第4章 観測装置

ここでは、TAO 望遠鏡運用当初に搭載することを考えている観測装置について、その 仕様を簡単に述べる.搭載する観測装置は、近赤外域、中間赤外域のものがあり、それぞ れ最適な焦点に設置される.

4.1 近赤外線2色同時多天体分光器SWIMS

SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph, 近赤 外線2色同時多天体分光器)は、0.9–2.5 µm の波長域において撮像機能と冷却スリット マスクによる多天体分光機能を備えた近赤外線観測装置である.この装置は TAO 望遠鏡 のサイエンスの大部分を担う最も重要な観測装置として、汎用的でありながらも TAO 望 遠鏡の独自性を保つ仕様となっている.

2011 年 5 月末までに全ての部品の製作・納入が完了しており, 各部の真空・冷却動作 試験を経て, 全体を組みあげた後, 望遠鏡シミュレータで装置を傾けた冷却時の性能評価 試験を予定している.

4.1.1 装置コンセプト

SWIMS は 0."126/pixel という高い空間分解能で ϕ 9.'6 の広視野をカバーし, 近赤外 線の 2 波長域 (blue: 0.9–1.4 μ m / red: 1.4–2.5 μ m) の同時撮像・同時多天体分光を実 現する. TAO 望遠鏡サイトの強みである連続的な大気の窓 (図 4.1) を活かし、"0.9–2.5 μ m のスペクトルを切れ目無く取得する事が出来る"、というのが SWIMS の最もユニー クな点である。

SWIMS の概観と装置仕様を図 4.2, 表 4.1 にまとめる. この装置は大きく分けて, 分 光用スリットマスクを扱うスリットマスク交換機構と, 光学系や検出器を真空・低温下に 維持するメインデュワー, そして装置を支える支持構造や周辺機器で構成される (図 4.3) ¹. 望遠鏡の完成に先立って試験観測や初期科学観測を行うために国立天文台すばる望遠

¹光学ベンチ、メインデュワーと支持構造は住友重機械工業株式会社により設計・製作された.

¹⁴³



図 4.1: 3 つの望遠鏡サイト(上: チャナントール(5,600m),中:マウナケア(4,200m),下: パラナル(2,600m))における典型的な水蒸気量を用いて大気透過率シミュレーション ATRAN (Lord 1992)で計算した近赤外線波長域の大気透過率.波長分解能は R=1000.広帯域フィルター (*J*, *H*, *K* など)の隙間となる強い大気吸収が高度が上がるとともに減っていくのが分かる.

鏡に PI 装置として取り付ける事を想定しており,現在は光学系の一部がすばる望遠鏡の 光学パラメータに合わせて最適化されている. TAO 望遠鏡に搭載する際には最低4枚の コリメータレンズを入れ替えるだけで結像性能を維持する事が出来る設計となっている.



図 4.2: 2011 年 6 月に初めて組みあげられた SWIMS



図 4.3: SWIMS の構成要素

サイズ・重量	$2m \times 2m \times 2m$,約 2.5t
観測モード	撮像, 冷却マルチスリットマスクによる多天体分光
視野 ^{<i>a</i>}	撮像: $\phi 9.'6$, 分光: $9.'6 \times 6.'0$
観測波長	0.9 – $2.5 \ \mu \mathrm{m}$
	(blue: $0.9-1.4 \ \mu m$, red: $1.4-2.5 \ \mu m$)
ピクセルスケール b	0."126 /pixel
検出器	Teledyne Technologies, Inc 社製 HAWAII-2RG
	$(2048 \times 2048 \text{ pixels}, 18 \ \mu\text{m/pixel}, 2.5 \ \mu\text{m cut-ff})$
	(blue/red 光路にそれぞれ 4 台ずつ)
フィルター	
広帯域	$Y \ (\lambda_{\rm c} = 1.02 \ \mu{\rm m}), \ J \ (1.25 \ \mu{\rm m}), \ H \ (1.64 \ \mu{\rm m}),$
	$K_{\rm s} \ (2.15 \ \mu {\rm m})$
狭帯域	$N129 \ (\Delta \lambda = 40 \text{nm}), N133 \ (34 \text{nm}), N1875 \ (20 \text{nm}),$
	N195 (40nm)
波長分解能 (スリット幅 0.''5)	blue: $\lambda/\Delta\lambda \sim 700$ –1000
	red: $\lambda/\Delta\lambda \sim 500$ –900
スリットマスク数	24 枚 (ロングスリットなど常設のものも含む)
同時分光天体数	~ 30 天体/マスク
期待される点源限界等級 [。]	
(AB 等級, 1 時間積分, S/N=5)	
撮像	$Y = 25.3, J = 24.6, H = 24.2, K_s = 24.3$
分光 $(\lambda/\Delta\lambda = 1000)$	$Y = 22.6, J = 21.7, H = 21.1, K_s = 21.3$

 a すばる望遠鏡用光学系では、撮像時 ϕ 7.'4、分光時 7.'4 × 4.'6 となる.

 b すばる望遠鏡用光学系では, 0.''096となる.

 c すばる望遠鏡搭載時は、TAO 望遠鏡と比べて口径分 ($2.5 \times \log_{10}(8.2/6.5) \sim 0.3$ 等) 深くなると予想される.

4.1.2 光学系²

SWIMS 光学系は、 *φ*9.'6 の広視野をカバーする *φ*230 mm のフィールドレンズや 2 波 長同時観測のためのダイクロイックミラーを有する全長 1.5m のレンズ光学系 (最終 F 値 4.8 となる縮小光学系) で、熱輻射を抑えるために 70K 以下まで冷却される.光学系の仕 様を表 4.2 に、光学系レイアウトを図 4.4 に示す.現在はすばる望遠鏡の光学パラメータ に最適化されているが、コリメータユニット内の 4 枚のレンズ (作業性やコストパフォー マンスを考慮するとユニット全体)を交換する事により TAO 望遠鏡用へと最適化出来る 仕様になっている (図 4.7, 4.8, 4.9).

