

3. BS におけるスラスト姿勢制御精度の検討

村上 秀俊*

(昭和59年11月20日受理)

THE ATTITUDE-CONTROL PERFORMANCE WITH THE THRUSTER OPERATION

By

Hidetoshi MURAKAMI

The BSE is a zero-momentum three-axis stabilized spacecraft and has three attitude sensors, i.e. a static infrared earth sensor (ES), a radio-frequency monopulse sensor (MP), and a sun sensor assembly (SSA).

Normally the sensor outputs are processed by attitude control electronics (ACE), and ACE drives each of the three reaction wheels independently.

After two wheels of pitch and roll axes were stopped in November 1979 suddenly, the backup control with the thruster limit cycle operation was used instead of the failed wheels.

This report describes the attitude-control performance of the BSE with the thruster control and compares it with the normal wheel control.

1. はじめに

BS の姿勢制御系は、地球センサ・太陽センサ・モノパルス RF センサからの姿勢誤差データを入力とし、衛星内に搭載された小型計算機で外乱トルクを推定し、それに応じた制御トルクを各軸のリアクションホイール又は、スラスタを用いて発生させることにより所望の姿勢を保持するゼロ・モーメント三軸姿勢安定方式を採用している⁽¹⁾。3種のセンサは、それぞれの基準方向に対するピッチとロール軸回りの姿勢検出が可能で、センサの組合せにより、静止軌道上の三軸（ピッチ・ロール・ヨー）の情報が得られる。通常の場合、各軸の制御はリアクションホイールの回転を調整することによって外乱トルクを吸収し、衛星自体の姿勢を連続的に保持している。このため衛星の姿勢変動は、センサの熱特性などによる一部の誤差要因を除いて小さく、安定した制御が行われてきた⁽²⁾。

しかし、1979年11月3日に突然ピッチホイールの回転が止まり、翌4日にはロールホイールの回転が停止し

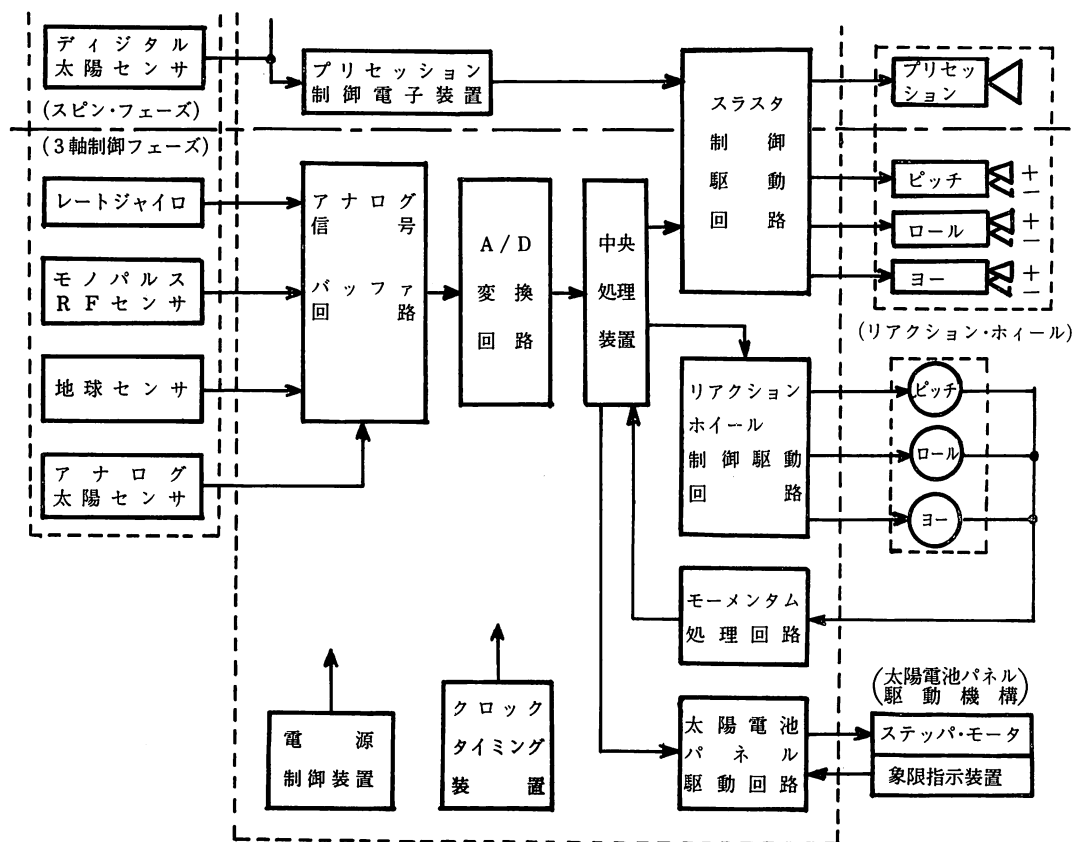
た。このため、以後は両軸の制御をスラスタに切り替えて行った。スラスタ制御は、リミットサイクルと呼ばれる方法により、ある与えられた誤差範囲領域から姿勢が逸脱しようになったときに、対応するスラスタのガスジェットを噴射し許容誤差内に保持している。したがって、ホイールのように連続的な制御ができず、離散的になるため衛星の姿勢誤差が大きくなる。

