

大型光学望遠鏡の時代

バディ・マーチン, ジョン・ヒル, ロジャー・エンジェル

地上望遠鏡による光学赤外線天文学での今後の飛躍は、より大型の望遠鏡または望遠鏡群によってもたらされる。新しい方式の鏡の登場でいままですとずっと大きい望遠鏡の建設が可能になってきた。

1990年代は望遠鏡の性能が急速に進歩する時代となりそうだ。角度分解能の向上、全波長域での感度の向上、広視野観測の有効利用などで、飛躍的な発展が起きつつある。このような発展を支える技術開発は、単にいままでよりずっと大きな鏡面を必要とするだけでなく、いままで以上に結像性能の良い鏡面を必要とするため、並たいていのものではない。高山の頂にある世界有数の天文台では、条件のよいときには、星像が0.3秒角にまでシャープになりうる気象状況がしばしばあることが、最近わかってきた。ところが、現存の望遠鏡の多くは、実際には星像をここまでシャープにすることができてはいない。

新世代の巨大望遠鏡を建設したいという背景には、天文学的な動機と新技術の可能性への期待がある。波長約10マイクロメートル以上での角度分解能は回折現象で制限されている^{*}。したがって、より高い解像力を得るにはより大きい望遠鏡か光干渉望遠鏡群を実現するしかない。ところが、可視光や近赤外線では少し事情が異なっている。10マイクロメートル以下では、入射光の波面が大気により乱されることが、地上望遠鏡の解像力を制限している。ハッブル宇宙望遠鏡(Physics Today 1990年4月号32ページのオデル氏の記事参照)は波長600ナノメートルで口径2.4メートルの回折限界に相当する0.06秒角の解像力を達成するように設計されていた。現在では、補償光学技術の発展により、地上望遠鏡でもある種の天体については回折限界の結像を可視光領域でさえ、実現する見通しが得られつつある。補償光学技術の実用化はここ数年のうちにも実

現する可能性が高いので、近いうちにすべての波長において解像力が望遠鏡の口径に応じて良くなる時代がくるであろう。

過去40年にわたって、天体観測の感度向上は、望遠鏡の口径の増大よりも検出器の感度向上と検出波長域の拡大によるところが大きかった。固体撮像素子の感度は乳剤写真乾板に比べていまやおおよそ50倍にもなっている^{**}。しかしながら、可視光での検出器の感度向上の歴史は、いまや終わりを告げようとしている。というのも、固体撮像素子の量子効率が100%に近づいているし、読み出し雑音も気にならないほどに小さくなってきているからである。赤外線の2次元検出器はまだこのような域には達していないが、急速な発展により、遠からず可視光と赤外線の差は解消されることになるだろう。

解像力と感度の向上は、このような状況のため、今後はより大きな望遠鏡か望遠鏡群の建設によってのみ実現可能である。このため世界中で次世代の大型地上望遠鏡を建設する機運が盛り上がっている。単一または複数の8メートル級望遠鏡を建設する計画が、欧州、日本、米国で進行中であり、他の国々も計画を練っている。1990年代には、過去20年間に比べて、全世界の天文学者が使える望遠鏡の全集光力は約4倍になり、新しい望遠鏡の効率は既存の望遠鏡の約10倍にも達するものになるであろう。

この解説では、新しい大型地上望遠鏡の建設に関して開発されつつある新技術の概念を紹介する。紹介の大部分は主鏡の製造に関するものである。というのも、大型主鏡の製造こそ最大の技術的課題だからである。わがアリゾ

* 1(訳注) 波長 λ マイクロメートル、口径 D メートルの望遠鏡の回折限界は $0.25\lambda/D$ 秒角となる。

* 2(訳注) 光化学反応を用いる写真乳剤の量子効率は1~2%だが、半導体の内部光電効果を用いるCCDでは最高で80%程度に達する。

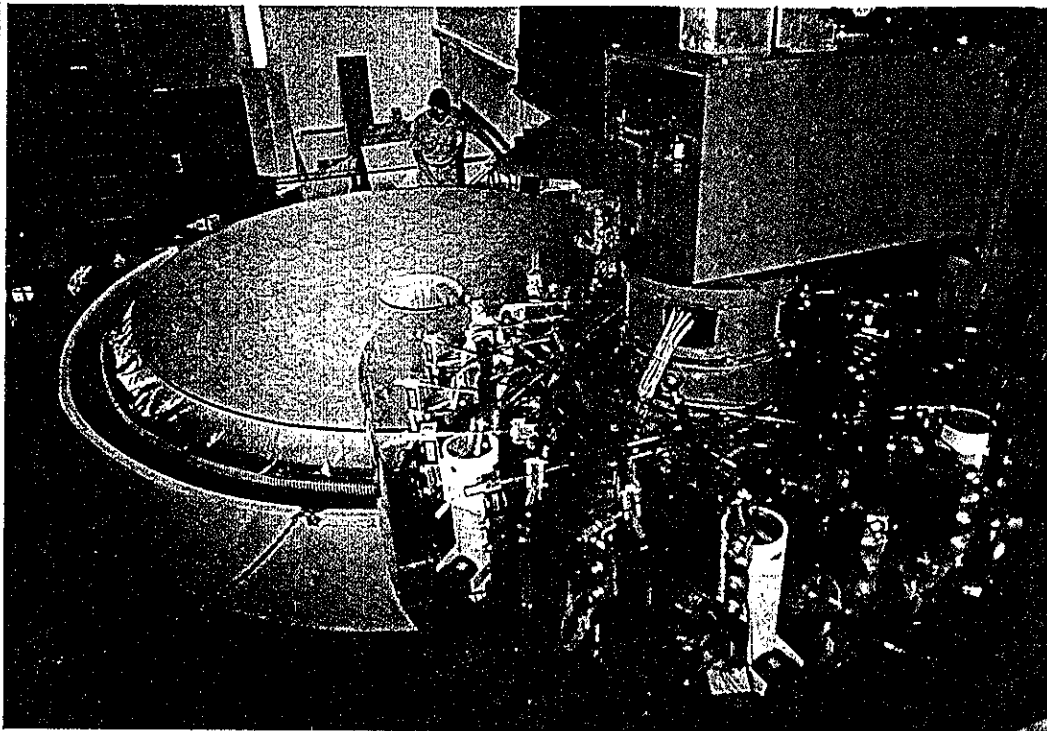
家 正則 訳

The new ground-based optical telescopes

Buddy Martin, John M. Hill, Roger Angel

Buddy Martin, John Hill and Roger Angel are all at the University of Arizona's Steward Observatory, where Martin is project scientist for mirror polishing, Hill is Columbus Project technical coordinator and Angel is director of the Mirror Laboratory.

