

内の浦の科学衛星光学追跡装置

富田 弘 一 郎*

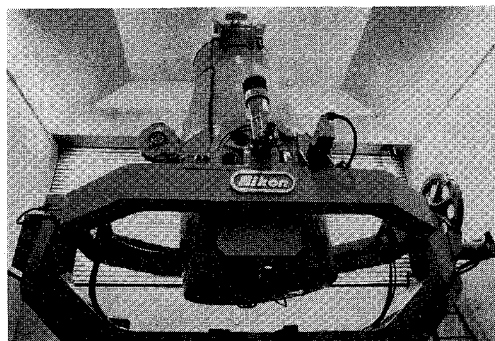
1. はじめに

“おおすみ”，“たんせい”，“しんせい”を打上げた東大宇宙航空研究所の鹿児島宇宙空間観測所 KSC (Kagoshima Space Center) に科学衛星の光学追跡用のカメラが完成した。

そもそも日本で打上げる人工衛星の軌道追跡は，宇宙開発委員会の決定によって電波によるドップラー法が採用され，内の浦で東大が，沖縄の恩納と千葉の勝浦で宇宙開発事業団が実際の観測を分担し，軌道決定，予報計算などは茨城県筑波に新設された追跡センターで開発事業団が実施することになっていた。

科学衛星については，電波によるものよりもっと精度の高い位置の決定や，姿勢に関する情報を得たいという要求が宇宙科学の研究者から出はじめ，また，打上ロケットの最終段の軌道情報が欲しいとの宇宙工学の関係者からの要請もあって，電波より1桁も精度の高い写真による追跡観測が望まれるようになった。ミュー・ロケットの第4段球形ロケット部分も，衛星軌道にのるが電波送信機は搭載していない。宇宙研ではこのような情勢のもとに光学追跡装置を予算化し，昭和44年度から3年計画でこれが認められた。

東京天文台ではIGY (国際地球観測年) のはじめから，人工衛星の光学追跡には深い経験をもち，ペーカ・ナン・シュミットカメラ (BNと略記する) による国際協同観測事業に参加していたので，宇宙研の新しい計画に当初から相談にのることになった。宇宙研ははじめ BN を輸入することを考えていたが，われわれの提案を入れて国産になった。BN は基本計画のころから数えると当時すでに15年を経ている，使用経験上からも改良を必要とする個所がかなりあり，その実施のための経費の増大と納期に問題があった。製作を引受けてくれた日本光学 KK では丁度，この時期に非球面の数値制御による研磨技術とシャリング干渉計による検査法が完成し，東京天文台堂平観測所の通称彗星写真儀と呼ばれている50cm シュミットカメラの補正板がほぼ満足できるまでに完成した (余談になるが，この補正板は前後3回の磨き直しを行ない，ハードコーティングについてもかなりの苦心をしたが，この間の関係者の努力には感謝の言葉もない程である)。また東京天文台が計画していた大型シュミット



第1図 カメラ全景

トカメラも具体化しつつある時で，新しい天体観測機器の設計製作は技術の進歩発展につながるわけで好ましいことであった。

今回のカメラの仕様は BN と性能的に同等またはそれを上まわることを目標とした。以下，この装置を BN と比較しつつ御紹介したい。BN については本誌第51巻5号，第61巻8号を参照されたい。

2. 光学系

人工衛星のように高速で運動する物体を撮影するカメラの能力は，有効口径を D ，焦点距離を f とすると， D^2/f に比例する。 D/f はいわゆる口径比 F 数の逆数であるから， F が明るく，口径を大きくすればよい。位置の測定のためには原板上のスケールが精度をきめるから，焦点距離も大きくしたい。また，人工衛星のように位置の予報がむづかしいものを撮影するには，広角である必要がある。このように大口径，大口径比，広視界の条件を満たすものとしてはシュミットカメラの右に出るものはない。

