

## 第6章 望遠鏡

### 6.1 望遠鏡の基本仕様

#### 6.1.1 背景

現在、建設中まで含めて 6m 超級の光赤外望遠鏡は 17 台もあり<sup>1</sup>、これらのすべてが 2005 年までに科学運用を開始することになっている。米国では、2015 年頃を目指して 30m 級の光赤外望遠鏡計画が進行中であり、2020 年頃には 50–100m 級の光赤外望遠鏡の建設が予想されている。すばる級の口径を持つ光赤外線望遠鏡をスペース天文台として運用する次世代宇宙望遠鏡 JWST も 2011 年頃の稼働を目指している。20 世紀は 8–10m 光赤外線望遠鏡の出現で幕を閉じたが、望遠鏡革命はまだ端緒についたばかりで、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。こうした時代に口径 4m 級以下の小さな望遠鏡を建設しても、それが MACHO や MAGNUM のような専用望遠鏡でない限り世界最先端の教育と研究を行うことは難しいであろう。我々は、最先端の教育と研究を維持できる最小口径の望遠鏡は MMT や Magellan の口径 6.5m であろうと判断した。Magellan 2 望遠鏡は、望遠鏡とドームを合わせた値段が約 30M 米ドルであり、Gemini など 8m 望遠鏡の価格 100M 米ドルに比べて、かなり割安であり、かつ構造も単純であり比較的小さなグループでも製作可能な大望遠鏡である。我々は、Magellan 望遠鏡に修正を加えて、赤外線の感度では世界最高性能の望遠鏡を建設することにした。

#### 6.1.2 望遠鏡の概要

TAO 望遠鏡と Magellan 望遠鏡の違いは、前者が 5000m 級の高地で運用されることと赤外線観測に最適化されていることである。表 6.1 に両者の主たる違いを示す。

望遠鏡や地球大気 (特に水蒸気) からの放射を最小にするために、主鏡を銀コーティングし、高度 5600m のチャナントール山頂に望遠鏡を設置する。構造の簡素化、および酸素が希薄な高度での科学運用の負担を軽減するために、単一の副鏡とし、副鏡の交換は

<sup>1</sup>すばる、Keck (×2)、Gemini (×2)、VLT (×4)、Magellan (×2)、MMT、GTC、LBT、HET、SALT、BTA

考えない。

MMT 用にアリゾナ大で開発中の  $f/15$  可変型副鏡を採用し、補償光学技術による回折限界での観測を行う。従来の補償光学系では、5-6 枚のミラーが必要であるが冷却が難しく、増大した熱雑音のために感度が思うように向上しない。一方、可変副鏡による補償光学系では、ミラーを追加する必要がないため、分解能が向上した分だけ感度が向上し、観測能率が従来型の数倍に達する。本可変鏡は、アクチュエータで駆動するために移動距離が長く、振動副鏡としての使用も可能である。また、レーザーガイド星を使い、

	TAO	Magellan
最適化波長	赤外線	光学
主鏡 6.5m $f/1.25$	Ag coating	Al coating
副鏡	$f/15$ deformable	$f/5, 11, 15$
光学最大視野	$30' \phi$	$60' \phi$
高度	5600m	2700m
Photometric nights/yr	260	220
Precipitable water	0.4mm 10%tile	~2mm 冬

表 6.1: TAO と Magellan の比較

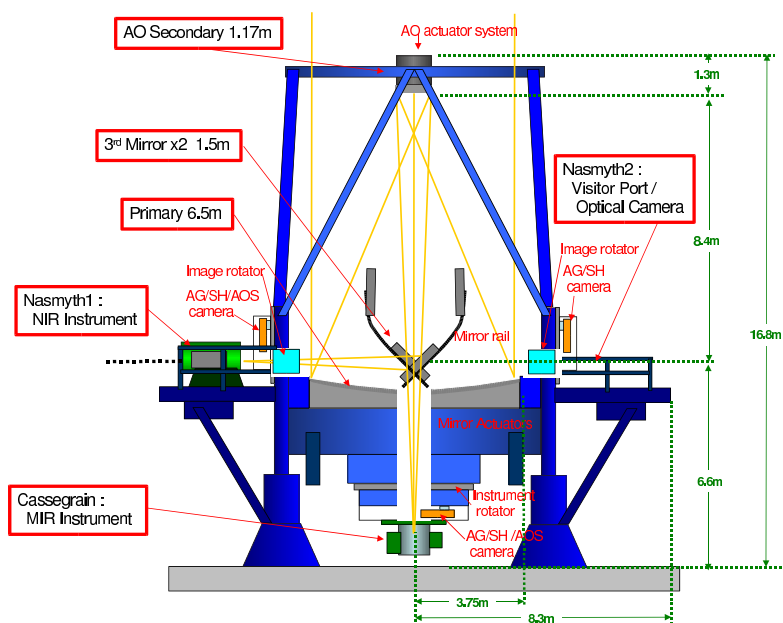


図 6.1: TAO 望遠鏡 (予想図)

補償光学の有効天域をほぼ全天に拡大する。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、上空の攪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がある。

## 6.2 マジェラン望遠鏡

TAO 望遠鏡と同一口径の望遠鏡として、チリ共和国内に設置されているマジェラン望遠鏡がある。そのデザインは TAO を設計する上で大いに参考になるものであり、かつ、参考にすべきものでもある。そこで、ここではマジェラン望遠鏡について多少詳しく紹介する。

カーネギー天文台とアリゾナ大学が始めたマジェラン計画では、口径 6.5m の光赤外望遠鏡をチリのラスカンパナス天文台のなかに一台建設する予定であった。その後、3 大学の参加により計画が拡大し、6.5m 光赤外望遠鏡を 2 台建設することになった。マジェランコンソーシアムでの出資比率は、カーネギー天文台 50%、ハーバード大学 20%、アリゾナ大学 10%、ミシガン大学 10%、MIT 10%となっており、ホスト国 (チリ) への分配 10%を除く 90%の観測時間は、出資比率に応じて分配される。マジェラン望遠鏡は、2 台で約 0.7 億米ドル (約 88 億円) と安価であること、比較的小規模のグループで建設運用が可能であること、望遠鏡そのものの構造が簡単で高地における建設が可能であること、などの観点から TAO 望遠鏡のモデルとして採用されることになった。

図 6.2 にマジェラン望遠鏡の組み立て図を示す。主鏡は、アリゾナ大ミラーラボで開発製作された F/1.25 ハネカム鏡 (オハラ社 E6 BSC ガラス) 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、重量は 7.7 トンと超軽量である。光学形状は Classical Cassegrain であるが、副鏡と組み合わせて Gregorian 焦点 (合成 F/11) を作り、視野 40 分にわたり平坦な焦点面を実現している。赤外線副鏡としては振動型の SiC 鏡が計画されていたが、開発のメドが立たず中止された。焦点としては、Gregorian Nasmyth 焦点 2 つ、“folded port” 焦点 3 つ、Cassegrain 焦点 1 つ (赤外線用) の合計 6 つが使用可能である。

架台は、カーネギー天文台と L&F 社が中心になって開発したもので、Tripod Disk という構造を採用した。これは、伝統的な Fork 型 (固有振動が低く不安定) と ALT-AZ Disk 型 (安定だが Elevation Disk が大きく製作が困難) の中間型と言うべきものである。床面から Tripod Disk を出すことで、Elevation Disk の直径を小さくして製作を容

