

世界の望遠鏡技術の現状と展望 (II)

清水 実*・磯部 琇 三*

5. 1990 年代の望遠鏡の計画案

1970 年代の半ばに、キット・ピーク天文台では 3-5 m 望遠鏡の次の大集光力望遠鏡として、25 m 望遠鏡の検討が開始され、1977 年 2 月から 1979 年 6 月までの間に 5 冊のレポートを出している。そして、1977 年 12 月にはジュネーブにおいて、ESO 主催の未来望遠鏡の会議、1980 年 1 月には、キット・ピーク天文台主催の 1990 年代の望遠鏡の国際会議が開かれている。それらの会議で提出されたいくつかの提案を下に記してみる。

1) キット・ピーク天文台の未来望遠鏡案群

a: アレシボボール

地上に固定された球面に小さな鏡がしきつめられている。副鏡は球面中心部で支えられたピボットから吊られており、天体が日周運動で移動すると副鏡を動かして追尾する。誰でも一度は考えたことのある案であるが、全天を観測できるようにするには、不必要な位大きな構造物になってしまう。この案では視野 5° 位、F比は 0.75 より明るいものになっている。しかし、追尾中や天体毎に異った鏡の部分を使うので、測光や赤外線観測に使うことはむづかしい。また副鏡を動かして追尾するのも実際にはむづかしい。なお、アレシボとは中央アメリカのアレシボに口径 300m の固定式の電波望遠鏡があり、これと同じようなシステムの望遠鏡という意味で、アレシボ・ボールとよんでいる。

b: 回転シュー (図 3)

これはアレシボ・ボールを一次元にし Azimuth 回転で全天をカバーしようとする案で、幅 25m、長さ 75m 曲率半径は 50m で F/1 の光学系を形成する。高度は 30° 以上で、回転する鏡筒の先、焦点の背後に 3.2m 径の非球面凹面鏡をおいて球面収差を補正し、凸面の第 3 鏡などのリレー系を使って高度回転軸に送られ、平面鏡によってクーデ室に送られる。主鏡面は 1~2m くらいの六角形の球面鏡でしきつめられ、個々の鏡は背後からサーボアクチュエーターで制御される。みるからに頑丈で安定性があるが、球面鏡のため、収差の補正や鏡の異った部分を使う不利は前述のボールと同様である。

c: シデロスタット

この方法は、たった 2 枚の反射面を使うだけで光束を

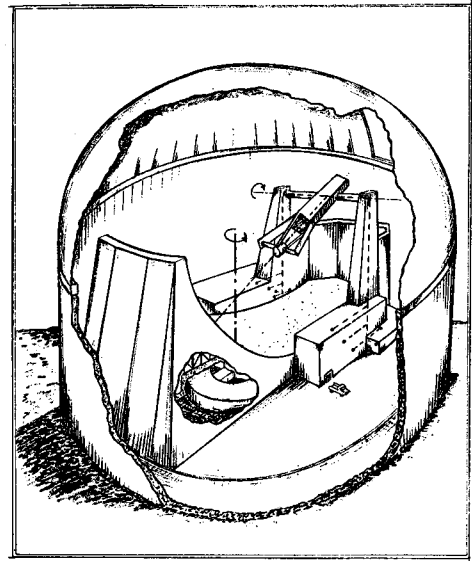


図 3 回転シュー

クーデ実験室に導くことができるという点では極めてすぐれているが、25m 以上の鏡を 2 面作るというのはコストの点などで如何にももったいないということと赤外観測や測光観測と偏光観測には不向きといえる。

d: 逆アルトアジマス

このマウンティングはやはり鏡の反射面を少くするために考えられたものである。高度方向のドライブに関して、負荷に大きなアンバランスがある点など問題点はあるが、2 枚鏡で簡単に水平に安定されたクーデ実験室まで光を導ける点は注目に値する。

e: ステイラブルディッシュ (図 4)

電波望遠鏡などでおなじみの標準的な案といえる。幅広い観測目的に適したタイプである。可視域からミリ波までを昼間でも 1" 角の指向精度で観測できる性能が要求される。鏡面は 25m の放物面で 1032 個の金属鏡のモザイクで作られる。16 個の同心円でわけられた軸外放物面鏡のセグメントは変形を利用して作られた原型からレプリカをとって量産される。ドームを小さくするためや構造上の理由から F比は 0.75 程度が適当とされている。

副鏡はグレゴリアン式でカセグレン焦点附近にある第 3 鏡、第 4 鏡を通して直下のクーデ室に送られる。主焦点とカセグレン焦点での観測も可能である。主鏡構造部の重力変形や温度変形は ±2mm 以内におさえなくては

* 東京天文台 Minoru Simizu and Syuzo Isobe:
New Development of Large Telescope in the World
[II].

