

K S C の口径 60cm 反射望遠鏡

松 岡 勝 ・ 常 深 博 ・ 榮 楽 正 光 ・
富 田 弘 一 郎*

60 cm Reflector at KSC

By

M. MATSUOKA, H. TSUNEMI, M. EIRAKU and K. TOMITA

Abstract: A new optical 60-cm reflector was constructed at KSC (Kagoshima Space Center), Kagoshima, in the summer of 1975.

Photographic observations are available at the prime focus ($F = 4.5$) and a photon counting photometer is set up at the Gregorian focus ($F = 31$) to observe the fast optical variations.

The guiding telescope is a 15-cm refractor with offset guiding system.

Since the telescope is set up at the rocket launching center, it is very convenient to carry out simultaneous X-ray and optical observation for the X-ray sources as well as normal astronomical observations.

概 要

K S C (鹿児島宇宙空間観測所) に口径 60cm の反射望遠鏡が設置された。グレゴリー式光学系をもち、主焦点 ($F = 4.5$) で写真測光、及び合焦点 ($F = 31$) で光電測光をすることができる。望遠鏡は自動追尾になっているが、長時間に及ぶ観測では 15 cm 案内望遠鏡 (屈折) により、オフセットガイドをすることができる。

この望遠鏡はロケット基地にあり、ロケット、人工衛星等の観測と同時に地上から光でその天体を観測することを主な目的としている。

1. ま え が き

さそり座 X 線源 ScoX-1 が、東京天文台の口径 188 cm 望遠鏡で青白い星として同定されて既に 10 年になる。この間我が国では ScoX-1 の X 線や光での観測が重要な課題のひとつとして、いろいろな方法でなされてきた。

X 線の観測は東京大学宇宙航空研究所のロケットや気球が用いられ、光学観測はその都度

* 東京大学東京天文台

東京天文台の協力のもとに行なわれてきた。また国際協力の一環として、インドにおいて行なわれた実験では、ロケットや気球でX線を観測すると同時に地上の光学望遠鏡でも観測がなされた。このときインドに東京天文台の口径30 cmの反射望遠鏡を持ち込んだこともある。

Sco X-1だけでなく最近ではいくつかのX線源が光学的に同定されているため、一般的にX線天文学における光学望遠鏡の需要はふえつつある。こういうわけでX線天文学をやっているグループが、自分のそばに自由に使える光学望遠鏡をもつことは、何かと便利なことである。

Sco X-1のX線と光との同時観測をやっていた頃、東京天文台の大沢清輝教授は宇宙研でも光学望遠鏡をもったらどうかという話をされ、これをうけ携帯用でもよいからと、小型望遠鏡の予算が申請された。宇宙研の小田稔教授は、早速東京天文台の大沢、古在両教授と相談して、東京天文台の富田が基本的設計に関し、宇宙研の松岡に協力することになり、その他、東京天文台の西村史郎氏や、清水実氏等にもいろいろ御相談にのっていただくことになった。又具体的なテストやシステムの開発には宇宙研の常深が参加した〔1〕。

この論文ではこのような背景によって出来た口径60 cm光学望遠鏡の性能、及びそのテストの結果について述べる。この望遠鏡にとりつけられた光電受光装置については他の論文〔2〕で取り扱う。

2. 口径60 cm 望遠鏡

2-1 望遠鏡諸元

A 機械系

A-1 装置の大きさ $5,460 \times 1,950 \times 5,700 \text{ mm}^3$

A-2 マウント ヨーク式赤道儀

A-3 指向範囲 極 軸 $\pm 5 \text{ hour}$

赤緯軸 $-45^\circ \sim +70^\circ$

A-4 指向速度

極 軸	a	ハイスピード	$\sim 1.5^\circ/\text{秒}$	DC モーター
	b	セットスピード	$\sim 1^\circ/\text{分}$	レバーシブルモーター
	c	ファインスピード	$\sim 1'/\text{分}$	レバーシブルモーター
	d	追尾速度	$1/1436.0439$	r p m
	e	手動操作	非常用	ハンドル
赤緯軸	a	ハイスピード	$\sim 1.5^\circ/\text{秒}$	DC モーター
	b	セットスピード	$\sim 1^\circ/\text{分}$	レバーシブルモーター
	c	ファインスピード	$\sim 1'/\text{分}$	レバーシブルモーター
	d	手動操作	非常用	ハンドル

B 光学系

B-1 主鏡	a	型 状	凹回転放物面
	b	外 径	610 mm
	c	有効径	605 mm

	d	厚 さ	100 mm (周辺部)	
	e	材 質	E-6	
	f	焦点距離	2696 mm ($F \approx 4.5$)	
	g	中央孔	130 mm	
	h	表面処理	アルミナイズ 及び シリコンナイズ ($\lambda / 4$ 厚)	
B-2	副鏡	a	外 形	凹回転楕円面
		b	外 径	152 mm
		c	有効径	146 mm
		d	厚 さ	23 mm (周辺部)
		e	材 質	パイレックス
		f	曲率半径	918 mm
		g	表面処理	アルミナイズ 及び シリコンナイズ ($\lambda/4$ 厚)
B-3	標準合成焦点距離		18563 mm ($F \approx 31$)	
	副鏡を移動することにより焦点位置を約 100 mm 移動可能			
B-4	15cm ガイディング望遠鏡			
	a	対物レンズ	アクロマート	
	b	有効径	150 mm	
	c	焦点距離	2250 mm ($F = 15$)	
	d	付属品	暗視野照明装置, 3倍バローレンズ, 各種アイピース, 十字動オフセット装置(最大移動量 ± 30 mm)	
B-5	8cm ファインダ			
	a	対物レンズ	セミアポクロマート	
	b	有効径	80 mm	
	c	焦点距離	1200 mm ($F = 15$)	
	d	付属品	各種アイピース	
			(15 cm 望遠鏡と共通)	
B-6	焦点位置における視角			
	a	60 cm 主焦点	80.1" / mm	
	b	60 cm 合焦点	11.6" / mm	
	c	15 cm ガイディング望遠鏡	96" / mm	
	d	8 cm ファインダ	180" / mm	
C	電気操作系及び表示系			
C-1	電源部			
	DC 24 V	操作系制御リレー電源	5 A	
	DC 12 V	焦点調節モータ (副鏡移動用)	0.3A	
		ランプ用電源	1 A	