易にすると同時に安定な構造 (固有振動 10Hz) を実現した。望遠鏡の回転部分の総重量は 127 トン (Azimuth システム回転 52 トン、OSS<sup>2</sup>システム回転 75 トン) である。駆動角速度は、Azimuth slew rate = 2°/sec (0.1°/sec<sup>2</sup>)、Elevation slew rate = 1°/sec (0.1°/sec<sup>2</sup>) である。指向精度は、1°offset に対し 0.1" (rms)、10°offset に対し 1" (rms)、任意からの offset (全天) に対し 2" (rms) である。

図 6.3 に示すように、温度制御は望遠鏡とドームで行う。望遠鏡の構造中や主鏡/セル中を空気が流れる。ドームの表面積の 25% は換気用のルーバーに覆われている。無風の場合は、ファンを用いて強制換気を行う。1°C/hour の外気温度の変化に追従することを目標としている。表 6.2 に operation condition と survival condition をまとめる。

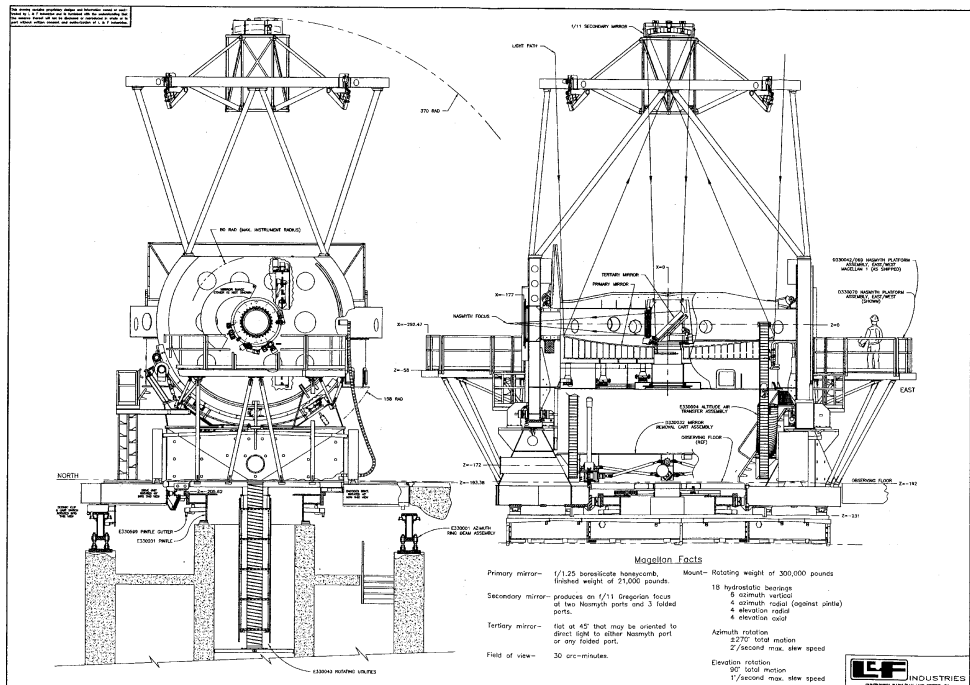


図 6.2: マジェラン望遠鏡

<sup>2</sup>optical support system (Elevation Disk と一緒に回転する光学支持部)

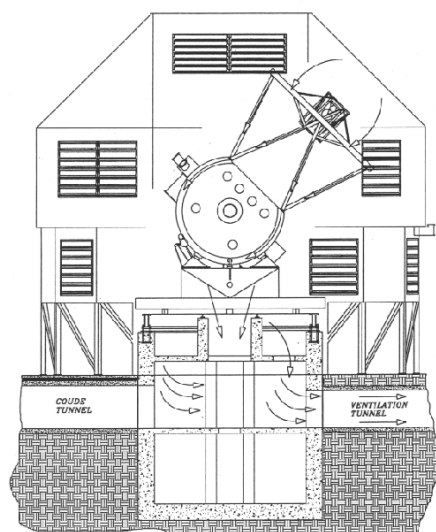


図 6.3: マジェラン望遠鏡とドーム

	Operating	Surviving
風速	最大瞬間風速 22m/sec、望遠鏡表面 6.6m/sec	望遠鏡表面 22m/sec
外気温	-9 ~ 27°C	-18 ~ 38°C
湿度	95%	100%
地震	0.4G 水平	0.4G 水平

表 6.2: Operating and Survival Conditions

## 6.3 望遠鏡光学系

TAO 望遠鏡は Magellan 望遠鏡を元にした望遠鏡であり、ベースとなる主鏡や構造などは Magellan で確立された技術を利用する。その一方で、TAO 望遠鏡はこれまでで最高高度の地点に設置されるなど、独自性の高い望遠鏡であり、そのメリットを最大限に活かす設計が必要である。

この章では TAO 望遠鏡の光学系仕様について、パラメータ選択の理由から設計案までについて解説する。

### 6.3.1 TAO 望遠鏡光学系の概念設計

目指すべき方向

TAO 望遠鏡の光学系を検討する場合に、重要視すべき要素は以下の 3 点である。

- 赤外線での観測に最適化された望遠鏡

TAO 望遠鏡は 5600m の高山の山頂に設置される。この高度では赤外域における大気の吸収が影響が小さくなるので、普通の地上望遠鏡からでは観測できないような波長域も観測できる。また、熱赤外域でも大気放射が少なくなることから、高感度の観測が可能になる。これらの特徴は、TAO 望遠鏡が赤外観測について大きな優位性を持っている事を示しており、これを活かすように望遠鏡光学系は設計されるべきである。

また、近年赤外域では、補償光学の利用が進んでおり、中間赤外を含めた広い波長でその有効性が指摘されている。赤外線望遠鏡である TAO 望遠鏡でもこの補償光学の導入を前提にして望遠鏡を検討すべきである。

- 広視野の望遠鏡

観測効率をあげて望遠鏡を有効に利用するには、視野をできるだけ広く取ることが望ましい。Magellan 望遠鏡はこの事を念頭に置いた設計をしており、TAO の光学系もその利点をできるかぎり活かした設計にするべきである。

- シンプルでメンテナンスが少ない望遠鏡

望遠鏡の効率を高め、最大限の成果を上げるためには、安定的に望遠鏡が運用できる状態にあることが不可欠である。これには望遠鏡の構造や運用をシンプルにする必要がある。特に TAO 望遠鏡は作業性の極端に悪い高地に設置する上に、運用に

割ける人員も限られているために、運用に手間がかからないように設計段階から気をつけておく必要がある。

そのため、望遠鏡光学系としては1つの副鏡だけを用いるように設計を行う。また、補正系などの切替えもシンプルな動作（例えば平面ミラーの抜き差しだけ）でできるようなレイアウトとする。

## 望遠鏡パラメータの選択

### 望遠鏡のタイプ I. (Cassegrain/Gregorian)

最初に望遠鏡のタイプを Cassegrain 系にするか Gregorian 系にするかを考える。

Cassegrain 系と Gregorian 系の利点を収差、実サイズ、補償光学の導入の点から比較したのが表 6.3 である

非点収差・像面湾曲は Cassegrain の方が少しだけ量が少ないが、補正は Gregorian の方が楽である。これは普通に補正系を組むと Cassegrain 系になるので、望遠鏡を Gregorian にした方が収差成分の打ち消しが容易になるからである。非点・像面湾曲は視野を確保する上で大きな問題になる収差なので、広視野化を考えた場合、Gregorian にするメリットは大きいと思われる。

