—技術ノート— TECHNICAL NOTE

衛星球形タンク内液体の動的挙動解明のための二つの試験^{*1} Experimental Investigation on the Dynamic Behavior of the Liquid in Spherical Tanks of a Spinning Satellite

小松 敬治^{*2}・小野 修 壽^{*3}

Keiji KOMATSU, Syuji ONO

清水 順一郎^{*3}・長 島 隆 一^{*3}

Junichiro SHIMIZU, Ryuichi NAGASHIMA

安 澤 眞 一^{*4}

and Shinichi ANZAWA

Key Words : Artificial Satellites, Oscillation, Sloshing, Spherical Tank, Spin

Abstract

Two experiments are carried out to investigate the dynamic behavior of the liquid partially filled in spherical tanks of a spinning satellite. One is the simulation test at the spin up phase of the rocket. The other is the sloshing test to analyze the propellant sloshing effects on the satellite attitude control. These experiments are specially set for the Engineering Test Satellite V which has two spherical tanks 37% filled with hydrazine, but the results obtained can be applicable to the other problems of the liquid dynamics in spherical tanks.

1. 序 論

昭和62年にH-Iロケットで打ち上げ予定のETS-V(技術試験衛星V型)は姿勢制御用に二つの液体推進(ヒドラジン)タンクを備えているが、ミッション遂行上、内部液体の動的挙動に関して問題点が指摘された。タンクは5年分の推進が入る設計であるが、ETS-Vのミッション期間は1年半であるため、タンク充填率が37%であることが原因となっている。一つはロケット姿勢制御フェーズでのスピナップ時の衛星内液体の大変形に関するもの、もう一つはアポジモーター燃焼フェーズでの液体のスロッシングが衛星の軌道投入誤差へ及ぼす影響に関するものである。

この二つの問題についてスピナップ試験とスロッシング試験とを行ったが、得られた結果は液体の動的挙動問題について一般性を持ち、しかも、この種の報告は従前なされていないので、ここに報告する次第である。

2. スピナップ試験

ETS-V(第1図)をペイロードとするH-Iロケットは、固体3段モーター燃焼開始前に3.5秒間で90rpmにスピナップするが、スピナップ完了後、3段モータ点火までのロケット姿勢制御フェーズに対する影響として、衛星内の液体の振動があるのかどうか、また、あるとすればどの程度の振幅が残るのかが問題となった。スピナップ前にはほとんど無重力状態にあると予測されるが、制御による残留加速度がかかっている可能性もあり、最悪の状態として第1図に示されているスピナップ後の平衡位置から90°ずれた位置に一塊として存在していた場合を採用した。この位置からの移動が有害な横スロッシングを最も大きく誘起する。このような問題についての試験例は報告されておらず、また、信頼のおける解析法もみあたらなかったため、以下のように1gの重力下でシミュレーション試験を行うこととした。供試体は実機相当の内径53cmの球形アクリルタンクを用いて行った。

第2図に試験装置の概要を示す。推進のヒドラジンの物性は水に近いので、内部液体は水で代用した。内部液体の運動は4チャンネル(ch)の波高計の出力を

^{*1} 昭和61年7月17日、第28回構造強度に関する講演会にて発表。昭和61年8月12日原稿受理

^{*2} 航空宇宙技術研究所

^{*3} 宇宙開発事業団

^{*4} 石川島播磨重工業(株)

第1図 ETS-V

第2図 スピントーブル上での試験のセッティング

記録するとともに、ビデオカメラでモニターした。また、スピンは窒素ガスのジェットにより与えた。充填率が30%と50%の波高計の結果を第3図と第4図とに示す。図において、ch.1とch.3とが回転方向に直角に貼ってある波高計の出力で、初期の振動は静止状態からの急な回転加速により、液体が回転逆方向に移動したために生じたことがビデオ画像で確認された。ch.2とch.4とが遠心力方向の波高計出力であり、スピニング完了後、たかだか1~2cm程度の振幅のスロッシングしか生じていない。この試験は1g下で行ったが、90rpmは8g程度の加速度に相当するので、無重力状態でもスピニング後の釣合い位置が異なる程度で、定性的には1gの影響は無視しうる。この試験の結果、ETS-Vについてはスピニング完了後、3段モーター点火までのロケット姿勢制御フェーズに

