

STCP-2016-011 固体ロケットシステム将来形態の検討

○徳留真一郎, 齊藤靖博, 山本高行, 中谷幸司, 小野哲也, 原利顕, 餅原義孝, 山城龍馬 (JAXA)

Conceptual Study of Japan's Future Solid Rocket

Shinichiro Tokudome, Yasuhiro Saitoh, Takayuki Yamamoto, Koji Nakaya, Tetsuya Ono,
Toshiaki Hara, Yoshitaka Mochihara, and Ryoma Yamashiro (JAXA)

Key Words: Conceptual Study, Solid Rocket, Space Exploration, Customer Needs, Differentiation

Abstract

For developing a Japan's future solid launcher, which will meet the needs of future missions with small satellites and probes and aim to create its own international market, its conceptual study has been started in JAXA. A study team has begun their first activity in order to read the current and mid-term customer's needs based on international market survey and interviews with domestic users, makers, and operators of small satellites and probes. The team also has been studying of application of novel technologies under intensive study in JAXA to the small launch system. The conceptual study will be accomplished and a concept of the small solid launch system will be revealed within a few years.

1. はじめに

ペンシルロケットの水平発射実験から約40年を経て、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システムは、従来の科学・探査や技術実証をはじめとする国のニーズに応えることに加え「市場投入」という新たな目標に向けて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¹⁾。

なぜ固体ロケットか? 高密度の推進薬を用いる固体ロケットには、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の理由で状況の変化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頻繁に試して迅速に改良を繰り返すにはうってつけの手段である。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を求められる第1段への利用価値も高い。ただし、いったん燃焼を開始すると固体推進薬が燃え尽きるまで止めることは難しい。そのため、事前の地上試験によって飛行中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が、ペイロードを正確な軌道に投入することは苦手である。この弱点に対してイプシロン試験機では、日本

の固体ロケットシステムとして初めてRCS規模の小型液体推進系を装備した最終段PBS(Post Boost Stage)を追加することにより、液体ロケットシステム並みの軌道投入精度を実現した¹⁾。

M-V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システムは、大学研究者の研究対象あるいは飛道具としてそのメリットを如何なく発揮し続けたものの、市場価値の観点で上述の①、③、④の特長を十分に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、人手と時間をかけていたのである。

また顧客目線の価値を高めながら収益性を上げるためには、他の乗り物と同じように機体の製造~運用のコストを下げた運賃を抑えるだけでなく、「差別化されたサービス(Differentiated Service)」を提供し、さらに競合他者に対する「模倣困難性(Inimitability)」を維持して、より高い価格を提示可能にする持続的活動が重要である。言い換えると、玄人向けの高価な実験機(M-V)を、狙いを絞った特定の顧客層にとって親しみやすい実用機(イプシロン)へと成長させ、さらにそのポジションを維持し価値を生み出す活動システムを構築することが、これからの固体ロケット開発における主要課題であろう。

M-Vの後継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年で初号機打上げにこぎつけた。しかし、これで目標達成ではない。

市場投入可能な水準にまで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と考えている。それらのための「抜本的低コスト化研究」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、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における技術的卓越性が失われてしまうかもしれない。卓越性とは不断のカイゼン活動によって達成されるものだからである。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、実績を積み上げながら信用を獲得し、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がとられているのである。

ところで、イプシロンの自律的な志向性は、Eを頭文字とする3つのフレーズと単語で表される²⁾。

- **E**volution & **E**xcellence (固体ロケットシステムの革新, さらに進化・卓越)
- **E**xploration (宇宙の開拓と探求)
- **E**ducation (ロケット技術者の育成)

また宇宙開発利用においてイプシロンが果たすべき役割は、「宇宙への敷居を下げる」ためのミッション目標で代表される³⁾。

- 小型衛星・探査機の普及を促進させる (Scientific and Commercial Activity)
- 輸送系先進技術の先行実証機 (プリカーサ) の役割を果たす (Technology Demonstration)
- 固体ロケットシステム技術基盤・産業基盤の維持体制を確立する (Self-sustainability)

固体ロケット将来形態は、イプシロンから引き継がれる以上の「ミッション」を果たすべく、輸送業として経済的に自立した「自立的に持続可能な固体ロケットシステム (Self-sustainable Solid Launcher)」の姿を目指す。