DC 100 V	早廻しモータ電源	10 A
AC 100 V	追尾, セット, ファインモータ電源	1 A
DC 5 V	TTL回路用安定化電源	6 A
DC -6 V	エンコーダ用安定化電源	1 A
DC 12 V	エンコーダ用安定化電源	0.8 A
AC 100 V	アウトレット用	10 A

各電源の一次側には安全のため、サーキットプロテクタ（ノーヒューズブレーカー）及び表示付ヒューズ組込み

C-2 操作部

操作パネル及び、2個のハンドセットにより操作可能。各軸におけるハイ、セット、及びファインの速度選択が、パネル及びハンドセットにある押釦スイッチにより可能。各方向の押釦スイッチを押している間のみ動く寸動式

追尾モーターは他の軸方向の動作と無関係にオン・オフ可能。

操作パネル及び2個のハンドセットの共通機能スイッチは3ヶ所で操作可能。但し同一軸の反対方向の動作（例：極軸のEとW）は、リレー接点によるインターロックにより早く動作した方が優先される。

シャッター開閉、焦点調節のための副鏡移動はハンドセットにより遠隔操作可能。

操作パネルの照光式押釦スイッチのランプは輝度調節可能。

C-3 恒星時部 SI D E R E A L T I M E

1秒きざみで最大23時59分59秒時まで表示。

基本周波数は1MHzで外部／内部の入力切換可能（裏面パネルのトグルスイッチ）。外部信号はBNC接続。

秒、分、時の各桁の時刻合せ可能。

SI D E R E A L T I M E の1 P P S 信号外部に取出し可能（BNC）

C-4 位置表示部 H O U R H O U R A N G L E, R I G H T A S C E N S I O N, D E C L I N A T I O N

H O U R A N G L E, R I G H T A S C E N S I O N は 0.1 分きざみで最大23時59.9分時まで表示。

H O U R A N G L E はデジタルスイッチのセットにより望遠鏡の子午線通過時において任意の数字に設定可能。

R I G H T A S C E N S I O N は子午線通過時に恒星時に設定。

D E C L I N A T I O N は1分角きざみで最大±99度59分角まで表示。

0点は赤緯0°0'でエンコーダの信号により校正。

D 受光系

D-1 主焦点（写真用）

a	手札版乾板用取枠	2枚
b	4×5版パックフィルム	1枚
c	ブローニー版フィルム用ホルダ	1組
d	35mm版カメラ（ニコン36枚撮モータードライブ）	

D-2 合焦点

光電受光装置 星の光の3色及び空（バックグラウンド）を同時にフォトンカウントする [2]

E 製作担当

株式会社法月鉄工所 静岡県焼津市

2-2 望遠鏡について

この望遠鏡の目的は、X線星を地上から光によりその性質を調べるため、光電測光及び写真測光することにある。特に暗い時には14等星にもなる Sco X-1 を光電測光するには口径が40cm以上必要になる。このことと予算とを考え合わせて、60cm 反射望遠鏡がつけられることになった。

観測方法としては光電測光及び写真測光が要求される。光電測光は精度のよい観測ができるが、天候に大きく左右される。これに対して写真測光は精度はおちるけれども不安定な天候においても観測することができる。特に内之浦では天候の移り変りが速いので両者の観測方法の変更は簡単であることが望ましい。一般に反射望遠鏡のシステムとしてはニュートン式、カセグレン式、及びグレゴリー式がある。このうち眼視観測は不要であるので、ニュートン式は除外される。次に主鏡の焦点位置で写真測光を、合成焦点位置で光電測光をする場合、カセグレン式では各々に応じて副鏡の取り付け、取りはずし、及び光学系の調節が必要になってくる。これに対してグレゴリー式では主焦点位置でのカメラの脱着だけですむことになる。グレゴリー式はカセグレン式に比べて鏡筒が長くなるなどの欠点はあるが、その他にも副鏡が凹面でよい。ため、よい光学系をつくりやすいなどの長所もある。こういう理由でグレゴリー式が採用された。

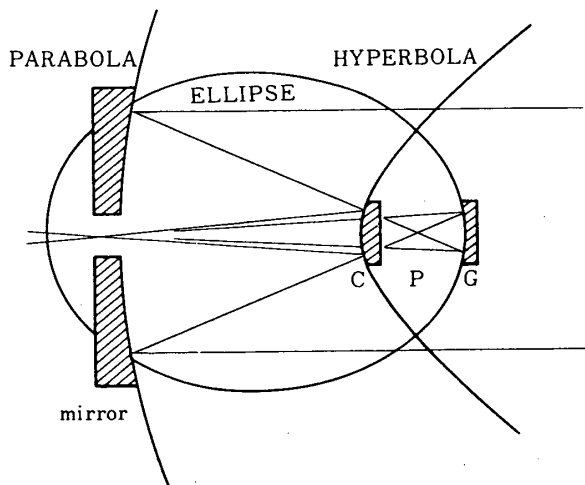


図1 カセグレン式とグレゴリー式の光路比較。
Cはカセグレン式の副鏡の位置、Gはグレゴリー式の副鏡の位置。

カセグレン式とグレゴリー式の簡単な比較を表1に示す。又その光学系の模式図を図1に示す。

表1 カセグレン式とグレゴリー式の特徴比較

	カセグレン式	グレゴリー式	備 考
鏡筒 副鏡 F 数	短 い 凸回転双曲面 小さい	長 い 凹回転楕円面 大きい	凹面の方が作り易い 光電測光には大きい方が 好ましい
像	倒立像	正立像	どちらでもよい

次に望遠鏡のF数であるが、これは光学系の製作の難易、星像の良否、写真撮影の場合の写野の広さ、鏡筒の長さなどに関係してくる。写真で最もよく使われる35mmフィルムにおいて、 $S \propto X - 1$ の比較星(20分角以内)が収差の少ない範囲に十分入るよう写野を選ぶ〔3〕。合成焦点では副鏡の大きさでF数がきまる。こうして主焦点は $F = 4.5$ 、合成焦点は $F = 31$ ということになった。

望遠鏡の架台は当然赤道儀が採用された。その中でもヨーク式と呼ばれる形式になった。これはこの望遠鏡の製作にあたった法月鉄工所が、ヨーク式赤道儀の製作経験をもっていたからである。この形式では北極付近の星野が見えないという欠点をもっている。観測可能な範囲は赤緯 $-55^\circ \sim +70^\circ$ である。

