

観測ロケット搭載用 1 軸制御 太陽追尾装置*

渡 辺 隆**・ 等 松 隆 夫†

Miniaturized Monoaxial Sun-Follower for
Small Rocket Instrumentations

By

Takashi WATANABE and Takao TOHMATSU

Abstract: This article describes briefly the one-axis controlled solar pointer which is suitable for the measurements of atmospheric minor constituents in the atmospheric occultation method using spin stabilized rockets.

1. 概 要

ロケットに搭載される太陽放射計を姿勢制御することを目的として 1 軸制御方式の太陽追尾装置（サン・ポインタ）を開発した。この装置はロケットがプレセッションによっておこす姿勢変動を補正するため、放射計の光軸方向をスピンの軸を含む平面内で制御する機能を持っている。このような 1 軸制御によって、ロケットのスピンの軸に従って回転する太陽放射計が太陽方向を向いたときに、太陽が放射計の光軸上を常に通りすぎないように制御することが可能になる。この 1 軸制御方式は本格的な 2 軸制御方式にくらべ、制御系が単純

* 宇宙研特別事業費による論文

** 東京教育大学理学部

† 東京大学理学部・宇宙航空研研究担当

になるため非常に小型・軽量になるので、適度のスピンを持つロケット・人工衛星・バルーンにおいて天体のあらいポインティングに用いると大変有用であると思われる。

ロケットでの搭載実験は1976年9月18日に内の浦から打ち上げられたK-9M-56号機を用いて行なわれ、太陽放射計を $\pm 1^\circ$ の精度で制御することに成功した。

2. 姿勢制御の方式

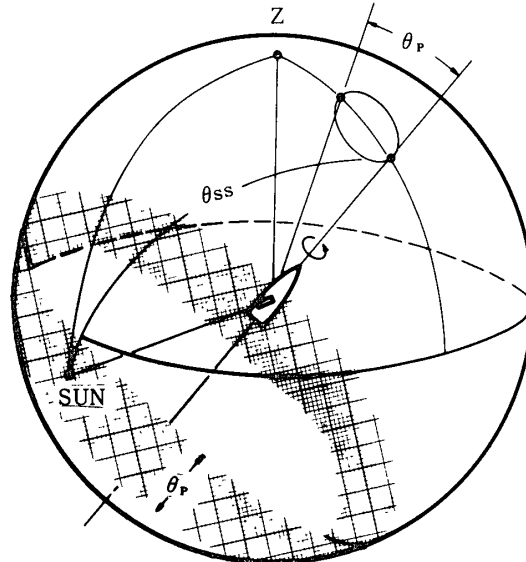
太陽、月あるいは星などの天体は天球上の1点にあるから望遠鏡あるいは放射計の光軸を正しくその1点に向ける（ポインティングする）ためには通常互いに垂直な2つの軸のまわりで姿勢制御を行なう方式、すなわち2軸制御方式が必要となる。これは地上におかれた観測装置でも飛しょう体に搭載された観測装置でも同じことであって、観測している時間中連続してポインティングする場合の必要十分条件である。

しかしながら、観測の目的と飛しょう体の飛しょう条件によっては1軸制御で十分その目的を果たすことができる。我々の報告はまさにこの場合にあてはまるのである。ここで我々の観測装置がどのような観測方式をとっているかを述べて、1軸制御方式で十分である理由を示すことにする。

我々の観測は太陽放射の地球大気による吸収を測定し大気成分の高度分布を求めるもので[1],[2]、観測に用いられる放射計は目的とする波長域を選別するための干渉フィルタ（15mmφ、透過半値巾5～20mm）と光電管（ヘッド・オン型）から成っている[3]、この放射計を適当なスピンを持つロケットに搭載した場合を考える。放射計はスピンの従って回転するので、放射計の視野方向は天球上にスピン軸を中心とする小円を描く。この小円が太陽と交われば、放射計は1スピンの1回太陽をとらえることができる。太陽は紫外から可視域では他の天体にくらべて圧倒的に強い放射源であるので、放射計の出力電流は、放射計が太陽に正対した時にパルス状のピーク値に達し、太陽放射がサンプリングされたことがデータ上で判別できる。放射計は干渉フィルタで分光する方式のため太陽放射をサンプリングする時間は非常に少なくよく、太陽が視野中を通りすぎていくだけでよい。このようなサンプリングは1スピンの1点のサンプリングなので連続したサンプリングではないが、ロケットのスピンの1～3Hzの時はサンプリング間隔は0.3～1秒となり、ロケットの上昇速度を2km/秒とすると0.6～2kmごとにデータが得られることになり高度に関して満足できるサンプリング間隔である。

