

航空・宇宙「技術トピックス編」 — イプシロンロケット試験機の開発 —*

徳留真一郎**, 井元 隆行**, 森田 泰弘**



徳留真一郎



井元 隆行



森田 泰弘

Aviation and Space (Technical Topics)

— Development of Epsilon Launch Vehicle —*

by TOKUDOME Shinichiro**, IMOTO Takayuki** and MORITA Yasuhiro**

キーワード

固体ロケット, 固体モータ, 液体エンジン, 小型衛星, 自律点検装置, 発射管制装置, 発射台, 衛星接手, モータケース, 姿勢制御

1. はじめに

ペンシルロケットの水平発射実験から約40年の時を経て、ついに世界最大級の M-V 型ロケットにまで発展した日本の固体ロケット技術は、「低コスト化」という新たな課題を取り込んで進化し続けることになった。「小さく産んで大きく育てる」ように進むその取組みの最初の成果が、イプシロンロケット試験機(初号機)の打上げ成功である。

ところで、なぜ固体燃料を使う「固体ロケット」なのか？

大型の衛星打上げロケットには高性能の液体燃料(液体推進剤)を使う「液体ロケット」が多いが、高密度の固体燃料(固体推進薬)を用いる固体ロケットは、液体ロケットに比べて次のような長所がある。①仕組みが簡単でコンパクト、②開発期間が短い、③地上設備がシンプル、④組立後すぐに発射できる、⑤長期保管が可能、⑥大きな推力が簡単に出来る。①～⑤の理由で状況に柔軟に対応し素早く打上げる用途に向いているため、先駆的な打上システムをフットワークよく試して迅速に改良を繰り返すにはうってつけである。また①と⑥の特性によってかさばらないことから、多段式ロケットの最終段や大推力が必要な第1段への利用価値も高い。ただし仕組みはロケット花火と同

じなので、いったん点火して燃焼を開始すると、固体推進薬が燃えつきるまで止めることが難しい。そのため事前の地上試験によって、飛行時の時々刻々の推力や力積を正確に予測できるように工夫しているものの、軌道を微調整して人工衛星を正確な軌道に投入することは苦手である。



図1 イプシロンロケット初号機の打上げ

*原稿受付 平成25年12月27日

** 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙輸送ミッション本部
イプシロンロケットプロジェクトチーム Epsilon Rocket Project
Team, Space Transportation Mission Directorate, Japan
Aerospace Exploration Agency

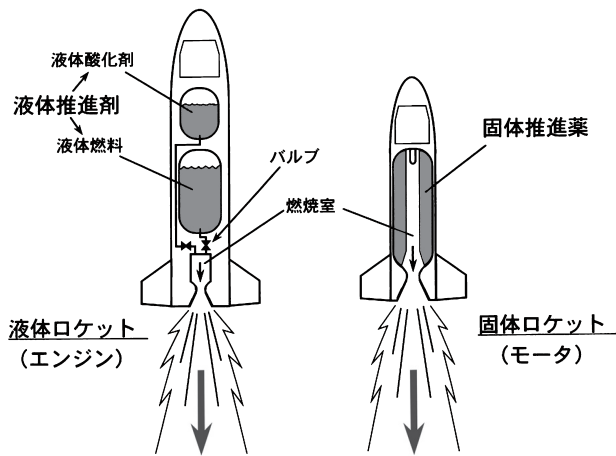


図2 固体ロケットと液体ロケット

M-V の開発を通してほぼ完成したと言われる高性能の固体ロケット技術も、打上システムとしてはまだ上述の①, ③, ④のメリットを活かす水準に達していなかった。特注生産の部品はロケット発射場に集めて点検, 組み立てされていたし, 運用の現場では自動化が進んでおらず, 人手と時間がかかっていたのである。

また顧客目線の価値を高めるためには, 他の乗り物と同じように機体の製造や運用にかかるコストを下げ、運賃を抑えるだけでなく, 乗り心地を良くしたり輸送の質を高めたりすることも重要である。うるさくて高価な F1 マシン (実験機) を, 卓越した性能を損なわないように, おだやかで使いやすい乗り物 (実用機) へと成長させるのが, このフェーズにおける開発者の仕事であろう。

M-V の後継機となるイプシロンロケットについては, 2007年度から「次期固体ロケット」と位置づけられて研究がはじまり, その開発方針が決定されたあと, 2010年度から約3年で開発されて初号機の打上げにこぎつけた。しかし, これで目標達成ではない。