極軸と赤緯軸にはエンコーダをとりつけ、赤経は0.1分時、赤緯は1分角までデジタル表示される。電源投入後、恒星時を正しく校正しておけば、時角0時0分(子午線)を望遠鏡が通過すると赤経方向のエンコーダは恒星時にセットされる。又同じく望遠鏡の視野が、赤緯 $0^\circ 0'$ (赤道)を通過すると、赤緯方向のエンコーダは0にリセットされる。その後は望遠鏡の向いている方向の赤経赤緯がデジタル表示される。又両軸の回転速度はハイスピード、セットスピード、及びファインスピードの3種類があり、ハンドボックスで操作できる。

この望遠鏡にはさらに口径15cm、 $F = 15$ の屈折望遠鏡がつけられている。これは視野を $\pm 1^\circ$ の範囲で変えることができ、オフセットガイドが可能になっている。この他ファインダーとして8cm及び4cmの屈折望遠鏡が付いている。

2-3 主鏡のハルトマンテスト

回転放物面の主軸に平行光線が入ると、幾何光学では放物面の焦点に収束する光束が得られるが、実際の光では回折により拡がってしまう。この焦点位置での拡がりや鏡面の位置からみると、その回折リング像の強度 $I(\lambda, \theta)$ は次の式で表わされる(図2)。

$$I(\lambda, \theta) \propto (J_1(x)/x)^2, \quad (1)$$

但し $x = \pi D \sin \theta / \lambda$,

I : 強度,

λ : 光の波長,

θ : 鏡面中央を原点とし主軸とのなす角,

J_1 : 一次 Bessel 関数,

D : 主鏡の直径。

$I = 0$ となるところは数表から $x = 1.220, 2.233, \dots$, つまり星をみると明暗の同心円が見えることになり、 $I = 0$ となるところが暗環に相当する。ここで2つの近接した星を見る時、各々の星の回折像の第一暗環が接しているか、離れている時、この2つの星を分離することができたと定義する。この時望遠鏡の分解能 θ_0 は次の式で与えられる。

$$\theta_0 = 1.22 \lambda / D = 14.0 / D (\text{cm}) \text{ arcsec} \quad (\lambda = 5500 \text{ \AA}) \quad (2)$$

実際の眼視観測では第一暗環がある程度の中をもって認められる。これは肉眼の反応が強度の対数に比例するからである。一般にいう分解能とはこうしてドーズが実験的に定めた次の式を示す。

$$\theta_0 = 11.6 / D \text{ (cm) arcsec} \quad (3)$$

次に実際の鏡面の分解能について述べる。

実際の鏡面は完全な回転放物面からは少しズレているので主軸に平行に入った光線も、幾何光学的に一点に収束することはない。そこでその焦点面での最小収束領域（ふつう円になるので最小錯乱円という）が、ドーズの実験値と同じ程度になっているかどうかでその鏡面精度を表す。この割合を表すのが、以下に述べるハルトマンテストである

一般に鏡面製作過程ではフォーコテストを行う。法月鉄工所において研磨担当の池谷薫氏によって行われ、その結果の一部を写真1に示す。



写真1 60cm 主鏡のフォーコテストの結果。

ハルトマンテストは主鏡を鏡筒に実装し鏡筒の先端に図3のような、穴のあいた円板をつけ、焦点の数cm内外で恒星像を写す。円板にあけた小穴は各々同心円周上にあり、その鏡面への射影がほぼ完全に鏡面をおおうようにする。こうして2～3等級の星に約30秒の露出を与えると普通のフィルムで直径約数mmのハルトマンプレートのパターンを得る。この像を焦点の内外で写す（図4）。すると点 A_1, A_1' の内外像の4点の位置から A_1 帯における焦点の位置 f_{a1} が決定される。

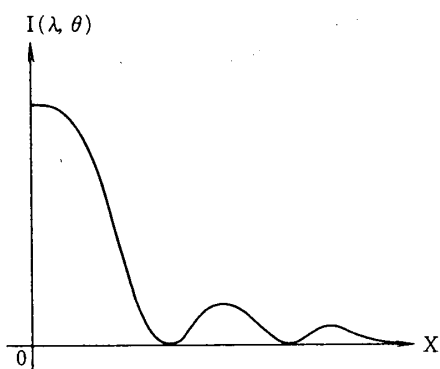


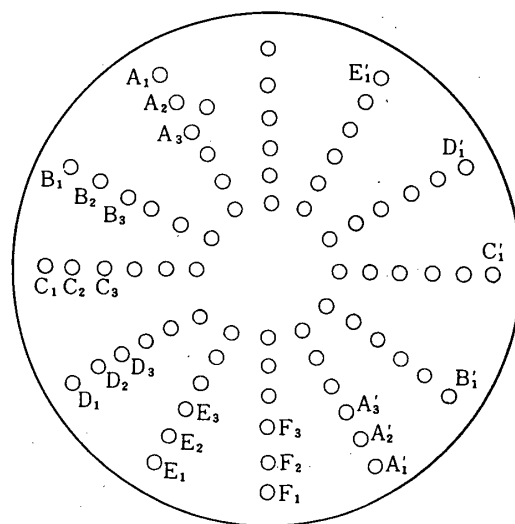
図2 回折リング像の強度グラフ,
 $X = \pi D \sin \theta / \lambda$,
 D は主鏡の直径, λ は光の波長.

$$f_{a1} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} d,$$

a_1 : 焦点内像における A_1, A_1' の距離,

a_2 : 焦点外像における A_1, A_1' の距離,

d : 焦点内外像の間隔,



Hartman plate pattern

図3 ハルトマンプレート。

f_{a1} : 焦点内像を撮影した位置と焦点位置との距離.