© 1991 American Institute of Physics



ナ大学光学研究所(〈図1〉参照)のような大型施設が、このようなかつてないサイズと精度の巨大鏡を製作するために、いくつか建設されつつある。

〈表1〉に建設中または設計の具体化が進んでいる望遠鏡計画をリストアップした⁷⁾。鍵となる技術的な進歩は鏡の製造法にある。というのも、主鏡のサイズ、重量、剛性と焦点距離が、望遠鏡設計において重要な要素となるからである。30年間ほとんど目立った発展がなかったのに、1980年代になってからまったく異なる3通りの大型主鏡製造法が登場したのは、興味深いことである。3つの新しい主鏡方式は世界中のそれぞれ別のグループにより活発な研究開発が進められ、健全なライバル関係ができている。このような開発努力により、やがてはさらに強力な望遠鏡が21世紀初頭に完成されるかもしれない。

目標性能

光学赤外線用地上望遠鏡は、地球大気の透過率によって決まる0.3~30マイクロメートルのスペクトル域で使用する⁸⁾。新しい大型望遠鏡の場合、この波

〈図1〉 スチュワード天文台の鏡工學研究所の新しい研磨施設

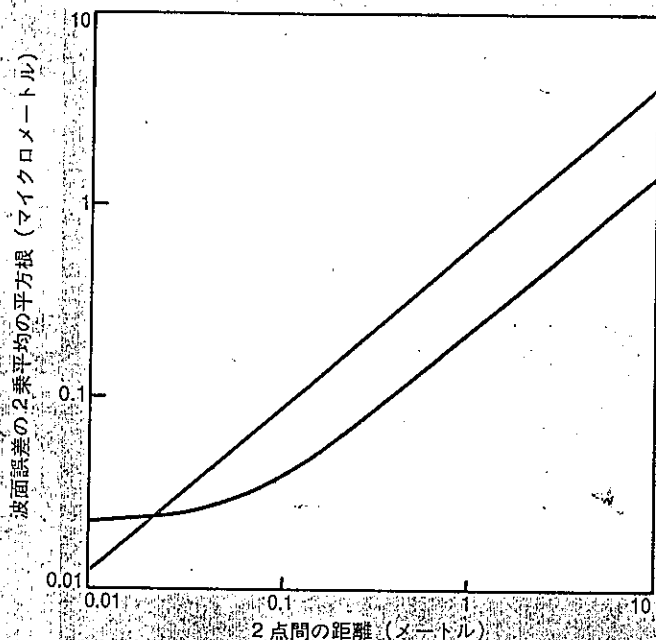
この施設は8メートル級の鏡を磨く能力を備えた最初の施設である。写真の3.5メートル、 $f/1.5$ のハネカムサンドイッチ鏡は短焦点用の大型鏡を研磨するために開発された曲げラップ法により研磨されているところである。

*3(訳注) 波長0.3マイクロメートル以下の紫外光はオゾンにより、また30マイクロメートル以上の赤外光は水蒸気分子により吸収されるため、地表にまで届かない。

*4(訳注) この表のうち、具体的な予算がついて建設が始まっているのは、VLT、ケック、JNL、MMT改修である。

〈表1〉 新世代の主な地上大型望遠鏡⁸⁾

計画名	組織	主鏡面積 (m^2)	主鏡の型	参考文献
VLT	欧州南天天文台	210	8.2メートルガラスセラミック 4台の独立な望遠鏡	1
コロンブス	イタリア オハイオ大学 アリゾナ大学	110	8.4メートルポリシリケート ハネカムサンドイッチ2台	2
ケック	カルテック カリフォルニア大学	76	1.8メートルガラスセラミック	3
マゼラン	カーネギー研究所 ジョン・ホプキンス大学 アリゾナ大学	50	36枚の六角部分鏡 8メートルポリシリケート ハネカムサンドイッチ	4
NOAO (北)	NOAO 英国 カナダ	50	8メートルポリシリケート ハネカムサンドイッチ	5
NOAO (南)	NOAO 英国 カナダ	50	8メートルポリシリケート ハネカムサンドイッチ	5
JNL	国立天文台(日本)	44*12(p.16)	7.5メートル*12ゼロ膨張 メニスカス	6
MMT改修	スミソニアン研究所 アリゾナ大学	33	6.5メートルポリシリケート ハネカムサンドイッチ	7



〈図2〉 大気による波面の乱れと望遠鏡の光学仕様

青い曲線は最良のシーイング状態(500 ナノメートルで半値全幅 0.33 秒角)での大気による波面の乱れを示す。黒い曲線は大型主鏡鏡面に対する仕様の例を示す。望遠鏡口径中の 2 点間での波面の誤差を 2 点間の距離の関数として図示してある。地上望遠鏡に対しては、すべての空間スケールにわたって、望遠鏡光学系による波面誤差が大気による波面誤差より小さくしなければならない。したがって、仕様は短いスケールになるほど厳しいものになる。最小スケールでは、大気による乱れは無視できる大きさになるので、表面の荒さのために光が散乱することがほとんどないということが必要条件となるだけである。

* 5(訳注) 乱流の波数空間でのエネルギースペクトルが慣性小領域では $k^{-5/3}$ に比例するという法則。

* 6(訳注) バリティ 1990 年 10 月号 34 ページ「補償光学：ESO が実証観測に成功」参照。

長域の大部分では角度分解能が大気の乱れによって制限されているため、解像力はほとんど波長によらない。したがって、鏡面形状精度、望遠鏡の指向精度、追尾精度、熱変形量など、結像性能に関連する望遠鏡の設計仕様はあまり波長によらない。だとすると、望遠鏡そのものとしてはこの波長域全体をカバーできる性能をもたすのが賢明であろう。このため、計画中の大望遠鏡はすべて、可視光だけでなく、赤外線での撮像と分光観測ができる装置を考慮に入れている。

地上望遠鏡の要求性能の多くは大気による像のぼやけに関係している。コルモゴロフ(Kolmogorov)の乱流理論に基づいて^{*5}、像の劣化を適切に表す数学的モデルでは⁹⁾、波面の乱れはコヒーレンス長 r_0 という 1 つのパラメーターで記述する。コヒーレンス長は望遠鏡口径中の 2 点間での位相誤差がほぼ π ラジアンになる距離である。望遠鏡直径 d が r_0 よりずっと大きい時には、波長 λ での瞬間的な像は太さ λ/d の多数の輝点(スペックル)からなるが、長時間露出の像の幅は λ/r_0 になってしまう。

実測によると、望遠鏡を設置するのによい場所は、どこでも上空の乱流により像質が決まるので、ほぼ同程度の像

質となる。コヒーレンス長 r_0 は 500 ナノメートルの波長では普通 15 センチメートル程度であるが、たまには 30 センチメートルくらいにまでなることがある。これらの値は長時間露出の星像の大きさに換算すると 0.67~0.33 秒角となる。コヒーレンス長は波長に対して $\lambda^{6/5}$ で変化する。したがって波長が長くなると、星像は $\lambda^{-1/5}$ に比例してゆっくりと小さくなる。回折限界の星像直径は波長に比例して大きくなるので、波長が十分長くなると回折が星像の質を左右することになる。望遠鏡を 8~10 メートルもの大きさにしようという理由の 1 つは、波長 10 マイクロメートルにある大気の透明な窓において、大気の乱流に比べて回折があまり深刻にならないようにするためである。

大気により地上望遠鏡がこうむる像のぼやけは、原理的には補償光学⁹⁾という動的な補正光学系により除去することができる。波面の乱れは 10 ミリ秒程度の時間で複雑に変化するうえ、このような短時間でも波面を測れるほど明るい天体が多くないため、このような補正は可視光ではとくに難しい。波長が長くなると r_0 が大きくなるのに比例して、波面変化の速さや細かさが緩くなる。欧州の天文学者グループは近赤外線で作動する補償光学系をつくりあげた^{*6}。米軍は補償光学を可視光で実現するための多くの秘密研究に出資している。地上望遠鏡への関心が再び高まってきた背景には、このような技術についての見通しが次第についてきたという事実がある。回折限界の解像力が近赤外線では実現された¹⁰⁾。可視光でも今後十年のうちに実現の可能性はある。

* 7(訳注) 直径 D メートル、厚さ h メートルのガラス円盤を周辺で支えたときの自重による中心のたわみ量は D^4/h^3 に比例する。 D も h も 2 倍にするとたわみは 4 倍になる。