最も大きな光学素子である入射窓は真空維持用 (Fused Silica, ϕ 254 mm) と輻射断熱 用 (Fused Silica, ϕ 238 mm) の 2 枚組構成となっている. 非球面の Fused Silica レンズ

²オプトクラフトとの共同開発

表 4.2: SWIMS 光学系仕様

	短波長側	長波長側
最適化波長	$0.9 1.5 \ \mu \text{m}$	1.4–2.5 μm
コリメータユニット	非球面の Fused Silica レンス	ズを含む7枚構成(短長共通)
カメラユニット	球面レンズ6枚構成 (F4.8)	球面レンズ6枚構成 (F4.8)
結像性能	1.2 pixel 以下	1.0 pixel 以下
(RMS スポットサイズ)		
視野歪曲	視野全域に渡り1%以下	視野全域に渡り1%以下
瞳径	直径 70mm	直径 70mm
使用温度	70K 以下	70K 以下



図 4.4: すばる望遠鏡搭載用 SWIMS 光学系レイアウト. 望遠鏡から入射して来る F12.2 の光は コリメータユニットによって平行光となり、ダイクロイックミラーで波長 1.4 µm を境に 2 光路に 分けられる. それぞれの光路に 3 層のターレット (分散素子,広帯域・狭帯域フィルター) がある. 平行光はそれぞれのカメラユニットにより集光されて最終的に検出器に再結像する. 分光観測時に は Multi Object Slit と記した望遠鏡焦点面にスリットマスク板が置かれる.

を含む7枚のレンズからなるコリメータユニットを通して、望遠鏡から入射する F12.2 の光が瞳径70mm となる平行光へ変換される.平行光中には150 mm × 120 mm のダ イクロイックミラーを設置し、反射する短波長側 (blue: 0.9–1.4 μ m) と透過する長波長 側 (red: 1.4–2.5 μ m) の2つに光路を分ける.それぞれの光路につき、分散素子用 (8ス ロット、 ϕ 120 mm)、広帯域フィルター用 (8スロット、 ϕ 120 mm)、狭帯域フィルター 用 (7スロット、 ϕ 125 mm) の3枚のターレットを設けており、狭帯域フィルター用ター

		۲	۲	۲							
	۲		٩	3	8			۲	٩		
	۲	۲	۲	۲	۲	۲			٢	٢	
۲	۲		۲	۲	•	۲		۲	۲	۲	
٢	۲	I	۲	۲	۵				٢		
	8	(٢	۲	\$				۲	۱	
		٢	۲	۲							

図 4.5: すばる望遠鏡搭載時の撮像観測の結像性能. 視野中心と ±1.'1, ±2.'2, ±3.'3 の位置での 結像状態を示している. 矩形は 1 辺が 55 μ m (3 pixel もしくは 0.''3 相当) である. 左:短波長側 (紫 = 0.9, 緑 = 1.25, 青 = 1.45 μ m, 丸は波長 1.45 μ m での Airy disk サイズ), 右:長波長側 (紫 = 1.45, 緑 = 1.8, 青 = 2.5 μ m, 丸は波長 2.5 μ m での Airy disk サイズ) を表す.

HRVELENGTH-> FIELD	0.900028	8.975888	1.458008	1.125888	1.200808	1.275888	1.358808	1.425288	1.580893	1 [HRVELENGTH-> FIELD	1.908828	1.528008	1.648008	1.764288	1.892092	2.852828	2.288808	2.352228	2.588893
0.0000, -0.0050 (DEG)	0	•	•	•	٠		۲	۲			0.0020, -0.0100 (DEG)	•	۲	۹	٩	ø	0	ø	8	•
0.0000, 0.0000 (DEC)	0		•	•	9		۲	۲	۲		0.0000, 0.0000 (DEG)	•	•	٩	Ø	Ø	0	٩	0	۲
0.0000, 0.0370 (DEG)	•	•	•	•	٠	•	٠	٠	٠		0.0000. 0.0317 (DEG)	3	•	•	ø	0	۹	0	۵	٠
0.0540, -0.0050 (DEG)	٩	•	•	•	*	٠	4	k	k		0.0540, -0.0100 (DEG)	<	×	ø	Ð	D	r	Ł	A	×
0.0540, 0.0020 (DEC)	•	•	•	•	*	*	4>	A.	*		0.0540, 0.0000 (DEC)	*	¥	ø	Ð	Ð	P	L	A	
0.0540, 0.0370 (DEC)	×	`	•	7	7	7	7	¥	۶		0.0540, 0.0317 (DEG)	÷	٠	۴	p	÷	*	•	۶	
SURFACE: IMA										١L	SURFACE: IMA									

図 4.6: すばる望遠鏡搭載時の分光観測の結像性能 (左が短波長側, 右が長波長側). 矩形は 1 辺 が 72 µm (4 pixel もしくは 0.^{''}4 相当) である. 丸は各波長での Airy disk サイズを示す.

レットは透過波長の視野位置依存性を抑えるためにカメラ系第 2 レンズのあとに挿入する. 焦点位置を変化させないために,狭帯域フィルターを用いない観測でも同じ屈折率を 持つ平行平板を使用する. 一度の観測で $0.9-2.5 \ \mu m$ 全てのスペクトルを取得できるよう にするため,分散素子 (グリズム)の波長分解能 R ($\lambda/\Delta\lambda$) は ~1000 (スリット幅 0."5 を仮定) となっている.

撮像および分光時のスポットダイアグラムを図 4.5, 4.6 に示す. どちらの観測モードに おいても blue/red 光路ともに視野全域に渡り良好な結像性能を示している.図 4.8, 4.9 に示すように, TAO 望遠鏡用にコリメータユニットを交換した光学系でも性能の劣化は 見られない.



図 4.7: TAO 望遠鏡搭載用にコリメータユニットを入れ替えた SWIMS 光学系レイアウト.

		۲						۲	۲		
	୍ଦ୍ଧ	N	્ર								
٨	୍ଦ୍ତ	8	۲	۲	S		S				
	۲	۲	٢	۲	۲	٥					
۲	٩	۹	۲	0	٩	۲					
	۲	8	8								

図 4.8: TAO 望遠鏡搭載用光学系での撮像観測の結像性能. 図の見方は図 4.5 に同じ.

