生したバイアスは検出器に送られ、クロックはプリアンプボードを通じて検出器に送られる。MACS2 を同じように検出器からの信号はプリアンプで増幅させ、ADC ボードでデジタル信号に変換しインターフェースボードを通じて CMC に入力される。

1.2.5 駆動・制御系

HONIR で制御の必要なところは検出器コントローラー、検出器の温度制御システム、真空槽の温度及び真空度モニターシステム、フィルターやプリズムなどの交換を行うホイール制御システム、及び露出時間制御のための光学シャッター制御システムがある。検出器コントローラーは 2009 年度初頭においてほぼ完成し ([4])、さらに現在は可視近赤外同時観測のためにシステムの最適化を行なっている。量子効率、電荷転送効率、及び暗電流の観点から CCD は 170K、VIRGO-2K は 80K が最適温度となっているためヒーターを用いて温度制御

を行い、モニターする必要がある。また、観測の際のフィルター、スリットやプリズムなどの交換のためにホイールのモーターの制御を行う必要がある。そして、光学シャッターの制御により露出時間の制御や、可視検出器は CCD なので読み出しの最中に遮光する必要がある。上記のホイール制御システムは Windows で検出器制御 PC からソケット通信による制御を行い、その他の制御は検出器制御 PC である Linux でシリアル通信で制御を行う。

1.2.6 HONIR での研究対象

前小節述べたように HONIR は TRISPEC に比べ、例えば K_s バンドにおいて限界等級が一声約 3 等下がるため、暗い天体に対してもより高精度で観測を行うことができる。これにより研究対象が増え、研究の幅が広がる。

- 系外惑星

太陽系とは異なる星系に存在する系外惑星は、これまで主に視線速度法で発見されてきた。視線速度法とは主星と惑星が共通重心の周りを回転運動しているため、主星の公転周期の視線速度方向の変化を観測することで、主星に付随する惑星を発見する方法であるが、この方法では惑星の質量の下限しか求めることが出来なかった。一方、最近目覚ましい成果を上げつつある方法としてトランジット法 (図 1.12) が挙げられる。これは視線方向の主星の表面を惑星が遮蔽することによる一次星食現象を観測する方法である。この観測により系外惑星の軌道傾斜角や半径が推定でき、視線速度法の結果と合わせることで正確な半径、質量を求めることができ、惑星の種類も特定することができる ([4])。

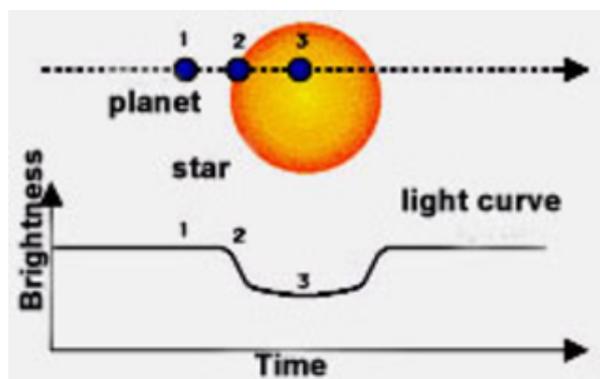


図 1.12: トランジット観測の減光の様子

- Blazar

銀河の中には銀河中心核が非常に明るく、時間変動の激しい銀河がある。これは活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) と呼ばれている。AGN の中にはジェットを噴出しているものもあり、そのジェットが我々観測者の方を向いているものを Blazar と呼ぶ。Blazar は電波からガンマ線まで幅広く放射をし、電波から紫外線まではシンクロトロン放射、X 線からガンマ線まではシンクロトロン放射を種光子とした自己シンクロトロンコンプトン放射であると考えられている。偏光観測を行った結果シンクロト

ロン放射による可視、近赤外領域での直線偏光が受かっており、その偏光はジェットの根元の磁場構造を何かしら反映している ([2],[3])。



図 1.13: Blazar

我々は Blazar の磁場構造や、また一定のタイムスケールで増光する現象の原因を調べるために日々 Blazar のモニターを行なっている。しかし、TRISPEC の近赤外の偏光の精度があまり良くなく、近赤外では S/N の良いデータが取得できていない。そこで HONIR を用いることで、S/N のより偏光データを可視、赤外 1 バンドずつで同時に取得することが可能 (将来的には可視 1 バンド、近赤外 2 バンド) となり、より正確な調査をすることができるようになる。

- T Tau 星

T Tau 星は主系列星の前の進化段階の若い星で原子星に分類される。可視光で変光が見られ、質量は $3M_{\odot}$ 以下で温度は同じ質量の主系列星と同程度であるが、半径が大きいため同質量の主系列星より明るい。中心温度は非常に低いため、星の自己収縮による重力エネルギーの開放により光っており、強い輝線と広い吸収線を持つ低温のスペクトル (G から M タイプ) を持つ。T Tau 星は大きな降着円盤を持っていることが多く、その円盤は惑星系の元と考えられているので原始惑星系円盤と呼ばれている。

T Tau 星は星周物質に埋もれているため吸収のされにくい赤外線での観測が有効となってくる。また、HONIR を用いることで S/N の良い偏光モニターができ、これにより磁場の構造や原始惑星系円盤に関する情報を得ることができる。

1.2.7 開発の歴史と進捗

我々は 2006 年度からこの HONIR の開発、立ち上げを行なってきた。検出器関係の開発、立ち上げは順調に行われ、2009 年 2 月には赤外線 1 バンドでの試験観測が行われた。この時の試験観測では、検出器の装置効率が 3% (設計値 ~ 19%) と低いこと、取得した星像サイズの平均半値幅が 3 程度 (目標値約 1) と大きく、強い収差があることが分かった ([4])。星像サイズが大ききことの原因としてレンズ群の調整がうまくいっていないこと、装置効率が

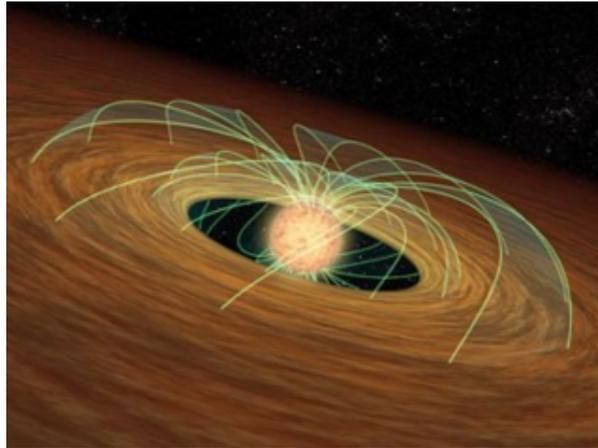


図 1.14: T Tau 星

悪いことの原因としてレンズ群やダイクロミックミラーの透過率が設計値と異なることやゲインの計算ミスなどが挙げられる。また、2009年の試験観測では観測中に冷却用に改造したモーターが異常発熱を起こし故障したり、動作不良を起こしていた。さらに、真空槽単体での真空試験においては $\sim 10^{-6}$ Torr が安定的に保たれていたが、観測に必要なコンポーネントを組み込み再度真空試験を行ったところ真空漏れまたはアウトガスが多く、観測を中断して2時間以内に真空引きをしなければならず、観測に大きく支障をきたす状態であった[4]。2009年度よりこれらの事柄に対して対処を行い、また、並列して残りの開発項目、例えば可視検出器のための光学シャッターの開発が行われた。

まずは真空漏れの原因を調査すると傷が見つかったので、磨き上げ真空試験を行ったがほぼ変化は見られなかった。そこで真空漏れ箇所特定のためにHeリーク試験を行い、2箇所真空漏れが起きていることが分かり、掃除を行ったり、傷を磨いて再度閉じてリーク試験と真空試験を行った。しかし、真空度は改善はされたものの期待ほどの結果は得られなかった。ここで傷のあったフランジにアルコール吹きつけ悪化の様子を見ようとしたところ、そのアルコールがうまく吸着剤として働き真空度が約 2×10^{-6} Torrを保つことができた。それ以降は安定的に真空度は期待通りの値を維持している([5])。

また、冷却用の改造モーターを新規に作成し、常温での試験を行い駆動の問題が無いことを確認し、再び冷却下での駆動試験を行った。さらに白金抵抗を用いた温度センサーを数カ所に取り付け様々な場所の温度をモニターできるようにした([5])。

星像の収差については、レンズ群を調査したところレンズホルダーの押さえ不良が見つかった。これは新規に押さえリングを作成しネジのサイズを交換することでしっかりと押さええることができるようになった。また、レンズホルダーとレンズが接触する面が0.5mmほど面取りされていたため、面取りしていないレンズホルダーを再度設計、発注し問題の解決をはかった([5])。

そして、光学シャッターの設計を行った。市販のシャッターではHONIRの大きな口径を補えず、また行って戻ってくるタイプのシャッターばかりで、そのタイプのシャッターでは露光ムラができてしまう可能性があった。そこでアクチュエーター(高速Xステージ)を用いて一方向に駆動し露光するようなシャッターを設計した([5])。

図 1.15 に 2011 年までの進捗状況を示す。そこで、私は赤枠で囲まれたレンズ群の再組み

上げと光学シャッターのソフトウェアの開発を担当し、光学シャッターのソフトウェアを開発を行うことで光学シャッターの立ち上げを行なってきた。

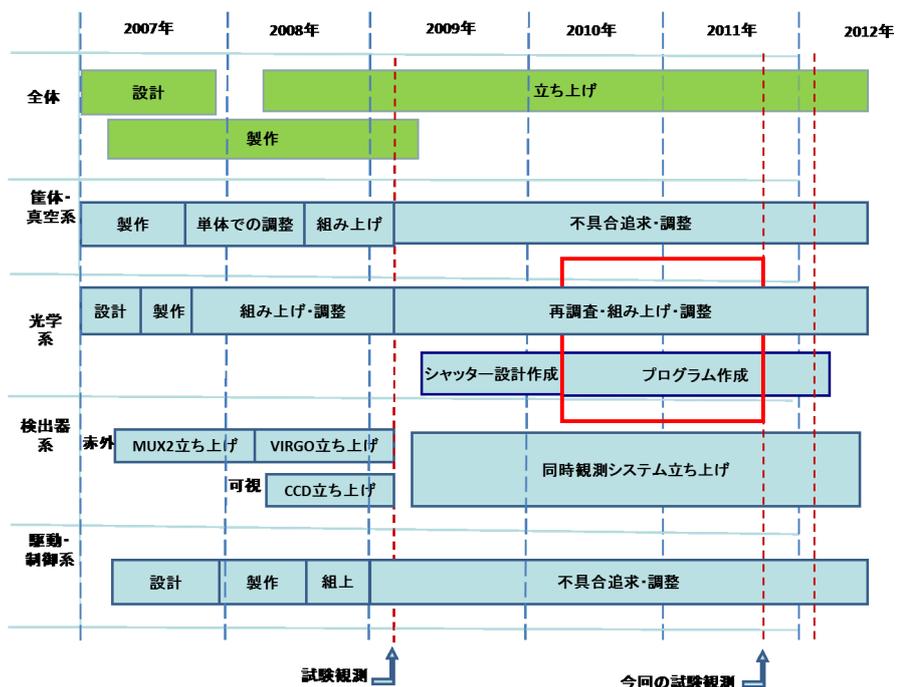


図 1.15: 2011 年までの進捗

1.3 本研究の目的

HONIR は 2006 年より開発が進められている。HONIR には真空・冷却系、光学系、検出器系、駆動・制御系があり、開発項目は多岐に亘る。これらの項目の中で私は主として、光学シャッターの立ち上げを行なってきた。また、2011 年 10 月から行われた試験観測においては、撮像モードに関する各種項目の評価を私が主導して行った。本論文では私が担当したシャッターのソフトウェア開発とその調査の詳細を述べると共に、撮像モードの性能評価を行うことで、装置開発の達成度を確認し、改善点を探ることが目的である。

第2章 光学シャッターの開発

2.1 ハードウェア及びソフトウェア

HONIRの可視検出器はCCDを使用しているため、読み出しの最中に遮光を行う必要があり、光学シャッターが必要となってくる。しかし、量産されているのシャッターではHONIRの視野を完全にカバーする大盤のシャッターは見つからなかった。また、通常シャッターでは目隠し板が行って戻ってくるタイプのものが多いが、この場合収束光中で用いると露光ムラが生じてしまう。そこで我々はアクチュエーター(高速Xステージ)を用いてシャッターを作製することにした。

シャッターの条件として、ハードウェアの面では露光ムラが生じないように露光を開始する時と、終了するときはシャッターを等速で動かせるよう十分な大きさを確保する必要がある。また、偏光観測のため半波長板を入射光に置く必要があるためそれとカップリングしないようなコンパクトな設計にする必要もある。ソフトウェアの面では露光時間を正確に制御できるようにすることである。

2.1.1 仕様

ハードウェア

大盤のシャッターとして、他の観測所ではある大きさの開口を持った目隠し板を、右または左に片道運動させることで、露光ムラのないシャッターを実現している例があるので、そのシャッターと同様なものを設計した。設計者は共同研究者の先本氏(D2)である([5])。

- 目隠し板

偏光観測に用いる半波長板がシャッター機構の内部に収まるようにするためには、シャッターを本体から約130mmの高さまで上げなくてはならない事が判明した。また、HONIRの入射光の光束の径は $\phi 85$ で、かなた望遠鏡の合成F値が12.01なので、本体から130mmの高さにおいて、HONIRの視野をカバーする開口としては、一辺100mmの正方形の穴があいた目隠し板を用意すれば良い。

- 開閉の仕方

スライド機構として、SUS社のアクチュエーターを使用した(図2.1)。このアクチュエーターの仕様を表2.1に示す。このアクチュエーターのモーターはサーボモーターを用いているため、位置制御が正確且つ容易である。

また、アクチュエーターには専用のコントローラー(図2.2)が必要となる。このコントローラーとアクチュエーターを専用のケーブルで繋ぎ、コントローラーと制御PCをRS232Cケーブルで接続をし、シリアル通信を用いてシャッターの制御を行う。

型番	SACR-S6DH-350BE
ストローク	350mm
最大速度	800mm/s
最大加速度	0.30G(2970mm/s ²)
位置繰り返し精度	±0.02mm
可搬積載量(水平)	6kg
可搬積載量(垂直)	1.5kg
モーター	ACサーボモーター(エンコーダー一体型)30W

表 2.1: アクチュエーターの仕様

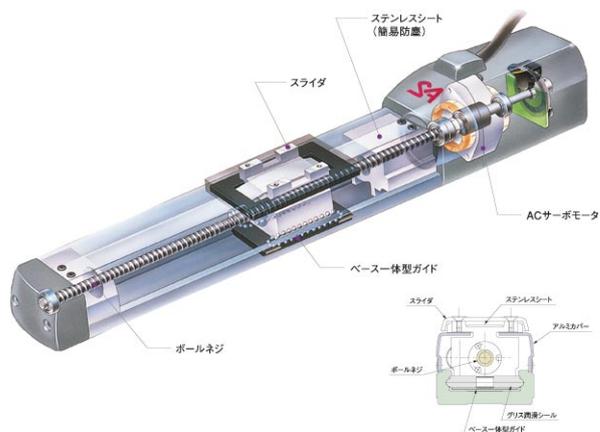


図 2.1: アクチュエーターの構造



図 2.2: アクチュエーターのコントローラー

ソフトウェア

シャッター制御は制御PC(OS:Linux)からC言語のオリジナルプログラムを用いて制御し、通信はRS232Cケーブルを用いたシリアル通信で行う。通信速度は諸々の事情から9600bpsで固定することにした。

2.1.2 要求性能

露光ムラを無くすため、及び露光時間を正確に制御するため、時刻と位置を正確に制御する必要がある。しかし、先程も述べたように制御できるパラメーターは位置と加減速度と最高速度のみであることから、この加減速度、速度がきちんと安定して駆動されているかが重要となってくる。また、露光ムラが出ないようにするために露光が開始される前に目隠し板の加速が終わって、露光中は等速で駆動している必要があるため、これらのことを検証する必要がある。

2.1.3 制御機構

制御の流れは、まずアクチュエーターの Protokol仕様書に従い、PCからコントローラーに文字列を送信し、コントローラーがアクチュエーターに動作を命令する。その後、アクチュエーターが命令を受け取ったとコントローラーにレスポンスを返して一連の流れが終了する(図2.3)。通常の駆動命令においては、指定できるパラメーターは駆動させる位置、加減速度、最高速度の3つとなる。



図 2.3: 制御の流れ

2.1.4 制御プログラムの開発

まずシリアル通信の設定を行うプログラムを作成してテストコール(文字列を送信して、その文字列が返ってくるプロトコル)を行い、C言語でコントローラーと通信が正常にできることを確認した。その後、駆動させる、あるいはアクチュエーターの軸のステータスを取得するといった組み込み済みのプロトコルを使用し、それらも正常に動作をしレスポンスもちゃんと返ってくることを確認した。