望遠鏡サイズ/副鏡サイズの観点から見ると、Cassegrain の方が全体のサイズを小さくできる分メリットは大きい。このメリットは望遠鏡最終 F 値が明るいほど顕著である。逆に F10 がそれ以上暗い望遠鏡光学系を考えると、サイズのメリットはあまり効かなくなる。

	Cassegrain	Gregorian
コマ収差	同じ	
非点収差	少し良い	少し悪い
像面湾曲	少し良い	少し悪い
湾曲の補正	難しい	やさしい
軸ずれコマ	同じ	
主鏡副鏡間距離	小 ~7m (F10 の場合)	大 ~10m (F10 の場合)
副鏡サイズ	小	大 (Cas の ~1.2 倍)
補償光学	効果小	効果大

表 6.3: Cassegrain 系と Gregorian 系の比較

補償光学の効果の点から考えると、Cassegrain よりも Gregorian の方がメリットが大きい。これは、Gregorian 望遠鏡では、副鏡の主鏡による像が実像として望遠鏡上空に結び、これがちょうど大気の大擾乱層付近にあたるので、擾乱の影響を副鏡による AO で補償しやすいからである。一方、Cassegrain ではこれが虚像になり、地表面よりも上に共役面はできない。

以上まとめると、広視野化、赤外線性能 (AO 性能) の両面から Gregorian の方がメリットは大きいと言える。唯一問題になるのは望遠鏡サイズの問題であるが、これは実際の製作性との兼ね合いもあるので、現時点での判断は難しい。したがって、今検討では望遠鏡タイプは Gregorian と考えることとする。

### 望遠鏡のタイプ II. (Classical/Ritchey-Chretien)

望遠鏡のタイプとしては Classical な望遠鏡にするのか、Ritchey-Chretien (以下 RC) にするのかを考える。

RC は主鏡副鏡でコマを取り除いてある系であり、同じ F 値で設計を行う限り Classical よりも結像性能は良い。しかしながら、RC 系は主鏡の形状も F によって変わってしまうので、コマを補正できるのは 1 つの F に対してだけであり、他の F 値を使うとコマが発生してしまう。このコマの強さは F の 3 乗に比例する量であり、RC で設定された F よりも F が暗い場合に特に影響が顕著である。

さらに、高視野用の補正系を考えると、コマ収差を取るには像面から離れた位置にもパワーを持つ光学エレメントを置く必要が出て来る。具体的には望遠鏡第三鏡付近に補正レンズ系をいれることになるが、これは交換等の手間を考えると非常に大きなデメリット

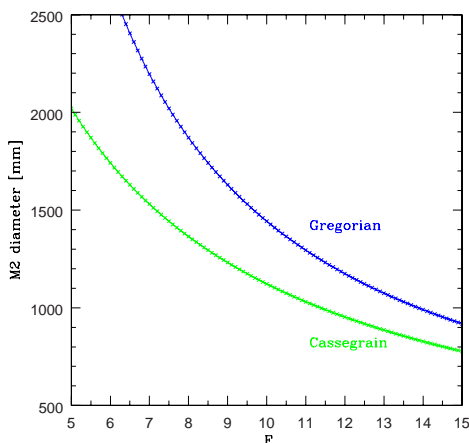


図 6.4: F 値と M2 サイズの関係

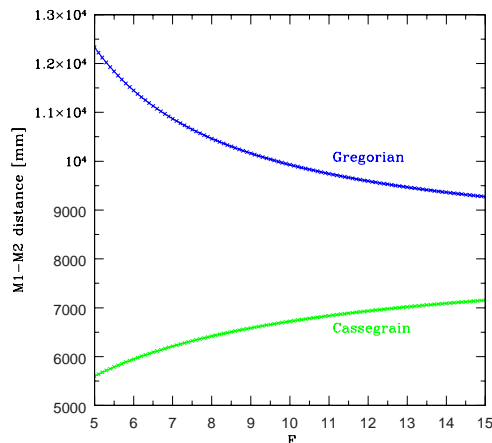


図 6.5: F 値と M1M2 距離の関係



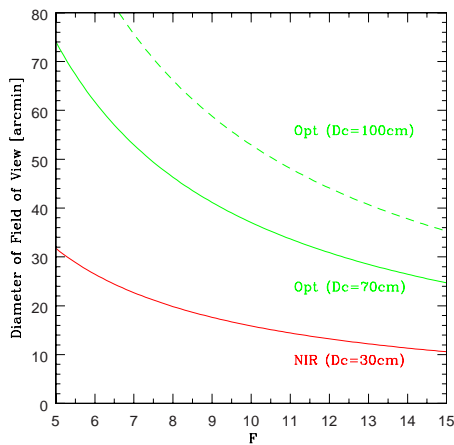


図 6.6: F 値と視野の関係

トとなる。

TAO 望遠鏡は運用をできるだけシンプルにしたいので、望遠鏡の F を切替えて観測を行うことは想定しない。したがって Classical な光学系を取るメリットは無く、RC 解を採用すべきである。

#### 最終 F 値

最終 F 値を決めるのに考慮すべき要素としては、視野と副鏡サイズの 2 点が挙げられる。

- 視野広い視野を取るには焦点面付近に補正系が必要となって来る。この補正系の物理的なサイズは製作などの面から限られており、これが焦点面の物理的なサイズを規定する。例えば可視用補正系の場合、レンズのサイズは  $\phi 70\text{cm}$  が限度であり、これが事実上の焦点面サイズになる (もし像面湾曲の補正をあきらめ、収差だけ取り除くならレンズを Silica だけで作れるので  $\phi 100\text{cm}$  超も可能である)。赤外の場合はレンズ材質がより限られるので、 $\phi 30\text{cm}$  程度が上限であろう。

このように焦点面のサイズが一意に決まってしまうので、望遠鏡の視野と F 値は 1:1 の対応を示すようになる。これを図にしたのが図 6.6 である。当然 F 値が明るい程視野は大きくなる。

#### ● 副鏡サイズ

主鏡のサイズ/F が固定なので、最終 F を決めれば副鏡のサイズも一意に決まる (図 6.4 参照)。副鏡サイズが大きくなると、補償光学副鏡の製作が難しくなる。現在、MMT で運用されている補償光学副鏡は直径 640mm、LBT 用および Magellan 用

に開発が進んでいるもので直径が各々 911mm、1300mm である (詳細は後の項を参照)。数年以内にどの程度大きい物まで実用化されるかは不明であるが、Magellan の 1300mm を大きく越えるものは難しい。

また、副鏡サイズが大きくなると、中心遮蔽の影響で望遠鏡回折像のリング成分が強くなる。図 6.7 は中心遮蔽の割合を変化させた場合の回折像を計算したものである。遮蔽物の直径が有効径の 20% を越える辺りから、影響は無視できないほど大きくなることが分かる。TAO 望遠鏡の主鏡サイズは 6500mm なので、遮蔽による像劣化を防ぐ意味でも副鏡サイズは <1300mm とすべきである。

上で見た通り、視野を確保するには最終 F は明るくしなければならず、副鏡の製作性や遮蔽の影響を鑑みると副鏡は小さく (すなわち、F は暗く) する必要がある。ここでは案として、最終 F=12、副鏡サイズ ~1200mm を取ることにする。この場合の望遠鏡の基本仕様は表 6.4 の通り。