本稿では、主にスラスタ制御時の姿勢制御の精度についてホイール制御との比較を行いながら述べることにする。

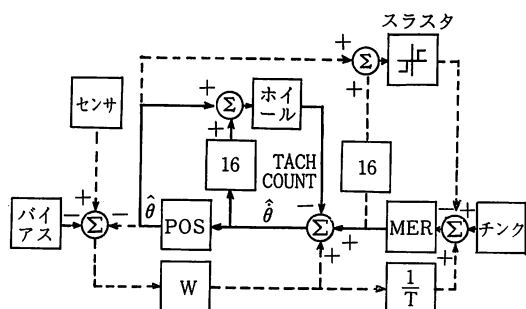
2. 姿勢制御装置の概説

BS の姿勢制御系は、第1図に示すハードウェアで構成されており、第2図に示す離散状態推定制御ロジックによって姿勢制御及び軌道制御を行っている。第2図の POS とあるのはポジションレジスタでの各軸の推定姿勢誤差であり、同様に MER は推定モーメントレートである。また実線は1秒周期、破線は16秒周期でのループを示している。これからわかるように、センサからの誤差データは16秒ごとに制御装置に入力されるが、その間は1秒ごとにポジションとレートの推定値を用い

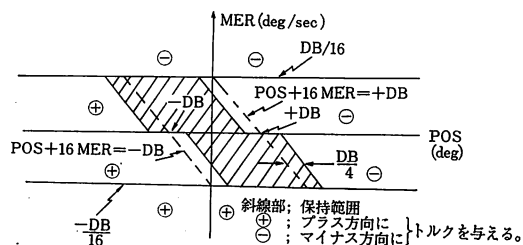
*(元)鹿島支所 第三宇宙通信研究室



第1図 姿勢制御系構成図



第2図 離散状態推定器



第3図 スラスタ制御領域の概略

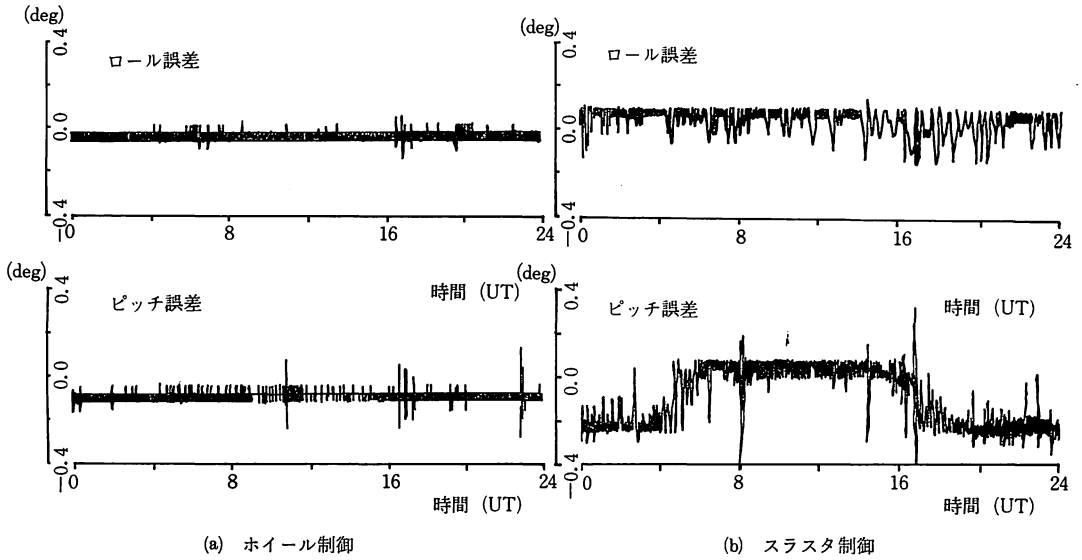
て制御している。

