

大型光学望遠鏡

1.5m径の鏡となると通常の設計では鏡材の重量だけで100トンをオーバーし巨大なガラス材の製作自体に膨大な費用と年月を要することになる まさに天文学的コストを新技術を駆使して如何に減らすかに苦心する

Large optical telescopes

国立天文台

Iye
家

Masanori
正則

1. 超大型望遠鏡への道

1.1 望遠鏡の発明から20世紀前半まで

望遠鏡が発明されたのは17世紀初めと言われている。ガリレオ・ガリレイが初めて望遠鏡を天体観測に用いて以来、宇宙を見る人類の視力は格段に良くなつて來た。レンズを用いた望遠鏡はヤーキス天文台に完成した口径1.01mの屈折望遠鏡で頂点に達し、20世紀に入ると反射鏡を用いた大口径望遠鏡が次々と建設されるようになつた。1948年に完成したパロマー山天文台の5.08m望遠鏡は、肉眼の約50万倍相当の集光力を有するものとなり、本格的な宇宙の研究に貢献した。

1.2 エレクトロニクスの時代

その後ソ連では6mの望遠鏡が建設されたが、5m以上の望遠鏡の建設は技術的困難が大きく、各国の天文台は口径の増大よりも光学系の効率や観測装置の感度を高める方向に向かった。19世紀中頃以来検出器として用いられてきた写真乾板は、撮像管や固体撮像素子など広い意味の電子カメラに急速に移行してきた。光検出器として用いた場合、写真乳剤では入射光量の1%程度しか有効利用できない。ところが、近年天文観測用検出器の主流となりつつあるCCD(電荷結合素子)カメラでは、最大で入射光子の80%まで光電子としてとらえることができる。1960年代・70年代はまさに、検出器の近代化の時代であったと言える。検出器を改良することにより、望遠鏡口径を大きくしたのと同じ効果を得たのである。

1.3 適材適所

また1960年代/70年代は天文観測に適した建設地を選ぶことの大切さが認識され、立地条件の良い海外に望遠鏡を建設する例が増えてきた時期でもある。その結果、1970年代には優れた4m級望遠鏡がハワイ島マウナケア山頂(4200m)やチリのアンデス山中に相次ぎ建設された。

1.4 新たな飛躍

宇宙時代の天文学の象徴ともいえるスペース・テレスコープ計画は、スペース・シャトルの事故で実現が遅れているが、大気圏外にでることができれば解像力が飛躍的に高まることになり、より鮮明な宇宙の姿を見せてくれることになるだろう。

一方、物理情報量の多いスペクトル観測など、集光力

CCDカメラ；シリコン半導体の内部光電効果を利用して光を電子に変換し素子内に蓄積する機能と蓄積した電子を順次読み出す機能を備えた撮像素子CCD

の大きさが重要な観測では、大気圏外に出るメリットはそれほど大きくはない。地上に超大型望遠鏡を作るほうが安上がりである。1980年代に入って超大型望遠鏡建設の気運が盛り上がってきたのには、二つの理由が挙げられよう。第一には、検出器の効率が80%にも達したため、光学系や検出器における損失を少なくすることがこれ以上は望めなくなり、集光力を増大させるためには望遠鏡の口径を大きくする以外に方法が無くなってきたこと。第二には、コンピューター制御技術などの発達で口径5m以上の超大型望遠鏡の建設が不可能では無くなってきたことである。

2. 口径7.5mのJNLT建設計画

2.1 ハワイ島マウナケア山

国立天文台(旧東京大学東京天文台)では、全国の天文学・天文工学関連研究者・技術者との検討・合意をもとに、直径7.5mの超大型光学赤外線望遠鏡(Japanese National Large Telescope:略称JNLT)を、ハワイ島マウナケア山頂(高度4200m)に建設することを計画している(図1)¹⁻³⁾。マウナケアは晴夜率が高く、海拔高度が高いため大気による星像の乱れが小さく、乾燥していて赤外線観測にも有利な、北半球一の天文観測最適地である。米・英・仏・加・蘭の望遠鏡が既に7台稼働中で、さらに2台が建設中という、いわば国際観測所である(写1)。ハワイ側との仮協定で山頂領域の北西部にJNLTの建設候補地点が確保されている。