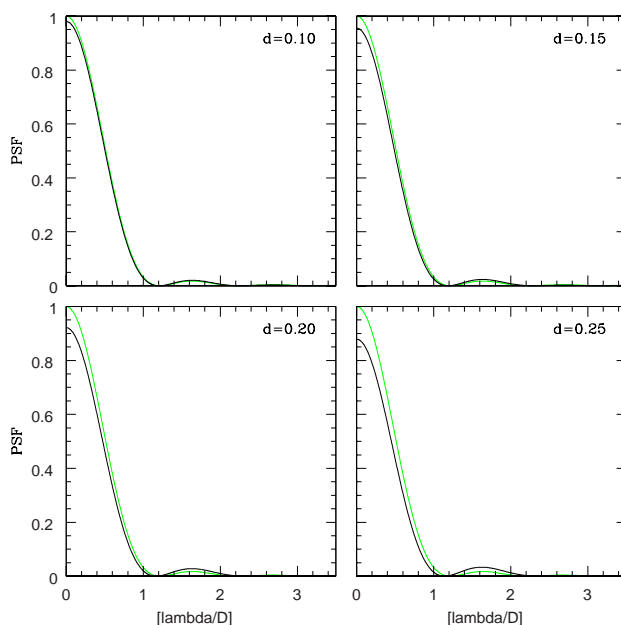


図 6.7: 遮蔽直径割合が 0.10、0.15、0.20、0.25 の場合の回折像。横軸は  $\lambda/D$  で縦軸が遮蔽無し  
の回折像の中心強度で規格化した明るさ。緑線は比較のための遮蔽が無い場合の回折パターンを示  
す。遮蔽率が 20% を越えると急激に回折像が悪化する事が分かる。

望遠鏡タイプ	Gregorian Ritchey-Chretien
主鏡系	6500mm
主鏡 F 値	1.25
副鏡	副鏡 (補償光学機能付)
副鏡サイズ	~1174mm
副鏡による遮蔽率	18% (直径換算)
主鏡副鏡間距離	~9593mm
バックフォーカス	4500mm
最終 F 値	12.0
プレートスケール	$2.65''/\text{mm} = 380 \mu\text{m}/''$
可視装置視野 *	最大 $\phi 30'$
近赤外装置視野 *	最大 $\phi 13'$
中間赤外装置視野	最大 $\phi 2'$

(\*) 理想的な補正系が組めた場合。なお補正系の設計は装置の光学系に深く関係するため、詳細は別項に述べる。

表 6.4: 望遠鏡光学系の基本仕様

### 6.3.2 望遠鏡設計案

上の概念設計に基づいて、設計した望遠鏡の案を表 6.5 に示す。また、これに基づくレイアウトを図 6.8 に、主焦点スポットダイアグラムを図 6.9 と図 6.10 に示す。

パーツ	パラメータ	コメント
主鏡	有効径 6500 mm	穴による遮蔽 = 直径で 7.2%
	曲率半径 -16250.00 mm	
	コニック係数 -0.99667	距離=8126.25mm に主鏡による像面
	カセグレン穴径 470 mm	
	距離 9560.91 mm	
副鏡	有効径 1145.19 mm	副鏡による遮蔽 = 直径で 18%
	曲率半径 2598.50mm	
	コニック係数 -0.66952	
	距離 8,560.91 mm	
第三鏡	サイズ 1250mm × 880mm	45 度の降り曲げ鏡 抜き差し可能
	形状 平面	
	距離 5,500 mm	
焦点面	像スケール $2.65''/\text{mm}$	
	像面の弯曲半径 ~1355mm	

表 6.5: 望遠鏡光学系のパラメータ

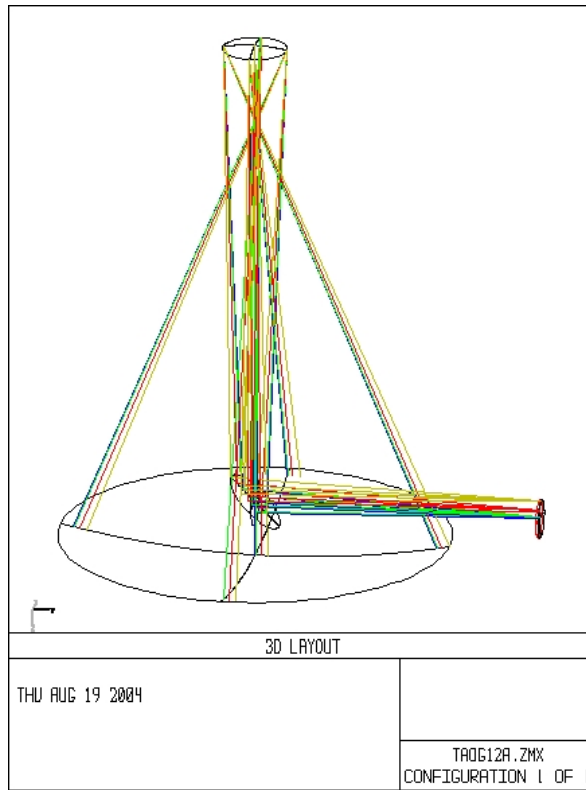


図 6.8: 望遠鏡レイアウト図。書かれてある光線は視野中心からの半径で 0' (視野中心)、1'、6.5'、15' となっている。

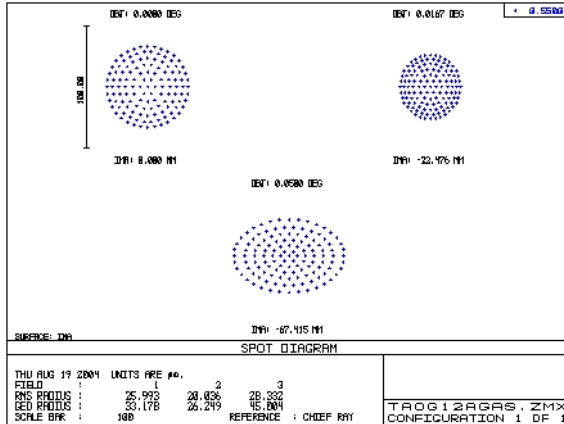


図 6.9: 直焦点 (補正系無し) のスポットダイアグラム。0' (視野中心)、1'、3' でのスポットを示してある。像面湾曲は補正せず、焦点は平面だとしている。スケールバーは 100 $\mu$ m であり、0.265'' に相当している。RMS 径は全ての視野で 60 $\mu$ m (0.16'') を切っている。

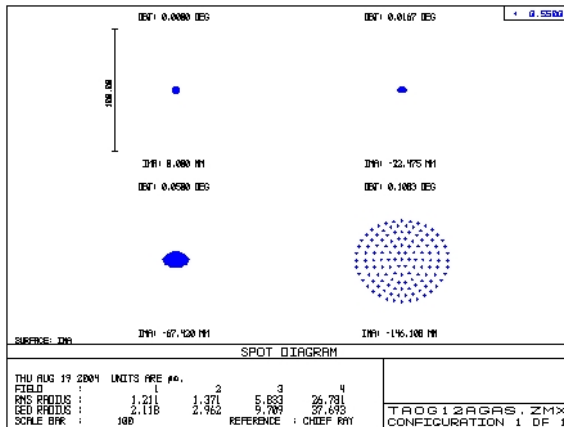


図 6.10: 直焦点 (補正系無し) のスポットダイアグラム。像面は曲率半径 1350mm の曲面とした。先の 0' (視野中心)、1'、3' に加えて、6.5' でのスポットを示した。

