

第3章 望遠鏡

3.1 望遠鏡の基本デザイン

3.1.1 背景

現在、稼働中の 6m 超級の光赤外望遠鏡は 16 台もあり¹、計画中のものも含めるとその数は約 20 台にもなる。また米国では有効口径 20m を超える光赤外望遠鏡計画が 2010 年代後半の運用開始を目指して進行中であり、2020 年代には 50–100m 級の光赤外望遠鏡の建設計画も検討されている。20 世紀は 8–10m 光赤外望遠鏡の出現で幕を閉じたが望遠鏡革命は依然進行中であり、21 世紀初頭は望遠鏡の大型化・高性能化が加速されるであろう。こうした時代に小口径望遠鏡を建設しても、研究課題を絞った専用望遠鏡でない限り世界最先端の教育と研究を遂行することは難しいであろう。そこで我々は、現代天文学の広い分野にわたって最先端の教育研究を推進できる口径の望遠鏡は MMT や Magellan 望遠鏡クラスの口径 6.5m であろうと判断した。とくに Magellan 2 望遠鏡はドームを含めた建設費用が約 30M 米ドルと、Gemini など 8m 級望遠鏡の費用 (100M 米ドル) に比べてかなり割安である。いっぽうで Magellan 望遠鏡の構造は極力単純化されており、小グループでも建設・運用が可能であると考えられる。そこで我々は Magellan 望遠鏡の考えかたを参考に、口径 6.5m 望遠鏡を地上望遠鏡として世界最高標高の地に設置することで、赤外線感度では世界最高性能の望遠鏡を建設することを企図した。

3.1.2 TAO 望遠鏡の特徴

TAO 望遠鏡の最大の特徴は標高 5,640m で運用されることにある。この標高を最大限に活かしつつ効率的に観測を遂行するため、TAO 望遠鏡は以下の三点を特徴としている。

- 赤外線性能の追求

TAO 望遠鏡を建設する標高 5640m のチャナントール山頂は大気の水蒸気量が極めて小さく赤外線波長域における大気透過率が著しく向上する。この建設サイトの

¹すばる, Keck (×2), Gemini (×2), VLT (×4), Magellan (×2), MMT, GTC, LBT, HET, SALT

特長を最大限に活かすため、TAO 望遠鏡は赤外線観測に最適化したシステムを追求する。具体的には光学系瞳を副鏡に置くような光学解を採用し、また構造物からの放射を最小限に抑えるように各所に反射ミラーを設置する。主鏡・副鏡の反射面には赤外線波長域で反射率が高い銀コートの採用を検討している。

- 運用・メンテナンスへの配慮

標高 5640m では大気圧は海水面のおよそ半分となり、このような低酸素環境では人間の作業効率は大きく低下し、作業安全にも特別な注意を払う必要がある。このような状況では運用に必要な人的資源をできるだけ少なくするべきである。このため TAO 望遠鏡は概念設計の段階から運用・メンテナンスを極力容易にする望遠鏡を目指している。具体的には観測装置は望遠鏡の各焦点面を占有し観測目的に応じた副鏡あるいは観測装置の取り付け・取り外し作業を行わない、簡便なあるいは自動化した機器を用いてメンテナンス性を向上する、山頂にオペレータが滞在して観測を行うのではなく原則的に山麓施設などからの遠隔制御で観測を遂行する、などである。

- 経済性

TAO 望遠鏡は東京大学を中心とした小グループで進められている計画であり、予算規模も国立天文台が運営するすばる望遠鏡などと比べると非常に小さい。限られた予算のなかで最大の成果を挙げるため、TAO 望遠鏡では必ずしも多機能さを追求せずコストパフォーマンスの高いシステムを目指す。また光学系については最終 F 値をすばる望遠鏡と同じくし、互いの観測装置を交換して運用できるようなシステムを考えている。

表 3.1: TAO 望遠鏡の仕様概要

パラメータ	値	備考
サイト標高	5,640m	
主鏡口径	6,500mm	主鏡外径 (直径)
光学系	Ritchey-Chretien	
最終 F 値	12.2	
視野	ϕ 25 arcmin	
架台形式	経緯台	
焦点面	カセグレン, ナスミス $\times 2$	
望遠鏡高さ	約 17m	方位軸回転面から
望遠鏡重量	約 140t	ピラー, 基礎を除く

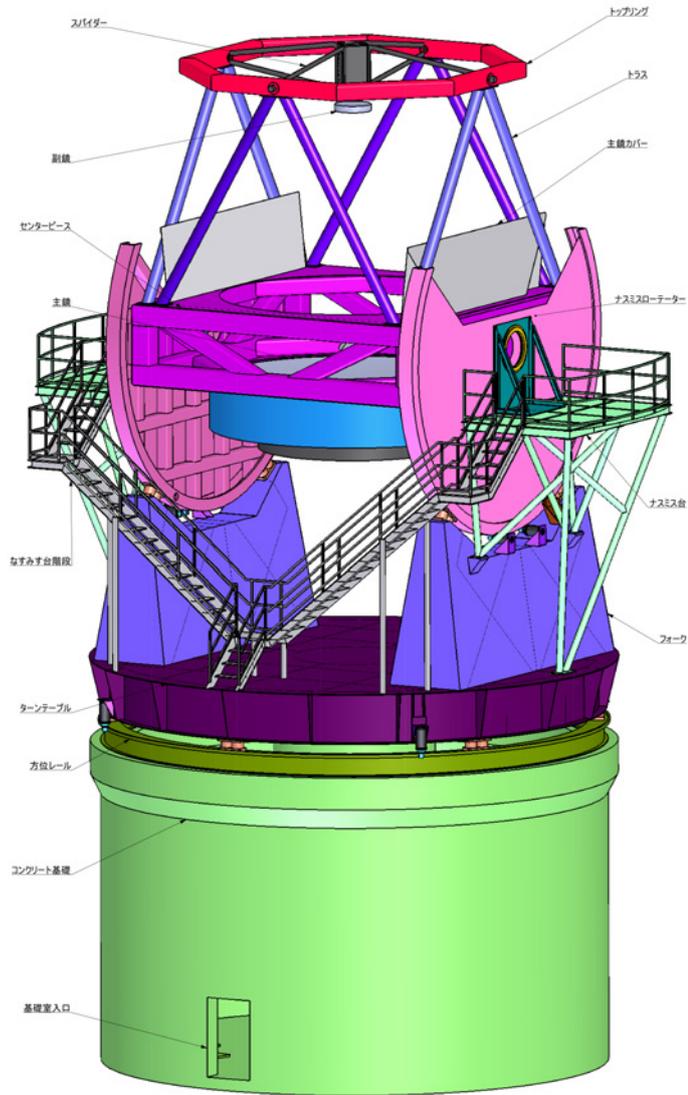


図 3.1: TAO 望遠鏡外観 (ソリッドモデル)

3.1.3 望遠鏡の概要

以上を基本方針として TAO 望遠鏡の概念設計を進めている。望遠鏡の外観を図 3.1 に示し、主な仕様を表 3.1 にまとめる。以降の章では TAO 望遠鏡の光学系、機械系などについてより詳細に説明する。

