

大型光学赤外線望遠鏡の概念設計

山下泰正*・西村史朗*

1. 基本的設定

本計画の大型光学赤外線望遠鏡は主鏡口径を5m以上の単一鏡とし、口径7.5mを設計の目標に据えて可視から近赤外において0.1の分解能を得るべく検討が進められている。光学系としては、主焦点はFナンバーをF/2程度とし、ここで写野約0.5の撮像を行う。カセグレン及びナスミス焦点は同一副鏡を用いることを考えF/10ないしF/15とする。赤外用には比較的小口径の振動副鏡系をトップリング付きで別に設け、望遠鏡自体からの熱雑音（赤外放射）を小さくおさえるよう全体として考慮する。架台は大重量を対称性よく支持するため経緯台式を採用する。

2. 大型、高精度化への道

現存する5m以上の望遠鏡にはソ連の6m望遠鏡、パロマーの5m望遠鏡がある。欧米では最近、口径10m以上の望遠鏡の計画がいくつか進められているが、これらの望遠鏡の主鏡は単一鏡ではなくて、いくつかのより小さい鏡を正確に研磨して、それらを精密に制御調整しながら主鏡面を合成する方式（SMT）や、いくつかの望遠鏡を同架させて各望遠鏡による星像が1点に集中するよう、各望遠鏡の向きを正確に制御調整して像を合成する方式（MMT）が採用されている。光学系として安定した高い精度を要求する場合には単一鏡が優れているが、口径7.5m程度が現在単一鏡として製作できる限度であろう。大望遠鏡建設の歴史をみると、それまでの技術的困難をそれぞれの創意工夫によって解決してきたが、その時代の工学とくに精密重工業の技術レベルの高さにも大きく依存している。現代はエレクトロニクス、コンピュータの時代であり、本計画でもそれらをフルに活用していくことになるであろう。

約10年くらい前までは地上で実現できる最良シーイングは1"の程度といわれてきたが、最近の精力的調査によって、高山にある少数の世界的観測適地では良い時には0.3程度の星像が得られることがわかった。ハワイのマウナケア山頂はシーイングの最も良いところであり、0.3のシーイングをフルに活用するには望遠鏡の分解能としては0.1程度が必要である。望遠鏡の性能は全体システムとして判断され、多くの部分では優れた性能をもっているが、弱点があると全体の性能はその弱点に左右されてしまうことが多い。以下では、各部について

大型、高精度化のために重要な点と現在の検討状況について述べる。

3. 鏡材支持機構

光学系は望遠鏡にとって最重要の要素であるが、今後の専門的検討の必要とされる面が多々ある。反射鏡は自重による変形に著しく弱いもので、自重変形によって鏡面が正規の面より傾くと反射光の偏角はその2倍に拡大される。通常、鏡はセルに多数の支持機構（サポート・パッド）を設けて変形させないようにその自重を支える。粗い解析では鏡材を梁または板で近似する。2点で支えられた梁は自重によって2種類の変形を生ずる。梁が水平の場合、第1の歪（ひずみ）は鏡の自重が支点まわりに鏡自身を廻そうとする曲げモーメントによるもので、梁の自重変形は2支点の間で最大になり、そこでの変形量は $(2 \text{ 支点間距離})^4 / (\text{鏡材の厚さ})^2$ に比例する。第2の歪みは自重によって梁と垂直な（重力を含む）面内にすべるもので、せん断歪みという。剪断歪みは $(2 \text{ 支点間距離})^2$ に比例し、鏡の厚さに無関係である。これは厚さを2倍にすると自重は2倍になるが、すべりに抗する断面積も2倍になって打消すからで、このことが従来の主鏡は無駄に厚いといわれてきたゆえんである。弾性限界内では2つの歪みの和が変形量になる。

単一鏡を実際に支持するには、望遠鏡が天球のどの方向を向いても、各パッドに加える上向きの力を丁度各パッドが受け持つ鏡の自重と等しいようする。あたかも鏡がパッドの上に浮いている状態になるので、この方式をフローティング方式という（鏡面位置を一定に保つ方式については清水、磯部両氏の天文月報75巻4号参照）。実際には自重を鉛直方向にそのまま支えるよう支持機構に工夫をするか、光軸方向と鏡の面内の分力に分けて別々に支持するか、また分力への分け方にも種々の考え方

