

解 説

大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT)

成相 恭二・山下 泰正

国立天文台 T181 三鷹市大沢 2-21-1

(1988年10月1日受理)

Large Optical and Infrared Telescope (JNLT)

Kyoji NARIAI and Yasumasa YAMASHITA

National Astronomical Observatory, 2-21-1, Osawa, Mitaka 181

1. はじめに

天文学においては、新しい望遠鏡ができると新しい事実がわかり、宇宙観が書き換えられてきた。古くにはガリレイの望遠鏡が有名である。20世紀になってからは、ヘルの努力でできた、1917年完成のウィルソン山の100インチ望遠鏡、1948年完成のパロマ山の200インチ望遠鏡がそれぞれ恒星、銀河についての研究を進めることになった。第2次大戦後にレーダー科学者がいろいろな種類の電波望遠鏡を作り、電波天文学を創始したし、ロケット、人工衛星の時代になるとX線望遠鏡や紫外線、赤外線の望遠鏡が大気外からしか行なえない天文学に取り組み、われわれの宇宙についての理解を深めさせてくれた。

電波、X線などによる進歩に対応して、地上の光学望遠鏡も変貌を遂げてきた。1970年代には口径3~4mの望遠鏡が、条件の良い場所、とくに南半球に次々と設置された。そのなかにはいくつかの赤外線専用望遠鏡も含まれる。望遠鏡がある程度大きくなってくると、大気のゆらぎが星像の大きさを決める。天文学者はこの大気のゆらぎのことをシーアイングと呼んでいる。もちろんこれは小さいほうがよい。ヘルの時代にも場所の選定に当たって、晴天率とシーアイングのことは考慮したのだが、この新しい世代の望遠鏡の建設に当たっては世界的規模で場所の選定が行なわれた。低緯度で大洋の中の高山をもつ島（ハワイ島、ラパルマ島（カナリー諸島））、中緯度で大陸西海岸に近い高山（アンデス山脈、スペイン、南アフリカ）が二つの条件を満たすことがわかった。赤外線望遠鏡は、大気内の水蒸気による吸収、発光がな

るべく少なくなるように高山に設置されることが多い。条件の良い場所に口径の大きな望遠鏡を置けば、今まで見えなかった暗い天体まで、つまり遠くの天体まで見えるようになる。そうすれば宇宙の涯の近く一ということは宇宙の誕生に近い頃一まで観測してわれわれの宇宙の姿を理解できるようになる。そういうことで現在口径7~8mの望遠鏡がいくつも計画されている。わが国でも国立天文台が中心になって口径7.5mの大型光学赤外線望遠鏡（Japanese National large telescope, 以下 JNLT と略記）を計画している。スペース・シャトルで打上げが予定されているハッブル・スペース・テレスコープは大気外に出るのでシーアイングによる像の劣化はなく、その口径2.5mの解像力の限界まで宇宙を探ることができる。しかし、写野が狭いこと、観測器が限られることから、地上の7~8m級の望遠鏡とは特性において大きく異なるため、それぞれの特徴を生かした観測により、協力して宇宙を解明していくことになるだろう。

ハワイの山が天文観測にとって条件が良いことは、1950年頃にすでにローウェルが気づいていたが、アメリカ本土からの遠さ、高山であるための開発のむずかしさ、などが原因で、アメリカが当時計画していた天文観測基地はアリゾナに決まった。ハワイの島の天文学のための本格的な開発が始まったのはNASAの宇宙開発に関連してカイバーが1960年頃にハワイ島のマウナケアでシーアイング調査を行なってからである。最初にハワイ大学の88インチ望遠鏡が建設され、その後3~4m級の望遠鏡が相次いで3基（うち2基は赤外線望遠鏡）が1970年代に建設された。現在ではハワイ大学とハワイ

