

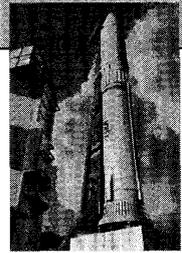
特集 イプシロンロケットの開発 第1回

イプシロンロケットの開発構想*1

森田泰弘*2・井元隆行*3・徳留真一郎*4・大塚浩仁*5

イプシロンロケットの目的は、小型衛星に対して即応性豊かな打ち上げシステム、すなわち自在性と機動性に富みユーザーフレンドリな輸送手段を構築、宇宙への敷居を下げ宇宙科学や宇宙利用の裾野を拡大することにある。一方、これを輸送系の視点で見ると、打ち上げシステムの革新というひと言に尽きる。すなわち、今後のロケット開発にあたっては、射場設備と運用はもとより、製造プロセスから搭載系に至るまで、およそロケットの打ち上げに必要な設備や運用をとことんコンパクトで身軽なものにしていこう、それが未来への扉を開く鍵であるという理念である。イプシロンロケットでは、このような壮大なビジョンを実現する第一歩として、ロケットのインテリジェント化やモバイル管制などの超革新技術を開拓、これを世界に先駆けて実証するために、初号機を2013年度に打ち上げる計画である。

Key Words: Epsilon Launch Vehicle, Rocket Science, Solid Fuel Rocket, Responsive Launch



1. はじめに

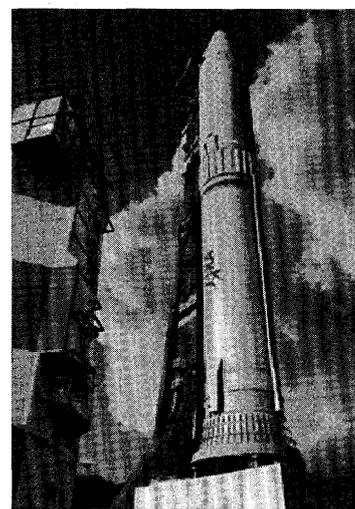
イプシロンロケットは、糸川英夫博士らによるペンシルロケット実験以来一貫して国産技術により着実な発展を積み重ねてきた我が国の固体ロケットシリーズの最新鋭機である(第1図)¹⁾。初号機は平成25年度に小型惑星望遠鏡衛星SPRINT-Aをのせて内之浦宇宙空間観測所から晴れて打ち上げの予定である。我が国の固体ロケット研究は、ラムダロケットによる我が国初の人工衛星の打ち上げ成功を皮切りに、M-3S-IIロケットによる月惑星探査ミッションの実現やM-Vロケットによる小惑星探査機「はやぶさ」の惑星軌道への投入に至るまで輝かしい成果をもたらしてきた。イプシロンロケットは、これまでの慣性をさらに超えて、「未来につながるロケット開発」をスローガンに、革新技術の開拓を進めているところである。以下では、イプシロンロケットの魅力を明らかにしつつ、その発展構想について示す。

2. イプシロンロケットの目的と開発構想

イプシロンロケットの目的の一つは、ユーザーの視点であり、急成長中の小型衛星コミュニティに対して効率的輸送手段を提供することである。イプシロンロケットでは今後見込まれる小型衛星需要の分析に基づき、打ち上げ能

力を低軌道換算で1.2トンに設定、射場での打ち上げ準備期間を約1週間にまで短縮する計画である。当面のペイロードとしては500kgクラスの科学ミッションや地球観測ミッションが中心になると考えているが、イプシロンロケットでは、軌道投入精度と軌道計画の柔軟性向上のために小型液体推進系を搭載した速度調整ステージ(PBS: Post-Boost Stage)をオプションで装備しており、多様なミッションへの対応が可能である。なお、JAXAではイプシロンロケットとセットで小型衛星用標準バスを構築しているところである。これは、小型で高効率なイプシロンと同様の性質をもつ小型衛星バスとの組み合わせによって、小型衛星ミッションを加速的に推進しようというビジョンに基づくものである。

