

科学衛星光学トラッキング装置による 科学衛星の観測

長谷部 望*・座間知之*・瀬尾基治
前田行雄・栄楽正光

The scientific satellite obserbation by the optical satellite tracking system
by

Nozomu HASEBE, Tomoyuki ZAMA, Motoharu SEO, Yukio MAEDA
and
Masamitsu EIRAKU

Abstract: The observation results by the optical satellite tracking system which has established in Kagoshima Space Center, Uuniversity of Tokyo are described.

Angle data of the optical tracking system were compared with the data computed from the orbital elements of the satellite which were obtained by the electronic tracking system using the doppler frequency measurement of radio waves from the satellite, in oreder to evaluate the overall accuracy of the existing tracking network in Japan. Also the simultaneous trackings of the scientific satellite by using the 18 m diameter automatic tracking antenna and this optical tracking system were made to estimate the accuracy in the angular tracking measurements of the antenna.

概 要

東京大学鹿児島宇宙空間観測所に設置した衛星光学トラッキング装置による科学衛星観測結果が述べられる。

光学トラッキングシステムの角度データは日本における既設の衛星追跡網の精度評価のため、衛星からの電波のドップラ周波数を利用した追跡システムにより得られた軌道要素から計算された角度データと比較された。また、18 m ϕ 自動追尾アンテナとこの光学トラッキング装置を用いて科学衛星の同時追尾を行い、アンテナの角度追尾精度で確かめられた。

1. は じ め に

科学衛星光学追跡装置としてシュミットシステムによる光学系と数値制御による装置の自動化を行った国産1号機が昭和46年秋、東京大学鹿児島宇宙空間観測所に設置された。装置の紹介については別稿にゆずるとして、ここでは我国の科学衛星の観測結果について報告することにする。

なお、これらの観測ならびにデータの解析は天文台、宇宙研関係者の合同で行なわれたも

* 東京大学生産技術研究所

のである。御指導を頂いた天文台古在教授，御協力頂いた天文台天体掃索部の方々に御礼申上げる。また，本文中の電波を用いた決定軌道との比較は，宇宙開発事業団・追跡管制部計算センターで行なわれたものであり，ここに謝意を表する。

2. 観測点とその周囲

シュミット観測点は東京大学鹿児島宇宙空間観測所内にあってロケット発射点より 2 km あまり南西に位置した山の上にある。

この位置は昭和 48 年 4 月国土地理院の測量結果より，

東経 $131^{\circ} 04' 02.586''$

北緯 $31^{\circ} 13' 43.719''$

高さ 227.6m (カメラ EL 軸)

となっている。

図 1 は付近の地形を示したものであり，南東は海に面し，北西には 500~700 m の山が存在している。

周囲の光源としては観測所内のナトリウムおよび水銀外灯，風向速塔の警戒灯があり，都井岬，種ヶ島の灯台光，漁船の漁火があげられるが，観測所内の光源は北側であるため，国産衛星の観測にはほとんど邪魔にはならない。

ただ地形の関係から海に向けて風が吹くときは，すぐ近くの 700m ほどの山の頂上より雲が発生し，ちょうど西南から東方に向って視界をさえぎることが多く，この地方が晴れているときでも観測方向に雲がでることが多い。それも夕刻，日の落ちるところによく起って困ることがある。

観測室は写真 1 に示してあるように，カメラを据付けてある観測室を南にして長手方向が南北に向いている。このカメラ室は 2 階建てになっており，2 階は走行ドームにより開閉できるようになっている。カメラ室の隣りは観測装置室で，ここに制御装置が設置してある。このほか，暗室，データ解析室，会議室よりなり，会議室には仮眠用の 2 段ベットを用