表1 マウナケア国際観測所に設置あるいは設置予定の望遠鏡

名 称 (所属国)	完 成 年	口径(m)	備 考
光学赤外線望遠鏡			
①ハワイ大学 60 cm (アメリカ)	1969	0.60	
②ハワイ大学 60 cm (アメリカ)		0.61	
③ハワイ大学 88 インチ (アメリカ)	1970	2.23	4200 m の山頂に置かれた最初の大望遠鏡
④NASA-IRTF (アメリカ)	1979	3.00	赤外線専用望遠鏡
⑤CFHT (カナダ・フランス・アメリカ)	1979	3.57	古典型の枠を尽くした光学望遠鏡
⑥UKIRT (イギリス・オランダ)	1980	3.89	赤外線専用望遠鏡
⑦WMRT (アメリカ)	1990年代	10	分割主鏡 (36 枚), 光学赤外線望遠鏡
⑧大型光学赤外線望遠鏡 (日本)	1990年代	7.5	一枚主鏡, 光学赤外線望遠鏡
⑨USA 8 m (アメリカ)	1990年代?	8	詳細未定
ミリ波・サブミリ波用望遠鏡			
⑩CSO (アメリカ)	1987	10	サブミリ波用
⑪J.C. Maxwell (イギリス・オランダ・カナダ)	1987	15	ミリ波用
⑫NRAO 25 m (アメリカ)	1990年代	25	ミリ波用, 10 台の VLBA の一台
⑬サブミリアレイ (アメリカ)	1990年代?		サブミリ波用アレイ干渉計, 詳細未定

州との間に西暦 2033 年までの借地協定が結ばれていて、山頂を含む科学指定地区（高度 12000 feet 以上）には望遠鏡を 13 基まで建設してもよいことになっており、建設予定のものまで含めると 11 基はすでに決まっている（表 1, ⑫⑬は計画中）。マウナケアでの可視光でのシャーディングは、平均で 0.5 s, 最高記録は 0.25 s である。

2. 光学設計仕様

JNLT の主鏡の口径は 7.5 m で焦点距離 15 m (F/2) である。この口径は現在活躍している 3~4 m 級の望遠鏡の 4~5 倍の光量を集め、また赤外線領域（波長 10 μm ）で角度の 0.1 秒の分解能を達成するのに必要な大きさである。F/2 という比較的明るい開口比は、望遠鏡およびドームの軽量化という要請から決まったものである。

観測位置は主焦点、カセグレン焦点（リッチャー・クレーチェン焦点）、ナスマス焦点（左右 2 カ所）、クーデ焦点が考えられている（図 1）。カセグレン焦点およびナスマス焦点は F/12.5 になっている。この F ナンバーでも副鏡の直径は約 1.3 m くらいあり、これより大きくなると副鏡支持が困難になる。

主鏡、副鏡の形状は大まかには双曲面形状の非球面であり、この 2 鏡の系は、副焦点（カセグレン焦点、ナスマス焦点）で球面収差とコマがないリッチャー・クレーチェン系を構成している。

主鏡が近似的に双曲面なので、その直接焦点では球面

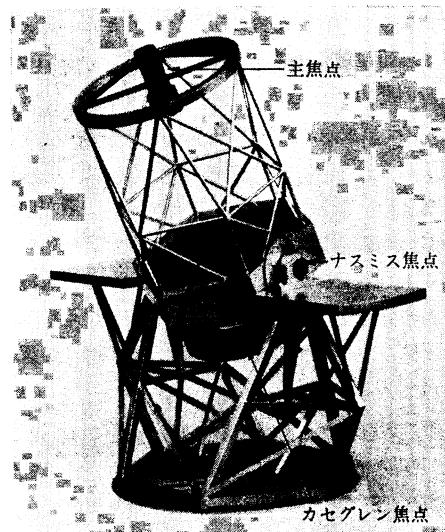


図 1 JNLT の観測位置

収差が残る。したがって少なくともその補正をしないと良い像が得られない。各種の収差をかなりよく取った大望遠鏡主焦点での 3 枚レンズの補正系が、最初ウィンによって発表され¹⁾、チリのラシーヤ (La Silla) にある ESO の 4 m 望遠鏡のために作られた。これは球面のみで構成されていたが、第 1 レンズが凸レンズで端面での厚さが小さくなり、重力によるたわみのために設計したところの性能が出なかった。その後数人によって第 2 レンズの後面に非球面を用いた設計がなされた²⁻⁴⁾。その結果は第 1 レンズがほぼメニスカスになったので、重力に

