

# 自動光電子午環

安 田 春 雄\*

## 1. はじめに

今から約 20 年前基礎位置天文学の分野では、基本座標系に準拠した位置と固有運動を持つ 6.5 等から 9.2 等間のあらゆる光度およびスペクトル型を含み、 $1^\circ$  平方に 1 個の割合で分布している星の網を全天に構成する計画である AGK 3R 星と南天標準星 (SRS) の国際協同子午環観測の最中にあった。この二つの計画はワシントン D.C. にあるアメリカ海軍天文台の今は亡きスコット (F. P. Scott) 氏の手で進行中で、AGK 3R 星の国際協同観測は終わり北半球の主要な子午環から観測結果がワシントンに送られてき、北半球の 2~3 の子午環が南天標準星観測のため南半球に移動していた時期であった。

この二つの計画で活気溢れるワシントン海軍天文台の子午環部門に滞在していた私は、スコット氏を中心に若い人も集って将来の子午環について話し合った。当然のことながら実視観測では限界と考えられる当時の観測精度をどうして突破するかが最初の話題であった。AGK 3R 星観測に参加した子午環の観測精度は平均誤差で赤経  $\pm 0.30$  赤緯  $\pm 0.35$  で、子午環によりそのまわりにばらつきがあった。また観測者の個人差とこれに起因する星の光度による系統差という難物を退治するには、あらゆる測定機構部に電子技術を使った測定装置の開発が急務であろうと考えられた。しかし子午環観測の基本は太陽の位置観測であるので、大きな視半径を持つ天体の位置測定方法の開発なしでは画竜点睛を欠くものである点で一致した。地上から観測する以上大気による星像の踊りで観測精度は制約されるが、それに起因する子午環観測の限界である 1 回の観測精度  $\pm 0.1$  に近い精度がその目標である。

当時はまた天文学の観測に電子計算機の導入が考えら

れていた時期であり、観測データ収集・測定機構の制御・望遠鏡の指向にオン・ライン計算機を使うことができるときがくれば、子午環観測のように膨大な仕事量を持つ分野としては、最初に手掛けるべき点であることで一致した。

電子技術とオンライン計算機との組合せは当然観測精度を前記の目標精度に近づけることを可能にするかもしれないし、一方では観測能率を飛躍的に増大させることはいうまでもなく、観測結果の迅速な発表も可能にする。観測能率の増大は観測の限界等級をこれまでよりかなり上げてでも子午環観測は対応してゆけることを意味する。

この話合いに参加していたクロック (B. L. Klock) 氏はその後数年のうちにカセグレン形式の 10 吋自動子午環の建設計画に着手した。ヨーロッパではハンブルグ天文台のヘッグ (E. Hög) 氏はスリットを利用した光電式マイクロメーターを持った子午環を、ボルドー天文台のルケーム (Y. Requième) 氏はセンサーを利用した光電マイクロメーターを持つ子午環を完成した。

これから紹介する東京天文台の自動光電子午環はその集りで話合われた理想をものごとく実現できるよう計画されたものである。

## 2. 自動光電子午環計画

自動光電子午環は昭和 54 年度に初年度予算が認められ、西ドイツのカール・ツァイス社で製作が行なわれており、昭和 57 年 3 月末までに三鷹の東京天文台に運び込まれ、4 月から組立・調整・試験が行なわれ 8 月末までに東京天文台に引渡される予定である。なお、昭和 55 年度は時計機構、昭和 56 年度はデータ処理計算機と気象記録装置の予算が認められた。