アクチュエーターの動作の順序は

命令を送る → 設定速度まで加速 → 等速で動く → 停止位置から逆算して減速

→ 停止位置付近でサーボモーターによる位置決め

となっている。

動作の確認が完了したので、次に実際の制御方法について考察した。まず、光路中でシャッターがどの位置で露光を開始し、終了するのかを設計図から算出した(2.1.5 参照)。算出した露光開始位置の約 1cm 手前までシャッターを加速させると、その時の速度は約 580mm/s になる。最短露出時間はこの速度のまま目隠し板が露光した時の露出時間であり、算出すると 286ms となる。これ以上の露出をする場合はシャッターの駆動速度を遅くすることで、露出時間を制御する。これを短時間露出モードと呼ぶことにする。短時間の場合はこのような動作形態で問題ないが、長時間の露出の場合はこのままでは実現できない。それは超低速度で動かすことの難しさと関係がある。そこで長時間露出モードの場合は動作形態を変え、図 2.4 のように動作させる必要がある。この動作形態を長時間露出モードと呼ぶ。この動作では完全に露光をしているか、全く露光をしていない時のみ加減速を行うため露光ムラが発生しない。この長時間での動作では 2 回目の動きが終わった後に、露出時間に合わせてシャッターを停止させることで露出時間を調節している。長時間露出モードで停止時間を 0s にした時に露出時間が、長時間露出モードでの最短露出時間となる。これを実際にシャッターを動作させて時間と位置の関係から最短露出時間を算出すると 1523ms となった。これらの結果を元に最短露出を 300ms とし、300~1521ms の時は短時間露出モード、1532ms~ の時は長時間露出モードで露出するようにプログラムを作成した。

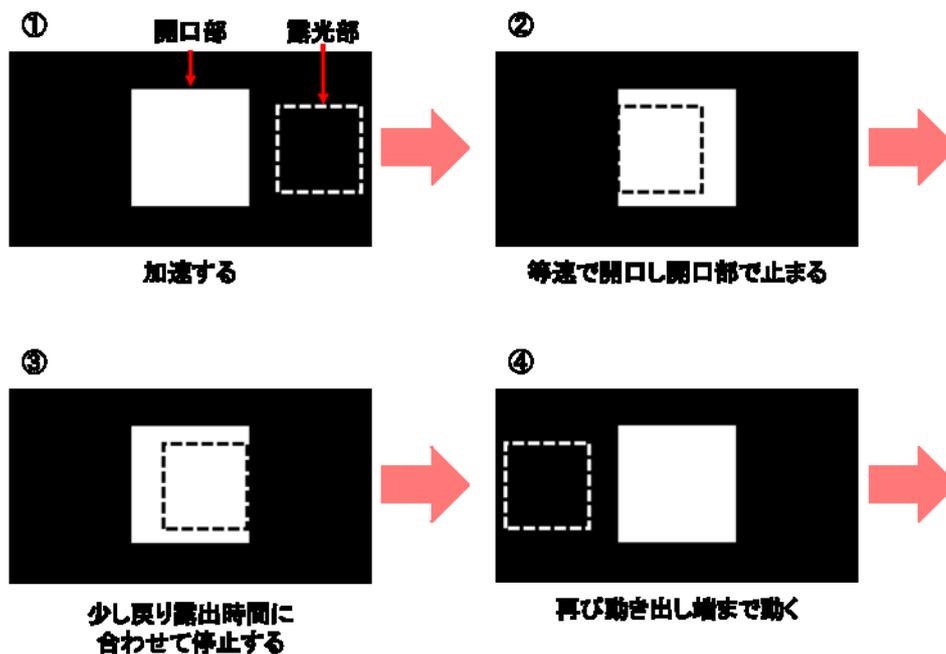


図 2.4: 長時間露出モードでの露出方法

2.1.5 露光開始・終了位置の算出

露出を開始するまでに目隠し板の加速を終了し、等速運動させないと露光ムラができてしまう。そうならないためにまず、目隠し板の位置における光路幅(ビーム幅)とその位置を正

確に知る必要がある。その上で、制御の詳細なパラメータを決めていく必要がある。シャッター面の光束の幅を知るために視野マスクのある焦点面から光束を逆に追尾して、シャッター面での光束の幅を計算する。

焦点面～G1(HONIR 入射窓材)間の距離が 20.12mm で、かなた望遠鏡の F 値は 12.01 なので、G1 における光路幅の増加分 l_1 は

$$l_1 = \frac{20.12}{12.01} = 16.753(\text{mm})$$

となる。また、G1 への光路端を通る光線の入射角 θ_1 は

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{l_1}{20.12}\right) = 0.0416(\text{rad})$$

となる(図??)。G1(フッ化カルシウム窓)の屈折率 n は $n=1.42379(T=85\text{K}, \lambda=2.400\mu\text{m})$ なので、スネルの法則より光路端光線の屈折角 θ_2 は

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right) = 0.0292(\text{rad})$$

G1 の厚みは 10.0mm なので G1 での光路の広がり分 l_2 は

$$l_2 = 10.0 \times \tan\theta_2 \times 2 = 0.585(\text{mm})$$

となる。なお、この量は n の波長依存性により変化するが HONIR の最も短い側波長 ($\lambda=0.500\mu\text{m}$) でも 0.579mm でその差は 0.007mm と非常に小さいので無視できる。G1～シャッター面までの距離は設計図より 195.22mm なのでそこでの光路の広がり分 l_3 は

$$l_3 = \frac{195.22}{12.01} = 16.255(\text{mm})$$

よって、シャッター面での光束の幅 l は、焦点面の大きさは 53.819mm なので

$$l = 53.819 + 16.753 + 0.585 + 16.255 = 72.34(\text{mm})$$

となる。

以下ではシャッターの位置を x と表し、 $x=0$ はアクチュエーターの原点、すなわち一方のリミット位置を表している。シャッターのストロークは 350mm なので、以後の計算では $x=175\text{mm}$ の時の開口部の中心と光軸の中心が一致するとする(これについては望遠鏡に設置後、実際の望遠鏡の光路で確認するものとする)。シャッターの開口部の動作方向の長さは 151mm なので、 $x=175\text{mm}$ の場合左右がそれぞれ 39.33mm ずつ余っている。 $x=175\text{mm}$ から 39.33mm 原点側に戻した $x=135.67\text{mm}$ の所がちょうど完全露出(つまり、視野全面にわたりにケラれなく露光された状態)を開始する所になる。そこからさらに光束の幅の 72.34mm 戻った $x=63.33\text{mm}$ が視野の一端において露出を開始する位置となる。露出終了の場所は開始位置と対称となっているので、視野の一端で露出終了が始まる所が $x=214.33\text{mm}$ で、完全露出終了(視野全面が完全に隠される)が $x=286.67\text{mm}$ となる。これを以下の表 2.2 にまとめ、模式図を図 2.5 と 2.6 に示す。

	露出開始	完全露出	完全露出終了	露出終了
x(mm)	63.33	135.67	214.33	286.67

表 2.2: 露出位置

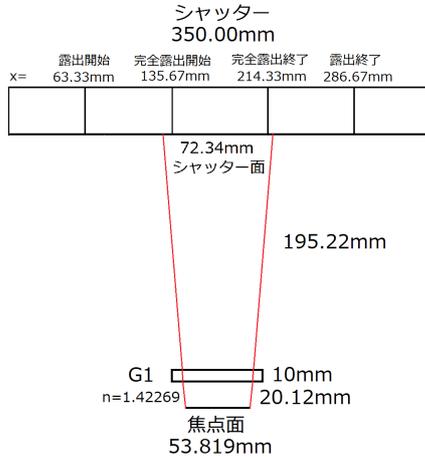


図 2.5: 模式図

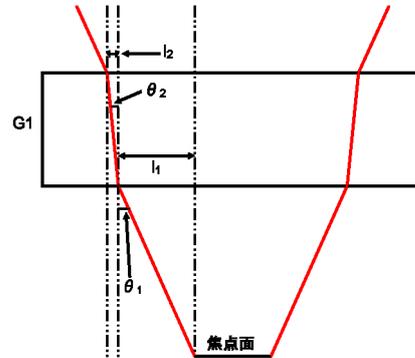


図 2.6: 図 2.5 の G1 付近の拡大図

2.2 駆動安定試験

基本的なシャッター駆動プログラムを作成し、実験室にて各種駆動の安定性の試験を行った。まずは、速度、加速度がきちんと出ており、且つ安定しているかを調べた。次に、望遠鏡は観測する天体の高度に合わせて傾くため、シャッターの姿勢を変化させてその変化に対する安定性を調べ、最後に全体の動作の安定性を調べた。温度に対する安定性は後述の試験観測時に行っており、そちら (§ 3.4.2) を参照していただきたい。

2.2.1 速度、加速度の安定性

速度、加速度の安定性を見るために、最大速度を 610~550mm/s まで 10mm/s 刻みで、加速度を 2940、2450、1960mm/s² と変化させて、多数回の駆動を行い、時刻と位置のデータを取得した。時間は PC の時刻を取得して、時刻としている。位置情報はアクチュエーターのコントローラーにアクセスすることで得られるが、そのアクセスに約 0.1s ほどかかる。そのため、加速部分、等速部分などにデータを分けると、加減速の部分ではデータ点が 1 点または 2 点となる。そうすると、フィッティングを行った時の値や誤差が正しく評価できないため、位置情報のアクセスするタイミングを約 0.03s ずらし時刻の分解能を上昇させ、加減速部分でのデータを多く取得できるようにした。タイミングをずらした各タイミングでそれぞれ 5 回ずつ駆動、合計 20 回駆動させてデータを取得した。取得したデータを加速、等速、減速部分に分けフィッティングを行い、加減速やその開始位置・時刻等のパラメーターを求めた。それぞれの結果を図 2.7 ~ 2.9 と表 2.3 ~ 2.7 に示す。

速度は約 0.1% 以下、加減速度は設定値が大きいほど誤差は大きく、0.5~1.5% 程度のばらつきとなった。そこで、仮に加速度が 1.5% 減少したとしても、露光開始位置までに加速し終えるように余裕を持たせて、露光を開始した時には必ず等速になるように上限速度を決定

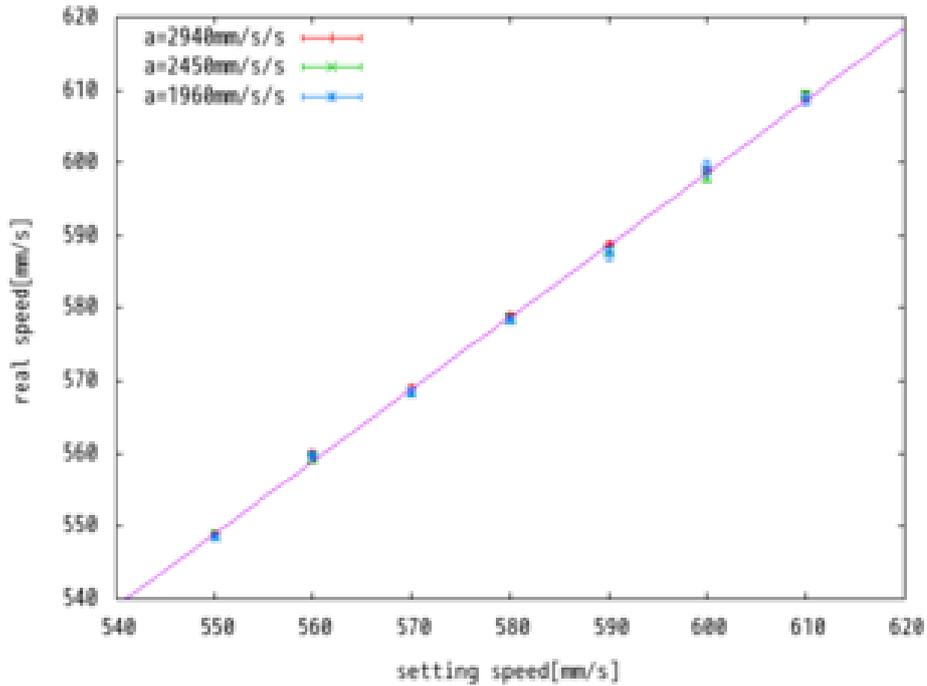


図 2.7: 各加速度での速度

設定速度 [mm/s]	フィッティングで 算出した速度 [mm/s] ($a=2940\text{mm/s}^2$)	フィッティングで 算出した速度 [mm/s] ($a=2450\text{mm/s}^2$)	フィッティングで 算出した速度 [mm/s] ($a=1960\text{mm/s}^2$)
550	548.77 ± 0.36	548.91 ± 0.44	548.56 ± 0.37
560	559.92 ± 0.34	559.39 ± 0.55	559.79 ± 0.36
570	569.01 ± 0.41	568.47 ± 0.48	568.42 ± 0.56
580	578.90 ± 0.43	578.72 ± 0.45	578.39 ± 0.42
590	588.79 ± 0.42	587.89 ± 0.64	587.5 ± 1.0
600	598.80 ± 0.58	598.02 ± 0.56	599.24 ± 0.97
610	609.16 ± 0.64	609.28 ± 0.57	608.65 ± 0.80

表 2.3: 各加速度での速度

設定加速度 [mm/s ²]	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] ($v=550\text{[mm/s]}$)	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] ($v=560\text{[mm/s]}$)	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] ($v=570\text{[mm/s]}$)
1960	1888.6 ± 6.3	1902.4 ± 6.5	1893.7 ± 6.8
2450	2321 ± 15	2339 ± 19	2333 ± 17
2940	2970 ± 57	2776 ± 21	2784 ± 20

表 2.4: 各速度での加速度 ($v = 550 \sim 570\text{[mm/s]}$)

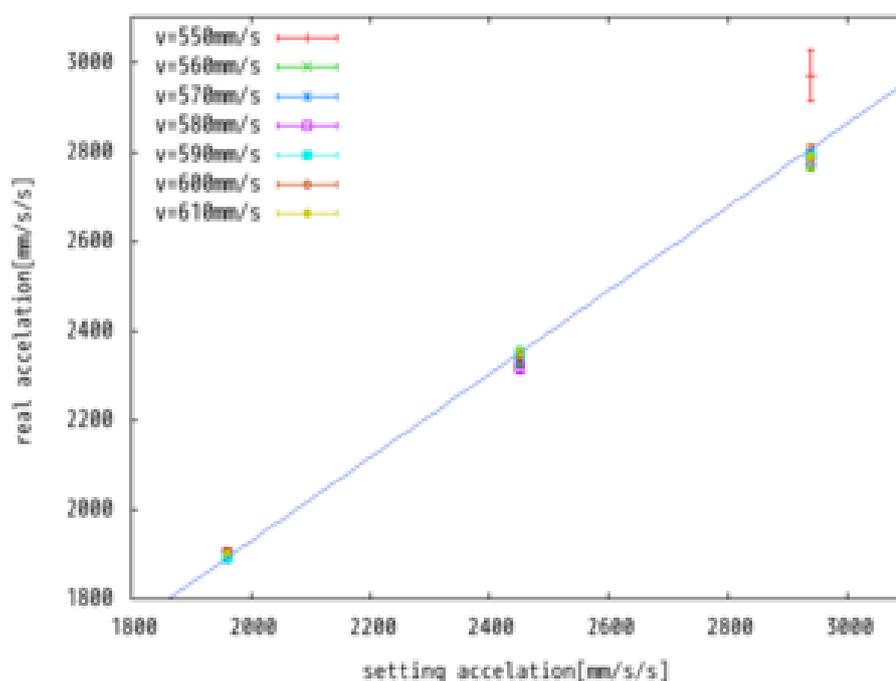


図 2.8: 各速度での加速度

設定加速度 [mm/s ²]	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] (v=580[mm/s])	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] (v=590[mm/s])	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] (v=600[mm/s])	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] (v=610[mm/s])
1960	1902.5 ± 6.3	1893.0 ± 6.2	1905.0 ± 8.0	1901.1 ± 7.1
2450	2318 ± 15	2345 ± 17	2343 ± 18	2350 ± 11
2940	2793 ± 22	2793 ± 27	2785 ± 23	2790 ± 30

表 2.5: 各速度での加速度 (v = 580 ~ 610[mm/s])

設定減速度 [mm/s ²]	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=550[mm/s])	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=560[mm/s])	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=570[mm/s])
-1960	-1919 ± 10	-1931.6 ± 6.9	-1918 ± 11
-2450	-2397 ± 24	-2365 ± 28	-2370 ± 15
-2940	-2808 ± 22	-2796 ± 28	-2790 ± 30

表 2.6: 各速度での減速度 (v = 550 ~ 570[mm/s])