* 8(訳注) 1990 年 4 月に打ち上げられたハッブル宇宙望遠鏡(HST)は主鏡に球面収差があることが打ち上げ後に判明した。このため現在は 1 秒角程度の解像力しかないが、1993 年に収差を補正する光学系をスペースシャトルで取りつけに行き、解像力を 0.07 秒角に回復する計画が練られている。

望遠鏡光学系に対する要求性能は次のように規定できる。光学系は観測地で起こり得る最良の波面を生かせるようでなければならない。光学性能の仕様はすべてのスケールでの鏡面の誤差を記述する構造関数を用いるのが適切である(図 2 参照)。細かいスケールでの光学望遠鏡に対する仕様は電波望遠鏡に対する仕様と同じである。つまり、使用する最も短い波長の光が散乱することなく反射される必要がある。

■ 今世紀の望遠鏡の進歩

屈折望遠鏡の建設は直径 1 メートルのレンズの製作で頂点に達し、19 世紀には大型の反射望遠鏡の建設が相次いだ。現代宇宙論の最初のステップは、銀河が互いに遠ざかるような運動をしているというベスト・メルビン・スライファ(VESTO MELVIN SLIPHER)の発見から始まった。この発見はアリゾナ州のローウェル天文台で 0.6 メートルの屈折望遠鏡を用いて行われた。これ以後の成果は、とくに 1918 年に完成したウィルソン山の 2.5 メートルフッカー望遠鏡など、ほとんど例外なく反射望遠鏡によっている。この望遠鏡でエドウィン・ハッブル(EDWIN HUBBLE)は系外銀河の距離をセファイド型変光星の観測から初めて測定することに成功した[Physics Today 1990 年 4 月号 52 ページのロバート・スミス(パリティ 1990 年 11 月号 p.34)の解説参照]。ウィルソン山での最初の“現代的”反射望遠鏡の成功は、1930~40 年代のパロマー山の 5 メートルヘール望遠鏡の建設につながった。

パロマー以後に建設された望遠鏡は、ソ連の 6 メートル望遠鏡を例外とすると、4 メートル級かそれ以下のもの

のが主であった。既存の大望遠鏡のほとんどは、18 世紀のウィリアム・ハーシェル(WILLIAM HERSCHEL)の設計を最大限にスケールアップしたものである。この設計では、厚板ガラスの剛性により鏡の変形を防いでいる*7。また、焦点距離が長いのは光学研磨技術の限界のためであった。

まったく新しい望遠鏡技術が 1970 年代後半にアリゾナ大学とスミソニアン天体物理学研究所の共同で建設された多重鏡望遠鏡[MMT: Physics Today 1978 年 9 月号 2 ページのナサニエル・カールトン(NATHANIEL P. CARLETON)とウィリアム・ホフマン(WILLIAM F. HOFFMANN)の解説参照]で登場した。MMT は 6 台の 1.8 メートル望遠鏡を共通の架台に載せて光を合成することにより、4.5 メートルの望遠鏡と等価な集光力を実現している。この方式だと通常の 4 メートル級望遠鏡に比べて望遠鏡構造が軽量で安価だけでなく、回転する小型の建物に望遠鏡を納めることができる。MMT の建物は通常のドームに比べて開口部が広く、自然換気により鏡や構造物が夜間の気温と熱平衡になりやすい。MMT と他の 4 メートル級望遠鏡での経験を比較すると、これまで上層大気の乱れのせいと思っていた像のぼやけのかなりの部分が、実は望遠鏡やドームから立ち昇る“かげろう”のせいであることが明らかになってきた。

最新の 4 メートル級望遠鏡である欧州南天天文台の 3.5 メートル新技術望遠鏡[NTT: Physics Today 1990 年 5 月号 17 ページ(パリティ 1990 年 9 月号 p.45)参照]は、MMT 型の開口の大きい建物を採用し、入射光の波面の乱れを極力抑えるように、建物内部の

温度を注意深く制御している。波面の測定と鏡の支持力の調整を行い、鏡面の形状と光軸調整を能動的に制御することにより、NTT は既存の望遠鏡の中では最良の結像性能を実現している。大気の状態がきわめて良い状況の中で行われた NTT の処女観測では、半値全幅が 0.33 秒角という驚異的な解像力が実現されたのである。

新しい型の地上望遠鏡の能力は、当然ながらハッブル宇宙望遠鏡(HST)*8の能力とよく比較される。紫外線での観測は宇宙空間に打ち上げた望遠鏡でのみ可能である。宇宙の望遠鏡は波長 1~2 マイクロメートルの大気輝線発光に邪魔されないという利点もある。一方、地上の大型望遠鏡は 10 マイクロメートル以上の波長では回折限界の解像力での撮像を行えるという利点があり、分光観測で集めた光子数が観測の限界を決めているような場合には、その大集光力がものをいう。

可視域では地上の大型望遠鏡と HST は互いに助け合う関係にある。この状況は HST に新しい光学系が搭載され回折限界の解像力が回復し、地上大型望遠鏡でも補償光学が実用化され回折限界の撮像が可能になったときでも、変化しないだろう。HST は 2.6 分角の視野について切れ味の良い撮像を実現する。大型地上望遠鏡は集光力で HST を少なくとも 1 桁以上も上まわる。また、補償光学が実現すれば、解像力でも HST を上まわることになる。しかしながら、可視域では数秒角以上の視野にわたって波面の補償を行うことはたいへん困難であろう。掃天観測やそのほかの観測で回折限界までの解像力を必ずしも必要としない場合には、地上大型望遠鏡は最大で 1 度角

までの視野をもつため、探査観測にはきわめて有力な望遠鏡となる。

鏡技術

鏡はガラスでつくられるが、それはガラスが化学的に安定で寸法が変化しないからである。金属反射鏡はニュートン(I. Newton)が発明した時以来19世紀まで使われ、屈折式望遠鏡と優劣を競ってきた。金属鏡は経年変化による変形とさびのためかなり頻繁に再研磨が必要である。ユストゥス・フォン・リービヒ(Justus von Liebig)が1850年代にガラス表面に銀の薄膜をつける方法を発明したのを機に、金属鏡の高い反射率とガラスの形状不変性・可研磨性という利点を両立させることができるようになった。

ウィルソン山の1.5メートル望遠鏡と2.5メートル望遠鏡は熱膨張係数 α がおおよそ $10^{-5}K^{-1}$ のソーダ石灰ガラスでつくられていた。このため、温度が1Kかそれ以上変化すると鏡面が著しく変形してしまう。この困難を緩和するためにパロマー5メートル望遠鏡の設計者グループは最初、熔融水晶(α が $7 \times 10^{-7}K^{-1}$)を試した。最終的には、今世紀の初めにコーニング社により開発された実験用や料理用の耐熱ガラス(パイレックス)の一種を用いて α が $2.8 \times 10^{-6}K^{-1}$ の5メートル鏡材を製造することに成功した。

数多くの新しい鏡材が1960年代から1970年代にかけて登場した。この中には、ショット社のゼロデュワーのようなガラスセラミック材料がある。ゼロデュワーは正の膨張率をもつガラス相と負の膨張率をもつセラミック相(結晶相)とを混ぜることにより、熱膨張率がきわめて小さい値になってい

る。コーニング社はその後ハッブル宇宙望遠鏡(HST)の主鏡にも用いられた超低膨張ガラス材(ULE)を開発した。ULEは熔融シリカに二酸化チタンを混ぜることにより、膨張率をほとんど0にすることができる。今日の4メートル級望遠鏡のほとんどは、これらの新素材のどれかを用いている。