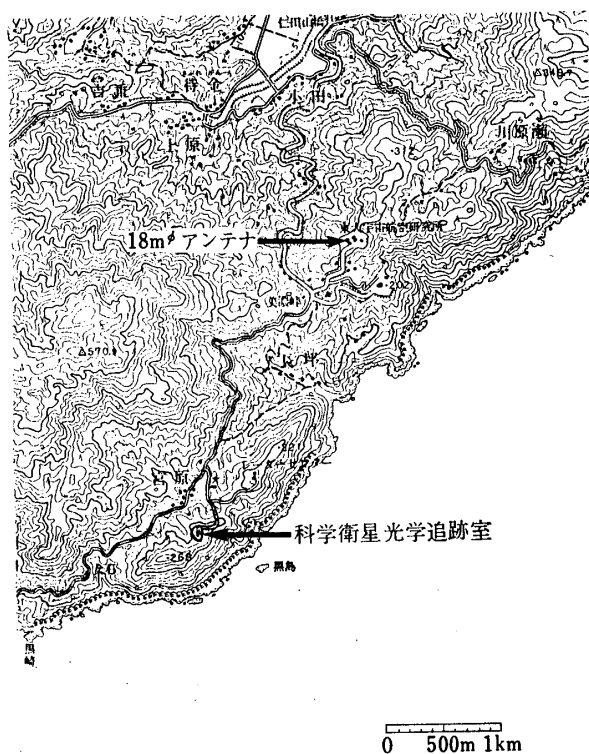


図 1

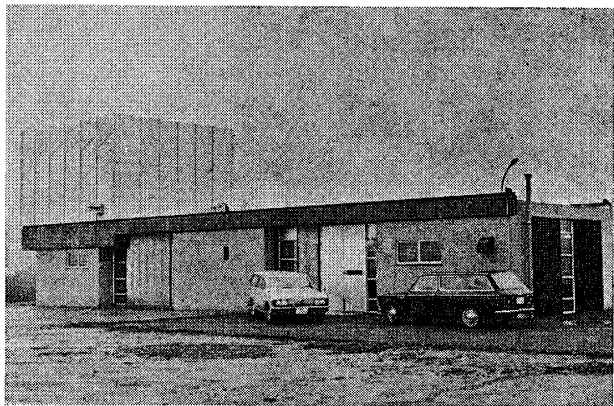


写真 1 科学衛星光学追跡室

意してある。

3. 衛星位置算出

写真乾板上に写っている星像を座標測定機で測定すると、乾板上の各々の星像の相対位置が測定座標系でわかる。次にこれを一般に使われている天球上の赤経赤緯*に変換するためには標準座標系という特別の座標系を考えることにする。この座標系は収差のない完全な写真レンズによって天球が平面の乾板に投影されたものと考え、座標系の原点は乾板の中心にあり、光軸上に正しく一致している。この点を P とし P を通る赤経大円への切線方向を η 軸として、北向きの方向を+とする。

乾板平面内で η 軸に直角方向を ξ 軸とし東向きを+とする。 $\xi\eta$ 座標系を標準座標系といい図3に示す。この標準座標系の P 点の赤経、赤緯がきまれ

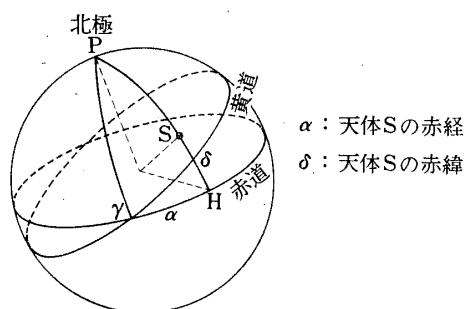


図 2

α : 天体Sの赤経
 δ : 天体Sの赤緯

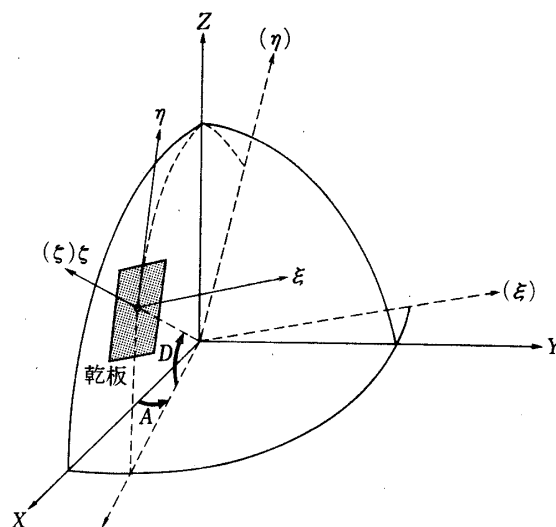


図 3

ば、天球上にある天体の赤経赤緯から標準座標の値を計算することができる。

フィルム上に撮影された衛星位置を決定するには、その要求精度によって3通りの方法がある。

その一つは、フィルムに撮影される写野と同じ大きさを有する星図を用いて、この上に衛星位置をプロットし、これから赤経、赤緯を読み出す方法がある。この方法では、フィルム上の尺度が $274''/\text{mm}$ であるので読み出し精度を $\pm 0.5\text{mm}$ と考えると $\pm 137'' = \pm 2.28'$ の精度となる。しかし、現地で大略の位置を出すには簡便である。