## 6.4 望遠鏡構造体

### 6.4.1 望遠鏡仕様

望遠鏡構造は原則として Magellan 望遠鏡のものを踏襲し、必要に応じて変更を加えてゆくこととする。表 6.6 に、望遠鏡に対する要求仕様をしめす。

### 6.4.2 マゼラン望遠鏡との違い

#### 焦点部

TAO 望遠鏡では中間赤外線観測が大きな柱となる。しかしながら、中間赤外線波長においては望遠鏡からの熱放射が背景放射の大きな要因となるために反射面の数を可能な限り減らす必要がある。このため、中間赤外装置は第 3 鏡を使わないカセグレン焦点におくこととする。

マゼラン望遠鏡ではカセグレン焦点は装備されてないため、以下の変更が必要となる。

- 主鏡セルにカセグレン穴を開ける
- 主鏡の再蒸着は主鏡セルごと行うため、蒸着時にカセグレン穴を塞ぐ構造が必要となる

最低固有振動数	10Hz
軸受	油静水軸受け
駆動機構	フリクションドライブ
指向精度	1."5 rms
エンコーダ	
解像度	0."01
精度	0."1
トラッキングエラー	< 0."03 (風速 11m/s 以下) < 0."2 (風速 15m/s 以下)
焦点部	可視ナスミス、赤外ナスミス、カセグレン

表 6.6: TAO 望遠鏡本体の要求仕様

## 風耐性

これまでの調査で、建設地の風速がかなり大きいことが判明してきた。とくに、前半夜の瞬間最大風速は 14m/s にも達し、平均速度も 11m/s を超える。このため、マゼラン望遠鏡の風耐性（トラッキングエラーが風速 7m/s 以下で  $< 0.''03$ 、風速 11m/s 以下で  $< 0.''2$ ）に比べてより厳しい条件となっている。

## 副鏡

マゼラン望遠鏡では複数の副鏡を交換する事を想定した副鏡ユニットであったが、TAO 望遠鏡では可変形副鏡のみを用いるために副鏡交換機構が不要である。

## 第 3 鏡

カセグレン焦点を持たないマゼラン望遠鏡では第 3 鏡ユニットは常に光路上におかれ、使用する焦点によって光軸上を回転させて切替えを行っていた。

これに対し、カセグレン焦点を持つ TAO 望遠鏡では第 3 鏡は 2 ユニット必要で、これらが必要に応じてレール上を移動することによって焦点を切替える設計となる（図 6.1）。

## 6.5 観測制御系

ここでは望遠鏡本体、および、望遠鏡・周辺機器・観測装置との関連を中心に観測のための制御系について検討する。まずは大きく 2 つの階層に分けて検討を進めることにする。すなわち望遠鏡の複数のモータや鏡のアクチュエータ、ドームスリットや方位軸回転モータなどのハードウェアを直接的に制御する階層と、望遠鏡、周辺機器および観測装置を統合して制御し適切な観測を実現する階層である。この章では前者を「望遠鏡制御層」、後者を「観測制御層」と呼ぶことにする。望遠鏡の指向機能を例にとると天体の赤経赤緯をパラメータとして時々刻々の方位高度に変換したうえで望遠鏡の方位軸モータ、高度軸モータを制御する部分が「望遠鏡制御層」に属し、指向追尾コマンドによって天体の赤経赤緯のパラメータを受け取る部分などのユーザ、装置間のインターフェース部分が「観測制御層」に属することになる。

その上でさらに望遠鏡および観測装置の遠隔制御による観測運用の実現について検討を行なう。望遠鏡サイトの標高 5600 m では気圧はおよそ半分しかなく人間が継続的に作業するには極めて困難な環境であり、このため観測者が山頂に登ることなく標高の低い基地から遠隔観測を行なうことが重要となるからである。我々、天文学教育研究セン

ターのグループではこれまでに地上光赤外線望遠鏡については木曾観測所 1.05 m シュミット望遠鏡および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、電波望遠鏡としては野辺山およびチリに設置されている 60 cm サブミリ波望遠鏡の開発および観測運用を通じて、遠隔観測についての経験を蓄積してきている。とくに MAGNUM 望遠鏡については当初より無人遠隔観測を目標として開発をすすめ、現在ではアメリカハワイ州マウイ島にある望遠鏡を天文学教育研究センター三鷹キャンパスから観測監視を行ないながら現地無人の状態での安定した自動観測を実現している。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。

### 6.5.1 望遠鏡制御層

望遠鏡制御層においてはモータ、アクチュエータ等の直接的な制御および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の統合的な制御を行なう部分である。制御計算機は装置ごとに設置しそれらをネットワーク(シリアル通信あるいはイーサネット)で結んで分散制御を行なう。比較的短いタイムスケールでの制御のために必要であれば制御計算機にはリアルタイム OS (DOS あるいは RTLinux など)を採用する。

また遠隔観測の実現のためには望遠鏡ハードウェアおよび制御層ソフトウェアの信頼性がことさらに重要になってくる。また機械に不調が生じたときにリセットをしたり電源を入れ直したりすることがあるが、それらは全て計算機から制御できなければならない。さらに不調が予想される場合には容易に交換できるようにハードウェアのモジュール化と立ち上げ試験ルーチンの自動化を進める必要がある。

いずれにしてもこの部分は望遠鏡や他の装置のハードウェアと密接に結びついているため望遠鏡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。

### 6.5.2 観測制御層

観測制御層において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、観測装置などを統合した制御を行なう部分である。

まず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



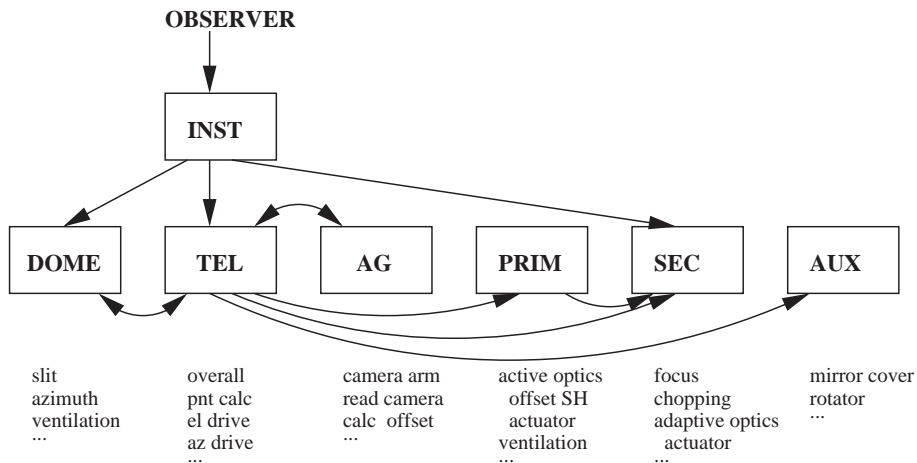


図 6.11: 観測制御系のイメージ。

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、ドーム等は観測遂行中に観測装置から求められる機能を提供すれば良いという考えかたに基づいている。望遠鏡制御のための独自のユーザインターフェースを用意する必要はあるが、主に一連の観測の前のオートガイダの設定や望遠鏡のメンテナンス、実験など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プログラムとして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(もちろん複数の矛盾するコマンドや望遠鏡の機能を損なうようなコマンドについてはソフトウェア的な安全装置を組みこんでおく必要がある)。また現地での調整作業を極力省力化するため望遠鏡制御プログラムの開発と同時にソフトウェア的な望遠鏡シミュレータを作成して観測装置開発時の試験に提供する。