3.2 望遠鏡光学系

3.2.1 光学系概要

TAO 望遠鏡は赤外線性能を追求し、かつシンプルなデザインとなっている。TAO 望遠鏡の光学パラメータを表 3.2 にまとめ、光学レイアウトを図 3.2 に示す。望遠鏡光学系としてはリッチクレティエン系を採用し、コマ収差の無い広い視野を実現する。光学系瞳を副鏡に置くように主鏡に対してやや小さい副鏡（アンダーサイズ副鏡）を採用し、すべての観測装置において同一の副鏡を使用する。最終 F 値はすばる望遠鏡と同じ 12.20 を採用しており、同じ観測装置をすばる望遠鏡と TAO 望遠鏡の両方で運用することが可能となっている。これは観測装置開発の点でも完成し観測装置の有効利用の点でも大きな利益をもたらす。

表 3.2: TAO 望遠鏡光学パラメータ

	パラメータ	値	備考
光学系	タイプ	Cassegrain w/ Ritchey-Chretien	
	最終 F 値	12.20	
	合成焦点距離	75,074 mm	
	プレートスケール	2.7475 arcsec/mm	1 arcsec = 364 μ m
	視野	ϕ 25 arcmin	
主鏡	外径	6,500mm	
	有効開口径	6,480mm	
	曲率半径	16,256mm	凹面
	コニック定数	-1.00400	
	有効口径	6,153.6mm	
副鏡	外径	897mm	
	有効開口径	897mm	
	曲率半径	2,657mm	凸面
	コニック係数	-1.58331	
主鏡副鏡間距離		6,943.2mm	
バックフォーカス		4,000mm	

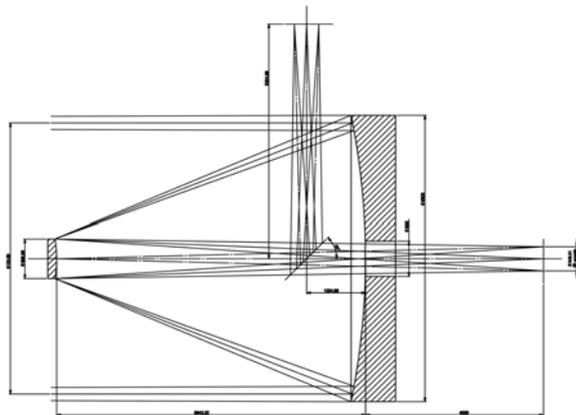


図 3.2: TAO 望遠鏡光学系レイアウト

3.2.2 主鏡

TAO 望遠鏡の主鏡にはボロシリケート (オハラ社 BSC ガラス) のハニカム軽量鏡を用いる。これはアリゾナ大学 Mirror Lab. で開発されたもので、自重を支えるのに十分な厚み (外周厚み 71cm, 内周厚み 39cm) を持ちながら、ハニカム構造によって重量を極限まで減らされている (約 8t)。同型の Magellan 望遠鏡主鏡 (口径 6.5m) の写真を図 3.3 に示す。能動支持の技術によって主鏡面形状が制御されるが自重変形が小さいため、薄メニスカス鏡の制御のような大出力高精度のアクチュエータを必要としない (図 3.3)。またハニカム内の空間を換気することで主鏡温度の制御を比較的容易に行える。これによって主鏡と周囲の大気との温度差によって生じる主鏡表面上の乱流を抑制し、望遠鏡結像性能 (いわゆるミラーシーイング) を向上させるのに有効である。主鏡 F 値は 1.25 と非常に速く、望遠鏡鏡筒を短くし望遠鏡・ドームをコンパクトに納めることに貢献する。このような速い F 値の望遠鏡を実現するため、回転するテーブルの上で鏡材を成形する方法 (spin cast 法) によって主鏡は製作されている。

同種のミラーはこれまで MMT 望遠鏡 (口径 6.5m)、Magellan 望遠鏡 (口径 6.5m×2 台)、LBT (口径 8.4m×2 台) などで用いられており、次世代の Giant Magellan Telescope でも採用されずでにその 1 枚目の鏡の成形が完了している。TAO 望遠鏡の主鏡パラメータは基本的には Magellan 2 望遠鏡のものを踏襲しており、焦点距離などは完全に同じ値を採用している。このため主鏡制作時の検査機器は Magellan 2 望遠鏡主鏡用のものが使えるようになり、製作費用を下げる事が可能となる。

TAO 望遠鏡の主鏡のパラメータを表 3.3 に示す。

表 3.3: TAO 望遠鏡主鏡パラメータ

パラメータ	値	備考	
物理パラメータ	直径	6,500mm	
	厚み	外周 710mm / 内周 390mm	
	カセグレン穴径	φ850mm	
	材質	オハラ社 E6 BSC ガラス	
	重量	約 8t	
光学パラメータ	有効開口径	6,480mm	
	曲率半径	16,256mm	凹面, Magellan2 と共通
	コニック定数	-1.00400	
	焦点距離	8,128mm	Magellan2 と共通
	F 値	1.25	
	有効口径	6,153.6mm	
鏡面形状制御	反射面	TBD	銀コートを検討中
	形式	アクチュエータによる能動支持	
	アクチュエータ数	104 個	



図 3.3: TAO 望遠鏡主鏡と同型の Magellan 2 望遠鏡主鏡 (口径 6.5m)



図 3.4: TAO 望遠鏡主鏡と同型の MMT 望遠鏡主鏡の鏡面制御アクチュエータ

3.2.3 副鏡

TAO 望遠鏡では赤外観測性能を高めるため赤外線観測に最適化した副鏡を用いる。光学系瞳を副鏡に置くように主鏡に対してやや小さい副鏡 (外径 $\phi 897\text{mm}$) を採用する (主鏡面でのビーム径すなわち有効口径は $\phi 6,153.6\text{mm}$)。また主鏡カセグレン穴やナスミス穴からの黒体放射が観測装置に指向しないよう副鏡中心部に対策を施す。いっぽう背景放射が極めて大きい中間赤外線波長域での観測では通常、副鏡を短いタイムスケールで振動させてビームを振りながら (副鏡チョッピング) 検出器読み出しと同期させて観測を行うが、TAO 望遠鏡の中間観測赤外線観測装置は装置内にチョッピング機構を持つため、副鏡チョッピング装置を採用せず副鏡駆動機構の簡素化をはかる。この副鏡はすべての観測装置で共通に使用し、観測モード変更による副鏡交換は行わない。これによって副鏡支持構造の簡素化、運用の負担を低減する。