4.1.3 検出器

Teledyne Technologies, Inc 社製の HgCdTe 検出器アレイ HAWAII-2RG (18 μ m/ pixel, 2048 × 2048 pixels, 2.5 μ m cut-off, Science Grade) を各光路につき 4 台並べ, 0."126 /pixel で視野 ϕ 9.'6 をカバーする設計となっている. 2011 年 7 月時点では各光路 に 2 台ずつ (視野にして 8.'6 × 4.'3) となる計 4 台を購入済みである (図 4.10) が, TAO

HRUELENDTH-> FIELD	0.900068	8.975268	1.859330	1.125880	1.280048	1.275000	1.358000	1.425880	1.5880018	Γ	UP) FIE	ELENGTH		1.400068	1.520008	1.648008	1.768220	1.890048	2.858008	2.288000	2.350000	2.580018
0.8020, -0.0050 (DEG) ⁰ .	0	•	•	9	9		8 0	6 0	۲		0.8020,	-0.0150	(DEG)	•	•	ø	0	0	o	0	٠	۲
8,0000, 8,0000 (DEG)	٥	•	•	•	•		•	6 0	۲		8.0000.	8.8868	(DEG)	•	•	٥	0	٥	0	Ð		۲
8,0000, 8,0400 (DEG)		¢.	f o	٠	•	•	•	•	•		8.0000.	0.0450	(DEG)	9	٠	-	ھ	۲	B		-	•
0.0717, -0.0080 (DEG)	8	4	4	4	Æ,	4	٤	¢.	٨		8.8717,	- 0.0150	(DEG)	4	4	.4	×	4	Ł	\$	\$	\$
0.0717, 0.0000 (DEG)	8	2	۵	۵	4	æ	۶	Å	â>		8.8717,	0.0000	(DEG)	4	۵	۵	*	Å	Ł	Ł	Ł	1
8.0717, 8.0498 (DEG)		9-	۶			۶	۶	Þ	Þ		8.8717,	0.8458	(DEG)	Å	۶	۶.	>	> -	>)÷-	١.	×
SURFACE: IMA											SURFACE	IMA										

図 4.9: TAO 望遠鏡搭載用光学系での分光観測の結像性能 (左が短波長側, 右が長波長側). 図の 見方は図 4.6 に同じ.



図 4.10: 納品された HAWAII-2RG 検出器の暗電流マップ (データシートより)

望遠鏡での観測を開始するまでに順次追加していく予定である.

検出器の制御には、Teledyne 社から提供される検出器駆動・読み出し回路 SIDECAR ASIC および JADE2 カードを用いる.

4.1.4 分光用スリットマスク交換機構³

SWIMSの多天体分光機能はすばる望遠鏡用観測装置 MOIRCS (Ichikawa et al. 2006; Suzuki et al. 2008)の分光機構をベースに設計されている.具体的には、

- 24 枚のスリットマスクを低温 (< 100K) 下で保管するためのマスクデュワー
- 任意のスリットマスクを選択するための回転部 (カルーセル)
- 選択されたスリットマスクを焦点位置まで運ぶ/マスクデュワーにしまうための直動部(マスクキャッチャー)

からなる機械系である.マスクデュワーには専用の真空ポンプと GM 冷凍機が備わっているので、メインデュワーとは独立に真空・冷却サイクルを行う事が出来る.さらに、

3株式会社センテンシアとの共同開発

表	4.3:	スリ	ッ	トマ	てス	ク	交換機構駆動系	•	監視系
---	------	----	---	----	----	---	---------	---	-----

1	駆動源	
	ステッピングモーター	マスクキャッチャー平行移動, カルーセル回転
	圧縮空気	マスクキャッチャー開閉, マスクキャッチャー回転
	センサー	
	ホール素子 IC	カルーセル回転時のマスク位置認識
		(マスクを保持するポケットに磁石を装着)
	可視光レーザー	マスクキャッチャー平行・回転移動,開閉の動作認識
	小型 CCD カメラ	デュワー内の様子を遠隔で視認するため



図 4.11: 単独試験中の SWIMS スリットマスク交換機構.図 4.2 のようにこのユニット全体 (黄 色い構造物を除く) が本体デュワーの上部に接続される.中央部が望遠鏡焦点に位置する. 左側が 直動部 (マスクキャッチャー),右側の多角形の構造がマスクデュワーで,全長はおよそ 2.4m,重 量はおよそ 370kg.

SWIMS では焦点位置に強力なネオジム磁石を配置してスリットマスクを固定し、観測 時の(装置の姿勢による)スリットマスク位置の安定性・再現性の向上を図る.図4.11, 4.12 に SWIMS スリットマスク交換機構の全体像と3D イラストを示す.表4.3 にはマ スク交換動作に用いられる駆動系・監視系についてまとめる.

分光観測におけるスリットマスク設置動作を図 4.13 に示す. カルーセルを回転させて 希望のスリットマスクを選んだ後、マスクキャッチャーにより掴み焦点面にセットする、 という流れである. スリットマスクの交換または分光観測終了時はこれと逆の順序でマス



図 4.12: スリットマスク交換機構の概観図. 24 種類のスリットマスクを保管するカルーセルを低 温下に保持するマスクデュワーと,指定したスリットマスクを取りだす/しまうための直動部(マ スクキャッチャー)から成る機械系.マスク交換動作の節目の場所にはレーザーやカメラで動作を 監視するのための小穴を設けている.ゲートバルブは,光学系・検出器を真空・低温状態に保った ままマスクデュワーのみを常温・大気圧に戻すために使用する.

クをしまう. カルーセルには 24 枚のスリットマスクを保管しておく事が出来るが, マス ク温度監視用スロットやロングスリット専用スロット (場合によっては複数のスリット 幅を用意)を除くと観測者が自由に使えるのは最大でおよそ 20 スロット程度になると予 想される. 一晩に 3-4 枚のスリットマスクを使用する場合では, およそ 5 日分をデュワー 内に貯めておける計算になる.全てのスリットマスクの観測が終わると, 新しいスリット マスクセットと入れ替える作業を行う. SWIMS では, マスクキャッチャーによるマスク の挿入方向と垂直な方向から手作業での入れ替えが出来るようになっている (図 4.14). その際, マスクデュワー内を常温・大気圧にする必要があるが, ゲートバルプを閉じる事 により, 光学系や検出器などメインデュワーには一切影響を与える事なく作業を行う事が 出来る.

広視野,特に視野端での分光の精度を向上させるために、スリットマスクホルダーは望 遠鏡の像面湾曲に沿うような曲率を持っており、スリットを切った厚さ100 µm のアルミ シートをその曲面にセットする (図 4.15).1 つのシートに切ることのできるスリット数 (つまり同時分光出来る最大天体数) はおよそ30 と見積もっている.スリットの加工は MOIRCS と同様にレーザーカッターを使用する予定である.アルミシートの着脱を容易 にするため、押さえ具 (retainer) はねじを使わずネオジム磁石でホルダーで固定される.



