

大望遠鏡の設計

山下 泰正*

今年の3月に表記の題目の国際会議がESO(ヨーロッパ南天天文台)とCERN(原子核ヨーロッパ共同研究所)の共催でジュネーブで開かれ、その報告が6月に出版された(Large Telescope Design, ed. R.M. West, ESO Hamburg (1971)). 会議には16ヶ国から114人の参加者があり、主に総合報告的な42篇の論文の発表とそれに続く活発な議論があって、盛会だったようである。内容は各計画の報告、光学系、望遠鏡架台、駆動および制御系、新しい視点(赤外線観測、光子計数による映像増幅など)に分けられ、一読した感想は1965年アリゾナのツーサンで開かれた時のもの(The Construction of Large Telescopes, ed. D.L. Crawford, Academic Press (1966). 後に*印で参照する)に比べると、実際の望遠鏡の建設が進行していることもあって、困難解決の方法がより具体的に述べられているという印象が強い。以下では、この報告書にそって世界の望遠鏡の最近の傾向を解説する。

1. 光学系

第1表はこの会で報告された大望遠鏡の建設計画で、ソ連の6m、イタリアの4mを除くと、他はすべてリッチー・クレティエン(R-C)系(後章参照)を採用している。これは、直接写真観測における限界等級は望遠鏡

の焦点距離のみに依存するから、カセグレン焦点を最重要視して、ここで空の暗さに匹敵する、あるいはそれ以下の限界等級にある天体を観測しようという最近の考えによる。R-C系は反射アプナートで球面収差、コマ収差は完全に除去されているが、非点収差、像面の彎曲は残っている。これら残存収差は焦点面の近くにおいて補正レンズで取り除く。R-C系の主鏡は双曲面だから、主焦点ではすべての収差が存在する。これらの収差は補正レンズ系で除く。これらカセグレンおよび主焦点補正系は今までも研究されてきたが(例えば*のpp. 9-48), R.N. ウィルソンは最近西独ツェイスで行なった計算の結果を報告している。クーデ焦点では視野はほとんどゼロでよいから、主鏡クーデ副鏡の組合せて球面収差だけを除去すればよいので、ほとんど問題は無い。

鏡面の温度変化による変化は長年の大問題であったが、最近ではゼロ膨張係数のセラミックガラスの鏡材(第1表のセルピット, ゼロドゥア, ULE)ができ、この問題は一挙に解決した感がある。しかし歴史が浅いので長年にわたる鏡面の安定性に不安があり、熱伝導率は依然悪いので熱の履歴の問題は残る(鏡が外気の温度になじまないで鏡面近くに空気の乱れを生ずる)。また自重による変形の問題もそのまま残り、鏡とセルの熱膨張係数の違いはかえって大きくなるという問題も生じた。その意味でなお軽い鏡材(例えば金属鏡)の開発も行な

* 東京大学理学部天文学教室
Yasumasa Yamashita: Large Telescope Design

第1表 建設,

建設者	ソ連	天文学研究のための 大学連合(米)		州立大学連合 カナダ	ヨーロッパ 南天文台 ESO	英国-オース トラリア
		AURA	AURA			
開始年	1960	約10年前	1967	1966	1962	1967
完成予定 場所	…… ソ連 コーカサス山 脈	1972 米国アリゾナ 州, キットピ ーク	1973 チリ セロ・トロロ	カナダ西岸 コバウ山	チリ ラ・シジャ	オーストラリア 東部, サイ ディング・ス プリング山
直径	6.0m	4.0m	4.0m	4.0m	3.7m	3.9m
材質	低膨張ガラス	溶融水晶	セルピット	溶融シリカ	溶融シリカ	セルピット
マウンティング	経緯台			フォーク馬蹄	フォーク馬蹄	フォーク馬蹄
光学系	抛物面-双曲面	R-C	R-C	R-C	R-C	R-C
F比主焦点	4	2.6	2.6	2.8	3	3.3
カセグレン	—	8	8	8	8	8と15
クーデ	31	30	30	30	30	36