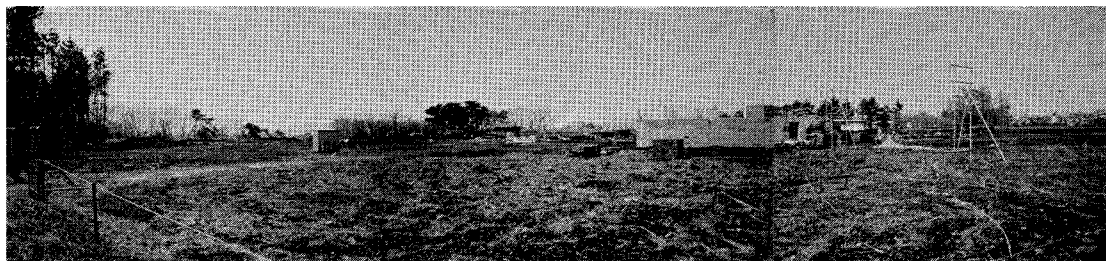
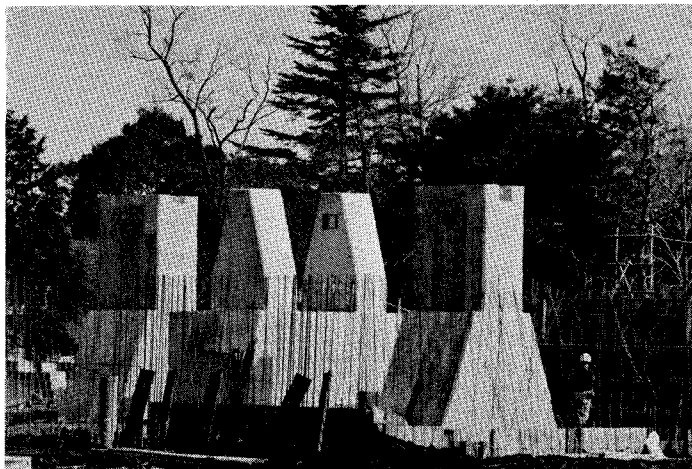


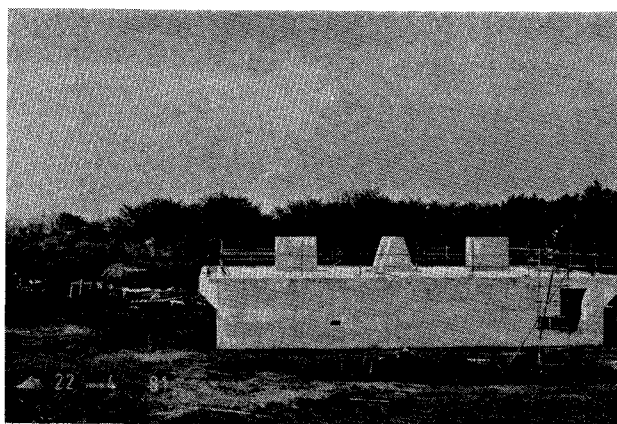
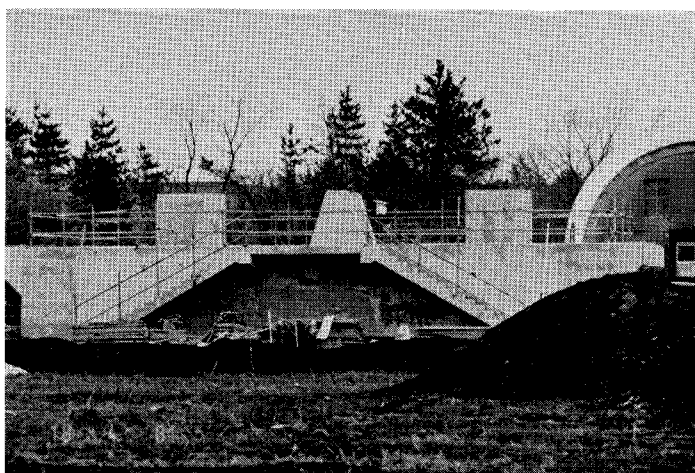
写真 1 自動光電子午環敷地全景  
中央に見えるのが観測室ドーム基礎

\* 東京天文台 Haruo Yasuda: Automatic Photoelectric Meridian Circle



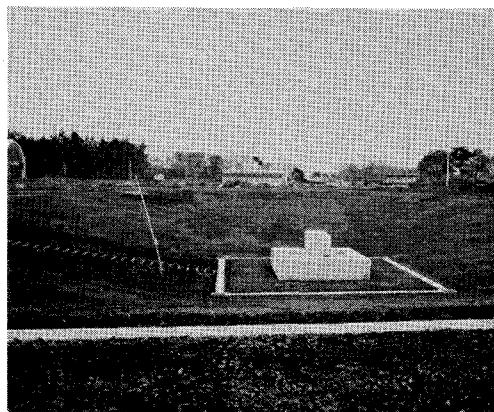
◀ 写真 2 建築中の観測室内ピアー  
中央2本のピアーは望遠鏡の  
東西ピアー、外側は南及び北  
子午面視準器のピアー。