TAO 望遠鏡の立ち上げ時および初期運用においては古典的な固定副鏡を用いる予定であるが、将来的には可変副鏡を採用し補償光学を実現することを計画している。これはアリゾナ大学とアルチェトリ天文台が共同で開発しているもので、薄い (厚さ 2mm) 鏡をボイスコイルで高速に変形させ、自由な形状を実現できる鏡である。通常、補償光学を構成する光学系には 5-6 枚の鏡が必要となり、なおかつ冷却も難しいため赤外線での観測では背景雑音の増加の要因となる。ところが可変副鏡を使うことで望遠鏡・観測装置に追加する光学部品を必要とせずに補償光学を実現することができ、特に熱赤外線での感度の高い補償光学の実現に威力を発揮する。実際 MMT では可変副鏡補償光学システムが

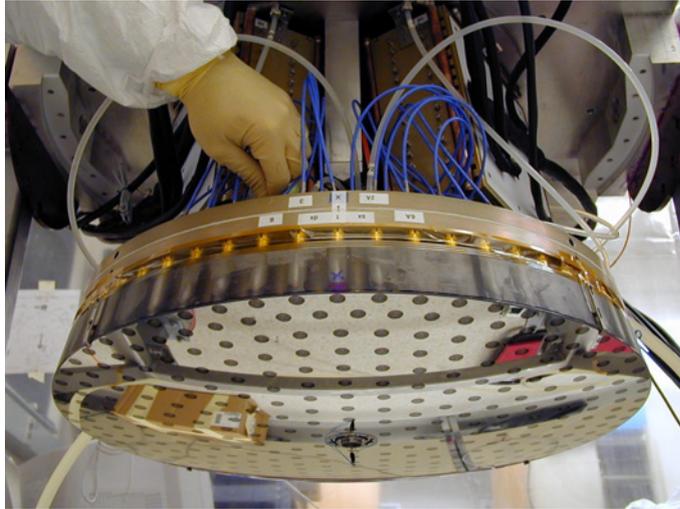


図 3.5: MMT に搭載されている可変副鏡. 直径は TAO 望遠鏡用のものより少し小さい ($\phi 640\text{mm}$)

搭載され, 中間赤外線の観測において回折限界に近い高いストレール比の星像が得られ, 8m クラスの望遠鏡を上回るような実効空間分解能を実現している. また広視野補償光学系に関しても, 可変型副鏡の共役点は地表付近にあるので, 上空の擾乱層の高度を共役点とする可変鏡を追加するだけでよいという利点もある.

TAO 望遠鏡の副鏡のパラメータを表 3.4 に示す.

表 3.4: TAO 望遠鏡副鏡パラメータ

パラメータ	値	備考	
物理パラメータ	直径	897mm	
	厚み	TBD	
	重量	TBD	
光学パラメータ	有効開口径	897mm	
	曲率半径	2,657mm	凸面
	コニック定数	-1.58331	
可変副鏡	反射面	TBD	銀コートを検討中
	形式	ボイスコイルによる能動支持	アップグレード
	アクチュエータ数	600 個	TBD

3.3 望遠鏡本体

3.3.1 望遠鏡本体概要

TAO 望遠鏡の構造は Magellan 望遠鏡を参考に、TAO 望遠鏡の仕様に合わせて概念設計を進めている。望遠鏡の外観を図 3.1 に示した。

TAO 望遠鏡は架台に経緯台を採用し、1つのカセグレン焦点と2つのナスミス焦点をもつ。カセグレン焦点は望遠鏡の熱放射の影響を極力低減させたい中間赤外線観測装置 (MIMIZUKU) 用のポートである。ここには大きさ 2m 立方、重量 2t までの装置が搭載できる。ナスミス焦点の1つは近赤外線観測装置 (SWIMS) 用のポートとし、もう1つを将来の可視光観測装置あるいはビジター観測装置のポートとして運用する。ここには大きさ 2m×2m×3m、重量 2.5t までの装置が搭載できる。カセグレン焦点とナスミス焦点の切り替えは主鏡直上に設置された第3鏡の回転と待避あるいは抜き差しで行う。

いずれの焦点にも望遠鏡追尾によって生じる像回転を補償する Instrument Rotator が設置される。またオフセット星を用いたシャックハルトマン式波面センサーも設置され、これを主鏡アクチュエータの制御に反映させることで常に理想的な主鏡鏡面形状で観測を行うことを可能にする。ここにはまた、オフセット星を用いたガイドシステムも設置する。

3.3.2 環境条件

TAO 望遠鏡の設置されるチャナントール山頂の環境を表 3.5 にまとめる。表に示したように気温・気圧が低いほか風速が速いことが特徴的である。さらに miniTAO 望遠鏡の運用から周囲の砂漠から（硫黄を含んだ）細かい砂塵が大量に飛散してくることがわかっており、その対策を考慮する必要もある。TAO 望遠鏡はこの環境下で運用して十分な観測時間を確保するため、環境条件に対して表 3.6 のような仕様を定める。

表 3.5: TAO 望遠鏡サイト環境条件

パラメータ	値	備考
気温 日中	0–10	
夜間	–15–0	
風速 平均	5–10m/s	風車型風速計による
瞬間最大	>15m/s	
気圧	0.5 気圧	
地震 最大加速度	0.25G	

表 3.6: TAO 望遠鏡耐環境仕様

パラメータ	Operating	Surviving	備考
気温 屋外	-9-27	-18-38	
風速 屋外	20m/s	—	最大瞬間
望遠鏡表面	6m/s	20m/s	
湿度	95%	100%	
地震	0.4G 水平		

表 3.7: TAO 望遠鏡架台仕様

パラメータ	値	備考
架台形式	経緯台	Tripod Disk 型式
固有振動数	>10 Hz	
方位軸	軸受 流体静圧軸受	
	駆動形式 フリクションドライブ	DD モーター ×4 台
	指向速度 2 deg/sec	最大加速度 < 0.1 deg s ⁻²
	駆動範囲 ±270deg	
	エンコーダ解像度 <0.01 arcsec	
	エンコーダ精度 <0.1 arcsec	
高度軸	軸受 流体静圧軸受	
	駆動形式 フリクションドライブ	DD モーター ×4 台
	指向速度 2 deg/sec	最大加速度 < 0.1deg s ⁻²
	駆動範囲 20-92deg	TBD
	エンコーダ解像度 <0.01 arcsec	
	エンコーダ精度 <0.1 arcsec	
装置デローテータ	軸受 R 型 LM ガイド	
	駆動形式 AC サーボモーター	
	指向速度 3 deg/sec	
	駆動範囲 ±270deg	
副鏡	駆動 焦点, XY, $\alpha\theta$	チョッピング機構なし
	焦点駆動速度 1mm/sec	
	焦点駆動範囲 ±50mm	
	XY 駆動範囲 ±5mm	
指向精度	絶対 <2 arcsec rms	
	相対 <1 arcsec rms	10 degree offset
	<0.1 arcsec rms	1 degree offset
追尾精度	<0.03 arcsec	平均風速 < 11m/s
	<0.2 arcsec	平均風速 < 15m/s