イプシロンロケットのもう一つの目的は、輸送系の視点であり、未来につながる宇宙輸送技術の開拓である。ロケ



第1図 ランチャー上のイプシロンロケット(想像図)

*1) © 2011 日本航空宇宙学会

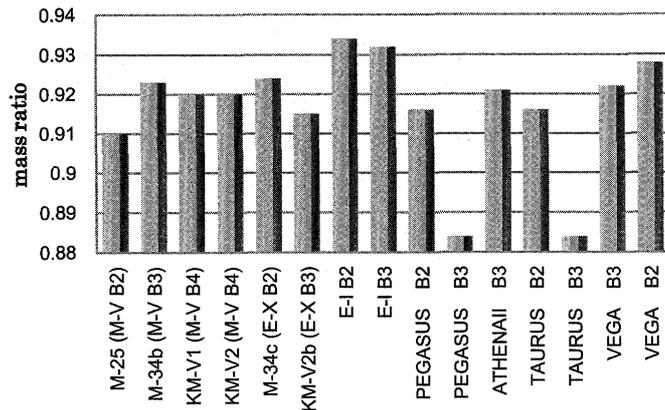
平成23年6月1日原稿受理 Development of Epsilon Launch Vehicle and Its Evolution

*2) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙航行システム研究系 Yasuhiro MORITA

*3) 宇宙航空研究開発機構 イプシロンロケットプロジェクトチーム Takayuki IMOTO

*4) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙輸送工学研究系 Shin-ichiro TOKUDOME

*5) 株式会社 IHI エアロスペース ロケット技術部 ロケット技術室 Hirohito OHTSUKA



第4図 イプシロンロケットと世界の上段ロケットの質量比

程などを削減，製造プロセスの効率化を目指す。これは，コンポーネント単体で，高性能化と低コスト化を同時に実現するという観点で，極めて重要な取り組みである。なお，イプシロン第2段階開発としてモータケースのさらなる低コスト化（軽量化プラン）がインシュレーションの単層化などとして既に定義済みであり，第2段階開発完了後の機体（E1形態）の性能（質量比）は，文字通り世界一となる見通しである（第4図）。現在までに，サブサイズ（φ300）モデルによる耐圧破壊試験によってモータケースの強度データを取得，実現性の目途を得ているところである。こうした取り組みは，上段ステージがロケット全体の性能や利便性の鍵を握るとの発想に則った戦略である。

3.2 イプシロンの革新コンセプト

3.2.1 ロケット管制の改革 イプシロンロケットの目的を要約すると，ロケットを打つ仕組みを簡単にして，みんなの宇宙への敷居を下げようということである。このため，イプシロンロケットの開発ではこれまでの慣性を超えて様々な新しい取り組みを進めている。その中でも特筆すべきは，打ち上げシステムの改革であろう。イプシロンでは，ロケットと地上支援系の一部を知能化して点検作業を自律化³⁾，ロケットの管制室を埋め尽くしている大量の管制装置類や点検装置の機能を搭載点検装置（ROSE: Responsive Operation Support Equipment）とモバイル管制装置（MLSC: Mobile Launch Control System）に置き換えようとしている。後者は，汎用のPC程度の規模である。自律点検のもつ意義には二つある。まず，地上設備をモバイルできるくらいコンパクトにして省人化を図るとともに，汎用PCを用いることによってメンテナンスの負担を軽減しようということである。もう一つは，点検のためのセットアップ作業を省略し，運用性の各段の向上（作業時間の短縮）を図ることである。現行のロケットの射場作業の分析によれば，特に点火系の点検などでセットアップに多大な時間を費やしていることから，極めて効果的なアプローチと言えよう。これらにより，イプシロンロケットの射場作業は，第1段ロケットを発射台に立ててからわずか1週間である。なお，M-Vロケットの場合では平均42日間（休日を除く）であった（休日を含めると47日間）。



