液体ロケットの振動

Vibration of Liquid Rocket

執筆者プロフィール

幸節 雄二
Yuji KOHSETSU

■1972年名古屋工業大学生産機械工学科卒業，
1974年名古屋工業大学生産機械工学専攻修士
課程修了，1999年博士（工学）東京工業大学
■主として行っている業務・研究
・ロケットの構造設計技術の高信頼性化
・再使用型ロケットのシステム研究
〔1974～2000 三菱重工業（株）にて，N-I，
N-II，H-I，H-II ロケット等の設計開発，
2000～2005 宇宙開発事業団／宇宙航空研究
開発機構にて H-IIA ロケット等の技術評価〕
■所属学会および主な活動
日本機械学会，日本航空宇宙学会，米国航空宇
宙学会
■勤務先
正員，九州大学教授 大学院工学研究院 航空
宇宙工学部門
〒819-0395 福岡市西区元岡 744／
E-mail : kohsetsu@aero.kyusyu-u.ac.jp

1. はじめに

実用衛星を打ち上げた日本の液体ロケットを図1に示す。図1からわかるようにロケットは梁状の構造物である。ロケットに発生する振動は、①過渡振動、②正弦波振動、③ランダム振動、④衝撃波振動に分類される。これらの振動の概要を表1に示す。①②は機体全体に及ぶ振動であり、③④は局所的な振動である。ここでは、執筆者が長年設計開発に携わってきた液体ロケットを対象にして、設計荷重を規定する主要な要因になる①②について

述べる。③④は搭載機器の環境条件を規定する要因になるが説明は省略する。

2. 液体ロケットは柔軟な構造体

ロケットは地球の重力に逆らって軌道に達する輸送システムであり、機体の軽量化が限界まで追求される。大型液体ロケットでは全備質量の約90%が推進薬であり、推進薬タンクが機体の大部分を占める。機体を軽量化するため推進薬タンクはタンク半径の1/1 000程度の板厚に設計される。

図2にアポロ月宇宙船を打ち上げたサターンVロケットの全備状態での固有振動特性⁽¹⁾を示す。全長106m，最大直径（第1段機体）10mのサターンVの機体構造は、図2に示した振動数の値から柔軟に設計されていることがわかる。

3. 液体ロケットに生じる主な振動

柔軟な液体ロケットは振動が発生しやすい特性を持っている。①②が起きると機体全体が振動して無視できない大きさの慣性荷重（質量×加速度）が発生する。しかし、大型ロケットの慣性荷重は実験によって求めることは困難であり、発生する振動加速度を高精度で予測することによって解析的に求める技術が使われている。主要な振動を取り上げると、①には、リフトオフ

時、および大気中飛行中に突風が作用したときの振動がある。②には、ポゴ振動（POGO）がある。POGOは液体ロケットに特有の不安定振動であり、縦方向に伸縮する振動の様子がアメリカのおもちゃPOGOスティックに似ていることからこの名称がついたといわれている。このほかに地上風（横風）によって生じるカルマン渦が発射台に起立したロケットの曲げ振動を励起したときにも②が発生する。

3.1 リフトオフ時の振動

機体をリフトオフさせるため自重よりも大きい推力がエンジン点火に伴ってステップ状に立ち上がる。柔軟な機体後端にステップ状に推力が作用するため全機縦振動が励起される。また、点火からエンジン推力が定常に達する短い時間は噴射ガスの膨張が不十分となりノズル内で流れが剥離し非軸対称となることによって横方向にパルス状の推力が発生する。この横力によって曲げ方向の振動も励起される。リフトオフ時の振動はロケットの先端部分が大きく振れるため、ロケットの上段構造や衛星に大きな加速度が生じる。例として日本のH-Iロケットのリフトオフ時に計測された機軸方向の加速度⁽²⁾を図3に示す。なお、スペースシャトルのように非対称な機体構成を持つ場合には、対称形のロケットには発生しない大きな曲げ振動⁽³⁾が発生するため設計上の配慮が必要となる。

図1 日本の液体ロケット

表1 ロケットの振動の概要

振動の種類	振動数の範囲	原因	問題となる対象
①過渡振動	約50Hz以下	推力立ち上り、突風	機体構造
②正弦波振動	約100Hz以下	POGO、地上風	機体構造
③ランダム振動	約2 000Hz以下	音響、空力的な圧力変動	搭載機器
④衝撃波振動	約10 000Hz以下	火工品の作動	搭載機器

図2 サターンVの固有振動特性(境界条件：自由-自由)

(注) この図は、文献(1)に基づき作成したモード図である。文献(1)の縦振動の第1次モードには推進葉のモード(逆位相と推定される)は示されていない。

図6 POGOの発生機構

3.2 突風作用時の振動

飛行中ロケットが遭遇する突風は図4に示すような台形状⁽⁴⁾にモデル化され、高度幅60~300mの間に、風速が0→9→0m/sと急激に変化する。ロケットが突風に突入すると対気速度が急激に変化する。突風がロケットに垂直に作用するときの対気速度の変化が最も大きく、その影響は機体の迎角に換算して0.5~1°程度の増加になる。この迎角増加に比例した空気力が機体に垂直に作用し機体の曲げ振動が励起される。突風による振動はロケットと内部の衛星との接触が問題となる。

3.3 POGO振動

POGOの例として日本のN-IIロケットの第1段の飛行末期に発生したPOGOの実測データを図5⁽⁵⁾に示す。POGOが発生すると大きな慣性荷重が負荷されるため機体の補強が必要になる。したがって発生しない場合

に比べて機体質量が増加し性能低下につながるためPOGOの防止は重要な設計課題である。POGOの発生機構⁽⁵⁾を図6に示すが、図に示した閉ループを安定化することによってPOGOは防止できる。一般に機体構造系と推進葉供給系の振動数が飛行中に一致すると閉ループが不安定となるが、構造系の振動特性を変更することは大幅な設計変更につながるため、ターボポンプの入口付近にアキュムレータを設置することによって推進系の振動特性を調整する技術が開発⁽⁵⁾されている。

4. おわりに

ロケットに関する技術データについては開示制限があり公表されている情報が少ない。ここでは身近にある公開情報を用いて液体ロケットの振動について概要を述べた。この概説によってロケットの振動に興味を持っていた

図3 H-IIロケットのリフトオフ時の過渡振動

図5 N-IIロケット第1段飛行末期のPOGO

文 献

- (1) Grimes, P.J., ほか, Advancements in Structural Dynamic Technology Resulting from Saturn V Programs, NASA CR-1359, I (1970), 31-32, NASA.
- (2) 幸節雄二・宇治野功・奈良登喜雄・池田伸一郎, 垂直発射ロケット打ち上げ時の構造体の過渡応答振動解析法の改良に関する研究, 日本機械学会論文集, 65-840, C (1999), 4605-4610.
- (3) Furniss, T., Dynamic Overshoot, Flight International, 24-30 (1996), 30-32.
- (4) Johnson, D.L., ed., Terrestrial Environment (Climatic) Criteria Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development, 1993 Revision, NASA TM4511 (1993), 2-83-2-85, NASA.
- (5) 森野美樹・幸節雄二, 液体ロケットのポゴ振動について, ターボ機械, 17-8 (1989), 516-525.