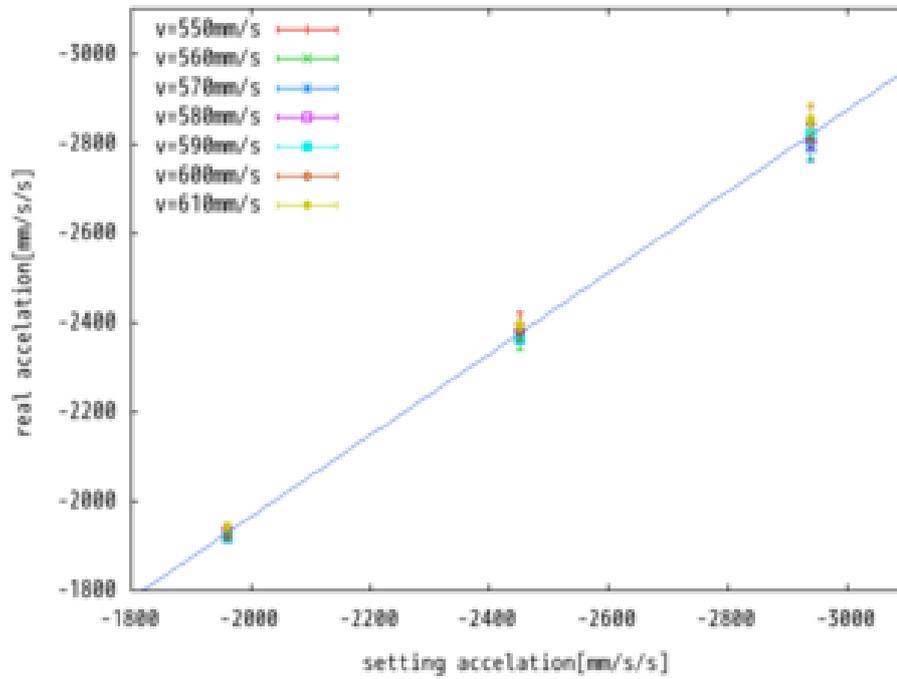


図 2.9: 各速度での減速度

設定減速度 [mm/s ²]	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=580[mm/s])	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=590[mm/s])	フィッティングで 算出した減速度 [mm/s ²] (v=600[mm/s])	フィッティングで 算出した加速度 [mm/s ²] (v=610[mm/s])
-1960	-1931.0 ± 8.1	-1922.5 ± 9.7	-1924.3 ± 9.5	-1940.2 ± 9.2
-2450	-2376 ± 15	-2366 ± 16	-2377 ± 17	-2392 ± 14
-2940	-2811 ± 26	-2823 ± 20	-2843 ± 38	-2854 ± 36

表 2.7: 各速度での減速度 (v = 580 ~ 610[mm/s])

した。算出した加速度の最低値 2776mm/s^2 の 1.5% 減の 2734mm/s^2 が想定される最低加速度であるとする。また、露光開始位置は 63.33mm なので、そこまでこの最低加速度で等加速度運動をしたとすると、所要時間 t は

$$t = \sqrt{\frac{2 \times 63.33}{2734}} = 0.215[\text{s}]$$

となり、このときの速度 v は

$$v = 0.215 \times 2734 = 587.81[\text{mm/s}]$$

となる。算出した減速度は加速度より大きいので、減速を行う距離は加速時より短いと考えられる。よって、想定される最低減速度では最高速度を 587.81mm/s に設定したとしても、露光が終了する前に減速を始めることはないと考えられる。また、駆動中心と光学中心が必ずしも一致している限らないので、そこでズレることを考慮し、上限速度を 580mm/s とした。また、速度は 0.1% 以上の精度で動くため、シャッターによる測光ムラは 0.1% 以下になる。

2.2.2 姿勢の変化に対する駆動の安定性

姿勢の変化により動作にかかる時間が変化するかを調べるために、シャッターを水平と動作方向に対して鉛直に置いて重力の影響により変化があるか調べた。水平に置いた状態と鉛直に置いた状態でそれぞれ 100 回動作をさせ、全体の駆動にかかった時間の平均とそのばらつきを表 2.8 に示す。結果を見ると精度は悪くなっているものの平均値には変化はほとんど

置き方	水平	鉛直
平均時間 [ms]	1025.1	1025.2
標準偏差	0.007	2.7

表 2.8: 置き方を変化させたときの動作の平均時間と標準偏差

見られなかった。つまり、シャッターの動作について、姿勢差は向きにに対する変化はほぼないと考えてよい。

2.2.3 全体の動作の安定性

最短露出時間 (300ms)、短時間露出モードでの最高露出時間 (1522ms)、長時間モードでの最短露出時間 (1523ms)、 10s でそれぞれ露出する動作を 10 回行い、動作完了までの時間の安定性を調べた。その結果を表 2.9 に示す。表 2.9 を見る限り、全体の動きとしては短時間露出モードの時は 1ms 以下、長時間露出モードでは数 ms の精度で駆動していることが分かり、短時間モードの最低露出時間が 1.5s 、長時間モードでは約 1.5s であることを考えると、 0.2% 以下のばらつきで安定的に露出制御が可能であると判断できる。

設定露出時間 [s]	0.3	1522	1523	10
動作終了平均時間 [s]	1.214122	3.93222	2.4445	10.9138
動作終了最大時間 [s]	1.214635	3.93294	2.4483	10.9222
動作終了最小時間 [s]	1.213593	3.93189	2.4403	10.9091
標準偏差	0.00051	0.00046	0.0032	0.0050

表 2.9: 各露出時間での動作終了時間

第3章 撮像モードの性能評価

撮像モードで観測できるまで仕上がったことを受け、2011年10月12日よりかなた望遠鏡のカセグレン焦点に HONIR を設置し、17日～11月7日まで試験観測を行った。また、HONIR でのサイエンスデータ取得のため12月12日より再度 HONIR を設置することになり、2012年1月31日までサイエンス観測が行われ、その合間に追加の試験観測を行った。

3.1 HONIR の撮像モード

3.1.1 検出器及びフィルター

検出器については1.2.4に示した通り、可視検出器は浜松ホトニクスと国立天文台で共同開発を行った完全空乏層型 CCD(図 1.9)、近赤外検出器はアメリカの Raytheon 社製の VIRGO-2K(図 1.10) を使用している。書く検出器の仕様については、それぞれ表 1.5、1.6 に示してある。

各フィルターでの有効波長と波長幅を表 3.1、3.2 に示す。いずれも常温での実測値であり、可視についてはメーカー(朝日分光)、近赤外については我々で実測したものになる。

バンド	B	V	R	I
有効波長 [nm]	443.5	549.2	653.5	808.8
波長幅 [nm]	101.7	107.0	129.4	138.2

表 3.1: 装着されている可視フィルターの仕様

バンド	J	H	Ks
有効波長 [nm]	1248.5	1638.0	2145.5
波長幅 [nm]	159.3	286.2	319.5

表 3.2: 装着されている近赤外フィルターの仕様

3.1.2 設計仕様

HONIR の設計仕様を表 3.3 に示す。HONIR の限界等級は、検出器のピクセルスケールが小さくなってスカイバックグラウンドの影響が低下することや、ノイズの低下が見込まれることから、特に近赤外域での Ks バンドでは3等ほど下がると予想されている。これにより可視では約19等、近赤外では約18等の限界等級を持つ装置となっている。

	設計値
使用波長域	H&Ks バンド $1.5 < \lambda < 2.4\mu m$ J バンド $1.15 < \lambda < 1.35\mu m$ 可視バンド $0.5 < \lambda < 0.9\mu m$
視野	10 × 10
各検出器の 受光サイズ	H&Ks,J バンド $20\mu m \times 20\mu m, 2k \times 2k$ 受光サイズ $40.96mm^2$ 可視バンド $15\mu m \times 15\mu m, 2k \times 2k$ 受光サイズ $30.72mm^2$
ピクセルスケール	0.29 × 0.29
使用気圧	~0 気圧 (高真空下)

表 3.3: 設計仕様

次に各検出器のノイズの目標値を考える。CCD では暗電流はほぼ無視できるくらい小さく、読み出しノイズのみを考えれば良い。ノイズ低下の努力をした結果 (最も効果があったのは、出力端子のグラウンドを装置筐体と短絡したことであった)、CCD の読み出しノイズは 5 electron である。近赤外検出器の VIRGO-2K の暗電流は実測した結果最大で 0.3331 electron/s 無視できるほど小さいものの、読み出しノイズは依然大きく実験室にて 17.34~55.08 electron/s、望遠鏡装着時は 61.166~81.600 electron/s となっており、ノイズ対策等の改善の余地がある。

3.2 試験観測

3.2.1 試験項目とその目的

撮像モードでの観測が可能になったので、現在の開発の達成度及び改善点調査のために、望遠鏡に設置し撮像をする上での性能の評価を行った。今回の試験観測の試験項目を以下に挙げる。

1. ホイール駆動試験
2. 装置効率の試験
 - (a) 可視での標準星観測
 - (b) 近赤外での標準星観測
3. 結像性能試験
 - (a) 星像の視野依存性チェック
 - (b) 収差についての詳細なチェック
4. シャッターテスト

- (a) 駆動中心と光学中心合わせ
 - (b) 露光時間の較正
5. 検出器性能テスト
 - (a) 検出器線形性
 6. 装置たわみ試験
 7. ノイズ対策
 8. MACS ボードの不具合調査、対策
 9. 可視近赤外同時読み出しのタイミング調整

3.2.2 実施内容

実施内容としては大まかに以下のような事柄を実施した。括弧内は§3.2.1の項目を表している。

- カセグレンローター中心軸出し
- フィルターホイール駆動試験 (1)
- 装置効率及び大気減光調査のための標準星の観測 (2-a,b)
- フラット光源を用いた検出器線形性調査のためのデータ取得 (5-a)
- 星像の視野依存性調査のための星団の観測 (3-a)
- 収差調査のための星像のデフォーカス像の撮像 (3-b)
- フラット光源を用いた露光時間の較正 (4-b)
- シャッター駆動の温度依存性 (4-b)
- 暗電流量調査のためのデータ取得 (7)
- フラット光源を用いた駆動中心と光学中心合わせ (4-a)
- 装置たわみ調査のためのデータ取得 (6)
- 可視、近赤外同時読み出しのタイミング合わせのためのデータ取得 (9)

3.3 光学収差

幾何光学において、レンズなどで像を結像させるときに生じるボケや歪みなどを総称して収差と呼ぶ。HONIRの試験観測では、後述の通り星団の観測で収差がどの程度あるかを評価した。ここではまず、レンズの基本的な収差であるザイデル収差について説明した後、試験観測での収差の測定について述べる。

3.3.1 ザイデル収差

ザイデルは \sin 関数の 3 次までの展開式を用いて、レンズの結像に関して各光線の追跡を行い、収差を理論的に評価した。焦点位置での近軸主光線からのズレの大きさは、入射光線の光束半径 (入射位置でのレンズ光軸からの距離) R と、入射光線のレンズ光軸に対する傾き角 ω に対し $R^x \times \tan^y \omega$ の級数として展開することができ、ザイデル収差は $x + y = 3$ の 3 次の収差となっている。

1. 球面収差

凸レンズに平行光が入射された時、図 3.1 の様にレンズの中心付近に入射した光と端の方に入射した光では、端の方に入射した光の方が入射角が大きくなるため、焦点がレンズに近くなり、収差が生じる。これはレンズが球面なため生じるので、球面収差と呼ばれる。球面収差では、先の焦点位置でのズレの大きさの式において $x = 3$ 、 $y = 0$ である。つまり、球面収差はレンズ光軸に対する傾き (つまり HONIR においては視野内の位置) には依らない一方、光束半径が大きくなるほど急激に増加するという依存性を持つ。

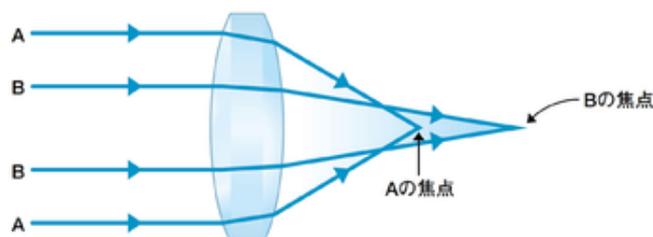


図 3.1: 球面収差 (光路)

2. コマ収差

もし、球面収差が全くないレンズだったとしても、図 3.2 の様にレンズの光軸中心から外れた位置に、ないし傾きを持った光を入射すると、焦点の位置が上下または左右にズれる。これにより結像した像が彗星の尾を引いている様に見えるため、彗星のコメットに由来して、コマ収差と呼ばれる。コマ収差では $x = 2$ 、 $y = 1$ である。つまり、光束半径と入射光線の傾きの両方に依存する。特に、入射光線の傾き (視野中心からの距離に比例) に対しては、1 次の依存性を持って増加する。

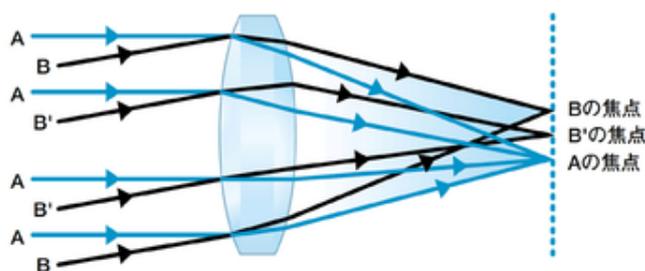


図 3.2: コマ収差 (光路)

3. 非点収差

レンズは3次元のレンズであるため、レンズの光軸に対して傾きを持って入射した光束に対しては、その傾きの方向と、それに垂直な方向でのレンズの曲率半径が異なるため、図3.3の様に垂直方向に入射した光と水平方向に入射した光の焦点が異なり、収差が生じる。この違いにより、焦点付近での像の形が一般的に長いものとなり、像面の位置を変化させることで、長軸の向きが90°反転するようなものとなる。非点収差では、 $x = 1$ 、 $y = 2$ である。つまり、光束半径と入射光線の傾きの両方に依存するがコマ収差よりも入射光線の傾き（～視野中心からの距離）に対して強い依存性を持つことに注意する。

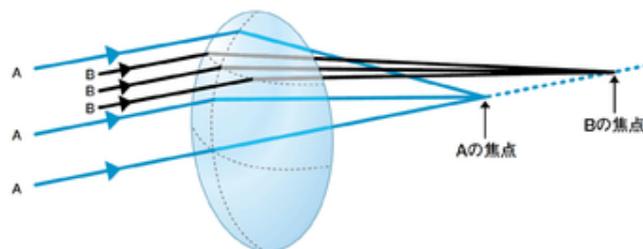


図 3.3: 非点収差 (光路)

4. 像面湾曲

レンズのある点に入射した光の角度が異なる場合 (図 3.4)、理想的には同じ場所に焦点を結ぶが、湾曲して像を結像させるしてしまい、中央付近もしくは端の方のどちらかの像がボヤけてしまう収差が生じる。また、像面湾曲は非点収差と同様に曲率半径を適切にすることで解消されるので、非点収差がなくなれば像面湾曲もなくなる。このため、 x 、 y も非点収差と同じく $x = 1$ 、 $y = 2$ である。

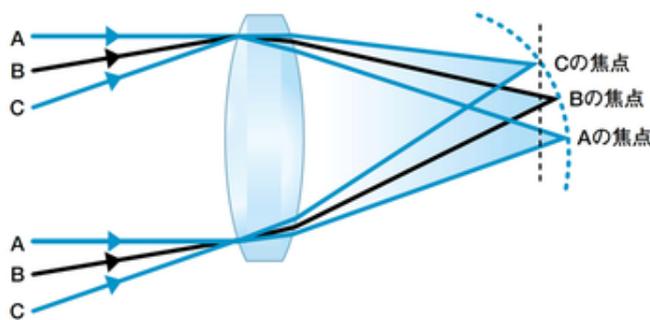


図 3.4: 像面収差 (光路)

5. 歪曲収差 (ディストーション)

1~4の収差は焦点がズレて像がボヤけるといったものだったが、歪曲収差は図3.5,3.6のように像全体が歪んで見える収差である。中央から外側に膨らんで見える歪曲収差を樽型歪曲収差 (図3.5) といい、その逆の外側から中央に縮んで見える歪曲収差を糸巻き型歪曲収差 (図3.6) という。この収差では、 $x = 0$ 、 $y = 3$ である。

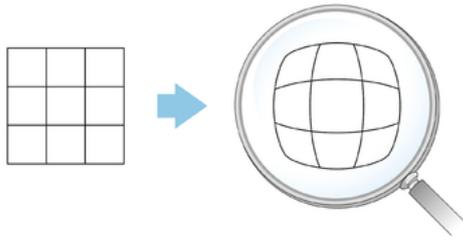


図 3.5: 歪曲収差 (樽型)