次にあげられるのは、“D” NUMBER 法と呼ばれるもので、フィルム上の衛星をかこむ3つの比較星の赤経 α_i 、赤緯 δ_i を用いて衛星の位置 (α_0, δ_0) を算出する法であり、次式の D_1, D_2, D_3 を衛星の測定座標と比較星の測定座標 $(x_i, y_i, i=0, 1, 2, 3)$ より決定し、これに球面補正量 $\Delta\alpha, \Delta\delta$ を加えて求めるものである。

$$\left. \begin{aligned} D_1 x_1 + D_2 x_2 + D_3 x_3 &= x_0 \\ D_1 y_1 + D_2 y_2 + D_3 y_3 &= y_0 \\ D_1 + D_2 + D_3 &= 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

* 赤経と赤緯

天球上の天体の位置は赤経と赤緯で決められ、図2において P 点を天球の北極とし、大円 γH を天球の赤道とし、赤道と黄道の交わる点 γ を春分点とすると赤経は春分点から天球の日周運動と反対の方向に $0 \sim 24\text{h}$ と測る。赤緯は赤道から北へ $0^\circ \sim 90^\circ$ 、南へ $0^\circ \sim 90^\circ$ と測る。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 - A &= D_1(\alpha_1 - A) + D_2(\alpha_2 - A) + D_3(\alpha_3 - A) + G \\ \delta_0 - D &= D_1(\delta_1 - D) + D_2(\delta_2 - D) + D_3(\delta_3 - D) + H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} G &= \left(\sum_{i=1}^3 D_i \Delta \alpha_i \Delta \delta_i - \Delta \alpha_0 \Delta \delta_0 \right) \tan D \\ H &= \left(\sum_{i=1}^3 D_i (\Delta \alpha_i)^2 - (\Delta \alpha_0)^2 \right) \sin 2D/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし,

$$\alpha_i - A \equiv \Delta \alpha_i, \quad \delta_i - D \equiv \Delta \delta_i$$

ただし, A, D はフィルムを中心座標

この方法による精度は $\pm 1''$ 内外とされている.

これ以上の精度を要求される場合は乾板常数による法があり, 3 つ以上の比較星を用いて次式の a, b, c, d, e, f を決定し, これからフィルム上の標準座標が求まる. (図 3 参照)

$$\left. \begin{aligned} ax + by + c &= x - \xi \\ dx + ey + f &= y - \eta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ξ, η : 標準座標 x, y : 測定座標値

この標準座標を用いて次式より赤経, 赤緯を求めることができる.

$$\left. \begin{aligned} [\xi] &= \xi / r \\ [\eta] &= \eta / r \\ [\zeta] &= 1 / r \\ 1/r &= \sqrt{1 + \xi^2 + \eta^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} [x] &= -\sin A [\xi] - \sin D \cos A [\eta] + \cos D \cos A [\zeta] \\ [y] &= \cos A [\xi] - \sin D \sin A [\eta] + \cos D \sin A [\zeta] \\ [z] &= \cos D [\eta] + \sin D [\zeta] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} [x] &= \cos \delta \cos \alpha \\ [y] &= \cos \delta \sin \alpha \\ [z] &= \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式中 $[\xi], [x]$ などは天体とフィルム上の座標軸間の方向余弦を表わし, A, D はフィルム中心座標を表わす.

以上で衛星の時刻 (U. T.) に対する赤経・赤緯が求まった. したがって, これが 1 周回中の何点か求まっておれば衛星の軌道決定が可能であり, このときのシュミットカメラに対する AZ, EL を算出することが可能である.

任意の観測点における AZ_0, EL_0 は人工衛星の赤経・赤緯と, このときの時角 t (恒星時 θ) を知れば球面三角より,

$$\left. \begin{aligned} t &= \theta - \alpha \\ \cos EL_0 \sin AZ_0 &= \cos \delta \sin t \\ \sin EL_0 &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \\ -\cos EL_0 \cos AZ_0 &= \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

として求めることができる.