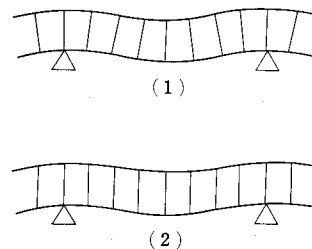


図1 鏡の自重変形の模式図

- (1) 曲げモーメントによるたわみ
(2) 剪断たわみ

* 東京天文台 Yasumasa Yamashita and Shiro Nishimura

ができる。力を加えるだけでは鏡の位置は不定だから位置決めのために通常固定パッドを設ける。固定パッドはなくても位置決めは必要だから下記の事情は変わらない。相隣るパッド間の歪みはもはや制御不能だから支点間隔は充分小さくとらねばならない。しかし実際には鏡全体の変形の方が問題である。支持力に誤差があると鏡の自重のうちの誤差分は固定パッドにかかる。この場合、固定パッド間隔は鏡の口径にほぼ等しく、変形は曲げモーメントによるものが支配的になる。

主鏡材としてはコーニング社製のゼロ膨脹ガラス (ULE) で厚さが口径の 1/20 程度の薄メニスカス鏡、アリゾナ大学で研究している熱制御と重量軽減のため蜂の巣構造をとったハニカム鏡、この場合小原光学の低膨脹ガラスをつかい厚さは口径の約 1/6、などが検討されており、他にもショットのゼロデュアのエッグ・クレート鏡 (板の接着) や穴ぐりによる重量軽減なども考えられているが、前 2 者以外は実現の可能性は薄そうである。

現実の形状をもつ口径 7.5m、厚さ 0.4m の薄メニスカス鏡について、計算機による自重変形のシミュレーションは渡辺正明氏によって精力的に進められ、いろんな事情がかなりわかってきた。ローカルな変形量は計算誤差、採用した定数の誤差、安全率などを考慮して 50nm を目標としている。鏡を水平にした場合、サポート・パッド (支持点) は 150~200 個必要であり、許容支持力誤差は約 2kg、鏡の重量は約 40 トンありパッド 1 個当り約 200kg の自重を支えているから許容誤差は約 1% である。鏡を立てた場合には鏡面に沿っての支持パッド数は 40 個程度と少なくともすむが 1 個当り約 1 トンを持たねばならない。鏡を任意に傾けた場合、鏡の重心まわりの回転モーメントを常に正確にゼロにするのはフィード・バック機構なしには困難だから、鏡が倒れよう、あるいは起きようとする回転モーメントは鏡背面の固定パッドで受けることになる。この誤差支持力による鏡面の変形が著しく大きいことがわかった。フィード・バックの機構あるいは固定パッドなしで位置決めする方法などを考えねばならない。この回転モーメントを止めるために生ずる鏡面変形は程度の差はあってもハニカム鏡でも起こることである。ハニカム鏡については現在計算が進行中であり、詳細は後にゆずりたい。これらの計算結果を活用して主鏡、副鏡の支持機構を早急に検討することが必要である。

鏡材の選択には熱膨脹、温度変化の時定数や履歴などの熱効果や風による鏡面の振動、研磨の際の研磨圧による変形などの重要な問題がある。特にハニカム鏡の場合には研磨時と建設地との温度差による変形を許容量以下に抑えるには鏡材の熱膨脹係数が 1% の程度まで一様でなければならないことが小平氏によって指摘されてい

る。これらのことを総合して鏡材の選択を早急に進めることが急務である。

4. 光学系

主鏡は口径 7.5m、主焦点での撮像のスケールから F/2 程度を目標とし、カセグレン、ナスミス焦点には古典的カセグレン系の採用が考えられている。例えば F/12.5 とすると収差が 0.71 以下に収まる写野は半径約 2', 焦点面上で半径約 5cm の範囲内で、写野を制限する収差はコマと像面彎曲である。主鏡を放物面とすると光軸上では結像は完全な筈だが、F/2 と明るいため主焦点ではコマが著しく大きく、コマ像が 0.71 以下の領域は半径約 0.2mm とほぼゼロに等しい。この意味では主鏡を放物面に固執する必要はないと考えられる。

