

イプシロンロケット試験機 衛星搭載環境

○小杉 幸寛、星野 剛(IA) 宇井 恭一、峯杉 賢治、後藤 健、紙田 徹、堤 誠司(JAXA)

The Evaluation of the Mechanical Environment on First Flight Epsilon Launch Vehicle Payload

Yukihiro Kosugi , Tuyoshi Hoshino(IA), Kyoichi Ui, Kenji Minesugi, Ken Goto,
Touru Kamita, and Seiji Tutsumi(JAXA)

Key words:

First Flight Epsilon Launch Vehicle, Post Flight Evaluation, Payload Flight Mechanical Environment

1 諸言

イプシロンロケット試験機は、平成25年9月14日に惑星分光観測衛星(SPRINT-A)を計画通りの軌道へ投入することに成功した。

フライトデータを評価した結果、イプシロンロケットの衛星搭載環境は世界トップレベルであることを確認した。特に、正弦波振動レベルは、新規開発した制振機構がフライトにおいても設計予測通りの効果を発揮し、世界のロケットをリードするレベルまで振動環境を緩和できた。また、音響環境についても、煙道および音響ブランケットの効果によって世界トップレベルの搭載環境を実現することができた。

本稿は、フライト中に取得した各種データを基に、イプシロンロケット試験機搭載衛星における機械的環境の評価結果について述べるものである。

2 イプシロンロケット衛星搭載環境の概要

2-1 衛星搭載環境の設定

イプシロンロケットは、搭載衛星の機械的環境を次の5つの条件にて設定している。

- ・正弦波振動(1段モータ燃焼圧力振動)
- ・準静的加速度
- ・音響
- ・衝撃
- ・ランダム振動

なお、試験機の衛星I/F条件においては、ロケット側から伝わるランダム振動は正弦波振動で包絡しており、従って衛星搭載環境は実質的にランダム振動を除く4つの条件で構成される。

2-2 正弦波振動の発生メカニズム

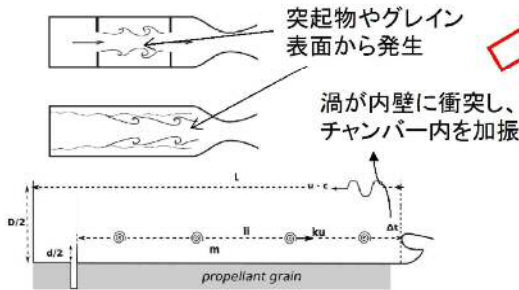
上記4つの機械的環境の中で、イプシロンロケットでは開発当初から1段モータの圧力振動が上段構造と連成することで衛星分離面での正弦波振動レベルが大きくなることを懸念し、正弦波振動環境の緩和を重要な開発項目に設定してきた。イプシロンロケットでは、正弦波振動は、主モータの燃焼圧力振動によって励起される正弦波関数状の周期的な振動であり、Space ShuttleのSRBやVegaのSRMなど他機種の固体ロケットモータでも生じている。一般に、大型のロケットモータで生じている正弦波振動の発生メカニズムは、Vortex Shedding[1,2]と呼ばれるメカニズムによって機軸方向に正弦波振動を励起している。

図2-1に、Vortex Sheddingのメカニズムを模式的に示す。グレイン表面や内部突起物から周期的に生じる渦(=微小な圧力擾乱)が、チャンバーの音響特性(気柱振動)と共鳴することで大きな圧力振動成分に成長し、モータケースを介して機体全体を機軸方向に揺らす。この時の加振周波数は、チャンバーの音響特性に依存しており、チャンバーの軸方向長さやガス流速によって支配される。

チャンバーの音響特性→気柱振動



圧力擾乱→渦



気柱振動と圧力擾乱の共鳴
→強い圧力振動成分の励起

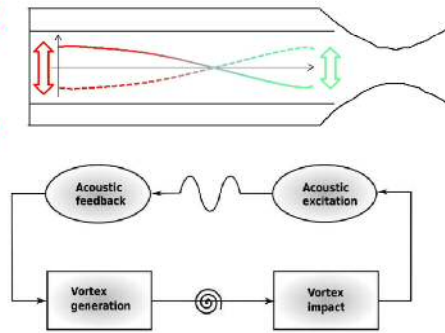


図 2-1 一般的な正弦波振動の発生メカニズム (Vortex Shedding[1,2])