2. イプシロンロケット開発に学ぶ

2010年度のイプシロン試験機開発移行当初は、2013年度までに試験機が開発が完了した後、それまでの「抜本的な低コスト化研究」の成果を反映した次の開発ステップへの移行を目指していた。しかしながら2010年度以降の以下の周辺状況の変化により、その計画は変更されることとなった。

- FY2015 以降の打上げを目指す 2号機については、ERG衛星の投入軌道の変更により、打上能力を増やす必要がある。
- FY2016 以降に ASNARO2衛星の打上げ実現を目指す 3号機については、当該衛星の質量と寸法の増大により、衛星搭載スペースと打上能力の両方を増やす必要がある。

以上の状況の変化に対応すべく、まず2012年度からERG衛星に対応する「2号機開発」が、さらにASNARO2衛星とその先の将来に対応する「高度化開発」が追加され、2014年度に入ってそれらは最終的に「強化型イプシロン開発」としてまとめられた。それを上記「衛星ミッションからの要求にタイムリーに応える」中間段階の開発と位置づければ、当初二段階で最終目標へと向かうはずであった道筋を三段階にして、効率的に低コスト化技術の実証機会を増やし、卓越性を高め、より着実にゴールを目指す道筋を得たと見ることもできよう。

そのため強化型イプシロン開発には、より効率的にイプシロンの理想を目指すことを念頭に、「抜本的低コスト化研究」による成果のうち現実的な開発費で早期実現が可能な技術項目を積極的に盛り込む計画となっている⁴⁾。

このように、「今必要なこと (直近のミッションへの対応) と将来必要になること (抜本的低コスト化) とのバランスを取りながら、ユーザーニーズの変化に柔軟に対応していく」基本姿勢こそ、将来の発展性とホスピタリティを高めるリーダーシップに最も必要な要素として学ばなければならない。

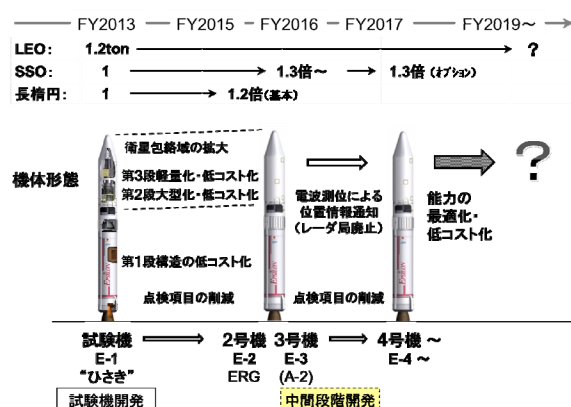


図 2-1 状況の変化に対応する開発計画⁴⁾
(衛星ミッションの要求にタイムリーに応える)

3. 固体ロケット将来形態の概念検討

国内外で新規参入事業者が次々と現れ、宇宙輸送の事業環境が大きく変わり始めている現在、「国の戦略的技術として重要」とされる固体ロケットシステムを、これからの国の需要やグローバルな宇宙開発利用にいかに関与して、維持・発展させてコモディティ化に備えるべきかが大きな課題と考えている。

すでに成熟した技術であって、今後市場サービスへの応用を軸として、自律性を確保しつつ国の需要に応じてゆく「自立的に持続可能な固体ロケットシステム」のあるべき姿について検討する。

概念検討の取組み(目標達成への活動)

「自立的に持続可能」とは、事業環境の変化に翻弄されることなく、自ら能動的にイノベーションを起こし続けられることではないか。それを実現するためには、まず市場の競争環境を理解して事業戦略を練り、その戦略に適したシステム仕様（ハード/ソフトの全系）を設定する必要がある。ここでは、以下に留意して体系的な検討を行う。

- プロジェクト計画の策定：ミッション＝事業、顧客、顧客価値、成果、計画を体系的に設定する
- 新事業戦略の策定：市場の競争環境を理解して我々の価値観や強みに合った新事業戦略を練る
- システム仕様の具体化：顧客価値と新事業戦略に適したシステム仕様を設定する
- 日常活動の差別化：日常的にイノベーションの機会を探す仕組みを創る
- 選択と集中：イノベーションへの挑戦は、的を絞り素早くコンパクトに始める