図 4.13: スリットマスク交換機構の基本動作.中央やや左側が望遠鏡からの光が入射してくる焦点位置で,右上(黄色い構造)が24枚のスリットマスクを冷却下で保管しているマスクデュワーである.(a)マスクキャッチャーを退避位置から焦点面上を通過させる.(b,c)マスクキャッチャーの向きを90度回転させる.(d)さらにマスクキャッチャーを進行させ,スリットマスクを掴ませる.(e)マスクを掴んだままマスクキャッチャーを戻す.(f)焦点面にスリットマスクを置き,マスクキャッチャーを退避位置まで戻す.



図 4.14: スリットマスクの取り出し・入れ替え方法. 観測中(低温時)はマスクキャッチャーに よって出し入れが行われる. 観測準備時(常温時)は(マスクデュワー内を常温・大気圧に戻して から)取りだし口を開けて新しいスリットマスクセットと手作業で入れ替える.



図 4.15: スリットマスクの構造. 望遠鏡の像面湾曲に沿った曲率を持つホルダー面上にスリット を切ったマスクシート (厚さ 100 µm) を置き,押さえ具 (retainer) で固定する.押さえ具とホル ダーは磁石で密着される.常温であるマスクキャッチャーが触れる箇所は熱伝導率の低いステンレ ス鋼を使用している (キャッチャー側の接触面には樹脂を使用).

4.1.5 開発中の機能

現在,装置本体の作業と並行して,下記の2つの要素開発を進めている.

4.1.5.1 面分光 (Integral Field Unit)

通常の (マルチ) スリット分光とは別の分光モードとして,国立天文台先端技術セン ターと進めている研究である.

スリットやマイクロシャッター(後述)を用いた通常の分光観測では,光が分散する方向には単一の開口しか開ける事が出来ない.このために天体の空間的な情報は著しく減少してしまう.一方,この面分光モードでは天体の空間情報を保持したまま分光観測を行う事が出来るために,観測効率を向上させる事が出来る.さらに,SWIMSの2波長域同時観測という特長と合わせると,既存の装置ではなし得ない波長範囲を同時に面分光する事が可能となる.

面分光には空間情報を保持するいくつかの方法があるが,我々が検討しているのはイ メージスライサー型の軽量面分光ユニットである.その原理を図 4.16 に示す (GEMINI 望遠鏡用観測装置 GNIRS の例).望遠鏡から入射した光は,焦点面に置かれた短冊状の イメージスライサミラー (S1) により視野分割される.S1 は凹面鏡となっており,分割さ れた視野からの光線は,瞳ミラー (S2) によって焦点位置に一本のスリット状に再結像さ れたのち,装置の光学系へと送られる.

現在, GEMINI/GNIRS の実績を参考に光学・機械系の検討を進めているが, SWIMS では現行のマスクキャッチャーが扱える大きさと重量以内に面分光ユニットを収める必



図 4.16: イメージスライサによる面分光の原理 (Allington-smith et al. 2006) . 望遠鏡から入 射して来る光は Slicing mirror である視野区画ごとに分割され, それらは Pupil mirror で一列に 並べ直されて装置光学系へと送られる.

要があるので、カバーする視野とのトレードオフで小型化・軽量化についても検討し、最 終的な仕様を決定する予定である.

4.1.5.2 マイクロシャッターアレイ

マルチスリットを用いた多天体分光に変わる、よりフレキシブルな分光機構として、東 京大学生産技術研究所の年吉研究室⁴と共同で進めている研究である.

これは半導体微細加工 (MEMS) 技術により 100 µm 程度の幅のシャッター (マイク ロシャッター)を敷き詰めてアレイを作り、その開閉を個別に制御する事で任意の形状の スリットパターンを作る、という手法である.これにより、これまで手作業で行われてい たマルチスリットマスクの作成や装置へのインストールが不要となり、非常に高効率で、 しかも容易に多天体分光観測を行う事が可能となる (図 4.17).

 $^{4} \rm http://toshi.iis.u-tokyo.ac.jp/toshilab/$



図 4.17: マイクロシャッターを用いたときの焦点面のイメージ. 背景の個々の長方形が 0.1 mm × 1 mm のシャッター板に相当する. 複数のシャッター板を同時に開くことによって (白抜きの長 方形), 任意の位置にある天体の分光を可能とする.



図 4.18: 東大天文センターと生産研が共同で開発しているマイクロシャッターアレイの1素子分の概念図 (左)と静電駆動のモデル図 (右)

我々のグループでは、100 μ m × 1,000 μ m のマイクロスリットを静電的に開閉を制御 する方式を考案し(図 4.18)、これまでに幾度か試作と改良を行ってきた(図 4.19).こ の方式による開閉動作は既に確認しており、現在は動作信頼性を高めるために製造プロセ スの改善を図っている.

最終的には、マイクロシャッターを 10 個並べたものをサブユニット $(0.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm})$ として、それを $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ に敷き詰めたもの (パッケージ) を焦点面に並べる予 定である.



図 4.19: 静電駆動マイクロシャッターアレイの試作品 (2010 年 9 月)

4.1.6 開発スケジュール

装置各部の設計・製作・納入は既に完了しており、今後、各機能の単独(冷却)試験や 全体の組みあげと性能試験を望遠鏡シミュレータに取り付けて行う.その後、すばる望遠 鏡での試験観測を実施する予定である.

大まかには以下のようなスケジュールになっている.

- 2011/後 検出器駆動試験,スリットマスク交換機構冷却動作試験, 光学系を除く全体冷却試験
- 2012/前 全体組みあげ、常温・低温性能試験、調整
- 2013/初 すばる望遠鏡への輸送
- 2013/後 すばる望遠鏡でのファーストライト,試験観測
- 2017 TAO 望遠鏡でのファーストライト,本観測運用

4.2 中間赤外線分光撮像装置: MIMIZUKU

4.2.1 TAO 望遠鏡の中間赤外線での特徴

地上大口径望遠鏡による熱赤外観測は、空間解像度が高いこと、また観測機会が多いこ となどといった特徴を持ち、飛翔体観測装置とは相補的な関係にある。観測天文学では高 解像度の観測は高感度の観測と並んで本質的に重要であり、熱赤外域での観測で地上望遠 鏡の果たすべき役割は非常に大きいと言える。

しかしながら、熱赤外域では大気中の分子、とくに水蒸気のラインが多数存在し、観測 の精度や感度を低下させる.これは、(i)大気中の水蒸気のラインは天体からの放射を遮 り、シグナルを低下させる、(ii)水蒸気ラインのフラックスにより背景放射量が増大し、そ の揺らぎに起因するノイズ (ポアソンノイズ)を増加させる、だけではなく、(iii)水蒸気 ラインは激しく時間変動しており、チョッピングなどを用いても落せない高周波のスカイ ノイズがノイズとして乗ってしまう、からである.このため、地上観測を精度よく行うに は水蒸気量が少ないサイトからの観測が必須となる.