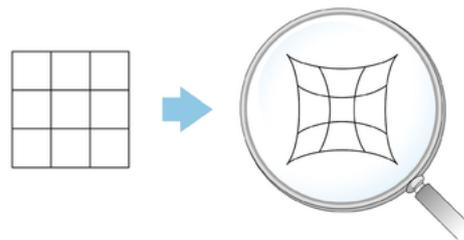


図 3.6: 歪曲収差 (糸巻き型)

3.3.2 星像サイズの視野内位置依存性

検出器の視野位置に依存した星像のサイズの変化があるかどうかを調べた。これは §3.3.1 の y に関する依存性を調べることに対応する。方法としては、 $H - \chi$ 星団を撮像することにより、視野の全面に亘り一度に多数の星像を得た (図 3.7)。この内カウントが飽和していな

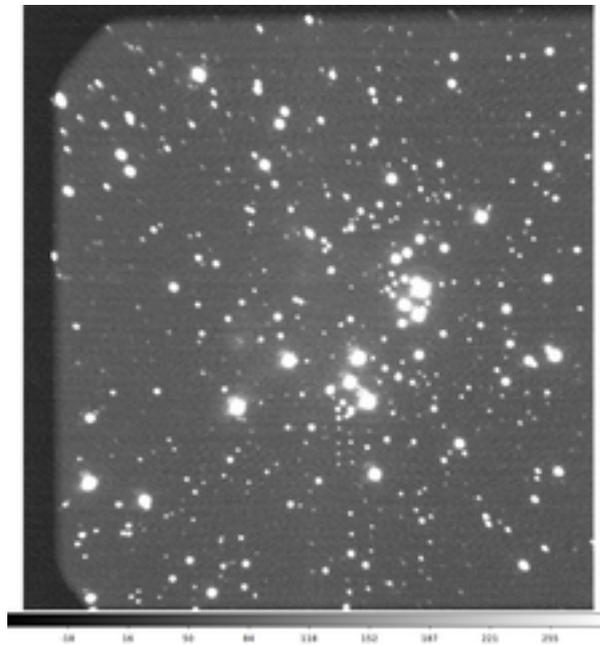


図 3.7: $H - \chi$ 星団

い恒星像一つ一つに対し、画像処理ソフトウェア IRAF を用いて、輝度分布の半値幅を計測した。これを星像サイズの代表値として扱う。結果を図 3.8, 3.9 に示す。縦軸が星像の半値幅 [pixel]、横軸が検出器の中心からの距離 [pixel] となっている。まず、近赤外検出器の方は視野内での依存性はあまり見られないが、2012/01/31 のデータは少し右肩上がりになっているように思える。可視検出器では 2011/10/27 のデータは全体的に、中心からの距離が大きくなると星像サイズが大きくなる傾向にある。しかし 2012/01/31 のデータではそのような傾向はないが、これはこの晩のシーイングが悪く、星像サイズが全体として大きくなっているため、微妙な傾向が消されて判りづらくなっていると考えられる。また、楕円の方向から HONIR の光学系のおおよその中心を求め (図 3.10)、求めた光学系の中心からの距離からの星像サイズも調べた (図 3.11)。近赤外の光学中心は視野内の星が真円に近く、楕円の方向

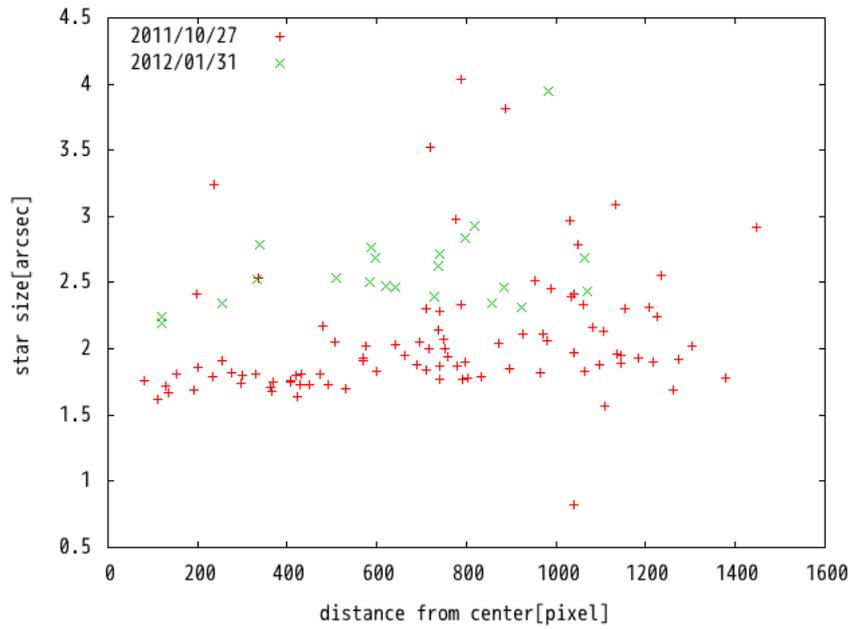


図 3.8: 星像サイズの視野内依存性 (近赤外)

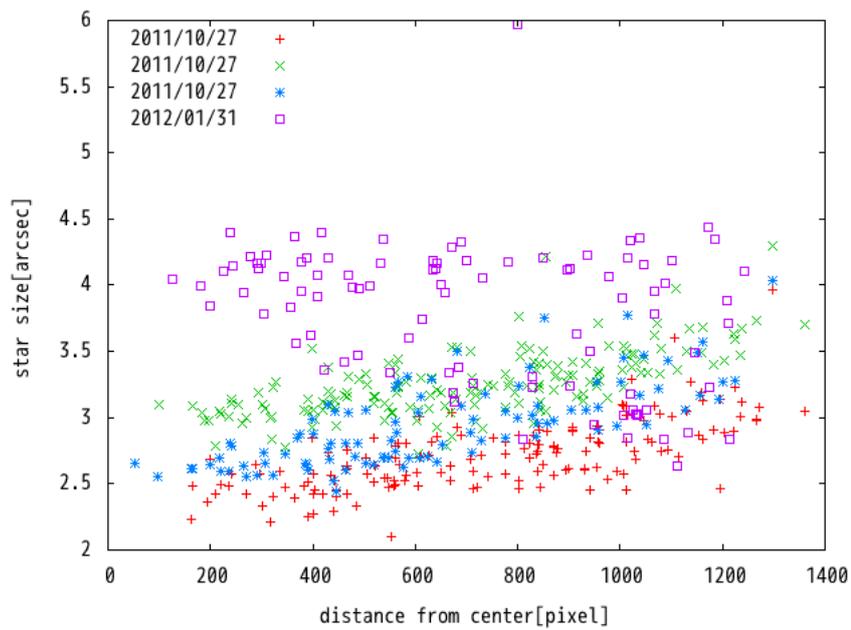


図 3.9: 星像サイズの視野内依存性 (可視)

が分からなかったため、光学中心は求めていない。図 3.9 に比べ、図 3.11 の方が 1 次の依

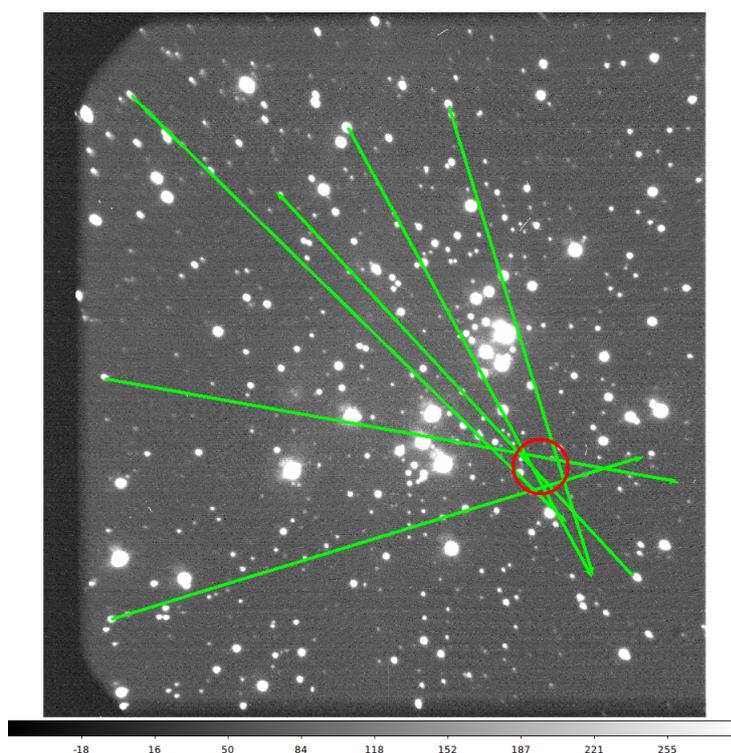


図 3.10: 周辺星像の楕円の長軸の方向から算出した光学中心

存性があるように見えるので、この像の伸びは $y = 1$ のコマ収差に依るものではないかと考えられる。

今回の試験観測における平均的な星像サイズは約 2 程度で、最良の星像サイズは可視で 1.7、近赤外では 0.9 という結果となった(但し、今回の試験観測においては可視の観測例は少なかったことに注意)。2009 年の試験観測での近赤外の星像サイズは最良で 1.65 で平均的な星像サイズは 3 だったので、光学系の調整の効果が見られるが、収差は残っており改善の余地がある。

3.3.3 デフォーカス像による収差の考察

フォーカスを前後にずらして星を撮り、その像(主鏡像)の変化の様子を調べることで、どの収差が大きく乗っているかを判定する方法がある([6])。そこで、副鏡位置をベストフォーカスから $\Delta z = \pm 1.5\text{mm}, \pm 3.0\text{mm}$ だけ光軸方向(光が進む方向が z の値が正となる)に沿ってずらして、どの収差が有意に効いているかを確認した。具体的にはフォーカスをずらして視野の中心、四隅の 5 箇所データを取得した(例:図 3.12 ~ 3.16)。

画像の白い部分が主鏡像で、各像の中心付近にある黒い円形のところが副鏡の影となっている。このようなデータを用いて、主鏡を楕円、副鏡の影を円と仮定して目視でフィッティングを行った。これにより主鏡像の長軸、短軸、傾き、中心座標、副鏡の影の半径、中心座標が得られる。そして、そこから主鏡の長軸 a と副鏡の半径 r の比率、主鏡の扁平率 e 、主

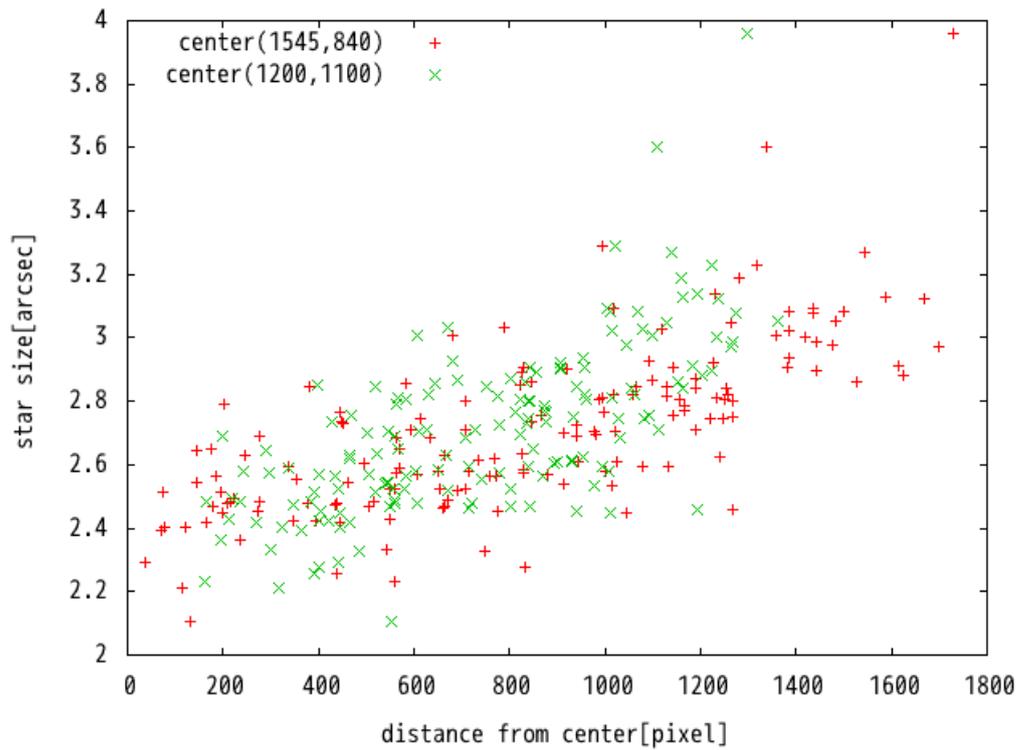


図 3.11: 星像サイズのノミナルな視野中心 (緑) 及び、星像の伸びから推算した光学中心 (赤) からの距離依存性 (可視)

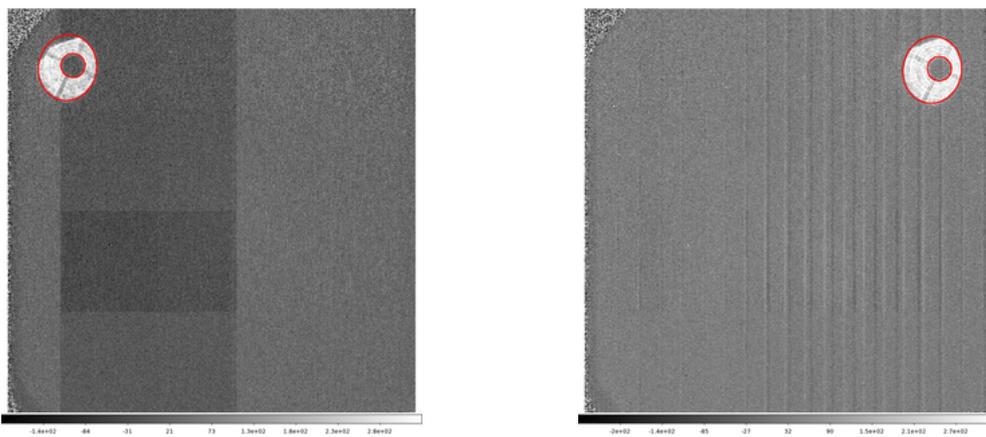


図 3.12: $\Delta z = +3.0\text{mm}$ の時の視野左上での星像
 図 3.13: 図 3.12 と同じ状態での視野右上での星像

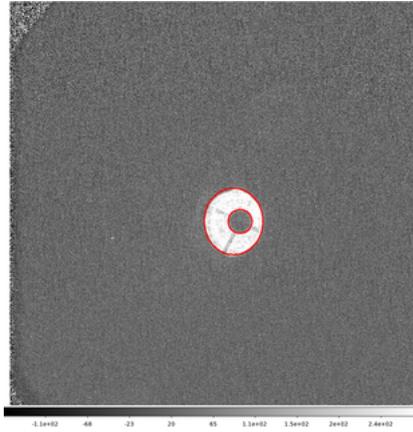


図 3.14: 図 3.12 と同じ状態での視野中心での星像

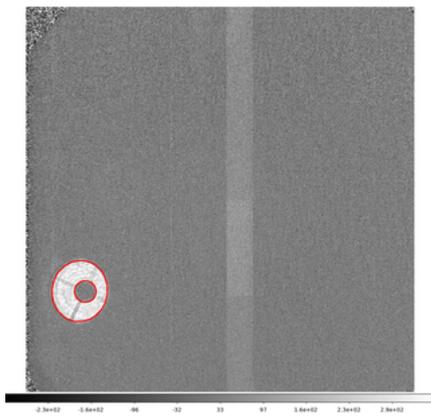


図 3.15: 図 3.12 と同じ状態での視野左下での星像

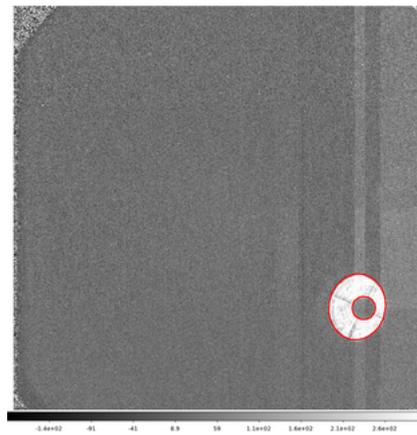


図 3.16: 図 3.12 と同じ状態での視野右下での星像

鏡と副鏡の影の中心のズレを求めた。中心ズレは算出した値を主鏡の長軸で割り、スケールした値となっている。

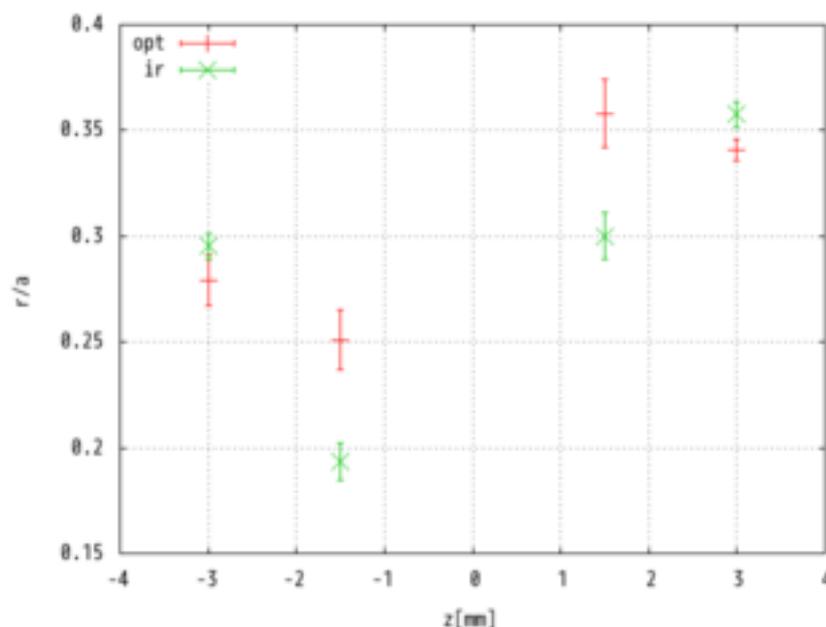


図 3.17: r/a の Δz の依存性。可視 (opt)、近赤外 (ir) それぞれで 5 箇所の星像の平均値を示している。

Wilson (1999) によると、光学系に幾何学的な軸ずれがある場合、 Δz の変化に伴って中心ずれが変化する。また、球面収差が大きい場合は、 Δz の変化に伴って r/a が大きく変わる。コマ収差が大きい場合は、視野端に行くほど中心ズレが大きくなる一方で、 Δz への依存性は無い。非点収差が大きい場合には Δz の正負によって楕円の傾きが 90° 変わる。