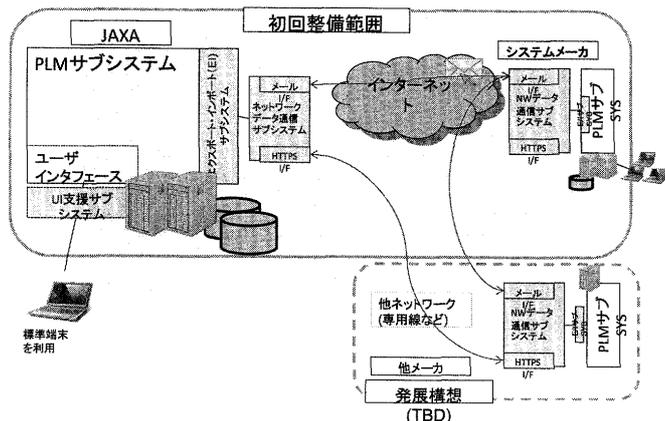
第5図 モバイル管制システムの試作試験

また，作業の効率化を進めることにより，レイトアクセス性についても世界最高レベル（3時間以下）を達成する構想である。

一方，ロケットの点検で最も熟練の知識と経験を要するのは，可動ノズルや姿勢制御バルブの駆動電流の波形の診断である。このような高度の技術判断の自律化のために，イプシロンでは，医療分野でも応用が進められているマハラノビス・タグチ・メソッド（MT法）という手法を用いている。これは，「正常なものはどれも同じように平凡である（均一である）が，異常なものはどれ一つとってもユニークである（不均一である）」という事実に着目したもので，複数のパラメータ間の（正常ならばあるはずの）相関曲面からの距離（マハラノビス距離）をもとに診断を行う。正常ならばあるはずの相関が崩れていれば異常というわけである。このように複数のパラメータ間の相関を考えることにより，パラメータそれぞれの閾値判定によるよりも正確で柔軟な診断が可能となる。既に可動ノズルの波形データを用いたプロトタイプモデルにより，自律診断の有効性は確認済みである（第5図）。今後の開発と運用を通して，自律点検の幅をさらに広げていく計画である。

3.2.2 開発プロセスの情報化 ロケット業界でも初めての試みとして，イプシロンロケットでは，開発効率と設計品質の向上を目的として開発プロセスの情報化を推進している。ロケット開発の一番大きな問題点として，本格的な開発が10年に一度程度の頻度でしか行われないうために，開発プロセスを効率的に進めるためのアプローチを構築しよう，あるいは，体系的に技術情報（知識と経験）を蓄積・継承しようという発想がこれまでは生まれてこなかった。例えば，獲得した技術情報同士の関連付けが限られた少数の上級エンジニアの頭の中になら形成されないため，わずかな設計変更を行うにも，その影響の評価と妥当性の確認に多大の時間を費やしてきた。また，人から人への丁寧な教育を施さない限り，技術情報や，技術情報相互の有機な関係性を伝承し活用することは不可能であった。しかも，ロケット開発は複数メーカーの協働によって行われるが，必要な技術情報の共有においてすら膨大な作業と時間を要していることも開発の非効率化につながっていたと言えよう。

このようなことを背景に，イプシロンロケットでは，



第6図 ロケット開発管理システムの情報化構想

第2表 イプシロンロケットの軌道投入精度

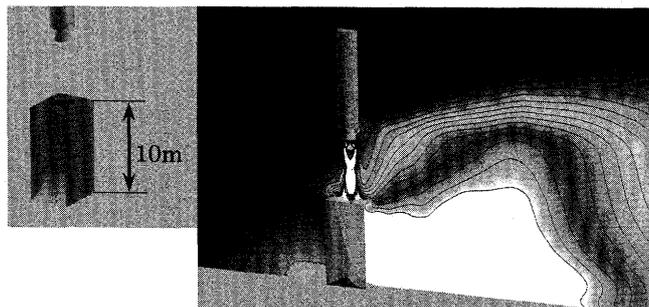
軌道 (SSO@ 高度 500 km)	形態	
	標準	PBS 搭載
近地点高度誤差 (km)	±25	±20
遠地点高度誤差 (km)	±100	±20
軌道傾斜角誤差 (度)	±0.6	±0.2