MMTとNTT以外の4メートル級望遠鏡は、約50センチメートルの厚みをもつ高剛性の堅い主鏡を採用している。このような設計をスケールアップして8メートル級またはそれ以上の口径の主鏡をつくることは、次の2つの理由でたいへん難しい。第一点は単に重量の問題である。比較的単純な支持機構に載せても形状が変形しないほど十分に堅い、従来型の4メートルガラス主鏡は約15トンとなる。8メートル鏡にこれをスケールアップすると、主鏡重量は120トンになり、より精密な支持機構を用いない限り、自重によるたわみが4倍になってしまう^{*)}。

鏡の大きさを制限する第2の理由は熱慣性である。低膨張素材は鏡面の熱変形を無視できる程度に小さくするのに有効であった。しかしガラスと周囲の空気の温度差により発生する対流の問題が残っている。上層大気中の乱流と同じように、このような対流も入射光の波面を乱す。この“鏡かげろう”の強さは対流の状況によるが、鏡ガラスと空気の温度差1Kあたりおおよそ0.3秒角程度の像のボケを起こす。これまでの4メートル級の鏡は温度変化の時定数が数時間に及ぶものが多く、周辺空気と熱平衡になることはまずなかった。この状況は8メートルの大きな鏡ではよりきびしくなり、“鏡かげろう”のせいで像質が1秒角かそれより

悪くなる恐れがある。

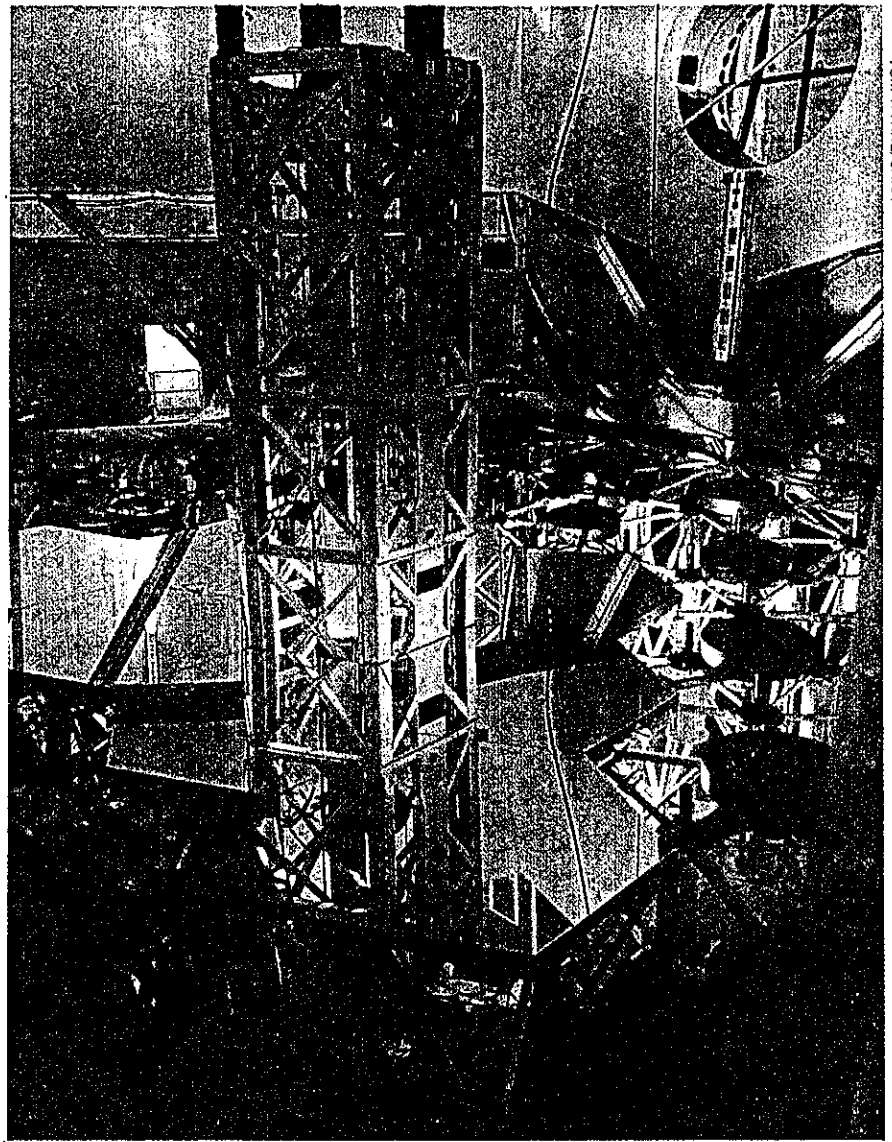
4メートル級ガラス鏡をスケールアップしようとして、これらの難題に直面した天文学者と技術者は、主鏡材をつくる3つの新しい技法を開発した。第1の方法は主鏡を多数の部分鏡からつくり、この多数の部分鏡からの光がちょうど、大きな1枚の鏡からの光と同様にきちんと焦点に集まるよう、正確に並べるといふものである。こうするとひとつひとつの部分鏡は単一の大きな鏡の場合に比べてずっと薄くて軽いものにすることができる。部分鏡への分割方式は重量と熱慣性の問題を大幅に軽減することになる。しかしこの方式では、光の波長よりさらに細かい精度をもつサーボ制御システムで、多数の部分鏡を制御しなければならないという、別の難題がつけ加わることになる。ケックの望遠鏡は分割鏡方式の最先端を行く実例である。

第2の方法は、従来の分厚いガラスの代わりに薄いガラスで主鏡をつくるというもので、厚さが一定の場合はメニスカス鏡とよばれている。従来の望遠鏡では、直径と厚さの比は6:1から8:1ぐらいであった。この程度の厚さがあれば、鏡を比較的小数の簡単な釣合方式の支持点で支えても、自重による鏡面の変形が無視できるようにすることができた。薄メニスカス鏡の場合、全体の剛性を犠牲にして軽量化を計るため、直径と厚さの比は40:1かそれ以上になる。鏡の形を維持するのは、鏡の裏に配置した数百個のアクチュエーターからなる能動的な支持機構である。このシステムで鏡の自重や風荷重に釣り合うように各アクチュエーターの支持力を制御する。メニスカス技術は、欧州南天天文台のVLT計画と日

本の JNLT 計画のグループが開発に取り組んでいる。

第3の方法は鏡の中に空洞をつくることで軽くする方法である。1次元要素としてはI型の梁が高い剛性を得るのに最も有効な形である。同様に、鏡のような2次元要素に対してはハネカムサンドイッチ構造が最も軽くて硬い構造となる。アリゾナ大学のわれわれのグループでは、従来の重い鏡と比べると重量が1/4しかないのに、自重による変形を従来の重い鏡と同程度におさえることができる、ハネカム鏡を鋳込む方法を開発した。ハネカム構造にする利点の1つは、どの部分もガラスが薄いため周辺の空気と素早く熱平衡に達するという点である。このようなハネカム鏡は米国の大学、私立天文台、外国の天文台の3つの計画で使われるようになっており、米・英・カナダ共同の8メートル望遠鏡計画でも採用される可能性がある。