スピン軸の方向が飛しょう中一定方向に向いていれば放射計の視野が描く天球上の小円は太陽と交わっている。しかしながらロケットは多かれ少なかれ才差運動（プレッション）があり、スピン軸の方向は時間と共に天球上を移動してゆくので、放射計の視野が描く小円も時間と共に天球上を動きまわり、その範囲はプレセッション角、 θ_p だけ広がった帯となる（第1図のハッチした部分）。

従って放射計とスピン軸のなす角度 θ を可変にしておいてこれを常に太陽とスピン軸とのなす角度 θ_{ss} に一致するように制御すれば、太陽が常に放射計の視野中心を通りすぎるようにすることができる。このような制御は、ロケットのスピン軸を含む平面内で行なう1軸制御方式となる。

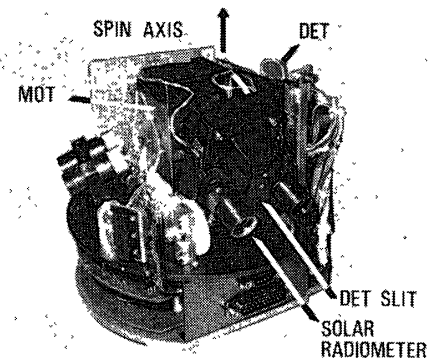


第 1 図： 観測の幾可学的表示。

Z ：天頂, θ_{ss} ：ロケットのスピン軸と太陽とのなす角度, θ_p ：ロケットのプレセッション

3. 太陽追尾装置の概要

ロケットに搭載された放射計と、放射計を姿勢制御するための 1 軸太陽追尾装置 (SAC = Solar Aspect Controller) を第 2 図に示す。図にみられるように 2 本の放射計の間にポインタの光検出部 (SAC-DET) があり、DET の光軸は放射計の光軸と平行になっていて両者は一体で動作する。DET は θ と θ_{ss} の差を検出しその信号で制御用モータ (SAC-MOT) を動作させる。DET と放射計は MOT

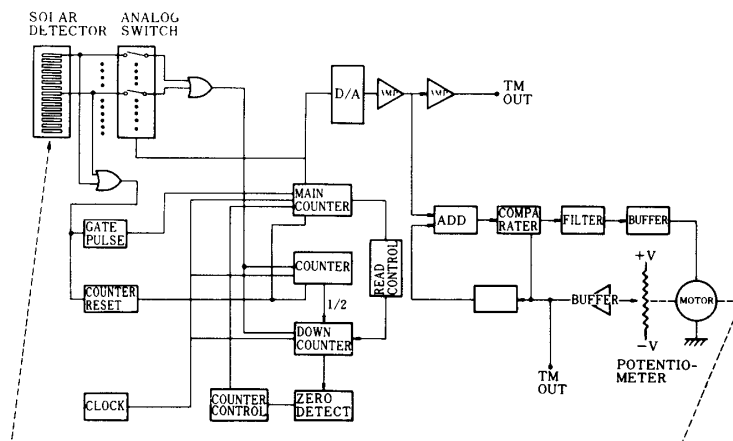


第 2 図： K-9 M-56 号機搭載用太陽放射計及び 1 軸制御太陽追尾装置 (記号の意味は本文参照)

$$\theta - \theta_{ss} = 0$$

が満たされるまでスピン軸を含む面内で回転する。

DET は入射スリット (幅 4 mm, 高さ 0.5 mm) と太陽光検出素子 (32 素子シリコンフォトセル, 浜松テレビ製) から成る。各素子の大きさは高さ 0.6 mm 幅 1.6 mm