われている。

鏡の自重による変形は、(直径; D)⁴×(密度; ρ)/(ヤング率; E)×(厚さ; h)² に比例する。この意味で ρ が小さく E の大きい、例えば軽い金属が望まれる。もし鏡材が与えられ、支持方法が同じなら、鏡の厚さは直径の2乗に比例して厚くしなければならない。鏡の支持の問題はいかに正確に鏡に力を加えるかということである。従来のテコとおもりによる支持方法では $D^2/h \approx 2.5 \times 10^8 \text{ cm}$ が限度で、誤差は支点の摩擦による。パロマー5m 鏡のように支点をボールベアリングで受けると、 $D^2/h \approx 7 \times 10^8 \text{ cm}$ まで行くが、これがテコとおもりによる支持の限界とのことである (* の pp. 66-71)。より正確な支持は空気袋で行なえる。鏡の傾きをはかってそれに見合うだけの圧力を空気にかけるわけである。鏡の背面支持には空気袋を、側面支持にはテコとおもりの方法を用いるのが最近の傾向である。ただし鏡の側面にパッドを糊付けし、そこに力を加えるので、押し引き両方ともにもできる。鏡は傾くと変形して非点収差を起こすが、鏡の上方を引張って、この変形を除こうというわけである。4m 鏡位になると副鏡は直径1m以上あり、しかも下を向いているので副鏡支持も大きな問題である。最近の傾向は背面を真空で支え、側面支持には水銀袋を用いているようである。

以上の方法は与えられた鏡面を鏡のあらゆる傾きに対していかに正確に再現するかという考えで、いわば閉じた回路に相当するが、むしろ鏡を薄くして変形しやすくし、常に鏡面の形を測って、それが与えられた形状になるように力を加えてやろうという考えもある。この閉じた回路に相当する方法は実現までにまだ時間を要するが、より大口徑の鏡を可動部にのせるには、このような支持方法に移行せざるを得ないであろう。

2. 鏡筒、架台

自重によって鏡筒が撓むと主鏡副鏡は理想的な相対位置から変移して視準(コリメーション)誤差を生ずるとともに、軸から取り出した望遠鏡の指示位置にも誤差を与える。自重による撓みをゼロにすることは不可能だから、鏡筒の問題は望遠鏡のあらゆる傾きに対して、撓んだ後の主鏡副鏡の光軸が一致し、しかもその光軸が撓みがない場合の光軸に平行になるような構造をいかにして実現するかということになる。R-C 望遠鏡の視準誤差に対する許容範囲は古典的カセグレン望遠鏡(放物面主鏡と双曲面副鏡)よりきびしく、例えば ESO 3.5m に対して星像を 0"2 以下に保つには、

カセグレン系	横方向変移	2.1mm	以下
	主鏡の回転	10"	以下
	副鏡の回転	42"	以下
主焦点補正系	横方向変移	0.45mm	以下
	主鏡の回転	10"	以下
	補正系の回転	3'7	以下

でなければならない (* の p. 19)。これらの数値から視準誤差の影響がいかに大きいか解るであろう。

第1図はパロマー5m 鏡のために開発された鏡筒の構造で、開発者の名をとってセルリエ構造と呼ばれている。この構造は強度と重量の比が大きく、円筒と同じようにすべての方向に対してほとんど同じ強度を示すので最近の大望遠鏡はすべてこの構造を採用している。鏡筒の中央部にセンターピースと呼ばれる強固な部分があり、そこから図のように8本の桁で先端、後端の円環を吊り、その各各に副鏡、主鏡のセルを取り付ける。桁の長さは副鏡側の方が主鏡側より長く、回転モーメントは長さに比例するのに撓みは長さの3乗に比例するから、

計 画 中 の 大 望 遠 鏡

天文学地球物理学国立研究所 (フランス) INAG	マックス・プランク研究所 (ドイツ)	イタリア国立天文台	カーネギー研究所 (米国)	ラ・プラタ天文台 アルゼンチン	マックス・プランク研究所 (ドイツ)	
1964 1975 スペイン?	1969 南西アフリカ ギャンスバー グ山	1969 未定(北半球)	1971 1974 チリ ラス・カンパ ナス	数年前 1974-5 アルゼンチン 西部	1969 1973 スペイン カラル・アル ト山	1969 1974-5 南西アフリカ ギャンスバー グ
3.6m	3.5m	3.5m	2.5m	2.2m	2.2m	2.2m
セルビット ヨーク	ゼロドップ	ULE フォーク馬蹄 拋物面-双曲面	未定 フォーク R-C	現存のキット ピーク 2.2m 鏡と同じ	ゼロドップ フォーク R-C	ゼロドップ フォーク R-C
3.75	未定	4	3		3	3
11		12	7.3と13(赤外用)		8	8
34		31	30		40	40

主鏡側の桁を細くして前後の円環の撓みが等しくなるように設計しなければならない。理想的セルリエ構造では、桁の接合点を含む面内に主鏡セルあるいは副鏡部の荷重の重心がなければならない。この場合荷重が円環に及ぼす回転モーメントは常にゼロだから、望遠鏡のあらゆる姿勢に対して、前後の円環は平行のまま撓む。したがって円環に強固に取り付けられた主鏡副鏡に対しては視準誤差も指示誤差もないというわけである。この構造の採用によりパロマー5m望遠鏡では筒の先端の撓みは1cm以上あるのに、主鏡副鏡の横方向の相対変移は0.25mm程度しかないとのことである。