新しい設計の望遠鏡は既存の望遠鏡とは主鏡の型だけでなくいろんな点で異なっている。いままでの望遠鏡と最も異なる点の1つは焦点距離が短くなってきたことである。既存のすべての望遠鏡では、主鏡の口径比(焦点距離と口径の比でf値ともいう)は比較的大きくて2.2から5の間にある。このような“遅い”主鏡を使うのは、焦点距離の短い“速い”放物面にすると非球面量が大きくなり製作が困難になるからであった。しかしながら、口径が大きくなるに従って、短焦点の主鏡を採用して望遠鏡の全体の長さを最小限に抑えたいという強い要望が生じてきた。その理由の1つは費用である。直径60メートルのドームは直径30メートルのドームに比べるとおよそ8倍の



費用がかかる。望遠鏡を短焦点にできれば別の利点もある。とくに5~10m/秒の風が吹いて望遠鏡をゆらす場合^{*9}など、望遠鏡が天体を正確かつ安定に追尾するうえでは、長さの短い望遠鏡の方が有利である。このような利点があるため、8メートル級望遠鏡を設計するグループでは口径比が2かそれ以下にしようとしている。コロンブス計画にいたっては、口径比1.14を目指している。

放物面か放物面に近い曲面の主鏡では、近似球面からのずれの大きさは直径に比例し、口径比の逆3乗に比例する。直径8メートル、f/3の放物面では球面からのずれがせいぜい72マイクロメートルであるのに対し、8メートルでf/1の場合では、ずれの大きさは2ミリメートルにも達する。光学研磨の立場からすると、これはとてつものな

〈図3〉 ケック望遠鏡の主鏡

9枚の部分鏡が納まったところ。ドーム内の様子は1990年11月に処女観測のためにセットアップしたときのものである。主鏡はそれぞれが独立に支持された36枚の1.8メートル部分鏡からなるモザイク構造となる。全体ではf/1.75、直径10メートルの双曲面になる。星から見るとおのおのの部分鏡は正確な六角形に見える。全体の形が連続的な光学鏡面となるように制御するための必要な情報は、部分鏡の境界につけた位置センサーにより、測定される。

*9(訳注) マウナケア山頂では年間平均で7m/秒の風が吹いている。

く大きな値である。光学研磨の場合、面を滑らかにするためにはできるだけ大きくて硬い研磨器具を使いたいが、一方では硬い道具を用いると面は球面になりやすい。球面から著しくずれた面を研磨するには、まったく別の方法を要するので、いろんな技法が開発されてきた。小さい研磨器具を用いる場合は、器具の直径のスケールでの非球面量は数マイクロメートル以下に限られる¹¹⁾。他には、望みの面形状に合うように曲がる柔軟な研磨器具を用いる方法、研磨器具の形状または研磨されるガラスの形状を能動的に制御する方法、研磨器具にかかる圧力を能動的に制御する方式¹²⁾、イオンビームでガラスを削る量を制御する方法¹³⁾などがある。

ケック望遠鏡

新しい大型望遠鏡計画の中で、設計段階から建設段階へと進んでいるのはいまのところ10メートルケック(Keck)望遠鏡計画だけである¹⁴⁾。これはハワイのマウナケア山頂の近くに建設中の分割鏡方式の望遠鏡である(表紙写真参照)。1990年11月には主鏡の1/4が装着され処女観測を行なった。ケック望遠鏡の鏡(図3参照)は36枚の六角形の部分鏡からなり、それぞれが全体として直径10メートル、 $f/1.75$ の双曲面になるように独立に支持される。この望遠鏡では、新しい技術的挑戦がいくつも行われているが、中でも主鏡の36枚の部分鏡を製作し能動的にその位置を調整すること、直径1.4メートルもある副鏡の製作は特筆すべきことである。おのおのの六角形の部分鏡はさしわたし1.8メートル、厚さ75ミリメートルのゼロデュワー鏡で

あり、軽量だが受動的な支持でも面形状が変化しないだけの十分な剛性をもっている。

主鏡を多数の部分鏡に分割したために、巨大な扱いにくいガラスをつくり、支え、保護する必要がなくなった。しかしながら、部分鏡が非球面(凸凹で200マイクロメートル)であるだけでなく、非軸対称なため、製作は難しい挑戦となった。1970年代に計画責任者のジェリー・ネルソン(Jerry Nelson)と、その共同研究者のグループは、このような複雑な鏡面の研磨を容易にする新しい技法を開発した¹⁴⁾。それは、初め円盤状のガラス材であった部分鏡を研磨する間、最終研磨鏡面が球面になるようにわざと弾性変形させるという方法である。研磨が終了し外力を除くと、研磨鏡面は必要な非球面になる。必要なガラス材の折り曲げモードが空間的には低次のモードであるため、円盤の縁に力とモーメントを加えるだけで、光学的に必要な精度で面形状を変化させられる。この曲げガラス研磨法の開発は、ネルソンのこういう信念に基づくものであった。新しい曲げガラス研磨法は初めキットピーク国立天文台で開発されたが、その後はアイテック光学システム社とティンズレー研究所で実用化の試作が行われた。すぐに目標精度の1桁手前に相当する250ナノメートル精度での研磨には成功した。だが、曲げガラス研磨法でこれ以上の精度を達成するのは困難であった。それは円盤を六角形に切断する段階でどうしてもこの程度の別の誤差が生じるためであった。切断することにより切断面での応力が解放され、部分鏡がそってしまふためである。先に六角形に切り落としてから曲げガラス研磨を行う

ことは、周辺に力とモーメントのみを与えて変形を制御するという原理が円盤についてのみ成り立つものであるから、採用できない。

切り落としによる変形を直すため、ケック望遠鏡では各部分鏡の支持機構にバネを仕込んで、部分鏡を正しい鏡面になるように折り曲げるという対策をとっている。処女観測のために製作した9枚の部分鏡については、曲げガラス研磨法と矯正用バネの併用により、20~40ナノメートルの鏡面精度を達成した。この精度なら、入射光の80%を直径0"24位内に集めることができる。コダック社のイオンビーム装置で部分鏡の1枚を再度仕上げた結果、矯正する前の段階でもrms90ナノメートルの精度を達成した。この方法により最終的には目標精度を達成できる見通しが得られた。

部分鏡の位置合わせ調整は、初めは星の光を用いて行う。その後は各部分鏡と相隣合う部分鏡の光軸方向のずれを数ナノメートルの精度で連続モニターする静電容量型変位センサーを用いて維持する。全部で168個の変位センサーの測定値を使って、マイクロプロセッサが各部分鏡を支えている3つのアクチュエーターの位置を調整する。この端面制御システムはあたかも部分鏡の縁に“蝶つがい”がついているような働きをする。蝶つがいがつながった36枚の六角形の部分鏡を、全体として正しい形に保つのが制御システムの役目である。鏡のスチール製支持機構がたとえたわんでも、この原理で鏡全体の形が正しく保たれる。究極的には鏡面の形状の安定性、個々の部分鏡の変形の大きさが結像性能を決めることになる。

分割鏡方式の改訂版が分光探査望遠鏡計画(SST)¹⁵⁾とドイツの大望遠鏡計画(GLT)¹⁶⁾で検討されている。SSTはテキサス大学とペンシルベニア州立大学の共同計画で85枚の部分鏡を合わせて、直径9メートルの球面主鏡を実現しようというものである。焦点面の可動補正光学系から固定式の分光器へは光ファイバーで光を導く。GLT計画は4枚ないし13枚の大型部分鏡を合わせて口径12メートルの主鏡を建設しようという構想である。