まず、楕円傾きの Δz に対する変化は殆ど見られなかったので (図 3.18)、非点収差は小さいと考えられる。

図 3.17 の r/a を見ると、 Δz が大きくなるにつれ、 r/a が大きくなる傾向が見られる。これは、球面収差が残っている場合に予想される挙動と一致する。しかしながら、 $\Delta z = -1.5$ mm のところで一旦 r/a が小さくなっており (特に赤外で顕著)、この球面収差がなんらかの複雑な性質を持っていることが示唆される。この異常性の傾向は、可視・近赤外共通であることから、コリメータレンズかそれよりも望遠鏡側の光学系を起源とすることが示唆される。

中心ズレについては、図 3.19 および図 3.20 から、可視・近赤外の両方で同程度、 Δz の変化に伴う x 方向のずれがみられた。これは、望遠鏡および装置内部の光学系のどこかで、 X 方向の光軸ズレが存在することを示唆している。可視と近赤外で同程度のズレであることから、望遠鏡と装置の間の軸ズレか、あるいは (可視と近赤外で共通に用いられている) コリメータレンズ系内のレンズ群の軸ズレがまず考えられる。

中心ズレの視野内依存性も、可視・近赤外共通にみられており、コマ収差も存在することが判る。これは図 3.10 と同様の傾向である。

以上のことから、収差の主な要因として、コリメータレンズかそれよりも望遠鏡側に (i)

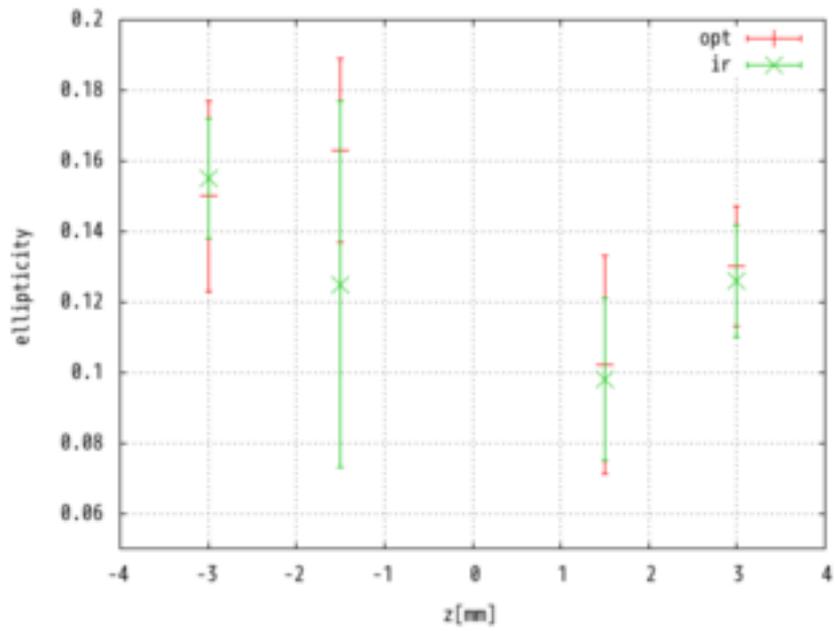


図 3.18: e の Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。

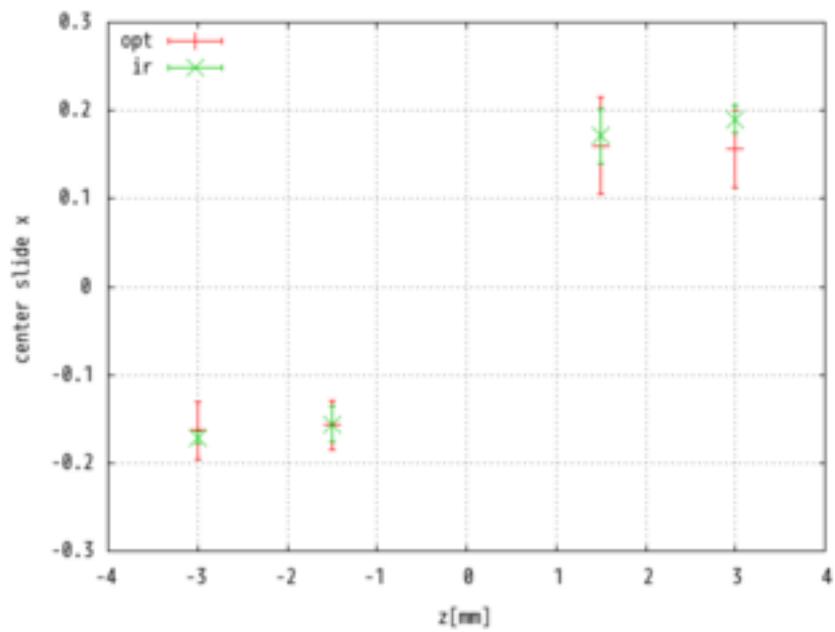


図 3.19: x 方向の中心ズレの Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。

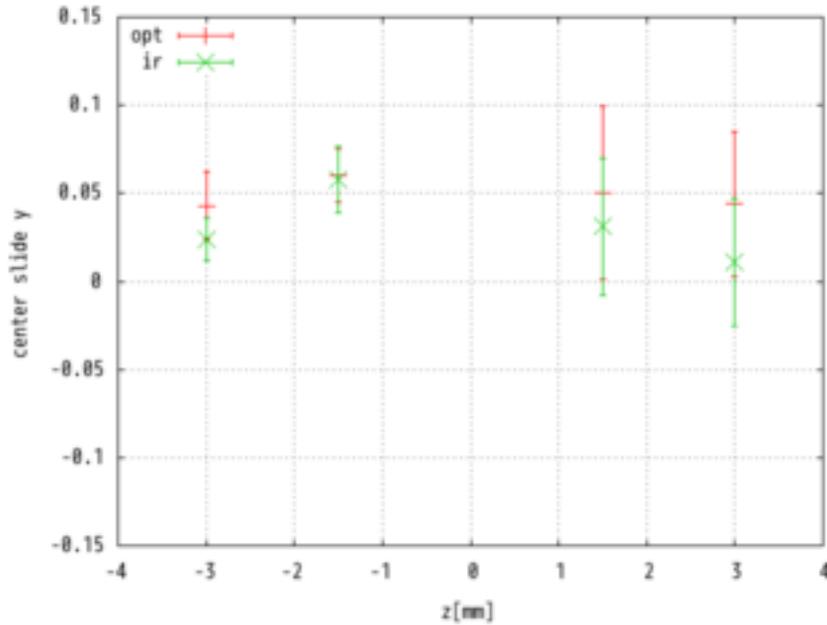


図 3.20: y 方向の中心ズレの Δz の依存性。表示の仕方は図 3.17 と同じ。

光学系の軸ズレ（画像の X 軸方向）(ii) 球面収差、および (iii) コマ収差が存在することが判った。今後、より良い星像サイズを得るために、これらの収差を取り除くべくレンズ群等の光学系の調整、および観測装置のインターフェース部の見直しをすることが必要となる。

特に、(i) 軸ズレについては、コリメーターレンズ系のレーザーを用いた単体光学試験で、ちょうど X 方向に対応する方向に、出射光が平行移動するといった特異な挙動を示すことが判っているので、それとの因果関係を調べ、対策を本格化する上でも興味深い。

3.4 シャッターの駆動安定性及びフラットフィールド

シャッターについて、駆動の安定性は実験室にて確認できているが、望遠鏡に設置して望遠鏡を通した光を入れての試験を行うべき項目がいくつかある。まず、シャッターの駆動中心と光学中心とが必ずしも一致するとは限らないので、その調査を行った。次に望遠鏡のあるドーム内は冬の深夜になると温度が氷点下になることもあるので、シャッターの温度変化に対する駆動の安定性を調べた。最後に、作成したシャッタープログラムが正しく露出時間を制御しているかの確認をし、その較正を行った。

3.4.1 駆動中心と光学中心合わせ

図 3.21 のように、シャッターを色々な位置で停止させてドーム内にあるフラット光源を近赤外検出器で撮像した。このデータから x 軸方向の視野中心の ± 10 ピクセル幅についての y 方向のカウント分布として取り出し、横軸を y ピクセル [pixel]、縦軸にカウント [ADU] をとったものを図 3.22 に示す。これらの各画像において、輝度がピーク（ピーク値はシャッター開放時の画像から算出しておく）の半値となるのピクセルを読み取り、これをシャッター

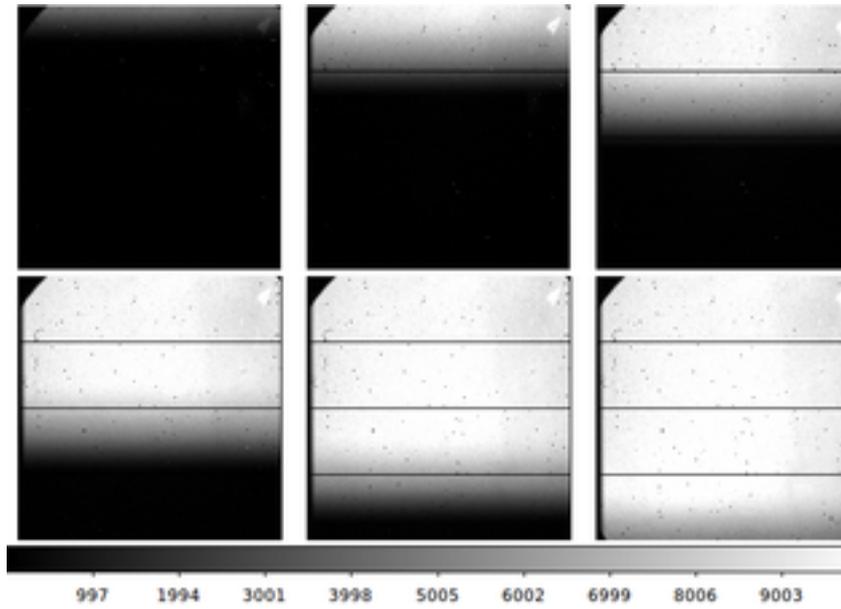


図 3.21: シャッターの位置を固定して撮像したデータ

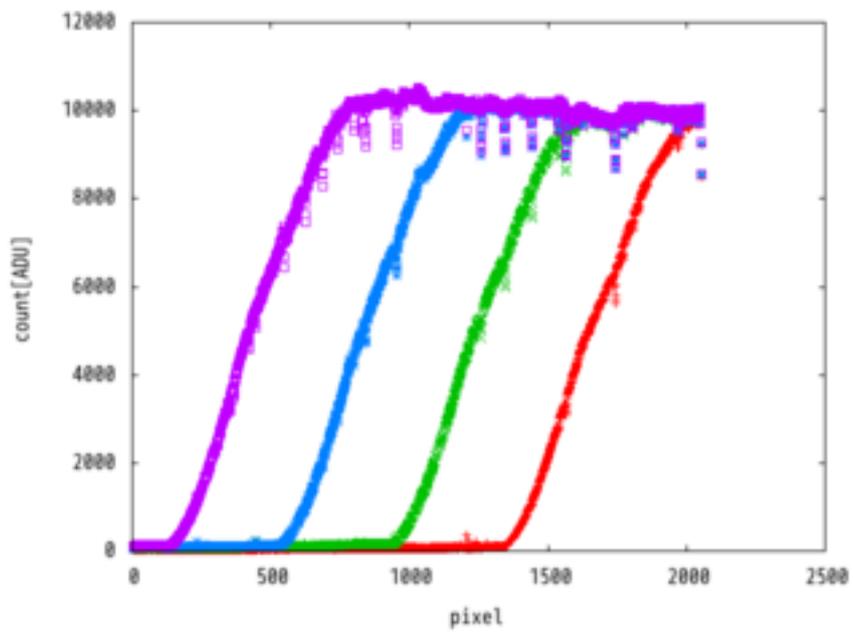


図 3.22: 図 3.21 を縦に見たグラフ

開口端の位置とみなし、シャッターが開く時と閉まる時とでのシャッタ 0 の位置 (ピクセル単位) を取得した。横軸にシャッターの読み位置 (アクチュエーターから返される位置)[mm]、縦軸に図 3.22 で得られた半値になるピクセル [pixel] をとったものを図 3.23,3.24 に示す。赤

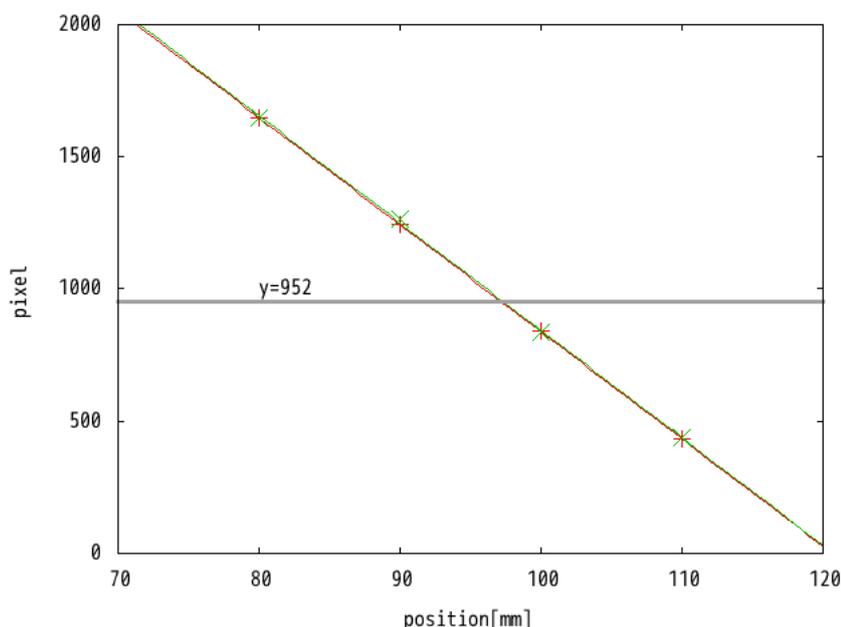


図 3.23: シャッターが開く時の半値になるピクセル

と緑の線はそれぞれの色のデータ点をフィッティングした直線で、黒の点線は視野中心のピクセルを表している。開く時と閉じる時それぞれでの黒の点線と赤、緑の線の交点の x 座標の平均を光学の中心をみなした。アクチュエーターのストロークは 350mm なのでノミナルな中心位置は 175mm になるが、入射光学ビームの中心位置は 172.691mm と算出され、それを踏まえてシャッター駆動プログラムにおいては、中心位置を 172.691mm となるように書き換えた。なお、これにより加減速の範囲が原点側では短くなることになるが、元々加減速の距離に余裕を持たせていたため、この変更による露光ムラは生じない。

