

MGF と SAS データを用いた S-310-44 号機の姿勢推定

田中 真 (東海大学)、阿部琢美 (JAXA/ISAS)
石坂圭吾 (富山県立大学)、熊本篤志 (東北大学)

Attitude Estimation for the S-310-44 rocket using MGF and SAS data

Makoto Tanaka (Tokai University), Takumi Abe (Japan Aerospace Exploration Agency)
Keigo Ishisaka (Toyama Prefectural University), Atsushi Kumamoto (Tohoku University)

1. はじめに

電離圏プラズマの加熱現象の解明を目的として、科学観測ロケット S-310-44 号機が、2016 年 1 月 15 日、日本標準時 12 時 00 分に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。打ち上げの方位角は、北から東周りに 135 度、発射上下角は 75.5 度であった^{[1][2]}。S-310-44 号機には、複数の観測機器が搭載されており、三成分高感度フラック・ゲート型磁力計 (MGF : Magnetic Field Measurements) と太陽センサ (SAS : Sun Aspect Sensor) も搭載された。MGF は、中低緯度電離層内での地球磁場を約 0.2nT/bit の高精度で観測し、微小な磁場変動の検出結果から同領域における電流系のメカニズムを明らかにする。また、MGF は地球磁場方向を基準としたロケットの飛翔姿勢 (地磁気姿勢角) も測定するものである。SAS はロケットの胴壁に取り付け、太陽方向を基準としたロケットの飛翔姿勢角を測定し、ロケットスピン軸と太陽方向とのなす角度 (太陽角) を検出するものである。

これまで JAXA/ISAS で打ち上げられてきた小型観測ロケットでは、その絶対姿勢を求めるにあたり MGF と SAS の角度データを組み合わせて推定することが一般的である^[3]。さらに NASA のロケット姿勢解析においても、1970 年前後には地磁気姿勢角と太陽角を使って、ロケットの絶対姿勢を求める技術が確立していた^[4]。

絶対姿勢の推定は、Fig. 1 に示すように地磁気姿勢角と太陽角と球面三角法を用いて、幾何学的な関係式よりロケットのスピン軸方向 (機軸方向) を求める手法が一般的である^[3]。本論文ではその詳細なアルゴリズムの説明は省略するが、Fig. 1 は、地磁気姿勢角よりロケットの機軸ベクトルから相対的に見て地球の全磁力のベクトルが存在すると想定される方向 (可能性のある方向) を、立体的に表現したものがコーン P である。同様に太陽角より太陽光線が SAS に入射するベクトルが存在すると想定される方向を表現したものがコーン Q である。2 つのコーンが交差する点 (解) は 2 つあり、2 点のどちらかが真のロケット機軸のベクトル方向を指し示している。ここでロケットの打ち上げ方向を考慮すると、解は 1 つに絞られる。Fig. 1 に示すように、または Fig. 2 の左図に示すように、P と Q のコーン間の角度が十分に大きい時には、ロケットの絶対姿勢を算出することは容易であるが、Fig. 2 の右図に示すように P と Q が接近してコーン間の角度が非常に小さい場合は、特異な条件のために従来の球面三角法による解法では算出することは困難となる。