3.3.3 望遠鏡架台

望遠鏡架台に関する仕様を表 3.7 に示した。架台は Magellan 望遠鏡と同様の Tripod Disk 型の経緯台を採用する。これはアジマス床面に背の低いフォーク構造を立て、この上に Elevation Disk を介して鏡筒が支えられ、Elevation Disk がフォーク構造の上で回転する構造である。この構造は伝統的な Fork 型経緯台に比べて固有振動数が大きく安定にすることができ、なおかつ Elevation Disk の直径を小さくできるので製作や輸送が容易になるという利点がある。TAO 望遠鏡ではカセグレン焦点を運用するため、Magellan 望遠鏡に比べてやや腰高な印象を受けるが、TAO 望遠鏡の総重量は約 140t と見積もられ、Magellan 望遠鏡に比べて 1 割ほどの増加にとどまっている。

望遠鏡方位軸、高度軸ともに流体静圧軸受とフリクションドライブを採用し、良好な星像に対応した高精度の制御を実現する。軸受け、フリクションドライブ機構やモータには観測中に侵入する細かい砂塵への対策を行う必要がある。またサイトの風速が速いことに対応し、Magellan 望遠鏡に比べて耐風性能を引き上げた仕様となっている。

3.3.4 望遠鏡鏡筒

望遠鏡鏡筒は一般的なセルリエトラス構造であり、望遠鏡の姿勢変化によって自重変形しても主鏡と副鏡の光軸を一定に保つ構造となっている。自重変形による副鏡の変位を最小にするために、トップリング側トラスの交点スパイダーを接続する。

望遠鏡鏡筒構造について固有振動解析と静変形解析を行った。荷重には自重に加えてスパイダー相当 400kg を加え、有限要素法によって解析した。図 3.6 は固有振動数が小さいものから順に 2 つの固有振動モードでの変形の様子を示したものである。最低の固有振動数は 14Hz となり、目標とする振動数 10Hz を上回ることができた。図 3.7 は垂直および水平時の望遠鏡鏡筒の変形の様子を示したものである。最大変移は垂直の場合 44 μ m、水平の場合 198 μ m となり、いずれも問題のない量といえる。

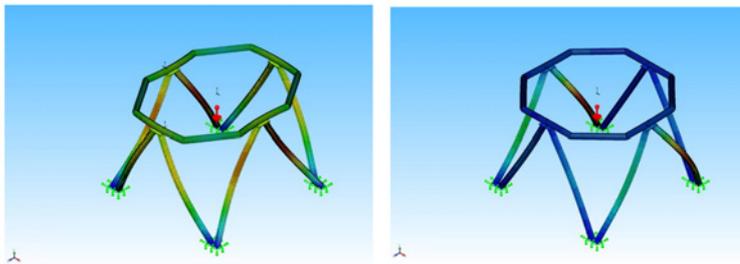


図 3.6: TAO 望遠鏡鏡筒固有振動解析変形図

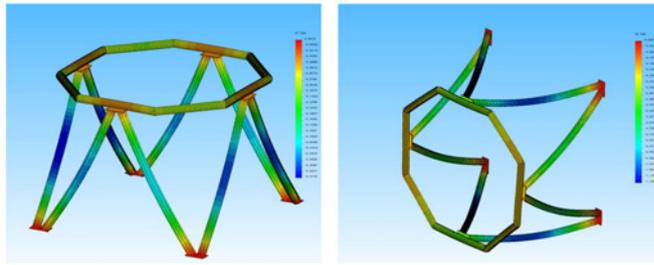


図 3.7: TAO 望遠鏡鏡筒静変形解析変形図

3.4 ドーム

現代のドームは観測時においてドームに起因するシーイングの劣化を最小限に保つように様々な処置が講じられている。ドームの形状も古典的な半球型のドームに対して接地境界乱流を望遠鏡の光路上に巻き上げないような様々な型式が研究されてきた。TAO 望遠鏡では最も星像が優れている望遠鏡の一つである Magellan 望遠鏡と同じ八角形の多角半球型のドームを検討している (図 3.8)²。TAO 望遠鏡を格納できるドームの大きさは直径約 25m になる。やはり接地境界乱流層を避けるためピラーの上に望遠鏡を設置する。アジマス床面で地表高約 10m, 高度軸不動点で約 18m 程度と考えているが、その高さは今後さらに検討する。ピラー横のドーム床下部については Magellan 望遠鏡のような吹き抜け構造とする案のほか、機材格納スペースや搬入経路も検討している。

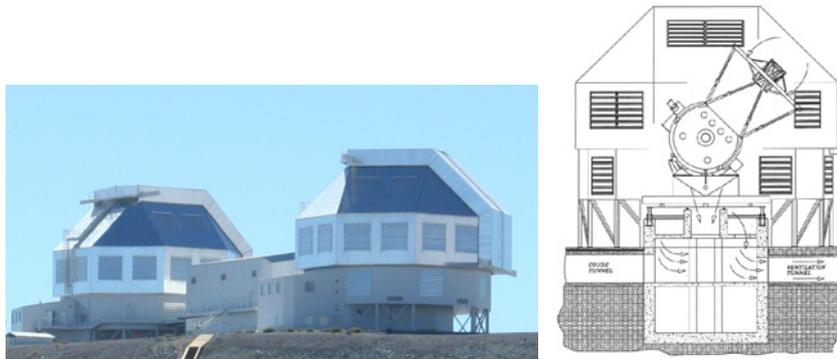


図 3.8: Magellan 望遠鏡ドーム

²すばる望遠鏡も最も星像が優れている望遠鏡の一つでありその円筒型のドームは優れた型式であるが、降雪にともない広いドーム天井の雪下ろし作業が必要となる。サイトの過酷な作業環境下での危険な作業を避けるため、円筒型のドーム形状は採用しない方針である。

ドームによるシーイングの劣化を抑制するにはドーム・望遠鏡の温度を周囲の気温とほぼ等しくさせることも重要である。このため、昼間は日射によってドームが暖まらないようドーム外壁の断熱に注意し、夜間の気温に合わせてドームと望遠鏡を冷却するためエアコン設備を設置する。また夜間観測中には外気を積極的に導入してドームと望遠鏡の温度を外気温に近づけるための換気設備を設置する。これらにより1 /hourの外気温変化に追随することを目標とする。望遠鏡やドーム、観測装置などから発生する熱のドーム外への廃熱も積極的に行ういっぽうで、これらの熱発生源の特定と低消費電力化、およびこれに伴う廃熱システムの簡素化も検討する。これは望遠鏡・ドームのメンテナンスを容易にするためである。

屋外環境からの望遠鏡の保護はもちろんドームの重要な機能である。TAO 望遠鏡サイトにおいてはとくに強風と砂塵の対策が重要となるであろう。強風下でも観測時に望遠鏡にあたる風を減速させ良好な観測が維持できるように、ドーム外壁に設置される外気導入のためのルーバーなどは開閉を細かく制御できる必要がある。また昼間ドームを閉じているときにはスリットやドーム回転部、ルーバーの隙間などから細かい砂塵が入り込まないように、これらの気密性に留意する。

ドームとしての基本的な機能のほか、付帯設備として観測装置などの移動用のクレーンやリフト、主鏡の洗浄設備・蒸着設備、メンテナンス作業のための望遠鏡制御室などが必要となる。とくにサイトの低酸素・低温環境下における作業安全を確保するため、望遠鏡制御室などでは暖房や酸素加圧/携帯酸素設備が必須となる。