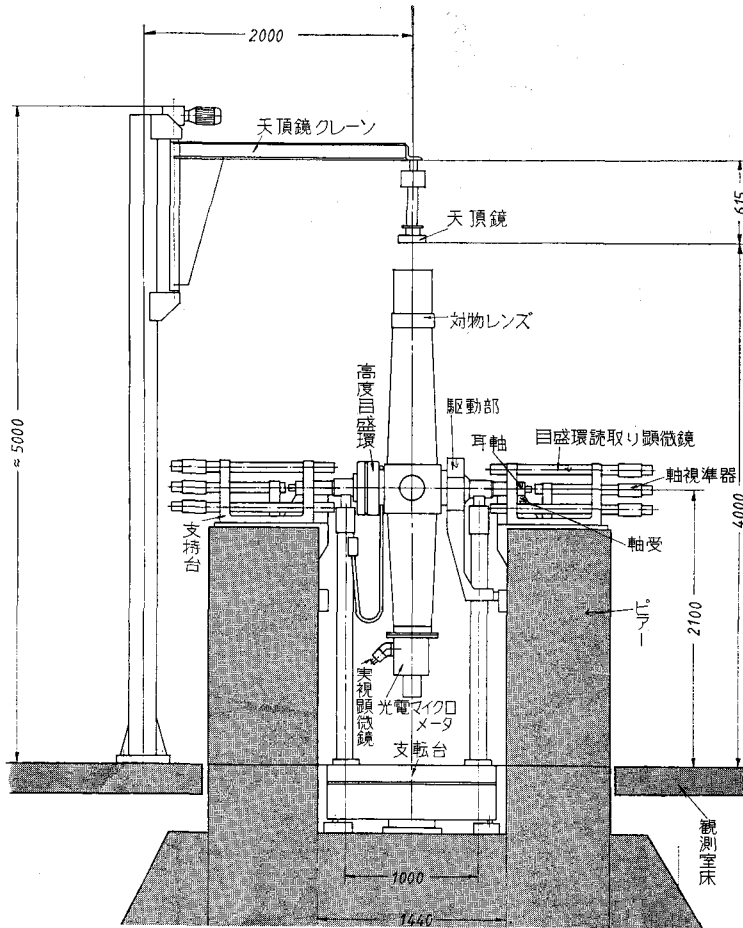
写真 3 観測室ドームの基礎完成の様子  
手前に見える階段は見学台昇降階  
段、右側に見えるのが現在の  
子午環のドーム



▲ 写真 4 東側から見た観測室ドームの基礎  
東側に監視室が隣接して建てられる、右側の  
入口は観測室地下への出入口

写真 5 北子午線標基礎  
向う側中央に見えるのが観測室ドーム  
基礎、左側に現在の子午環室ドームが  
見える。





単位: mm

図 1 子午環望遠鏡各部構成.

自動光電子子午環室は現子午環の西 50 m 離れた地点に建てられる。接地気層の影響を避けるため子午環の水平回転軸の高さは地表約 5 m とした。観測室の広さは南北 15 m, 東西 10 m であり、観測室の東側に隣接して 2 階建の監視室がおかれる。ここには観測者一名が常駐し望遠鏡と制御盤・計算機の監視に当り、必要場合は望遠鏡についた実視顕微鏡で視野内の星の位置を調整する。

子午環は他の望遠鏡と異り夜間観測の他、昼間も太陽・水星・金星や 4 等星までの明るい星の観測も行う。したがってドームの設計に当り室内屈折を起こさないように特に注意を払った。

観測室から約 200 m 離れて制御棟をおく、制御棟にはデータ処理計算機・原子時計・気象収録装置などがおかれる。観測室ドーム、監視室、制御棟は今年度中に完成予定である。

