

# 地磁気姿勢計による「たんせい」の姿勢測定\*

遠山文雄\*\*・青山巖\*\*・高橋隆男\*\*

“TANSEI” Attitude Measurement by Magnetometers and Sun Sensor

By

Fumio TOYAMA, Iwao AOYAMA and Takao TAKAHASHI

**Abstract:** The attitude of the experimental satellite “TANSEI” (1971-011 A) launched on February, 1971, was measured utilizing two flux-gate magnetometers and a sun sensor. One magnetometer was loaded in parallel with the satellite’s spin axis and another was perpendicular to the axis.

Angle between the spin axis and the geomagnetic force line is detectable from the outputs of magnetometers. Similarly, angle of the sun is detectable with sun sensor. The orientation of the spin axis is determined at the position of satellite in space when the calculated orientations of geomagnetic field and the sun are known.

As a result, the right ascension of the spin axis orientation was 98~102 degrees and the declination of that was 8~9 degrees in the right ascension-declination coordinate system. And the “TANSEI” attitude was very stable without periodic motions as precession.

But it leaves something to be improved to measure the attitude. One of the problems is magnetic influence upon the magnetic sensors from other instruments. And it had need improve the attitude sensor or use jointly with another attitude sensor to detect more precisely.

## 1. ま え が き

ロケットや人工衛星の飛しょう中の姿勢を測定することはロケット工学にとっても搭載観測機器のデータ解析における情報としても非常に重要なことである。

われわれは磁力計を搭載して、スピン軸と地球磁力線とのなす角度を検出し、地磁気を基準とした姿勢および太陽検出器も同時に搭載して、太陽を基準とした姿勢とから宇宙間における絶対的姿勢の測定を行ってきた。本稿では1971年2月に打上げられた試験衛星「たんせい」の姿勢測定について述べる。

---

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 東海大学・工学部

## 2. 姿勢測定方法

地磁気姿勢計として搭載された磁力計は磁場の成分測定ができるフラックス・ゲート型磁力計で、検出器は衛星のスピン軸方向 ( $Z$ 成分) とこれに直角な方向 ( $H$ 成分) の二成分である。  $H$ 成分はスピンを利用してスピン軸と直角成分の磁場が検出できるから両成分の出力値から容易にその場所における地球磁力線とスピン軸とのなす角度が計算される。一方、CdS ポテンショメータを利用した太陽検出器からスピン軸と太陽方向とのなす角度が測定できる。したがって、その衛星位置における地球磁力線方向および太陽方向を知れば宇宙空間での衛星のスピン軸のむいている方向が決定できる [1]。