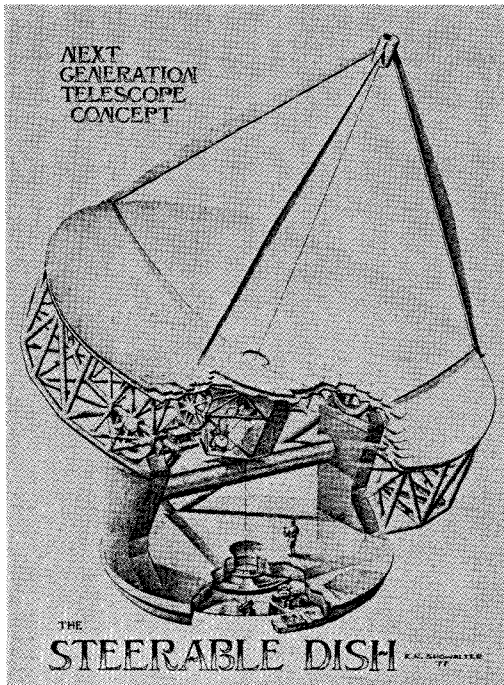


図4 スティラブルディッシュ

ならない。鏡面の制御、副鏡の調整、16種類の異ったサポートシステム、可干渉性など、注意深い設計が要求されるが、他の案にくらべて最もコンパクトでスマートな点有望なものの一つといえる。

f: 6×10m MMT

この方式は、スミソニアンとアリゾナ大学がホブキンス山々頂に完成させたもの(図2)をスケールアップしたものである。25mを得るためには10m鏡6個を一つの架台にのせなければならない。構造的には大きくなるが、個々の望遠鏡の間に支柱が入るため頑丈な立体構造が形成される。6個の望遠鏡を独立に使って、一つの天域でのことになった場所や同じ天体を異った波長や装置で同時に観測できる。又共通架台のため像の合成も比較的容易である。個々の望遠鏡のF比をむりに明るくしないで筒を短くできるという利点もある。鏡の軽量化のために、“Egg Crate”方式(ハネカム式)を採用し、それぞれの10m鏡は中央6m、周囲は16個の2m扇形鏡を並べるといふ複合方式である。何よりも経験ずみの強みはある。

g: 6×10m アレイ望遠鏡(図5)

前述のMMTをバラバラにして光束を一ヶ所に集める方式で、一つずつ独立に使ったり共同で使ったりできる。多少コスト高になるが、色々な国や機関で分担して作り使用できること、順次で作っていける点など見逃せない利点である。スペckルなど干渉観測に適している。

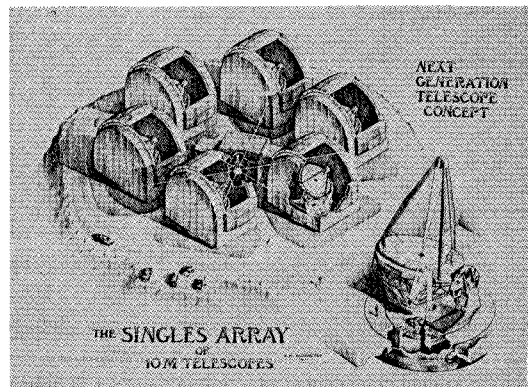


図5 6×10m アレイ望遠鏡

h: 小望遠鏡のアレイ

これは、たくさんの光束を1ヶ所に集める技術だけを解決すれば、すでに技術的に完成されているクラシカル2.5mを100個並べるだけでよいという開発要素の最も少い何となく横着な方式である。広大な敷地を必要とし光束を集める技術も複雑でロスも大きく、一見現実的なわりには最も非現実的である。赤外観測には特に不向きである。アレイ式としては、どの位の口径を何個集めるのが最適かを考える必要がある。(インドでは238cm望遠鏡を6台並べる計画を持っている。)