薄メニスカス主鏡の望遠鏡

熱膨張率が0の材料を用いた薄メニスカス主鏡を採用する計画が2つある。〈図4〉に示した欧州南天天文台(ESO)のVLT計画は4台の8.2メートル望遠鏡からなり、この4台は別々に使うこともできるが、共通の焦点へ4台すべてからの光を集中することもできる望遠鏡である。4台からの光束の可干

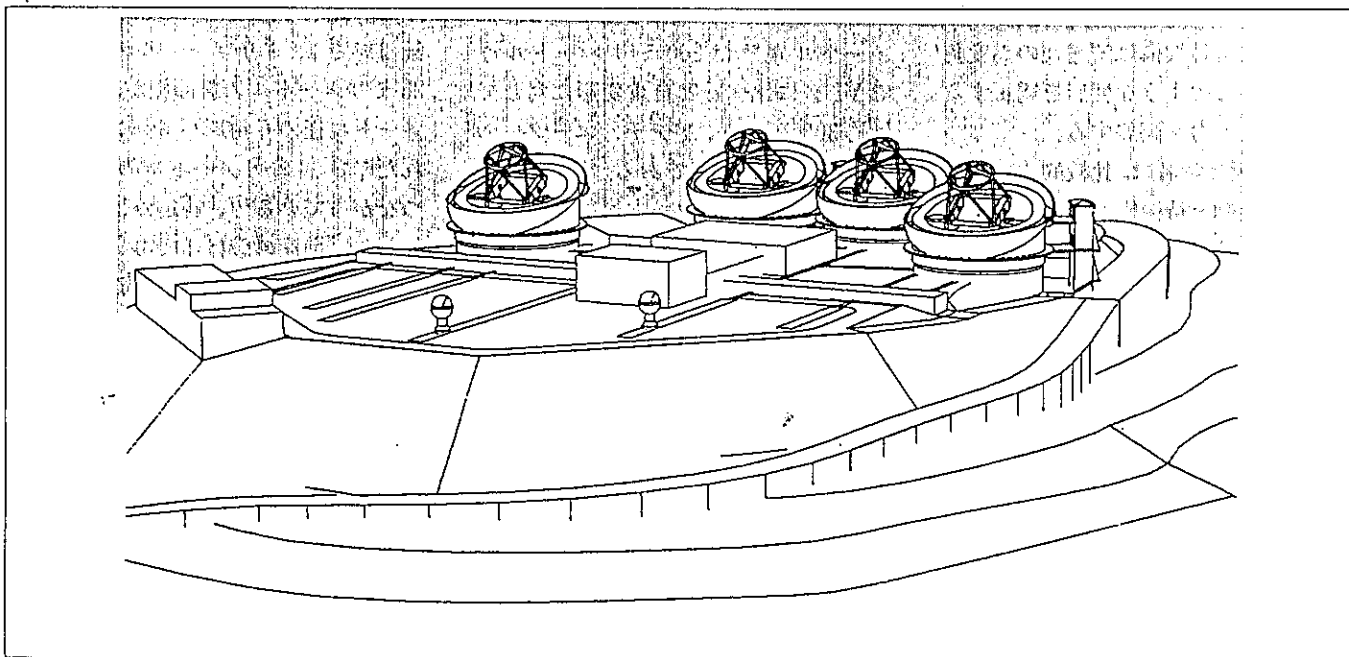
渉性を保つための光路長補償器を備えて、光干渉計として働くようにも考えられている。VLTはチリのアンデス高原にあるセロ・パラナルに建設される予定である。2つめの薄メニスカス計画はマウナケア山に建設予定の日本の大型光学赤外線望遠鏡(JNLT)である。

VLT用のゼロデュワーは、ドイツに最近ショット社が建設した施設で、回転する凹面鋳型の中で鋳込む予定である。4つの主鏡材のうちの最初の鏡は1993年に完成する予定である。研磨はフランスのレオスク社が行う。口径比が1.8なので鏡の研磨には本質的に新しい技術を開発する必要はない。

VLTの鏡の厚さはわずか175ミリメートル、重量は23トンである。非常に精密に支持力を制御できる能動支持システムが数百点で鏡を支える設計になっている。能動支持システムは望遠鏡構造のゆっくりした熱変形、より速

〈図4〉 超大型望遠鏡(VLT)

欧州南天天文台が建設を開始したこの望遠鏡は、4台の8.2メートル鏡からなり、それぞれを別々に使うことも一緒にして使うこともできるように設計されている。光干渉観測では、光路長補償回路を用いて4台の望遠鏡間の光路長を補償し、ビームの位相合わせを行うことになる。光干渉観測の場合には4台の主望遠鏡に加えて、小型の補助望遠鏡群を用いることも併せて考えられている。外気との熱平衡を達成し、かげろうによる像の劣化を最小に抑えるためにも、通常のドームの代わりに折りたたみ可能なドーム状の覆いを用いることが計画されている。



* 11(訳注) リッチ-クレチアン系は主鏡と副鏡がともに回転双曲面の光学系で、第2焦点では球面収差、コマ収差などのない像を広い画角にわたって確保できる。ただし、第1焦点で観測するには、補正光学系を用いる必要がある。これに対して、古典的カセグレン系は主鏡が回転放物面鏡、副鏡が双曲面となっていて、第2焦点の視野は広くとれないが、第1焦点が使いやすい。

* 12(訳注) バリティ 1990年9月号52ページ「能動光学望遠鏡 JNLT」参照。JNLT計画は1991年度から建設開始になった。主鏡の直径は当初計画の7.5メートルから、その後の検討で有効口径8.2メートル(外径8.3メートル)に格上げされた。このため(表1)ではケック望遠鏡の次の大きさとなる。

いが姿勢に応じて予測できる自重変化、それに予測困難な風荷重の速い変動に対処しなければならない。必要とされる100ナノメートルの表面精度を維持するため、主鏡で反射した星からの光波面を測定して、支持力を調整する。

VLT主鏡の軸方向の支持システムは2段階からなる。主鏡面下の約450点で受動的な流体圧パッドが鏡の重量をほぼ支える。力の微調は各点についている能動的な電動アクチュエーターが行う。実際のアクチュエーター数は3点ごとにグループ化するので約150個となる。鏡の横すべりを止めるには鏡の外周に配置した別系統の受動的な流体圧支持システムを用いる。このシステムは望遠鏡が天頂以外の方向を向いたときに、鏡面にほぼ平行な力を発生して鏡の横すべりを防ぐ。VLTの場合、外周だけに作用する横すべり防止機構のみで、軸方向の能動的な支持機構がなければ、鏡が天を向いていないときは、きわめて大きい変形が生じる。軸方向支持機構は望遠鏡の高度角に応じて、このような変形を矯正するように支える力を調整する。

ESOの天文学者は、比較的柔軟な鏡と精密な能動支持機構をさらにうまく利用する考えである。実際にVLT計画のプロトタイプとして建設した3.5メートルNTTではこの方式がうまくいくことが確認された。自重や風圧とバランスするためのダイナミックな支持機構は、研磨誤差や光軸調整誤差などの静的誤差をも補正するように、鏡面に一定の修正を施すことができる。実際、HSTで生じた鏡面誤差と同様の球面収差という誤差が、(たぶんその原因も似たような手違いと思われる

が)、NTTでも4マイクロメートルほど残っていることが、初期観測で確認された。NTTの鏡面形状誤差は軸方向支持機構を利用して高い精度で除去することができた。この手法を拡張すると、望遠鏡の光学系を観測に応じて変えるというウルトラCの離れ技すら考えられる。VLTの光学系は、 $F/15$ の第2焦点をもつリッチ-クレチアン(Ritchy-Chretien)系^{*11}として設計されており、その主鏡は双曲面である。他の焦点で使いたいときに主鏡を放物面に変形して古典的カセグレン系に変えることすら可能となる。このためには、鏡面形状を20マイクロメートル変化させる必要があるが、能動支持機構を用いるとこれが可能になる。