TAO 望遠鏡は高山に建設されるため、熱赤外域の観測でも高い優位性を示すと考えられる. 図 4.20 は大気の吸収のモデル計算の結果である. マウナケアと比較しても、N バンド (波長 8–13 μ m) での透過率もさることながら、Q バンド (波長 16–26 μ m) での透過率が非常によい事が分かる. また、波長 28 μ m 以降には、マウナケアでは全く透過しない大気の窓が幾つか表れている.

我々は TAO 望遠鏡用の中間赤外観測装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-mode Imager for gaZing at the UnKown Universe)の開発を進めてきた.この装置は 2-38µm という広い波長範囲をカバーする装置であり、TAO 望遠鏡の持つ熱赤外域での観測ポテンシャルを最大限活かした設計となっている.また Field Stacker という 2 視野を同時に観測できるシステムを世界で初めて実用化し、赤外線の時間変動も高精度で検出できるよう工夫されている.以下、この装置の特色・仕様についてまとめる.

4.2.2 装置概要

MIMIZUKU の特徴は以下の三点に集約される.

- 熱赤外波長の 2-38µm という広い波長範囲をカバー
- 30µm 帯で1 秒角と言う世界最高の解像度を達成
- Field Stacker による観測で高精度のモニタ観測を実現

以下,各項目の詳細について述べる.



図 4.20: 大気透過率のモデル計算結果.赤が PWV=0.38mm, 青が PWV=0.91mm であり, 各々 高度 5600m, 4200m での水蒸気条件上位 10%に対応している.

4.2.2.1 広い波長範囲

MIMIZUKU 最大の特徴はその広い波長範囲にある.中でも波長 26-38µm (以後 30µm 帯と呼ぶ)は従来地上からは観測が不可能とされてきた波長域であり、世界中で現在 TAO サイトだけが観測できる波長帯である.我々は miniTAO 望遠鏡/MAX38 を用いた先行 研究によって 30µm 帯での観測の方法を確立すると同時にその有効性を実証してきた. MIMIZUKU によってより詳細な観測ができるものと期待している.

30µm 帯以外でも MIMIZUKU のカバーする波長帯には新しいデータをもたらすもの が多く含まれている. 波長 16-26µm は Q-band と呼ばれ、これまでもすばる望遠鏡など では観測が行われており、惑星系円盤などで多くの興味深い結果が得られている. しか し Q-band も大気の吸収が激しく、標高 4,200m のマウナケアでなければ良いデータは得

られていない. 翻って南半球には標高 3,000m を超える大型望遠鏡は存在せず⁵ 南天の 興味深い天体については観測があまり行われていない. TAO は南半球最初の高標高大型 望遠鏡になるので、そこでの Q-band 観測は興味深い結果をもたらすと思われる. 波長 2.5-5.5µm も状況は似通っており、良質なデータ取得が強く望まれている.

4.2.2.2 世界最高の解像度

MIMIZUKU は波長 6µm 以上の中間赤外線域で TAO 望遠鏡の主鏡回折で決まる空 間解像度を達成できる. 30µm での解像度は約1秒角になる. この空間解像度を達成で きるシステムは近未来の衛星計画を含めても TAO/MIMIZUKU 以外には存在しない⁶. 30µm 帯は星・惑星系形成や恒星進化最末期天体の観測で最重要な波長のひとつであり、 詳細な観測には高解像度の観測が欠かせない. その意味で TAO/MIMIZUKU の果たす 役割は大きいといえる.



図 4.21: 赤外線域における各プロジェクトの空間解像度

⁵南半球に存在する 6m 以上の望遠鏡は全て 3000m 以下の地点にあり、これよりも高高度に望遠鏡を建設 する計画は TAO 計画だけである. ⁶JWST の中間赤外線装置は 30µm 帯をカバーしていない

¹⁶⁰

4.2.2.3 モニタ観測を実現

近年の衛星観測によって、中間赤外波長でも様々な天体で変光が検出され始めている. 変光は直接観測がかなわないような領域の情報を含んでおり、またその時間スケールから 宇宙の化学・物理現象に大きな制限をつけられることから、今後の観測が強く望まれてい る.しかしながら衛星観測は装置寿命が短く、望遠鏡占有時間も限られているため思うよ うに観測が進められていない.

地上熱赤外線観測は長期間運用されることが多く、また望遠鏡時間も比較的フレキシブ ルであることから変光観測を進める上で重要なカギを握る.実際近赤外線までの波長で は地上望遠鏡によって精力的に変光観測が進められている.しかし中間赤外線では変光 モニタ観測は難しかった.これは中間赤外線波長では星は相対的に暗くなるため中間赤 外線カメラの限られた視野内に他の天体が入ることが極めてまれになり、近赤外線で使わ れるような視野内相対測光が不可能であったためである.

MIMIZUKU は中間赤外線波長で視野内相対測光を実現するための視野合成システム (Field Stacker)を搭載している. このシステムは望遠鏡内の 2 つの視野を可動式のピッ クアップミラーで選択,それを 1 つの検出器上に落とし込むことで,離れた 2 つ (以上) の天体を同時に観測する機構である. これによって大気変動の影響を大幅に除去するこ とができ,高精度でのモニタ観測が実現できるものと考えている. このような機構は世界 的にも例がないものであり,非常に独自性が高い観測研究が行えるものと期待できる.

4.2.3 装置の仕様

本装置の仕様を表 4.4 にまとめる.

4.2.3.1 光学系

光学系は大きく分けて4つの低温部光学系と、常温部に設置された Field Stacker ユニットからなる. ブロック図を図 4.22 に示す.

光学系は入射窓およびフィルターを除いてすべて反射系で構成されている. これは 2µm から 38µm という広い波長範囲で使用するためである. また Field Stacker を用いるため, 視野は 2arcmin 程度を確保する必要がある.