3.4.2 駆動の温度依存性

アクチュエーターの仕様書での使用温度としては 0 以上となっている。しかし、東広島天文台のある場所は冬の寒い日になると氷点下になることもしばしばある。一般的に駆動物は温度が低下するとグリスが固まるなど摩擦が増えて、駆動性能に変化が生じる可能性がある。そこで、温度に対する駆動の安定性を調べた。測定温度は -2.0~6.0 で、シャッターの往路駆動と復路駆動の 2 通りで各温度 10 回、合計 20 回駆動させて駆動に掛かる時間のデータを取得した。その結果を図 3.25,3.26 に示す。グラフからも分かるように駆動時間に対してのばらつきは 0.05% 以下であり、且つ温度に依る変化もほとんど見られない。このことから、光学シャッター機構に使用しているアクチュエーターはこの気温範囲程度では十分なトルクを持っており、温度の依存性はないと考えられる。

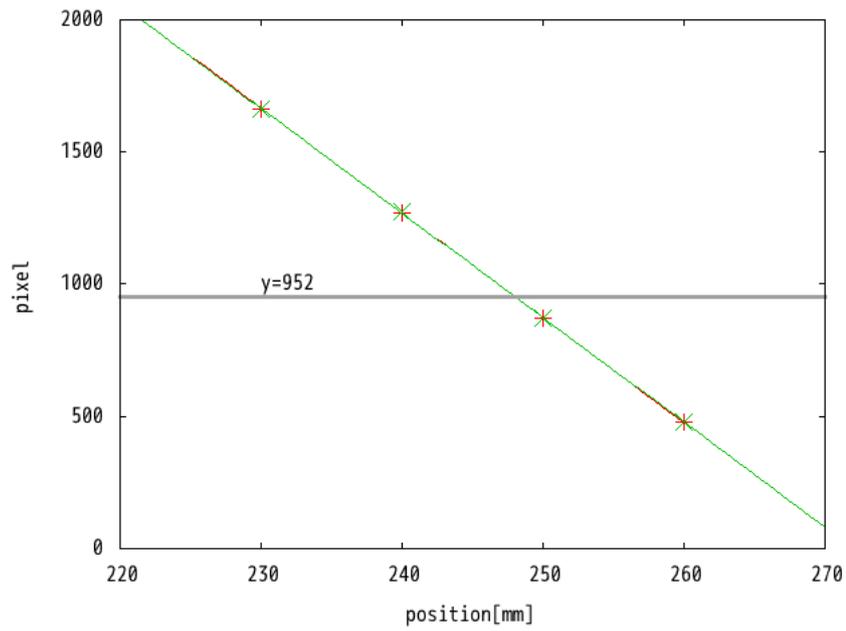


図 3.24: シャッターが閉じる時の半値になるピクセル

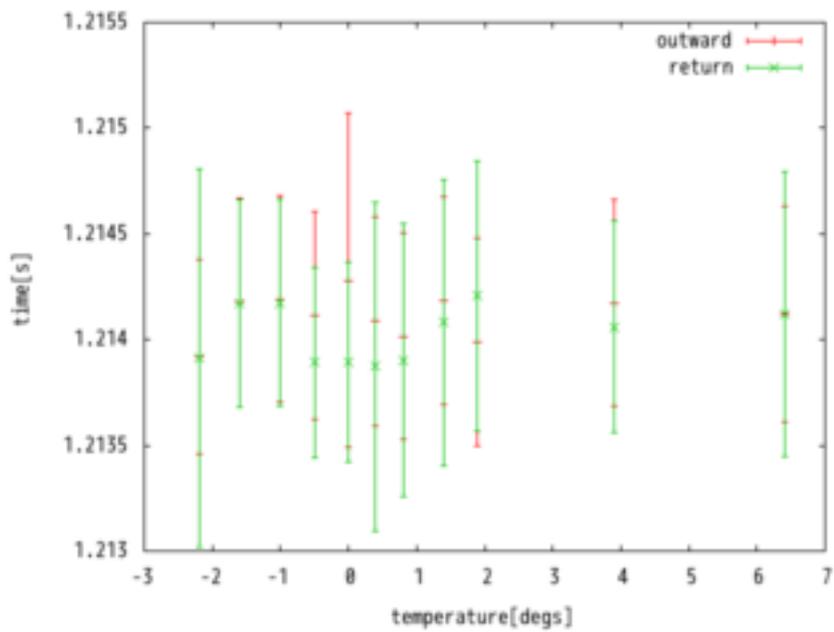


図 3.25: 短時間露出モードでの温度依存性

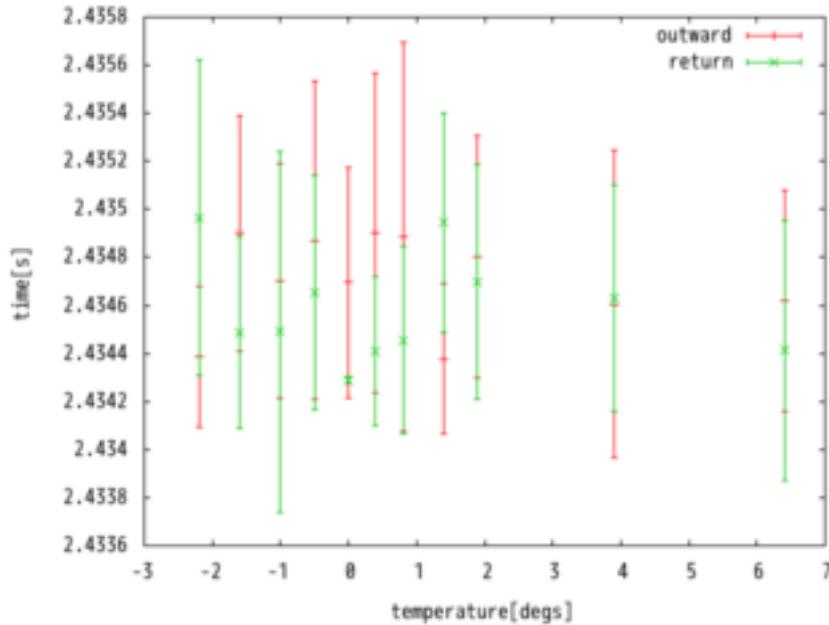


図 3.26: 長時間露出モードでの温度依存性

3.4.3 露出時間の較正

シャッターの露出時間は、実験室にて算出した加減速度、最高速度を元にして計算したものととなっているが、露出時間が本当に期待するものになっているかどうかは何らかの方法で確認しなくてはならない。そこで、様々な露出時間でドーム内にあるフラット光源を撮像し、露出時間の較正を行った。較正を行うにあたって以下の3つのことを仮定する。

- 500sでの露出時間は動作に関わる不安定性に比べて十分に長く、正確である
- CCDの線形性が500 ~ 20,000[ADU]では保たれている
- PCの時刻の精度は正確である

1つ目は相対的に僅かな駆動誤差を無視できるようにするためである。2つ目は露出の長短に伴うカウントの比をそのまま露出時間の比として扱う場合に、線形性が保たれていないと、正しく較正ができないためである。3つ目はシャッタープログラムはPCの時刻にて制御を行なっているためこの時刻が正確でないと正しく較正できないからである。一般的に負荷が少ない場合のPCの時刻の精度は、悪いもので1秒間に $\pm 10^{-4}$ の精度があると言われており、誤差1%レベルが許容できる場合には問題はないと考えられる。

まず2011年10月の試験観測の時に(500,90,15s),(15,5,1.4,1.3,0.6,0.3s)の2つのデータ群を取得した。その後2011年12月からの試験観測の時にシャッタープログラムを修正し、再度(500,220,100,50,20s),(20,12,6,3,1.6,1.5s),(1.5,1.0,0.7,0.5,0.3s)の3つのデータ群を取得した。データの取得方法は次のとおりである。まず、フラット光源の電源を入れて20分程度待ち、光源を十分に安定させる。光源が十分に安定したら露出時間の短い方(もしくは長い方)から長い方(もしくは短い方)のデータを取得し、すぐにその逆の方からデータを取得した。上記のような方法により光源が時間的に徐々に明るくなっていっても、その効果を消す

ことができる。取得したデータの視野中心の 100×100 pixel の平均カウントそれぞれ出し、更に同じ露出時間での平均をその時間でのカウント値とした。そして、500s 露出した時のデータから 1s あたりのカウントを算出し、各露出時間でのカウントをそのカウントで割ることで実際の露出時間とした。図 3.27 に 10 月期の結果を示す。横軸は設定した時間 [s] で、縦軸は 500s でスケールした実際の露出時間 [s] である。このフィッティングの結果は、

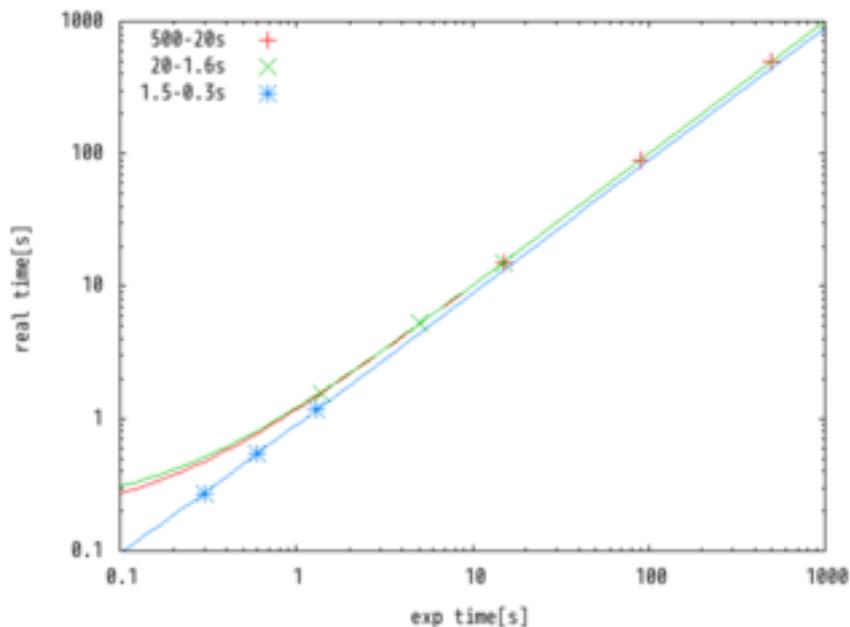


図 3.27: 設定露出時間と実際の露出時間

$$\text{赤} : f(x) = (0.99965 \pm 0.000010)x + (0.1729 \pm 0.0028)$$

$$\text{緑} : f(x) = (0.999 \pm 0.014)x + (0.21 \pm 0.12)$$

$$\text{青} : f(x) = (0.8872 \pm 0.0040)x + (0.0081 \pm 0.0034)$$

となった。赤と緑は長時間露出モードで、青が短時間露出モードを表している。つまり、長時間露出モードでは、露出時間にオフセットがかかったような状態となっており、これまで想定されていない一定の駆動時間があると考えれば説明できる。短時間露出モードでは、目隠し板の速度が実験室での測定結果よりも僅かに速く、実際よりも短い露出が行われていると考えられる。

2010 年 12 月からの試験観測では、この結果をプログラムに反映させてたものを用意し、正しく較正されているかどうかを確認した。その結果のグラフが図 3.28 となっている。較正後のフィッティングの結果は、

$$\text{赤} : f(x) = (0.99960 \pm 0.000016)x + (0.174 \pm 0.040)$$

$$\text{緑} : f(x) = (1.00768 \pm 0.00041)x + (-0.0035 \pm 0.0044)$$

$$\text{青} : f(x) = (1.032 \pm 0.019)x + (-0.027 \pm 0.018)$$

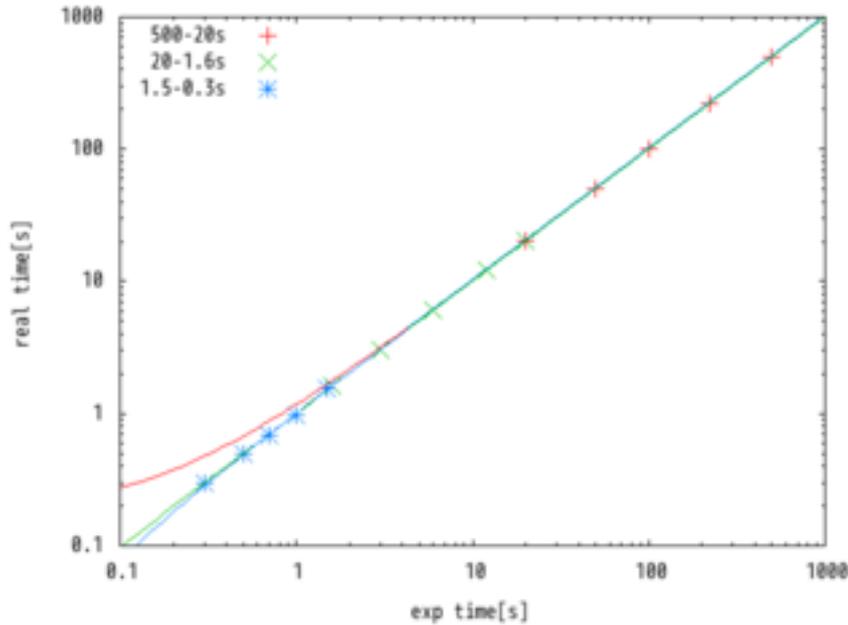


図 3.28: 露光時間を校正した後の設定露出時間と実際の露出時間

となった。短時間露出モードでの傾きは校正前と比べほぼ 1 に近づくことができた。しかし、長時間露出モードでは 500~20s ではオフセットが残っているように見えるが、20~1.6s でのデータではオフセットもなく、傾きもほぼ 1 という結果になった。この原因については、500~20s では光源が弱いため、シャッターを通らずに隙間から侵入する迷光が影響した可能性があるが、はっきりとした事は分かっておらず、今後解明しなければならない事柄である。

次に、シャッターの駆動による露光ムラがないか調べた。これは多少のムラはなまされて無視できると考えられる 500s で撮像した画像で、より短い時間で撮像した画像を割り、規格化してムラがどの程度あるかを調べた (図 3.30 ~ 3.32)。視野全体に亘るグローバルなばらつきは特に見られず、シャッターに依る露光ムラはないと考えられる。また、短時間露出になると視野中央に縦一直線に明るいパターンが見られるが、これはバイアスによるパターンが見えているので、露光ムラとは関係がない。

3.5 大気減光及びスカイ輝度

地球の表面には大気が存在しており、地上望遠鏡で星を観測すると大気中の微粒子や分子などにより散乱、吸収されて望遠鏡に届くまでに減光される。観測する星の高度が低ければ低いほど大気の厚さ (airmass) は厚くなるので、より減光される。airmass は

$$airmass = \frac{1}{\cos(90^\circ - altitude)} \quad (3.1)$$

で表され、天頂では airmass=1、高度 30 °では airmass≈2 となる。

等級の分かっている様々な高度の星を撮像することにより、各バンドにおける観測所の大気減光の係数が分かる。ただし、大気減光の特性は一般に時々刻々と変化するため、正確に