表 2 青用補正系の光学パラメータ

面番号	半径	間隔	材質	有効径	備考
1	-30000	-13872	空気	7500	Mirror*
2	-489.157	-56	UBK7	640.52	
3	-488.386	-653.090	空気	291.88	
4	-1257.429	-16	UBK7	**	
5	-268.136	-266.096	空気	249.50	***
6	-327.643	-32	UBK7		
7	8194.237	-161.178	空気	157.02	
8	∞	-10	UBK7		
9	∞	-5	空気		

* 放物面+多項式 $A_4=4.764e-17$, $A_6=-7.04e-26$, $A_8=1.8e-34$

** 球面+多項式 $A_4=8.1098e-10$, $A_6=3.338e-15$

*** 球面+多項式 $A_4=-4.7579e-11$, $A_6=-1.751e-14$

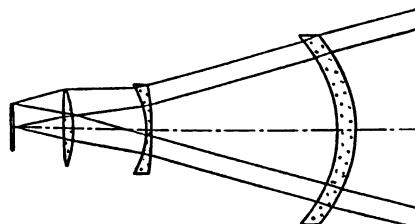
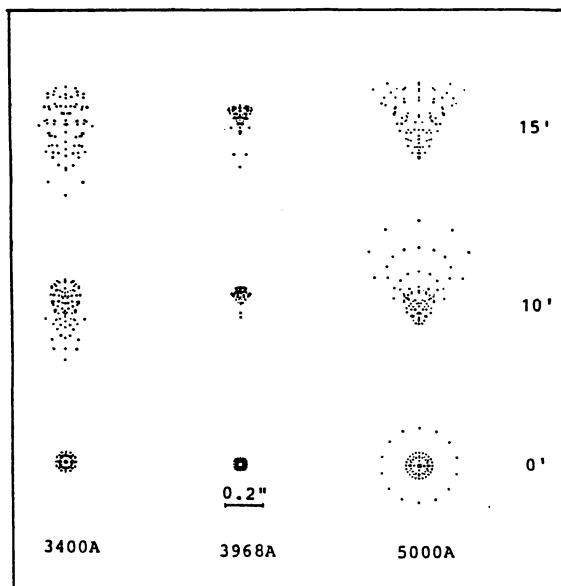


図 2 主焦点補正系の構成例

軸上および画角 15 分角からの光束を示す。図の右約 14 m のところに JNLT の主鏡がある。最終焦点距離 17.162 m。結像性能を表わすスポット図は図 3 参照。

図 3 広写野補正系によるスポット図
青用のものを示す。

よるたわみの問題は軽減されていると考えられる。これらの非球面を 1 枚用いた設計では、副焦点での F ナンバーが F/8 とか F/9 くらいに対応して、主鏡の離心率が大きいときには良い結果を得ることができた。しかし副焦点での F ナンバーが大きいと、副鏡の直径が大きくなつて支持が困難になる、という問題が生じる。われわれは第 2 レンズの後面と第 3 レンズの前面に非球面を用いることによって、F/12.5 に対応した主鏡についても希望どおりの補正系が設計できることを示した⁵⁾。コーティングの要請から波長 340~500 nm 用と 440 nm~1 μm 用の二つ（以下青用、赤用と呼ぶ）に分けた設計も行なつた⁶⁾。表 2 に青用補正系の光学パラメーターを示し、図 2 に断面図を示した。図 3 はその補正系によって得られる平均最良像面でのスポット図である。赤用については文献 6) を参照されたい。