コストを下げるには, システムアーキテクチャだけでなく, 部品レベル, 工程レベルからの抜本的な改善や改革が必要である。その研究や開発に時間がかかることは想像に難くない。しかしながら, それらすべての完成を待っているのは, これまでに築き上げた固体ロケットの存在感や開発と運用の技術そのものが失われてしまうかもしれない。そこで, 打上げ時期が迫っている衛星ミッションからの要求にタイムリーに応じて, 信用を獲得しながら実績をつみあげ, 並行して行われる低コスト化研究の成果を順次反映しながら目標に近づいていくという, 段階的な開発方式をとることにしたのである。

2. イプシロンロケット試験機の開発

第1段階となる試験機の開発では, これからの需要増が期待できる質量 500 kg 前後の小型衛星にターゲットを絞り, コンパクトな機体と運用によって打上げ機会を増やし, 「宇宙への敷居を下げる」ことをスローガンとして課題に取り組んだ。最初の積荷は, 2013年夏の打上げを希望する小型科学衛星 SPRINT-A。試験機にもかかわらず, 顧客は

本格的な惑星分光観測ミッションである。このことは, 日本独自の固体ロケット技術が信頼されている証であろう。

主要な開発課題として, まずは手付かずであった固体ロケットの運用性の向上に取り組むことにした。それは従来, 人手と時間をかけて行われていた発射前の機体点検および発射管制の作業を劇的に簡素化する「機体点検作業の自動化 (自律点検)」及び「発射管制作業の自動化・コンパクト化 (モバイル管制)」の試みである。また, 発射時の騒音と飛行中の振動を緩やかにして, 乗り心地を改善することにもチャレンジした。さらに, 従来の固体ロケットで軌道に投入された衛星は, 衛星に搭載された小型の液体エンジンを用いて正確な最終軌道にのせるための軌道調整を行っていたが, イプシロンではその最終段に小型の液体エンジンを搭載して衛星の負担を大幅に減らすというサービス (オプション: 高い軌道投入精度を要求するミッション向け) を追加した。

以上の開発課題に集中するため, その他のサブシステムやコンポーネントについては, M-V や H-IIA, H-IIB の開発の成果を最大限に活用することにした。1 段の固体モータは, 量産品である H-IIA/B の固体ロケットブースタ SRB-A を共用して低コスト化している。2 段, 3 段の固体モータには, 「はやぶさ」を惑星間軌道に投入した M-V-5 号機の 3 段, 4 段の各モータを改良, 再製造して流用した。さらに搭載電子機器や機体構造の一部についても, アーキテクチャを損なわない範囲で共用品, 流用品で構成して開発の期間と費用を節約したのである。

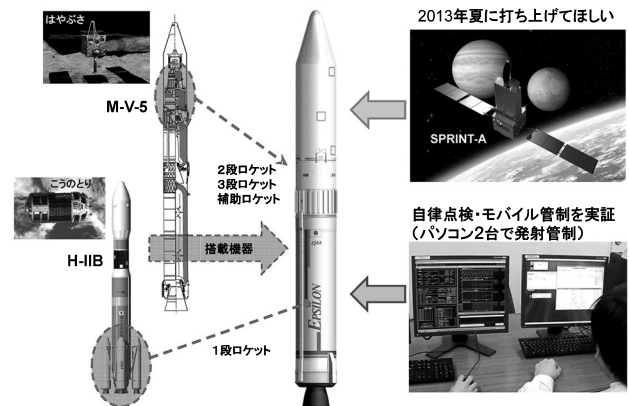


図3 イプシロンロケット試験機の開発

項目	諸元	
	イプシロン(試験機)	M-V
ロケット	イプシロン(試験機)	M-V
機体構成	3段式 (PBS追加可)	3段式 (第4段追加可)
直径	2.6 m	2.5 m
全長	24.4 m	約 31 m
全備質量	約 91 ton	約 140 ton
打上げ能力*	LEO: 1.2トン	LEO: 1.8トン
打上げ費用	約38億円(目標)	約75億円
打上げ年度	初号機 2013年	1996~2006年
打上げ場所	内之浦宇宙空間観測所(USC/JAXA)	

*LEO:地球周回低軌道に換算した能力

図4 イプシロンロケット試験機の概要

■発射前点検と発射管制の自動化（運用の簡素化）

従来の固体ロケットの打ち上げでは、搭載機器の機能系統ごとに担当チーム（班）が分かれていて、それぞれが専用の点検設備や監視装置を運用していた。それなりに人手と時間と維持費がかかっていたのである。これを、IT技術を駆使して効率良く統合し、すでに半世紀の連綿たる歴史の中で鍛えられ蓄積された知恵と経験を人工知能化（人が知能を使って行う判断を機械にやらせる）すれば、運用が効率化され、コストを大幅に削減できるだろう。もちろん世間にはありふれた発想であった。しかしながら、やり直しがきかない使い捨てロケットの世界では、充分な実績に基づく信頼性を重んじており、特に実用機に位置付けられる機体の運用システムを一気に変革するなどということは、容易に受け入れられるものではなかったのである。