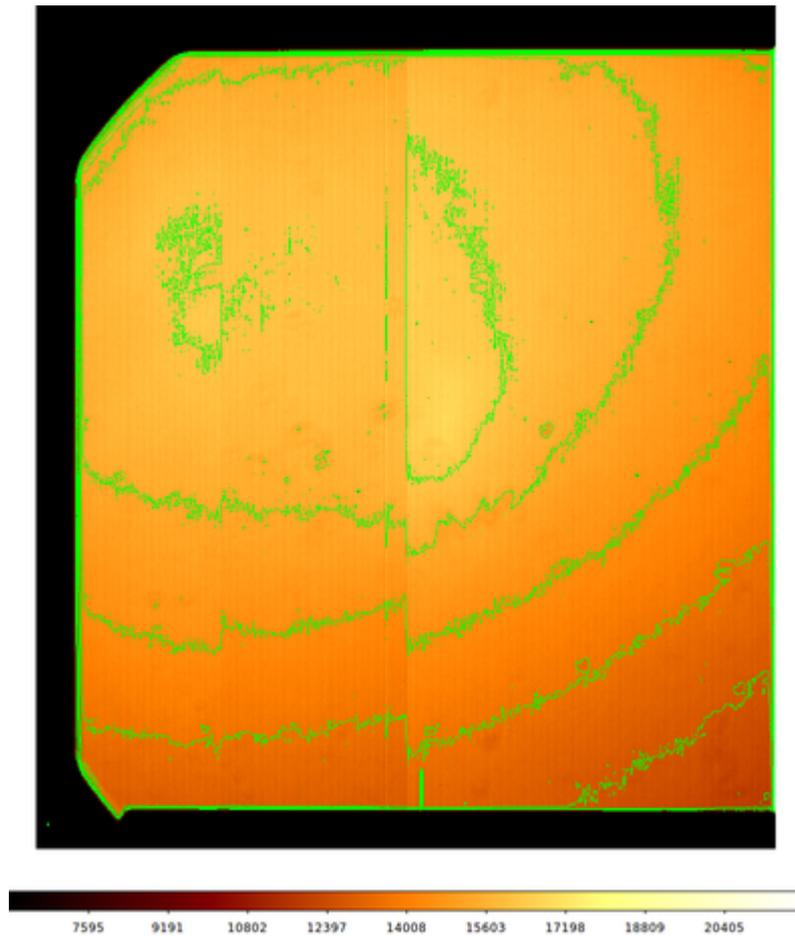


図 3.29: 500s 露出でのフラットフィールド

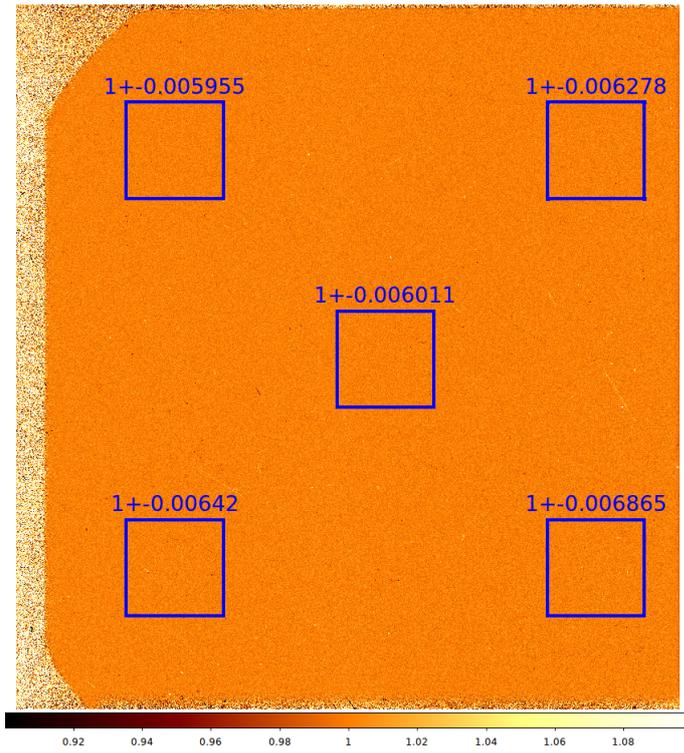


图 3.30: 220s 露出

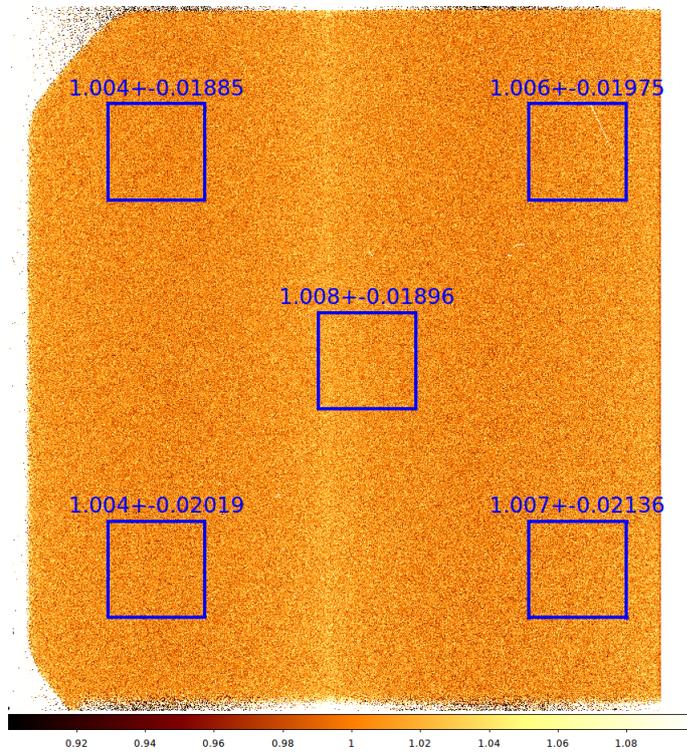


图 3.31: 6.0s 露出

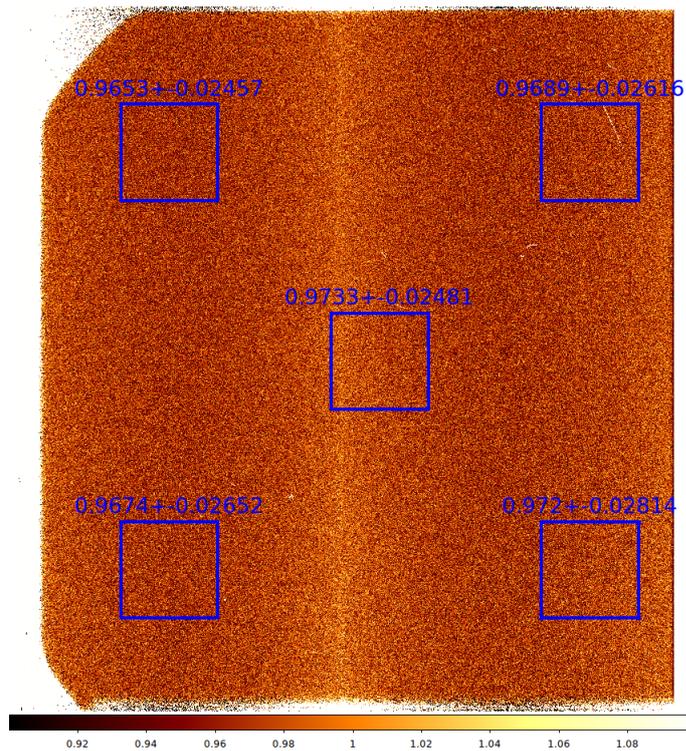


図 3.32: 0.3s 露出

大気減光の係数を算出することは困難であり、快晴夜でないとき安定的には求まらないことが多い。

観測される等級 M_{obs} は

$$M_{obs} = M_{cat} + A * X \quad (3.2)$$

M_{cat} (カタログ等級) に対して減光を受けて、式 (3.2) の様に表される。ここで、 A が減光係数、 X が airmass を表している。よって、様々な高度 (すなわち X) の星を撮像することで、減光係数 A を求めることができる。また、 A は波長依存性もあり、波長によって異なる。

2011年10月期には可視、近赤外それぞれ3日間、12月期には可視、近赤外それぞれ2日間 (Ksバンドは1日のみ) データを取得した。データ取得のために用いた天体は Landolt の標準星フィールドで、このフィールドには1つの視野内に同じような等級で様々なカラーを持つ標準星のセットが揃っている。

取得したデータのなかでも、特に大気の状態が良かった日の大気減光のデータを図 3.33 に示す。HONIR は元々Bバンドにあまり感度がないため、誤差が大きく 1/17 の Bバンドの減光係数がかなり低く見積もられているのも、その影響を受けている可能性がある (また、後述のように大気の状態が不安定だった可能性もある)。しかし、Bバンドを除くと、割合安定している。なお、他の世界的な天文台サイトと比較すると、可視では多少悪い値にはなっているが、近赤外線については遜色のない値となっている。

また、標準星を撮像した時のスカイバックグラウンドからスカイ輝度も求めた。縦軸にスカイの等級、横軸に airmass、月齢を取り、各バンドごとにグラフにした (図?? ~ 3.47)。

基本的には airmass が大きくなるほどスカイ輝度も増加し、月齢が 15(満月) に近いほどスカイ輝度は高くなっている傾向が見られる。また、近赤外のスカイ輝度については、ヒト