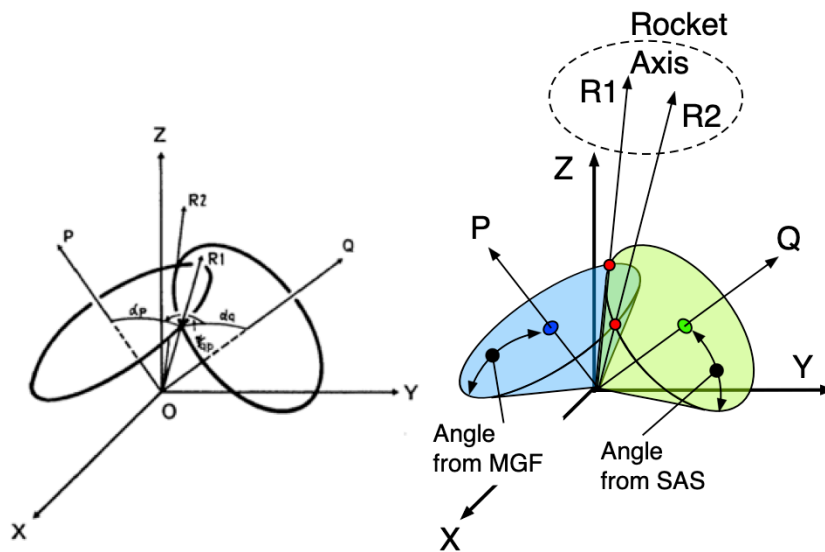


Fig. 1 地磁気姿勢角と太陽角から導かれるコーンの交差
 (左図：参考文献[3]より引用、右図：左図を元に描画補足したもの)

S-310-44号機の打ち上げられた時刻に、偶然、Fig. 2の右図に示すようにPとQが非常に接近する条件となり、つまりMGFとSASで観測された地磁気姿勢角と太陽角のデータが特異な条件を指し示す数値であったため、球面三角法を用いた従来方式のロケットの絶対姿勢推定は困難となった。よって、本研究では、特異な条件下でもロケットの絶対姿勢を推定できるような新しい解析アルゴリズムを提案し、S-310-44号機の絶対姿勢解析に適応させた事例を示す。

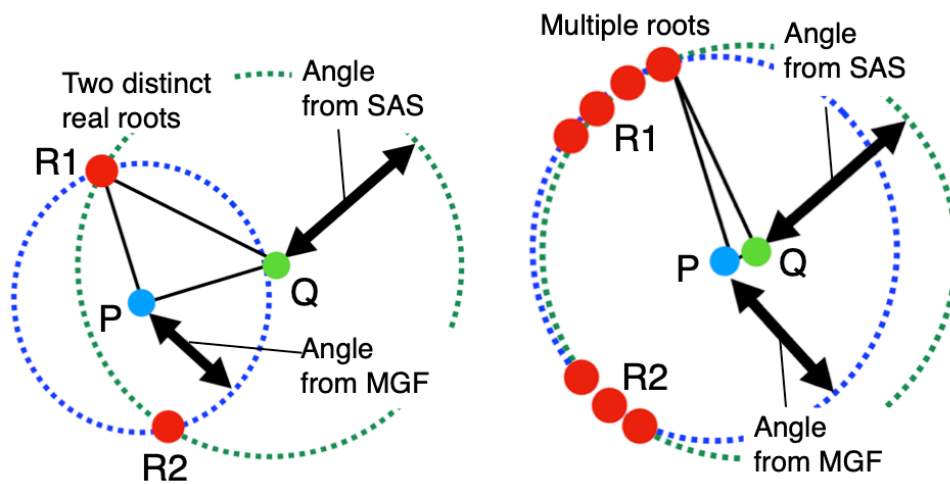


Fig. 2 地磁気姿勢角(P)と太陽角(Q)とロケット機軸(R1, R2)の幾何学的関係
 (左図：一般的な解析条件、右図：PとQが接近した特異な解析条件)

2. 3球面の交差を用いた絶対姿勢推定

球面三角法は、三角関数Sin、Cos、Tan、などから構成される方程式であり、ある角度の数値の条件下では、わずかな角度変化で、球面三角法より導かれた解が大きく変化する現象が起

こりうる。そこで本研究では、さらにシンプルな幾何学的な方程式を連立させて、Fig. 2 の左図に示すように、必ず存在するであろう 2 点の交点 (R1, R2) の座標 (x, y, z) を求めることを試みた。着想は GPS 測位の基礎原理であり、Fig. 3 の左図に示すように、複数の球面の交差点が GPS レシーバの位置を指し示すという原理を用いた。GPS の測位は、式(1)に示すシンプルな球の方程式を連立させて解けばよく、これを、地磁気姿勢角を示す P のコーンを球面に拡張表現したもの (S_MGF)、太陽角を示す Q のコーンを同じく球面に拡張表現したもの (S_SAS)、そして、ロケット機軸 (BODY 軸) が存在する可能性のある 3 次元空間を球面として拡張表現したもの (S_BODY)、この 3 球面を構成し、3 球面の交点 (R1, R2) の座標 (x, y, z) を、式(1)の 3 元連立方程式より求めることを考案した。2 重解の交点 2 つが、求めたいロケット機軸の方向であり、ロケットの打ち上げ方向を考慮して解は 1 つだけ決定される。