2.2 薄皿型軽量主鏡

大型望遠鏡の鏡は、自重変形量を光の波長の数分の一下に抑えねばならないという厳しい制約があるため、従来は十分な剛性を持たせるよう設計された。そのためガラス鏡材の厚さは直径の8分の1程度より薄くはできないとされてきた。しかし、この方式では7.5m径の鏡ともなると、鏡材の重量は100トン以上になる。巨大なガラス材の製作自体が膨大な費用と年月を要するだけでなく、鏡を支える望遠鏡構造物までも重くなり、結果として全体のコストがそれこそ天文学的な額になってしまふ。

主鏡の軽量化にはいくつかの方法がある。パロマー山の5m鏡は裏をくり貫いた。アリゾナ大学や東京天文台では鋳型に流し込むと穴あきの蜂の巣構造になるような

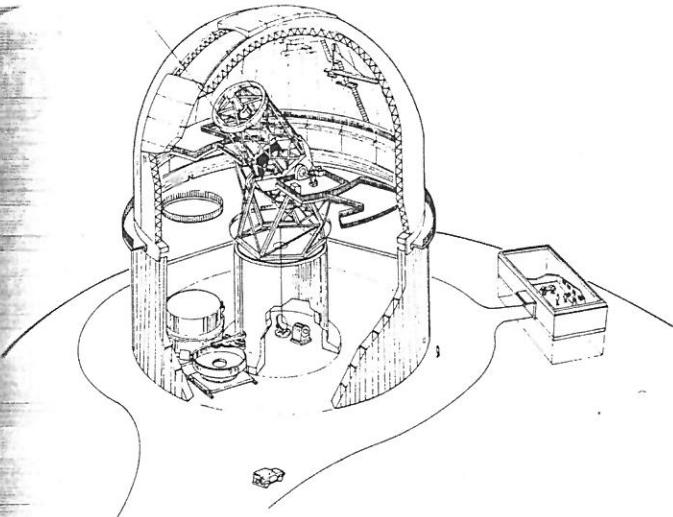


図1 JNLT 完成予想図

鋸造法を開発した。米国のガラス会社では、薄板ガラスを接着したり、溶接して蜂の巣構造の鏡を作る技術を開発している。

JNLTでは、考えられるいくつかの方法を比較検討した結果、超低膨張ガラスを薄皿型に鋸造する方式を採用することにしている。この方法だと主鏡重量は約20トン、従来方式の5分の1以下になる。

鏡は薄いと構造的に柔になり、姿勢の変化や風圧の変化の影響を受け易くなり、そのままでは理想的な鏡面形状を保てない。そこで、後述のように支点の数を増やし、鏡の変形を常時モニターして、各支点の支持力をコンピューター制御することにより、変形を補償するという新しい方式を検討している。この新しい方式を、我々は能動支持方式と呼んでいる。

2.3 主鏡の研磨

主鏡はFナンバーが2の双曲面に仕上げる。直径7.5mにわたって面精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ (10^{-8})で研磨し、天体観測中の様々な姿勢でもこの精度を保たねばならない。主鏡面の測定精度と研磨量の制御精度が鍵となる。

7.5mの鏡を $0.1\mu\text{m}$ の精度で仕上げるということは、たとえてみると関東平野全体を2mmの精度で地ならしするようなものである。研磨時の発熱で鏡が熱変形するという心配は、超低膨張ガラスを用いるため比較的少ない。望遠鏡に装着した時に使うのと同じ支持機構を研磨時にも使うなどの細心の配慮が必要であるが、時間さえかければ研磨は十分に可能なことである。

2.4 自重変形

薄皿型主鏡を採用して軽量化を徹底的に計っても、7.5mの望遠鏡ともなると高度軸回りに回転する部分の重量が110トン、方位軸回りに回転する部分の重量は300トン程度となる。自重による鏡筒のたわみを全く無くすことはできないので、たわんでも光軸が傾かないような構造(セルリエトラス)にする必要がある。鏡自体も柔なので、自重による鏡面のたわみも無視出来ない。有限要素法を用いたカメラ。低雑音、高量子効率など数々の利点があり、数10万画素からなる二次元CCD素子を液体窒素で冷却したカメラが天体観測で近年多用されて