さて、誤差の推定に伴うホイールの駆動又はスラスタの噴射であるが、ホイールは1秒ごとの両推定値から回転方向及び速度が決められ姿勢誤差を吸収するように駆動される。このため前述のように連続的な制御が可能となる。一方、スラスタ制御の場合、16秒ごとに得られた推定値とあらかじめ与えられた誤差のリミット値 (DB) とから次のような手順で処理を行う。すなわち、次の二つの式

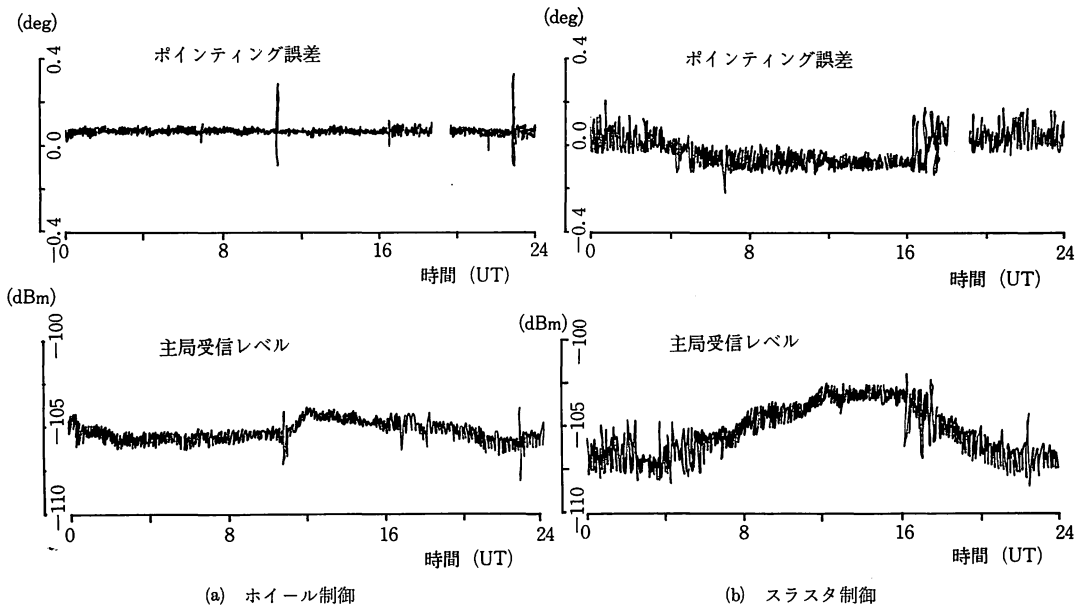
$$|16 \times MER| > DB \quad \dots\dots(1)$$

$$|POS + 16 \times MER| > DB \pm DB/4 \quad \dots\dots(2)$$

を用いる。はじめに(1)式のレートチェックを行い、式が成立すれば対応するスラスタを噴射する。また、(1)式を満足しないときは(2)式のポジションチェックを行って同様の制御を行っている。すなわち、第3図に示すように2次元のリミット範囲から逸脱する場合のみガスジェットを噴射することになる。このため、与えるリミット値により姿勢の保持精度が決まるが、あまり DB を小さくすると、ガスジェット1発のトルクが一定のため、制御