第 3 図： 制御系のブロックダイアグラム

で隣りあう素子は入射スリットから見て互いに 1.2° 離れておりこれが DET の角度分解能を与える。32素子全体は 36° の視野に相当しており、これが追尾の範囲を与える。

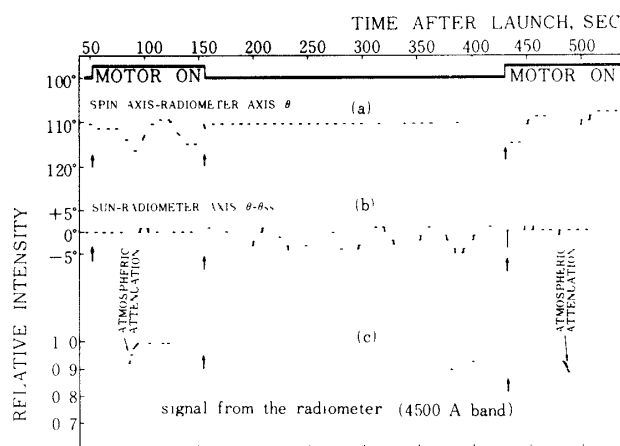
太陽光を検出した素子の番地が $\theta - \theta_{ss}$ に対応する。この素子の番地信号は MOT を動作させるために使われるが、そのための制御系回路のブロックダイアグラムが第3図に示されている。32コの素子の電気的狀態を調べるために CLOCK からのタイミングパルスで1つずつ進むカウンタからの bit 信号を使ってアナログスイッチが次々と切りかえられる。これによって太陽光を検出している特定の素子が検索されるとカウンタが止まり、このカウンタのデジタル信号が DA 変換されてアナログ電圧として MOT 駆動に用いられる。MOT が動作すると、DET と放射計は回転を始めるが、この回転角はポテンショメータでモニタされ、回転角が $\theta - \theta_{ss}$ に達するとポテンショメータの電圧と等しくなり MOT が止まる。

K-9M-56号機に搭載された装置(第2図)は6組の放射計と太陽追尾装置が含まれていて装置全体の大きさは $200\phi \times 160H$, DET 部分は $56(W) \times 51(D) \times 84(H)$ の大きさを持っている。

4. 実験結果

ロケット搭載実験は1976年9月18日(1900 JST)に内の浦から打ち上げられた K-9M-56号機によって行なわれた。打ち上げ時刻の太陽の天頂角は 100° (水平線下 10°) で、地上 98km 以上の高度には日があたっていた。ロケットは上下角 80° で東南方向に発射され、飛しょうは大変順調に行なわれた。我々の装置は開頭部に搭載されており、発射後51秒に開頭が行なわれたあと、52秒でタイマ信号により MOT 電源が ON になりポイントの動作が開始された。途中156秒に他の観測器の実験(プラズマ波励起実験)への影響を避けるために MOT 電源を OFF にしてポイントの動作を停止したが、再び431秒に電源を ON にして約550秒まで放射計の姿勢制御が続けられた。プラズマ波励起実験のための2本の5m アンテナの展開が52秒にあったがロケットの姿勢はほとんど影響を受けなかったようでスピンは飛しょう中ほぼ一定で 2.7Hz 付近に保たれていた。

ポイントの動作状態が第4図(a), (b)に示されている。まず MOT 電源が OFF されていた156秒から431秒までのデータでは、スピン軸と DET 光軸とのなす角度 θ (第4図(a))は変化していな



第4図: K-9M-56号機による観測データ(本文参照)。

最上段は姿勢制御用モータの電源ON/OFFのタイムシーケンス。

いので当然のことながら MOT が停止していたことがわかる。この時間の間、 $\theta - \theta_{ss}$ は振幅 6° 、周期 49 秒の周期変化をくりかえしている（第 4 図(b)）。 θ は変化していないのであるからこれは θ_{ss} の変化であり、図 1 からわかるようにこれはプレセッション角 θ_p に等しくなるはずである。これは地磁気姿勢計のデータ（プレセッション角 $\theta_p = 6 \sim 7^\circ$ 、プレセッションの周期 = 50 秒）と非常に良く一致していることから、DET の電氣的動作が正常であることがわかる。(a) 及び (b) 共にデータ間隔があらいの θ 及び $\theta - \theta_{ss}$ のテレメータチャンネルが同一でしかも他の観測器（太陽ライマンアルファ線の強度測定）と 2 秒毎に切りかえて使用しているためである。