MIMIZUKU ではこのような光学系を軸外し共焦点非球面鏡で実現している. これは Chang らが 2006 年に提唱した光学系解であり, 焦点を共有する 2 つの非球面である幾 何学的な関係が成り立つときに広い範囲で良好な像が得られる, という性質を利用してい

OVERVIEW		
観測波長域	$238\mu\text{m}$	3 チャンネル
観測モード	バンドパスフィルターによる撮像	
	ロングスリット低分散分光 (R~200)	
サイズ	2m x 2m x 2m 約 2.3ton	
MIR-S Channel		
観測波長	$6-26~\mu{ m m}$	
検出器	Si:As 1024x1024 AQUARIUS	Ravtheon 社製
Pixel Scale	0.11"/pix	
Field of View	2arcmin x 2arcmin	w/o Field Stacker
	$1 \operatorname{arcmin} x \operatorname{2arcmin} x 2$	w/ Field Stacker
撮像フィルター	N-band filters ($\Delta \lambda \sim 1 \mu m$)	
	Q-band filters $(\Delta \lambda \sim 2 \mu m)$	
分光モード	N-band : 7.5-13.5 μ m, R~230	w/ Ge-grism
	Q-band : $16.5 - 25.5 \mu m$, $R \sim 160$	w/ Si-grism
スリット	0.3" or 0.6 " (length 60")	
Sensitivity (1sig1sec)	50m.Jv	$10\mu m$ imaging
	130mJv	$20\mu \text{m}$ imaging
	250mJv	N-band spectroscopy
	650mJy	Q-band spectroscopy
MIR-L Channel	00011055	ę sana spectroscopy
<u>観測波長</u>	$24 - 38 \ \mu m$	
給出器	Si Sh 128×128	or Si·Sb 1024x1024
	51.55 120X120	(optional)
Pixel Scale	0.44" /pix	(optional)
Field of View	56" x 56"	w/o Field Stacker
I left of view	28" x 56" x 2	w/ Field Stacker
撮像フィルター	bandpass filters $(\Lambda) \sim 3\mu m$	mesh filters
山家 ノイルノ 分光モード	$26 = 38 \ \mu m B \approx 60$	optional
	1.2° (length 50")	optional
Sonsitivity (1sig1soc)	200 mJy	30 um imaging
Scholding (151g15cc)	400m Jy	38µm imaging
	800m Jy	30µm spectroscopy
NIR Channel	otomsy	John spectroscopy
相测波星	$2 - 5.6 \ \mu m$	
航 <u>制</u> 版区 检出哭	InSb 1024 \times 1024 Alladin II	Baytheon 社 劃
Pivel Scale	0.11"/pix	nay meon 12 ac
Field of View	2arcmin x 2arcmin	w/o Field Stacker
	1arcmin x 2arcmin x2	w/ Field Stacker
撮像フィルター	K Ldash Mdash	IH and narrowband
	ix, Euasii, iviuasii	filtors (option)
分光モード	$28 - 5.6 \mu m B_{24}$ 180	mers (opion)
	$2.0 0.0\mu \text{mm} \text{ for } 100$	
	SHE 0.5 X 00	

表 4.4: TAO 望遠鏡用中間赤外装置 MIMIZUKU 仕様



図 4.22: MIMIZUKU の光学系ブロック図



図 4.23: MIMIZUKU 低温光学系 3 次元イラスト

る. MIMIZUKU では低温光学系の Fore-opt, MIR-S, MIR-L, NIR の各々のチャンネ ルで 2 組ずつ, 計 8 組 1 6 枚の非球面鏡によって光学系が構成されている.

このような非球面鏡で構成された光学系は一般に製作・調整が困難である.特に軸外



図 4.24: MIMIZUKU 低温光学系

し量が大きい鏡は通常の旋盤では製作することができない.そのため MIMIZUKU では 軸外し量が非常に大きい鏡についてはスローツールサーボを用いて製作を行った.また 調整には光学系全体がすっぽり入るような大型三次元測定器を用い,これとレーザーを組 み合わせて高精度かつ高効率な調整を実現した.結果常温状態で十分な光学性能を達成 することを可視光を用いた実験で確認済みである.

MIMIZUKU は次節に述べる Field Stacker を搭載しており、ピックアップミラーの位 置によって望遠鏡に対する装置の入射光方向が違ってくる.光学性能的にはこれは軸傾 きの収差を生むことになる.これを軽減するため、MIMIZUKU のピックアップミラーは 平面ではなく4次のポリノミナル面を採用している.ピックアップミラーが外側に行く と軸に対する傾きが大きくなるが、ポリノミナル面は焦点位置(視野中心にある)から離 れるため、ミラーのパワーが増す.一方ピックアップミラーが軸ずれの小さい内側に来る と焦点に近づくため、ミラーのパワーは落ちる.これを利用して異なる軸傾きでも良好な スポットが得られるよう工夫をした.結果、TAO 望遠鏡視野 25arcmin 全域で 10µm でのストレール比 >0.82 (24arcmin なら >0.9)という良好な性能を持つ光学系を構 成することに成功している.



図 4.25: 調整を終えた MIMIZUKU 低温光学系

4.2.3.2 Field Stacker

MIMIZUKU の重要な機能の一つが、変光などのモニタ観測精度を向上させる二視野同時観測機能であり、これを実現するための機構が Field Stacker ユニットである. ユニットの概念図 4.26 に示す.

ユニットは2つのピックアップミラーと1つの視野合成 形鏡から成っている. ピッ クアップミラーは1軸ステージの上に乗っており,さらにそれが回転式のテーブルの上に 搭載されている. これによって2つの離れた視野を視野合成 鏡に集め,さらに低温光学 系へと導く. 望遠鏡焦点を 鏡下端にあわせることで,視野のつなぎ目をできるだけ小さ くしている. またピックアップ鏡はそれ自身の傾きを変えることができ,光軸が常に望遠 鏡副鏡中心を見るように制御されている. これらユニットは MIMIZUKU の真空チャン バー上面に設置されている. ほこりよけカバーを外した状態の内部写真を図 4.27 に示す.

なお、視野合成 鏡は電動で光路から退避させることも可能である. その場合は Field Stacker は用いられず、通常のカメラとして機能させることができる.

4.2.3.3 冷却チョッパー

地球大気や望遠鏡からの熱赤外背景放射は不規則に時間変動し,中間赤外線観測の測定 精度に大きな影響を与える.地上中間赤外線観測では,この大気放射の変動を計測,除去



図 4.26: MIMIZUKU 視野合成 Filed Stacker ユニット概念図



図 4.27: MIMIZUKU 視野合成 Filed Stacker ユニット写真

するために、頻繁に視野の切替えをするチョッピングと呼ばれる観測手法をとる. 高精度 の観測を行うには、数 Hz の周波数で天空上の ~1'離れた間を交互に観測 (チョップ) す る必要がある. これまでのチョッピング観測は、望遠鏡の副鏡を振ることによって実現さ れてきた. しかし、近年の望遠鏡の大型化に伴い副鏡を高速・高精度に振動させるのが困 難になりつつある. 特に補償光学 (AO) 副鏡を採用する場合にはチョッピング副鏡との 共存は難しい. そこで MIMIZUKU では低温で駆動するチョッピングユニットを低温光

表 4.5: 冷却チョッパー仕様

	MIMIZUKU 用	MAX38 用
チョッピング幅	max 30 arcsec 以上	max 50 arcsec
周波数	up to 6Hz	up to 6Hz
軸数	2 軸	1 軸
位置安定性	<< 1pix	<< 1pix
アクチュエータ	低温ピエゾ素子	低温ピエゾ素子
センサー	TBD	ギャップセンサー
ステータス	開発中	観測運用中



図 4.28: MAX38 で用いられている冷却チョッパーの写真

学系 Fore-opt 部に搭載することを考えている.