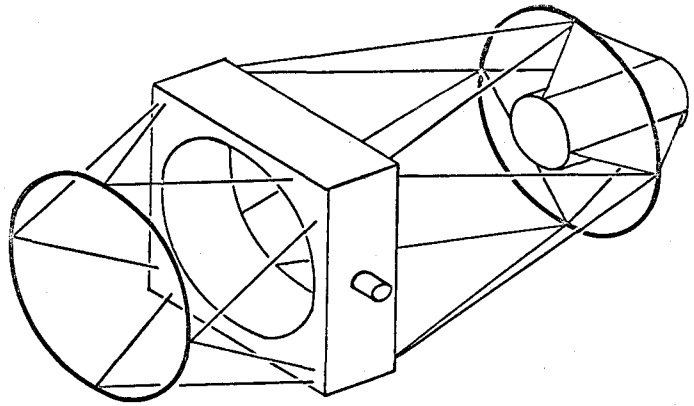
実際の望遠鏡では桁の接合を点にできないし、その面内に荷重の重心をもってくることも難かしい。また円環の変形も問題になる。エグマン等は実際のセルリエ構造を理想的なものに近づけるには桁の接合をどうすればよいかを検討し、実際のものについて変形量を計算している。

主鏡副鏡の一部を視準誤差測定用に磨くか、あるいは別の鏡を貼り付けるかして視準誤差を実際に測定し、それがゼロになるように鏡を動かすという考えもある。具体的方法は不明だが、同じ閉回路でも鏡面の制御よりこの方が容易そうな印象である。

架台についてはソ連6mが高度方位式である以外には、現在建設中の3.5~4m望遠鏡はすべて、それは緯度に密接に関係していることだが、フォーク型、馬蹄変形、フォーク変形馬蹄型 (cf. 天文月報 62, 225) の何れかを採用している。架台の問題は数100トンに及ぶ可動部分の荷重を受けるベアリングの問題と、時角に依存するフォークまたはヨークの変形の問題である。ベアリングにはオイルパッドをつかうことで問題はほとんど解決しているし、変形量は時角の関数として実測し、計算機制御で望遠鏡の指示位置に補正を加えるというのが最近の傾向である。

3. 駆動, 制御

最近の望遠鏡工学の最も著しい特長は駆動系からウォーム歯車を追い出して、一枚の平歯車で早廻しから追尾までのすべての駆動を行なうということである。その理由は筆者にはまだはっきりと理解できないが、ウォーム歯車の唯一の欠点は逆転不能ということで、何らかの原因(事故, 地震など)でウォーム歯車に限度以上のトルクが働くと歯車をこわしてしまう。それを避けるにはウォームにある限度以上の推力が働くと、ウォームは台座



第1図

に対して滑るような工夫をしておかねばならない。また現在の技術では直径5m以上の超精密ウォーム歯車は切れないというのも理由の一つかも知れない。

平歯車はウォーム歯車に比して接触面積が小さいので滑らかさに欠けるし、ピッチ誤差も同じ直径のウォーム歯車より約10倍大きくて角度の1秒以上に達する。この欠点を補うためには、平歯車の代わりに magari 歯車を用いたり、おのおの独立なモーターをもつ同等の減速装置2個を1枚の主平歯車にかみ合わせて接触面積を大きくしたりしている。

モーターにはパルスモーターを用いて駆動速度は計算機で制御する。追尾駆動の場合には極軸の回転角をエンコーダーで読み取って計算機で処理し、大気差、鏡筒およびフォーク(あるいはヨーク)の撓み、ピッチ誤差などを補正してモーターの回転を制御するか、あるいは自動案内装置からの信号で制御する。

ウォーム歯車には大きな減速比がとれる、切削精度もよい、という特長がある。減速比が大きいいいことは前段の減速装置におけるピッチ誤差、周期誤差はそれだけ減衰されて主ウォーム歯車に伝達されているということである。精度のよいウォーム歯車をやめて平歯車を使用し、そのピッチ誤差を計算機制御で補正するのが果たして賢明かというのが筆者の疑問である。

最近のもう一つの特長は計算機による望遠鏡、観測装置および観測そのものの制御である。望遠鏡の制御については、鏡支持の空気袋内の圧力の制御、早回し遅回し駆動の速度の制御、鏡筒および架台の撓みを計算しそれを補正して指示精度、追尾精度を向上させること、エンコーダーからの信号を受けて計算処理しそれを望遠鏡にフィードバックさせること、歳差、章動、光行差、固有運動、大気差などを考慮して観測時点における星の位置を計算すること、等等である。大望遠鏡は暗い天体の観測を目的としているから、赤経赤緯の目盛板で星を入れ

