

三菱重工名誘における H-IIA ロケットエンジンの開発

北爪 進 編集副委員長（当時）

MHI 名誘 松山液体ロケットエンジン設計課長は娘さん、息子さんより貰った打ち上げ成功祈願のお守りを胸に抱いて、私たちはやれるだけのことはやった、“打ち上げは絶対に成功する！”との強い信念で射場に向かった。



No.1: 松山 MHI 名誘・液体ロケット設計課長 ロケットエンジンを語る

去る8月29日午後4時00分（日本標準時）種子島宇宙センターより H-IIA ロケット試験機1号機の打ち上げが成功した。リフトオフから約40分後にレーザー測距装置（LRE）を静止トランスファー軌道に投入した。これは遠地点高度 36190.6km（計画値 36186.2km） 近地点高度 251.3km（計画値 251.3km）であり 0.1 シグマ以内の正確さであり衛星打ち上げを待っているものにとってこの上ない朗報であった。

AIAA JFSC では早速 LE-7A エンジンの開発に携わり今回の成功に貢献された三菱重工業

(株)名古屋誘導推進システム製作所 エンジン機器技術部液体ロケットエンジン設計課の松山行一課長を訪ね打ち上げ成功に至る苦心談を伺った。



No.2: 松山課長とのインタビュー風景

松山課長は 1983 年神戸大学大学院を卒業と共に三菱重工に入社され LE-7A ロケットエンジンの前身である LE-7 エンジンの開発にも携わり日本の国産技術によるロケット開発に深く携わってこられた日本におけるロケットエンジン開発の第 1 人者である。

読者は既にご承知の如く H-IIA ロケットは 21 世紀における人工衛星の打ち上げや宇宙ステーションへの物資補給等の多目的な宇宙への輸送需要に低コストで対応するという要請に対応するため、それまでの H-II ロケットの開発技術成果をもとに開発されたロケットである。平成 10 年 2 月の H-II/F#5 号機、平成 11 年 11 月 H-II/F#8 号機の失敗を経験しそこから得た教訓を生かして開発強化活動、品質再評価活動などを強化し日本の宇宙開発の為に純国産ロケットの開発に取り組んだものである。H-IIA ロケットは標準型と増強型があり、標準型は H-II と同様静止トランスファ軌道 (GTO) に 4 トンクラスの衛星を打ち上げる能力を有する。増強型は、標準型に大型液体ロケットブースタを追加装備することによって静止トランスファ軌道 (GTO) 7 トンクラスの衛星を打ち上げることが出来るように設計されている。



No.3: LE-7A ロケットエンジンの説明をする松山課長



No.4: HII-A ロケット3号機用 LE-5B エンジンの前で

H-IIA 1号機の打ち上げ成功

今回の試験機 1号機は標準型 H-IIA ロケットの最も基本的な形態により静止トランスファ軌道への飛行を行い、その機能、性能を実証するためのデータを取得することを目的に行われ成功したものである。そのかげには松山課長を筆頭にして多くのロケット開発関係者の血のにじむ努力があったことを特記するべきである。 打ち上げ前には