低温下で駆動するチョッピングユニットについては TAO 中間赤外線グループで開発 を進めてきており、1 軸駆動のものは mini-TAO 用中間赤外線装置 MAX38 にも実装さ れている. MIMIZUKU ではこれを 2 軸に拡張したユニットを搭載したいと考えている. MIMIZUKU 冷却チョッパーの諸源を表 4.5 に示す.

4.2.3.4 真空冷却系

MIMIZUKU は最長で 38 µm の波長までカバーする装置であり,検出器 (Si:Sb) 自身 は 40µm まで感度を持つ.これらの波長域で光学系からの背景熱放射を十分下げるため に、本装置は入射窓以降の全光学要素を 20 K まで冷却する.冷却には 4K1W の機械式 GM 冷凍機を 2 台用いる.冷却時には補助冷媒として液体窒素を用いており、24 時間程 度で冷却が完了する.



図 4.29: MIMIZUKU 真空冷却系 イラストと写真

MIMIZUKU には低温光学系内にピント調整機構が無いため、装置側からの焦点位置 はチャンバーに対して固定されている.一方 Field Stacker はピックアップミラーの位置 によって光路長が変わるため、そのままではピントを合わせることができない.この光路 差を補正するため、MIMIZUKU は低温光学系全体を上下に駆動させるシステムを採用し ている.駆動にはパワーシリンダーを用いた.ストロークは 120mm、位置精度は 0.1mm である.ボールねじを用いたシステムの為、停電などのトラブル時でも装置が落下するよ うなことはない.

真空冷却系の概要イラストとその写真を図 4.29 に示す.

4.2.3.5 低温機械駆動系

多彩な観測モードを実現するため, MIMIZUKU では低温部に幾つかの機械駆動系を 設置する. これらはすべて低温モータによって駆動される. 表 4.6 に低温機械駆動部の一 覧を示す.

4.2.3.6 検出器

MIMIZUKU は各チャンネルに大型アレイ検出器を1つづつ,計3つの検出器を搭載した装置である.

表 4.6: MIMIZUKU 低温機械駆動系一覧

光軸調整ユニット	光軸調整用のユニット	2 軸
Slit ユニット	スリットを交換するためのホイール スリット数 x7	1 軸
光線切替ユニット	光線を MIR-S と MIR-L で切り替えるユニット	1 軸
MIR-S フィルターユニット	MIR-S 用のフィルターホイール 7 穴 x2	2 軸
MIR-L フィルターユニット	MIR-L 用のフィルターホイール 9 穴 x1	1 軸
NIR フィルターユニット	NIR 用のフィルターホイール 9 穴 x2	2 軸
瞳レンズユニット	瞳撮像系用のレンズユニット	1 軸

主力チャンネルである MIR-S チャンネルには, Raytheon 社の 1024x1024 Si:As BIB 検出器 AQUARIUS を用いる. これは 2011 年現在最新最大の中間赤外用検出器であり, すばる望遠鏡用装置 COMICS 搭載の検出器 (320x240) に比べ 10 倍以上のピクセル数 を持つ. このピクセル数のおかけで 2 視野を合成した観測でも, 各視野十分な視野を確保 することができる.

NIR チャンネルには同じく 1024x1024pix を有する AladdinII 検出器を用いる. これ はすばる第一期装置で用いられていたものであり,最新検出器と比べほぼそん色ない性能 を有している. InSb 検出器を用いることで SWIMS の観測波長と中間赤外線の間である 3-5µm 帯を高感度で観測する.

MIR-L チャンネルの検出器についても、1024x1024 フォーマット Si:Sb 検出器を検討 している.しかしながらこのような大フォーマットの検出器は Si:Sb ではまだ完成した ものは無く、現在メーカーにて開発が進められている状態である.今後も入手に努力する 一方、既に入手・実用化している 128x128 Si:Sb 検出器をバックアップとして計画を進 めている.

表 4.7 に検出器の諸源をまとめておく.

	MIR-S	NIR	MI	R-L
名称	Aquarius	AladdinII	-	—
Type	Si:As BIB	InSb	Si:Sł	b BIB
Format	1024 x 1024	1024x1024	128x128	1024x1024
Pixel Size	30mum	$27 \mu \mathrm{m}$	$75 \mu m$	$(30\mu m?)$
Pixel Scale	0.11"/pix	0.10"/pix	0.44"/pix	0.18"/pix
Well	1e7 e-	1e5 e-	1e7 e-	?
Temperature	$7 \mathrm{K}$	50K	5K	5K
Manifactured by	Raytheon	Raytheon	DRS	DRS

表 4.7: MIMIZUKU 検出器諸源

4.2.3.7 電気回路部

地上望遠鏡における中間赤外線観測では背景光によるサチュレーションを避けるため 検出器を高速で駆動・読み出しすることが必須となる. MIMIZUKU MIR-S チャンネル の場合は 1024x1024pix を <10msec で読みだす事になり, リセットレベル測定も考慮す ると 64ch で 1pix を 0.3µsec で読みだす必要がある.

このような高速駆動を必要とする一方, MIMIZUKU は真空チャンバーが巨大 (~1m) であり低温部の検出器と常温部の駆動・読み出し回路の間のケーブル長は数 m にもなる. ケーブル長が長くなるとその浮遊容量によって高周波の信号が伝わらなくなるため, その ままでは上で述べたような高速な駆動・読み出しは不可能となる.そこで MIMIZUKU では低温 (7K)の検出器と常温回路の間の低温部分 (20K) にバッファ回路を設置する. 低温でのバッファ回路は主に衛星などを対象に研究が進められているが, このように多 チャンネルのものはほとんど例がない. 我々は市販の GaAs FET を低温駆動することで これを安価に実現したいと考えている.

