

イプシロンロケットの初飛行と今後の展望

森 田 泰 弘

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系
〒252-5210 相模原中央区由野台3-1-1〉
e-mail: morita.yasuhiro@jaxa.jp



いま宇宙開発は大きな時代の転換点に差し掛かっている。これからは「小型・高性能・低コスト」という概念が重要で、打上げの頻度を上げてチャンスを増やすことが宇宙科学の進歩と宇宙開発利用の活性化をもたらす大きな鍵となる。このような新しい時代の幕を開けるべく、イプシロン開発では打上げシステムを革新、ロケットを高頻度に打つ仕組みを構築して宇宙への敷居を下げることを最大の目的としている。昨年9月に打ち上げた試験機では、モバイル管制などの世界をリードする革新コンセプトを実現、宇宙ロケット全体の未来を大きく切り拓いた。ここでは、イプシロンが現在過去未来で目指すものは何か、そしてその一部が試験機でいかに実現されたのかを検証するとともに、今後の発展の方向性を示したい。

1. はじめに

いまようやく宇宙は開発から利用の段階に移ろうとしている。宇宙科学はもちろん、今後の宇宙利用を本格的に活性化するためには自律的な打ち上げ手段をもって頻度を大きく上げていくことが最重要の課題である。頻度が上がれば宇宙利用のすそ野が広がり、その可能性も大きく拡大していくであろう。そのための取り組みの一つが、小型・低コストでチャンスを増やそうという小型衛星コンセプトである。これこそ、これからの宇宙科学の進歩と宇宙工学の発展、そして宇宙利用の促進の鍵を握る概念である。イプシロン試験機で上げた「ひさき」は極端紫外線による惑星観測というように目的をシャープに絞ることによって、世界に胸を張れる観測を行った。このように小さくも夢のあるミッションが可能であって、夢は大きく膨らむというわけである。素晴らしい時代の到来である。

このような新しい時代の幕を開けるために登場

したのがイプシロンである(図1)。イプシロンは新時代にふさわしいロケットとして打上げシステムを革新、ユーザーにとっての使いやすさも含めロケットを効率良く打つ仕組みを構築しようとしている。いうなれば、F1レーシング並みに特殊だった宇宙ロケットを、乗用車並みに身近なシステムに変えようというわけである。このために開発したモバイル管制などの世界をリードする革新コンセプトは、これまでのロケット業界の常識



図1 イプシロン発射の瞬間(内之浦)。

を覆す革命であり、宇宙開発利用の未来を切り拓く切り札の一つである。次の段階では新型基幹ロケットにも応用可能であり、将来の完全再使用ロケットにも不可欠の技術である。イプシロンはまさに「未来への大きな一歩」と言えよう。

イプシロンのもつもう一つのテーマは「伝統と革新」の融合である。イプシロンには固体ロケットに代々受け継がれてきた遺伝子がしっかりと内蔵されている。それは、世界に追い付き追い越せではなく世界の先を行け、われわれの力で未来を変えよう、というフロンティア精神である。伝統に根差しながらも、常に革新を続ける固体ロケット。イプシロンはまさにその最新鋭機と呼ぶにふさわしいロケットに育ってくれたと考えている。もちろん、ロケットは技術だけで打てるわけではない。大事なものは「人機一体」の精神、人とロケットの融合であり、モノづくりを通して、人を育て、人を生かし、技術を人で伝えることが重要である。試験機の成功は、将来を見渡した的確なビジョンとそれを実現する関係者の地道な努力の結果である。まさに、世界をリードするロケットを目指して、チーム一丸となってイプシロン開発を進めてきた開発チームこそが宝と言えよう。

イプシロンの挑戦はまだ始まったばかりである。早くも2号機に向けて、「強化型イプシロン」開発がスタートした。その目的は、当面の小型衛星の需要に柔軟に対応するための能力向上にあるが、技術としては低コスト化につながる形で進めている。これを足掛かりに、本格的惑星探査にも活用できる抜本的高性能・低コストのイプシロン「発展形態」の早期実現を目指して鋭意検討を行っているところである。

2. イプシロン開発の目的と基本戦略

イプシロン開発の目的は、今後の急成長が期待されている小型衛星コミュニティに対して効率が良く使い勝手の良い輸送手段を提供することにある^{1)~3)}。打上げシステムの効率化としては、従

来2カ月近くかかっていた打ち上げ準備期間を1週間程度にまで短縮する計画である（第1段ロケットを発射台に立ててから打ち上げるまでの日数として定常運用段階で達成すべき目標値）。現在、試験機の打ち上げに要した日数や人手から試験機固有の作業を除いた定常運用値を評価中であるが、おおむね計画に準ずる見込みであり、世界最高レベルの運用性に見通しをつけることができた。ユーザーにとっての使いやすさという観点では、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することで、液体ロケット並みの軌道投入精度を実現するとともに軌道計画の柔軟性において多様なミッションに対応することが可能となった。なお、イプシロンロケット試験機では、打上げ能力を低軌道換算で1.2トンに設定しているが、後述するように、2号機以降に適用される強化型イプシロンでは、30%以上の能力向上を図る。