2-3 制振機構による搭載環境の向上設計

イプシロンロケット 1 段モータの場合、気柱振動を仮定した場合の固有振動数を評価すると、概ね 50～60Hz にあることになる。実際、過去に行なわれた地上燃焼試験で得られた燃焼圧力の振動成分を抽出すると、40～60Hz であることを確認している。

この帯域の振動成分は、衛星の主構造体の固有振動数に近く、従って衛星の固有モードと共振すると大きな応答加速度を発生し、衛星の搭載環境を悪化させることとなる。そこで、イプシロンロケットでは衛星分離部 (PAF) に制振機構を搭載することで、正弦波振動の緩和のみならず、世界トップレベルの正弦波振動環境を実現すべく開発当初から技術的検討を行ってきた。

制振機構の概要図を、図 2-2 に示す。制振機構 (アイソレータ) は、衛星側に結合させる先端リングと、ロケット側に結合する後端リングの間を接続している。アイソレータは、製造性・組付性の観点でシムとエラストマを 2 ニート化したもので、二重リングの間に周方向に均等配置している。このアイソレータを用いて、衛星+PAF の機軸方向モードは 20Hz 付近に固有振動数を有し、正弦波振動の周波数帯域での応答倍率は 0.32 倍以下となる制振特性を有するように設計した。これを表したものが、図 2-3 である。図 2-3 で示す曲線は、衛星はマス/制振機構をバネ、に置き換えた 1 自由度バネ-マス系での応答曲線である。

なお、制振機構は搭載するアイソレータの個数を最大 48 個までに変更することで、イプシロンロケットで打ち上げが想定されている最大 1200kg の衛星までに対応できる仕様となっている。すなわち、アイソレータの個数を変えて衛星+PAF の機軸方向モードの固有振動数を 20Hz 付近にすることで、様々な衛星で一定の制振特性を発揮できる。

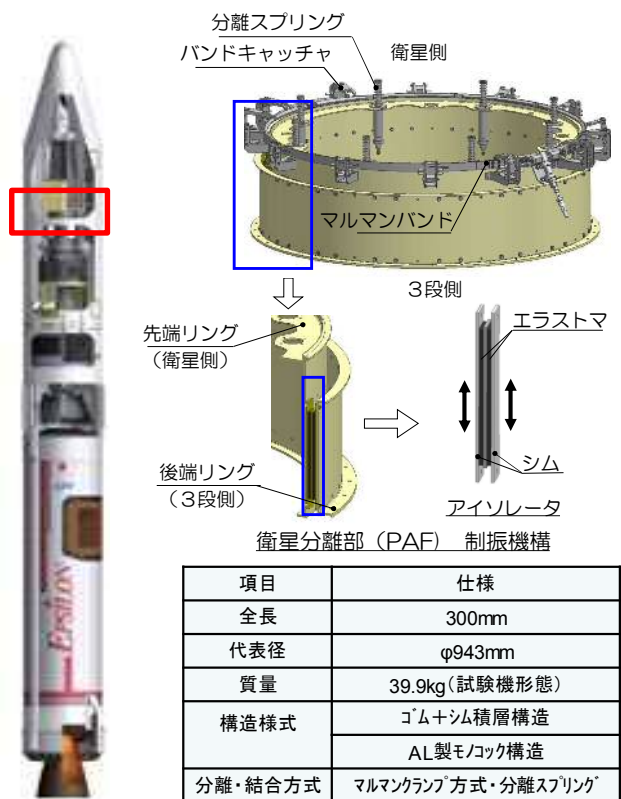


図 2-2 制振機構の概要

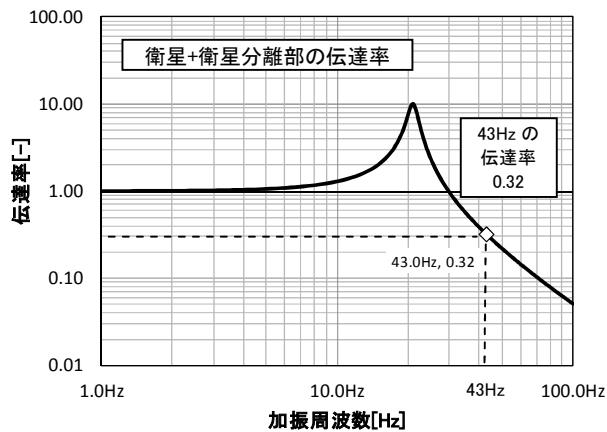


図 2-3 衛星+PAF 機軸方向加速度の伝達率

3 フライトデータの評価

3-1 制振機構のフライト実証

図3-1に、制振機構の前後で取得した機軸方向加速度の振動成分(燃烧振動の周波数帯域でバンドパスフィルタ処理)を示す。これより、実際のフライトにおいても制振機構によって機体側の振動を、設計通り1/3程度まで制振させていることが実証された。