3. 望遠鏡の形式

現在進められている大望遠鏡計画は大別して単一鏡、合成鏡、複合鏡、集合鏡の四つの形式に分けられる（表 3、図 4）。

単一鏡は従来どおりの一枚の鏡で集光するものである。われわれの大型光学赤外線望遠鏡はこれにあたる。

合成鏡は小さな鏡を組み合わせて大きな口径を実現するもので、ケック望遠鏡がこれにあたる。この利点は大きな鏡材と大きな研磨機を必要としないことである。しかしのおのの鏡は軸対称ではないので、ストレスをかけた状態で研磨し、ストレスを取ると希望の面形状になる、というむずかしい技術が使われる。この段階までは鏡は円形であるが、この後、組み合わせたときに隙間が小さくなるように、端を切り落として 6 角形にしなくてはならない。ケック望遠鏡の製作は現在までに 36 枚のうち 3 枚の研磨が終了したが、この 6 角形にする過程で予期しなかった問題が生じた、と報告されている。

複合鏡は単一鏡数枚を同一架台に乗せるものである。この形式の望遠鏡では、合成焦点ではおのの鏡による焦点面が少しづつ傾いているので、視野が極端に小さくなるのが問題である。マルチミラーテレスコープ (MMT) は 6 枚の鏡を使っている。

集合鏡は、単一鏡による望遠鏡を数台適当な距離を置いて設置して、干渉計として使用するものである。一台だけについて考えれば単一鏡と同じになる。ヨーロッパ南天文台 (ESO) の VLT 計画はこの方式を採用している。

表3 世界における大望遠鏡計画

望遠鏡	機関	主鏡	設置場所	状況
ケック望遠鏡 (WMKT)	カリフォルニア天文学連合	10m, 36分割	ハワイ	建設中
JNLT	日本国立天文台	7.5m, 単体薄メニスカス	ハワイ	準備中
VLT	ヨーロッパ南天文台	8m (4基の No. 1), 単体薄メニスカス	チリ	準備中
コロンブス望遠鏡 US 8m	イタリア・アリゾナ大等 米国立天文台	8m×2, ハニカム 7~8m, 薄メニスカス	アリゾナ ハワイ チリ	計画中 計画中
マゼラン望遠鏡	カーネギー+ジョンズホプキンス大	8m, ハニカム	チリ	計画中
ドイツ大望遠鏡 ソ連大望遠鏡	西ドイツ ソ連	12m, 4~6分割 未詳		未定
分光探査望遠鏡	テキサス大	9m, 分割固定球面	テキサス	準備中

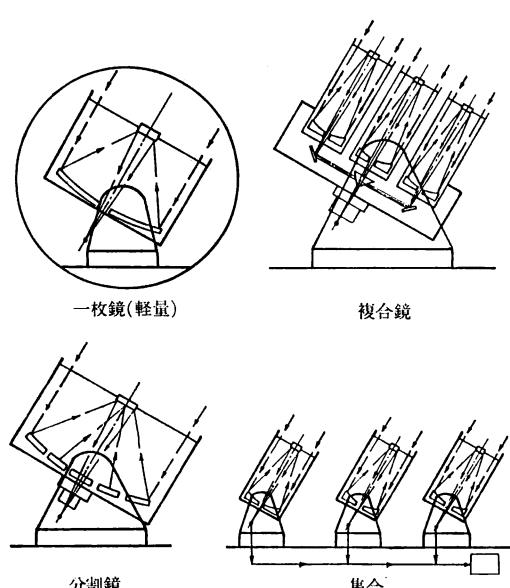


図4 新技術反射望遠鏡の諸様式 (表3参照)

4. 鏡の構造、鏡材

鏡は自重によって歪む。従来は鏡の厚さを口径の1/6くらいにすれば十分高い剛性をもち、てこを使った受動的支持機構で鏡面精度を保てる、とされていた。しかし口径が7.5mにもなると厚さが1mを越し、重さが100トン以上になって精密な駆動ができなくなるし、それ以前の問題としてひずみがない材料を作るのに要する冷却時間が数十年もかかってしまう。そのために世界では二つの新しい技術の開発が進行中である。