ミッションの設定に向けて

科学探査をはじめとする国の需要を満足させながら、国際市場において持続的に顧客を獲得して事業を発展させてゆくためには、我々にとっての貢献すべき顧客を我々自身の価値観や固体ロケットシステムの強みに基づいて理解し選ばなければならない。また従来の打ち上げサービスでは十分に満足できない顧客にとっての理想と現実のギャップを埋めるような付加価値を提供する必要がある。

製品やサービスに係る顧客価値を突きつめると、次の三つに集約できるのではないだろうか。

- A. ほしい機能と性能を備えており無駄がない
- B. 手ごろな価格で入手（利用）できる
- C. 必要なときにすぐ入手（利用）できる

Aは機能・性能の最大化（どんなニーズにも対応）ではなく最適化（狙った顧客層向け）、Bは宇宙活動

の発展を阻む高すぎる輸送コストの低減（値ごろ）、Cは契約から打上げまでの短縮化（即納、即応）にとどまらず確実化（安全、信頼）に及ぶであろう。

上述の通り、固体ロケットシステムの強みは、コンパクト、シンプル、柔軟、迅速のキーワードで表現できる。それらを最大限活かすには、小規模で迅速さを求める顧客に対応するミッションを設定するのが適切であろう。例えば次のような方向性が考えられる。

- 顧客： 小型衛星による宇宙事業への新規参入者
- 価値： 多様な要望に素早く応えられるサービス
- 事業： 手ごろな価格と軽快なサービスによって宇宙活動を多様化させ盛んにすること。

なお国の需要については、宇宙基本計画工程表⁷⁾に基づき、2010年代末以降2年に1回の頻度でイプシロンを用いた公募型小型計画（衛星・探査機）が実行され、さらに同頻度で革新的衛星技術実証計画が実行される計画である。基幹ロケットとなったイプシロンについては、年1回の打上げが担保される見通しである。将来形態については、この頻度で実行される国の様々な衛星・探査機計画と無駄なく共通化できて、それを強みとし、差別化できるようなミッションを設定することが望ましい。

事業戦略

自立的な持続可能性をめざす概念検討の第一歩は、事業戦略の策定である。事業戦略は、市場分析と競合分析の結果を踏まえて以下の二点に留意して策定したい。

- 何かについて市場トップを担うイノベーションを目指すこと
- 我々の価値観や強みに合う戦略をつくること

「何かについて市場トップを担う」ためには、ゼロから全く新しい市場を創り上げるか、または既存市場においてまだ満足されていないニーズを察知して、差別化された製品やサービスを投入せねばならない。そのためには、既存技術による新しい利用方法の開発や新技術による新しい価値や基準の提案によって、新たなニーズあるいは未だ満たされていない既存の潜在ニーズを発掘することを視野に入れなければならないだろう。

システム仕様

顧客価値を読み解いてミッションを設定し、市場・競合分析の結果に基づいて事業戦略が策定できたら、それらに適した「自立的に持続可能な」システム仕様（機体、地上、サービス）を設定する。シ

システム仕様には、特にホスピタリティ向上と人材育成の観点から、研究、開発、運用、サービスに関わる人々の新しい活動形態を含める。

新しい利用方法／新しい技術の開発

システム仕様を実現するための適用技術の検討を行う。核となるのは、既存技術の新しい活用方法の開発及び顧客価値を高めるための新しい技術の開発である。これまでに JAXA で行われてきた低コスト化研究の成果⁶⁻¹³⁾はもちろん、開発中の輸送系^{7),14),15)}などに適用される技術や研究中の将来技術^{6),7)}の中から、システム仕様の実現に適するものを幅広く取り込む。そして、システム仕様をミッションと事業戦略に対して“最適化”するとともに開発成果の“最大化”を目指す。

4. まとめ

運用中の固体ロケットシステムであるイプシロンロケットの開発は、2013年9月の試験機(初号機)打上げ成功をうけて、次なる近い将来のニーズに柔軟に対応すべく、強化型イプシロン開発へと歩を進めている。

「自立的に持続可能な」固体ロケットシステム将来形態については、宇宙輸送における事業環境の大きな変化に対応すべく、2020年代の市場投入を目指して体系的な概念検討を進めてゆく。