以下同様にして $f_{a2}, f_{a3}, \dots, f_{b1}, \dots, f_{b6}$ を求める. 次に $f_{ai}, f_{bi}, \dots, f_{ei}$ の算術平均でもって第 i 番目の円周上の焦点位置 f_i を得る. さらに各円周の鏡面全体に対する寄与は, その半径 r_i に比例するので, 鏡面全体の焦点距離は次の式で与えられる.

$$f = \sum r_i f_i / \sum r_i \quad (4)$$

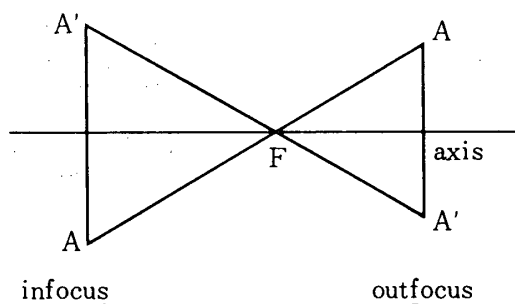


図4

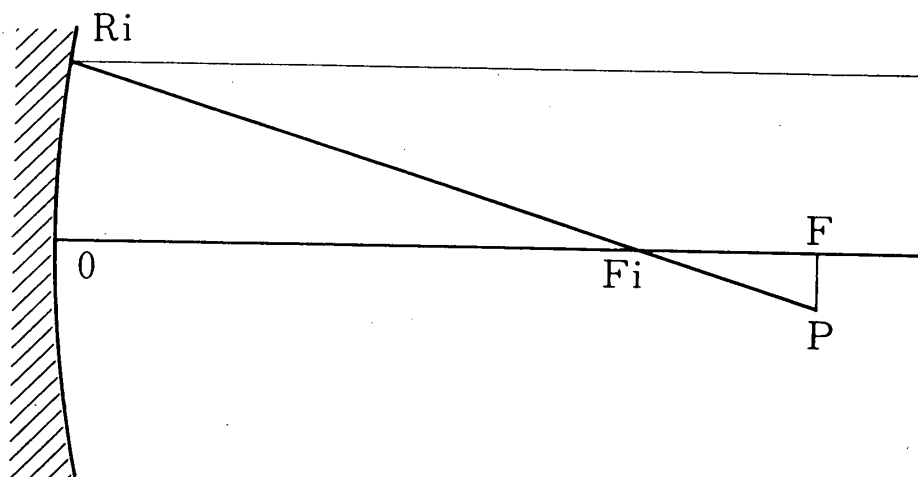


図5

次に第 i 番目の同心円から焦点面への影響は図5により, 角 FOP である. $OF \simeq OF_i$ を使うと, 最小錯乱円を見込む角 T_i は次の式で与えられる.

$$T_i = PF / OF \simeq r_i x_i / f_i,$$

$$x_i = FF_i,$$

$$r_i = OR_i.$$

これを各同心円についてその半径 r_i で平均すると全体の最小錯乱円を見込む角が得られる. これを秒角で表したものをハルトマン値 T という.

$$T = 2 \times 10^5 \cdot \sum r_i^2 x_i / f^2 \sum r_i, \quad (5)$$

$$x_i = |f - f_i|.$$

この他各直径についての f_{ai}, f_{bi}, \dots から $T_{ai}, T_{bi} \dots$ を、同様にして $T_a, T_b \dots$ を求め、最後に a, b, \dots について平均する方法もある。この場合には鏡の直径上の凹凸を推定することができる。こうして求めた図6は、この鏡面の回転放物面からのズレを表している。KSCにこの望遠鏡を設置した後行なったハルトマンテストでは $T = 0.2 \sim 0.3$ を得た。なおドーズの式(3)によると60cm 鏡の分解能 θ_0 は0.2となる。小型望遠鏡でよく調整された光学系では T/θ_0 が $1/2$ 程度になるが、50cmをこえると1よりは小さくならない。例えばリック天文台の120インチ反射鏡では $T/\theta_0 \simeq 2$ である。

このハルトマンテストによって主焦点の位置を正確に決めることができる。一般に焦点の位置は鏡筒を規準にして求めるのが便利である。こうすると焦点位置は温度の関数となるので、その温度特性を求めておけば写真撮影の時に便利である。

2-4 無収差領域

ハルトマンプレートをつけ恒星を撮影すると、ハルトマンパターンをフィルム上に得るが、この時星が鏡面の主軸上ないとハルトマンパターンは、点対称でなく線対称となる。この対称軸は明らかに光線と鏡面主軸を含む平面内にある。そこで鏡面の主軸からはずれた位置にある星を撮影すれば焦点面における鏡面の主軸の位置を決めることができる。こうして決めた主軸の位置は、眼視的に決めた位置とよく一致した。次に焦点をあわせて写真撮影する場合には、光学系の収差が問題になってくる。廻転放物面鏡における最大の収差はコマ収差であって、主軸から離れるに従い大きくなる。主軸から α をなす角で入ってくる星の光は、幾何光学によっても点像とはならず大きさをもつ。この像の主軸と入射光線のなす平面上の大きさを m_s 、それと直角方向の大きさを m_t とするとそれらは次の式で表される

[Appendix B 参照]。

$$m_t = \alpha / 8 F^2, \quad m_s = 3 \alpha / 16 F^2 \quad (6)$$

この光学系は $F=4.5$ 焦点距離2.7mであるから、主点で写真をとる場合 $m_t - m_s$ が目立たない範囲はフィルムの粒子の大きさを $\sim 50\mu$ とすれば、 $2\alpha \sim 15'$ となる。

この他、大気の流れガイドの甘さ、鏡面の不整などから、丸い星像が得られる範囲は約20分角とわかった。

3 望遠鏡の設置と基礎テスト

望遠鏡は1975年5月に鹿児島県内之浦にある東京大学宇宙航空研究所宮原地区に設置された。ここには人工衛星追跡用シュミットカメラがあり、60cm反射望遠鏡はこの南側に、