写1 ハワイ島マウナケア国際観測所

左からカナダ・フランス・ハワイ共同3.6m望遠鏡。NASA赤外線専用3m望遠鏡。Keck10m望遠鏡（建設中）。JNLT建設候補地はKeck望遠鏡の右側の台地。

用いた計算によると、直径7.5m、厚さ20cmの薄皿型主鏡の場合には、外乱の無いときには、400個の支持点でバランス良く支えてやれば、自重変形量を $0.1\mu\text{m}$ 以下の許容範囲内に抑えられることが分かる⁴⁾。

2.5 鏡面の測定

主鏡の形状の計測には、二つの方法が考えられている。

一つめは、トンボの複眼に似た微小レンズ群を内蔵した光学系により、主鏡を約1000個の領域に分割し、各領域が作る独立な1000個の星像の位置を実際にモニターして、どの領域がどれだけ理想形状からずれているかを測定する方法である。この方法は、その発明者にちなんでシャック・ハルトマン法と呼ばれている。シャック・ハルトマン法は光学的な測定法であり、望遠鏡の結像性能を直接モニターする方法として重要である。国立天文台で開発したシャック・ハルトマン装置では、鏡面を約 $0.01\mu\text{m}$ の精度で測定できることが実証された。

二つめは、400個の支持点の支持荷重をモニターする方法である。各点で実測した支持荷重がモニターする方法である。各点で実測した支持荷重が、あらかじめ計算しておいた指定値からどうずれているかが分かれば、フックの法則を用いて鏡面の変形状態を求めることができる。この支持力モニター法は、やや間接的だが高速で常時モニターすることができるので、シャック・ハルトマン法のつなぎとして用いるのに適している。

2.6 能動支持システム

2.5で求められた鏡面のずれを補償するように、400個の支持点の支持力を調整するシステムを能動支持システムと呼んでいる。

400個の支持点はそれぞれが最大で約50kgの荷重を受け持つ。望遠鏡が天体を追尾する際には、この荷重を0~50kgの範囲で $\pm 5\text{ g}$ (10^{-4})の精度で制御する必要がある。そのような性能を持つ力支持駆動装置が国立天文台

を中心とする開発チームにより試作された。

直径62cm、厚さ2cmの薄皿型試験鏡をこの支持駆動装置で支え、強制的に鏡面を曲げて、シャック・ハルトマン装置で鏡面の変形量を測定したところ、有限要素法による理論的予測値と一致することが確かめられている。

JNLTでは、鏡の形状の測定に光学的な計測と支持、力分布の情報を併用する。形状の変形状態を把握したら、こんどはそれを直すための支持力の補正量分布を求める。計測と力補正とでサーボ・ループを組む(図2)。

2.7 热特性

熱膨張率が一様で $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 以下の極低膨張率ガラスを用いれば、数 $^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変化があってもガラス面そのものの変形は大きくない。しかし、ガラス材と接触する部分の金属材料などは、ガラス材と膨張率の等しいものを選ぶ必要がある。また、熱容量の大きい鏡が夜間の気温の低下に追随できないと、鏡の表面近くで対流が発生して像を乱す原因となる。したがって、ドームと望遠鏡を冷却して、積極的に温度制御をする方法についても検討している。

2.8 風圧の影響

マウナケア山頂は年平均7m/秒の比較的強い風が吹いている。ただし、平地での風とは異なり乱れの少ない層流であり、気圧も $2/3$ しかないので、風圧の変動は比較的小さい。とは言っても、鏡筒に当たる風は望遠鏡全体を振動させる。鏡に当たる風は鏡面の振動を引き起こすので、ドーム内部での風を抑える工夫が重要となる。風圧の時間変動には速い成分があるが、これをも補償するには極めて高速のサーボシステムが必要となる。

2.9 経緯台式架台

主鏡の形状が理想的なものになったとしても、それだけではまだ天体観測はできない。次に日周運動をする天体を正確に追いかけてやる必要がある。JNLTは従来の1軸駆動の赤道方式ではなく、2軸駆動の経緯台方式を採用する。経緯台方式では駆動速度を計算制御する必要があるが、構造的には単純でバランスが良いのが大きな利点である。目標とする星像の大きさが0.1秒角なので、望遠鏡の追尾誤差も±0.1秒角(5×10^{-7} ラジアン)以下に抑えねばならない。駆動サーボ系には位置制御された2型速度サーボを採用する。比較的風が強いマウナケアで望遠鏡をこの精度で滑らかに動かすためには、超高精度の大型歯車、エンコーダー、滑らかな軸受けなどが必要であり、水平軸・垂直軸の直交性なども厳密に満たされる必要がある。