ロケット発射直前まで、機体の搭載計算機、点火系、電力電装系、計測通信系、航法誘導制御系の各系統の健全性は、機体に搭載された自律点検装置（ROSE）によって集中的にモニタされている。ROSEは、発射管制室に置かれた発射管制装置（LCS）からの指令を受けると、各系の動作状況をチェックして結果をLCSに伝える機能を持つ。自動車のキーをひねると、車載コンピュータがバッテリーの残量やエアバッグ点火系の導通などをチェックして結果をランプで知らせる機能に似ている。打上げのカウントダウン中に異常が検出されると、LCSが自動的に搭載計算機のタイマーを停止させ、さらに点火系の安全装置を働かせて安全が確保される仕組みになっている。M-Vの時代は、人が判断して人がスイッチを押して行っていた作業を、ROSEの自律点検機能とLCSの判断及び指令機能の連携で行うのである。発射管制では、数十名の各系統担当者の代わりに、LCS用のパソコン二台（冗長のため）と作業指揮者、操作者、補助者、点検者の四人だけで数十名分の作業ができるようになったのである。

以上のように運用の自動化を進めたことによって、人員を削減するだけでなく、発射直前の準備時間を短縮することもできた。M-Vでは、発射9時間前までに制限されていたペイロードへの最終アクセスが、一気に3時間前までに緩和できる見通しを得たのである。このことは、発射直前まで高真空や極低温の環境を保たなければならない機器を用いる衛星ミッションに対して、価値（利便性）を大きく向上させたといえる。

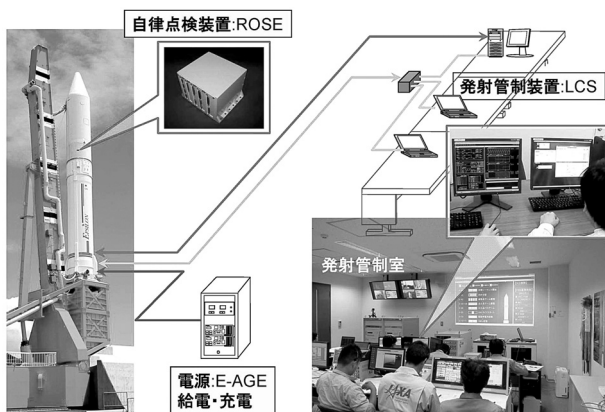


図5 機体点検と発射管制の自動化

■発射時の騒音を下げる（乗り心地の改善）

ロケットの積荷（衛星や探査機）にとって、騒音が問題になるのは発射の時である。パワフルな騒音は、地面に跳ね返った一段ロケットからの高速の噴射ガス流と大気との干渉によって発生する。ロケットの隔壁を通して積荷に達する強力な音波の周波数が搭載機器の固有振動数に一致すると、共振によって損傷を与える場合があることから、騒音レベルは、積荷の搭載の可否を判断する上で重要な評価項目となる。

M-Vの発射装置は、ロケットの噴射ガス流をはね返して斜めに吹き上げる設計となっていたため、他のロケットに比べて騒音が大きかった。そこで、それを改修して用いるイプシロンの発射装置では、騒音のパワーを1/10程度に抑えるように、発射台の形状を工夫することにした。他のロケットでは経験則で整理された騒音と発射台形状の関係を参照して設計される例が多いが、イプシロンでは数値流体力学と小規模の燃焼実験を組み合わせた世界初の評価手法を開発して設計した。その結果、ロケットが載る発射台の高さを上げて噴射ガスが真下に流れる煙道を設置し、さらに水平方向に偏向させた後の流路に特定の周波数の音波を弱めるための適切な長さの屋根を設ける設計を採用した。試験機の打上げでは、目論見通りに音響パワーが低下したことを確認している。