主焦点補正レンズ系として現在多く採用されているものはワイン型と呼ばれ、紫外透過の同一ガラス材を用いた分離型の 3 枚玉である。補正レンズ系の基本的性質を知るための調査を成相、茂山、中桐の諸氏と進めている。系に課す条件としては 3 次収差論の言葉でいうと表 1 にかかげた 7 個である。薄レンズ近似ではレンズはパ

表 1 3 次収差除去条件

- | | |
|----|--------------------|
| 1. | 系が与えられた焦点距離をもつこと |
| 2. | ベッツパウル和=0 (像面彎曲ゼロ) |
| 3. | 像位置色収差=0 |
| 4. | 倍率色収差=0 |
| 5. | 球面収差=0 |
| 6. | コマ収差=0 |
| 7. | 非点収差=0 |

ワー (焦点距離の逆数)、ベンディング (パワー一定で前後面の曲率を変えること)、レンズ位置の 3 パラメータで決まる。7 個の条件を満たすには最低 3 枚のレンズが必要であり、3 レンズ系をとると 2 自由度が残る。最初の 4 条件はどのレンズにどうパワーを配分するかのことで決まり、その上でベンディングは後の 3 条件から決まる。4 条件を解いた結果次のことがわかった。全系の焦点距離を主鏡の焦点距離より若干引き伸ばさないと解はない。パワーの配分は主鏡側より正、負、正の配列に限られる。これらの性質は放物面以外の双曲面に対しても全く同じである。後の 3 条件はベンディングの 8 次式だが、実用的な数値範囲では 2 個の解しか見つからない。結局、2×3 自由度の解があり、現在これらを減衰最小二乗法で厚レンズ化し、光線追跡によって光線の収束状況を調べている。これらの厚レンズ解は基準波長で 3 次収差の範囲では完全に無収差だが、主鏡が F/2 と明るいため、高次の収差、3 次収差の色による補正不完全などによって結像の性質は必ずしもよくない。次の課題は同じ手法で系をオプティマイズして最良のものを選び

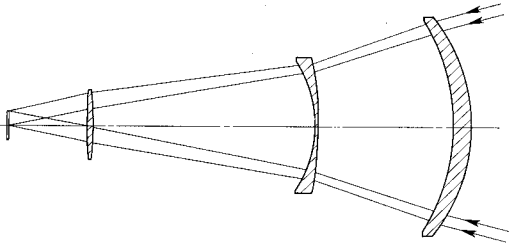


図2 3次収差論で求めた3枚レンズ補正系の解の一つ (No. 2b KP). 7.5 m, F/2 の放物面主鏡は第1レンズの右方 12.8 m にある. 系の合成焦点距離は 17.341 m. 波長 4861 Å で 3 次収差は完全にゼロであるが, 高次収差については未だ最適化されていない. 写野中心及び写角 15' の光線を示した. 第1レンズの直径は約 1.1 m である.

出すことである.

自重変形によって鏡筒がたわむとカセグレン副鏡または主焦点補正レンズ系の光軸ずれが起きる. それによる像の錯乱については成相, 野口, 綾仁の諸氏が光線追跡した. 星像はコマ的な錯乱を示し, 収差を 0%1 におさえるための副鏡の許容横方向変位は 0.2mm, 回転 0'3, 補正系については許容横方向変移 0.2mm, 回転 6' と相当にきびしいものであることがわかった. 光軸方向変移は ±2mm 位までは許容される.

5. 架 台

経緯台は 1976 年に完成したソ連の 6m 望遠鏡をはじめとして, 1978 年の MMT, 建設中のハーシェル望遠鏡に採用され, 現在計画されている大型望遠鏡はすべて経緯台といってよい.

経緯台の利点は, 構造が重力に対して対称性を持つことにある. 赤道儀型式では, 赤緯・時角によって鏡筒や赤緯軸に対する重力の方向が変化する. これに対し経緯台では高度軸より下の部分は回転によって重力の方向が変らないし, 鏡筒部では重力は常に 1 平面内で働く. このことは望遠鏡の構造設計を単純化し, 軽量化することを可能にする. 例えば鏡筒は自重変形に対して上下方向にだけ補強すれば, 水平方向は望遠鏡制御の加速度や風などの衝撃に耐えられるものであればよい. 主鏡の支持方法も, ほとんど 1 方向だけを考えればよい. またグーズ焦点に比べて少ない枚数の鏡で, 安定したナスミス焦点観測台を得られることも, 経緯台の魅力である.