ただし, AZ_0 は南を 0 度とし, φ は観測点緯度を表わす.

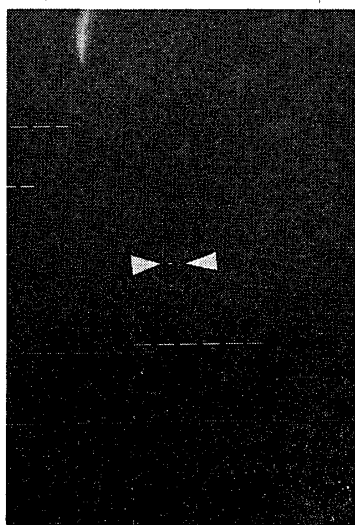


写真2 「TANSEI」 1972-10-12

U. T. 20H02M 32.6S 4秒露出

国産衛星の様に比較的小さい衛星を撮影する場合には衛星の動きと、カメラの動きをできるだけ同じにし、光を蓄積する必要があるため恒星が長く衛星は点に写る。

以後紹介する衛星の写真は以上の方法で写したものである。

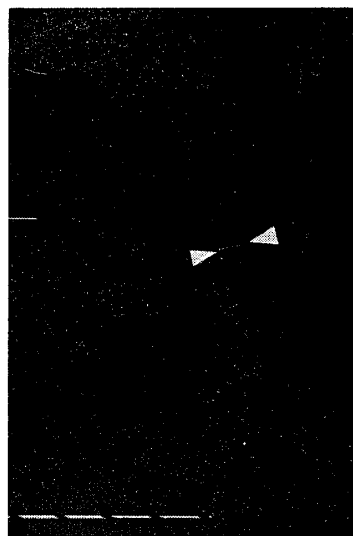


写真3 「SHINSEI」 1973-2-1

U. T. 20H24M 38.5S 4秒露出

中央部にやや斜に小さく点線に写っているのが衛星、下部に横に長く点線に写っているのは恒星。

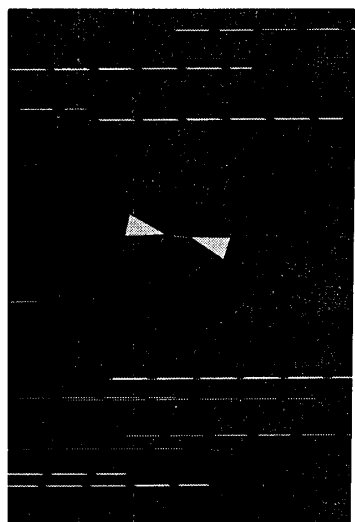
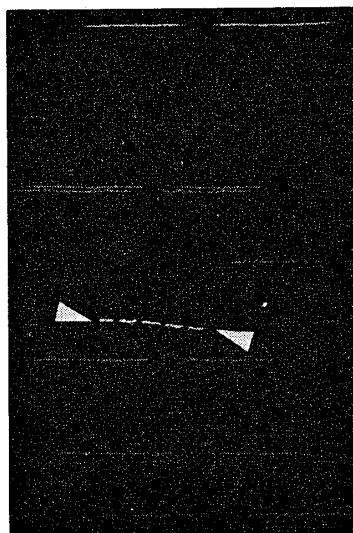


写真4 「SHINSEI」 1973-2-2

U. T. 20H55M 57.0S 4秒露出

衛星が点線に写っているのはトラッキングスピードのずれによるためのもの。

写真5 「SHINSEI」の4段目モーター部
1972-1-26

U. T. 10H10M 17S 4秒露出

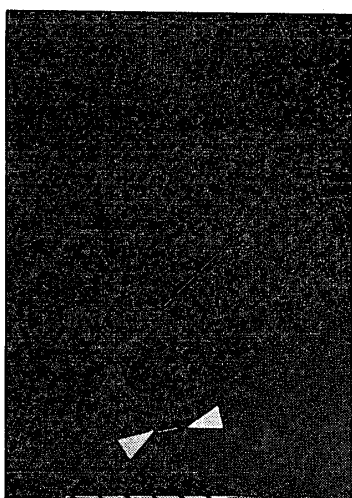


写真6 「DENPA」 1973-2-13

U. T. 10H00M 41.27S 2秒露出

下部に小さく点線に写っているのが「DENPA」中央部に斜めに走っているのは外国の衛星名前不明.