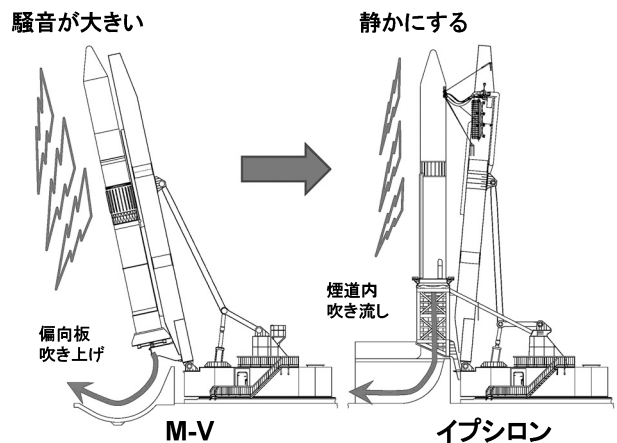


図6 M-Vとイプシロンの発射台形状の比較

■飛行中の振動を抑える（乗り心地の改善）

イプシロンロケットでは、1段固体モータ燃焼中の燃焼室内の圧力振動によって、衛星構造にとって有害な周波数の振動が発生する可能性が予想されていた。そのため、ロケットと衛星の結合部（衛星接手）に、機軸方向の機械的な振動を減衰させて無害化する「制振機構」を追加している。二重円環構造の制振機構付き衛星接手は、外側の円環がロケット側に、内側の円環が衛星側に結合されていて、その間にゴムと金属の積層構造になっている振動吸収用のダンパー機構がはさんである。初号機のフライトの結果、衛星側に伝わる機械振動のレベルは衛星継手ロケット側の1/3程度に抑えられたことが振動計測の結果から判明している。

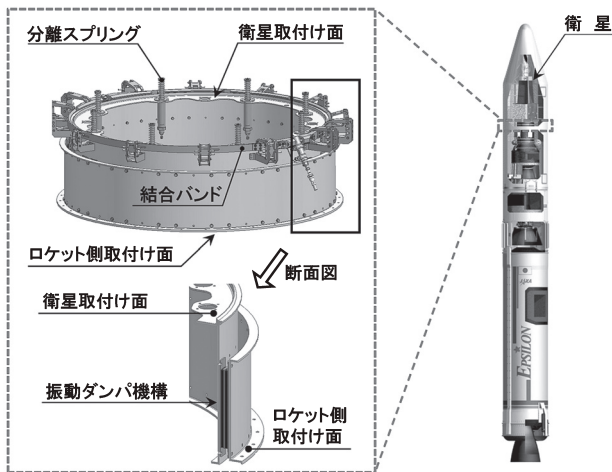


図7 イブシロン初号機に採用された制振機構

■ 正確な軌道投入を実現する（サービスの向上）

3段式の固体ロケットであるイブシロンには、正確な軌道投入を希望する衛星ミッションのために、液体エンジンを装備した第4段（ポスト・ブースト・ステージ PBS）を追加するオプション形態が用意されている。PBSは、H-IIAの2段に搭載されている姿勢制御用の小型液体エンジンを共用で8基装備していて、細かな軌道の調整と姿勢制御を行うことができる。今回打上げられた「ひさき」に対しては、液体エンジンを持たず高い軌道投入精度を求める惑星観測衛星だったため、PBSを追加して要求に応えたのである。

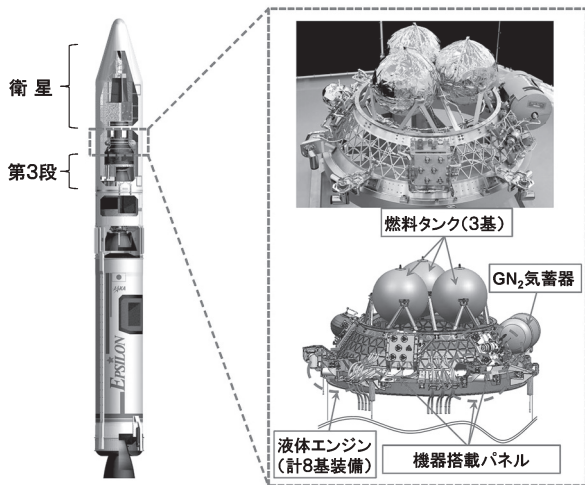


図8 イブシロンの PBS 搭載液体エンジン

■ 固体モータの改良例（サブシステムやコンポーネントの軽量・低コスト化）

前述のとおり、イブシロンロケットでは歴史ある高性能固体ロケットの性能（輸送効率）を高めながら低コスト化を図りたい。そのため、低コスト化＝小型・軽量化を念頭に置いた研究と開発を進めている。