さらに、JAXA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開発し、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を組み合わせることによって、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を構築している。イプシロンロケットと小型衛星標準バスを一体のスペース・ビークルとみなし、衛星ユーザーにこれをセットで提供するという考え方である。従来の衛星ユーザーは衛星全体を開発する必要があったが、極端に言うと、今後はミッション機器さえ開発すれば、他の部分の開発の負荷は相当軽くなる。宇宙への敷居は大幅に下がってきたと言えよう。これからは衛星とロケットがシステムとして強く連携する時代で、世界的にも衛星メーカーとロケットメーカーのコラボレーションが加速していくであろう。

一方、イプシロンの目的を輸送系の視点で見ると、それは未来を拓く宇宙輸送共通技術の革新である^{4)~9)}。ロケット点検の自律化や打上げ管制のモバイル化（図2）など、次世代に向けた斬新な

コンセプトを世界に先駆けて実現したところは胸を張れるポイントであろう。このような革新コンセプトは、わが国が世界に誇る固体ロケットの発展につながることはもちろん、基幹ロケットや世界のロケットにとっても次世代の標準技術となるものである。まさに、日本で誕生して世界に広まる技術革新である。なお、イプシロンでは、点検の自律化などのため、最新の人工知能とIT技術を応用している。また、ロケット業界では初めての取り組みとして、最新のIT技術を駆使して開発プロセスの情報化も推進し、わずか3年という超スピード開発につなげた。このような最先端の工業技術を宇宙ロケットに適用しようというチャレンジは今後の宇宙開発の方向性を定める重要なモデルとなる。すなわち、異分野との融合により宇宙に参加するプレーヤーの裾野を広げていくことが、これからの宇宙開発利用活性化のヒントである。



図2 モバイル管制システム（最前列）。

さて、未来を拓くロケット開発をスローガンとしたイプシロン開発も最初のステップが終わり、今や大切なのはイプシロンをいかに未来につなげていくか、すなわち将来の構想である。当初から、JAXAは試験機開発と並行して先進的研究を進め、抜本的低コストのイプシロン発展形態に移行するという2段階開発構想を打ち出してきた（図3）。第1段階にあたる試験機形態では自律点検やモバイル管制などの革新技術を世界に先駆けて早期に実証、一方、第2段階の発展形態では、抜本的低コスト化を図ろうという戦略である。低コスト化技術とは高性能・低コスト化技術のことであり、低コスト化の取り組みが高性能化を呼ぶ、いわゆる一粒で2度おいしい開発である。現在、高性能・低コスト化を目指した研究を推進しているが、その一部をイプシロン強化型開発として上段ステージに適用、早くも2号機で実証する計画を進めている。これを土台として、イプシロン発展形態の早期開発着手を目指しているが、その打上げ能力とコストの目標については、ユーザーの要望および現在進めている研究の成果も踏まえて、精密に設定すべく鋭意検討を行っているところである。

このように、イプシロン開発の視点で重要なのは、高性能・低コスト、加えて高信頼性というベクトルである。一般に、これらは相反する要求と考えられてきたが、これからはフロンティア精神で新たな展望を開きたい。そのために必要となる発想の転換を分解して、いくつかのチャレンジに

Items	試験機形態 超革新技術の早期実証	発展形態 高性能・低コスト化
打ち上げ能力 コスト	SSO(500km): 450 kg 38億円(運用段階の目標値)	SSO(500km): TBD TBD
革新技術	ロケットの知能化/モバイル管制 ユーザI/Fの向上 (その他は既存技術を最大活用)	本格的低コスト化開発 構造: CFRP一体成型(ガンブラ方式) アビオ: 民生部品(品質保証) ロケット追跡系のモバイル化
開発費	205 億円	TBD
打ち上げ年度/場所	2013夏/ Uchinoura	TBD/ Uchinoura

図3 イプシロンロケットの2段階開発構想。

分けてみよう。まず、これからは異分野のアイデアや他の産業の最先端の技術と融合していくことが大切であり、いわゆる「開かれた宇宙」という発想が大きなテーマとなる。というのも、宇宙開発というと最先端の科学と技術の集大成であり、事実液体ロケットのエンジンや固体ロケットの燃料などはまさしくそのとおりである。しかし、他の部分、例えば電気製品などは、信頼性を優先するあまり、意外にも古い技術に頼って、いわばガラパゴス状態である。こういう部分を革新していかない限り、宇宙ロケットに未来はない。低コスト・高信頼性を目指すイプシロン自慢の自律・自動点検などは、医療の分野や自動車業界では当たり前に近い技術とも言えよう。次のポイントは、脱・特殊材料、脱・特殊部品と言う考え方である。ロケットの値段が高い理由の一つは特殊な材料や部品を多用していることにあり、これを転換していくことが宇宙ロケットの未来につながる。例えば、イプシロン試験機のフェアリングの耐熱には、特殊なC/C材を卒業して工業用の汎用断熱材を活用している。2号機以降の強化型開発ではさらに踏み込んで、固体推進薬の主成分の一つであるバインダーを宇宙用の特殊な樹脂から工業用の汎用品に置き換える計画である。このような考え方を搭載系に当てはめると、いよいよ民生部品の本格活用を視野に入れる必要がある。こうして部品や材料の選択肢を増やすことにより宇宙に参加するプレーヤーの数を増やし、宇宙利用のすそ野を広げていきたい。産業界との連携がこれまで以上に期待される時代になってきたと言える。さて、このような考え方を突き詰めていくと、やがて「製造プロセスの革新」という概念にたどり着く。イプシロン試験機ではこのコンセプト実現の最初の一歩として、フェアリングの円錐部と円筒部をつなぐボルト結合を一体成型とした。強化型開発では、構造のシンプル化をさらに推進するとともに、搭載系の統合化（コンポーネント数削減）とネットワーク化（計装ラインの削