第4図 各制御時の地球センサ誤差出力



第5図 各制御時のアンテナポインティング誤差と主局受信レベル

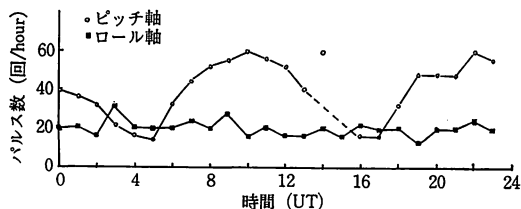
量が DB より大きくなり発振現象を起こしたり、また、噴射パルス数が増大し、燃料の浪費になったりする。したがって、DB の値は許容される精度及びジェットトルクの大きさの兼ね合いで最適値を選ぶことが重要になる。また(2)式の右辺の $\pm DB/4$ の項はシステムのダンピングを考慮したもので図に示す符号になっている。

3. 取得データによる精度の検討

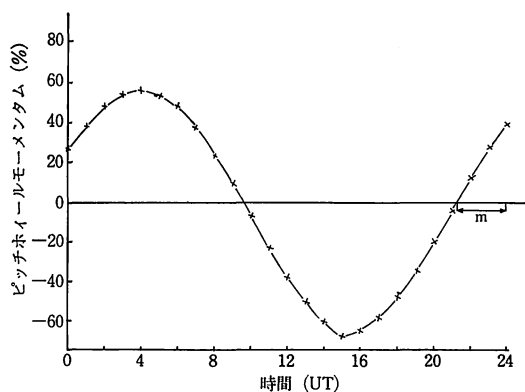
ここでは、鹿島支所で得られたデータを基に、ホイール制御とスラスト制御での精度の検討を行う。

第4図に両制御での地球センサのピッチ、ロール両軸誤差出力を示している。(a)のホイール制御の場合、ピッチ軸に非常に小さな日変化が見られるものの両軸とも一定した値になっており、安定した姿勢制御がなされていることがわかる。ただし、ピッチ軸のセンサ出力に -0.08° のバイアスが見られるが、第2図で示されるように推定処理に使われるときは、地上からのバイアスコマンドでキャンセルしているので問題はない。

一方、(b)のスラスト制御時はピッチの大きな日変化及びロールのランダムな誤差も大きくなっている。このと



第6図 スラスタ制御でのパルス噴射回数



第7図 ホイール制御でのピッチ軸ホイールモーメント変化

きのリミット値は 0.16° であり、ピッチ軸の変化の大きさは、ほぼ 0.35° である。これは日変化の中で、第3図に示した保持範囲領域の一端から他端まで動いていることを示している。

次に、センサ出力などのテレメトリデータを用いて推定したアンテナのポインティング誤差と主局の受信レベルを第5図に示す。この結果もホイール時の非常に安定した制御実績を示している。また、スラスタ制御においては大きな日変化が見られるものの、ポインティング誤差が $\pm 0.2^\circ$ 以内であり、要求精度 $\pm 0.2^\circ (3\sigma)$ を満足しており、 0.16° のリミット値は妥当であることがわかる。

第6図はスラスタ制御のピッチ・ロール両軸のパルス噴射回数を1時間刻みにカウント (T_h) し1日分プロットしたもの、第7図はホイール制御時のピッチホイールモーメント (M_w) の変化を示したものである。前者は衛星に加わる外乱トルクを T_d とすると次式が成立する。

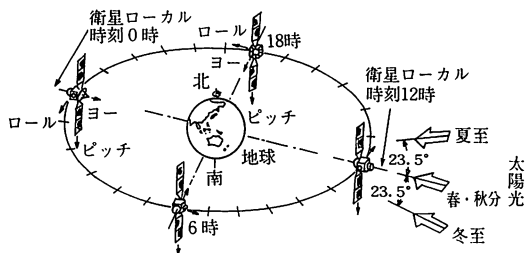
$$T_h = a |T_d| \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 a は比例係数であり、季節により変化する。また、後者は次のようにモデル化することができる。

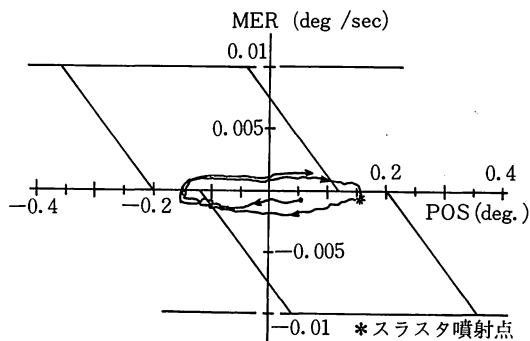
$$M_w = A \sin (nt + m) \quad \dots\dots(4)$$