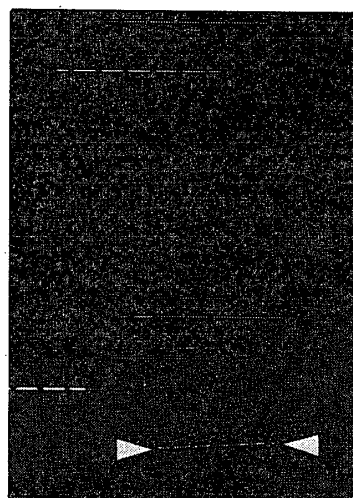


写真7 「DENPA」 1973-2-13

U. T. 10H00M 57.27S 2秒露出

下部にやや斜めに長く写っているのが「DENPA」小さな点が多く写っているのはスピンのために衛星の表面に反射される光量が変わるためこのときのトラッキング角速度 $2000''/\text{sec}$, 星像は右へ流れて写り, DENPAはスピードが速いため左へ流れて写っている.

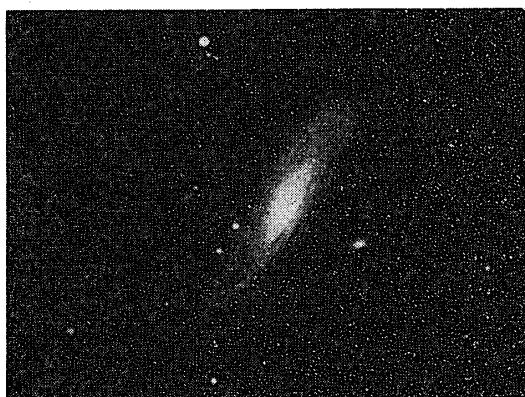


写真8 アンドロメダ大星雲 1972-10-4

U. T. 13H24M 00S 6分露出

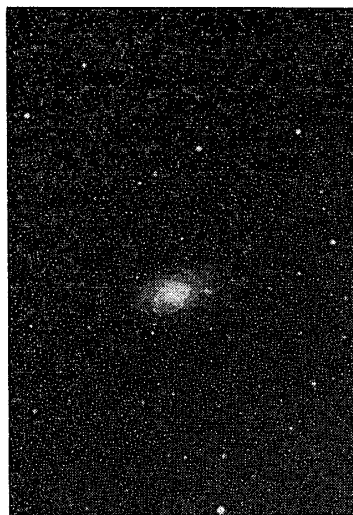


写真9 さんかく座大星雲 1972-10-4

U. T. 15H09M 10S 6分露出

宙研のメンバーにより 47 年 4 月に天文台堂平のシュミットカメラと “SHINSEI” の同時観測を行い, この結果を電波追跡による決定軌道と比較している. 第 3 回目は同年 10 月天文台のジャコビニ流星群観測に先きがけ, “SHINSEI”, “DENPA” の観測を試みたが, “DENPA” は予測計算に用いる軌道要素に難点があって観測できなかった. また同時期に “TANSEI” の観測を行っている. 第 4 回は昭和 48 年 2 月に “SHINSEI” を 18mφ 自動追尾アンテナと