一つは図5のように鏡を厚さ200mm程度の薄いメニスカス形状にして精密な支持機構を使う方法である。

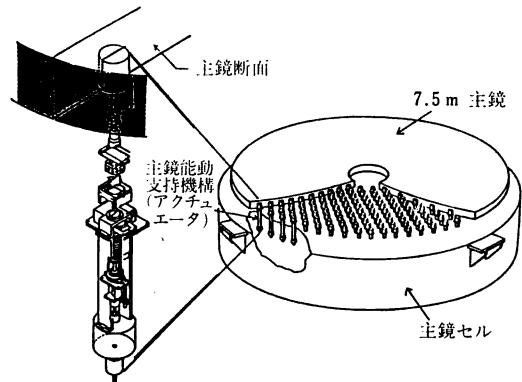


図5 7.5 m 薄メニスカス主鏡の概観

これはコンピューターを使った有限要素法で必要な鏡面精度を保つための数百点の支持点で必要な力の計算が可能になったことと、精密な力制御ができる技術が使えるようになったことによっている。

もう一つは、厚さは従来どおりにするが中を蜂の巣状にして、強度はあるが重量は少ない鏡を作るという方法である。製作方法は多種多様で、一枚の鏡材からくり抜く方法、薄いガラス板で蜂の巣状の部分と上下の面を貼付けて作る方法（人工衛星用の望遠鏡）、ガラスの鋳込みのときに空洞部分に対応する粘土型を埋め込んでおく方法（ヘル望遠鏡）などがある。アリゾナ大学で大型鏡用に開発されているハニカム鏡はガラス材の厚さが20mm程度になるような鋳型をつくってガラス材料を流し込むもので、ヘル望遠鏡に使われた方法をさらに進めたものといえる。

鏡は温度変化によっても変形する。このため膨張係数は小さいほうがよい。コーニング社のULEやショット社のゼロデュアは膨張係数が $4 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ 程度であり、

薄メニスカス法ではこのようなガラス材を使用する。ハニカム鏡の鋸込みではガラス材料の粘性が高いと、鋸込んだときにガラス材がうまく型の間に流れ込まない。このため ULE やゼロデュアは使えず、パイレックス系のガラス（膨張係数は $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 程度）を使うことになる。アリゾナ大学では小原光学の E 6 ガラスを使って良い結果を得ている。

7.5 m, F/2 の鏡面は軸上で縁から約 230 mm 下がっている。これを平らな鏡材から掘削整形するのはたいへんだし、ガラス材にも無駄が多い。ULE の場合は平らな鏡材を炉にいれて型に落とす方法でこの手間を省いている。ゼロデュア、ハニカム鏡は遠心力によって周辺が盛り上がる効果を利用した回転する炉を使用している。

温度変化による変形を評価した結果、JNLT の要求する精度を達成するにはハニカム鏡は適当ではないことが判明した。JNLT では ULE などの超低膨張ガラスの薄メニスカス鏡を使って支持精度を上げる方法を採用することになっている。

5. 支持方法

主鏡の姿勢は水平からほぼ垂直まで変化する。各支持点は鏡面各部の重心位置になるよう、そして各支持点の支持力が等しくなるように決められており、主鏡の傾きが変わっても重力による曲げモーメントは生じないようになっている。

板の重力によるたわみは支持点の間隔の 4 乗に比例し、厚さの 2 乗に逆比例する。この量は鏡が水平のときに最大値を取り、鏡が垂直のときにはゼロになる。最大たわみによる面の法線のずれが 0.1 秒を越えないという条件から、厚さ 200 mm の ULE ガラスを使った場合は支持点の間隔が約 500 mm という結果を得る。JNLT では図 5 に見られるようなアクチュエーターを用いた 390 の支持点を配置している。