ここで n は1日1回の回転レートで m は初期位相である。一方、 T_d と M_w は次の関係がある。

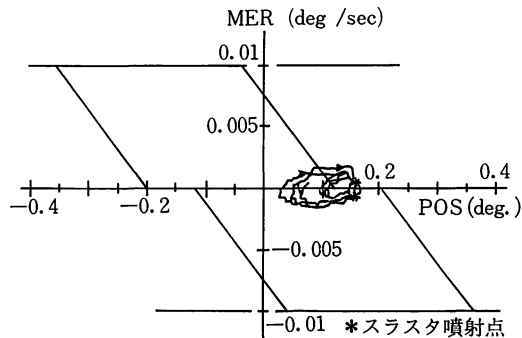
$$T_d = dM_w / dt \quad \dots\dots(5)$$



第8図 軌道上のBSの位置



(a) 外乱トルクの小さいとき (1979年11月10日 4時~4時20分 (UTC))



(b) 外乱トルクの大きいとき (1979年11月10日 10時~10時20分 (UTC))

第9図 リミットサイクルの軌跡

したがって(3), (4), (5)から

$$T_h = a |nA \cos (nt + m)| \quad \dots\dots(6)$$

となる。第6図及び第7図は、ピッチ軸において以上の関係を示している。 m は約1.5時間となりBSの静止緯度 110°E から妥当である。ロール軸の日変化はほとんどみられない。

静止軌道上で衛星の姿勢運動を引き起こすトルクは、ほとんどが太陽光の圧力に基づくものである。第8図に軌道上のBSの位置関係を示す。これからわかるようにロール軸とヨー軸は、衛星の位置によって太陽との相対

方向が変化するが、太陽電池パネルの大きさが南北とも対象になっているため、太陽光によるアンバランストルクは小さく、日変化が小さいことが裏付けられる。一方、ピッチ軸回りのアンバランストルクは、太陽電池パネルと軸の相対関係が不変のために生ずる一定のトルクと、1日1回転する衛星本体部の非対称性から生ずる1日周期のトルクの合成になる。衛星本体の構造はアンテナやアポジモータなどの機構のため、大きなアンバランストルクが生ずると考えられる。第7図において日変化のバイアスがほとんどみられないことから、ピッチ軸の外乱トルクは主に本体部の非対称性によるものであり、太陽電池パネルの東西の対称性がよくとれていることが推測できる。

最後に、スラスタ制御時のパルス噴射と姿勢の軌跡についての一例を紹介する⁽³⁾。第9図(a)はピッチの外乱トルクが最も少ない4時(UTC)近辺のもの、(b)は最も大きい10時ごろのデータである。(a)の図から1パルスの噴射トルクの大きさで、ちょうどリミット内を折り返す様子がわかる。これは最適なリミット値の設定になっていることを示している。一方(b)では、最も大きい外乱トルクを受けている間は、ほとんど一方のデッドバンドにはり付いた形で、姿勢を保持している様子がわかる。

4. ま と め

以上、BSの姿勢制御について、スラスタモードを中

心に述べてきた。結果的に、ピッチ軸に加わる太陽輻射圧による外乱トルクが最も影響が大きく、その主なものは衛星本体部の非対称性によるものであることがわかった。しかしながら、スラスタモードでも、 0.16° のリミット値の設定で要求精度であるポインティング誤差 $\pm 0.2^\circ$ を満足していることを確認した。

このことから、スラスタモードでも要求精度内で姿勢保持を実現することができ、有効な制御方式であることが証明された。

参 考 文 献

- (1) 荒井功恵, 末永雅士; “BSの姿勢制御システムについて”, 信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会, SANE 80-4.
- (2) 村上ほか; “テレメトリデータによるBSの姿勢決定値と主局受信データとの比較検討”, 第24回宇宙科学技術連合講演会, 2E1.
- (3) S. Shimoseko, H. Murakami, R. Mochizuki, S. Yokoyama, M. Kajikawa, and K. Arai; “The Attitude Control Performance of the BSE and its Influence on the Received Television Signal Strengths on the Ground” IEEE Trans. Broadcast, BC-28, 4, Dec. 1982.

////////////////////////////////////