以下紙数の都合上仕様を中心に装置を紹介することに

止めたい。

### 3. 望遠鏡

自動光電子子午環は現在の子午環と同様な屈折望遠鏡で、対物レンズの有効口径 190 mm, 焦点距離 2576 mm 焦点面での 0.1 mm の長さは角度の 8" に相当する。

望遠鏡の受光部であるマイクロメータ部には、片仮名の“ハ”の字形に 2 本のスリットを配置した二重スリット (Double Slit) 板がおかれ、スリットを通過した光は中心波長 550 nm の干渉フィルターと 2 枚の減光フィルター (夫々 1/60 と 1/3,600) の組合せからなるフィルターを通過し、光電増倍管 (EMI 9892B/350) の直径 6 mm の陰極板上に集められる。この光電増倍管は光子計数器に接続され、50 ミリ秒の間にスリットを通過した光子の数を数え、その量を時間とともに積分してゆき中央値法 (Median Method) でスリット中心を通過する時刻を決定する。この方法はシンチレーションによる星

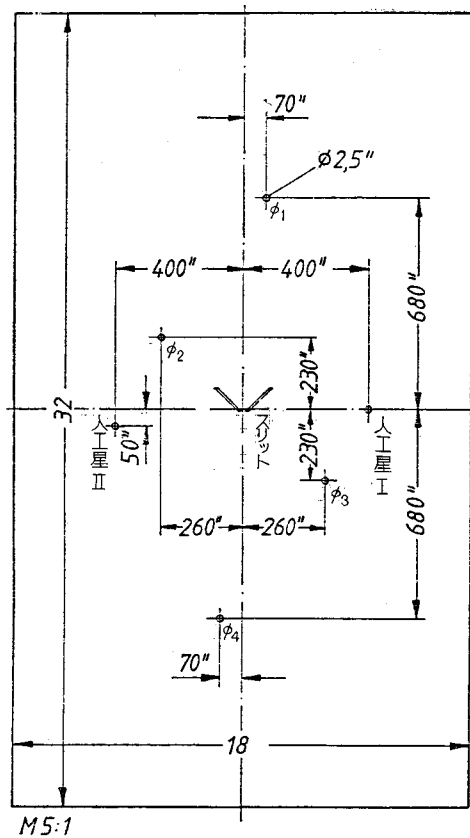


図 2 二重スリット板

中央にある片仮名の“ハ”の字形のスリット，太陽月観測用のピンホール  $\phi_1\phi_2\phi_3\phi_4$  と天頂鏡天底鏡などの測定に使う2つの人工星（発光ダイオード）からなる。

像の踊りに起因する誤差を最小にする目的で採用した。

スリットの高さは太陽系の中で最も視半径の大きい木星も観測できるよう70"に作られているが，微小星観測の場合背景光の量を最小にすることが望ましいので，スリット板のすぐ後におかれた絞りでその高さは20"に絞ることができる。スリット幅は5"，7"，10"の3種類が用意され観測条件に応じ交換可能である。

二重スリットは赤経方向のみ動く。観測の時二重スリットは一定の振幅で振動しつつ星を2分間追跡する。すなわち一振動の間に一つのスリットは正逆2方向から星を横切る。ただし星の赤緯による系統誤差を防ぐため星とスリットの相対速度は星に無関係に一定とする。例えば星とスリットの相対速度が秒間に30"，スリット幅10"スリットの高さ20"の時2分間で88箇のスリット通過時刻がえられる。この時刻の平均から星の子午線通過時刻が計算され，“ハ”の字型の二つのスリットの中心通過時刻の差からスリットのどの高さを星が通過した