また高速での検出器読み出しは膨大な量のデータを発生する. MIMIZUKU で発生す るデータを全て保存すると、1 時間あたりのデータレートは 150Gbyte、一晩の観測で 1 Tbyte のデータが発生することになる. これは 1 装置が扱う量としては莫大である. こ れを回避するため MIMIZUKU ではデータの演算処理をリアルタイムで実行する. これ によってデータを 1/10 から 1/100 程度まで減少させる.

電気回路, とくにアナログ系電気回路については, MAX38 や ANIR, 木曽観測所新広 視野カメラ KWFC などで十分実績のある回路を改良して用いる. デジタル部分について も MAX38 などで採用した Linux+市販 IO ボードの組み合わせで対応する予定である.

4.2.4 その他新規技術

4.2.4.1 メッシュフィルター

中間赤外線装置開発で最大の問題のひとつは波長選択フィルターである. 科学観測に は正確精密な波長選択が欠かせないが,従来の多層膜コーティング法では中間赤外線波 長,特に 30µm 帯では,思い通りの波長選択を行うフィルターは製作できない. これは, この波長で透明な物質が非常に限られたものしかなく屈折率の選択肢が狭いこと,さらに 低温で使用するため熱収縮の影響も考えねばならず,張り合わせ物質の組み合わせパター ンがさらに限られていること,という原理的な問題に起因している. この状況を打破する には,別の物理に基づいたフィルター開発が必須である.

我々のグループでは 2006 年度より干渉膜多層コーティングとは原理が全く異なる「メ タルメッシュフィルター」の開発研究を進めてきた.メタルメッシュフィルターとは金属



図 4.30: 30µm 用メッシュフィルター (金膜自立型) の写真



図 4.31: 30µm 用メッシュフィルター (金膜自立型)の透過率特性.4 枚重ねでの性能

格子の光干渉や金属表面プラズモン・ポラリトン効果を用いて選択的な波長透過特性を 実現したものである.第一世代メッシュフィルターとして、金厚膜(厚さ約2ミクロン) で自立するメッシュフィルターの設計・製作を行った.単波長側のリークを実用レベル まで抑えるため、膜は1mm 程度話して非平行に4枚重ねて利用することとした.結果、 31µm、37µm に透過ピークをもつ R~10 程度のフィルターを作ることに成功した.4枚 を重ねた透過率(ピーク値)は各々80%、55%と良好な性能を有している.このフィル ターはminiTAO 用中間赤外線カメラ MAX38 に搭載し、観測に使用している.

このように自立金膜によるメッシュフィルターは良好な性能を達成しているが、膜自 身の強度が弱く、大型化が難しいという問題があった。そこで現在は第二世代のメッシュ フィルターとして高強度のフィルター開発に取り組んでいる。例えばSiC あるいはSiN メンブレンによって格子構造を構成し、その表面に金を付着させたフィルターは、金膜よ りも強度を向上させながら、金膜フィルターと同様の波長透過特性を示すことが明らかと なっている。このようなフィルターは MIMIZUKU のみならず SPICA や TMT など将

来の大型装置でも不可欠なものであり、開発を続けていきたいと考える.

4.2.4.2 モスアイ

シリコンは長波長まで吸収がほどんとなく、また加工性にも優れているので、中間赤外 線波長で透過光学部品を製作するのにもっとも有望な材料である.しかしながらシリコ ンは屈折率が高く (3.42)、反射ロスが非常に大きい.例えば平行平板を透過するとその反 射量は 46%にも達する.微小な光を捕えるためには、反射防止を実現することが必須と なる.しかしながら前節でも述べた通りこの波長で干渉膜を実現するのは技術的に非常 に難しい.

これに代わる反射防止技術として我々はモスアイとよばれる構造の開発を進めている. モスアイは波長の半分程度の突起を表面に構成することで屈折率の階段的変化を無くし, 反射を抑える技術である.モスアイは可視光など短波長の光に対しては実用化が進んで いるが,我々がターゲットとする 30µm 帯用としては高さが高い突起が必要であり,新規 開発を行わねばならない.

我々は 2009 年から中間赤外線用モスアイの開発を行っている. 2011 年までの研究で 平面上にモスアイを構成する方法を確立,実際に一面あたりの反射率を 2%程度まで減ら すことにも成功している.また電磁界シミュレーションによって反射が残ってしまう原 因についても明らかにした.さらに平面ではなく曲面あるいは階段面にモスアイを構成 する方法についても検討,試作が進んでいる.

30µm 帯におけるモスアイ技術が確立すれば、MIMIZUKU 光学系のうち MIR-L チャ



図 4.32: 30µ に対応したモスアイの写真

ンネルの一部をモスアイ付レンズを用いた透過光学系に交換することも可能である.透 過光学系は現在の反射系による設計よりも視野が広く取れるので, MIR-L チャンネルを 1024x1024 アレイに変更する際に威力を発揮する.また, 階段面にモスアイを作ることが できれば, モスアイ付のグリズムも実現できる.このような高効率のシリコングリズムは 30µm 帯のみならず, 20µm 帯観測でも非常に有用なものである.このほかにもモスアイ は非常に広い波長でのアプリケーションが考えうる技術であり, 今後も開発を進めていき たい.

4.2.5 開発スケジュール

MIMIZUKU の設計・製作・納入は 2011 年 8 月現在で既に完了しており,今後,各種 機能試験や全体の組みあげを行う。また望遠鏡搭載時の性能は望遠鏡シミュレータに取 り付けて試験を実施する.その後,すばる望遠鏡での試験観測を実施する予定である. 大まかなスケジュールは以下の通りである.

2011/後 検出器駆動部製作, 遮光部改良

光学系・低温光学系冷却動作試験。

- 2012/前 全体組みあげ、常温・低温性能試験、調整
- 2013/初 すばる望遠鏡への輸送
- 2013/後 すばる望遠鏡でのファーストライト,試験観測
- 2017 TAO 望遠鏡でのファーストライト, 本観測運用



図 2: アタカマ高原より望むチャナントール山と TAO アクセス道路 (TAO ロード).

関連図書

Allington-Smith J. R., Content R., Dubbeldam C. M., Robertson D. J., & Preuss W. 2006, MNRAS, 371, 380

Ichikawa T., et al. 2006, Proc. SPIE, 6269, 38

Lord S. D., 1992, NASA Technical Memorandum 103957

Suzuki R., et al. 2008, PASJ, 60, 1347



図 3: TAO アクセス道路 (TAO ロード) の写真.