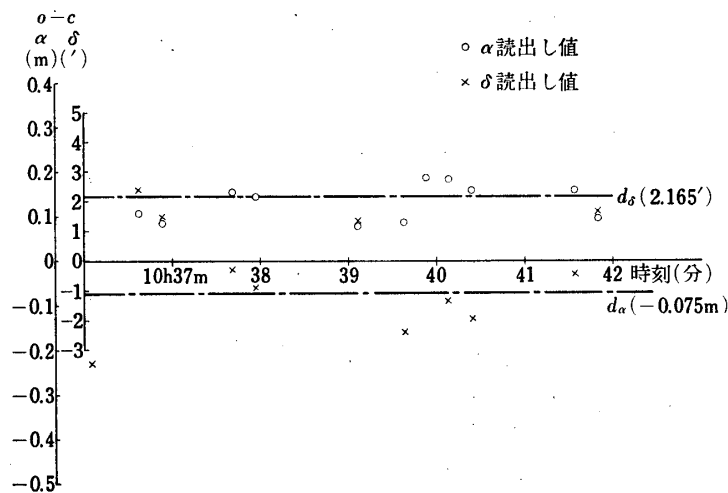


図 5

同時観測を行い、この結果をアンテナの追尾角度と比較している。また“DENPA”は2月13日初めて観測に成功して4コマの撮影を行った。

写真2～7は観測された衛星のうち、興味を引くものを載せた。また星雲の写真も参考までに載せている。

5. SHINSEI の観測 (堂平と同時観測)

図5は本装置を用いて“SHINSEI”の観測を行った結果、フィルム面と同寸法に作った星図より、その赤経(α)、赤緯(δ)を読み出したものを、電波による追跡(ドップラ周波数変化および追尾角度)から算出した軌道による衛星位置と比較して、この差を時刻に対してプロットしたものである。なお、この計算は宇宙開発事業団追跡管制部の計算センターで行われたものである。

α, δ の読み出し値に対する計算値からの差(o-c)の平均値を一点鎖線で引いてあり、

$$d_{\alpha} = -0.075\text{m} = -0.0188^{\circ}$$

$$d_{\delta} = 2.165' = 0.0361^{\circ}$$

の差がある。ただし、 d_{α} の符号は電波追跡による衛星位置に対し時計回りにずれていることを示し、 d_{δ} は赤緯が高く見えたことを意味する。また読み出した結果の d_{α} 、 d_{δ} に対する二乗平均値は、

$$\sigma_{\alpha} = 0.131\text{m} = 0.033^{\circ} \text{ (r. m. s.)}$$

$$\sigma_{\delta} = 0.630' = 0.011^{\circ} \text{ (r. m. s.)}$$

となり、δに対しαのσが3倍大きくなっている。このことは観測がBモード*であるため、星は流れ衛星が短い線(理想的には点)になって写り、赤緯の方向に対しては星図を合せやすいが、赤経の方向に対してはチョップの切れ目を使用する関係から誤差が大きくなると考えられる。しかし、同時期(4月2日)に観測した天文台堂平のシュミットカメラによる同

* 追尾軸駆動

じ方法の読み出し結果をまとめてみると,

$$d_{\alpha} = -0.060\text{m} = -0.015^{\circ}$$

$$d_{\delta} = 4.268' = 0.0711^{\circ}$$

$$\sigma_{\alpha} = 0.067\text{m} = 0.017^{\circ} \text{ (r. m. s.)}$$

$$\sigma_{\delta} = 1.21' = 0.020^{\circ} \text{ (r. m. s.)}$$

となり, α, β の σ はバランスがとれていることがわかる.

この読み出し精度は両者の σ をフィルム上の長さに換算すると, 本装置の場合には

$$\sigma_{\alpha} = 0.434\text{mm (r. m. s.)}$$

$$\sigma_{\delta} = 0.145\text{mm (r. m. s.)}$$

であり, 堂平の場合はフィルム上の尺度が $360''/\text{mm}$ であるから,

$$\sigma_{\alpha} = 0.17\text{mm (r. m. s.)}$$

$$\sigma_{\delta} = 0.20\text{mm (r. m. s.)}$$

となる. すなわち前者はフィルムの横方向に 0.4mm 程度の読み出し精度を有し, 後者は縦横とも 0.2mm 程度である.

また, 両者の d_{α} の値がほぼ一致しており, d_{δ} も同じ方向にずれていることに気付く. このことは両カメラで観測した衛星位置に対し, 電波追跡により決定した軌道がずれていることを意味し, このときの直距離約 $2,000\text{km}$ であり, 位置差は約 1.3km , 2点間の角度に直して 0.04° 程度とわかる. 以上の計算結果は, 観測点位置測量以前のデータに基づくもので