次にポインタが ON になっている 156 秒以前及び 431 秒以降の時間帯のデータを見ると、(b) のデータは $\theta - \theta_{ss} = 0 \pm 1^\circ$ の範囲内に収まっていることを示している。これは DET の角度分解能と同程度の精度であり、太陽の追尾は良好に行なわれたことを示している。

第 4 図(c) は 450 nm 帯の放射計のデータを示しているがこのデータからも追尾の状態を見ることができる。このデータでは上昇時の 70 ~ 100 秒及び下降時の 480 秒以降に強度の大きな変化がみられるが、この部分は観測の目的とする大気吸収の高度プロファイルが得られている部分であって当然変化すべきものである。従って 100 秒以降 480 秒程度までは放射計は大気吸収を受けていない太陽放射を測定しているので、信号の変動は放射計の姿勢制御の影響と、ドリフトなど電気系の変化分である。MOT が停止している時間帯では約 10 パーセントの信号の変動があらわれており、これは (b) と全く同じ周期であらわれているところからプレセッションによるロケット姿勢の変動がもたらしめていることがわかる。これに比べると MOT が動作している時間帯では大気吸収のない部分のデータは ± 1 パーセントの変動にとどまっており、放射計の姿勢制御が良好であることがわかる。

5. 結果の考察と将来の方向

1 軸太陽追尾装置のロケット実験で得られた主な結果は

- (1) 放射計の姿勢制御を $\pm 1^\circ$ の精度で行なうことができた。これは制御系の性能から期待される精度と同じである。
- (2) この姿勢制御系の働きによって放射計のデータ変動は ± 1 パーセント内に収めることができた。 ± 1 パーセント程度の変動量は現在の観測方式及びデータ解析の方法からみるとかなり満足できるものであるので、姿勢制御の方式はほとんどこのまま今後も使用できると考えられる。

将来追尾の精度を上げようとする場合にはまず DET の角度分解能を良くする必要がある。現在の DET では隣りあう検出素子は角度にして 1.2° であるので、この角度を小さくすることがひとつの方法である。今これを 10 分の 1、つまり 10 分程度の分解にする場合を考えるとそれは光学系に工夫を加えることで可能になると思われる。しかしその場合 32 素子では全体で 3.8° しか視野がなくなってしまうのでプレセッションの大きさによっては問題があるので、 $\pm 30^\circ$ 程度をカバーする粗追尾と、 $\pm 1 \sim 2^\circ$ をカバーする精追尾の 2 段階を考え方がでてくると考えられる。

ここで報告した1軸制御方式は追尾しようとする天体を連続してポインティングすることを必要としない干渉フィルタ方式の放射計,あるいはイメージングを必要としない観測装置を適当なスピンを持つロケット・人工衛星・バルーン等の飛しょう体上で姿勢制御する場合に大きな利用価値があるということを強調したい。

謝 辞

太陽追尾装置の設計,製作,調整に際して明星電気株式会社阿部,藤沢,藤田,八巻の各氏にお世話になった。ロケット実験の際には宇宙研担当者の方々,特に平尾実験主任には大変お世話になった。あわせて感謝の意を表する。

1976年12月20日

参 考 文 献

- [1] T. Watanabe and T. Tohmatsu: An observational evidence for the seasonal variation of atmospheric ozone in the upper stratosphere and the mesosphere, Rep. Ionos. Space Res. Japan, 30, 47–50, 1976.
- [2] T. Ogawa, T. Watanabe and T. Tohmatsu: Measurement of stratospheric aerosols by the solar occultation method, J. Geomag. Geoelect., 28, 237–242, 1976.
- [3] T. Tohmatsu: Solar radiation detector system for meso-turbosphere ozone density measurement, Small Rocket Instrumentation Techniques, North-Holland Publ. Comp., Amsterdam, p. 195–202, 1969.