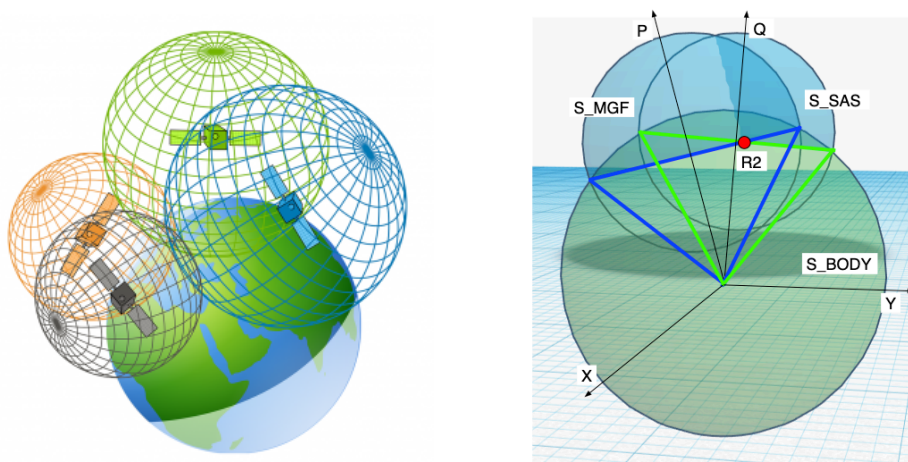


Fig. 3 3 球面の交点を用いたロケットの絶対姿勢推定概念図

(左図：参考文献[5]より引用、右図：絶対姿勢推定のために拡張した 3 球面の交差を描画)

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = r_i^2 \quad (1)$$

Intersections of three spheres = (x,y,z), Two distinct real roots

Central coordinate of a sphere = (x_i,y_i,z_i), (i=1,2,3)

Radius of a sphere = r_i , (i=1,2,3)

4. 解析結果

S-310-44 号機の絶対姿勢の解析に、前述の新しい解析手法を適応した結果が Fig. 4 と Fig. 5 である。約 300 秒間に渡って、ロケットのコーニング運動と歳差運動の姿勢変化を導き出し、その絶対姿勢として 800Hz の時間分解能で明らかにすることができた。Fig. 4 はロケットに固定定義された X-Y-Z 軸の時間変化を、その軸先の軌跡としてプロットしたものであり、X-Y 軸は Z 軸周りのスピン運動のため、天球を周回していることがわかった。また機軸方向である Z 軸は、完全にスピン軸とは一致しないので、Z 軸は大まかに天球のある一定方向を向いているもの

の、Z軸自身も時間とともに、歳差運動を指し示す大きな輪を描いていることが明らかになった。Fig.5はそのZ軸の歳差運動の変化を詳細に描画したもので、約220秒間で1周するように輪を描き、その角度変化は約26.1度であった。細かく観察すると大きな運動を示す歳差運動の中に、コーニングを表す微細な姿勢変化も明らかにできた。