経緯台にはこのような利点がある半面, 制御が複雑になる. 赤道儀では極軸の周りに等速回転を行うだけで日周運動を追尾できたが, 経緯台では高度・方位の両軸を不均等に回転させなければならない. これは計算機を含んだサーボ制御の発達によって可能となった. 天体が天頂付近を通過するさいに, 方位軸周りの速度が大きくなる. しかし毎分 50° 程度まで速度制御が可能であるの

で, 追尾出来ない天域は天頂から約 15' となり, 観測の中断時間はたかだか 1 分と実用上は問題にならない.

今一つの問題は視野の回転である. 星野の撮影や拡大した天体の分光観測では, 機械的あるいは光学的に補償しなければならない. 主焦点で 0°5 の写野では, 要求される視野回転の精度は 10" 程度でよいので, 通常は計算機からの指令で回転補正を行い, オートガイダーからのフィード・バックは追尾を補正する方式で十分である.

6. 駆 動 系

マウナケア山上の良いイメージに見合った精度で追尾を行うには, 機械系に高い精度が要求される. まず回転軸を支える軸受は, 軸を正しい位置に保持すると共に, 摩擦が小さくしなければならない. 摩擦が大きいと, 力を加えて行くと急に大きく動き出すという風に, ぎくしゃくとして滑らかな追尾が難しくなる. 大きな荷重に対しては, 普通の機械に使われている転がり軸受は摩擦が大きく不適當である.

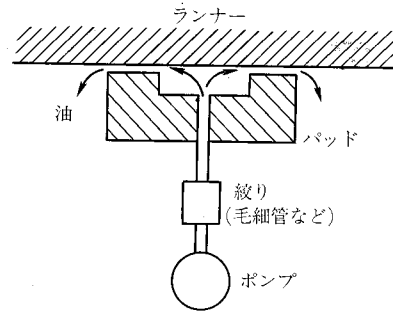


図3 静圧軸受の模式図

静圧軸受は圧力を加えた流体 (通常は油) を凹みに注入して, 回転部との隙間から溢れさせる (ベルヌーイの定理). 適当な条件の下では, 荷重が変動しても隙間の油膜の厚みの変化を小さく押えるように, いい換えると軸受の剛性率を高くする解がある. 7.5m 望遠鏡の方位軸上の重量は約 400 トンで, これを 80cm 平方の 3 つのパッドで受けることが出来る. 油膜の厚みは通常 0.15 mm 程度になるが, ここで 1 トンくらい荷重が変化しても油膜は 0.7 μm しか変化せず, 方位軸の狂いは 0'02 と十分に小さい.

歯車系は最終段の大型歯車が特に重要であるが, 従来スイスでしか作れなかったような 5m に近い精密歯車が国内メーカーで研磨できるようになっている. 現在駆動系に起こる種々の誤差について, 技術的検討が加えられており, オートガイダーを含めたサーボループによって, 0%1 精度の追尾の可能性が得られつつある.

7. 制御システム

計算機とそのソフトウェアによる制御は, 近年ますます望遠鏡システムの中心的要素となっている. そもそ

経緯台は計算機制御なしには不可能であるが、今回の計画では計算機が最大限に利用される。制御システムに計算機を導入するメリットは、汎用的なハードウェアの高い信頼性と、専用のソフトウェアによってもたらされる制御の複雑さと柔軟さにある。望遠鏡・ドームなどからの情報はそれぞれの発生源である程度処理され、システムで必要な情報だけが、中心にある計算機に送られる。これらのローカル処理には多くのマイクロプロセッサが使用される。

観測装置とのインタフェースを規格化しておく（例えば GPIB あるいは CAMAC）、観測者が持ち込む新装置との接続が容易になる。各焦点部と計算機との間は、光ファイバーを用いた高速伝送路によって各種データを時分割で送り、伝送線の本数を極力押える。従来のような多芯ケーブルが機械系に摩擦として働き精密な追尾を妨げるという難点が解決される。