第3図 充填率30%での波高計出力とスピン回転数

対しては、液体の振動は問題としなくてよいことがわかった。一方、液体を第5図に示すような剛体振り子とみなして振れ角 θ についてたてた運動方程式

$$\begin{aligned}
 ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} + cl \frac{d\theta}{dt} - m\Omega^2(t)(L + l \sin \theta) \cos \theta \\
 + mg \sin \theta = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

をルンゲ-クッタ-ギル法により数値積分した結果を第6図と第7図とに示す。この結果は第3図と第4図のch.2に対応する。計算に用いたパラメータの値については付録に示す。図の実線は振り子の振れ角 θ の動きを表しており、スピニング完了後にはそれぞれ振り子としての自由減衰をすることになる。実際には、スピニング完了後の運動はスロッシングとなり、スロッシングの固有振動数と振り子のそれとは異なるので、この計算で意味があるのはスピニング完了までの経過と初期振幅である。計算での初期片振幅は波高計での出力に換算して、充填率30%のとき $R\theta = 0.7$ cm、充填率50%のとき $R\theta = 0.5$ cmとなり、計算結果と試験結果とは定性的によく一致していると考えられる。スピニングに要する時間を変えて計算し

第4図 充填率50%での波高計出力とスピン回転数

第5図 液体の剛体振り子モデル

たものを第7図に重ね書きして示すが、時間が短ければ大きな振動が生ずる可能性があることも明らかとなった。また、減衰には等価粘性減衰比として0.3%をいれて計算したが、無減衰として計算しても結果は図にプロットすればほとんど重なり、減衰は二次的効果しかないこともわかった。よって、このような場合にはナビエ-ストークス方程式をもちだすまでもなく、

第6図 充填率30%での剛体モデルの流れ角 θ 第7図 充填率50%での剛体モデルの振れ角 θ

簡単な剛体モデルで十分に現象を把握できることがわかった。

3. スロッシング試験

ETS-Vのアポジモーター燃焼フェーズは静止衛星達成上、重要なフェーズである。衛星は静止三軸衛星であるが、アポジモーター燃焼フェーズではまだスピンをしている。この過程でスロッシングは、アポジモーターの推力ミスアライメント、衛星の重心オフセット、衛星のスピン軸と機械軸とのずれなどとともに、軌道投入誤差の一因となりうる。スロッシングの軌道投入誤差への影響を解析するのに必要な基礎データを取得するため、スロッシングに関する試験を行った。

スロッシングについては、すでに多くの研究がなされてきているが¹⁾、そのほとんどが、円筒タンクに関するもので、球形タンクについての数は少ない。線形の範囲ではあらためて試験をする必要はないが、大変形時での減衰特性を求めることを主目的として試験を行った。大変形時の減衰については文献²⁾があるが、これは、加振振幅と減衰比の形で結果がまとめられている。制御では波高振幅と減衰比との関係が必要であり、しかも非線形領域では寸法効果があるので、実験相当のタンクでのデータが必要であった。

第8図 振動波高と等価粘性減衰比との関係

□: 充填率65%, ○: 充填率50%, △: 充填率30%

推奨充填率が30, 50, 65%のときの一次の横スロッシングモードの振動波高と等価粘性減衰比との関係を第8図に示す。減衰は自由減衰法により計測し、対数減衰率を求めることにより算出した。このときの固有振動数 f は充填率に応じてそれぞれ1.11, 1.21, 1.30 Hzと計測され、これは過去の実験データにより信頼性の確立している近似式¹⁾