また、フライトデータと開発試験データから求めた加速度の伝達率とを比較したものを、図3-2に示す。これより、実際のフライトにおいても、開発試験で確認した減衰特性が再現されていることがわかる。

3-2 他機種との比較

ここでは、フライトで得られた各データに基づき、他機種との衛星搭載環境を比較し、イプシロンロケットの優位性を示す。

- ① 正弦波振動： 図 3-3
- ② フェアリング内部音響： 図 3-4
- ③ 準静的加速度： 図 3-5
- ④ 衝撃： 図 3-6

図 3-3~6 より、イプシロンロケットの衛星搭載環境は世界トップレベルであり、特に正弦波振動環境は制振機構の効果によって世界をリードするレベルまで衛星搭載環境を向上することができた。

また、フェアリング内部音響についても、フェアリング内部に搭載した音響ブランケットや射点煙道の効果によって世界をリードする環境を実証できた[3]。

なお、図 3-3~6 で示した値は試験機のフライト実績であり、衛星 I/F 条件は別途衛星側の特性を踏まえて設定するものである。

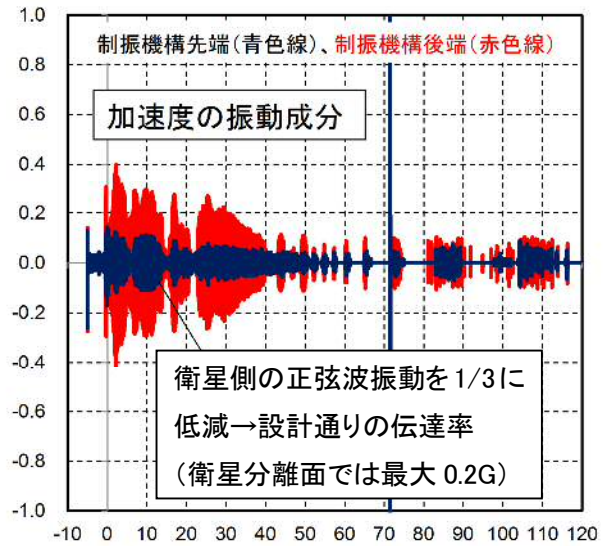


図3-1 制振機構前後の機軸方向加速度

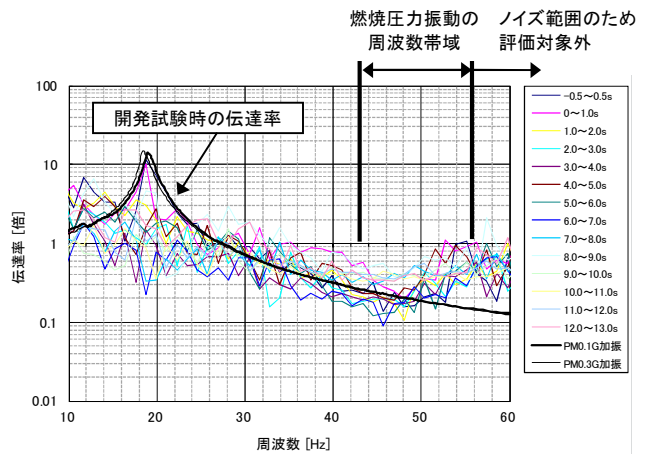


図3-2 制振特性のフライト実績

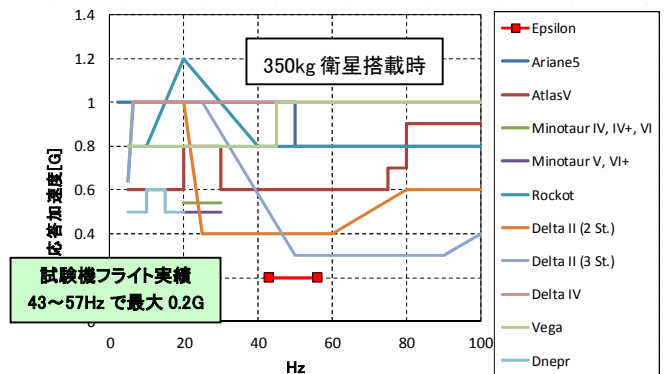


図 3-3 正弦波振動環境の比較

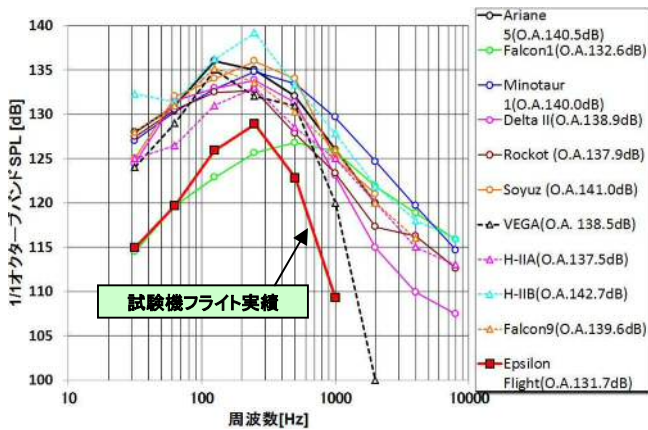


図 3-4 フェアリング内部音響環境の比較

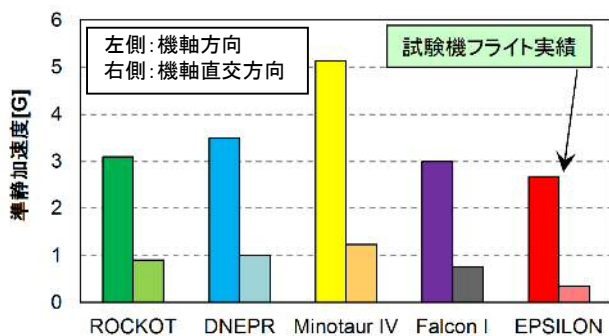