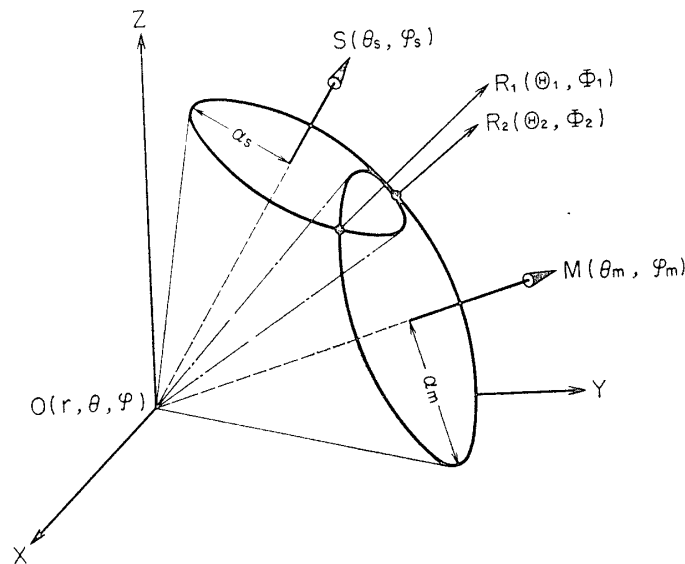
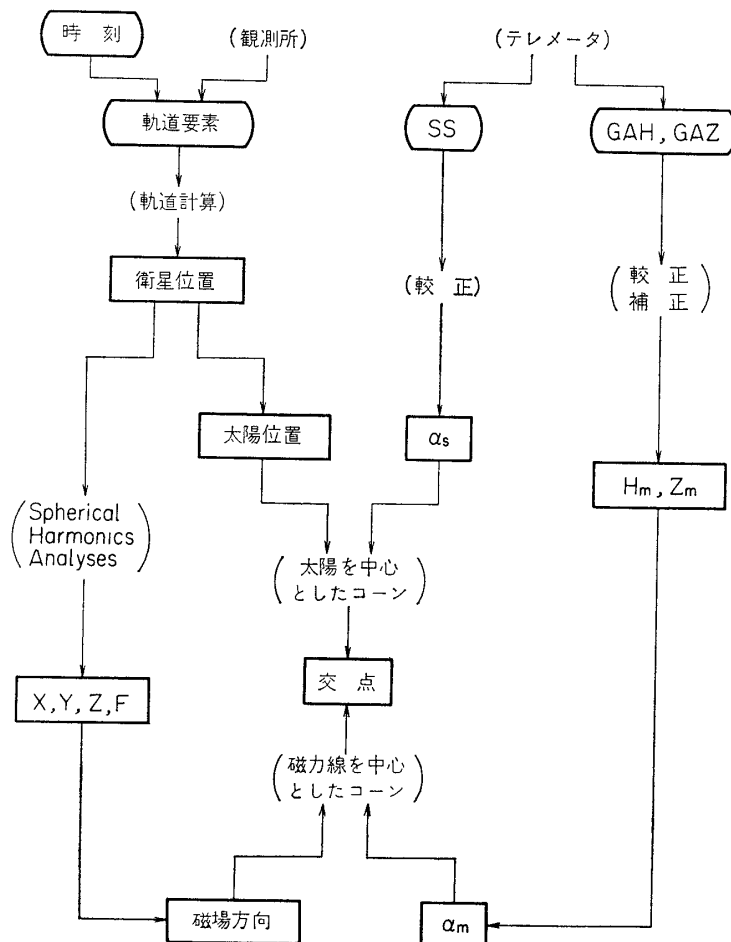
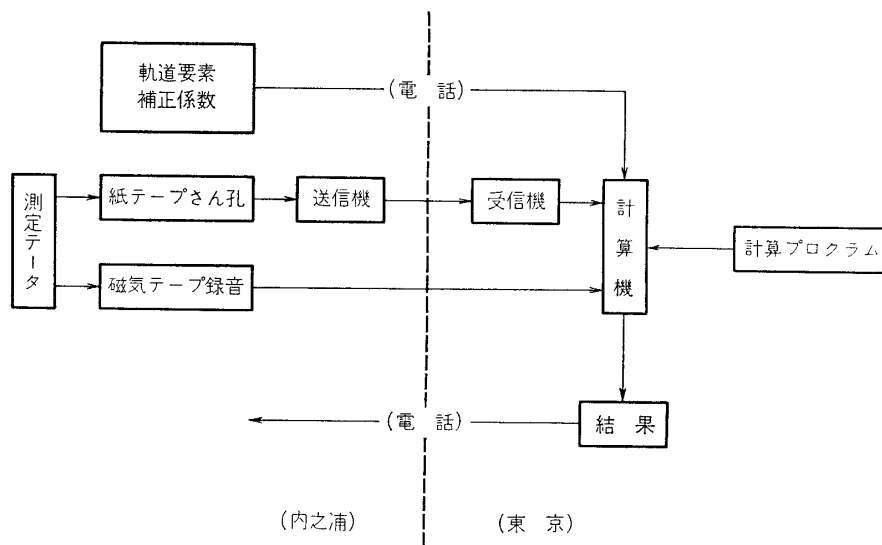


図 1 姿勢決定方法

図 1 は姿勢決定方法を示す図で、  $M$  を地球磁力線方向、  $S$  を太陽方向とし、搭載された地磁気姿勢計から検出される磁力線とスピン軸とのなす角および太陽検出器から測定される太陽とスピン軸とのなす角をそれぞれ  $\alpha_m$  および  $\alpha_s$  とすると、二つのコーンの交点がスピン軸方向である。交点は一般に二点求まるが、そのいずれかを選択できればよい。衛星のスピン軸方向は適当な座標系、たとえば地平座標や慣性空間座標などで表示し、計算は電子計算機で処理される。