2) その他の案群

a: ソ連の25m計画案では6mをそのまま大きくしたAlt-Azマウントでセグメントミラー方式が考えられている。25m主鏡部の重量は鏡筒を液体内に浮かして軽くしようというユニークな考えである。カナダのドミノンの25m案では、旧来型の3m鏡69個を環状に配置し中央のクーデ実験室に光を送りこむアレー式が考えられている。ESOでは25mと欲張らず2つの16m案が提出されている。

b: 4m×15 アレイ望遠鏡(ESO, 図6)

個々の望遠鏡はAlt-Alt方式を採用し、各々の望遠鏡からの光束は共通のクーデルームに焦点を結ぶが、何れも途中の大気の乱れを防ぐため真空パイプで導かれる。このAlt-Alt望遠鏡のテストを兼ねて現在チリで3.5m用クーデフィールド望遠鏡が作られ、基礎実験が始められている。共通の焦点までの間に7枚の反射面を使わなくてはならない点はあまり感心できない。又この方法では300ミクロン以下の可干渉性を得ることはむづかしい。第1段階として光学的に像の結合を行うことを考えているが同じ焦点距離にすることや像回転をそろえることなど難しい問題が多く、最終的には個々の望遠鏡の検出器からの出力を合成させる電子的像合成方式をとることになりそうである。

c: 16m シングル望遠鏡(ESO)

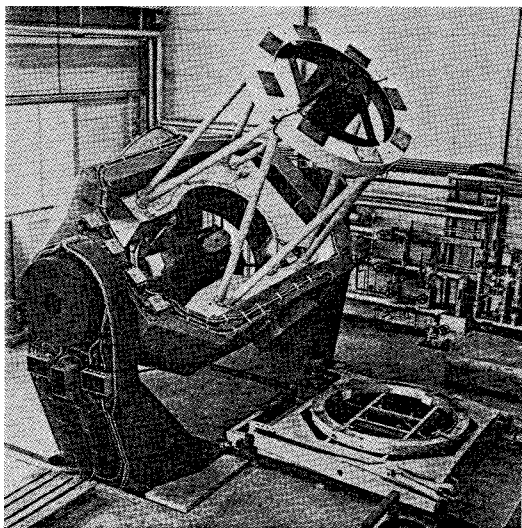


図 6 ESO の 1.5m Alt-Alt 望遠鏡

この望遠鏡の主鏡は 18 個のセグメントからなっており 96 個の精密位置検出器と 54 個の位置決め機構によって数 msec の応答速度でコントロールされる。波長 $2\ \mu\text{m}$ 以下のコヒーレンスが得られるそうである。この望遠鏡の特徴は、時間のロスと光のロスと同じであるという考えに重点をおき、沢山のナスミスユニットをドームのまわりに配置して簡単に交換できること、各々のユニットで自身の制御デスクを持っていること、そして一つのミラーセグメントの再蒸着を速やかに行えることなどに気がつかっている。例えば一つのセグメントをはずすのに 3 時間、蒸着に 4 時間、取り付けに 5 時間と昼間のうちに完結させるといった具合である。

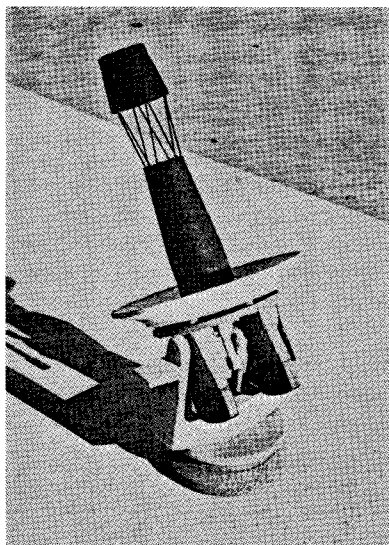
d: その他イギリスの 25m ($6 \times 10\text{m}$)、中国の 10m (六角セグメント, F/1.75 オプティカルテーブル式) や小さいが 4m のストローマン (かかし) 望遠鏡 (図 7 中央の筒で副鏡を支える)、フランスのセルガ天文台の球形のコンクリート干渉望遠鏡 (図 8) などたくさんのアイディアが提出されている。

6. スタートしている新技術望遠鏡 (New Technology Telescope)