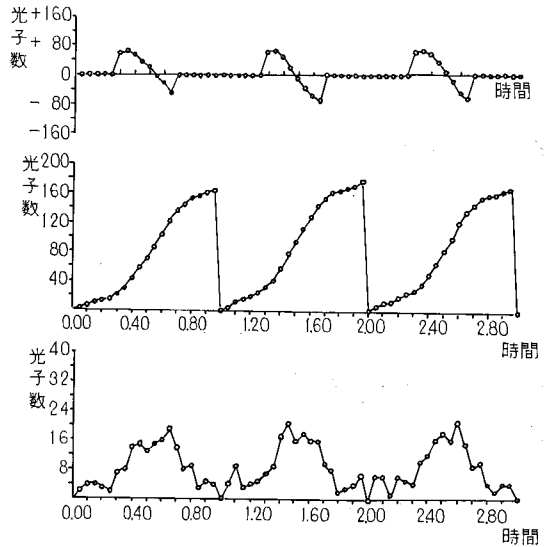


図 3 スリット中心通過時刻決定の中央値法の一例  
下図は，12.0等星を10"幅のスリットで観測した時の50msの間に受光する星の光子数の時間変化。但し一つのスリット通過時間を単位にとっている。空の星像の踊りと光子雑音は考慮されている。この光子数を一つのスリット通過毎に積分してゆく。その時の時間変化を示したものが中段の図である。毎50msごとにその時刻より $\pm b$ 離れた時刻の積分値の差を取ったものが上段の図である。この時光子数が正から負に変わりゼロになる時刻がスリット中心を通過する時刻である。（星の像の大きさは3"とする。）

表 1 光子雑音に起因する予測平均誤差

増倍管の受ける光子数 (CPS)	星の実視等級	平均誤差	
		通過時刻 (時間のミリ秒)	角度への換算 (角度の秒)
60,000	6	$\pm 1.2$	$\pm 0.035$
24,000	7	1.9	0.056
9,500	8	3.0	0.089
3,800	9	4.7	0.141
1,500	10	7.4	0.223

かを決定できる。

表1は10等までの星の一つのスリットの中心を通過する時刻決定の光子雑音に起因する平均誤差を示す。（東京天文台吉沢正則氏の計算による。）

機械定数（望遠鏡の光軸の方向の地球上の子午線からはずれを示すパラメーター）の測定に6等星の明るさに相当する人工星を使うと，1回のスリット通過で決定される人工星の位置の測定精度は $\pm 0.035$ であることを表はす。図は実視等級11，12，13等の星を観測した時光雑音に起因する誤差と1回の観測に使用するスリットの

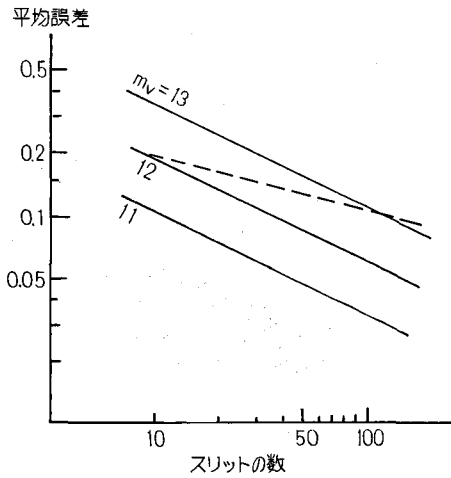


図 4 光子揺らぎによる平均誤差と星像の揺らぎによる平均誤差の比較

実線は光子揺らぎ，波線は星像の揺らぎによる平均誤差を示す。

数との関係を示す。波線は星像のゆらぎに起因する観測誤差を示す。図から明らかなように 12 等星までの星は星像のゆらぎが観測精度を決定し，13 等より暗い星では光子雑音で観測精度が決定される。

星の子午線通過時刻の決定にはある時刻にスリットが望遠鏡視野内のどの位置にあるのか知らねばならない。

このために光素子 (Photo Diode Array: 以下 PDA と略称) を使い 16 階補間法で PDA から出る信号を処理し，毎 50 ms 毎の二重スリット板の位置を決め，星のスリット中心通過時刻における二重スリット板の位置を決定する。カールツェイス社で行なわれた実験によれば，1つのスリットを星が通過する瞬間のスリット位置決定精度は平均誤差で  $\pm 0.03$  である。機械誤差の測定では地上の光源を測るので，その測定精度を決定するものは光子雑音と PDA による測定の誤差である。機