3.5 制御系

ここでは望遠鏡本体の制御系に加え、観測を遂行するために望遠鏡・観測装置・観測装置を統合して制御する方法について検討する。

3.5.1 望遠鏡制御系

望遠鏡制御系はモータ、アクチュエータ等の直接的な制御、さらに望遠鏡の指向追尾や主鏡副鏡の補正など比較的短いタイムスケールでの複数の装置を統合した制御を行なう。密接に関連する重要な周辺装置としてドーム（スリット、Az 回転）、補償光学とガイドシステムがあり、いずれも望遠鏡制御系と連携して制御される。制御機は主要な装置あるいは機能ごとに設置しそれらをネットワークで結合した分散制御を行なう。

TAO 望遠鏡ではサイトの厳しい作業環境に対応するため、山麓施設からの遠隔制御による観測を定常的に行うことを予定している。このため望遠鏡ハードウェアおよび制御

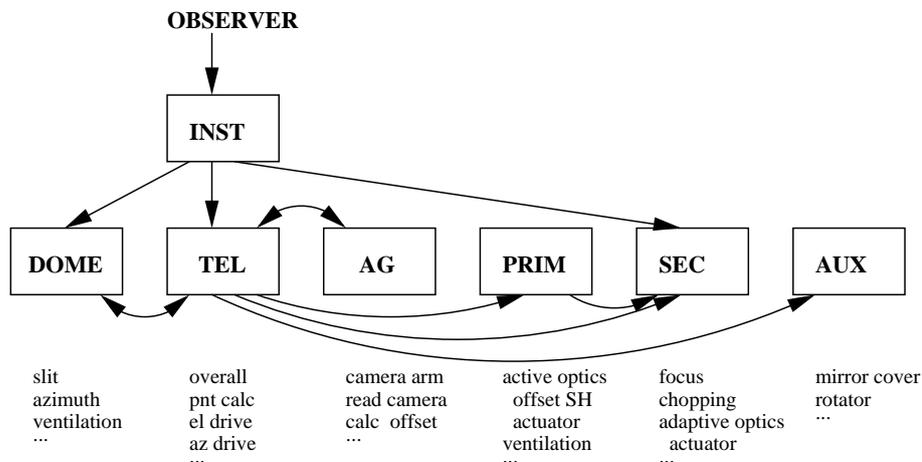


図 3.9: 観測制御系のイメージ.

ソフトウェアの信頼性はことさらに重要になってくる。ハードウェア・ソフトウェアの適切なモジュール化を進め信頼性を向上させるとともに、機能試験をルーチン・自動化し、故障時に速やかに交換対応できるようにする。また、細かなトラブルに対しても遠隔制御で対応、再起動（必要に応じて電源操作から）できるようにする。

いずれにせよ、この部分は望遠鏡架台や主鏡アクチュエータ、ドームなど、各装置のハードウェアと密接に結びついている。このため各製作会社と十分に協議をしたうえで細かい仕様を策定していく予定である。

3.5.2 観測制御系

観測制御系は観測者にインターフェースを提供し、目的とした観測を遂行するために望遠鏡、ドーム、観測装置および周辺装置を統合して制御を行なう部分である。

観測遂行時における制御の統括は観測装置の制御プログラムが行なうことにする。すなわち観測装置が観測者へのインターフェースを提供し、また観測装置制御プログラムからの指示のもと望遠鏡やドーム他の装置の制御を行なうことにする。これは観測者が求める観測データは観測装置が取得するものであること、観測装置によって観測に必要な機能の内容が様々に異なることなどの理由から、望遠鏡、ドームなどは観測遂行中に観測装置から求められる機能を提供するという考え方である。望遠鏡制御系を直接操作するユーザインターフェースを用意するが、主に一連の観測の前のオートガイダや主鏡鏡面制御、

補償光学の設定や望遠鏡のメンテナンスと試験の用途に限定されることになるであろう。このため望遠鏡制御系は観測装置および観測者へのインターフェースの基礎として各機能の制御コマンドセット/ライブラリを提供する。望遠鏡制御系と同様に観測制御系においても各装置ごとに制御計算機を設置しネットワークで結んだ分散制御を行う。このさい階層構造をシンプルに保つことに留意する。

また望遠鏡調整作業や観測装置立ち上げ、トラブル対応において現地作業を極力省力化するため、望遠鏡制御系の開発と並行して望遠鏡・観測施設シミュレータを作成し、日本国内あるいは山麓施設における試験設備とする。

3.6 遠隔観測

望遠鏡サイトの標高 5,640 m では大気圧はおよそ半分しかなく、低酸素・低温環境は人間が継続的に作業するには大きな困難を伴う。そこで TAO 望遠鏡は観測者が山頂に登ることなく、原則的に山麓施設などからの遠隔制御で観測を遂行することを予定している。我々は長年にわたり、アメリカハワイ州マウイ島に設置した東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター 2m MAGNUM 望遠鏡をサイトを無人にしたまま天文学教育研究センター三鷹キャンパスから遠隔観測を遂行してきた。さらに TAO 望遠鏡にさきだって、同サイトに建設した miniTAO 望遠鏡についても、2011 年にはサイト観測室とサンペドロアタカマの山麓施設のネットワークを速度 5Mbps の無線 LAN 回線で結び、山麓施設からの遠隔観測の遂行に成功した。そこでこれらの経験を踏まえつつ他の 8 m 級大望遠鏡の状況も調査し遠隔観測についての検討を行なった。

なお、望遠鏡立ち上げ当初からの完全無人遠隔観測を開始することは現実的ではない。そこで立ち上げ当初においては、観測支援と現場監視にあたる望遠鏡オペレータを山頂に 2 名配置し、いっぽう観測者はサンペドロアタカマの山麓施設から遠隔観測を遂行することを目標とする。その後、遠隔観測の経験の蓄積とシステムの安定化に従って順次、山頂のオペレータを無人としていく。また作業安全のため、山頂にオペレータが居る場合でもトラブル時の対応は夜間をあくまで応急処置にとどめ、トラブル復旧作業は基本的には翌昼に行なうこととする。最終的には山麓施設にメンテナンス要員を配置しつつも観測者は日本からの遠隔制御で観測を遂行することを目標としている。

3.6.1 通信設備

TAO 望遠鏡サイトは現在、サンペドロアタカマの山麓施設と速度 5Mbps の無線 LAN 回線で接続され、さらにバックアップ回線として BGAN 衛星通信システム (電話併用)

が運用されている。将来的には TAO 望遠鏡サイトを ALMA が整備する光ファイバーネットワーク網に接続する計画で、TAO 望遠鏡サイトと ALMA OSF とが高速回線で結ばれる。そこで ALMA OSF と山麓施設とを結ぶ回線を確保することで LAN 環境に匹敵した速度が得られると期待される。いっぽうで ALMA の本格運用に伴い無線回線機器は停止する方針であり、光ファイバー回線に対するバックアップ回線（ネットワーク、電話など）の確保が将来的な課題となっている。