望遠鏡制御には柔軟な入出力機能と高精度の計算能力を持ったミニコンピュータが必要である。経緯台制御は、0.1秒～0.01秒程度の間隔で、位置読み取りや制御指令を行えばよいので、計算機にとっては比較的容易であるが、ドームなどを含め多種類の情報を処理する必要がある。観測装置の制御用計算機は、画像検出器や高速測光のデータを扱うため、高速の入出力機能を必要とする。観測データベース管理には画像プロセッサなどをもった汎用大型計算機システムが適している。

計算機の信頼性は向上しているが、貴重な観測時間を失わないよう、バックアップ用のシステムを用意しておかねばならない。上述のマイクロプロセッサの場合は、ハードウェアを標準化しておき、個別の機能は書き込まれたソフトウェアで果たすようにして、互換性を高めてスペア部品を減らすように計画する。

マウナケア山上と山麓基地および日本国内基地との間に遠隔操作を計画している。今後10年間に通信回線技術の進展とコストの低下が期待される。山麓基地との間では、機器の遠隔診断と保守指令の送受を行い、山上の厳しい環境を考慮して遠隔保守を推進する。日本国内へは、視野確認画面や観測データのモニタ情報を送り、直接的あるいは間接的に操作指令を送り出す。

8. 観測装置

現在までに検討されている主な観測装置を簡単に説明しておく。

主焦点では、カメラが最も基本的な装置としてあげられる。伝統的な写真は望遠鏡の広視野を活かした銀河団や広がった天体の観測に用いられるであろう。しかし量子効率と精度において勝れた CCD などの固体画像素子が、写真と相補的に多用されると予想される。今はまだ CD は写真に比べて画素数が少ないが、10年後には格

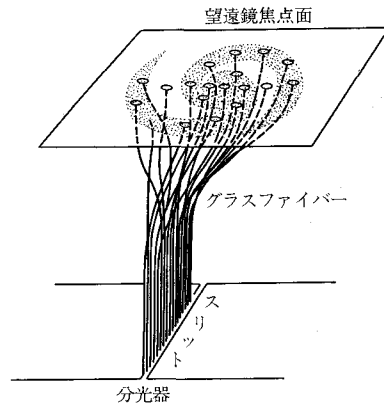


図4 多天体分光器への光の導入

段の進歩が期待されるし、さらに素子をモザイク的に並べて視野を拡大することも試みる。また赤外画像検出器の開発も重要な目標の1つである。

広視野を活用したもう一つの装置は、多天体分光器である。望遠鏡の焦点面においた板上に、あらかじめ観測計画に従って小穴を多数開けておき、ガラスファイバで各穴からの光を分光器スリットの別々の場所に導く。この辺りの様子が、ギリシャ神話の蛇髪の魔女を想起させるので、メデューサ分光器と呼ぶことがある。我々はファイバーの位置を可変として、コンピュータで制御することも考えている。主焦点の像をナスミス台においた分光器に導くことになる。

カセグレン焦点は主焦点に比べてやや大型の装置がつくこと、ナスミス焦点に比べて反射が1回少なく、光の損失や赤外の熱放射が少ないので、暗い天体や赤外観測に適している。特に斜反射がないことで偏光観測に最適である。測光器は赤外から可視域までをターレット式に交換するものが検討されている。また凹面格子を用いた低分散高能率分光器で分光測光を行う計画もある。さらにこれらに前置光学系として偏光解析装置を挿入して、偏光測光および偏光分光測光観測を行うようにする。

ナスミス焦点は、姿勢が安定していて、最も大型の観測装置をおける場所である。一方のナスミス台には主に可視域の、他方には主に赤外域の観測装置が設置されていて、第3鏡の切替によって、いずれかが使用可能となる。可視域では、まず長いスリットを持った中分散分光器（分解能 10^3 - 10^4 ）があり、これは視野回転を補償するために、分光器全体を回転させる。この分光器が広がった天体や暗い恒星のためのものであるのに対して、明るい恒星のために高分散エッセル分光器（分解能 10^4 - 10^5 ）を作る。その他にすでに岡山観測所で実験が行われているフーリエ分光器、ファブリペロ分光器も、さらに高性能のものに発展させて行く。赤外域では観測装置内で発生