BN の仕様はアメリカの IGY 衛星・バンガード計画によって，口径50cm，焦点距離50cm，口径比1，写野 $5 \times 30^\circ$ と決まった。 $F1$ を実現するために，色収差が問題になり，ペーカは補正板を3枚に分けて設計した。外側の2枚は KzFS-2，内側は SK-14 というショットの特殊光学ガラスを使い，内側に向いた4面を非球面とした。KzFS-2 というガラスは湿気に非常に弱く，天体観測のように夜露にあう機会の多い場合には好ましくない。事実，堂平の BN は完成後14年たった現在，失透現象があらわれはじめています。KSC は海岸に近いので，もっと丈夫な光学ガラスを使いたい。

国産人工衛星はバンガードよりひとまわり大きい，

* 東京天文台

Kōchirō Tomita: A Satellite Tracker at Uchinoura

軌道が高いので、見かけの光度は同じ位になる。

シュミットカメラは焦点面が球面になっている。焦点直前に平凸レンズをおいて平坦化をはかり乾板を使うことも考えられる。位置測定の精度は乾板がよい。しかし、人工衛星のように次々と連続的に撮影するためには、ロールフィルムの方が便利である。位置予報のずれは、彗星の場合と同じように平均運動がよくきまらず、真近点離角の予報が悪い。軌道面は比較的好くきまるものだから広角といっても衛星軌道面に沿って広い範囲が写ればよく、軌道と直角方向は多少狭くともよい。BNの $5 \times 30^\circ$ の写野にはこのような意味がある。今回もフィルムを採用した。

最近では高速電子計算機が使えるので、光線追跡による光学設計が楽である。補正板の枚数を変えた場合についても計算を行ない検討したが、設計値がいくら完全であっても製作誤差が入りこむ。研磨の困難な非球面の数を増すことは必ずしも得策ではない。

結局、最終的にきまった光学系はBK7を使った1枚補正板のオーソドックスなシュミットで、口径50 cm、焦点距離75 cmとなった。口径比を1.5と暗くして色収差を逃げ、フィルム上のスケールがのびて位置測定精度には有利となったが写野が狭くなるので70 mm幅のフィルムを使用した(BNは55 mm幅)。フィルムが大きくなったため、焦点部が大きくなって中央部のかげりが増え、有効口径が減ったが、構成枚数が少ないので、表面反射と内部吸収は少なく有利となる。写野の長手方向が14度までしかとれなかったが、架台の方に数値制御によるプログラム操作ができるようにして補った。

シャリング干渉計による検査で極めて平坦なよい面に仕上がったことがわかっていたが、組立後の星像検査でも殆んど完全に近い星像を示した。今までの国産天体観測機器の中で、最高の出来ばえだと思う。

3. 鏡筒部

主鏡口径が80 cm (BNは75 cm) と大きく焦点距離が長いのでBNよりひとまわり大型となった。鏡筒部は鋼板溶接構造で、上部は光軸修正装置のついた補正板がつき、短いフードの先端に電動で開閉するキャップをつけ、乾燥空気を補正板上面に吹きつけるようにした。

中間部はカメラ部と架台に取り付く耳軸が出ている。下部は主鏡セルがついている。主鏡は下面と周辺各6点の重錘平衡方式で支え、中央の穴で横方向の位置決め、光軸方向はBNのように3本のインパー棒で焦点面との間隔を保った。鏡筒内部は乾燥空気が循環する。

4. カメラ部

フィルムは70 mm幅のパーフォーレーション付きのもの、360 mが供給側マガジンに入る。鏡筒中部を横切って巻取側マガジンに入るが1駒の長さは321 mmで画面

は 6×18 cmの範囲に $4.2 \times 14^\circ$ の天空が写る。余白部分にデータ、時刻が焼込まれる。BNでは必要データが2駒先きの部分に写るが、このカメラでは撮影された駒のすぐ横に焼き込まれるので便利である。データは半透明板に鉛筆で記入した日附、衛星名などと、撮影時刻がデジタルで示される。時刻は撮影中に円筒形回転チャップで5回の露出中断を行ない、5回とも0.1ミリ秒まで記録される。BNでは5回チャップのうち中央の1回だけ記録される。今回は各チャップを独立の観測として考えることができるので、シンチレーションによる影響を平均するのに役立つ。