3.6.2 監視システム

遠隔観測を支援するため監視システムを構築する。これは環境監視系、システム監視系、状態表示系、緊急警告系の各システムによって構成される。環境監視系は気象情報および雲量情報を監視するものである。降雪・結露・強風などから望遠鏡を保護するために悪天候時には確実にドームを閉じる必要があるが、地上観測では天候が変化し予測も難しいため常に気象条件を監視して対応する必要がある。基本的な気象情報、雲量の測定のほか、砂塵の量や可降水量の測定も行いたい。環境監視情報は観測条件について定量的な情報が得られるため、観測モードの選択や得られた観測データの質の評価にも有用である。

システム監視系は望遠鏡やドーム、観測装置、またネットワークや電源などのインフラの状態を監視するものである。制御機からのステータス取り込みだけでなく、観測者やオペレータが望遠鏡や観測の状況を目視で状態を確認するために監視カメラや音声のリアルタイム監視も充実させる。

状態表示系は環境監視系やシステム監視系で収集した情報を整理し、現在のステータスやその変化の状況をオペレータや観測者に示すものである。回線速度に余裕がある状況ではとくに、グラフィカルユーザインターフェースなどを利用することでオペレータや観測者にわかりやすく表示することが可能である。表示画面は複数立ち上げることが原理的に可能であり、山頂の望遠鏡オペレータと山麓施設の観測者との情報の共有にも役立つであろう。

緊急警告系は環境監視系やシステム監視系で収集した情報を解析し、異常な状態である可能性がある場合にはオペレータや観測者に警告を発するものである。単純で影響が小さいものから複雑で深刻なものまで様々な状況が考えられるため、事態収拾は基本的にオペレータあるいは熟練した観測者が遠隔で行うが、よくある異常（観測中の天候の悪化など）については望遠鏡や観測装置の停止・状態復帰手順をマニュアル化し、さらに極力シンプルなコマンドによって安全を確保するようにする（これにはソフトウェアシステムだけでなくハードウェア側の対応も重要である）。また電源やネットワーク回線の異常は深刻で迅速な対応が必要なため、オペレータや観測者の介入を待たず緊急警告系が自律的に望遠鏡や観測装置の停止・安全確保手順を遂行することとする。

現代的な望遠鏡や観測装置は基本的に遠隔操作可能な計算機の制御下にあるが、遠隔観測のためにはこれを徹底し、通常の観測制御のみならず緊急時の状態監視や復旧手順も含め、細かい部分についても状態監視・遠隔操作できるようにハードウェア・ソフトウェアを対応させる必要がある。

3.6.3 信頼性・耐障害性の向上

遠隔観測の実現のためには望遠鏡やドーム、観測装置、通信設備や電源設備、監視システムのハードウェア・ソフトウェアの信頼性と耐障害性を高めることが重要である。システムの信頼性向上のためにはある程度機能を制限してでも必要以上にシステムを複雑化しないようにする。いっぽうで単体の信頼性の向上には限界もあるため通信設備など重要部分は多重化・冗長化してシステムの可用性、耐障害性を高める。また TAO 望遠鏡サイトにおける低大気圧・低温環境下で安定した動作を確保するため、機器の選定および動作検証を行うべきである。日本国内のサイトで期待できるような安定した電力を確保するのは難しいため、停電時に安全にシャットダウンするための電力と通信回線の確保は極めて重要である。

3.7 限界等級

3.7.1 主なパラメータ

この計算で用いた望遠鏡の仕様は表 3.8 の通りである。

以下、望遠鏡鏡面の反射率、大気の透過率、大気背景放射の条件に関して詳細に説明する。

3.7.2 望遠鏡鏡面の反射率

望遠鏡鏡面は銀蒸着を施すと仮定し、反射率は理科年表の値を用いた。反射率のプロットを図 3.10 中段に示す。

3.7.3 観測装置の効率

観測装置の効率は、大きく (1) 検出器の量子効率、(2) 光学系の透過率、(3) 分光観測を行う場合は分光素子の透過率、に分けて考える。

表 3.8: 限界等級計算に用いたパラメータ

パラメータ	可視 ($< 1\mu m$)	近赤外 ($1 \sim 10\mu m$)	中間赤外 ($10\mu m <$)	単位	
主鏡口径	D	6.5 (TAO)	8.2 (Subaru)	8.1 (VLT)	(m)
鏡面反射率	ϵ_{tel}	3.7.2 節参照			
鏡面数	n_{mirror}	2			
大気透過率	ϵ_{atm}	3.7.4 節参照			
大気温度	T_{atm}	255			(K)
大気放射率	e_{atm}	$= 1 - \epsilon_{atm}$			
望遠鏡温度	T_{tel}	270			(K)
望遠鏡放射率	e_{tel}	$= 1 - \epsilon_{tel}^{n_{mirror}}$			
観測装置効率	ϵ_{opt}	3.7.3 節参照			
大気背景放射	f_{BG}	3.7.5 節参照			
読出ノイズ	n_{read}	3	10	2000	($e^- s^{-1} pix^{-1} r.m.s.$)
暗電流	i_{dark}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	($e^- s^{-1} pix^{-1}$)
ピクセルスケール	s_{pixel}	0.1			($'' pix^{-1}$)
電荷容量	W_{pix}	1.5×10^5	2×10^5	2×10^7	($e^- pix^{-1}$)
最短積分時間	t_{min}	10	0.1	0.025	(s)

3.7.3.1 検出器の量子効率

- 可視 ($\lambda < 0.9\mu m$) での CCD の効率は, EEV のカタログ値を³用いる.
- 近赤外線 ($0.9 < \lambda < 5\mu m$) のアレイ検出器は全波長帯域で 80%を超えるものが出来ているので, 80%とした.
- 中間赤外線 ($5\mu m < \lambda$) では, $25\mu m$ 以下では Si:As を, $25\mu m$ 以上では Si:Sb を使うと仮定し, 値は SOFIA 計画の中間赤外カメラ FORCAST のページにある Si:As⁴と Si:Sb⁵の値を用いた.

3.7.3.2 光学系と分光素子の透過率

光学系, 分光素子の透過率は表 3.9 のように仮定した.

これらすべて合わせた観測装置の透過率を図 3.10 の下段に示す.