図 2 は「たんせい」の姿勢計算の地上系のデータ伝送を示すブロック図である。測定データは地上で受信されたリアルタイムのデータを紙テープにさん孔し東京に電送して計算機にかけられた。また、一周分近い地球の裏側のデータは搭載されたデータレコーダに収められ地上局の上空で再生されて磁気テープに録音したものを東京に送って計算処理された。衛星の軌道要素などの計算処理に必要な定数は電話によって送信された。

図 3 は計算方法を示すブロック図である。衛星の軌道要素からその時刻での衛星位置が与えられると、その場所における太陽方向の計算および地球磁力線方向の計算が行なわれる。



地球磁力線の方法は Spherical Harmonics Analyses による計算で、用いられた Gauss の係数は J. C. Cain らによるものである [1][2]. 一方、衛星に搭載された姿勢計から角度  $\alpha_s$ ,  $\alpha_m$  が算出され、太陽を中心とした  $\alpha_s$  のコーンおよび地球磁力線を中心とした  $\alpha_m$  のコーンが天球上で描かれ球面三角法によって交点が計算される. 図で  $X, Y, Z$  は地球磁場の成分の大きさ,  $F$  は全磁力,  $SS$  は太陽検出器からの出力データ,  $GAH, GAZ$  は磁力計からの出力データ, および  $Z_m, H_m$  は衛星のスピンの軸成分とそれに直角成分の磁場の大きさを示す. また (□) で囲まれた量は計算機への入力量で, (○) で囲まれた量は出力として表示されている.

### 3. 測定結果

「たんせい」は 1971 年 2 月 16 日, M-4 S-2 号機によって打上げられ, 軌道投入から送信が途絶えるまで約 108 周分の姿勢測定データが解析された [3].

軌道投入直後の第 1 周目の解析結果の一部を図 4 に示す. 横軸に時刻 (通日, 世界時) をとり, 縦軸には図の上方から次の値を示した.

- $\theta$ , 衛星スピン軸方向の地軸北極側からの角度. (度)
- $\phi$ , 衛星スピン軸方向の春分点方向からの角度. (度)
- $F$ , 衛星位置での地球磁場の計算による全磁力. ( $\times 10^{-2}$  ガウス)
- $FM$ ; 衛星位置での地球磁場の測定による全磁力. ( $\times 10^{-2}$  ガウス)
- $\alpha_s$ ; 太陽検出器によるスピン軸と太陽方向のなす角度. (度)
- $Z$ , 地軸気姿勢計によるスピン軸成分の出力値. (相対値)
- $H$ ; 地軸気姿勢計による水平成分の出力値. (相対値)

同様に図 5, 図 6 はそれぞれ第 40 周, 第 80 周の解析結果の一例である.