露出時間は0.5, 1, 2, 4秒の4種が可能で、別にタイム露出も出来る。撮影間隔は露出時間の4倍で、2, 4, 8, 16秒とした。これはジオスのような発光衛星の国際協同観測に参加できるように配慮したためである。チャップ用の円筒シャッターを廻すモーターは、BNではフィルム送り、露出用シャッターの開閉と共用で、回転ムラが生じている。今回は独立したモーターとした。

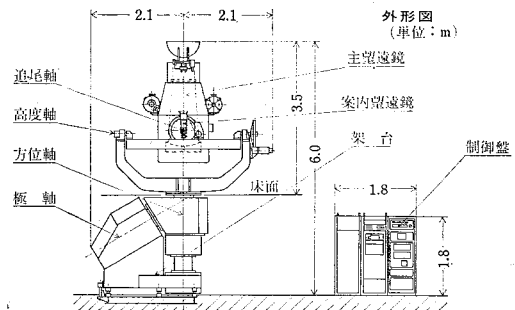
また、チャップ時刻を取り出す電接は、BNでは機械的コンタクトであるが、今回はマグネセンサーを用いた無接点のものとした。精度と寿命の点ですぐれている。

焦点合せは前述のインパー棒の先端に 1μ まで読めるマイクロメーターをつけて、光軸修正機構を兼ねている。

5. 架台部

BNのような方位、高度、追尾の3軸のほかに極軸を設けたことがこのカメラの大きな特長である。BNクラスになると5等級より明るい人工衛星は、追尾軸で追わないでも十分に撮影できる。この時、BNでは日周運動で恒星が短い線状に写り、その中央を測定しているが、精度が低下する。極軸をつけて赤道儀運転ができると恒星は点像に写るから前述の5回チャップ毎の時刻記録と共に明るい衛星については測定精度がよくなるだろう。

この極軸は構造上 ± 3 度の範囲しか回転しない。つまり連続24分間しか露出できない。KSCの暗い空でも、F1.5の明るいシュミットでは高速フィルムを使えば、10分露出が限度だから、これで充分である。任意の時



第2図 装置の全体図

角、赤緯方向にカメラを向けるにはほかの3軸が使えるので、フィルムの長手方向の位置角はかなり自由に選べる。衛星観測だけでなくほかの天体観測にも利用できる。

極軸の上部にBNと同じような3軸があるので、カメラの全高は6mにも達するが、方位軸から下の部分は観測床の下に入ってしまうて見えず操作も楽である。

追尾軸は低慣性モータによって100"/secから2,000"/secまで連続可変速する。

方位軸は北を中心として左右に200度まで施回し、高度軸と追尾軸は天頂を中心として±70度まで向けられる。

各軸は電動で、レゾルバがついていて、デジタルで0.01°までの現在位置を制御盤と操作盤に表示する。

追尾軸の両端に口径12cm 20倍と5cm 6倍の小型屈折望遠鏡をつけた。プリズムの着脱で同一接眼鏡で覗けるようになっている。視野は直径3度と10度になる。

6. 制御部

このカメラの最大の特長の一つは駆動系に数値制御(NC)装置を採用したことである。

基本は三菱電機製の工作機械用MELDAS 4200 NC装置を利用した。紙テープまたは手動による各軸の位置決めが行なわれる。

駆動方式はDCモーターによるセミクローズドループ方式パルス駆動で、同時2軸の操作ができる。位置指令は絶対値と増分方式が併用され、入力設定単位は0°.01/1パルス、位置決め速度は極軸は6°/分、ほかの3軸は180°/分である。