械定数決定に二重スリット板 (スリットの高さ 70") の 4 振動 (スリット通過回数 16) を使うと理想的な場合  $\pm 0.013$  の決定精度で求まる。

赤経の原点 (春分点) 決定のため太陽の位置観測を行う。月の位置観測も必要である。太陽も月も大きな視半径 (角度の 15') を持つのでスリットでは観測できない。そのため前のスリット配置図に示されているように，二重スリットの他に四個のピンホールを配した。太陽や月の西縁は  $\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_4$  の順に東縁は  $\phi_4 \rightarrow \phi_3 \rightarrow \phi_1$  の順に入りまた逆の順に出てゆく。東縁あるいは西縁の観測の時使用しないピンホールと二重スリットは絞りで隠される。一回の太陽観測で東西両縁を観測する必要上片側の縁の観測時間は 103 秒 (振幅 220" の 7 振動) とする。このようなピンホール使用の利点は片側の縁の観測のみから，太陽の中心の赤経・赤緯を決定できることである。ピンホールの直径 2.5 の時，太陽の片側の縁のみの観測から求まる太陽の中心位置決定の予想精度は  $\pm 0.16$  である。しかし実際には表面輝度の不均一性・周辺減光の影響の他昼間は星像の踊りが夜間より大きいと考えられるので，これより大きな誤差を持つであろうと推測される。なにはともあれ，太陽観測が可能であるという点でも，世界で初めての自動子午環である。

太陽のへのりのより鮮明な像が得られるよう，近赤外線領域 (中心波長 805 nm) での太陽観測も導入される。

#### 4. 高度目盛環読取り機構

天体の子午線通過時の高度決定には望遠鏡視野内の天体の位置の他，望遠鏡の視線方向の高度も測定する必要がある。望遠鏡には高度目盛環が固定され読取顕微鏡で測られる。高度目盛環は目盛線のコントラストを高めるためガラス製とした。目盛線は角度の 0.1 度間隔で目盛られている。90 度の間隔に配置され固定された読取顕微鏡はその受光部に約 430 ミクロンの長さを持つ PDA を持つ。これは目盛線の局部的不完全さの影響を

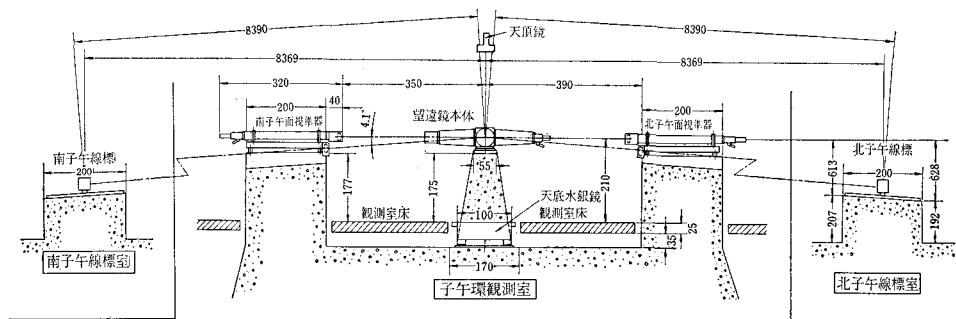


図 5 子午環附属装置配置図

子午線面に沿って観測室内の南北に子午面視準器がおかれ，望遠鏡中心から約 84 m 離れて子午線標が配置される。(単位は cm)

除くためである。読取り顕微鏡は倍率 13 で 5 本の目盛線を PDA 上に投影し、得られた信号を A/D 変換器でデジタル化し 16 ビットマイクロプロセッサに送り、中央値法で各目盛線の位置を計算する。目盛環の読みは毎秒 1 回出力される。4 箇の顕微鏡から望遠鏡の高度角の読取り予想精度は  $\pm 0.015$  である。

目盛線刻み誤差測定のため一対となって動く 2 箇の読取り顕微鏡も備える。

## 5. 望遠鏡高度設定機構

粗動機構と微動機構で望遠鏡の高度は  $\pm 2''$  の精度で設定される。粗動機構はエンコーダーの読取りを利用して、角度の 2 分の精度で高度を設定し、微動機構は高度目盛環の読取り値を利用して目的の星がスリットの中央に位置するよう望遠鏡の高度角を設定する。粗動機構による高度設定速度は 1 秒間に角度の 6 度、微動機構は 1 秒間に角度の 1 分である。