減）などスペクトルも広げていく計画である。これまでは低コスト化の取り組みは研究ではないという錯覚もあったが、設計を変えるような抜本的な低コスト化は高性能・高信頼性にもつながる魅力ある研究である。個別の取り組みについては後述するが、積極的な姿勢で改革を進めていきたい。

3. イプシロンの開発コンセプト

3.1 ロケット・コンフィグレーションの最適化

試験機開発の拘束条件は、自律点検やモバイル管制などの革新技術を世界に先駆けて早期に実現するために、開発費と開発期間を最小に抑えることにある。すなわち、可能な限り既存の技術を有効活用する方針である。このために、第1段ロケットにはSRB-A（H2Aロケットの補助ブースター）を流用、上段ステージにはM-Vロケットのモーターを改良して用いている。また、搭載の電気系についても、自律点検などの最新機器類は別として、誘導制御系や通信系などの汎用部分ではH2A機器を流用した。

イプシロンロケットは全段固体の3段式ロケットである（表1）。一般に、上段ステージ（第2段

表1 イプシロンロケット（試験機）の主な緒元。

項目	諸元
機体構成	3段式固体ロケット (PBSオプション搭載可)
全長/直径	約24 m/2.5 m
全備重量	約92 ton
軌道投入能力	LEO (250×500 km): 1.2 ton SSO (500 km): 450 kg
運用コスト	約38億円（運用段階における目標値）
未来を拓く	自律点検機能搭載
次世代革新技術	モバイル管制
開発費	209億円
打上げ年度	2013年9月
打上げ射場	内之浦宇宙空間観測所（USC）

ロケットと第3段ロケット)は、製造コストに比して能力感度が著しく高い。こういうところはまさに小さな固体ロケットにとっては生命線であり、性能劣化は許されない。M-Vロケットの真価もまさにここにあつて、全段固体で「はやぶさ」のような小惑星探査機を打つことができたのも、世界最高レベルの上段モーターがあつたからこそと言える。このようなキーの部分では、M-Vロケットで確立した高性能の上段モーターをさらに改良して活用し、第1段ステージにSRB-Aを使って能力的には損した部分を十分に補っている。イプシロンの第2段と第3段モーターは、それぞれM-Vロケットの第3段モーター、および「はやぶさ」用キックモーターとほぼ同一仕様であるが、CFRPフィラメントワインディング製モーターケースについては、材料と製造方法を一新した新規開発となっている。すなわち、最先端の高比強度繊維を採用してさらなる軽量化を図るとともに、製造方法としてオープンキュア（無加圧キュア）成形を採用することで、従来のオートクレーブ（加圧キュア）成形と比較して製造プロセスの格段の効率化を果たした。前述のとおり、イプシロン発展形態に向けて製造プロセスの改革を本格的に推進しようと計画しており、これはその先行実証の一例と考えることができる。

ペイロードフェアリングはM-VともH2A/Bとも異なる新規設計であり、イプシロン発展形態につながる二つの新しいコンセプトを内蔵している。既に触れたように、一つは全体構造の一体成型化による製造プロセスのシンプル化（部品点数の削減）であり、もう一つは、断熱材として汎用のウレタンフォーム材を活用した脱特殊材料化の試みである。このように、身近な材料や部品でロケットを簡単に作っていくという概念が、今後ますます重要になってくると考えている。

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（非常識への挑戦）

次世代を担う新しい宇宙輸送システムとして、イプシロン開発ではこれまでの慣性を超えてさまざまな新しい取り組みを進めてきた。その中でも代表選手は、打上げシステムの改革である。イプシロンでは人工知能技術の活用により点検作業を自律化¹⁰⁾、ロケットの管制室を埋め尽くしてきた大量の管制装置や点検装置の機能を搭載点検装置（Responsive Operation Support Equipment; ROSE）と地上の管制装置2台（Launch Control System; LSC）に集約した。これまでのロケットを打ち上げる仕組みは重厚長大で、数十台の装置と100人規模の人手を要してきた。この仕組みは、基本的にはアポロの時代から変わらぬ愛すべき伝統工芸であり、アポロ方式と呼んでもよい。一方、イプシロンではこれを一新し、パソコンわずか2台からなる管制装置と8人規模による運用を可能にした（次号機以降、さらに少人化を進める計画である）。まさに、ロケット管制の桁が変わる革命である。こうしたな夢のような打上げシステムを「モバイル管制」と呼び、まさに世界のロケット業界の常識を覆すイプシロン方式の誕生と言える。