VLT計画に比べるとJNLT計画はより安全な設計となっている^{*12}。JNLTの主鏡の口径比は $f/2$ で、新型の大望遠鏡としては最も F 比が大きい。それでも今日までにつくられたものの4メートル級望遠鏡よりも F 比が小さく速いシステムになっている。7.5メートル鏡^{*12}は200ミリメートル厚でVLTに比べると自重変形に対しては約30%硬いが、アクチュエーターの数も264個と多めである。VLTと違って、これらのアクチュエーターは能動的な軸方向支持と受動的な横方向支持を同時に実現する。鏡の裏面に空けた穴の中にこのアクチュエーターを差し込んで、局所的な重心で支える構造になっている。このため横すべり防止機構による変形は微少かまたはまったく無視できる。

薄メニスカス鏡の鏡面を必要な精度で正しい形に保つために、商品化された力センサーでは測れないほどの精度で軸方向支持力を制御する必要があ

る。欧州のグループも日本のグループも、かかった力に応じて振動周波数が変化する音叉を用いて、 10^{-4} 以上の相対精度をもつ力センサーを開発した。

ハネカム鏡の望遠鏡

相当数の大望遠鏡計画において、アリゾナ大学で鋳造するハネカムサンドイッチ構造の鏡が用いられる予定である。これらのうちで最大のものは、コロンブス計画の口径8.4メートル、 $f/1.14$ の2枚の鏡である。この望遠鏡は、(図5)に示したように、単一架台に載せる望遠鏡としては最も強力な望遠鏡となろう。集光面積は口径11.8メートルの望遠鏡と同一になり、瞳が端から端まで23メートルあるため空間解像力もきわめて高いものとなる。コロンブス望遠鏡の建設予定地は、アリゾナ州ソノラン砂漠の最高峰であるグラハム山(海拔3200メートル)である。

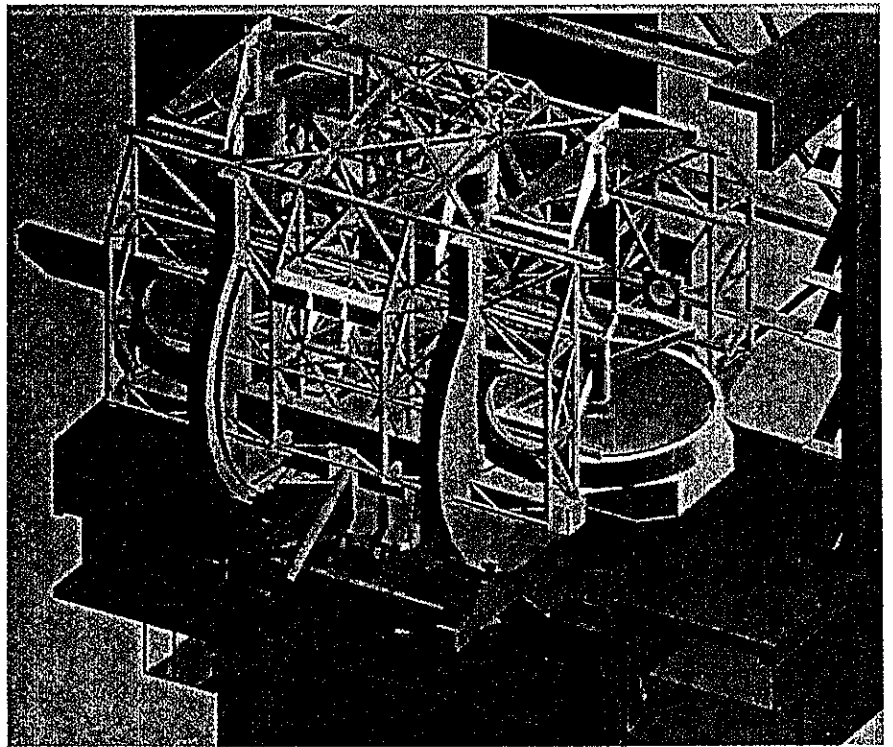
ハネカム鏡は、中空構造となるように複雑精緻な鋳型で鋳込まれ、直径と厚さの比が8:1の1枚鏡に仕上がる。鏡は厚さ28ミリメートルの前面板と25ミリメートルの裏面板が、200ミリメートル径の六角形パターンに並べられた厚さ11ミリメートルの補強材で、つながっている¹⁷⁾。鋳込みは回転炉で行われ、前面の形は1ミリメートル精度で正しい放物面になる。鋳込みだけでは必要な面精度に比べて4桁ほど荒い面しかできないが、回転鋳込み法によりガラスの削りしろを20トン(1トン当り約400万円)ほども節約することができる。そのうえ、1年以上かかっていた焼きなまし時間を2か月に短縮することができる。

アリゾナの鏡は日本の小原光学社製のE6型ボロシリケートガラス(パイ

レックス相当)を用いて鋳込む。このガラスは比較的低温で溶解し、1200℃で粘度が10⁵ポアズに達し、ハネカムサンドイッチ構造の鋳型の中に流れ込むようになる。ガラスセラミックは、ボロシリケート系のガラスより熱膨張率が低い、ハネカム構造に鋳込むことができない。もう1つのガラス材である熔融シリカは、液体相になることがないので、HSTでも採用されたように薄板を溶着する方法か、厚板材から不要部をくり抜き、削り出す方法によってのみ軽量化を図ることができる。これらの方法は8メートル級の鏡ともなると、どちらもきわめて高価で採用は困難である。

最も大きいハネカムサンドイッチ鏡は直径8.4メートルで重量は14トンとなる。縁での厚さは850ミリメートルあるが、ガラスの全容積は厚さ100ミリメートルのメニスカス鏡と同等でしかない。そのような薄いメニスカス鏡と比べると、風荷重や自重によるハネカムの変形量は7~10分の1程度しかない。ハネカムの場合、重さの割に硬い主鏡であるおかげで、望遠鏡の構造への負担も軽くなる。

いままでのところ、スチュワート天文台の鏡工学研究所では直径3.5メートルの鏡まで鋳込みに成功している。鋳込み用の炉は最近8.4メートル鏡が鋳込めるサイズに拡張された。1991年秋には最初的大型鏡として、6.5メートル鏡をつくる。この鏡は多重鏡望遠鏡(MMT)の6台の1.8メートル鏡と取り替えるためのものである。この取り替えにより、望遠鏡の構造やドームの改修は最小限に抑えて、集光力が2倍以上になる。この改良は6.5メートル鏡の焦点距離を非常に短くして、現在



の6枚鏡の望遠鏡を格納している回転建物に納めることで、可能となった。 $f/1.25$ の鏡にすることで、新しいMMTは現存の建物をちょっと改修することと、新しい名前をつけることだけが宿題となった。

6.5メートル鏡ができた後は、一連の8~8.4メートル鏡を9~12か月ごとに鋳込むことになる。マゼラン計画では8メートル、 $f/1.2$ の主鏡を用いた望遠鏡をチリのラスカンパナスに建設する。コロブス計画やマゼラン計画に加えて、米国国立光学天文台では、 $f/1.8$ の8メートルハネカム鏡を用いた同じ設計の望遠鏡を、マウナケアとセロトロロとにそれぞれ1台ずつ建設する提案がなされている。