る場合に高い指示精度が要求される。最近の大望遠鏡では指示精度 $6''\sim 10''$ 、追尾精度は $0.2''$ 程度を目標としている。人間による望遠鏡の誤操作を監視し、観測を最も能率よく行なえるよう監視することも計算機の役目である。

以上この報告書に現われた論文のなかで基本的なことを、特長的なことを中心に紹介した。論文には総合報告的なものが多く、最初にも述べたように問題が具体的に議論されているので理解しやすい。観測を主としている人、大望遠鏡の建設に興味のある人はぜひ本文の方をお読みいただきたい。

4. リッチー・クレティエン (R-C) 望遠鏡**

カセグレイン型の2面合成の反射系を考えると、主鏡副鏡の曲率半径 r_1, r_2 、それぞれの球面変形係数 b_1, b_2 、および主鏡副鏡間の距離 d の5個のパラメーターがある。これらを 1) 焦点距離が与えられた値 f をもつこと、2) 主鏡副鏡の口径比 $D_2/D_1 \equiv \Delta$ 、3) 主鏡頂点から焦点までの距離 $-s_2'$ 、4) 球面収差の係数がゼロ $A=0$ 、

** この章にてでくる記号、符号については、広瀬秀雄、シュミット・カメラ、河出書房、昭和22年を参照。

5) コマ収差の係数がゼロ $B=0$ 、という5個の条件をおいて解いたものが R-C 望遠鏡である。2) の条件は副鏡の影をどの位許すか、3) はカセグレイン焦点をどこに置くのが観測に便利か(主鏡の後にある場合 s_2' は負) という実用上の条件である。解いた結果は $s' = s_2'/f$ とおくと、

$$r_1 = 2f(\Delta + s')/(1 - \Delta), \quad r_2 = -2f\Delta(\Delta + s')/(1 - 2\Delta - s'),$$

$$d = f(\Delta + s'),$$

$$b_1 = -1 - \frac{2\Delta(\Delta + s')^2}{(1 - \Delta)^3},$$

$$b_2 = -\frac{2(1 - \Delta)^2}{(1 - 2\Delta - s')^3} + \frac{1 - s'^2}{(1 - 2\Delta - s')^2}$$

となる。 $s' = -0.05$ (カセグレイ焦点は合成焦点距離の5%だけ主鏡の後にある)、 $\Delta \approx 0.3$ 位にとると、 $b_1 \approx -1.1$ で放物面に近い双曲面、 $b_2 \approx -6$ でかなりきつい双曲面になる。主鏡は双曲面だから主焦点では球面収差をはじめすべての収差が存在する。これらの収差は補正レンズ系で除去しなければならない。カセグレイン焦点では $A=B=0$ とおいたので球面収差、コマ収差はなく反射アプラナートになっている。しかし非点収差、像面の彎曲は存在し収差係数で書くと、

(337 頁へつづく)

好評増刷発売中

火星

—観測と研究—

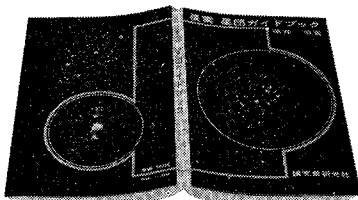
■天文ガイド臨時増刊 / B5判 / 122頁 / 定価480円

マリナー探査機による火星の写真、今季の観測についてのアドバイス、ベテラン各氏の観測経験の紹介、火星の地図、データなど火星に関する総合版です。

★主内容 本文 / 今年の火星大接近 / 最接近のころの火星面小・中望遠鏡で見る火星 / 今世紀の火星接近—
 覧表 / 口絵 / 火星のカラースケッチ / 花山天文台の標準火星地図 写真 / マリナー 6・7号による火星写真

星雲星団ガイドブック

—小型カメラと小望遠鏡による星雲・星団の観測—



好評発売中

■藤井 旭著 / A5変型判 / 316頁 / 定価680円

天文ファンにとって人気のある星雲星団の写真撮影と観測についての入門書です。オリオン星雲など約120種の作例と、見つけ出すための星図を添え、撮影の方法や注意、小望遠鏡でながめる場合のヒントをくわしく解説した。星雲星団の写真集として満足できる本で、同じ著者の「天体写真の写し方」の姉妹編です。

誠文堂新光社

東京・神田錦町1の5 振替東京6294