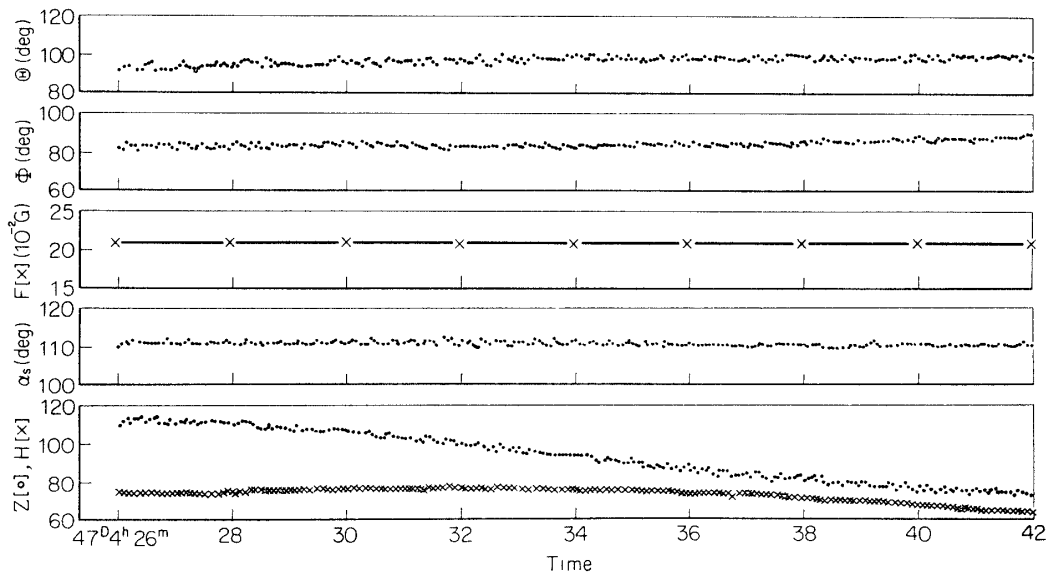


図 4 第 1 周目の結果図

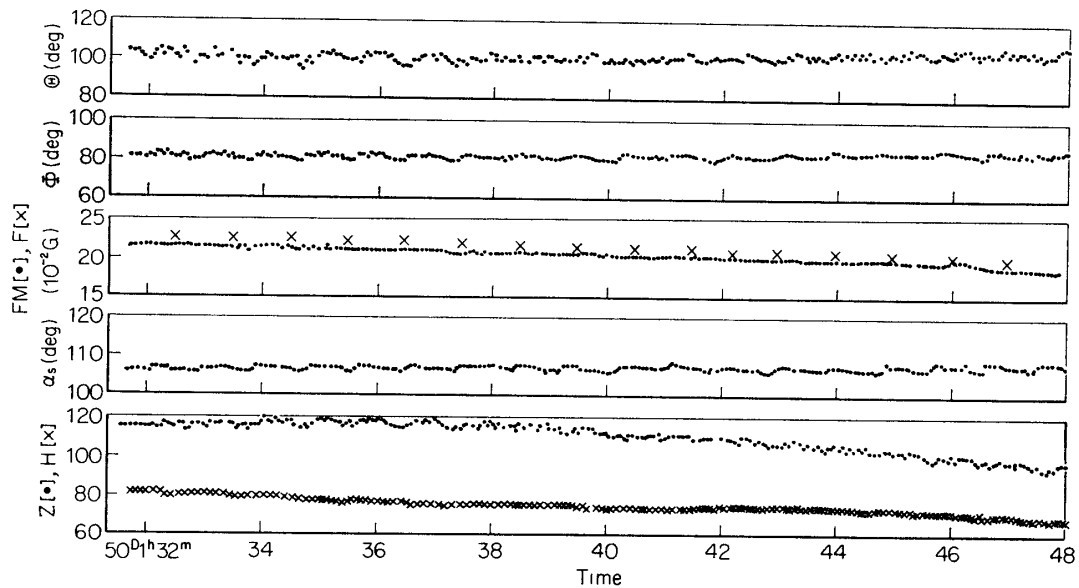


図5 第40周目の結果図

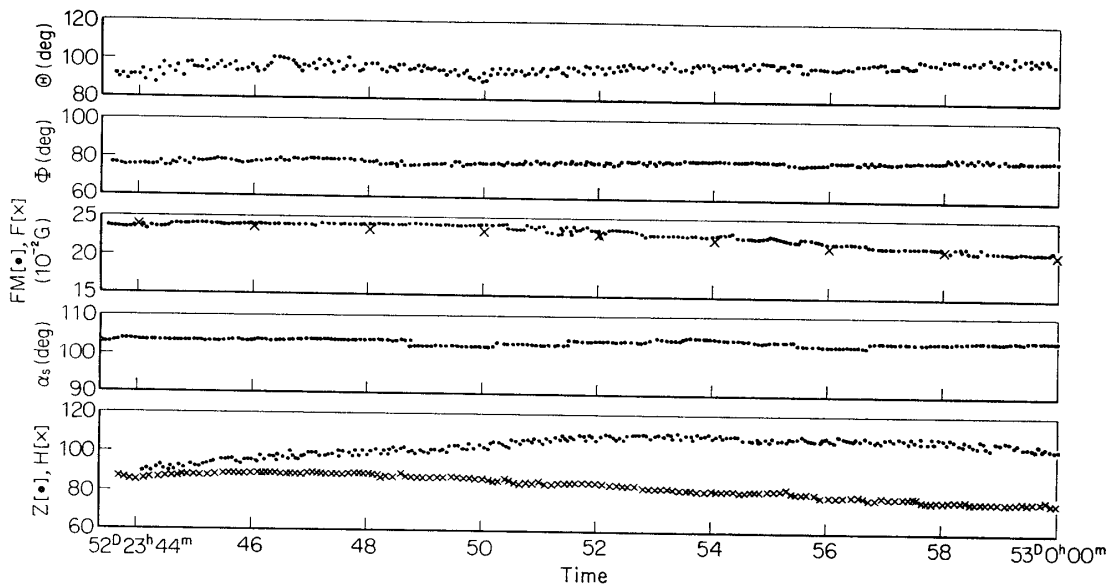


図6 第80周目の結果図

受信期間中（約8日間）の姿勢は計数結果のバラつきが見られるが、プロセッシングなどの周期的変化や日変化は顕著に見られず安定した姿勢で飛しょうしていると考えられる。そして衛星のスピ軸方向は、 $\theta=98^\circ\sim 102^\circ$ 、 $\phi=81^\circ\sim 82^\circ$ である。

図7には第40周目において衛星が太陽に対し地球の影の部分を通る前後の結果図を示した。影の部分については、太陽検出器が使えないのでこの間の姿勢計算は行なわない。また、影から出た直後に姿勢のバラつきが大きいのは、これは主としてセンサの温度特性によるものと思われる。ほかの周回数についてもこれらの結果とほぼ同様であった。