いる。

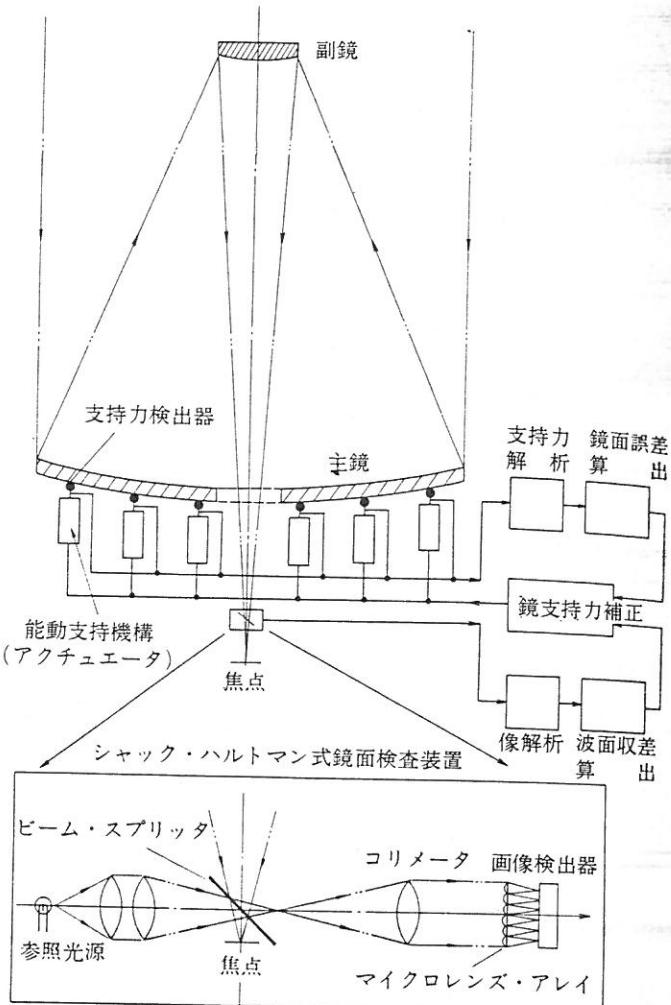


図2 能動支持システム構成原理図。

3. 他国の計画

我国のJNLT計画に匹敵する規模の望遠鏡計画としては、次の三つがあげられる。

(1) 米国のカリフォルニア大学の研究者が中心となって推進している有効口径10mのKeck望遠鏡計画。1.7m口径の鏡を36枚敷き詰めて10m口径と等価な望遠鏡にする計画で、大富豪のKeck財団の基金を得てマウナケア山頂で建設が始められた。

(2) 欧州の国際天文台組織であるESO(欧州南天天文台)が計画中の8m望遠鏡4基からなるVLT計画。JNLTと似た薄皿型主鏡と能動支持方式を採用。建設地は南の宇宙を観測するため南米のチリを予定。

(3) 米国国立天文台は南北両半球に口径8m望遠鏡を1台ずつ造るコロンブス/マゼラン計画を提案中である。

(2)は南天用なので、JNLTと競合するのは当面(1)である。(1)のほうが完成時の合成口径は大きいが、鏡の敷き詰め調整法が難しく、結像性能は $0''.5$ 程度になるものと予想されている。また方式の違いがあるため、赤外線観測での性能や偏光観測/干渉観測などでは、JNLTのほうが優れたものになると期待されている。Keck望遠鏡はJNLTと全く異なる方式の超大型望遠鏡であり、良い

(494ページに続く)