ユーザが容易に参画できるよう汎用の情報化技術をうまく組み合わせた情報システムを構築し、開発プロセスの効率化を図っているところである (第6図)。すなわち、開発を進めながら技術情報 (知識と経験) と技術情報相互の関連付けを体系的に蓄積することを可能とする。また、複数メカ間の情報の共有として、業界標準データインタフェースである PLM (Product Lifecycle Management) Service を採用し、各社の PLM ソリューションに依存しないオープンな環境で安全に情報共有を可能とする。これらにより、設計作業の高品質化・効率化を図れるばかりでなく承認 (レビュー) 等の作業がオンラインで済み、いわゆるコンカレントな開発環境を実現できる。こうして、イプシロンロケット開発は、従来7~8年要していたロケット開発を3年間に短縮する計画である。このようにして、イプシロンロケット開発では、我が国が誇る工業技術とそれが拓く夢を膨らませていきたいと考えている。

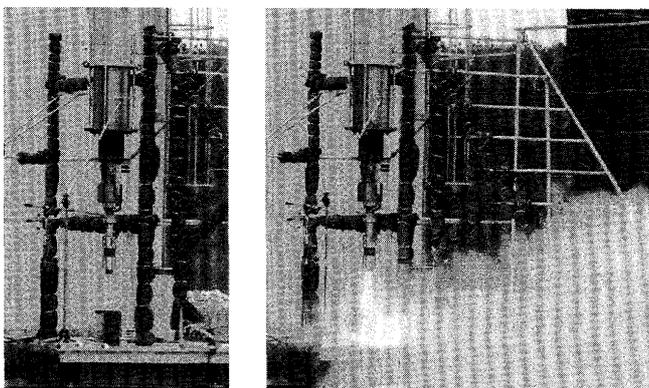
3.3 ユーザにとっての使いやすさの向上

3.3.1 軌道投入精度と軌道計画の柔軟性

イプシロンロケット開発では、ユーザにとっての利便性という概念を重要なポイントと考えている。例えば、軌道投入精度と軌道計画の柔軟性を向上させるために、第3段上部に小型液体推進系を搭載した速度調整機能 (PBS) をオプションで搭載することを可能とする設計である⁴⁾。これにより液体ロケット並みの軌道投入精度を実現できる (第2表) とともに多様なミッション要求に柔軟に対応することが可能である。液体推進系と言っても、規模は M-V ロケットの姿勢制御用小型エンジン程度のものであり、当座はヒドラジン燃料とするにしても、タンクはカートリッジ方式 (製造工場での燃料を充填し、その後はパイロ弁で封印) とするため、簡単簡素なイプシロンロケットの射場の運用には影



第7図 イプシロンロケットの射点設計 (音響環境の緩和と CFD 解析)

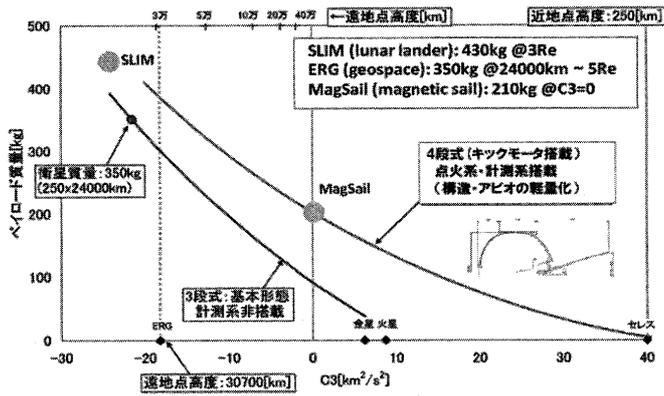


第8図 模擬射点を用いた音響環境計測試験

響しない構想である。

3.3.2 機械環境の緩和 イプシロンロケットでは、第1段モータ (SRB-A) の燃焼振動に起因する正弦波振動がペイロードに及ぼす影響を許容範囲に抑えるために、制振機構を新規に開発している。制振機構は、適切に機軸方向の剛性を下げつつ横方向の剛性は維持する必要があるが、可動ノズル用フレキシブルジョイントとして実績のある技術を応用して、2重円筒構造を積層ゴムで結合する方式を採用、剛性要求を満足する機構の開発を進めている。現在、制振機能を担う弾性体の要素試験および機構の成立性確認のためのサブサイズ試験を進めているところである。