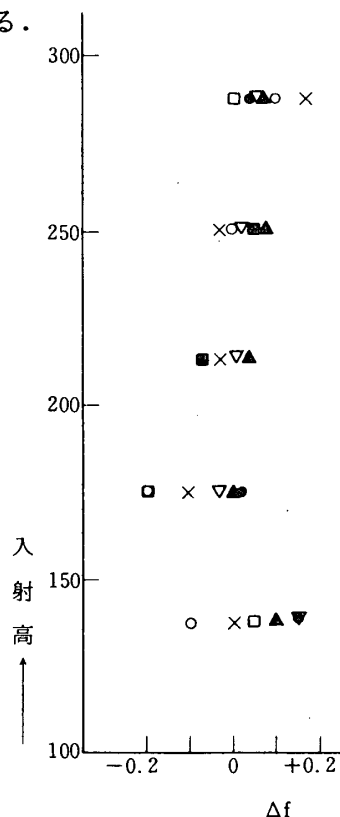


図6 ハルトマンテストで求められた輪帯収差。北より時計回りで●▽□○×▲の順に方位角 30° 毎に殆って測ったもの(単位mm)。

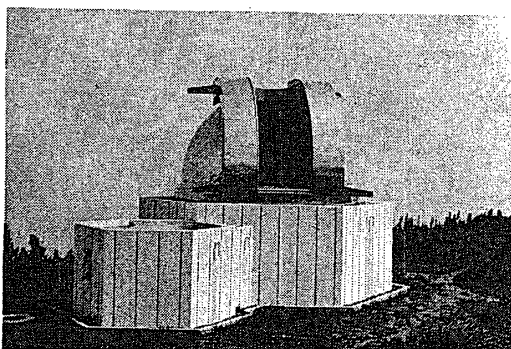


写真2 60 cm 望遠鏡が収められているドームと準備室。

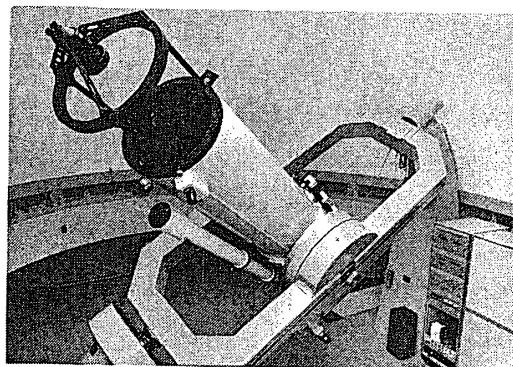


写真3 60 cm 反射望遠鏡全景。

大小六角形を結合した形の建物に準備室と直径6.5mの日本アストロドーム K.K. 製のドームがとりつけられた。以下その設備について述べる。

3-1 望遠鏡の設置

望遠鏡はいつも星を視野におさめておく必要があるから、自動的に星の日周運動を補正しなければならない。このため望遠鏡の回転軸は天球の回転軸と一致させて設置することが必要である。そのためには設置場所の緯度とそこでの北の方向を正確に知らねばならない。設置場所

は衛星追跡用シュミットカメラの南隣りであり、国土地理院の測量により東経 $131^{\circ} 2' 59''$ 、北緯 $31^{\circ} 13' 44''$ とわかった。これに従って望遠鏡は、水平方向から $\sim 31^{\circ} 10'$ 傾けられ、だいたい北の方向に向けられた。さらに精密には実際の星の追跡により調整された。

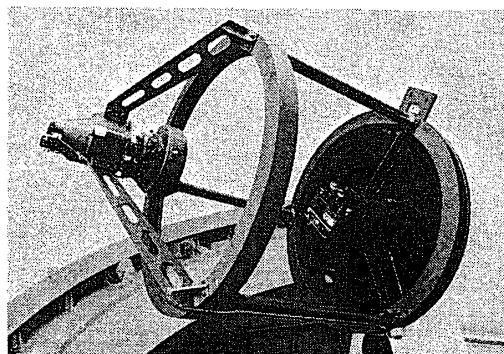
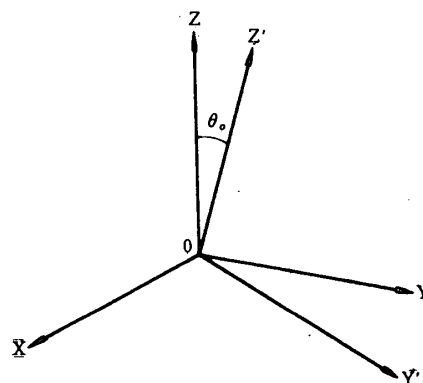


写真4 主焦点部にとりつけられたカメラとその前方の副鏡。

次に実際に星を視野に入れ、その動きから設置のズレを検出した。いま図7のような座標系を考える。天球の回転軸を Z 軸、望遠鏡の極軸を Z' 軸、 ZZ' 軸できまる平面内に各々、 Y, Y' 軸をとる。視野に入れる星の位置を r_h, r'_h とし、望遠鏡の視野を r_s, r'_s で表す。 r は単位球面にあるベクトルで必要に応じ天球座標 (α, δ) 又は直交座標 (x, y, z) で表す (但し $x^2 + y^2 +$

図7 初期設置においては、望遠鏡の極軸と天球の回転軸とは θ_0 だけズレていた。

$z^2 = 1$).

$$\begin{aligned} t=0 \text{で} \quad \mathbf{r}_h &= \mathbf{r}_h(\alpha, \delta), & \mathbf{r}'_s &= \mathbf{r}'_s(\alpha', \delta'), \\ t=t \text{で} \quad \mathbf{r}_h &= \mathbf{r}_h(\alpha - \omega t, \delta), & \mathbf{r}'_s &= \mathbf{r}'_s(\alpha' - \omega' t, \delta'), \end{aligned} \quad (7)$$

但し ω : 天球の角速度,

ω' : 望遠鏡の角速度,

以下 $\omega = \omega'$ とする.

次に \mathbf{r} と \mathbf{r}' には以下の関係がある.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= P(\theta_0) \cdot \mathbf{r}', \\ \text{但し } P(\theta) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 & 0 \\ 0 \sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

θ_0 : Z 軸と Z' 軸とのなす角.

$$\therefore \mathbf{r}'_h(\alpha'_h, \delta'_h) = P(\theta_0) \mathbf{r}_h(\alpha - \omega t, \delta)$$

ここで

$$\mathbf{r}'_s(\alpha'_s, \delta'_s) = \mathbf{r}'_s(\alpha' - \omega t, \delta') \text{ とおくと}$$

視野における星の見かけの動き $\Delta \alpha(t)$, $\Delta \delta(t)$ は次の式で与えられる.

$$\Delta \alpha(t) = \alpha'_h - \alpha'_s, \quad \Delta \delta(t) = \delta'_h - \delta'_s.$$

以上のことから次の関係式を得る.

$$\begin{aligned} \tan \frac{\alpha'_h}{2} &= \frac{\{\sin(\alpha - \omega t) \cos \delta \cos \theta_0 - \sin \delta \sin \theta_0\}}{\cos(\alpha - \omega t) \cos \delta + A}, \\ \tan \frac{\delta'_h}{2} &= \{\sin(\alpha - \omega t) \cos \delta \sin \theta_0 + \sin \delta \cos \theta_0\} / A, \\ \text{但し } A^2 &= \cos^2(\alpha - \omega t) \cos^2 \delta + \{\sin(\alpha - \omega t) \cos \delta \cos \theta_0 - \sin \delta \sin \theta_0\}^2. \end{aligned}$$