1) 2段液体酸素タンク圧力調整弁の動作不良

があり、打ち上げ日が 8月 25日 から 29日に延期され、打ち上げ当日も

2) 液体水素系配管接続装置の不良

などにより打ち上げ時刻が 13時 00分 から 16時 00分に延期になった。が関係者の不屈の精神力でこの困難を克服し成功に導いた。

LE-7 から LE-7A へ

H-IIA 打ち上げ成功に至るエンジン開発には多くの困難と犠牲があった、ロケットメインエンジン LE-7A の前進である LE-7 の開発には原型、実験型(その1)、実験型(その2)、認定と4つのモデルにわたり総数 16 台のエンジンの開発が必要であった。その中には燃焼試験中に一瞬にして失われてしまったエンジンも 3 台ほどあった、始動して燃焼開始したらエンジンをモニターしている画面が真っ白になりエンジンが無くなっていたと言うような瞬間的な事故であった。高温高圧になる燃焼器の燃焼試験後の気密試験で尊い人命の犠牲もあった、打ち上げの2年前であり精神的にも最悪の時期であった。500 度 C、140 気圧の燃焼ガスとマイナス 180 度(90K)、180 気圧の液体酸素とを極薄い壁を隔てて混合させ燃焼させるエンジンの開発には多くの困難と克服しなければならない技術の壁があった、その様な困難を克服し血のにじむような努力によって H-II ロケットの成功があった(1994 年初号機の打ち上げ) それまで 12 年かかっていた。H-II ロケットの開発は成功と思われるがその間世界の経済状況は一変しており急激な円高などによって世界の衛星打ち上げ市場に参入出来ない価格になっていた。そこで経済的に競争力のある H-IIA ロケットそして LE-7A エンジンの開発となった。

LE-5B, LE-7A の開発

LE-7 の開発、製造、検査の経験より知恵を集め、LE-7A の開発に反映させるべき項目を纏めあげた資料はキングファイルに収め 1メートル以上になった。設計面ではエンジン設計に3次元の CAD を使い、応力・熱設計に適用艱装構造を簡素化し且つ信頼性をあげる、製作面では作り易くすること、それは溶接の箇所を減らすことであった(LE-7 では溶接箇所が予想以上に母材の強度に比べ弱くなっていることが分かり、溶接箇所にてできる溶接ビードに応力が集中し脆弱になるため熱処理を施し強度を回復させると共に溶接ビードを削り取り滑らかにする作業が必要であり、人海戦術で芸術品を作るような作業であった) 例え主噴射器は LE-7 では約 260 箇所あった溶接箇所を 60 箇所に減らした。又 LE-7 の経験より不要と考えられる部分を減らすこと等信頼性を確保しつつコストダウンをおこなった、1994 年に開発作業を始め最初のエンジン燃焼試験が始まったのは 1996 年であ

った。その後も幾多の困難があったがそれを克服しエンジン完成に導いたが初期計画より1年6ヶ月の遅れであった経緯を熱っぽく語る松山課長には本当に開発の苦労を経験した技術者の顔であった。

エンジン名	LE-5B	LE-7A
推力 (真空中)	14トン	109.5トン
燃焼圧	3.6MPa	12.3MPa
比推力	448秒	430秒
直径 x 長さ	1.7m x 2.7m	2m x 3.4m
質量	285kg	1715kg
用途	H-IIA 2段	H-IIA 1段
主要技術	<ul style="list-style-type: none"> ・液酸/液水 ・多数回着火 ・アイドルモード燃焼 ・低コスト ・推力可変 	<ul style="list-style-type: none"> ・液酸/液水 ・大推力 ・高燃焼圧 ・低コスト ・信頼性向上

No. 5 : HII-A 用ロケットエンジン性能表

平成12年9月にはH-2A1号機仕様のLE-7Aエンジンの開発が完了し、10月には1号機用エンジンの領収試験に移行した。1号機は平成13年2月に打ち上げが計画されていた。しかし、領収試験において2件の不具合が発生し11月には対策が取られ追加の領収試験でその効果が確認されたが、更に12月にノズルスカートの冷却管母材に侵食が起きるといった問題が発生するに至り、宇宙開発事業団はH-2A1号機の打ち上げの半年延期を決断し、H-2A開発に未だ不安の要素が残っていないかを点検するために各メーカーと合同で開発総点検を実施することとした。1号機用として製作されたLE-7Aは開発用に転用され、万全を期してエンジンは再製作された。平成13年3月には再製作品が完成し領収試験が無事完了した。エンジンの機体側への引渡し後、配管部品の中に清浄度が不足している部品が発見されエンジンより配管をはずし修正作業を行った。配管調達先での洗浄方法、洗浄後の検査方法に不備があったことが原因であった。スケジュールが押し迫っていた為配管解体修復作業は徹夜で行った。

そうこうして一号機用のロケットが7月10日に完成し三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所飛島工場より種子島に運んだ後、8月上旬に極低温試験をおこなったところ、機体