自律機能の中核部はROSEと呼ばれる新規開発の搭載装置である。その中核的機能は機体のデータを一括して収集して管理することにあるが、主なアプリケーション機能としては三つある。まず最も基本的な機能は、機体のデータを地上に送るためのネットワークHUBとしての機能である。これによりイプシロンはイーサネットケーブル1本で地上と接続可能となった。言い換えると、世界でも初めてロケットが情報端末化したということである。二つ目は、自動で管制手順を実行して機体を点検し打ち上げ、必要に応じてシーケンスに緊急停止をかけるという管制機能である。これにより発射管制を完全に自動化することが可能となった。すなわち、大きな管制室の機能が事実上

ROSE一つに集約されたのである。なお、イプシロン試験機では、開発の過程の打ち上げという性格上、ROSEの自動管制機能（アプリケーション）を地上のモバイル管制装置に移植して自動管制を行った。運用号機では、ROSEのみで行うことも可能である。三つ目は、高級エンジニアに代わって動的アナログデータを自律的に診断する機能である。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などである。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。この手法は、熟練のエンジニアの経験をルールとして抽出し、点検結果をデータベースと照合することにより診断を行うというもので、データの蓄積が知能の進化につながるというシステムである。現時点では試験運用の段階であるが、2号機以降の製造を通して（号機を重ねるにつれて）データベースを蓄積し（知能を増して）、定常号機での本格運用につなげていく計画である。

このような非常識に挑戦するフロンティア精神は固体ロケットの伝統であり、一番大切な遺伝子とも言うべきものである。事実、固体ロケットはペンシルの時代から常に非常識なことに挑戦し、世界が無理だと言ったことを次々とやり遂げて発展してきた。ペンシルロケットの水平発射はレーダ技術なしにロケットは打てないという当時の世界の常識を覆すものであった。また、ラムダロケットによるわが国初の人工衛星「おおすみ」の打ち上げは、誘導制御技術なしに人工衛星は打てないという世界の常識を破る偉業であった。そして、M-Vロケットによる世界初の小惑星探査機はやぶさの惑星軌道への投入は、小さな固体ロケットで小惑星探査などできないという世界の常識に挑戦するものであった。その集大成が、イプシロンの非常識な挑戦としてのモバイル管制である。

このような「チャレンジ精神」は、小さな固体ロケットにとっては生命と同じである。というのも、欧米諸国に比べて人的リソースも予算も桁違いに少ない中で、諸外国と同じことをやっているは得られる成果は目に見えないだろう。失敗を恐れないチャレンジ精神こそが、活路を開くのである。

3.2.2 開発の効率化（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かったために、開発プロセスを効率的に進めるためのアプローチの構築や体系的技術情報（知識と経験）の蓄積・継承という発想がこれまではなかったことを挙げねばならない。このようなことを背景に、イプシロンロケットでは汎用の情報化技術をインテグレートして情報システム（MIDLEE）を構築、開発プロセスの効率化を図っている。ロケット開発を進めながら技術情報および技術情報相互の関連付けを体系的に蓄積することが可能となり、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）など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が整った。こうして、イプシロンロケット開発は、従来7～8年要していた固体ロケット開発を3年間に短縮することに成功した。今後とも、ロケット開発とわが国が誇る工業技術の融合を推進したい。

3.3 ユーザにとっての使いやすさの強化

3.3.1 軌道投入精度と軌道計画の柔軟性の向上

イプシロン開発では、宇宙への敷居を下げるなどの観点から、ユーザーにとっての利便性という概念を重要なポイントとして位置づけている。このため、軌道投入精度と軌道計画の柔軟性を向上させる目的で、第4段ステージとして小型液体推進系を搭載した速度調整機能（PBS）をオプションで装備した¹¹⁾。これにより液体ロケット並みの軌