次に $|\theta_0| \ll 1$ であるから

$$\begin{aligned} \Delta \alpha(t) &\approx \theta_0 \tan \delta \{\cos \alpha - \cos(\alpha - \omega t)\}, \\ \Delta \delta(t) &\approx \theta_0 \{\sin(\alpha - \omega t) - \sin \alpha\}. \end{aligned} \quad (9)$$

視野内での星の見かけの動きは $(\Delta \alpha \cos \delta, \Delta \delta)$ であること、及び $|\omega t| \ll 1$ とすれば、次の式を得る.

$$\begin{aligned} \Delta \alpha(t) \cos \delta &\approx -\theta_0 \sin \delta \sin \alpha \cdot \omega t, \\ \Delta \delta(t) &\approx -\theta_0 \cos \alpha \cdot \omega t \end{aligned} \quad (10)$$

但し $|\tan(\alpha - \omega t)| \geq 1$.

以上の式においてガイド星の赤経、赤緯は $(\alpha, 90^\circ - \delta)$ である.

いま望遠鏡の視野内で星が図8に示す方向にズレていったとする. その時の角速度を ω_* とすると、以下のようにして α_0 , θ_0 を計算する.

$$\begin{aligned} \tan \alpha_0 &= \sin \delta \tan \alpha_1, \\ \theta_0 &= \omega \sin \alpha_1 / \omega_* \cos \alpha_0. \end{aligned} \quad (11)$$

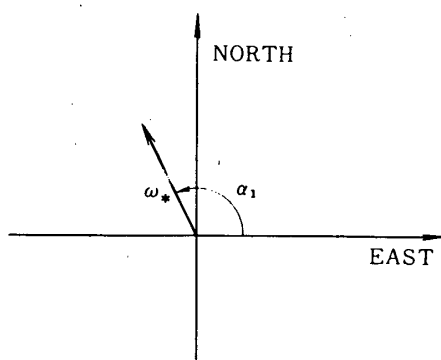


図8 望遠鏡の視野内で星は α_1 の方向へ角速度 ω_* で動いていく。これは図7にあるように極軸のズレのためである。

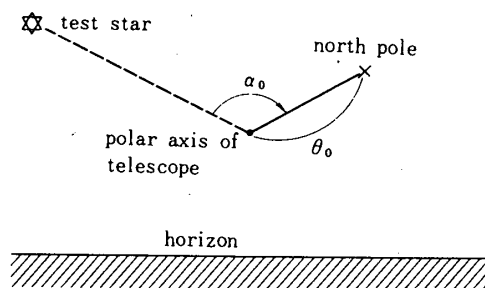


図9 真の極軸は(11)式で与えられる α_0 と θ_0 から決定する。

この α_0 、 θ_0 から図9に示されるように望遠鏡を動かせば天球の回転軸と望遠鏡のそれとが一致する。

この方法ではガイド星がZY平面上にある時には誤差が大きくなるので、赤経の90°程度異なる星についてテストする必要がある。ZY平面上にある星でテストすると θ_0 は非常に小さく $\tan \alpha_0$ が大きくなる(但し誤差が大きい)。又当然のこととして初期設定の真の北極からのズレ θ_0 は充分小さいことが必要である。

このようにしてテストした結果により、最初の設定から望遠鏡を約8'角動かした。その後のテストでは20分間程度の追尾からは誤差が一意的に決まらず、0.5'角程度の精度で設置できたと考えられる。なおAppendix Aを参照のこと。

3-2 望遠鏡の追尾精度

望遠鏡の自動追尾には商用の交流電力を使用するシンクロサモーターを使い、次のようなギャトレンによって極軸を恒星時運転している。この短時間変動を調べるため次のようにした。

まず極軸がほぼ満足のようにセットできたら、望遠鏡の第一焦点にカメラをとりつけ、3~4等星を入れる。露光をはじめ、自動追尾にあわせて赤緯方向にファインスピードで望遠鏡を動かす。この時南北方向には1"/秒の速さで動くので、35mmフィルムの端から端まで星が移動するのに約20分かかる。そこでフィルムに約15分の露出時間を与える。この時星はフィルム上を南北に少し蛇行しながら進む。露光を終える直前に望遠鏡の極軸追尾をストップすると、星は大きく東から西に動く。その後シャッターを閉じる。こうするとフィルム上での星の動きから南北がすぐ判定できる。即ちフィルム上で南北方向は時間を、東西方向は日周運動からのズレを表している。この実験結果を図10に示す。

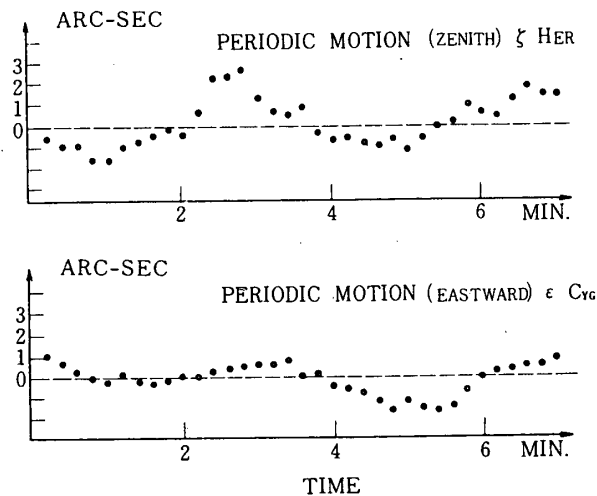


図10 追尾精度のテスト結果. 望遠鏡はこの図のように等速運動はしない. これはギヤがよくなじんでいないためと電源周波数の変動によるものである.

この結果 から, 東天方向のズレは小さいことがわかった. 又西天及び南天方向のズレはもう少し大きく, その蛇行の振巾は2~3秒角であった. 方向による振巾のちがいはギヤの方向による慣れであると考えられる. 即ち法月鉄工所での製作中の各種テストは, その立地条件から東天しか見られなかったため, ギヤのなじみが方向により異なるからである. 又各方向での蛇行の周期は約4分である. これは望遠鏡を動かす最後のウォームギヤの一回転の時間に一致している. これらの周期的な運動は望遠鏡を使うにつれて減少していく方向であろう.