³<http://anela.mtk.nao.ac.jp/eev/eev.pdf>

⁴http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiAs%20DQE.prn

⁵http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiSb%20DQE.prn

表 3.9: 観測装置の透過率

	可視	近赤外	中間赤外
光学系透過率	0.7	0.7	0.5
分光素子透過率	0.6	0.6	0.6

3.7.4 大気の透過率

3.7.4.1 可視域

可視域での大気減光は主に大気中の分子とダストの散乱によるものと考えられる。そこで GEMINI の資料 (もとのデータは CFHT マニュアルなど) にあるマウナケア (4200 m) における大気減光量のデータをもとに、各高度の大気圧によってスケールリングして各高度での大気透過率を推定する。

3.7.4.2 赤外域

赤外域での大気透過率は大気モデルによる透過率を計算するソフトである ATRAN (Lord, S. D. 1992, NASA Technical Memor, 103957) によりを計算した。標高は 5600m, 4200m (マウナケア相当), 2600m (VLT サイトのパラナル相当) の 3 通りを仮定している。注意事項として

- 天頂 ($Z = 0$)
- 計算波長域は $0.8\mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$
- ATRAN の仕様が波長分解能 $R \sim 10000$ (30 km/s) までとなっているので、計算は $R = 10000$ (波長によって R に ± 200 くらいの差がある) で行なった。
- ATRAN の標準大気モデルによれば 5600m=18373 フィートにおける水蒸気量は 1.1mm となったが、Chajnantor における水蒸気量の観測結果より水蒸気量上位 25% より 0.5mm を仮定した。
- ATRAN の標準大気モデルによれば 4200 m=13780 フィートにおける水蒸気量は 3.4 mm となったが、GEMINI 望遠鏡の資料で 4200m マウナケアでの水蒸気量上位 20% が 1.0mm であることから、1.0mm を仮定した。
- 2600m=8530 フィートの計算については ATRAN の標準大気モデルによる水蒸気量 6.0mm を採用。

計算結果を図 3.10 上段に示す。

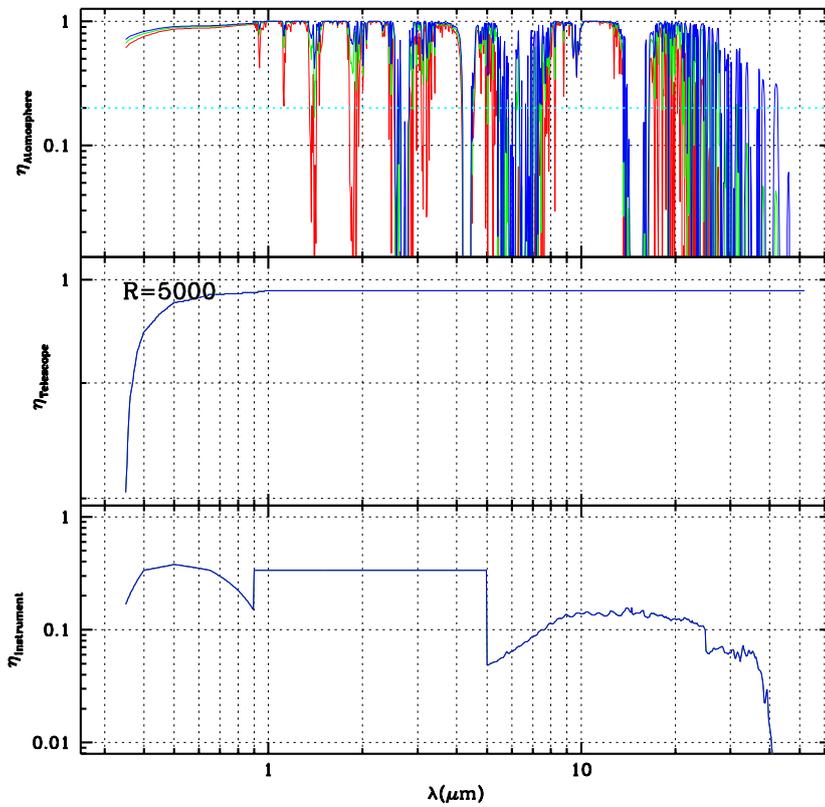


図 3.10: 限界等級計算に用いたさまざまな透過率曲線. (上) 大気の透過率. ただし, 大気の透過率のデータは波長分解能 5000 に落して表示している. 青線が 5600m (TAO), 緑線が 4200m (すばる), 赤線が 2600m (VLT) の標高に対応している. また, 水色線は透過率が 20% のレベルを示している. (中) 望遠鏡鏡面の反射率 (2 回反射). (下) 観測装置の透過率 (光学系, 分散素子, 検出器の効率を全て合わせたもの).

3.7.5 背景放射

大気背景放射は夜光と熱放射の 2 種類があるとし, 以下のように仮定した.

- 夜光は⁶<http://www.gemini.edu/sciops/ObsProcess/obsConstraints/obsConstraints.html> を用いる. ただし, $2.25\mu\text{m}$ より長波長は大気熱放射だけで良いとして, 0 とする.

⁶マウナケアでの測定結果

- 大気からの熱放射は、温度 T_{atm} の黒体放射 $\times(1 - e_{\text{atm}})$ とした。
- 望遠鏡からの熱放射は、温度 T_{tel} の黒体放射 $\times(1 - e_{\text{atm}}^{n_{\text{mirror}}})$ とした。

3.7.6 限界等級

以上の条件を元に、 $0.35 \sim 52\mu\text{m}$ に渡っての限界等級を積分時間は 10,000 秒、 $S/N = 10$ として TAO, すばる, VLT の各望遠鏡で、撮像 ($R = 5$), 狭帯域撮像 ($R = 100$), 中分散分光 ($R = 5000$) の観測モードについて算出した。

この際に以下の条件を課した。

- 星像サイズは可視 ($\lambda < 1\mu\text{m}$) で $0.''5$, 赤外 ($\lambda > 1\mu\text{m}$) で $0.''4$. ただし、回折限界のサイズがこれよりも大きい場合は回折限界サイズを用いる。
- 検出アパーチャーのサイズは星像サイズの 2 倍とする。
- 単一フレームの積分時間 t_{single} は背景放射によるカウントを S_{BG} ($\text{e}^- \text{s}^{-1} \text{pix}^{-1}$) としたときに

$$t_{\text{single}} = W_{\text{pixel}}/S_{\text{BG}} \quad (3.1)$$

とする。ただし、

- $t_{\text{single}} > 3600\text{s}$ なら $t_{\text{single}} = 3600\text{s}$
- バックグラウンド・リミットに達する積分時間 t_{BGLP} を

$$t_{\text{BGLP}} = (4n_{\text{read}})^2/S_{\text{BG}} \quad (3.2)$$

とし、 $t_{\text{single}} > t_{\text{BGLP}}$ なら $t_{\text{single}} = t_{\text{BGLP}}$ とする。

さらに、以下の観測不能条件を課している。

- 最小積分時間 (t_{min}) の積分で背景放射によってピクセル容量 W_{pix} が溢れる場合は観測不能とする。
- 大気の透過率が $\epsilon < 0.2$ の波長帯は背景放射の変動が大きすぎるために観測不能とする。