望遠鏡制御層と同様に観測制御層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なう。観測装置制御プログラムは主に望遠鏡制御プログラムに通信すればよく、主鏡、副鏡、オートガイダなどの各制御プログラムに直接通信する必要はないと思われるがそれらへのアクセスを制限しないという意味で、階層構造をことさらに深くすることはしない。例えば副鏡チョッピング制御の場合においては検出器の読みだしのタイミングに合わせて観測装置計算機から副鏡制御計算機に直接制御信号を送る必要がある。計算機の OS には Linux、プログラム言語には C を中心に使い、制御プログラム間の通信には IP プロトコル/イーサネット上での socket 通信を使う予定である。

### 6.5.3 遠隔観測

前述のとおり望遠鏡サイト標高 5600 m での作業はたいへんな困難をとまなうため遠隔観測が重要となるが、望遠鏡立ち上げ当初からの完全無人遠隔観測を開始しようとすることは現実的ではない。そこで安全のために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 名配置するが、サンペドロ (標高 2500 m) の基地に滞在する観測者が全ての操作を行ない遠隔観測を遂行する状況を最初の目標とする。

このため山頂には酸素分圧を高めた待機室を設置して望遠鏡オペレータや山頂作業者の健康と安全に配慮する。また山頂の望遠鏡オペレータは緊急時の対応も行なうが夜間の作業は危険も伴うのであくまで応急処置にとどめ、本格的な対応は翌昼に行なうことにする。山頂とサンペドロの観測基地は高指向性アンテナを利用したマイクロ波無線通信によって数 Mbps の速度で直接 TCP/IP LAN を接続する。山頂の望遠鏡オペレータと基地の観測者とのコミュニケーションのためにはテレビ会議システムを準備する。さらになんらかの LAN 接続の故障に備えバックアップ回線として衛星電話 (FAX も使用可能) を 2 回線は確保する。観測は基本的には無線 LAN 経由で観測装置制御計算機にログインし、コマンドなどテキストベースでの観測制御プログラムを実行する。この場合、回線速度は全く支障が無いであろう。取得画像の表示などグラフィカルなユーザインタフェースが必要な場合においても無線 LAN 接続の数 Mbps の速度では制御プログラムの X ウィンドウ画面を観測者の手元に飛ばして来てもおそらく支障はないと考えられる。しかし将来的により遅い回線速度や不安定な回線からの遠隔観測、すなわち公衆インターネット経由での日本からの遠隔観測の実現を見据え、観測者の手元の計算機で表示制御プログラムを立ち上げ socket 通信によって必要なデータをやりとりすることにして通信量を減らすことも考慮する。

また、遠隔観測を支援するものとして監視システムを構築する。これは主に環境監視、装置監視、緊急警告対応の各システムによって構成される。環境監視システムは気象情報および雲量情報を収集する。地上観測では天候が変化するためこれらの情報は望遠鏡や観測装置の保護には欠かせず、さらに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変更や得られた観測データの質の評価にも有用となる。我々は既にサイト調査において気象モニター、雲量モニターの遠隔自動運用を行っており、それらをさらに改良・追加する予定である。

装置監視システムは観測制御層の各制御プログラムからリアルタイムでステータスを収集し一ヶ所にまとめログとして保存するとともに観測者にわかりやすい形でまとめて表示するものである。ステータス収集のタイムスケールは必要に応じて可変にする。人間からみたときの認識性や汎用性を考慮しログは ASCII テキストとして保存する。ここまでにおいてログを表示するだけでも原理的には観測監視が可能であるが、それらの

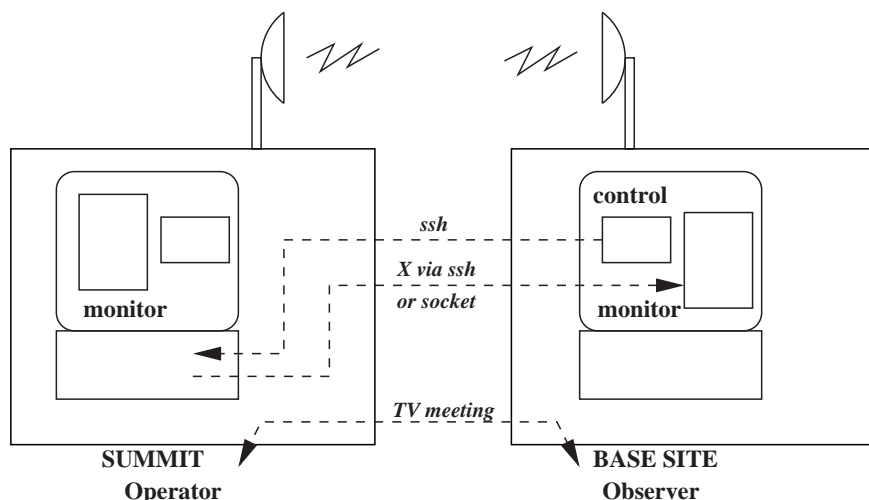


図 6.12: サンペドロからの遠隔観測のイメージ

情報を集約、取捨選択して表示することはたいへん有用である。そこで収集したログに基づいて情報を提供するサーバを置き状況表示クライアントが socket 通信により随時必要なステータスを取りだして表示するシステムを構築する。表示システムは複数立ち上げられるので望遠鏡オペレータと観測者との情報の共有にも役立つ。

緊急警告対応システムは観測中に一ヶ所に収集したステータスを解析し、問題となる状況が生じている場合には観測者に警告を発するとともに定められた手順に基づいて事態收拾、復帰を自動で行なう、あるいは手動で行なうことを要請するものである。同様のシステムは MAGNUM 望遠鏡における遠隔自動観測システム上で運用を続けている。単純な障害についてはごく簡単な対応で自動対応には問題ないと思われるが、深刻あるいは複雑な障害が生じたときには対応は難しくなり人間による介入が必要になることが考えられる。このとき必要な手順が複雑になると時間もかかり切迫した状況のなかでヒューマンエラーを起こしやすくなるため、ごく簡単なコマンドで望遠鏡および観測システム全体が「安全」な状態にもっていけるようにハードウェア・ソフトウェアとも作りこんでおく必要がある。これにより緊急時において焦るなかでも簡単に安全を確保できると同時に、より複雑な対応をじっくり行なうための時間を作りだすのにも重要である。また速やかな観測復帰のために立ち上げ試験手順においても自動化を進めることが有用である。

## 6.6 リモート制御の検討

本計画では良好な観測条件を求めて望遠鏡を高山に建設する。建設地の標高は 5000 m を超え大気圧は地上のおよそ半分しかなく、人間が継続的に作業するには極めて困難な環境である。このため通常は高山に登ることなく標高の低い基地からのリモート制御により観測を行なうことが必須となる。

地上光赤外線望遠鏡のリモート制御に関して天文学教育研究センターのグループは東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター MAGNUM 望遠鏡の開発と運用を通じてその経験を蓄積している。同望遠鏡(口径 2 m)はアメリカ合衆国ハワイ州マウイ島の標高約 3000 m のハレアカラ山頂にあり、TAO 建設予定地ほどは厳しい環境ではないが観測のための恒常的な滞在は望ましくない。そこで開発当初から無人リモート制御を目標に整備を進めており、さらに観測スケジューリングソフトウェアを整備することで無人自動観測を目標としている。すでに天文学教育研究センター三鷹キャンパスからのリモート監視・制御のもとで複数回の無人自動観測を行なっている。