この蛇行により視野は最大3秒角程度フラフラすることになる. 主焦点での写真撮影の場合フィルム上で40 μ 以上になる. そのため長時間露光をする際放置すると星像は丸くならず長円になる. そこで長時間露光の際には, ガイド望遠鏡によりこの不整運動を補正しなくてはいけない. これは15cmのガイド望遠鏡で行うことができる. 15cmの望遠鏡はオフセットで約1°程度の1°程度の視野をみるできるので, その範囲にある明るい星を選んでガイドする.

オフセットガイド時には約700倍の倍率をかける. この時接眼鏡には視野の中央に十字線をもったものが使われる. そして星がこの十字線からはずれないようにガイドする. 追尾精度を1秒角, 即ち主焦点面で13 μ とすれば, 接眼鏡の視野内で, 10分角程度の範囲にガイド星を収めればよい. 7~8等星がガイド星として十分に使える. こうして得た写真を写真5に示す.

次に光電測光の場合, 星の像はグレゴリー焦点にあるダイヤフラム内に収まらねばならな

い。但し星像はそうシャープである必要はない。グレゴリー焦点での焦点距離は約18mあるので、ダイヤフラムの直径1mmは11秒角にあたる。つまり1mm程度のダイヤフラムを使う場合でも星の追尾は充分できる。実際にはシンチレーションなどがあるため2~3mmのダイヤフラムを使うことが多く、連続で20~30分程度の追尾では星が視野から逃げることはない。一つの星をこれ以上長く光電測光する場合にはオフセットガイドをした方がよい。

写真測光の場合、13~14等級より明るい星ならば露光は2~3分で十分であるので眼視による追尾は不要である。ギヤのなじんんでいる方向ならさらに長時間自動追尾が可能である。一般の天文台で使用されている望遠鏡でも、長時間露光の際には眼視による修正が必要である。

以上のことからこの望遠鏡の自動追尾精度は、写真測光及び光電測光を充分可能にすることがわかる。



写真5 三裂星雲 (M20). 1975年9月8日20時
30分~20時50分露出。フィルムはコダック103aOを使用。

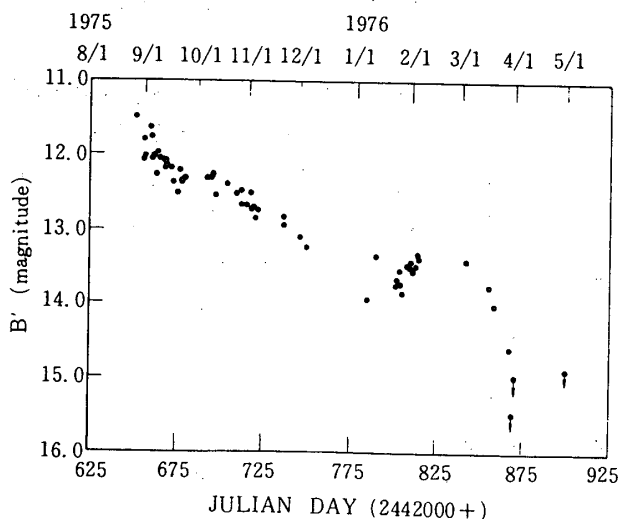


図11 X線新星A0620-00 (V616Mon) の減光曲線。

4. 結 語

この望遠鏡はロケット基地にあるためロケットや人工衛星の観測の様子と直接連絡をとりながらX線を出す特殊な天体を観測することが出来る。衛星との同時観測は日本の衛星だけでなく外国の衛星と共同に同時観測も出来る。最近 Cyg X - 1 等X線星で問題となっているミリ秒の短時間変動の観測は光子検出装置を備えた受光装置〔2〕で観測することが出来る。その他普通の天体用光学望遠鏡としても使用出来る。

最後にこの望遠鏡が設置されて間もなくあらわれた一角獣座のX線新星を、主として写真観測で行った結果を図11に示す〔4, 5〕。

5. 謝 辞

最後にこの望遠鏡建設の推進に努力された小田稔教授、東京天文台の大沢清輝・古在由秀教授に謝意を表わしたい。また、計画の進展にともなって、試験観測や調整などに協力された宇宙航空研究所と東京天文台の各位に厚くお礼申し上げる。特に東京天文台の西村史朗氏と清水実氏にはいろいろな助言を賜った。

また内之浦の望遠鏡の設置場所とシュミット望遠鏡の施設の一部共同使用に関しては生産技術研究所の斉藤成文教授、長谷部望氏にいろいろな便宜を計っていただいた。ここに深く謝意を表したい。

1976 年10月 7 日 新設部（科学）

Appendix A 極軸についてのコメント

一般に地球大気の影響で、天頂以外にある星はすべて浮き上って見える。この浮き上りの量は水平方向で最も大きく 1° 程度になる。仰角 30° 程度でも約 $1'$ 浮き上る。この時望遠鏡の極軸は、大気により浮き上った見かけの北極にあわせるべきか、それとも真の北極にあわせるべきかが問題になる。その差は小さいけれども、どちらにあわせた方がよりよく追尾できるかということである。

北極星付近の星野は見かけの北極を中心としほぼ円運動をする。しかし天頂付近の星野は、真の北極を中心とする円運動をする。我々の場合（観測地が赤道や極からある程度離れている場合）以下の理由で、見かけの北極に極軸をあわせるのがよいとわかった。見かけの北極に極軸をあわせれば、北極付近の星については追尾のズレはおこらない。ところが、天頂付近の星に対しては、（3-1）で考察したように回転軸のちがいによるズレはほとんどおこらない。最も大きくズレるのは、水平線方向であるが、ここはもともと大気による浮き上りのため、精度よく追尾ができない。こういうわけで望遠鏡の極軸は、見かけの北極にあわせるのがよい。