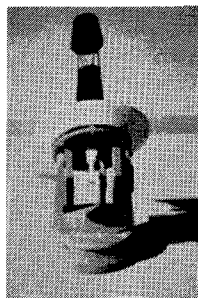
キット・ピーク天文台をはじめとするやや夢のような 25m 案、ESO のやや現実的な 16m 案を紹介したが、4m クラスがほぼでそろった現段階で実際に実験と設計に入った幾つかの例をあげてみよう。

a) 完成した MMT (図 2)

ホプキンス山の MMT についてはすでに 4 でのべた通りである。鏡の軽量化、像合成、Alt-Az マウントなどの新技術をふんだんに採り入れたこの望遠鏡は現在も詳しい解析段階であると聞かすが、今後この望遠鏡の経験



(a)



(b)

図 7 4m ストローマン望遠鏡

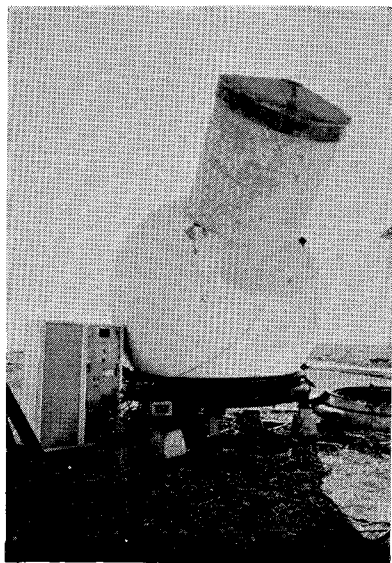


図 8 コンクリート干渉望遠鏡

は次の大型望遠鏡にとって有効な実験望遠鏡としての役割りが期待される。現在このスケールアップとして14.2 m の“MMT-2”を設計中である。

b) カリフォルニア大学の 10 m 計画 (図 9=表紙)

リック天文台では 305 cm (120 インチ) に次ぐ望遠鏡として 10 m の超大型プロジェクトを 1980 年代に完成させようとする設計と実験を開始している。この望遠鏡は紫から赤外までの波長域をねらっているが、この種の望遠鏡としては比較的広い視野 20 分角を目標としている。そして波長 10 μm での回折限界の分解能が得られるという理由から 10 m という口径と Single dish 方式がえらばれたそうである。視野を広くとりたいことと鏡の作り方のむづかしさから主鏡の F 比は 1.5 が限界であるという計算から一応 1.75 という F 比がえらばれた。光線集中度として 80% が 0.33 内に入ることを期待しているとのことである。

鏡はセグメント方式で 60 個の六角形の鏡は 10 cm 厚の 1.4 m 径である。鏡材には低膨張ガラスが用いられ、軸外放物面の研磨方法が第 1 の難問である。そして全面を質のよい放物面に保つためのアクティブコントロールシステムが次の難問である。このためのセンサーとアクチュエーターの研究はすでに開始され試験研究費として 2 億円が通ったそうである。最終的には 300 個の静電容量を用いたセンサーとボールネジ式の 180 個のサーボアクチュエーターで各セグメントの相対位置をコントロールする。

c) テキサス大学の 7 m 望遠鏡 (図 10)

この望遠鏡は一枚もの (Monolithic Mirror) で 7 m を実現しようというものである。200 吋の次は 300 吋でいこうとテキサス魂で国民にうったえようという魂胆である。鏡の厚さは 5 インチで口径/厚さの比は 60 という薄さである。7 m という直径はメッキ装置、研磨、輸送などの点から多分ギリギリ可能な線といえよう。光軸方向のサポートは 100 個のエアパッドを用い、ラジアル方向は鏡の背面に穴を明け、60 個のレバーとおもりで重