支持点での力は鏡軸に平行な方向と垂直方向の成分に分解される。このうち垂直方向の力はてこを使った機構で支えられる。鏡軸方向の力はロードセルで計りながらアクチュエーターで必要な力をだして支持する。民間との共同研究で国立天文台（旧東京天文台）と三菱電機は加える力に対する相対的な力精度 10^{-4} の支持機構を開発した。

鏡面が正しい面を保つようにするために必要な各点での力は姿勢によって変わるので、これは有限要素法を使って計算されて制御を行なうが、さらに高い精度を得るために、シャック・ハルトマン法という星像を使った検査

によってアクチュエーターの力を制御する。

6. 研磨、検査

焦点距離 7.5 m, F/2 の鏡の曲率中心は鏡から 30 m の所にある。検査はヌルレンズあるいはゾーンプレートを使った干渉計を曲率中心近くにセットして行なう。このような距離になると検査室の空気のゆらぎが検査の障害になるので、温度変化の非常に少ない研磨および検査場所が必要になる。塔の中を真空にするとか、ヘリウムを詰めるとかいう方法も提案されている。

7. マウンティング

従来光学望遠鏡には、赤道儀式の架台が使われてきたが、大型のものには経緯台方式が採用されるようになってきている。JNLT でも経緯台方式を採用した。構造が簡単で、鏡筒も一方向だけの変形を考慮すればよいためである。しかし、駆動は経度緯度の 2 方向に計算機制御で行なわなければならない。また、写野が回転するので、画像を撮る場合にはその補償機構を付けなければならない。

赤道儀の場合は鏡筒がどの方向に傾いても主鏡と副鏡の相対位置が変わらないようにセルリエ・トラスが使われる。これはパロマーのヘル望遠鏡の製作の際に開発された。JNLT は経緯台なので図 6 に示したようなトラスを用いて剛性をあげ、重量を減らしている。

8. ドームとシーリング

シーリングの悪化を起こす空気の乱れは、大きく分けて上空の空気によるもの、地表乱流によるもの、ドームに起因するものがある。1 番目は設置場所の選定で決まってしまう。2 番目は建設地点とドームの高さを選んで少なくなるようにする。3 番目にはいままであまり注意が払われていなかったが、他の二つが小さくなるにつれて、もっと努力しなければならないことがわかつってきた。ドームには望遠鏡を風雨から護るという大切な役目