Appendix B コマ収差について

回転放物面において、鏡の主軸をZ軸、中心を原点O'とする座標系を考える(図B 1, 鏡面上の点には'をつけ、その焦点面への正射影には'を付けない)。いま主軸と α をなす方向Bから入射する光が、鏡面上の点A' (λ, μ, ν)で反射、焦点面上Cを通るとする。収差がなければBからの光はA'で反射後C' (x, y, f)を通るとする(f は鏡の焦点距離)。するとC ($x + \Delta x, y + \Delta y, f$)と書ける。 $\Delta x, \Delta y$ が歪を表す量で、 λ, μ, α によって決まる量である(f を単位とする長さをとる)。 $\Delta x, \Delta y$ には(λ, μ, α)の一次の項は含まれないし、Z軸についての対称性から、偶数次の項も含まれない。更に $\Delta x, \Delta y$ は(λ, μ, α)についての3次以上の項からなることがわかる。以下5次以上は無視する。又入射光線がY軸に垂直な座標系を考えれば、 Δx は μ について偶数次の項のみとわかる。又 $\alpha = 0$ で回転放物面に収差のないことから、 Δx は $\alpha^3, \alpha^2 \lambda, \alpha \lambda^2, \alpha \mu^2$ の一次結合となっている。さらに入射角 α は小さいとしてその一次までを考えると次の式ようになる。

$$\Delta x = E \alpha \lambda^2 + F \alpha \mu^2, \quad (B 1)$$

$$\Delta y = G \alpha \lambda \mu.$$

次に焦点面における各点の配置を図B 2に示す。光線B A'はA'で反射後Dを通る。AA' = $f - \nu$, A'O = $f + \nu$, A (λ, μ), B ($\lambda + AA' \alpha, \mu$), D ($(f + \nu) \lambda / 2f$, $(f + \nu) \mu / 2f$), C ($-AA' \alpha + \Delta x, \Delta y$)となる。ここでC, B, Dが一直線上にあることを考えると次のようになる。

$$\lambda^2 G = \nu + E \lambda^2 + F \mu^2.$$

又 $\nu = (\lambda^2 + \mu^2) / 4f$ なることから、(12)を使うと、次のようになる

$$F = -1 / 4f, \quad G = E + 1 / 4f. \quad (B 2)$$

又(B 1)において $\mu = 0$ の場合を考えると、Eが求まる。

$$E = -3 / 4f. \quad (B 3)$$

(B 2), (B 3)によりGを得る

$$G = -1 / 2f. \quad (B 4)$$

$\lambda = r \cos \theta, \mu = r \sin \theta$ とおくと

(B 1), (B 2), (B 3), (B 4)により $\Delta x, \Delta y$ について次の関係を得る。

$$(\Delta x - 2R)^2 + (\Delta y)^2 = R^2 \quad (B 5)$$

但し $R = -\alpha r^2 / 4f, r^2 = \lambda^2 + \mu^2$ 。

よって主軸と α をなす角度で入射する光は、焦点面上で主軸から $f \alpha$ 離れた点を原点とする座標系において、(B 5)で与えられる円の集合となる。その大きさは光軸を含む方向を m_s , それと直交する方向を m_t とすると次のようになる(図B 3)。

$$\begin{aligned} m_s &= |3R| = 3f\alpha / 16F^2 \\ m_t &= |2R| = f\alpha / 8F^2 \end{aligned} \quad (B 6)$$

但し、 f は主鏡の焦点距離、 F はそのF数。

この歪像を鏡の位置からみると、その視角は $m_s / f, m_t / f$ となる。

コマ収差の表式から次のことがわかる。

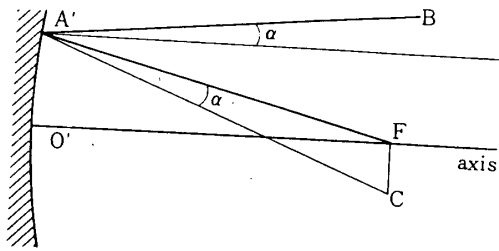


図 B 1

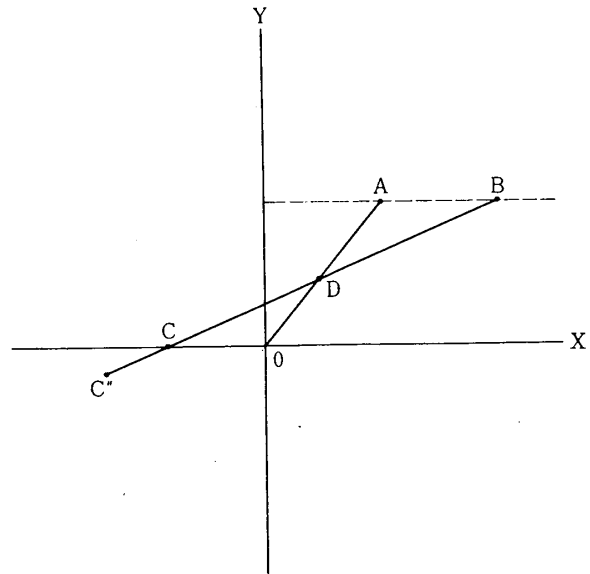
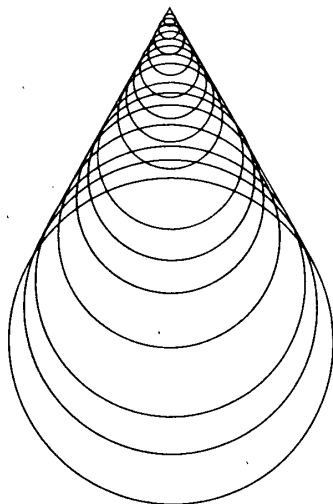


図 B 2



COMA ABERRATION

図 B 3 回転放物面鏡によるコマ収差像.

- 鏡面の半分をかくしても収差像は変らない.
- コマ収差像の頂角は 60° である.
- 収差像のうち円錐頂点がとくに明るい.

参 考 文 献

- [1] 松岡勝, 富田弘一郎, 天文月報 69 (1976), 14.
- [2] 常探博, 松岡勝, 富田弘一郎, 宇宙航空研究所報告 12 4号(A) (1976), 792.
- [3] M. Eiraku, N. Kawano, N. Kawajiri, K. Makishima, M. Matsuoka, T. Moriuchi and H. Tsunemi, ISAS RN-14
- [4] M. Eiraku, H. Inoue, K. Koyama, Y. Maeda, M. Matsuoka, K. Takagishi, H. Tsunemi and E. Watanabe, ISAS RN-12.
- [5] H. Tsunemi, M. Matsuoka and K. Takagishi, Astrophys. J. Letters, 205, L1 (1977)