参考文献

- 1) 森田泰弘, 井元隆行, 徳留真一郎, 大塚浩仁: イプシロンロケット試験機の飛行結果の概要: 1Z01: 第57回宇宙科学技術連合講演会: 2013年10月9日.
- 2) イプシロンロケットプロジェクトについて: 宇宙開発委員会推進部会(平成22年第1回)説明資料(付録2): p.3: 平成22年7月12日.
- 3) JAXA 総合技術ロードマップ: 第3期中期計画期間(A改訂): p.23: 2014年1月(内部資料).
- 4) 徳留真一郎, 齊藤靖博, 山本高行, 中谷幸司, 岩田直子, 岡田修平, 羽生宏人: イプシロン最終形態(進化型イプシロン)の開発構想: 1S09: 第58回宇宙科学技術連合講演会(長崎): 2014年11月12日.
- 5) 宇宙基本計画工程表(平成27年度改訂), 平成27年12月8日宇宙開発戦略本部決定.
http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy27/kaitei_fy27.pdf
- 6) Tokudome, S., Habu, H., Ui, K., Shimizu, F., Morita, Y., Nakano, N., Yachi, Y., Sano, N., and Tanno, H.: Propulsion Systems for Epsilon Launch Vehicle and Their Future Prospects, ISTS 2011-g-03, The 28th International Symposium on Space Science and Technology, Okinawa, June 5-12, 2011.
- 7) Habu, H., Tokudome, S., Goto, K., and Sato, E.: Activities of a Working Group for Experimental Study on Advanced Solid Rocket System (in Japanese),

S4-01, Eleventh Space Science Symposium, ISAS/JAXA, Sagami-hara, 2011.

<http://ae86.eng.isas.jaxa.jp/sss11/> (in Japanese)

- 8) Sasada, T., Hamaya, A., Hayashi, N., and Uchida, T.: Study of Onboard Network System for Launch Vehicle -System Design-, 1S10, 58th Conference on Space Science and Technology, Nagasaki, Nov. 2014 (in Japanese).
- 9) Ikaida, H., Ui, K., Nakagawa, K., Terashima, K., Kamita, T., Nishio, S., and Kitai, Y.: New Technologies in Structural System for the Evolved Epsilon Launch Vehicle, 1S12, 58th Conference on Space Science and Technology, Nagasaki, Nov. 2014 (in Japanese).
- 10) Kitagawa, K., Tokudome, S., Wada, E., Habu, H., Hori, K., Ui, K., Kagawa, H., Shida, M., Azuma, N., Tanno, H., Nakano, N., Tate, I., Yamada, K.: Development Status of Propulsion Systems for the Enhanced Epsilon Launch Vehicle, 1S03, 58th Conference on Space Science and Technology, Nagasaki, Nov. 2014 (in Japanese).
- 11) Kimura, N., Sato, A., Minato, M., Yamaguchi, H., and Sato, E.: Application of Nondestructive Inspection by Ultrasonic to Epsilon's Upper Stage Motors, 1Z13, 57th Conference on Space Science and Technology, Yonago, Oct. 2013 (in Japanese).
- 12) Tsutsui, A., Miyagawa, K., Ishibashi, H., Kobori, T., and Hoshino, T.: Development Status of Unilaminar Case Insulator for Solid Motors, 1Z12, 57th Conference on Space Science and Technology, Yonago, Oct. 2013 (in Japanese).
- 13) Goto, K., Toshima, H., Tokudome, S., Yagishita, T., Suzuki, N., Ootani, A., Arikawa, S., and Yoneyama, S.: Study of CFRP Materials Applied to Lightweight and Low Cost Nozzle Liner of Solid Motors, 1Z14, 57th Conference on Space Science and Technology, Yonago, Oct. 2013 (in Japanese).
- 14) Nishihira, S., Mori, S., Saito, A., Arita, M., Okada, M., Sato, A., Kamiya, T., and Niitsu, M.: Purpose and Significance of Next Flagship Launch System, H-X, and Overview of its System of Systems, 2S01, 58th Conference on Space Science and Technology, Nagasaki, Nov. 2014 (in Japanese).
- 15) 竹内伸介, 徳留真一郎, 峯杉賢治, 北川幸樹: イプシロン4段用キックステージの開発とそのSLIMへの応用: 2D11: 第59回宇宙科学技術連合講演会(鹿児島): 2015年10月8日.