図 3-5 準静的加速度環境の比較

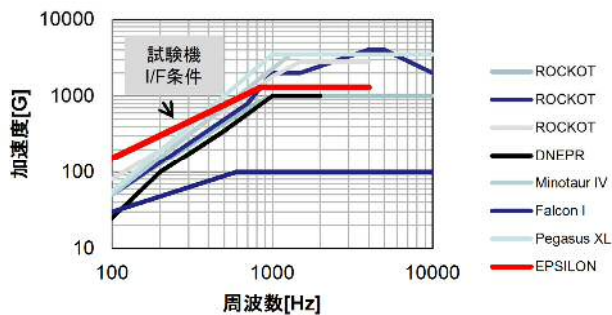


図 3-6 衝撃環境の比較

4 まとめ

本稿は、フライト中に取得した各種データを基に、イプシロンロケット試験機搭載衛星における機械的環境の評価結果について述べた。

イプシロンロケットでは、衛星にやさしい搭載環境を実現するため、(1)制振機構による正弦波振動環境の緩和(2)フェアリング内部に搭載された音響ブランケットや射点煙道の効果による内部音響の緩和、の二つを重要な開発項目と設定した。

3-2項で示した通り、イプシロンロケットの衛星搭載環境は世界トップレベルであり、とりわけ環境緩和

に積極的に取り組んだ正弦波振動およびフェアリング内部音響は世界のロケットをリードするレベルにあることをフライトにて実証した。

今後は打ち上げ能力向上に向けたイプシロンロケットの高度化を行っていく予定であるが、試験機のフライト実績を基に、さらにユーザーフレンドリーなロケットを目指して引き続き開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 木村逸郎、「ロケット工学」、養賢堂
- 2) Fled S. Blomshield, “Lesson Learnd In Solid Rocket Combustion Instability,” *AIAA Missile Conference*, Moterey, CA, November 2006.
- 3) 宇井恭一、峯杉賢治、後藤健、紙田徹、岸光一、石井達哉、堤誠司、「イプシロンロケット試験機の構造系と環境条件の評価」、第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013.