一方、大型の固体ロケットではリフトオフ時の音響環境の緩和が大きな課題となる。ロケット打ち上げ時の音響環境については、世界的にもこれまで NASA SP-8072 に基づき予測されてきた。しかし、これは膨大な試験データをもとに単に実験式を与えているに過ぎず、火炎偏向板や煙道といった射点周りの局所形状を考慮することはできない。このようなことを背景に、イプシロンロケットでは世界でもまれな取り組みとして、数値流体力学 (CFD) 技術を活用して 100 Hz 程度までの周波数領域において高精度の予測を可能とするとともに、NASA SP-8072 が与える実験式の高精度化も行って、高周波領域での予測精度も向上させている。現在、液体ロケットレベル並みの外部音響環境の実現を視野に入れて CFD 解析を実施 (第7図)、低騒音射点の設計を進めているところである。なお、これらの取り組みを踏まえた音響環境の確認と条件設定のため



第9図 高エネルギー軌道への打ち上げ能力

第3表 飛行安全の段階的自律化構想

実証時期	形態	
	半自律 第1段階	完全自律 第2段階
地上系		
追跡レーダ	-	-
コマンドアンテナ	○	-
飛行安全計算機	○	-
テレメータアンテナ	○	○
搭載系		
航法センサ	○	○
テレメータ送信機	○	○
コマンドデコーダ	○	-
CPU	-	○

○:要, -:不要.

に、小型モータを用いた地上燃焼試験を実施し、得られた実測データを活用している (第8図)。

3.4 月惑星探査と高エネルギーミッション 我が国の固体ロケット研究は、我が国初の惑星空間探査機「さきがけ」(1985)、我が国初の月探査機「ひてん」(1990)、そして世界初の小惑星探査機「はやぶさ」(2003) など、我が国の月惑星探査の発展にも大きく貢献してきた。小型衛星打ち上げ用に計画されているイプシロンロケットであるが、衛星同様に探査機も小型化を進めている中で、月惑星ミッションに挑戦することも自然な発想である。M-Vロケットでは、高エネルギーミッション (長楕円軌道:「はるか」、月遷移軌道:「のぞみ」、惑星軌道:「はやぶさ」) に対応するために、ミッションごとに4段ロケットに相当するキックモータを開発してきた。イプシロンロケットにおいても、高エネルギーミッションへの対応策の一つとして、推進薬質量 700 kg 程度の超小型キックモータにより打ち上げ能力は格段に向上、惑星探査も十分に視野に入ってくる事が示されている (第9図)⁵⁾。なお、後述するポストイプシロン計画と連動して、小型軽量化等による能力向上についても検討が進められていることを特記しておきたい。

4. ポストイプシロン開発

これまでに述べたように、イプシロン開発では打ち上げシステムの抜本的改革を最大のテーマに革新技術の開拓を進めているが、このような取り組みは単に固体ロケットの発展だけを目指したのではなく、輸送系全体の長期的ビジョンに沿って戦略的に進めているところである。それはすなわち、ロケットシステムのコンパクト化であり、それが究極の低コスト化につながるという理念である。ここで言うロケットシステムとは、ロケット本体はもとより、ロケット管制やロケット追跡系などを含めた地上設備や運用、そして製造プロセスまでも指している⁶⁻⁹⁾。既に述べた通り、イプシロンロケット開発はキー技術の成熟度に応じて2段階に分けて進める計画であり、これはまたSACでも承認されている。第1段階では開発コストを抑えつつ、自律点検やモバイル管制などの革新技術を早期に

実証、試験機を25年度に打ち上げる。一方、第2段階では、さらなる打ち上げシステムの効率化を目指すとともにアビオ系や構造系などを抜本的に低コスト化、29年度の打ち上げを目指して低コスト版イプシロンを実現しようという構想である。