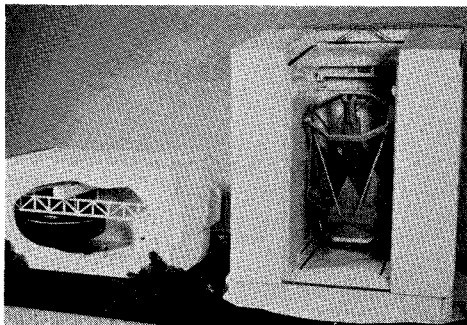


図 10 テキサス大学 7 m 望遠鏡と真空メッキ装置の模型

力による横ズレを補償するという方法が検討されている。約 1 m 厚の鉄骨構造のミラーセル構造体と主鏡との間の温度変化と撓みによる変位のちがいをどのようにして補償するかなどまだまだ研究の余地は多い。ニューヨークのコーニング社で作られた鏡材を船でセントロレンスまで運び、そこからツーソンまでトラックで運んで研磨と検査を行い再び陸路ミラーセルと共にマクドナルドまで輸送する姿は想像するだけで勇壮である。しかしメッキとテスト, focal reducer やチューブトラスをどうするかなど山積した難問題をどう解決してゆかか期待より心配の多い望遠鏡である。

d) キットピークの NNTT

キットピーク天文台では NGT の夢からさめてというか現段階での最も可能な選択として、15 m の National Telescope のデザインの検討をはじめている。セグメントミラー方式を採用した場合 5~20' の視野が必要であり、全部の鏡を総合して種々の波長でシーイングの良い所で回折限界の良い像質を得ることはキツイ問題である。又 MMT の場合は近赤外での回折限界の影響をさけるために個々の主鏡の大きさを 4~7 m にしなくてはならない。イメージングと焦点位置など普通の望遠鏡と同様未解決な問題を処理していく必要がある。カリフォルニアの 10 m, テキサスの 7 m, アリゾナの 14.2 m “MMT-2”, KPNO・NNTT などすべての計画やテストの状況をみながら共同で 1985 年をめどに設計を完成させて NSF に予算要求を行う予定である。

15 m 鏡のためには 1.5 m~2 m のサイズのセグメントを 100 個必要とする。高精度の放物面鏡を得るために、Stressed Mirror Polishing という研磨法と光学検査のための実験が開始されており、そのむづかしさがすでに報告されている。2 m のテスト望遠鏡の設計図はすでにでき上がっている。

7. 新技術望遠鏡の問題点

今まで述べてきた色々の計画案から今後どんな技術開発が必要であるかは大体つかめることと思うが、問題点の整理と検討をしてみると次のようになる。

a) 単光軸と多光軸望遠鏡

未来望遠鏡は単光軸望遠鏡と多光軸望遠鏡の二つに大別されるが、MMT やアレイは後者に属し前者の単光軸方式にくらべて個々の望遠鏡の鏡が小さくてすみ、鏡のサポートや軽量化の点で作りやすさに利点があるが、光束を集める技術と赤外観測における回折限界と背景雑音の点に問題が残る。しかし別々にして使える点、干渉計として使う場合や鏡筒が短くてすむなどの利点を見逃すことはできない。単光軸の場合はセグメント間の面積を 2% 以下におさえないと赤外観測にとって不都合とな

る。副鏡のサポートトラスも赤外屋さんの気にする所である。しかしアクティブコントロール（パッシブならなお結構だが）さえうまくいけば結像系としては良質のものが得られるであろう。何よりも全体として一番コンパクトになる点が魅力である。どちらも天文学的要請と干渉計技術がキメ手となる。MMT とアレイの選択ではコスト的にアレイの方が高くなりそうであるが MMT はかさばりすぎになる点が気になる。最適なサイズが計算できるであろう。アレイは国際協力向きといえる。

b) モノリスとセグメント

Monolithic mirror の場合、蒸着と研磨と光学検査と輸送の点で 7m 程度が目下の限度であろう。スプレーでメッキするとか何か手軽にコーティングできないものであろうか。テキサス式の超うす型の鏡では風などによる鏡面の波打ち現象をどう防ぐかの問題がある。これはマウナケアの UKIRT でも起きた問題である。

10m クラスではやはりセグメント（モザイク）にならざるを得ない。六角セグメントかペダル（花卉）式セグメントかは口径によるが、各セグメントは丸い鏡材から作られるのでペダル式の損失は大きい。またいくら計算機がやることとはいえあまりセンサーとアクチュエーターの数が多すぎることはトラブルの種となりそうである。10m 程度までならペダル式の方が都合よさそうである。セグメント間のすき間の問題も重要である。