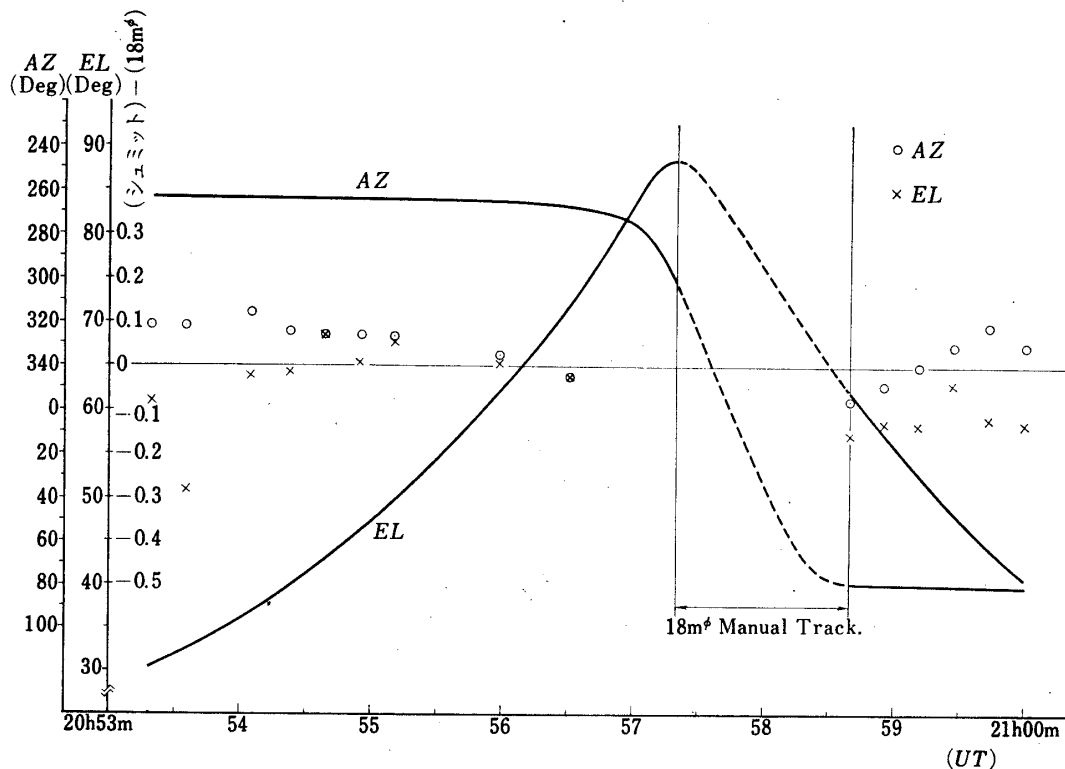


図 6

ありこの後国土地理院による測量結果を得、また電波による軌道決定も座標系の変更と一部プログラムの修正が加えられたため、現在この新しい座標系による観測値比較を用意中である。

6. SHINSEI の観測 (18mφ アンテナと同時観測)

図 6 は昭和 48 年 2 月に行った 18mφ アンテナとの同時観測の結果をまとめたものである。

シュミットカメラはセミオート*による追尾を行い、追尾軸の角速度の調整と軸の補正を行いながら、この周回中 23 点の観測を行った。露出は 4 sec/1 フレームである。

18mφ アンテナは頂点付近で角速度が追従できずマニュアル操作に切換えている。

時刻は、両者同一系統による時刻を用いた。

シュミットカメラによる観測結果は同寸法の星図上に衛星位置をプロットし、これより比較星 3 個と衛星の赤経・赤緯を読み出し、さらに座標測定器を用いて衛星と比較星の座標を読み出して“D” NUMBER 法を用いて衛星の赤経・赤緯を算出し、これを観測月日の分点になおしている。

また 18mφ アンテナに対する衛星の AZ, EL に換算するため、シュミットカメラから衛星までの直距離として、予想計算による直距離のデータを代入して X, Y, Z を求め、これから座標変換を行っている。

なお、衛星の赤経・赤緯から AZ, EL の角度への換算に用いる恒星時の計算は天文台・古川氏作成のサブルーテンを参考にさせていただいた。

この読み出しは星図上から赤経で ± 10 s, 赤緯で $\pm 1'$, 座標測定で ± 0.05 mm 程度である。

参考のため 18mφ アンテナの概略性能を表 1 に示した。

表 1 18mφ 自動追尾アンテナ性能

パ ラ ボ ラ 直 径	18mφ
周 波 数	400.5 MHz
利 得	32.5 dB
測 角 精 度	0.06° r. m. s
引 込 み 角 度	$\pm 3.2^\circ$
最 大 角 速 度	AZ: 2.5°/sec EL: 1.8°/sec
最 大 角 加 速 度	AZ: 2.5°/sec ² EL: 1.8°/sec ²
最小ロックオンレベル	-137 dBm