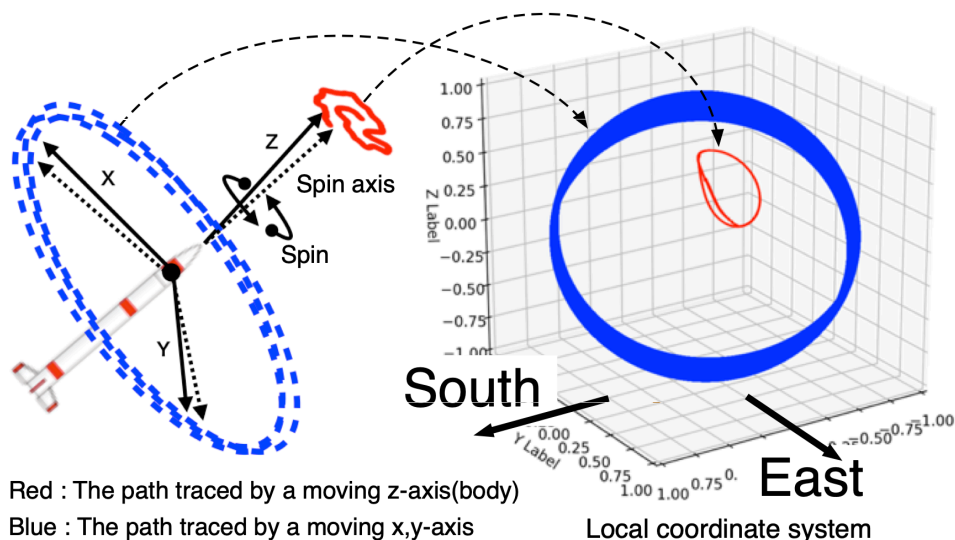


Fig. 4 S-310-44 号機の X-Y-Z 軸の時間変化(機軸は Z 軸)

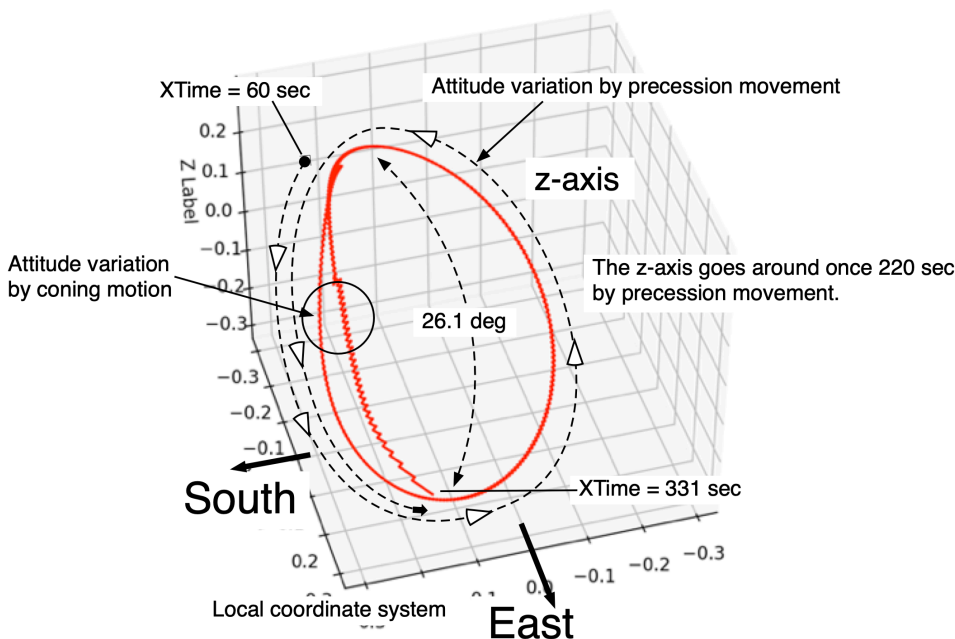


Fig. 5 S-310-44 号機の Z 軸の軌跡変化(歳差運動とコーニング運動)

地磁気姿勢角(ロケット Z 軸方向と地球全磁力 F のベクトルの間の角度)のデータを用いて、歳差運動とコーニング運動を示す角度変化を Fig. 6 に示す。下段のグラフより、約 220 秒で 1 周する歳差運動の変化が読み取れ、その波形を拡大したものが上段左側のグラフである。点線の傾きは歳差運動の変化を拡大して示しており、2 本の点線の間で周期的な角度変化がコーニング運動による Z 軸の変化を示している。コーニング運動による角度変化を上段右図に示す。