c) セグメントミラーのコントロール

カリフォルニア大学の 10m では 10cm 厚で 1.4m 径が単位になっているが、厚み対口径の比が 1/14 になっているので 9パッド 3点支持方式などで鏡面のゆがみを 30nm に押えることが果して可能であろうか。300 個の変位センサーと 180 個のアクチュエーターを Alt. と Az. に関する 300 個の線型方程式で計算して 100 Hz で制御することに問題はないのであろうか。もし変位センサーのノイズレベルを 50nm r.m.s. とすれば像の大きさは 0.2" になるそうであるが、この 50nm で安定な感度を示すセンサーに対して同様のスムーズさを要求されるアクチュエーターが必要となる。この辺の実験は現在カリフォルニア大学で行われている。

d) センサーとアクチュエーター

この種の検出器としては最近、差動トランスや静電容量や渦電流を利用した微小変位計がでまわっており 10nm 程度の分解能が得られる様になった。エンコーダーや光波干渉計を併用してストロークと分解能の適当な検出方法を確立する必要がある。UKIRT の薄型鏡の場合はロードセルを用いている。

アクチュエーターとしては最近 IC パターンを作るときなどの必要性からセンサーと共に需要がふえ研究も進んでいる。精密ボールネジを用いた方法で $1\mu\text{m}$ 、繰り

返し位置決め精度 $\pm 0.25\mu\text{m}$ でストローク 100mm 程度のもものが得られているが nm 領域では電磁駆動やピエゾを利用したものでないと精度が得られない。鏡のコントロール用としてはパワーも必要であり、リックでは精密ボールネジで成功のめどがついていると聞いている。計算機制御とサーボシステムに関しては充分進歩しているので多分問題はないと思われる。

e) Stressed Mirror Polishing

主鏡の各セグメントは、各ゾーン毎に何種類かの軸外放物面を作らなければならない。このためにどの天文台でもこの方法を研究している。この方法は、鏡にあらかじめ計算された量の曲げを与えておきその表面を球面に研磨する。そしてあとから曲げていた力をとりのぞくと面はお好みの軸外放物面になるというやり方で、昔シュミットが補正板を作るときに用いた方法と原理は同じであり歴史は古い。一つの型ができればレプリカを必要な数だけ作るだけでコスト的にはうまいやり方といえる。リックでは 35cm, KPNO では 2m を用いて共同で実験を行っている。この実験では高いテストタワーが必要であり、KPNO では 4m の研磨台の上では高さが足りないで平面鏡で折りまげて研磨台の近くで曲率半径や面の形状をしらべながら研磨を行っている。各セグメントの表面形状誤差は $\lambda/10$ r.m.s. におさえなくてはならないのと曲率半径誤差も $\pm 0.5\text{mm}$ 以内にしないといけない。余計な平面鏡の介在は困難さを増大している。

f) Light Weight Mirror (図 11)

鏡を軽量化することは望遠鏡の全重量を減らすことになり、いろいろな面でコストダウンにつながる。MMT では“Egg crate”方式といういわゆるハネカム構造が採用されている。これは図のように 2枚の 25mm の板の間を同質の Fused Silica でつなぎ合わせ融着させたもので、重量はムクの場合の 1/3 ということである。鏡材の支持は Alt-Az 架台のおかげでローラーチェーンとコンストンパネのようなもので一方向に吊るだけという簡単なものである。鏡を裏側から支持する方法は SAO/UA では機械的なレバー式であるが、エアバッグを大口徑の場合には用いる方がよいであろう。このように、モザイ

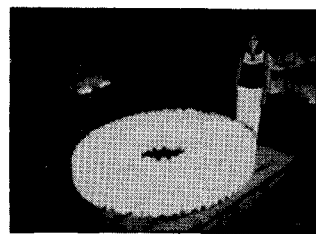


図 11 ハネカム鏡の前身。エッグ・クレート鏡

クでもモノリスでも鏡をいかに軽くするかの研究が大切である。

g) ゆがみの解析

鏡面のサポートや研磨、望遠鏡本体や光軸の姿勢差による変形と変位などの解析のため有限要素法などを用いたゆがみの解析が盛んにおこなわれている。これは設計段階だけでなく、使用中でも常に計算しながら観測することも考えられ、計算機も専用のものを必要とすることもあり得る。

h) 架台について

Alt-Az マウンティングについては、赤外望遠鏡、電波望遠鏡や飛驒のドームレス望遠鏡などすでに我国でも経験済みなので余り問題はないと思われる、Alt 軸、Az 軸共に非線型な動きをするため、計算機と精密なエンコーダを用いた完全な速度制御と各種の補正解析が必要である。又 Parallax angle に相当する視野回転（ナスミスやクーズでは更に Alt 回転や Az 回転に依存する回転が追加される）が生じることがこのマウンティングで一番の問題でもあろう。観測装置の回転機構やデローターを用いたガイドシステムの研究も必要となる。直線モーターを用いたサーボシステムに関しては問題な