最終的に算出された限界等級が図 3.11 ~ 3.13 である。

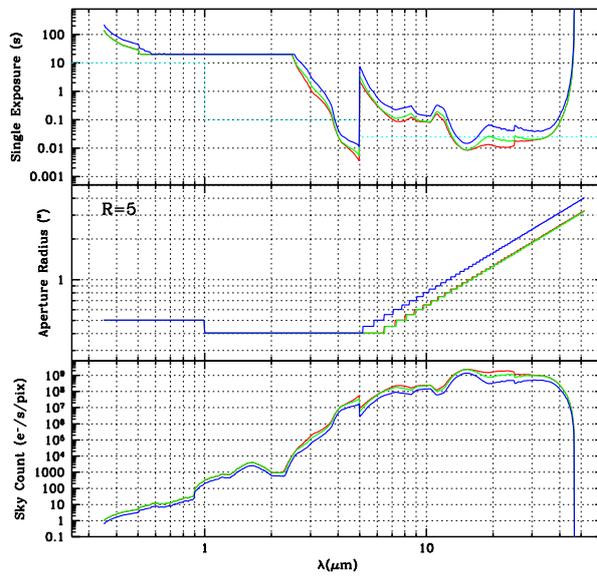
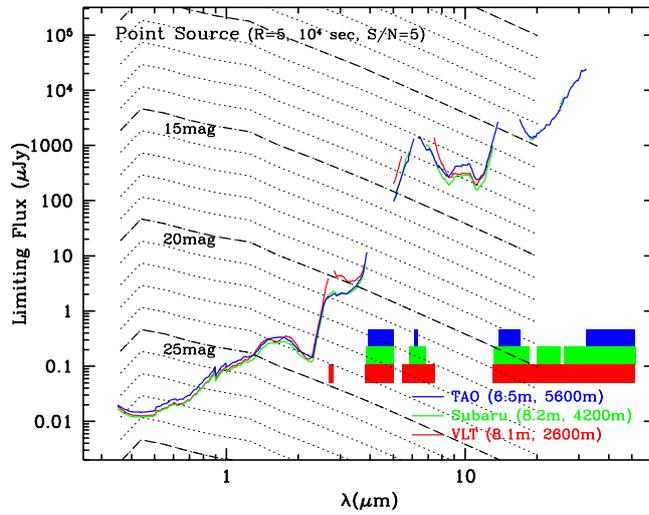


図 3.11: (上) 撮像時 ($R = 5$) の TAO (青線), すばる (緑線), VLT の限界等級 (赤線). 下四角は TAO (青), すばる (緑), VLT (赤) で観測不能な波長帯を示している. (下) 撮像時の単一積分時間, アパーチャの半径 (星像サイズの直径), ピクセルあたりの背景放射のカウント. 水色の点線は各波長帯での最小積分時間を表している.

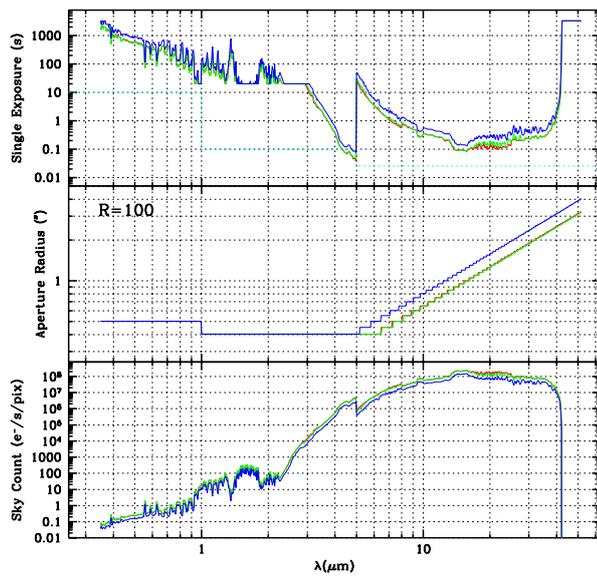
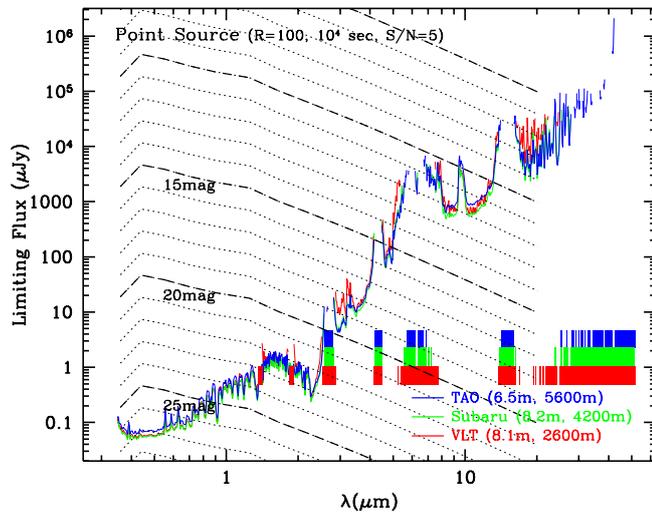


图 3.12: 狭帯域撮像時 ($R = 100$).

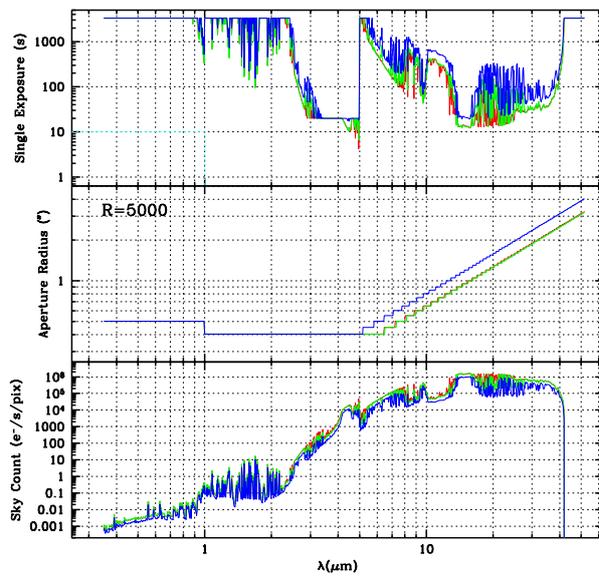
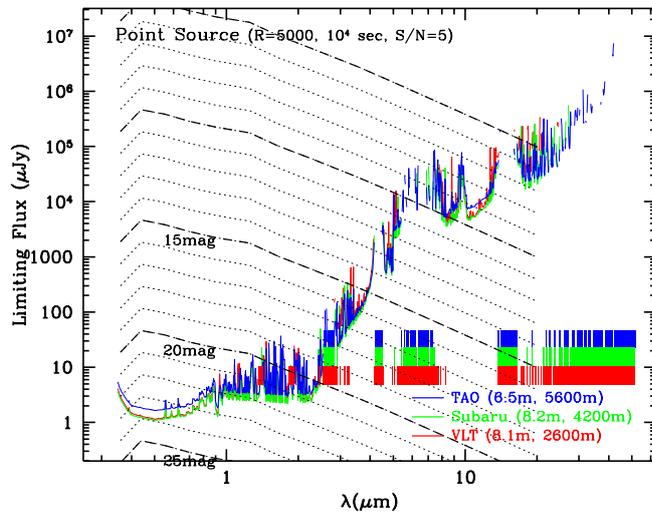


図 3.13: 分光時 ($R = 5000$) の TAO(青線).