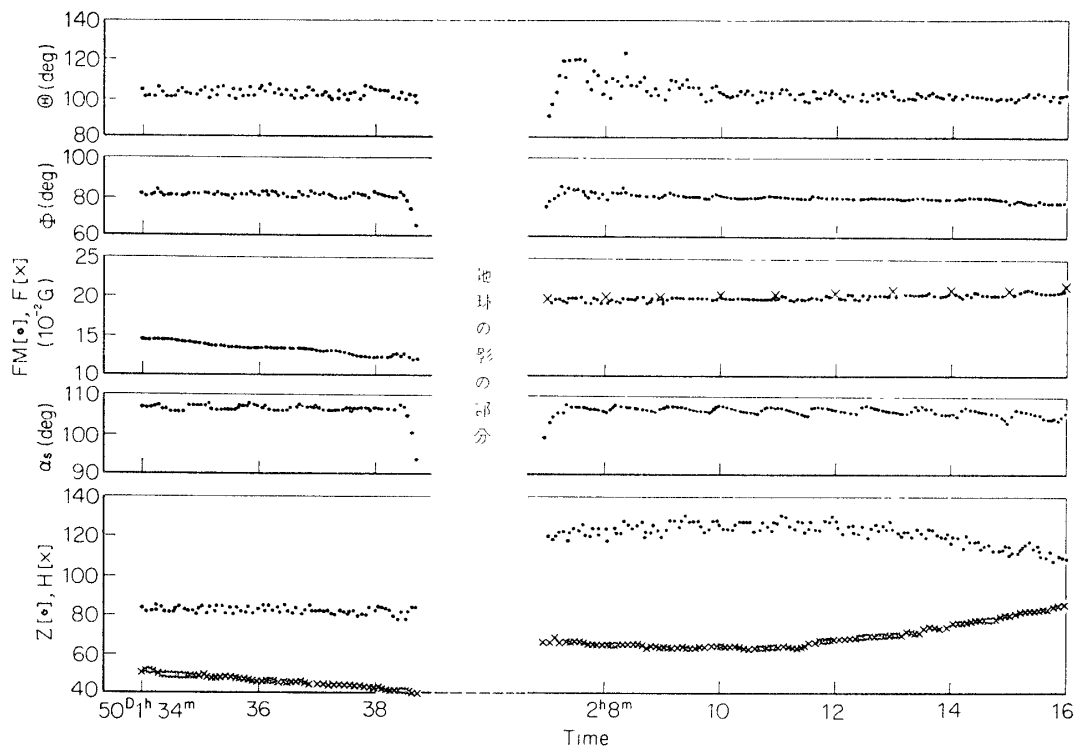


図 7 地球の影の前後の結果図

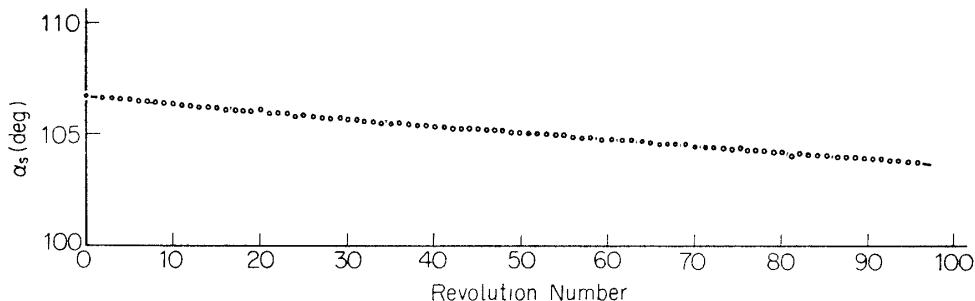


図 8 太陽角度の周変化

また、図 8 は太陽検出器から得られた周回数に対する  $\alpha_s$  の角度変化である。この角度変化は日変化にして約  $1^\circ$  弱の割合であった。「たんせい」の軌道において衛星が一周することによって変化する地球磁場の全磁力は、たとえば第 40 周では約  $16,500 \sim 27,500\gamma$  で、そのこう配は最大毎分約  $300\gamma$  であり、スピン軸と磁力線のなす角度の変化は約  $130 \sim 50^\circ$  で、そのこう配は最大毎分約  $3^\circ$  であった。

なお、この解析に使用された衛星の軌道要素は次の値である。

元期 1971 年 2 月 16 日 4 時 12 分 03 秒

軌道長半径 7426.866 km

離心率 0.008

平均近点離角 0.098 rad.  
 昇交点経度 4.252 rad.  
 軌道傾斜角 0.518 rad.  
 近地点引数 1.888 rad.

#### 4. 考察と今後の問題点

計算結果の精度を左右するものとしては、地磁気姿勢計と太陽検出器の検出精度や温度特性などのハードウェアに依存するもの、および地球磁場の近似計算、太陽位置の計算、感度特性曲線の近似などのソフトウェアに依存するものが考えられるが、主として前者に大きく左右される。

今後の姿勢測定の問題点とその対策案を表 1 にあげた。

表 1 今後の問題点と対策

問 題 点	対 策
1. 磁気的影響	○地上試験で値を測定 ○理論値による補正 ○センサのつき出し
2. 交点の選択	○検出装置の搭載 ○他の姿勢計の併用
3. 検出精度	○センサの改造 ○ソフトウェアの改良 ○他の姿勢計の併用
4. 出力データのバラつき (特に $z$ 成分)	○検出方式の改良 ○データ処理の方法
5. データ処理	○ソフトウェアの改良 ○データのチェック・システム ○quick look システム ○データ伝送の迅速化 ○計算処理の迅速化 ○ルーチン・ワークの簡素化

地磁気姿勢計による姿勢測定において最も重要なことは衛星本体や搭載機器からの磁気的影響があるため、その対策をどうするかということである。「たんせい」においては、この対策として理論値による補正のみが行なわれた。すなわち、 $Z$ 成分および $H$ 成分の磁気的影響が直流的なもののみであるとして、衛星が軌道に投入された時点におけるジャイロなどからの情報をもとにその場所での磁場の理論値を基準として補正された。この結果、理論的な磁気バイアス量は $Z$ 成分で約 10,000 $\gamma$ 、 $H$ 成分で約 6,000 $\gamma$ の磁気量が影響していたことになる。これは図 4～図 7 に示したように計算による全磁力と測定による全磁力がほぼ等しい

値になるかどうかでこれらの補正量の適否のチェックの一つになる。しかしながらこの方法よりも事前に磁気バイアス量を実測することが良い。直流的な磁気量のほかに誘導される磁気量や他の搭載機器の時間的動作変化による影響や太陽電池の電流による影響なども考慮しなければならない。さらに磁気センサの伸展を行えば磁気的影響を少なくするのに効果的であろう。