表2 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

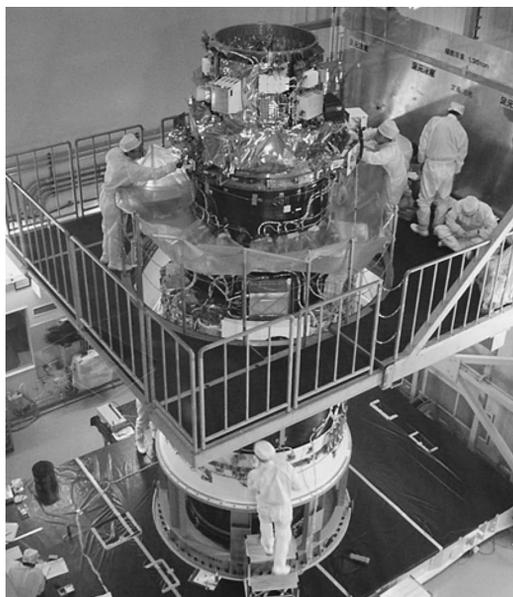


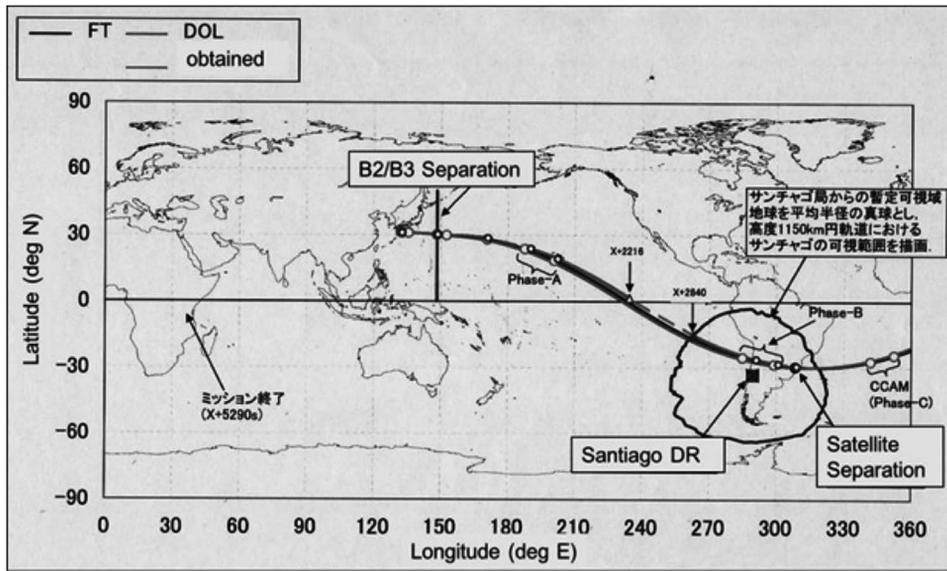
図4 上段ステージの組立て(内之浦).
作業床上で半分より上の部分がPBS.

道投入精度を実現する(表2)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となった。液体推進系といっても、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、当座はヒドラジンを燃料とするにしても、タンクはカートリッジ方式(製造工場に燃料を充填し、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響しない仕組みである。このように、必ずしも固体にこだわらず、柔軟な発想で良いロケットを作っていきたいと考えている。なお、試験機はPBSを搭載したオプション形態(図4)で飛行、衛星分離時の軌道投入精度は誤差数キロ以内という、

予想を上回る極めて高いものであった(図5)。

3.3.2 機械環境レベルの緩和 イプシロンロケットでは、第1段モータ(SRB-A)の燃焼振動(50 Hz近傍)によって誘起される正弦波振動がペイロードに及ぼす影響を低減するために、振動抑制機構を新規に開発した。これは機軸方向の剛性を下げることにより高周波の振動を遮断するものであるが、可動ノズル用フレキシブルジョイントとしてこれまでのロケット開発で実績のある技術を応用した。具体的には、二重円筒構造を積層ゴムで結合する方式を採用して、これを衛星継手(PAF)の一部として機体に装着したものである。実際に得られた飛行データは、小型衛星の正弦波振動環境条件としては世界最高レベルであり、衛星インターフェイス条件を十分に満足するものであった。なお、この制振機構(PAF)の搭載により、機体の弾性振動と姿勢制御との連成の度合いがM-Vロケットより大きくなっているが、M-V用に開発した H_{∞} 制御論理をベースとして、これを改良することにより解を得ている¹²⁾⁻¹⁴⁾。

一方、固体ロケットは小型ながら推力が大きいことが飛行計画上のメリットであるが、その引き換えに、リフトオフ時の音響環境の緩和が大きなチャレンジとなる。ロケット打上げ時の音響レベルについては、世界的にもこれまでNASAの技術資料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安全側の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。事実、これを用いると、地中に50 m近くものトンネルを掘らねばならないことになり、現実的な解につながらない。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初めての取り組みとして、数値流体力学(CFD)技術を活用して発射台近傍の詳細な形状設計を行い、小型の燃焼試験で検証するという作戦をとった。具体的には、シュラウドリング(発射支持台)の位置を12 mかさ上げするとともに、この下部に地面に接する



近地点高度誤差: 3.2 km
 遠地点高度誤差: 6.8 km
 軌道傾斜角誤差: 0.02 ° 以下

図5 イプシロン試験機の飛行軌道。
 FT: 計画軌道, DOL: 発射時の目標軌道, DR: 通信局。



図6 イプシロンロケットと発射台(内之浦).
 イプシロン直下の構造物の上端がシュラウドリング。

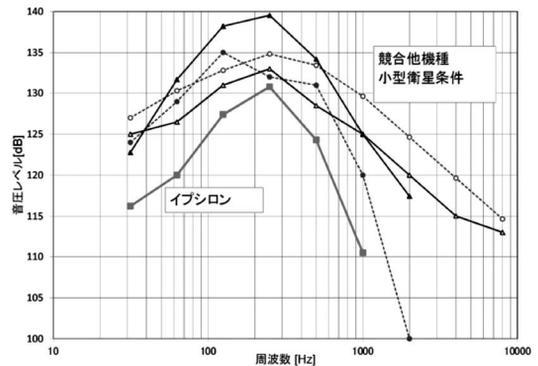


図7 イプシロン試験機の音響レベル(実測値)。

程度の規模の煙道を設置して音響レベルの低減を図ったものである(図6)。これらの工夫が大いに功を奏し、イプシロン試験機の音響環境は、大型の液体ロケットを含めても世界で最も静粛と言えるレベルであった(図7)。

4. イプシロンの発展構想と段階的実証計画

イプシロン開発では、打上げシステムの改革を最大のテーマとして革新技術の開拓を進めている。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、輸送系全体の未来を牽引するという明確な意図をもっている。そ

表3 強化型イプシロンの主な緒元.