いとしても3つの回転軸の機械的安定性再現性がどこまで得られるかが追尾精度を決定するので、この辺の検討が急務といえる。ツアイスでは75cmの望遠鏡で良質の直接写真の撮影に成功しているが超大型での問題点は多く残されている。

i) その他の問題点として新しい発想による光学設計、focal reducer, image combine, adaptive optics, fiber optics の利用、検出器の開発など実に多くの問題が残されている。そしてコストダウンをいかにして行うかということが常につきまとう大きな問題点である。

8. おわりに

今までのべてきた問題点を日本の現状にてらして考えてみると、残念ながらこと望遠鏡工学に関して何人の人がどれだけ関心をもちどれだけ努力してきたであろうか。勿論これは日本の特殊事情として片付けることもできる。我国ではメーカーがしっかりしているという事情、また日本の大学の性格などの事情もあるが、今からでもおそくはない、しっかりとした技術的基礎をもった天文学にしたいと思っているのは筆者らのみではないことを信じている。

書 評

理科年表読本「こよみと天文・今昔」

内田正男 著

(丸善, 昭和56年12月刊, 184頁, 1,200円)

それまで使われていた太陰太陽暦から太陽暦への改暦が行われた明治6年(1873)から100年後の1973年、改暦100年を記念して、それまであまり見られなかった暦に関する一般書が出版され、それ以後、多くの暦、天文学史に関する一般書、啓蒙書が出版され続けている。この本の著者内田正男氏をはじめ、暦、天文学史の研究をされている先達の研究成果がわかりやすく書かれており、暦についての多くを教えていただいた。この本もまた多くのおもしろい話にいろどられていると同時に著者の暦に対する主張が語られている。

著者が「はじめに」の中で「暦や天文の歴史についての啓蒙書は、ここ数年かなり多く出版されている。そのうえにまた一書を加えることにはいささかの疑問がない訳ではない」とし、それらの類書と違う特色の模索、理科年表との接点について苦心された事が書かれているが、読み終わった時に、その苦心の跡が感じられた。又、読みやすい事という点もあげられているが、著者の歴史や文学への関心の深さから、それらの逸話を取り入れて、興味深く読まされた。そして私なりに思った事は、理科年表に載せられている数字の解説というよりは、それらの数字のいわれと言おうか、その数字に至った歴史——例えば経度の話(V章)など——理科年表の暦、天文に

載せられている数字の物語が語られているという事だった。

後になったが、内容を簡単に目次順に印すと、

「I 理科年表と旧暦と」24気について説明されていると共に、24気の掲載への疑問が出されている。又、旧暦の不便さについて話されている。

「II 歴史上の日付」干支が古くから用いられている話。昔の日付を知るための長暦についてと、太安万侶の墓誌の日付についてふれられている。

「III 太陽暦」古くから太陽暦であったエジプト暦から太陽暦の歴史が語られ、日本で太陽暦が用いられる事になった明治の改暦の周辺が書かれており、神武紀元の話、改暦の詔書に載せられている閏年の話。月齢をあらわすのになぜ正午月齢なのか等がある。この章で神武紀元に関連してアメリカの天体暦掲載の年代学的紀元の話がある(p.60)が、そこで日本の暦象事項が米暦によってどのように書かれているが、日本で別に計算されている。

「IV 年月日と時刻」それぞれの長さの事。週についての話。明け六つ、暮六つのところで不定時報について説明し、暦の仕事にたずさわってきた人々が苦心した食子報の話がある。

「V 天文台今昔」江戸の天文方や西洋天文学の普及について、理科年表の誕生について書かれている。又、日の出入、方位高度の計算の仕方がでているので、任意の場所や時間のがほしい方の参考になると思う。

「VI 暦と迷信」章題の他に各地でだされていた領暦やほうき星の話がでている。

理科年表の解説としてというよりは、暦の本としておもしろく、豊かな本であると思う。(伊藤節子)