で使用しているバルブより黒色のごみ（数十マイクロオーダーの大きさ）が発見され交換を行ったがこれも機能試験中の作業環境の不備によるものだったことが判明し信頼性管理の重要性を痛感する出来事であった。いずれにしてもコンタミ問題が多く発生したが（ロケットエンジンとは金属でもなんでも燃えてしまう高圧酸素の環境でありわずかな不純物がエンジンの精密動作に支障を来す原因になる）その対策の為 “コンタミ点検検討チーム” を NASDA/MHI 合同チームとして編成し部品製作過程において清浄度管理を徹底することを実行している。

松山課長の開発苦労談を聞き、ECS で 1 本の Ka-Band TWT フライト品を獲得するのに 31 本の開発を必要とした経験と困難を思い出してしまった。



No. 6: LE-7A(左)と LE-7 エンジンの比較説明される松山課長

台風の中バルブを抱いて！！

打ち上げ前の最後のバルブ作動点検において 2 段液体酸素タンク圧力調整弁の動作不良については、打ち上げ前の最後のバルブ作動点検において 2 段液体酸素タンク圧力調整弁の作動不良が発見された。調査の結果バルブに取り付けられたフィルターに付着していた珪素化合物の微粒子（コンタミネーション）が流出しバルブの予備系の開閉動作に影響を与えたことを突き止め次号機用に製作準備されていたバルブと交換した。

8 月 19 日に推進系の点検を行っていた時、夜 8 時ごろバルブの作動試験で不具合が見つかった、バルブを機体より取り外し宇宙センターのクリーンルームに分解点検の為搬入し、

摺動部分が固着している事が判明した、それ以降の詳細な調査の為には現品を名誘に持ち帰る必要があった。翌日 20 日は不運にも台風 13 号が種子島上空に来ており射場は暴風圏内であり名古屋行きの商用航空機は運行中止となっており輸送手段が無い状態であった、頼みの綱は三菱重工の社有機 MU-300 であり、やっとの思いでその機会を捉え大切なバルブを胸に抱いて名古屋まで輸送したのが松山課長であった。暴風の中、MU-300 は名古屋から那覇まで飛び、翌日 21 日種子島に到着し、バルブを持つ松山課長を乗せて名古屋に向けて飛んだが、暴風のため鹿児島空港で社有機は運行不能となった。幸い全日空機が辛うじて飛んでいる事を知りそれに飛び乗り名古屋へ持ち帰った。バルブ摺動部分の拡大観測により大量の微小粒子が固着を引き起こしたことが分かったが、その粒子がどこから来たのかが謎であった。しかしとうとう珪素化合物の微粒子がフィルタに付着していることを発見、不具合品の代わりに次号機用の健全なバルブを使用することを決意しその作業の為 9 月 23 日は徹夜作業でフィルタの洗浄作業を行なった、翌日 24 日にかけて 10 ミクロン以上のコンタミをゼロに近い形にすることに成功し、午後 3 時 30 分に名誘を出荷し夕刻 6 時ごろまでに種子島宇宙センターに持ち込み夜間作業で機体の復旧を行い、25 日にはロケット打ち上げのカウントダウンに入る事が出来た。この間睡眠時間は 1~2 時間/日しか取っていない状態であった、フィルタからコンタミが出ていることに気付くことが解決の鍵であった。

製作工程では何らかの不具合は必ず起きるものであるとの認識で、それを検査工程で発見し最終的にゼロにすることが重要な仕事である。と松山課長は末端の孫請を含めての作業の品質管理が重要であることを強調していた。

本来なら微粒子を取るべきフィルターであるが、バルブに取り付けられたフィルターになぜ珪素酸化物の微粒子が付着して不具合の原因になったのか疑問に思った筆者に松山課長は明快に答えてくれた。



No.7 :2 段液体酸素タンク 圧力調整弁

ミニスカートとロングスカート（改良型ノズルスカートの設計 4号機より）

エンジン開発者の松山課長としては第 1 段エンジン（LE-7A）の更なる改良を考えている、それはエンジンノズルスカートの改良設計である、0.5mm 厚の壁を持った無数のパイ