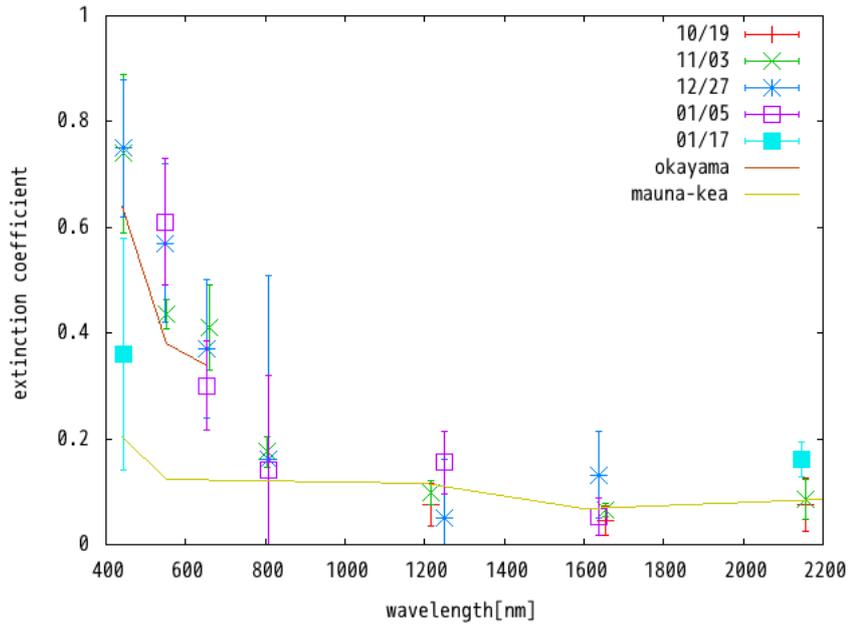


図 3.33: 各バンドの大気減光

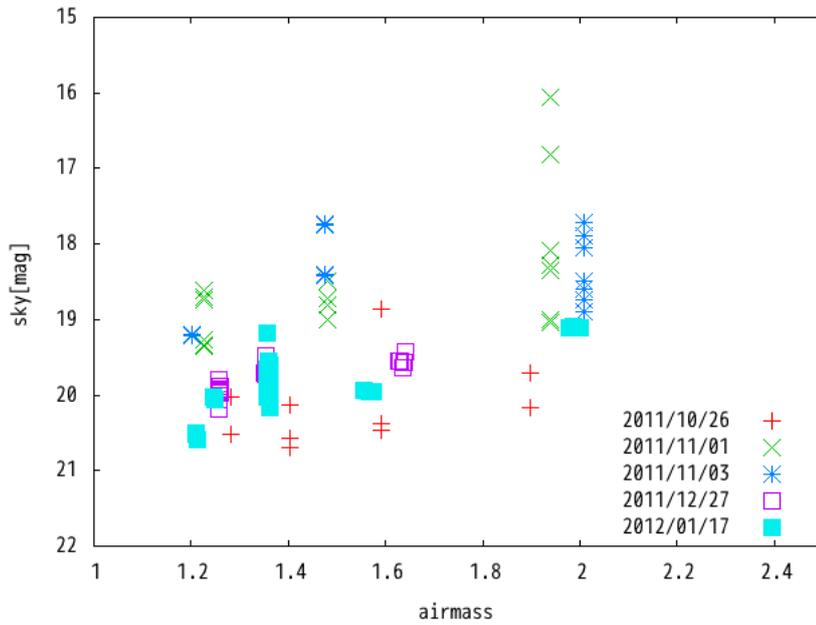


図 3.34: airmass による B バンドでのスカイ輝度の変化

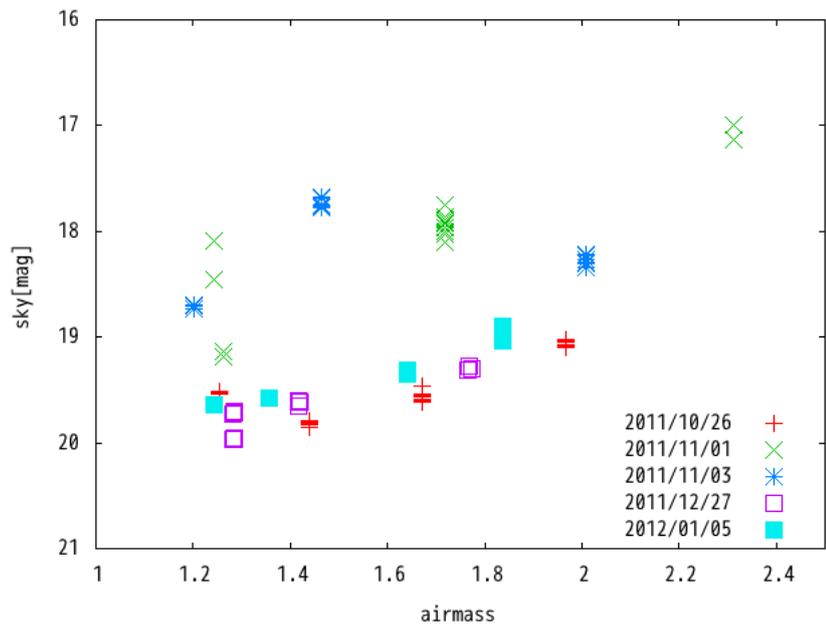


図 3.35: airmass による V バンドでのスカイ輝度の変化

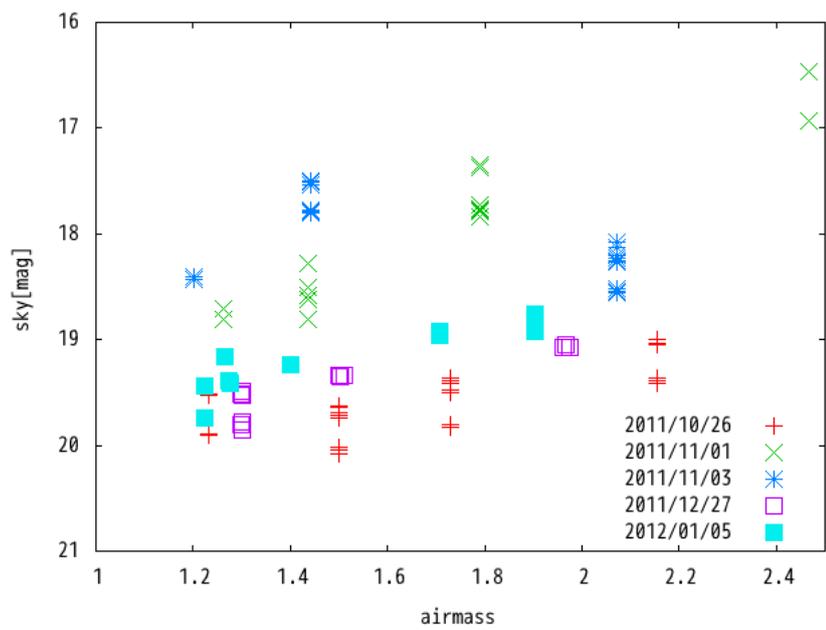


図 3.36: airmass による R バンドでのスカイ輝度の変化

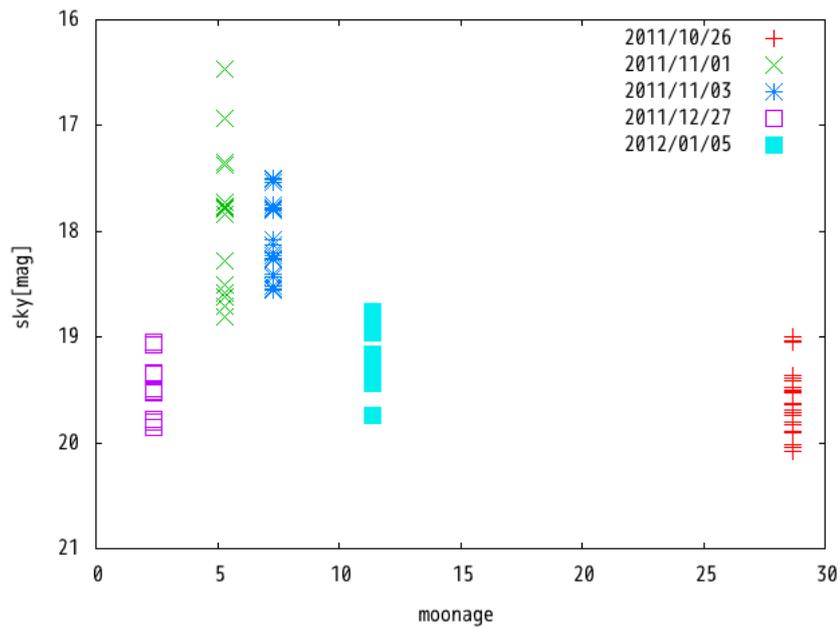


図 3.43: 月齢による R バンドでのスカイ輝度の変化

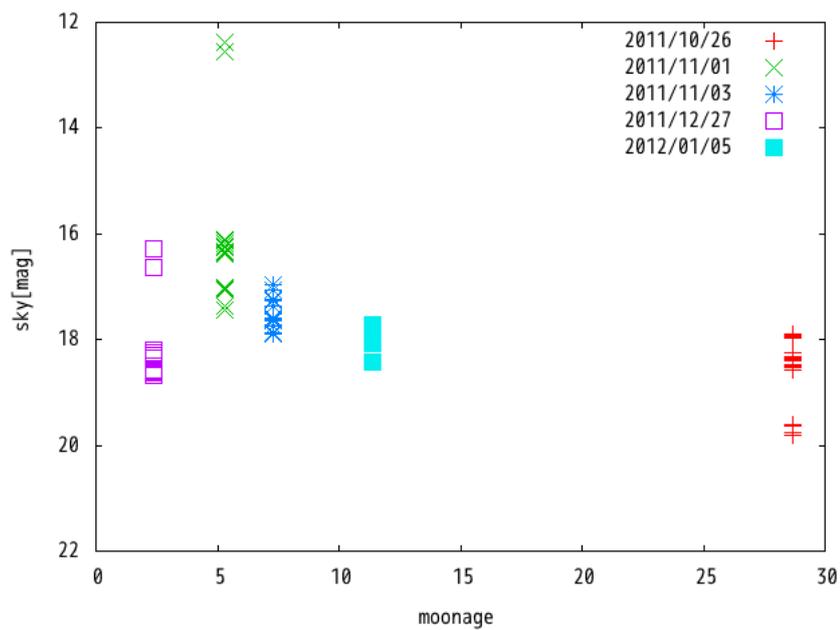


図 3.44: 月齢による I バンドでのスカイ輝度の変化

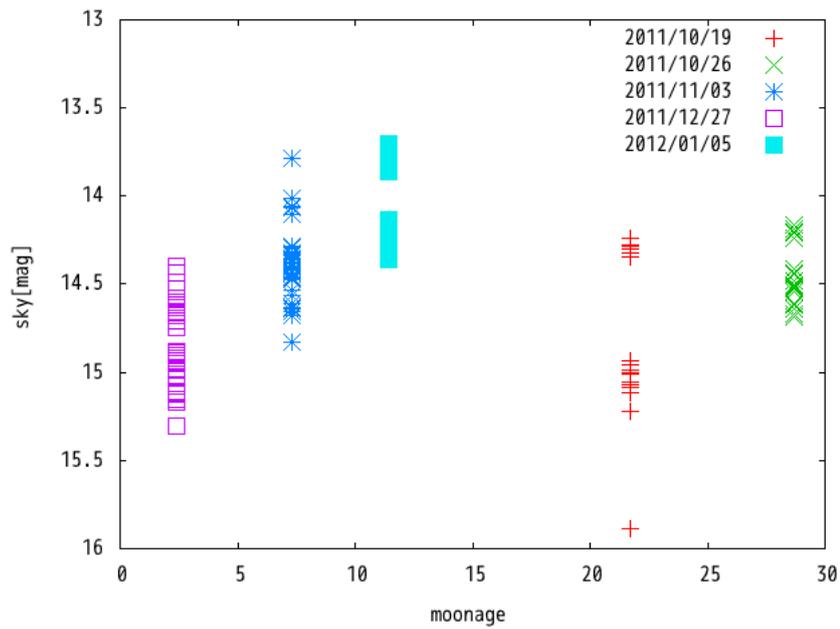


図 3.45: 月齢による J バンドでのスカイ輝度の変化

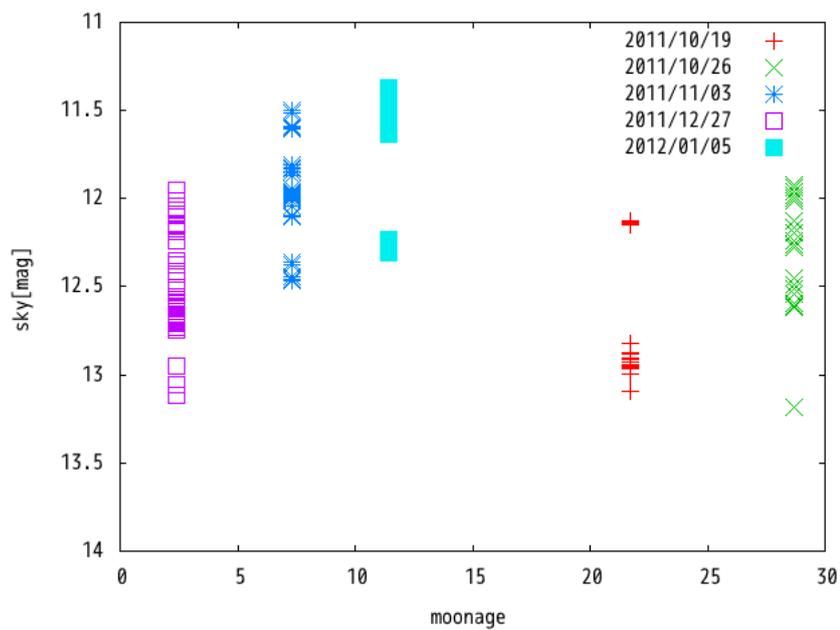


図 3.46: 月齢による H バンドでのスカイ輝度の変化

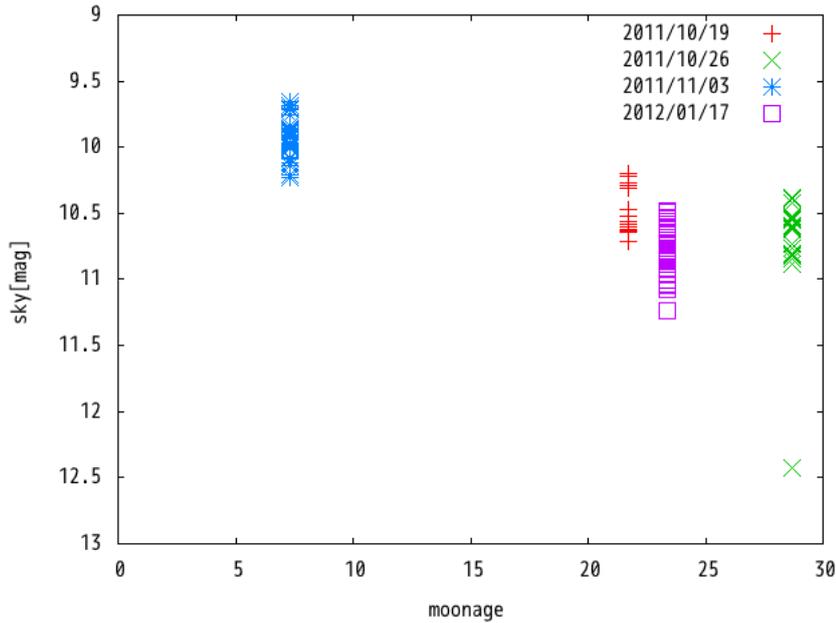


図 3.47: 月齢による Ks バンドでのスカイ輝度の変化

ミがけていることが分かっており、これにより他の熱放射を見ている可能性がある。それにより、スカイの輝度が明るくなっていると考えられる。

3.6 総合効率

装置効率は実際に観測された光子数を、望遠鏡にやってくると期待される光子数で割ることと求められる。m 等の天体から波長 $\lambda[\text{\AA}]$ の光が 1.5m の望遠鏡 (かなた望遠鏡) にやってくると期待される 1\AA あたりの光子数 N_λ は

$$N_\lambda = \frac{4.5 \times 10^{10}}{\lambda} \times 10^{-\frac{m}{2.5}} \times 1.5^2 \quad (3.3)$$

で表せられる [8]。この N_λ の λ に各バンドの有効波長を代入し、波長幅を掛けることで、各バンドにおける望遠鏡にやってくると期待される光子数となる。

§ 3.5 で求めた減光係数を用いて、観測された光子数を補正した時の装置効率 (望遠鏡を含む) を表 3.4(2011 年 12 月の試験観測のみ) に示す。

バンド	B	V	R	I
	3.7±0.9%	20.8±1.9%	19.5±2.0%	19.7±2.6%
バンド	J	H	Ks	
	6.3±1.2%	8.6±1.1%	6.2±0.4%	

表 3.4: 大気減光を補正した装置効率 (望遠鏡込み)

HONIR の総合効率の設計値は、各光学素子の透過率ないし反射率の積で表される。個別に見ていくと、光の通る順に

- 望遠鏡と主鏡の反射率が約 80%
- 副鏡の遮蔽率が 10% → 効率は 90%
- HONIR ウィンドウ表裏面での透過率それぞれ 96%
- ヒトミマスク遮蔽率約 10% → 効率約 90%
- ダイクロイックミラー反射率約 90%(但し、B バンドは約 30%)
- 可視フィルター B:約 98%,V:約 93%,R:約 97%,I:約 98%
- 近赤外フィルター J:約 85%,H:約 95%,Ks:約 90%
- コリメーターレンズ+可視カメラレンズの透過率
B:約 48%,V:約 50%,R:約 57%,I:約 52%(レンズの設計書より [9])
- コリメーターレンズ+近赤外カメラレンズの透過率
J:約 50%,H:約 55%,Ks:約 45%(レンズの設計書より [9])
- CCD 量子効率
B:約 55%,V:約 82%,R:約 92%,I:約 90%(CCD 設計書より)
- VIRGO-2K 量子効率
J:75%,H:89%,Ks:89%(iVIRGO-2K 設計書より [10])

上記の設計値から算出すると表 3.5 のようになる。また、設計値と観測された総合効率を図

バンド	B	V	R	I
	約 3.7%	約 16%	約 22%	約 20%
バンド	J	H	Ks	
	約 14%	約 20%	約 15%	

表 3.5: 装置効率の設計値 (望遠鏡の反射率込み)

3.48 に示す。

設計値と今回の試験観測での効率を図 3.48 比べると、可視は設計値に近い効率は出ており、V バンドではほぼ設計値通りとなっている。また、R,I バンドも平均こそ設計値より低めだが、どちらも遜色のない値が出ている。しかし、近赤外の効率はどのバンドも設計値の約半分程度となっている。この原因ははっきりとはまだ分かっていないものの、VIRGO-2K の電荷変換効率(ゲイン)が異なっている可能性があると考えている。共同研究者の浦野氏(物理科学科 4 年)の調査によるとゲインが約 3 倍になる可能性も指摘されており、その場合効率はほぼ設計値と等しくなる。そうなると、装置効率に関しては問題がなくなるが、VIRGO-2K 素子のノイズが依然大きく、ゲインの詳細な測定結果は今後の進展を待たないといけない。

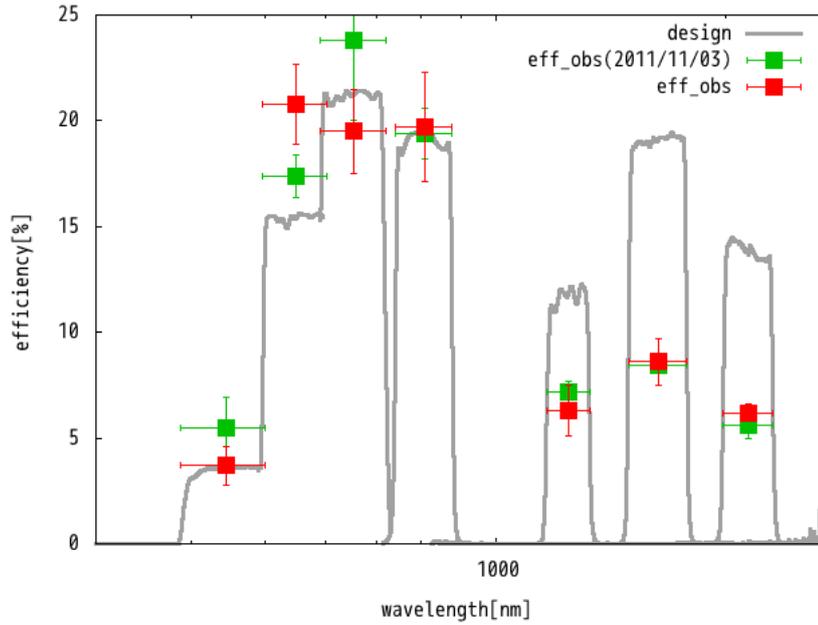


図 3.48: 設計効率を観測された総合効率

3.7 限界等級

スカイ、ダーク、読み出しノイズから式 3.4 を用いて、限界等級を求めることができる。

$$S/N = \frac{N \times t}{\sqrt{N \times t + N_{sky} \times t + N_{dark} \times t + N_{readout} \times t}} \quad (3.4)$$

$t[s]$ は露出時間、 $N_{sky}[e^-/s]$ はスカイの輝度、 $N_{dark}[e^-/s]$ はダーク、 $N_{readout}[e^-/s]$ は読み出しノイズを表しており、これらから天体からのシグナル $N[e^-/s]$ を求める。式 3.4 から S/N が 10,100,1000、露出時間が 600,60[s] の時の限界等級を R と Ks バンドで求めた。また、アパーチャーは $\phi = 9$ で算出している。

露出時間 [s] \ S/N	10	100	1000
600	20.2	17.62	14.741
60	18.9	16.23	12.751

表 3.6: R バンドでの限界等級

露出時間 [s] \ S/N	10	100	1000
600	15.1	12.66	10.079
60	13.3	10.82	8.221

表 3.7: Ks バンドでの限界等級

また、600 秒露出、 $\sigma=0.1\text{mag}$ 、アパーチャー $\phi=9$ での限界等級を TRISPEC と比較したものを表 3.8 に示す。Ks バンドにおいて限界等級がほぼ同じとなっているが、これは HONIR

	HONIR	TRISPEC
R バンド	20.2	18.5
Ks バンド	15.1	15.1

表 3.8: HONIR と TRISPEC の限界等級

のアーチャーを 9 と広くとってあるためだと思われる。

第4章 まとめ

私は2010年度よりこのHONIRの開発に携わってきた。HONIRは可視1バンド、近赤外2バンドで同時に撮像、偏光、分光、偏光分光を行うことができる装置である。私は主に光学シャッターの立ち上げを担当し、制御ソフトウェアを作成した。そして、各種駆動の安定性の試験を行い十分な安定性を持っていることを確認した。また、HONIR全般の開発も進み可視、近赤外での撮像モードが仕上がったことを受けて、2011年10月からは試験観測が行われ、私は撮像モードにおける装置性能全般の評価を担当した。

試験観測では標準星等の観測による大気減光、スカイ輝度と装置効率の測定、結像性能を評価した。また、光学シャッターについては露光時間の較正、駆動の安定性と温度依存性、及びフラットフィールドの安定性を評価した。露出のモードには短時間露出モードと長時間露出モードの2つのモードがあり、それぞれ較正することで0.3~500sまでの広い露出時間での線形性のズレを2%以内に収めることができた。駆動の温度依存性については有意な依存性は見当たらず、季節間の変動もないことを確認した。装置性能においては、様々な高度で標準星を観測し各バンドにおける地球大気の減光係数を求めつつ、装置効率を求めた。望遠鏡の反射率込みの装置効率は可視ではほぼ設計値通り、近赤外では設計値の約3分の1の効率となった。近赤外の効率の悪さはゲインの不安定性が影響している可能性がある。これ以上の評価は、今後のノイズ低減後のゲインの評価測定を待ちたい。また、平均的な星像サイズは可視、近赤外共に約2 μ m、最良星像サイズは近赤外で0.9 μ m という数値が得られ、通常の観測においては十分な星像サイズが得られた。しかし、収差は依然残っていることが判り、さらに調整を加えることで、より高い結像性能の得ることが向上が期待できる。今回、その調整の指針となる情報も得ることができた。

以上のことから、可視近赤外同時カメラHONIRは同時撮像装置としては既に十分な性能を持っていると結論できる。今後調整を加えることで更に性能は向上し、観測できる限界等級も上がることも期待される。

謝辞

修士での2年間、HONIRの開発から可視光に関する知識等を指導して下さった川端先生に深く感謝致します。HONIR開発統括の先本さんにはHONIRに関する基本的な事柄からご教授いただき有難う御座いました。吉田先生、秋田谷先生には装置開発や試験観測、プログラミングでのアドバイスをいただき感謝しております。HONIR開発メンバーの山下先生、大杉先生、中島さんにもお世話になりました。有難う御座いました。植村さん、山中さん、笹田さん、伊藤さん、宇井くんには観測の際お世話になりました。有難う御座いました。また、深沢先生をはじめとする高エネの皆様にはセミナー等でお世話になりました。最後の研究室の皆様、4年生の後期から現在の研究室に移動になり、不安もありましたが、皆様のおかげで楽しい3年間を過ごせました。心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 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
- [2] Sasada et al. 2010 PASJ,62,645S
- [3] Ikejiri et al. 2009 arXiv:astro-ph09123664v1
- [4] 宮本久嗣 広島大学 修士論文 2009
- [5] 先本清志 広島大学 修士論文 2010
- [6] Wilson, R. N., Reflecting Telescope Optics II, (Berlin: Springer-Verlag), 1999
- [7] IRAF Project home page <http://iraf.noao.edu/>
- [8] Massey et al.1998,ApJ,328,315
- [9] (株) レンズ屋 「可視赤外カメラ (HU05) 設計報告書」
- [10] Raythoen, VIRGO-2K 2048 ×2048 SWIR HgCdTe IRFPA Readout Model:SB-301 User's Guide and Operating Manual