$$f = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (2)$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{3} \frac{240 - 220\alpha + 72\alpha^2 - 9\alpha^3}{80 - 100\alpha + 44\alpha^2 - 9\alpha^3 + \alpha^4} \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{4}(2-\alpha)\left(1+\frac{\alpha}{3}\right)\right\}$$

$$\alpha = H/R$$

とよく一致(計算値はそれぞれ1.11, 1.18, 1.25 Hz)した。

なお、微小波高での充填率50%の場合の等価粘性減衰比は次の半実験式により

$$\xi = \frac{0.131}{2\pi} \left(\frac{\nu \times 10^4}{\sqrt{8gR^3}} \right)^{0.359} \quad (3)$$

と与えられる²⁾。ここに ν は液体の動粘性係数である。この式による値も第8図に付記する。第8図の関係をもとにスロッシングのメカニカルモデルの減衰部を作ることにより、より実体に近いシミュレーション解析³⁾が可能となった。

4. 結 論

ETS-Vで指摘された液体の動的挙動問題解決のために試験を行って、当初の目的を達成し、さらに、次のような一般性のある結果を得た。

1) 球形タンク内の液体のスロッシングの等価粘性減衰比は波高が大きくなると増大するが、これを、液面波高と等価粘性減衰比の形でまとめた。

2) 球形タンク内液体のスピンアップ時の過渡応答解析には第一近似として剛体モデルを用いればよいことが試験により確認された。

3) 球形タンク内液体のスピンアップ時には、減衰は二次的効果しかないことが計算と試験により明ら

かとなった。

参考文献

- 1) Abramson, H. N. (ed.): The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, NASA SP-106 (1966).
- 2) Sumner, I. E. and Stofan, A. J.: An Experimental Investigation of the Viscous Damping of Liquid Sloshing in Spherical Tanks, NASA TN D-1991 (1963).
- 3) Ono, S., Ueno, K., Yamada, S., Miwada, M., Murayama, H., Nakamaru, K., Yamagata, F., Toyoda, T., Hiwada, T. and Inomata, H.: Engineering Test Satellite V Spin Dynamics, Simulations with Sloshing Effects and Geostationing Analyses (Apogee Boost Motor Burning, Precession, Despin), 36th Congress of the International Astronautical Federation, Stockholm, Sweden, IAF-85-76, 1985.
- 4) 今井 功: 流体力学 (前編), 裳華房, 1973, pp. 291-300.

付 録

式(1)において用いた数値は以下のとおりである。

m : 液体の全質量で

$$m = V_l \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho \right)$$

となる。ここに $R=26.5$ cm, $\rho=1.0$ g/cm³で、充填率 V_l は

$$V_l = \frac{3}{4} \left\{ \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{b}{R} \right)^3 - \frac{b}{R} \right\}$$

と与えられる。 b は第5図で

$$b = R - H$$

と定義される。

l : 液体の重心と球形タンクの中心との距離で

$$l = \frac{3}{8} R \frac{1 - 2 \left(\frac{b}{R} \right)^2 + \left(\frac{b}{R} \right)^4}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{R} \right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{b}{R} \right)}$$

となる。

c : 減衰係数で、等価粘性減衰比 ξ と固有振動数 f により

$$c = 4\pi \xi f m$$

と表示できる。 ξ の値は式(3)では1g下で0.37%, 8g下で0.26%となるが、この値は微小変形のスロッシングの減衰比であるので、もう一つの評価として液体と接する振動平板の理論(低速すべり運動を仮定)⁴⁾を用い、球形タンクの濡れ部分を同じ面積の平板として求めると0.35%となる。よって、計算には0.3%を採用した。なお、水の動粘性係数は $\nu=0.01$ cm²/sとした。

L : 75 cm

$\Omega(t)$: スピン回転数。スピンアップ完了時間を T として

$$0 \leq t < T \text{ で } \Omega(t) = 9.425t/T$$

$$T \leq t \text{ で } \Omega(t) = 9.425 \text{ (90 rpm に相当)}$$