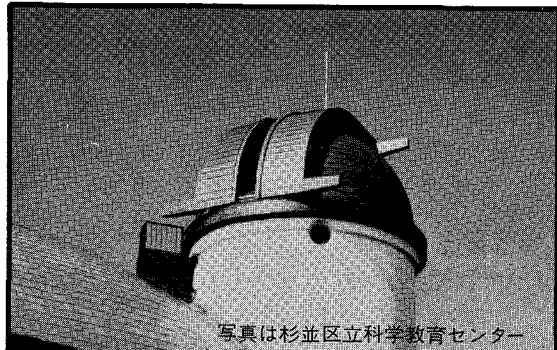
する背景雑音を減らすために分光系を冷却した分光器や、赤外用フェブリペロ分光器が主体となる。

観測装置のバックエンドとなる各種検出器の開発も観測の効率を規定する重要な要素である。CCDを始めとする固体画像素子と、極限微弱光のための映像増幅管と固体素子の組合せの双方の開発が始められている。

以上のような観測装置は現在の技術で実現可能のものであるが、今後望遠鏡が完成するまでの約10年の間はむろんのこと、定常運行に入ってから、不断の努力で更新を行わねばならない。望遠鏡には製作時点の最高の技術が注入されるが、完成後は性能改善の余地は比較的少ない。これに対して観測装置は、その開発改良によって望遠鏡の総合性能をさらに高めることができる。

9. おわりに

大型光学赤外線望遠鏡について重要と思われる点を列挙解説したが、鏡材、支持機構の問題は早急に検討を進めねばならない。また今後の検討によって変更の必要な点もあるであろう。このサイズの望遠鏡には既存の知識技術だけではすまされない点が多々あり、関係者の叡智の結集をお願いする。



写真は杉並区立科学教育センター

★営業 ASIB 品目★
天体望遠鏡と双眼鏡
ドームの設計と施工

▶主なドーム納入先◀

東京大学宇宙航空研究所/東京大学教養学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/川崎市青少年科学館/杉並区立科学教育センター/駿台学園高校(北軽井沢)/船橋市立高校/高知学園/土佐市公民館/刈谷市中央児童館等の他、日本全国に100余基の実績。

ASTIB 光学工業株式会社

東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321



New and Recent Books

D. Reidel Publishing Company

Alphabetical list of members
International Astronomical Union
Paper ¥3,300
1983 ISBN 90-277-1569-6

The Big Bang and Georges Jemaitre
Berger, A.
440pp. 1984, ISBN 90-277-1848-2
Cloth ¥16,500

Clusters and Groups of Galaxies
Mardirossian, F.
704pp. 1984, ISBN 90-277-1772-9
Cloth ¥26,400 (ASSL 111)

General Relativity and Gravitation
Bertotti, B.
536pp. 1984, ISBN 90-277-1818-9
Cloth ¥19,800 (FTP 9)

Observational Tests of the
Stellar Evolution Theory
Maeder, A.
616pp. 1984, (IAUS 105)
Cloth ¥19,250 ISBN 90-277-1774-5
Paper ¥8,800 ISBN 90-277-1775-3

Physics of Thermal Gaseous
Nebulae (Physical Properties
in Gaseous Nebulae)
Aller, L.H.
356pp. 1984, ISBN 90-277-1814-8
Cloth ¥13,750 (ASSL 112)

Problems of Collapse and
Numerical Relativity
Bancel, D.
416pp. 1984, ISBN 90-277-1816-4
Cloth ¥15,950 (ASIC 134)

Solar Magnetohydrodynamics
revised reprint
Priest, E.R.
496pp. 1984, (GAM 21)
Cloth ¥25,850 ISBN 90-277-1374-X
Paper ¥9,900 ISBN 90-277-1833-4

VLBI Compact Radio Sources
Fanti, R.
512pp. 1984, (IAUS 110)
Cloth ¥15,400 ISBN 90-277-1739-7
Paper ¥7,700 ISBN 90-277-1740-0

D. Reidel Pub
日本総代理店



株式会社 ニュートリノ

東京都港区赤坂8-4-7 カールビル1107 TEL (03)406-6137