項目	諸元
機体構成	3段式強化型形態 (PBSオプション搭載可)
全長/直径	約26 m/2.5 m
全備重量	約95 ton
軌道投入能力	長楕円 (200 km×31100 km): 365 kg (TBD) SSO (500 km): 600 kg (TBD)
運用コスト	TBD億円 (運用段階における 目標値)
未来を拓く	高性能・低コスト化技術
次世代革新技術	CFRP一体構造・低コストモータ 追跡系の革新 (実証段階)
開発費	51.5億円
打上げ年度	2016年度 (TBD)
打上げ射場	内之浦宇宙空間観測所 (USC)

それはすなわち、打上げシステムの究極の効率化であり、それが抜本的な低コスト化につながるという理念である。ここでいう打上げシステムとは、ロケット本体はもとより、打上げ管制や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をも指している¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。このようなビジョンに沿って、高性能・低コスト化技術の一部を強化型イプシロン開発として2号機以降に適用、小型科学衛星や小型利用衛星の当面の打ち上げ需要に柔軟に対応する計画を設定している。そのスコープは、上段ステージにほぼ特化しているが、30%程度の能力向上を見込んでいるところである (表3)。

4.1 ロケット追跡管制のモバイル化

イプシロン試験機により打上げ管制のモバイル化を実現した今、次に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シンプルかつコンパクトなものにしようということである。ここまで打

表4 飛行安全の段階的自律化構想.

項目	形態	
	半自律	完全自律
機体形態 (目標時期)	強化型形態 (TBD)	発展形態 (TBD)
地上系		
追跡レーダ	—	—
コマンド・計算機	○	—
搭載系		
航法センサ	○	○
コマンドデコーダ	○	—
CPU	—	○

(注) ○: 要, —: 不要.

上げシステムが効率化できれば、打上げ射場には発射台と組立スペースさえあればよい。これは未来への必修科目であり、射点や射場によらない打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極めて大切である。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レーダと地上の計算機は不要となり、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。飛行安全を完全に自律化する前段階として、ロケットに搭載する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廃止することが可能であり (表4)、イプシロン2号機搭載の実証ミッション (通称RINA) として計画を進めているところである。

4.2 搭載系の革新 (小型・軽量・低コスト化)

4.2.1 搭載電子機器の改革 イプシロン試験機では、開発コストを極小化するとの観点でH2A用の電子機器を流用しているが、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、イプシロンの打上げ能力に大きな影響を与えている。このため、高性能・低コストのイプシロン発展形態に向けて、搭載系の小型・軽量・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る。要は、わが国が最も得意とする小型・低コスト技術のロケット搭載系への応用である。このような取り組みは今に始まった話ではなく、衛星などでもすでに進められているのは衆知のとおりである。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、大切なのはいかにして品質を保証するかという観点である。そもそも電子機器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がある。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して複合環境で行うことにより、検査・試験の集約化を図りたいと考えている。同様の視点であるが、今後は部品点数の削減が低コスト化と信頼性の向上にとって重要なテーマであり、電子機器としては、統合化（コンポーネント数の削減）とネットワーク化（計装ラインの削減）が特に推進すべき課題である。電子機器の軽量化は、イプシロンロケットの打上げ能力の増強に直接につなが

ることはもちろん、新型基幹ロケットの上段ステージ用電子機器への活用など、その波及効果は極めて大きいと言えよう。

イプシロン2号機（強化型イプシロン）で実証する高性能・低コスト化技術として、電子機器では電力分配器の小型軽量化を考えている。固体ロケットには点火項目がたくさんあり多数のリレーが搭載されているが、現在はすべて機械式リレーになっているために、電力分配器は弁当箱を通り越してミカン箱くらいの大きさになってしまっている。これを半導体リレーに換装することによって、小型軽量化を実現する計画である（図8）。なお、産学官の連携で、搭載電子機器の次世代化の一環として機内通信のフライバイ・ワイヤレス化についての研究を鋭意進めており、これを点火器に適用した無線着火システムの試作試験が既に終了している¹⁹⁾。今後の実機への適用としては、まずは計装のかさばる点火系や段間の結合部をワイヤレス化する方針で進めていく計画である。

4.2.2 構造系の改革 構造系でも先進的研究を進め、抜本的低コスト化と軽量化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、構造系では製造と組み立て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一体成型化、特に周辺インターフェイスを含む構造全体のニアネット成形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、できあがりの形を型にはめて一気に成形してしまおうというわけである。これにより、部品点数の大幅な削減による信頼性の向上やロケット組み立て工程の簡素化によるコストダウンなど、その効果は極めて大きい。加えて、イプシロン試験機でもすで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