このように望遠鏡の高度の精密な自動設定を必要とするので、旧来の子午環で採用されている耳軸を V 字型の金属軸受の上に直接載せる方式を捨て、油圧による支持方式を採用した。耳軸と軸受の間の油膜の厚さは粗動機構が働いている時 25 ミクロン以上、微動で 10 ミクロンを超えず観測時は 10 ミクロン以下であるよう制御される。観測時油と周囲の空気の温度差は  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  以内に止められる。ポンプからの脈動が伝わらないようポンプ及び油圧タンクに工夫がほどこされている。

## 6. 附属装置

望遠鏡の光軸方向の天球の子午線からのずれを常に測定できるよう子午環は様々な附属装置（軸視準器・天底鏡・子午面視準器・子午線標）を持つ。このうち軸視準器と天頂鏡の使用は世界中の子午環で初めてである。

軸視準器は望遠鏡の高度角の違いによる方位誤差と水準誤差の変動を知ることが主要目的であるが、そのほか 1 星の観測中の望遠鏡の不安定さを監視する。望遠鏡の水平回転軸に向い合って東西ピア上それぞれ 1 箇置かれる。軸視準器は互に 90 度の角度で配置された PDA を持つ受光部と、それと同じ方向に見えるよう配置されたそれぞれ 6 箇のスリットからなるスリット群を持つ。光源から出た光はスリットを通過し望遠鏡の水平回転軸に取り付けられた半透鏡での反射光と透過光を PDA で受光し、スリットの位置の動きを測る。1 回の読取り精度は  $\pm 0.025$  で、1 秒に 1 回読み取られる。

旧来の子午環は水銀面を持つ天底鏡でのオートコロメーションで、水準誤差と高度目盛環での天頂点を決定していた。観測に使用されない方向での測定であるので、望遠鏡各部の歪みなどにより真の値を決定できない危険

が、現子午環での長年の経験から抱かれている。そこで直径 20 cm の平面鏡を薄い針金で吊し、振動を防ぐため鏡体の翼をシリコン油に入れた構造のカーツァイス社で開発された天頂鏡を導入した。180 度回転した二つの鏡面の測定を利用し  $\pm 0.01$  以内の精度で水平面を作る。天底鏡と常時組合せて使用することにより旧来は実験的にしか求められなかった望遠鏡鏡筒の垂直撓みを常時測定できる。子午面視準器から求まる水平方向の視準線（対物レンズの第 2 主点から望遠鏡の水平回転軸に下した垂線）とこの測定から求まる垂直方向の視準線との比較から機械定数の性格を解析できる。

南北にはそれぞれ子午面視準器と子午線標を持つ。子午線標は水平方向から  $4:1$  の俯角の方向に 80 m 離しておかれ、方位誤差の変動を監視する。子午面視準器は望遠鏡の鏡筒の撓みと視準誤差を決定するためのもので、望遠鏡の対物レンズと同じ大きさを持ち、受光部も望遠鏡とほぼ同じ構造を持つ。

## 7. 電子制御・データ処理

自動光電子子午環では 12 等星までの星を時間の 3 分間隔で次々に観測してゆく。観測される対象も太陽・月・円板状に見える惑星・点光源の天体と多様で、それぞれ異なった観測手続を採用しなくてはならない。また観測の途中で附属装置を利用して各種機械定数の測定も行う。そこで観測および測定の種類メニューに従って、迅速に望遠鏡の駆動・制御を行い、膨大な観測データを処理する必要がある。

観測室に直接隣接した監視室に置かれた制御計算機 (PDP 11/34) と望遠鏡はオンラインでつながれ、その制御計算機は約 200 m 離れた制御棟に置かれたデータ処理計算機 (HITAC E-800 相当) に接続されている。