もともと現代的な光赤外線望遠鏡はほぼ全てがコンピュータの制御下でありネットワークを通じてリモート観測を遂行するにあたっての障害はさほど大きいものではないが、リモート観測の実現にあたってはいくつか特別に考慮すべきことがあることは確かである。そこで MAGNUM 望遠鏡の経験をもとに以下にそれらを簡単にまとめる。なおここでは具体的な技術・方法には踏み込まず方針とすべき内容を列挙する。これはコンピュータ・ネットワーク技術の進歩が非常に速いため採用すべき適切な技術も当然変化していくためである。

まず気象条件の監視が極めて重要である。風雨から望遠鏡および観測装置を保護するために悪天候時には確実にエンクロージャを閉じなければならないが、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。このとき温湿度、風向風速や気圧、雨量など基本的な諸量のほかに雲量の測定が重要である。雲量監視装置はすでに MAGNUM 望遠鏡の運用にあたって実用化しており、これにより気象条件の悪化にも事前に余裕をもって対応できるようになっている。

ハードウェアの信頼性の確保は当然重要である。なかでもすべての機械のリモートでの制御のためには停電時の電力と通信回線の確保が重要となる。低温下における機械系や冷凍機冷却水の凍結防止や低大気圧下におけるハードディスクの耐久性、機器の冷却特性の低下など高山での運用において特別の注意が必要となるものもある。また安全対策のためにあらゆる望遠鏡や観測装置の状況把握と施設内の監視が必要である。

つぎに現代的な望遠鏡はもともとほとんどコンピュータ制御下にあるが、それをさらに押し進め望遠鏡や観測装置の「全て」の制御がコンピュータを通じて実行できるようにする必要がある。これには通常の観測制御のみならず観測準備や緊急時の対応、復旧

手順も含まれなければならない。

システムの信頼性の確保のためには機能を制限してでも信頼性の確保を優先し必要以上にシステムを複雑にしないことが重要である。ただ単体の信頼性の向上には限界もあるためネットワーク回線も含む重要部分はシステムを多重化し誤動作に備え、さらにシステムの異常監視システムを独立に機能させる必要がある。

## 6.7 限界等級

### 6.7.1 主なパラメータ

この計算で用いた望遠鏡の使用は表 6.7 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。

### 6.7.2 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 6.13 中段に示す。

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	$\epsilon_{tel}$	6.7.2 節参照			
鏡面数	$n_{mirror}$	2			
大気透過率	$\epsilon_{atm}$	6.7.4 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	$\epsilon_{opt}$	6.7.3 節参照			
大気背景放射	$f_{BG}$	6.7.5 節参照			
読出ノイズ	$n_{read}$	3	10	2000	( $e^- s^{-1} pix^{-1}$ r.m.s.)
暗電流	$i_{dark}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	( $e^- s^{-1} pix^{-1}$ )
ピクセルスケール	$s_{pixel}$	0.1			(" $pix^{-1}$ )
電荷容量	$W_{pix}$	$1.5 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$2 \times 10^7$	( $e^- pix^{-1}$ )
最短積分時間	$t_{min}$	10	0.1	0.025	(s)

表 6.7: 限界等級計算に用いたパラメータ

### 6.7.3 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。

#### 検出器の量子効率

- 可視 ( $\lambda < 0.9\mu\text{m}$ ) での CCD の効率は、EEV のカタログ値<sup>3</sup>を用いる。
- 近赤外線 ( $0.9 < \lambda < 5\mu\text{m}$ ) 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 ( $5\mu\text{m} < \lambda$ ) では、 $25\mu\text{m}$  以下では Si:As を、 $25\mu\text{m}$  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:As<sup>4</sup>と Si:Sb<sup>5</sup>の値を用いた。

#### 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 6.8 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 6.13 の下段に示す。

### 6.7.4 大気の透過率

#### 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

	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

表 6.8: 観測装置の透過率

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

<sup>4</sup>[http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support\\_Docs/TM00\\_19/SiAs\%20DQE.prn](http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiAs\%20DQE.prn)

<sup>5</sup>[http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support\\_Docs/TM00\\_19/SiSb\%20DQE.prn](http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiSb\%20DQE.prn)

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リングして各高度での大気透過率を推定する。

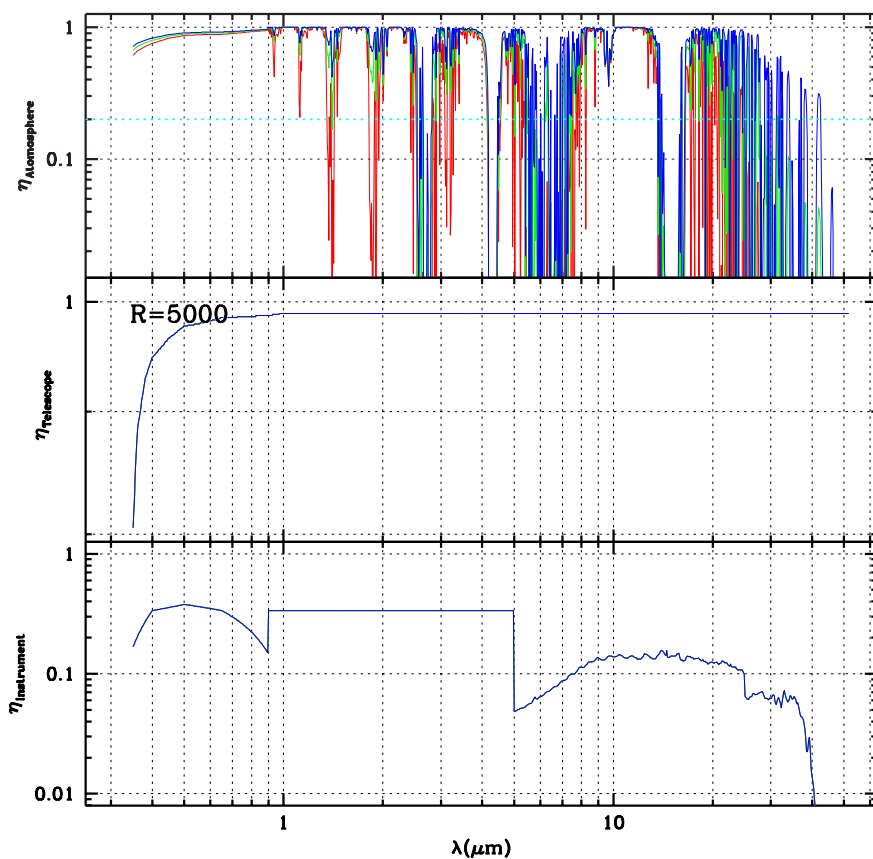


図 6.13: 限界等級計算に用いたさまざまな透過率曲線。(上) 大気の透過率。ただし、大気の透過率のデータは波長分解能 5000 に落して表示している。青線が 5600m (TAO)、緑線が 4200m (すばる)、赤線が 2600m (VLT) の標高に対応している。また、水色線は透過率が 20% のレベルを示している。(中) 望遠鏡鏡面の反射率 (2 回反射)。(下) 観測装置の透過率 (光学系、分散素子、検出器の効率を全て合わせたもの)。

## 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  $\pm 200$  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 6.13 上段に示す。

### 6.7.5 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。

- 夜光はマウナケアでの測定結果<sup>6</sup>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。
- 大気からの熱放射は、温度  $T_{\text{atm}}$  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  $T_{\text{tel}}$  の黒体放射  $\times (1 - e_{\text{atm}}^{\text{mirror}})$  とした。