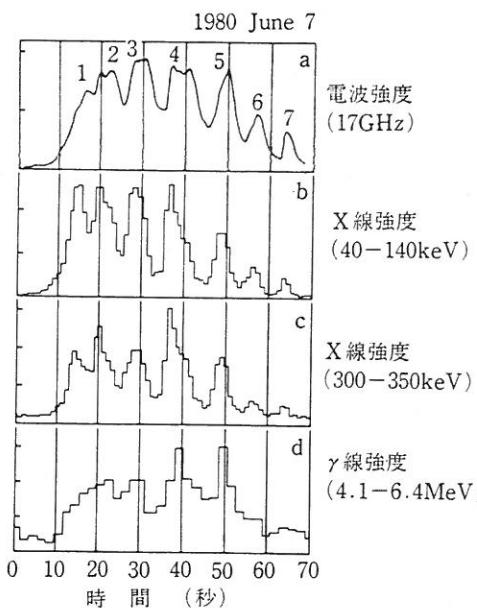


図5 激しく変動するタイプBフレアからのマイクロ波、X線、 γ 線強度の例
高エネルギーのイオンが作り出す γ 線の強度変化の早さが印象的だ。

放射強度比がほとんどのフレアではほぼ同一の値をとることなどから、これまで同一放射源であろうと考えられてきたのであるが、再考を迫られている。

5. 今後の課題と計画

天文現象の例にもれず、太陽フレアも実験で再現できる物理学の対象とは異なり、ひたすら観測機器を整備し

(480ページより続く)

ライバルであるが、Keck 望遠鏡と JNLT を結ぶ光干渉観測の可能性についても検討が始まられている。JNLT の早期建設開始を、我が国のみならず各国の天文学者が切望している。

4. あとがき

JNLT のシステムは、擾乱の多い自然環境の中で重量構造物を超高精度で高速制御するという、工学的には要求の大変厳しいシステムである。鏡の研磨、能動支持システム、風対策、熱制御、…等々、新しい工夫をする技術的課題も多い。

しかし、その中でも技術開発の要とされている能動支持システムについては、国立天文台の研究者を中心とするチームによりプロトタイプモデルを組み上げ、基本的

て次の機会を待つことによって研究の前途がひらけてくる。次の太陽活動の極大期は1991年前後にやってくるが、この時期の我々の重点課題は、①コロナの磁力線の変化をフレアの起こる前、フレアの進行途中、フレアの起こった後にわたって詳しく追跡すること、②粒子の加速と伝播の様子を、磁力線の構造と関係づけつつ、詳しく追跡すること、であろう。この課題をこなすべく、日本の太陽フレア物理学グループが現在準備を進めているプロジェクトを簡単に紹介しておく。

ひとつは、太陽フレア観測衛星計画であり、SOLAR-A プロジェクトと呼ばれている。SOLAR-A 衛星は、より高いエネルギー域の X 線フレア像を撮影しようとする新しいアイデアに基づく硬 X 線撮像望遠鏡、アメリカのグループと共同で開発を進めている軟 X 線ミラー望遠鏡、イギリス、アメリカとの共同で作る軟 X 線の超高分散ブレググ分光器、および X 線から γ 線までのスペクトラルを取得する広帯域分光器を搭載して、1991年に宇宙科学研究所から打ち上げられる予定となっている。この衛星は、この時期に打ち上げられる世界でただひとつの太陽フレア観測衛星であり、国際協力が広く組織されることになっている。

いまひとつは、国立天文台の太陽電波グループが提唱している「電波ヘリオグラフ計画」であるが、これについては、甲斐敬造氏執筆の別項を参照のこと。

な動作確認試験が完了している。

世界の第一線で活躍している我が国の X 線天文衛星や口径45mの宇宙電波望遠鏡とスクラムを組み、JNLT は宇宙の謎を解き明かしてゆくに違いない。日本が基礎科学の分野でも世界に貢献する良いチャンスである。

参考文献

- 1) 小平桂一：大型光学赤外線望遠鏡計画の基本構想、天文月報、78巻、1月号、P 4 (1985)。
- 2) 山下泰正、西村史朗：大型光学赤外線望遠鏡の概念設計、天文月報、78巻、1月号、P 9 (1985)。
- 3) 東京大学東京天文台望遠鏡ワーキンググループ：大型光学赤外線望遠鏡/技術調査経過報告書（昭和59/60年）(1986)。
- 4) M. Watanabe : Deflection Study of 7.5m Lightweight Mirrors, I. Thin Meniscus Mirrors, Ann. Tokyo Astron. Obs. 2nd Series, 21, 3, (1987)