全自動観測と半自動観測の二つの観測モードが可能であり、その他制御盤を介してマニュアル操作も可能である。全自動観測（計算機制御モード）はデータ処理計算機から制御計算機に入力されるリストに従って選ばれた各種メニューに応じ、望遠鏡各部を駆動しデータを収録しデータ処理計算機に送り返し観測結果を整約する。

観測の各種メニューの輪郭を理解できるよう入力リストの主なものをあげる。(1) 観測か機械定数の測定か。観測の時北極のすぐ近くの星・点光源の天体・視半径を持つ惑星・太陽・東縁あるいは西縁を照らされている月などの区分。測定の時どのような機械定数測定の組合せをとるかの区別。(2) 観測される天体の視赤経・視赤緯。気象装置で測られた温度・気圧・湿度をデータ処理計算機にオン・ラインで入力し大気差を計算して視赤緯は補正されている。(3) 太陽の視位置。星の太陽からの角距離を計算し、光電増倍管の保護処置を行う。(4) 天体の

実視等級、実視等級と背景光の明るさでフィルターの組合せの自動選択が可能であり、またフィルターコードを与えることによってフィルターの組合せを指定する。(5) 天体とスリットの相対速度。(6) 二重スリット板の振幅。(7) スリットの高さの選択。(8) 観測時間は2分間か、全視野内で観測するか。(9) 星は上方通過か下方通過か。(10) 自動観測か実視観測か。

望遠鏡のマイクロメーター部には実視顕微鏡があり望遠鏡の視野内の様子を見ることができる。観測者はこれを覗いて目的の星を視野内の必要な場所に持ってきたり、観測を希望する位置から初めたり終らせる動作をハンドボックスについたボタンで操作できる。このボタンからの指令は他のあらゆる指令に優先する。

半自動観測(計算機支持モード)は制御計算機のキーボードから観測測定のリストを打込むことによって、観測や測定を全く同様に進行。収録されたデータは制御計算機のディスクに貯えておくこともデータ処理計算機にオン・ラインで送ることもできる。なおこのモードでは

望遠鏡の単一あるいは複合の動作を指令できるので、特殊な測定望遠鏡の調整・検査などにも使える。

## 8. おわりに

以上、簡単に自動光電子午環の計画について紹介したが、一年後に始まる組立、調整、試験観測の進行をまって再び紹介されるであろう。

ちなみに、このような自動光電子午環は、現在ブルゴボ(ソビエト)、ボルドー(フランス)、フラッグスタッフ(アメリカ海軍天文台)、ラ・パルマ(カナリー諸島)、パース(オーストラリア)、ニュージーランド(アメリカ海軍天文台)及び東京で計画進行中である。しかしどの望遠鏡も異なった光電測定方式(スリット・回転式セクター・星像ディセクターなどの諸方式)を採用している。このことはこれらの自動光電望遠鏡が全部稼働した暁には、各々の方式に固有な系統誤差が存在するかどうか明らかになる大きな利点を持っている。

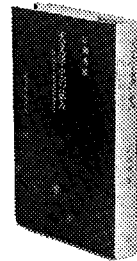
わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価380円(〒70円) '81-11月号・10月5日発売!

### ●11月号のおもな内容

- ★11月の観測ガイドは、しし座流星群やおうし座流星群など、にぎやかな現象がいっぱい。金星も西の空に高く観望の好期。藤井旭さんの解説。
- ★この夏の日食のとき、わざわざアメリカから飛来したアメリカ航空宇宙局のカイパー空中天文台。この飛行機に京都大学の舞原俊憲先生が搭乗、観測されました。その様子を舞原先生に、またこの飛行機の解説を富田弘一郎先生にお願いしました。
- ★星野写真から星の位置をどこまで正確に出せるか、加茂昭さんの計算法。
- ★各地での日食観測の模様をまとめたもの……ほか



## 天文学史の試み 誕生から電波観測まで

長い天文学の歴史を、文化の流れとしてとらえようと試みたもの。個々の事項を網羅することを主眼とせず、天文学をすすめた天才たち、そして天文学をささえた研究者たちを選んで語った、きわめてオリジナリティにあふれた読み物。

●広瀬秀雄著 / 定価2300円

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5  
振替東京6294 電話03(292)1221