4.1 ロケット追跡管制のモバイル化 打ち上げ管制のモバイル化の次に当然狙うべきは、ロケット追跡管制のモバイル化である。すなわち、トラッキング・レーダやテレメータ・アンテナからなる追跡管制系をモバイルできるくらい簡素なものにしようということである。これは未来に目を向ければ必ず必要な技術であり、射点や射場によらない打ち上げシステムという考え方は将来の宇宙輸送システムにとって大切である。このような取り組みの中で最もスペクトルの極端領域にあるのが飛行安全の自律化である。これにより高性能のトラッキングレーダは不要となり、テレメータにより最低限の情報をダウンリンクすれば十分である。放送局の中継車くらいのものであればロケットの打ち上げが可能になるというわけである。もちろん、このような革新的な発想には段階的アプローチが必要であろうが、考え方の方向性には間違いはないであろう。第1段階のイプシロンで実現しようとしているロケット点検の自律化にも当初は激しい抵抗があったことを忘れてはならない。地道な研究を続けてやがては実現すべき課題の一つである。いつまでも高性能のレーダがないと打てない、という旧態依然の考え方はできる限り早く卒業したいものである。なお、飛行安全を完全に自律化する前段階として、イプシロン第1段階の運用中において、ロケット搭載の航法センサのデータをダウンリンクすることによりトラッキングレーダを順次廃止していく計画である (第3表)。

4.2 ロケット本体の革新 (低コスト化・高性能化)

4.2.1 アビオニクス改革 既に述べたように、イプシロンロケット (第1段階) では、開発コストを極小化するとの観点で、H2A用のアビオニクスを最大限に活用する方針である。しかし、大型ロケット用に開発された搭載品は高コストであるばかりでなく質量もかさみ、イプシロンの打ち上げ能力に少なからず影響を与えているという現実がある。このため、イプシロンの第2段階のステップ

(高性能低コスト版イプシロン開発)では、搭載系の小型軽量化・低コスト化を緊急の課題と設定している。この新しい世界では、いよいよ民生部品の活用がメインテーマとなろう。最新の部品を使うことにより、コストが下がるばかりでなく、自動的に小型軽量化も図ることが可能であり、要は小さくて軽くて低コストのロケット搭載系を目指そうというわけである。なお、民生部品の活用というのは今に始まった話ではなく、衛星などでも同じ取り組みが進められているのは衆知の通りである。現在 JAXA では民生部品活用のためのガイドラインを策定しつつあるが、大切なのは如何にして製品を保証するかという観点である。これについては、海外で構築されつつある新しい規格の動向も十分念頭に入れて研究を進める計画である。そもそもアビオ系のコストを押し上げている要因の一つに、各種の試験や検査に膨大な手間と時間がかかっているということ挙げることができる。このようなことから、これまで項目ごとに個別に行っていた試験や検査を統合化し、複合環境で行うことも視野に入れて、検査・試験方法の効率化を図ることが必要であろう。同様の観点で、今後はアビオ機能の統合化も推進すべきと考えている。なお、アビオニクス軽量化は、イプシロンロケットの打ち上げ能力の増強に直接につながることはもちろん、高エネルギーミッション用のキックステージの実現や次世代基幹ロケットの上段ステージ用アビオニクスへの発展など、その波及効果が極めて大きいことを特記しておきたい。