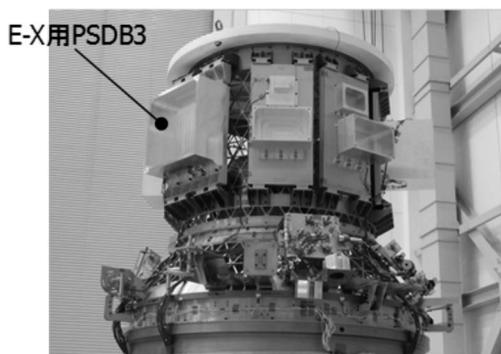


図8 電力分配器搭載リレーの半導体化。

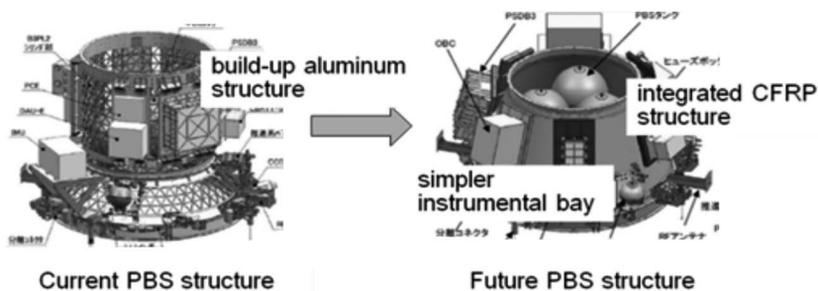


図9 イプシロン上段構造のCFRP一体成型化。
アルミのグリッド構造全体をCFRPの一体構造に変更。

あ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。また、このような低コスト化手法は軽量化（高性能化）にもつながることは明らかである。なお、イプシロン発展形態で実証する高性能・低コスト化技術として、構造系では上段ステージの機器搭載構造（オプション形態ではPBS構造に相当）をCFRP一体成型化する方向で検討を進めている（図9）。

4.3 推進系の改革

高性能・低コスト化を目指した推進系開発においては、ステージモーターのさらなる改良プランを設定している。例えば、現行の3層インシュレーションの単層化や発泡樹脂によるノズルの軽量化などである。このうち、インシュレーションの単層化については、イプシロン2号機（強化型イプシロン）で実証する計画である。このような直近の取り組みを超えて、われわれが目指す究極の改革は重厚長大で非効率な現行の製造プロセスの革新である。そのころは、製造方法を根本から変えることにより、製造設備を小型化・高頻度化するとともに製造プロセスの省人化を図ろうということである。このようなコンセプトはこれまであまり声高には叫ばれてこなかった。それは製造プロセスの効率化が利益の減少をもたらすとの錯覚があったからである。しかし、未来のロケットの真価はコストを下げて機数を増やすというビジョンにこそある。やがてはロケットの打ち上げが航空機くらい日常の風景にならないと駄目であ

る。現在、産学官の連携により、低融点推進薬（LTP）という新たな推進薬の研究を進めているところであるが²⁰⁾、これは従来とは全く逆転の発想で生まれたものである。これまでの推進薬は非可逆の熱硬化樹脂をベースとしているために、製造プロセスは大型のバッチ方式となり効率が悪かった。反対に、この新しい推進薬は可逆の熱可塑性樹脂を用いるので、板チョコの生産のように小型のミキサーによる連続生産と保管が可能になる。このようにして、製造設備の小型化と製造プロセスの効率化を図ることができるというわけである。一步一步着実にこうした取り組みを進めていくことが大切であるが、すでに研究活動は実用化を視野に入れた段階に達している²¹⁾。

その他の展望としては、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。JAXA（宇宙研）ではこれを戦略研究テーマに設定し、基礎研究として推進しているところである²⁰⁾。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、脱特殊材料化という戦略に則ったものと言うことができる。なお、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検査で代替するための研究が進められており、できる限り早期の運用開始を目指したい。

5. おわりに

ここでは、小型衛星時代の幕開けと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、今後の構想についても述べた。

未来を拓くイプシロンロケットは、モバイル管制などの超革新技術を世界に先駆けて実現し試験機の打ち上げに成功したが、イプシロンの挑戦はまだ始まったばかりである。2号機以降も打上げシステムの改革を進め、本格的な惑星探査にも活用できるイプシロン「発展形態」の早期実現につなげていく計画である。その第一歩として、早くも2号機に向けて「強化型イプシロン」開発がスタートした。

イプシロンが引き続き目指す改革は、技術の成熟度に応じて段階的に進める計画である。各段階の研究開発が、抜本的高性能・低コストのイプシロン発展形態に向けた開発リスク低減のためのフロントローディングとなっており、極めて効率の良い戦略である。イプシロン試験機では、ロケットの打上げ管制をモバイルできるくらいコンパクトに変身させたが、これは現時点でのロケット業界の常識を覆す革命である。強化型イプシロン開発をはじめとした次の段階では、ロケット本体の小型・軽量・低コスト化はもちろん、ロケット追跡系や製造プロセスに至るまで、抜本的改革を推し進める計画である。