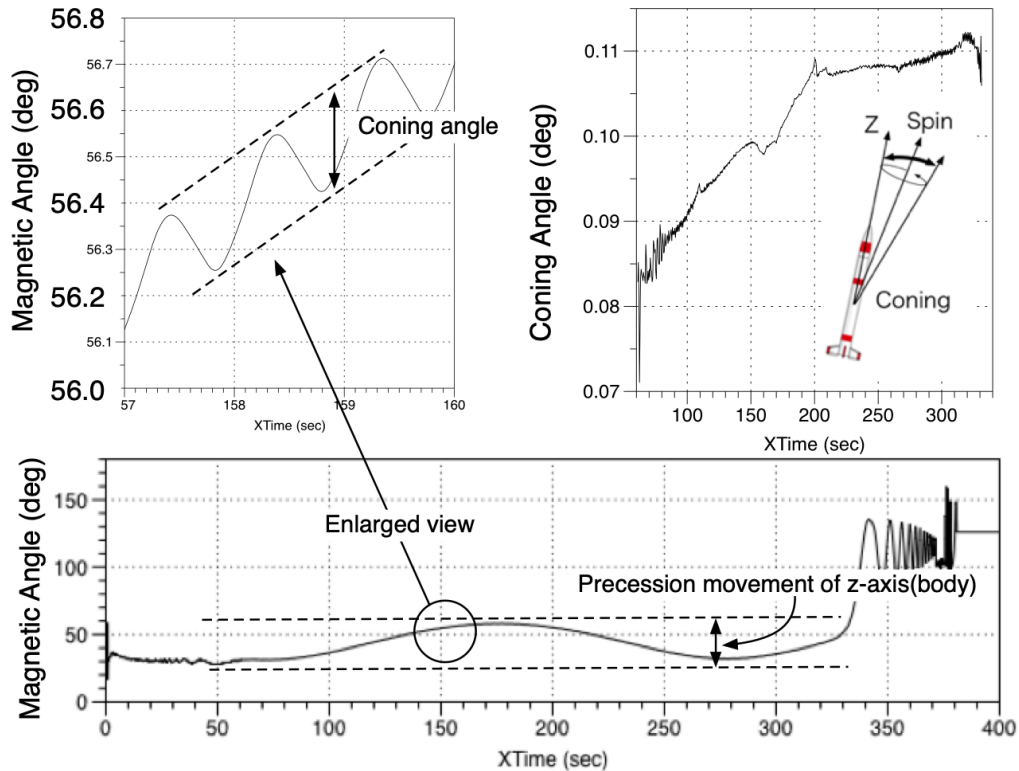


Fig. 6 S-310-44 号機の地磁気姿勢角から導いた歳差運動とコーニング運動

5. まとめ

地磁気姿勢角、太陽角、ロケット機軸を3球面の形で表現し、その球面の交点からロケットの絶対姿勢を推定する新しい手法を開発した。この手法を用いて、Fig.2の右図に示すようにPとQが接近してコーン間の角度が非常に小さい特異な角度条件下におけるS-310-44号機の絶対姿勢を推定することに成功した。そして、詳細な歳差運動とコーニング運動を明らかにすることができた。提案手法は、PとQが接近しない一般の角度条件下でも適応できるものであり、汎用性を有する解析手法である。

参考文献

- [1] JAXA/ISAS, 観測ロケット S-310-44 号機実験の実施について, <<http://www.isas.jaxa.jp/topics/000237.html>>, (参照 2019-08-01).
- [2] JAXA/ISAS, 観測ロケット S-310-44 号機 打上げ結果について, <<http://www.isas.jaxa.jp/topics/000249.html>>, (参照 2019-08-01).
- [3] Fumio TOHYAMA, Masahiro ISHIDO, Hiroshi FUKUNISHI, Attitude Determination of the Antarctic Sounding Rockets from Magnetometer and Horizon Aspect Sensor Data, Journal of geomagnetism and geoelectricity, Vol. 40, Issue 7, pp. 817-829, 1988.
- [4] Charles F. Miller, Jr., A GRAPHIC METHOD FOR DETERMINING THE ABSOLUTE ATTITUDE OF SOUNDING ROCKET VEHICLES, NASA TN D-5172, 1969.
- [5] GISGeography, Trilateration vs Triangulation - How GPS Receivers Work, <<https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>>, (参照 2019-08-01).