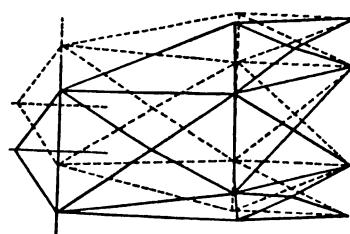


図 6 自重変形（高度角 90°）を相殺する
ようなトラス構造設計の例

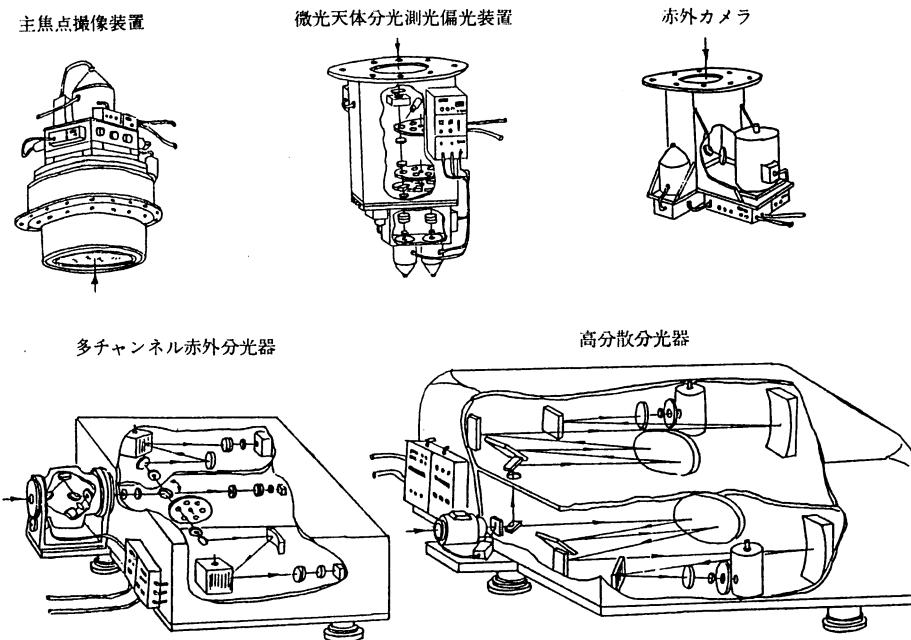


図 7 観測装置の概念図

表 4 大型光学赤外線望遠鏡の観測装置例一覧

初期立上げ装置	順次開発装置
主焦点撮像装置	多天体同時分光器
微光天体分光測光偏光計	グリズム分光器
赤外カメラ	中分散分光器
多チャンネル赤外分光器	赤外フーリエ分光器
高分散分光器	可視光用ファブリ・ペロー分光器

赤外線用ファブリ・ペロー分光器
干涉観測装置

的成果が得られるものとして光3個と赤外2個を考えられている(表4、図7参照)。望遠鏡完成後は年次計画に従って、順次その時点での最新の観測機器を開発していくことになる。

10. 体制

国立天文台にJNLT国内推進本部、ハワイ島にハワイ観測所を置く。ハワイ観測所には国内推進本部や関連研究所から交替で派遣されて勤務する日本人の天文学者・技術者と現地で雇用する人がいて、望遠鏡の保守・整備と観測者に対する支援を行なう。道路、水、電気、通信等、マウナケア観測所全体の管理はハワイ大学がマウナケア・サポート・サービスを通じて行なっている。その状況は山頂を利用している機関の代表者の会議に報告され、各機関はあらかじめ決められた比率にしたがってその費用を負担する。

観測は原則として日本から天文学者・技術者のチームが現地に出張し、決められた期間観測する。観測計画は公募し、審査の上決定する。

この文を書くにあたり、国立天文台大型望遠鏡準備室が編集したパンフレット⁷⁾から図や表を転用した。もっと詳しい内容を知りたい方はそちらを参照していただきたい。

9. 観測機器

科学的な使命を果たせる望遠鏡の寿命は約30ないし50年といわれているが、検出器は数年の単位で進歩しているので、一つの観測機器の使用期間は約5年くらいと思われる。当初の観測機器としては簡単でしかも科学

文 献

- 1) C.G. Wynne: "Afocal correctors for paraboloidal mirrors," *Astrophys. J.*, **152** (1967) 1227.
- 2) E.H. Richardson, C.F.W. Harmer and W.A. Grundman: "Better but bigger prime focus corrector lenses for Ritchey-Chretien telescopes," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **206** (1984) 47.
- 3) C. Cao and R.N. Wilson: "An improved prime focus corrector for F/3 true or quasi Ritchey-Chretien telescopes," *Astron. Astrophys.*, **133** (1984) 37.
- 4) H.W. Epps, J.R.P. Angel and E. Anderson: "Advanced wide-field broad passband refracting field corrector," *IAU Coll. No. 79, Very Large Telescope, Their Instrumentation and Programs*, ed. M.-H. Ulrich and K. Kjar (European Southern Observatory, München, 1984).
- 5) K. Nariai, Y. Yamashita and M. Nakagiri: "Characteristics of three-lens corrector for the primary focus of large telescopes," *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, II, **20** (1985) 431-463.
- 6) K. Nariai, Y. Yamashita and M. Nakagiri: "Correctors for the primary focus of 7.5 m telescope," *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, II, **21** (1987) 357-362.
- 7) 国立天文台: 大型光学赤外線望遠鏡計画 (1988).