成功のカギは、日本が世界に誇る最先端の工業技術と宇宙開発技術をしっかりと融合させることにある。これからは宇宙という分野も産業とせずそ野を広げていくことが重要である。かつて、自動車も飛行機も限られた人しか乗れない代物であったが、今では日常の風景である。結局、すべての移動手段は大衆化していくのだ。それはロケットも同じで、やがては飛行機のように身近な宇宙ロケットという時代がやってくる。イプシロン開発は、まさにそれに道を拓くものである。今

後はこれまで以上に多くの方々のご支援をお願いするところである。

参考文献

- 1) 森田泰弘, 井元隆行, 徳留真一郎, 大塚浩仁, 2011, “イプシロンロケットの開発構想,” 日本航空宇宙学会誌59(695), 371
- 2) 森田泰弘, 2012, “イプシロンロケットの開発現状と発展構想,” 第12回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所
- 3) 森田泰弘, 2012, “イプシロンロケット開発の現状と将来の展望,” 平成23年度小型科学衛星シンポジウム, 宇宙科学研究所
- 4) Morita Y., Imoto T., Ohtsuka H., 2010, Development of Japan's Next Generation Solid Rocket Launcher—the Epsilon Rocket,” 61st Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Prague, Czech Republic
- 5) Morita Y., Imoto T., Tokudome S., Ohtsuka H., 2013, “First Launch in Months: Japan's Epsilon Launcher and Its Evolution,” 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Nagoya, Japan
- 6) Morita Y., Imoto T., Tokudome S., Ohtsuka H., 2011, “Development Status of Japan's Epsilon Solid Rocket Launcher and Its Evolution,” 62nd Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Capetown, SA
- 7) 森田泰弘, 他, 2012, “イプシロン開発の現状と固体ロケットの発展構想,” 平成23年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所
- 8) 森田泰弘, 堀 恵一, 山田哲哉, 他, 2011, 固体ロケットの発展構想について, 平成22年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所
- 9) Morita Y., Imoto T., Ohtsuka H., 2012, “A Year to Launch: Japan's Epsilon Launcher and Its Evolution,” 63rd Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Naples, Italy
- 10) 田村 誠, 井上智也, 森田泰弘, 他, 2009, 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
- 11) Tanaka K., Otsuka H., Saito K., Tamura T., Ishii N., Maeda Y., Morita Y., 2009, “PBS (Post Boost Stage) Design of the Advanced Solid Rocket,” 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Tsukuba, Japan
- 12) Morita Y., 2011, “On the Guidance and Control System of Epsilon Solid Rocket Launcher,” Proceedings of the 21st Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS
- 13) Morita Y., 2012, “ROBUST CONTROL OF THE ADVANCED SOLID ROCKET LAUNCHER,” First IAA Conference on Dynamics and Control of Space Sys-

- tems (DyCoSS1), Porto, Portugal
- 14) Ohtsuka H., Tanaka K., Morita Y., Tamura M., 2012, "The Responsive and Mobile Concept of Guidance & Control System of Epsilon Rocket," 13th International Space Conference of Pacific Basin Societies (ISCOPS), Kyoto, Japan
 - 15) Morita Y., Imoto T., Tokudome S., Ohtsuka H., 2011, "Epsilon Rocket Launcher and Future Solid Rocket Technologies," 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Okinawa, Japan, 2011
 - 16) 森田泰弘, 2010, "イプシロンロケットの開発と今後の展望," 平成22年度JAXA宇宙航空技術研究発表会, 東京
 - 17) Morita Y., Hori K., Imoto T., Ohtsuka H., Fukuchi A., Akiba R., 2010, "Advanced Solid Rocket Launcher and beyond," 12th International Space Conference of Pacific Basin Societies (ISCOPS), Montreal, Canada, 2010/Advances in the Astronautical Sciences, American Astronautical Society, Washington, D.C.
 - 18) 森田泰弘, 井元隆行, 徳留真一郎, 堀 恵一 (JAXA), 大塚浩仁, 宮川 清 (IA), 秋葉鏝二郎 (HASTIC), 2012, "イプシロンロケットの2段開発と将来構想," 第56回宇宙科学技術連合講演会
 - 19) 植草, 森田, 羽生, 他, 2013, "新点火システムの開発," 第57回宇宙科学技術連合講演会
 - 20) Morita Y., 2010, "Advanced Solid Rocket Propellant for Cost Effective Launchers," IAA 50th Anniversary Celebration Symposium, Nagoya, Japan
 - 21) Hori K., Tsutsumi A., Morita Y., Akiba R., Hasegawa H., Sasaki K., Kato N., 2011, "A Study on Low Melting Point Thermoplastic Solid Propellant," 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Okinawa, Japan

First Flight Results of the Epsilon Launch Vehicle and Its Evolution Plan

Yasuhiro MORITA

JAXA, Japan, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan

Abstract: The Epsilon launch vehicle successfully had its first flight in September 14, 2013, carrying "HISAKI," the world first extreme ultra-violet planetary telescope satellite, onboard. The purpose of the Epsilon rocket is to provide small satellites with a responsive launch, which means a cost effective, user friendly and ultimately efficient launch system. To realize this, the design concept of the Epsilon involves various innovative next generation technologies: highly intelligent mobile launch control and the enhanced user-friendly characteristics. This paper deals with the first flight results of the Epsilon launch vehicle and its evolution plan.