4.2.2 構造系の改革 構造系でも抜本的なコスト低減と軽量化を目標に、イプシロン開発と並行して先進的な研究に取り組み、第2段階の開発につなげる構想である。まず、低コスト化研究の前提として、M-V ロケットと H-IIA ロケットのコスト分析を実施した結果、構造系では加工・成形・組立・機装にかかるコスト割合が極めて大きいことが明らかとなっている。このことに着目し、機体構造の CFRP 化、特に周辺インターフェースを含む構造全体のニアネット一体成形化による製造プロセスの改革を研究の軸に据えている。要は、金属部品をボルトナットで留めていく昔ながらの方式を転換、最終形態に近い形を型にはめて一気に加工・成形・組み立ててしまおうというわけである。これにより、構造部品そのものの製造が安価になるばかりでなく、部品点数の大幅な削減やロケット組み立て工程の簡素化など、その波及効果は大きい。加えて、イプシロン第1段階でも既に取り組みを始めているように、脱オートクレーブ化による製造設備の簡易化や成形コストの低減を推進することは言うまでもない。このような製造プロセスに踏み込んだ改革を行うためには、品質要求の在り方や品質保証プロセスを根本から見直すことも必要であろう。例えば、製造コストが大きく低減するのであれば、歩留まりを心配する必要がなくなるため、製品保証は最終段階で一度行えばすむということも考えられよう。なお、このような低コスト化手法は軽量化にもつながることを明記しておきたい。現在、有望な低コスト製造方法を適用した段階構造の試作を継続しているところである。

4.2.3 推進系の改革 推進系改革の展望としては、固体、液体を問わず推進薬のグリーン化が大きなチャレンジの一つである^{10,11)}。ターゲットは、固体ではデブリレスや非塩素化、液体では脱ヒドラジン化であろう。こうした取り組みは、脱特殊材料と言い換えることもできる。まず、宇宙空間での環境問題への対応としてはデブリレスという観点が重要であるが、バインダーとして現行の HTPB の代替として金属フリーである GAP を用いることが一つの解であり、わずかな比推力の低下と引き換えにアルミナの生成を回避できることが理論的に証明されている。地上の環境対策としては、過塩素酸アンモニウム (AP) を代替するための研究が急務となるわけであるが、その方向性の一つとして、いわゆる高エネルギー密度材料 (HEDMs) の研究が次世代推進薬というスローガンの元に積極的に進められているところである。その代表例であるアンモニウムジニトラミド (ADN) は塩素系物質フリーの酸化剤として期待が大きい。理論的には、現行の推進薬より高い比推力が証明されているのも頼もしい。なお、ロール制御用の小型モータなど補助推進系では、性能感度が小さいために硝酸アンモニウム (AN) による非 AP 化が可能である。硝酸アンモニウムは入手性も良好で低コストのため、将来性が高い。

一方、液体燃料であるが、固体ロケットでも姿勢制御用の補助エンジンや速度調整用の上段エンジンとしてヒドラジンを燃料に用いており、無毒化に向けた研究が重要である。脱ヒドラジン化の取り組みとして、エタノールエンジンの研究が積極的に進められていることを付け加えておきたい。なお、イプシロンロケットで推進している製造プロセス改革の一環として、非破壊検査プロセスの低コスト化も今後の展望としては重要である。そのような取り組みの一つとして、高価な X 線検査をより簡便な超音波探傷検査で代替するための研究が進められており、イプシロンの試験機運用段階において漸次適用していく計画である。

5. おわりに

本報告では、宇宙輸送システムの革新という大きなビジョンの中で、イプシロンロケット開発のもつ意義を明らかにするとともに、今後の研究開発の構想について示した。

参考文献

- 1) Morita, Y., Imoto, T. and Ohtsuka, H.: Development of Japan's Next Generation Solid Rocket Launcher—the Epsilon Rocket, 61st Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Prague, Czech Republic, Paper No. IAC-10.D2.1.7, 2010.
- 2) Morita, Y., Imoto, T., Habu, H. and Ohtsuka, H.: Japan's Next Generation Solid Rocket Launcher, 60th Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Daejeon, Republic of Korea, Paper No. IAC-09.D2.1.9, 2009.
- 3) 田村 誠, 井上智也, 森田泰弘, 大塚浩仁, 野原 勝, 加藤弘一郎, 佐賀勝之: 次期固体ロケット自律点検システムの開発, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 論文番号 1B05, 2009.
- 4) Tanaka, K., Otsuka, H., Saito, K., Tamura, T., Ishii, N., Maeda, Y. and Morita, Y.: PBS (Post Boost Stage) Design of the Advanced Solid Rocket, 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Tsukuba, Japan, Paper No.