図 6 は横軸に時刻をとり、縦軸に 18mφ アンテナの AZ, EL 追尾結果およびそのときのシュミットカメラ観測値からの 18mφ アンテナ角度への換算値とアンテナ追尾角度との差をプロットしてある。図で 20 時 57 分 20 秒より 58 分 40 秒まではアンテナがマニュアル操

* 追尾軸速度可変、撮影半自動

作を行っている。

この結果を全体について差の平均値を算出し、光学による追尾結果と電波による追尾結果の差とすることは不適當と考えられる。なんとなれば、アンテナとしては北西の方向には山があり、南東の方向は海拔 300m の山の上から海に向っているため、追跡条件が異なってくるためである。

また頂点付近では衛星の角速度がアンテナの AZ 最大角速度を越え、遅れて追尾しているためである。

この角度差は両者の観測のバラツキが同時に含まれるが、アンテナの角度追尾結果は 2 秒毎のデータが残されており、このデータをプロットしてみると $1/100$ 度までのバラツキが少ないことがわかる。(最小桁 $5/1000$ 度) したがって両者の差はシュミットカメラによる観測結果の読み出しによるバラツキを主に含んでいると考えても大きな誤りではない。これを衛星が西側にいたときの角度で両者の差の平均値をとり、これに対する二乗平均値を計算した結果、

差の平均値

$$d_{AZ} = 0.065^\circ \text{ (18m}\phi \text{ アンテナが CCW 側にいる)}$$

$$d_{EL} = 0.0003^\circ \text{ (18m}\phi \text{ アンテナが下向き)}$$

二乗平均値

$$\sigma_{AZ} = 0.040^\circ \text{ (r. m. s.)}$$

$$\sigma_{EL} = 0.043^\circ \text{ (r. m. s.)}$$

となった。ただし、AZ についてはアンテナが最大角速度 $2.5^\circ/\text{sec}$ 以下の 9 点、EL については 8 点を用いている。

一方 AZ が東側に回ると 18m ϕ アンテナの角度とシュミットによる角度が交叉した形をとっていることに気付く。また EL に対する差はアンテナが 0.13° 程度上向きになっていることを示している。

以上の結果から、アンテナが西側を向いているときの両者の差は AZ で 0.065° 、EL でほとんど 0° であるといえよう。また読み出し値に対する σ は AZ, EL とも約 0.04° となり、この値をフィルム上の尺度に換算すると 0.53mm となり、妥当な値であることがわかる。

7. お わ り に

以上、科学衛星光学追跡装置を用いて観測した結果を同寸法の星図より読み出して、これと電波追跡による決定軌道と比較し、また 18m ϕ 自動追尾アンテナと同時観測を行って角度比較を行った。この結果は星図からの読み出しでも電波による決定軌道との比較に十分な精度を有することがわかった。

現在までに行なわれた観測結果の解析は、前述の方法が採用されたが、今後精度向上には“D” NUMBER 法や乾板常数法を用いて算出する用意がすでになされている。

我国の科学衛星の観測は、“TANSEI”、“SHINSEI”、“DENPA”と観測され、M-4S-3 の 4 段目モータの観測も行えた。

今後、光学による衛星の軌道算出を行うことや、この装置を種々の光学観測に応用したいと考えている。

1974 年 5 月 30 日 新設部 (工学)

参 考 文 献

- [1] 斎藤・他：“科学衛星光学トラッキング装置”宇宙研，宇電工談資，Vol. 1, No. 9, 1972. 12. 14
- [2] 広瀬：“シュミットカメラ”河出書房
- [3] 宮地：“天文台と観測器械”新天文学講座，恒星社。
- [4] 斎藤・富田：“科学衛星光学追跡装置Ⅱ”位置天文学 SYMP., No. 9, 1971. 11
- [5] 平山：“科学衛星光学追跡装置の制御テープの作成”位置天文学 SYMP., No. 9, 1971. 11
- [6] 富田：“内之浦の科学衛星光学追跡装置”天文月報 Vol. 65, No. 8, p. 207
- [7] K. G. Henize “The Baker-Nunn Satellite-Tracking Camera” Sky and Telescope Vol. XVI, No. 3, Jan. 1957