NC操作を行なうには、まず各軸が原点復帰する。カメラは天頂を向き、方位軸は北を指す。全軸が原点復帰すると緑ランプが点燈しこれを知らせる。極軸を使う時は東側リミットまで自動的に送って停止し待機する。

次いで制御盤上にプリセットした各軸の設定値に従ってカメラの方向が変わり、このほか撮影指令部に露出時間、撮影枚数、追尾速度、露出開始時刻などを設定しておく。デジタル時計(KSCにはルビジウム原子時計が標準時計としてあって、この1MHz信号を有線で受けて時計を駆動している)が設定時刻になると、次々と操作がすすみ、最後に原点復帰して次の指令をまつ。

設定は紙テープに一晚の観測予定を穿孔しておけば便利である。KSCにはデータ処理用に電子計算機NEAC 2000-400があるので、人工衛星の軌道要素を入力するとこのカメラのNC用8単位紙テープを作る計算プログラムを用意した。一晚の紙テープは5分位で計算作成される。1回の観測命令紙テープの長さは30cmほどである。

7. 観測室

KSC宮原地区(ミューの発射台から南西約7km)のレダ台地の更に南西2kmほどの海拔約220mの台地を整地して6.4×24mの1部2階式の観測室を新築した。

南端の6.4×6.4mがカメラ室で、この部分は移動屋根になっている。2階が観測床でカメラの水平軸から上の部分と操作盤がある。この操作盤には4軸の現在値の表示のほかに、手動操作に必要なスイッチ類がついている。

観測床の階下は極軸が据っていて、乾燥空気用のポンプ等がある。この前室は制御盤があり、NC装置、デジタル時計、比較用ロランC受信機など観測に必要な電気装置が納まっている。

観測者は夕方、観測室の屋根を開けて(電動式)、NC用の紙テープをリーダ部分にかければ、あとは居なくともよい。次々とカメラは予定時刻が来ると衛星の撮影をくりかえすから明方になったら屋根を閉め、フィルムをはずして現像すればよい。

暗室には70mmフィルム用の自動現像機があって、30mのフィルムが2時間ほどで乾燥してでてくる。

そのほか、研究室、待機室、手洗所などが附属している。観測所の四周は東北にロケット発射場、北西と南西に高度15度ばかりの高地があり、南から東北にかけては海であって、見はらしは格別である。漁船が出漁して、海上で灯をともしこともあるが、発射場の屋外燈と共に殆んど観測には影響がない。空は随分暗く、東京や水島の明るい市街燈になやまされている堂平や岡山に馴れているわれわれにとって別天地である。

8. おわりに

このカメラは単に国産科学衛星の追跡だけに使うのはいらない。堂平のBNと組んで、日本の基準点として重要な位置をしめ、衛星測地観測にも偉力を発揮することができる。事実、昨年12月末から新年にかけて、海上保安庁水路部が硫黄島の衛星による位置決定を行なったときに、完成まぎわのこのカメラも観測に参加した。大口径、大口径比、広角を利用して、行方不明の彗星や小惑星の掃索にも偉力を発揮しよう。彗星の光度、形の変化などの観測も期待されるし、銀河や微光星雲等、純天文学的な観測に利用できよう。勿論そのためにはフィルター、対物プリズムの整備が望まれる。

日本で最初の数値制御の大型天文機械としても意義が大きい。工作機械と天体望遠鏡では共振周波数がかなり違うので、その対策、調整にも苦勞した。省力化と自動化は将来の天文機械が進むべき方向でもある。このような新技術を手がけることができたことは幸であった。

いろいろな意味でBN性能を大きく上まわっていると思う。世界でも1,2を争う高性能追跡カメラである。

東大・生産技術研究所の斎藤成文教授をはじめ、宇宙研の諸先生方の御指導と御理解によって、このような立派な装置が出来たことを天文関係者として深く感謝したいと思う。今後とも宇宙研当局の御理解を得て天体観測にも大いに活用したいものである。