第2段、第3段の固体モータには10年以上前に開発されたM-Vの上段用固体モータが流用されるが、主に複合材

について、開発当時の素材が入手できなくなっていること、製造技術の進歩によって工程の効率化が進んでいることから、新たに、より安くより軽く製作することを目指した。例えば、固体推進薬が充填されていて燃焼室となるモータケースには、フィラメントワインディング成形法による炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が用いられている。その樹脂を硬化させる工程において、M-V開発時には加圧窯を使うオートクレープ成形が採用されていたが、近年、より高強度の炭素繊維を用いて加圧不要のオープン成形が実用化されたことから、製品の軽量化と低コスト化を同時に達成できたのである。1段モータについては、同等の技術が先行して適用されていた。

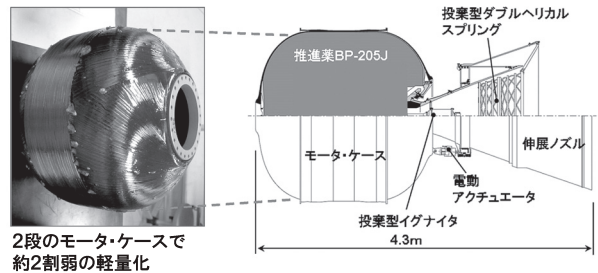


図9 上段用モータケースの軽量・低コスト化

日本の固体モータ技術の特徴づけるサブシステムの一つが、発射直後から1段モータ分離までの期間の姿勢制御を担う固体モータサイドジェット装置（SMSJ）である。固体モータの簡素でかさばらない特長を活かして、比較的大きな推力をコンパクトなシステムで長時間発生できるのだ。1段モータ燃焼中の約2分間は機体のロール姿勢制御（機体軸回りの回転の制御）を、1段モータ燃焼終了から1段分離までの約40秒間は3軸姿勢制御（機体のヨー姿勢制御＝横揺れ制御、ピッチ姿勢制御＝縦揺れ制御、ロール姿勢制御）を行うために用いられる。M-Vでは、噴射ガスを対向する2方向に振り分ける簡単な機構のバルブを装備

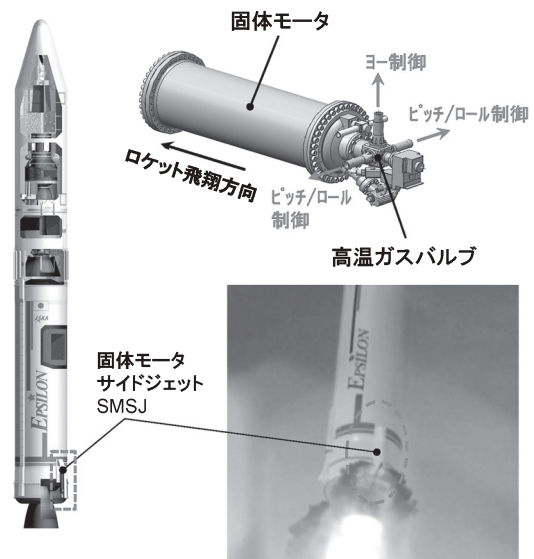


図10 イブシロンの固体モータサイドジェット SMSJ

したものを用いていて、3軸姿勢制御のためには最少4基のSMSJのシステムが必要であった。それを減らして低コスト化するため、イプシロンの開発では、噴射を3方向に振り分ける機構を開発するとともに、その固体モータを大型化して1基あたりの推力を増強することによって、2基の組合せで3軸姿勢制御ができる新型SMSJを完成させた。これによって、さらにシステムの簡素化が進み低コスト化が達成できたのである。

3. おわりに

イプシロンロケットの初号機は、2回の延期を経て9月14日土曜日の14時ちょうどに鹿児島県肝属郡肝付町にあるJAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。おりしも台風22号が接近中であり絶好の天候条件ではなかったものの、美しい飛跡を描きながら排気音を轟かせて上昇

してゆくロケットを多くの見学者の方々に見て頂くことができた。

打上げ前のカウントダウンシーケンス以降すべてのシステムは正常に動作して、計画通りに惑星観測衛星「ひさき」を地球周回軌道に投入することができた。2013年11月末には、最初の観測結果（木星）が得られて観測機能の健全性が確認されている。

上述した、「運用の簡素化」、「乗り心地の改善」、「サービスの向上」の3つの技術課題についてはほぼ目標をクリアすることができたので、2015年度の打上げを目指す2号機までに、さらなる改良を加えて臨みたい。さらに開発の2段階目の準備も並行して進めている。その中では、イプシロン試験機の開発で手を付けていないすべてのサブシステムやコンポーネントを再開発して低コスト化の目標を達成する計画である。