---

<sup>6</sup><http://www.gemini.edu/sciops/ObsProcess/obsConstraints/obsConstraints.html>



### 6.7.6 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  $t_{\text{single}}$  は背景放射によるカウントを  $S_{\text{BG}}$  ( $\text{e}^- \text{s}^{-1} \text{pix}^{-1}$ ) としたときに

$$t_{\text{single}} = W_{\text{pixel}}/S_{\text{BG}} \quad (6.1)$$

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  $t_{\text{BGLP}}$  を

$$t_{\text{BGLP}} = (4n_{\text{read}})^2/S_{\text{BG}} \quad (6.2)$$

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 ( $t_{\text{min}}$ ) の積分で背景放射によってピクセル容量  $W_{\text{pix}}$  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 6.14 ~ 6.16 である。

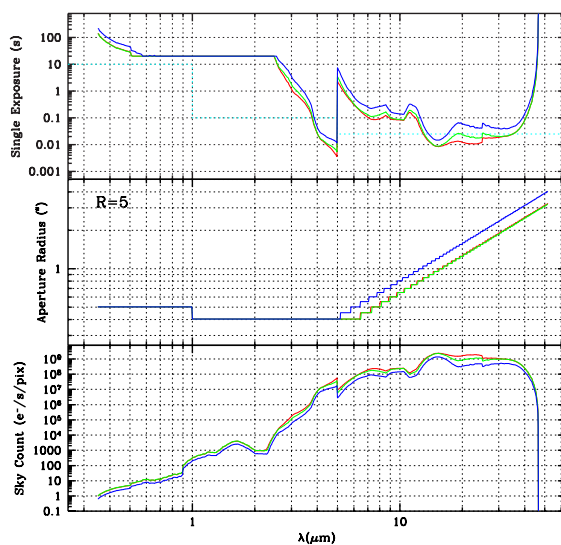
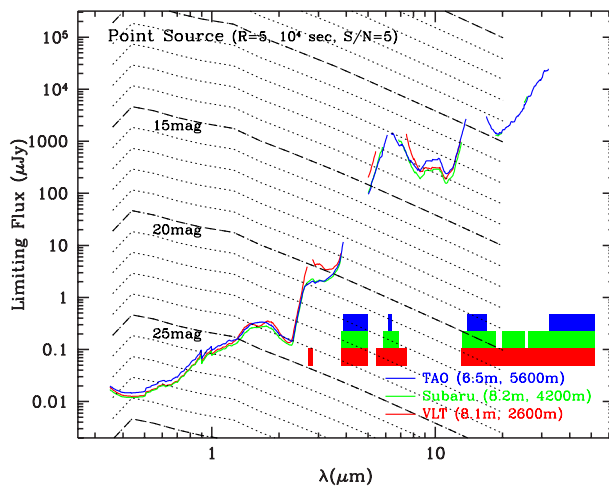


図 6.14: (上) 撮像時 ( $R = 5$ ) の TAO (青線)、すばる (緑線)、VLT の限界等級 (赤線)。下四角は TAO (青)、すばる (緑)、VLT (赤) で観測不能な波長帯を示している。(下) 撮像時の単一積分時間、アパーチャーの半径 (星像サイズの直径)、ピクセルあたりの背景放射のカウント。水色の点線は各波長帯での最小積分時間を表している。

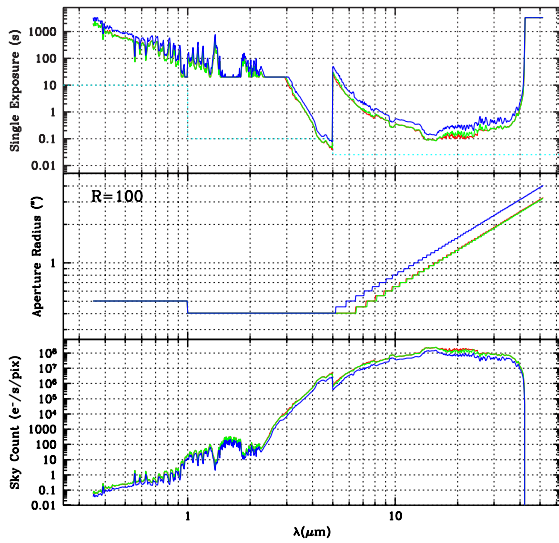
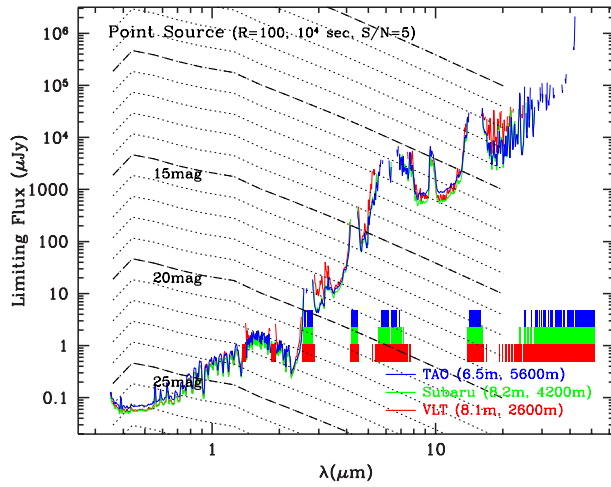


図 6.15: 狭帯域撮像時 ( $R = 100$ )。

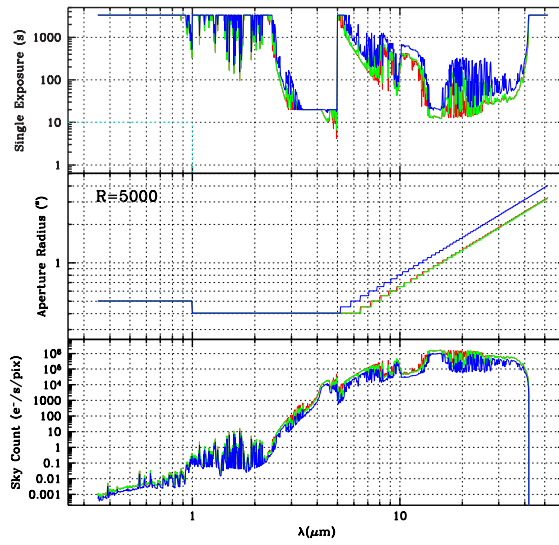
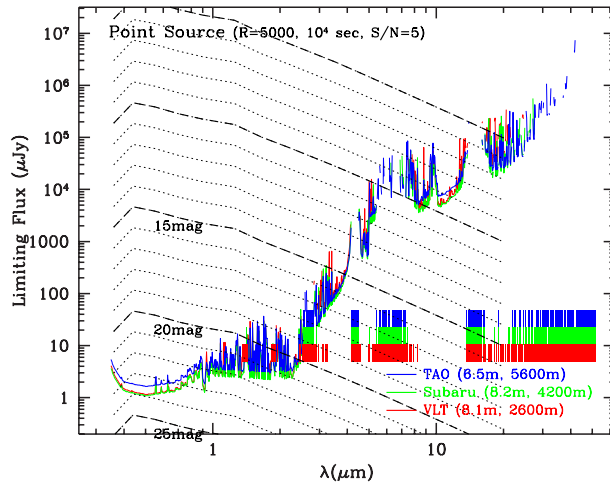


図 6.16: 分光時 ( $R = 5000$ ) の TAO(青線)。