ハネカム鏡を用いた多くの計画では口径比の小さい速い主鏡を選んでいるが、これは前述したような光学的かつ構造的な必要性からである。非球面量の大きい面を磨く新しい方法が開発されようとしている。“曲げラップ研磨法”とよばれる方法では、能動的に研磨力を加減する研磨装置¹⁰⁾(図1参照)を用いる。鏡面をなぞっていくときにラップが連続的に形を変え接触する面が常に正しい非球面になるように研磨

〈図5〉 コロブス望遠鏡計画

イタリア-オハイオ大学-アリゾナ大学の共同で建設されるコロブス望遠鏡の構造をコンピュータ設計画面で示す。2台の8.4メートル主鏡を用いることで、11.8メートルの望遠鏡に相当する集光力を実現する。光干渉モードで使用すれば、口径23メートルの望遠鏡に相当する解像力が達成できる。2枚の主鏡は共通の架台に載せるので2台の位相を合わせるのに光路長補償回路は必要としない。高度軸駆動用の2つの大きなC型のリングが、光学系の重量を直接地面に伝える。最低共振周波数が10Hzという高い剛性のおかげで、光干渉観測ができる安定なプラットフォームとなる。望遠鏡と一体となって回転する建物(切口を図示した)には、十分な自然換気が行えるように四方に開口部が設けられている(図面はA. D. S. イタリアのご好意による)。

する。曲げラップ研磨法は曲げガラス研磨法と同じ弾性体力学の原理を応用している。研磨ラップの曲げ方はケック望遠鏡の部分鏡を曲げたのと同質的には同じ方法を用いている。ただし、曲げラップにかかる縁でのモーメントの大きさは、ラップが鏡面全体を動きまわられるように計算機制御で連続的に調整する。曲げラップ研磨法は現在のところ、2つの鏡の研磨に実際に使用している。1つは1.8メートル、 $f/1.0$ のヴァチカン新技術望遠鏡、もう1つは3.5メートル、 $f/1.5$ の米国防空軍望遠鏡用の放物面鏡である。2つとも1991年1月の時点で、rms 400 ナノメートルの研磨精度に達した。

ボロシリケートハネカム鏡は、鏡内部の温度差をなくし、外気との温度差を最小にするために、ガラス温度の能動制御を行う。ガラスセラミック鏡と違って、ボロシリケートの熱膨張率、 2.9×10^{-6} は無視できない。内部温度差が ΔT があると、内部応力が生じ、 $\alpha \Delta T$ 程度の表面傾斜誤差が発生する。この誤差を0.06秒角程度以下に抑えるには、 ΔT は0.1K以下でなければならない。鏡が中空のハネカムサンドイッチ構造であるため、必要な温度一様性を達成する簡単な機構を考えることができる。温度を制御した空気をひとつひとつの6角セルの中に裏面の穴から流し込む。この空調システムと軽量構造のおかげで、鏡の熱時定数はおよそ40分ほどになる。これなら、ほとんどの観測可能な場合にガラスの温度は周辺空気と0.2K以内になり、鏡面からの対流による劣化はほとんど問題にならないであろう。

将来の方向

この解説で紹介したさまざまな計画の実現と並んで、角度分解能を補償光学や光干渉法を用いてさらに改善しようという開発的研究が盛んである。補償光学は、大口径の望遠鏡での補償が実現すると、とくに著しいメリットがある。もし大型鏡の部分鏡が20センチメートル程度であれば、大気による波面ゆらぎを補正するのに必要な速さですべての部分鏡を駆動できるくらい身軽になる。著者の1人はこのような分割鏡方式で直径32メートルの球面鏡主鏡をもつ望遠鏡を提案している¹⁹⁾。

固定基線長 B の光干渉計は最高で微小角度 λ/B までのなんらかの情報を与える。だが、高解像度の実用的な撮像を行うには瞳面での十分なサンプリングが必要なため、高解像撮像観測は可動式の光干渉計でのみ実現できる。ESOはすでに4台の可動式2メートル望遠鏡を付け加えて、VLTの能力アップを図る計画を練っている。さらに将来的には基線長1キロメートルで波長1マイクロメートルまで光干渉を実現するプランが検討されている。

地上望遠鏡をさらに発展させようという提案に加えて、10~16メートル級の望遠鏡を地球周回軌道か月面に配置しようという構想が関心をよんでいる。そのような野心的な計画の実現には20~30年の歳月といまのお金にして5000億から1兆円の予算が必要になろう。しかしながら、HSTやこれからの8~16メートル級の地上望遠鏡の技術を土台にして、人類はこのような計画にも着手することになるであろう。

参考文献

- 1) D. Enard: *Advanced Technology Optical Telescopes IV*, Proc. SPIE 1236, L. D. Barr, ed., SPIE, Bellingham, Wash. (1990) p. 63.
- 2) P. A. Strittmatter: *ibid.*, p. 71.
- 3) J. E. Nelson, T. S. Mast: *ibid.*, p. 47.
- 4) A. Dressler: *ibid.*, p. 42.
- 5) P. S. Osmer: *ibid.*, p. 18.
- 6) K. Kodaira: *ibid.*, p. 56.
- 7) F. H. Chaffee, D. R. Blanco, C. B. Foltz, C. C. Janes, H. N. Lester, A. D. Poyner, J. T. Williams, S. C. Criswell, D. G. Fabricant, G. D. Schmidt: *ibid.*, p. 507.
- 8) V. I. Tatarski: *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, New York (1961).
- 9) J. M. Beckers, F. Merkle: in *New Technologies for Astronomy*, Proc. SPIE 1130, J. P. Swings, ed., SPIE, Bellingham, Wash. (1989) p. 10.
- 10) G. Rousset, J. C. Fontanella, P. Kern, P. Gigan, F. Rigaut, P. Lena, C. Boyer, P. Jagourel, J. P. Gaffard, F. Merkle: *Astron. and Astrophys.*, in press.
- 11) R. A. Jones: *Appl. Opt.* 17 1889 (1978).
- 12) K. Beckstette, E. Heynacher: in *ESO Conference on Very Large Telescopes and Their Instrumentation*, M.-H. Ulrich, ed., ESO, Garching, Germany (1988) p. 341.
- 13) S. R. Wilson, D. W. Reicher, J. R. Mcnell: in *Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*, Proc. SPIE 966, J. B. Arnold, R. E. Parks, eds., SPIE, Bellingham, Wash. (1988), p. 74, L. N. Allen, R. E. Keim: *Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics*, Proc. SPIE 1168, R. E. Fisher, H. M. Polokove, W. J. Smith, eds., SPIE, Bellingham, Wash. (1990) p. 33.
- 14) J. Lubliner, J. E. Nelson: *Appl. Opt.* 19, 2341 (1980).
- 15) F. B. Ray, V. Krishnamachari: *Opt. Eng.* 27, 769 (1988).
- 16) K. F. Fricke, H. Nicklas: in *ESO Conference on Very Large Telescopes and Their Instrumentation*, *op. cit.*, p. 59.
- 17) J. R. P. Angel, W. B. Davison, J. M. Hill, E. J. Mannery, H. M. Martin: in *Advanced Technology Optical Telescopes IV*, *op. cit.*, p. 636.
- 18) H. M. Martin, D. S. Anderson, J. R. P. Angel, R. H. Nagel, S. C. West, R. S. Young: in *Advanced Technology Optical Telescopes IV*, *op. cit.*, p. 682.
- 19) R. Angel: *Q. J. R. Astron. Soc.* 31, 141 (1990).