プの集合体より出来ているノズルスカーートを、1号機はミニサイズであり定格推力で109.5トンであるが、今後4号機を目指してロングスカーートにすることで推力増強を図り定格推力112トンに向上させることを計画している。外観的には単純に見えるノズルスカーートも温度・熱設計、冷却流体、気密性、強度等110トンの推力とマイナス250度Cから3,000度Cの温度差に耐える構造を実現する技術は口では言い尽くせない難しさがある事を実感する、またまた松山課長の明快な説明に納得！！



No. 8-1 : LE-7A エンジンのノズルスカーート



No.8-2 : LE-5B エンジンノズルスカート

ロケットは 30 分の勝負！ 衛星はその後 10 年の悩み

H-IIA 標準型ロケットは全長 53m 重量 285 トンである、米国のケーブカナベラルでアームストロング船長を月に送ったサターンロケットの実物大模型が横たわっており初めて見た時その大きさに驚愕したが、H-IIA も NASDA 発行の各種パンフレットでこの数値を既に知っているが現物を見るとその大きさに今更ながら驚くものである。MHI 飛島工場では H-IIA ロケット 2 号機、3 号機の組み立て作業が行われている状況を説明頂きその素晴らしい景観に感激した。

又打ち上げシーケンスに戻るが第 2 段エンジン第二回燃焼停止が打ち上げ後 2 8 分 2 秒であった、管制センターではこの時点でロケット打ち上げ成功の歓声が上がった、その 1 1 分 4 5 秒後 LRE 分離であるがここまで入れても約 4 0 分である。従ってロケット打ち上げは約 4 0 分の勝負であり結果が出る。そのロケットで打ち上げられる通信・放送衛星や観測衛星はそれから 1 0 年ほど軌道上で安定動作を要求されるため乾杯できるのは寿命達成の 1 0 年後でありその間大変な時を過ごす事となる。

長年衛星開発に携わった筆者は実感として松山課長の言葉を聞きながら、私を衛星開発に引き込んだ先輩の顔を今更ながら思い浮かべ、清々しい顔で説明される松山課長と比較して私も松山課長のような上司を持てば良かったなあ！と運命のいたづらを嘆いてしまった。



No. 9 :三菱重工業名古屋航空宇宙システム製作所飛島工場内
(H-IIA ロケット組み立て工場)



No.10 :HII-A ロケット組み立て風景
大きさに驚愕した！！

バルブコントロールエレクトロニクス

精密な機械構造物で構成されているロケットエンジン部品の中でバルブなどの動作を制御しているエレクトロニクスとしてコントローラとニューマチックパッケージがある。多くの精密機械構造物の中で唯一エレクトロニクスらしい機器を探しここにあった！と心の中で叫んでいた。

そのコントローラ部分に使用されているいわゆる高信頼性電子部品の一部を（株）ジェピコが MHI へ納入させて頂いており、（株）ジェピコも H-2A ロケット開発の末端に関わらせて頂いていると思うと感動を覚えた。



上段



下段

No.11: バルブコントロールエレクトロニクス

ロケットは He か She か？ 娘である！！

豪快にロケットエンジンの開発状況を説明頂いた松山課長に意見を伺った。あの轟音と共に豪快に天空高く飛び立つロケットは男性的であり、英語で言えば “He” であり “Hero” でしょうね！と、松山課長は間髪を入れず即座に ロケットは “She” ですよ！と答えていた。

私は、常日頃衛星は娘である、従って “She” である、衛星がロケットにて打ち上げられる時はちょうど娘が嫁に行く時の気持ちであり無事打ち上がって動作して欲しい、愛着のあまり出来れば少しでも打ち上げ時期が延びて欲しいと心の中で念じていた。

松山課長の “ロケットは “She” ですよ” の言葉に胸がジーンときてしまった、外観は豪快で快活な説明をされる松山課長もエンジン開発にはご苦労されているのだなあと、ロケットを “She” と感ずる心情を持った技術者によって純国産のロケットエンジンの開発が推進されているのなら将来は万全であると密かに思った次第である。



No.12 : 松山課長大いに頑張る！！



No.13 :HII-A ロケット 2段組み立ての前で

(以上文責：SJR 編集委員会 当時編集副委員長 北爪 進)