第二の問題は姿勢測定で述べた二つの交点の選択の問題である。この選択方法としては主に次の様な方法が考えられる。

- (1) 太陽と磁力線の位置の位相をスピンの利用してオンボードで検出する。
- (2) 地上から衛星の軌道投入時までの姿勢情報をほかの方法で示唆する。
- (3) 別の姿勢計を併用する。

(1)の方法は天球上で二つの交点が太陽方向と磁力線方向を結ぶ大円に関して対称な位置にあるから、スピンを利用して太陽の入射時および磁場の $H$ 成分の最大時の時間位相から判定しようとするものであるが、磁力計の改造とそれに伴う重量、寸法、電力などの問題がある。(3)の方法は同時に姿勢測定精度の向上もあわせて行なえるし、地球の影における姿勢検出も可能ならしめる利点を持つ。今回採用された方法は(2)の方法で地上から軌道投入までの姿勢を地磁気姿勢計のほかにレーダ、ジャイロなどの情報によってシミュレートし選択している。この方法は衛星が短時間で大きな姿勢変化や姿勢制御をした場合やあるいは二つの交点が接近している場合などは選択しにくく不適當である。

第三の問題点として姿勢角度の計算を含めた検出精度に関する問題である。今回姿勢計として搭載された磁力計と太陽検出器の検出角度精度はともに  $\pm 1^\circ$  であるが、総合的な絶対姿勢精度は  $\pm 3 \sim 5^\circ$  であろう。これらの精度を上げるにはセンサの改良やソフトウェアの改良、特に感度特性曲線などの近似をより良くし、温度特性なども加味してハウスキーピングからの情報に基づいた補正計算を行なわねばならない。また、交点の選択の問題にも関連する別の姿勢計の併用も検出精度向上の一方法であることはもちろんである。

次に出力データのバラつきの問題があるが図4～図7の結果図に見られるように地磁気姿勢計の出力データ ( $Z, H$ )、特に $Z$ 成分のバラつきが $H$ 成分のそれに比べて大きい。これは検出方式の差異によるもので、 $H$ 成分がスピンごとに得られる値の時間平均の形で出力としているのに対し、 $Z$ 成分は単一的な値を出力としているためである。この対策としては $Z$ 成分の検出方式の改良のほかにデータ処理でのデータのサンプリングや平均化が考えられる。

最後の問題点として、データ処理一般に関する種々の問題がある。ソフトウェアの改良についてはすでに述べたことのほかにたとえば結果の表示項目や表示方法、計算結果のプロット、出力データの雑音対策などもある。また、出力データや交点の選択が適正かどうか、計算値と測定値の全磁力の大きさが一致しているかどうかなどを監視するチェックシステムを考えねばならない。さらに、これとあわせて姿勢結果の quick look も重要である。特に衛星の姿勢制御を行なう場合や姿勢変化の大きい場合は姿勢の情報をすぐに知らねばならないからで、ソフトウェアおよびハードウェアのシステムが必要であろう。また、データ伝送や計算解析処理に要する時間の短縮化および姿勢測定のルーチンワークの総合的簡素化も今後の問題であろう。



## 5. 謝 辞

「たんせい」の姿勢計算は東京大学宇宙航空研究所の大型計算機によって処理され、多くの方々の御助力をいただきました。特に姿勢計算に関して御協力いただいた二宮講師、野村研究室、計算センターの方々、また姿勢計に関しては株式会社測機舎の方々に対し深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] 加藤, 青山, 遠山: GAS によるロケットおよび衛星の姿勢計算. 科学衛星将来計画シンポジウム, 昭和43年度, 118 (1969年3月)
- [2] J.C. Cain, S.J. Hendricks, R.A. Langel and W.V. Hudson: A Proposed Model for the International Geomagnetic Reference Field-1965. J.G.G. Vol. 19, No. 4, 1967.
- [3] 二宮, 広川, 遠山, 高橋. たんせいの姿勢について, 宇宙航行の力学シンポジウム, 昭和46年度, 43 (1971年11月)