

イプシロンSロケット 2段モータ(E-21)地上燃焼試験調査状況

令和5年7月31日

宇宙航空研究開発機構

宇宙輸送技術部門 事業推進部 部長 佐藤 寿晃

イプシロンロケットプロジェクトチーム プロジェクトマネージャ 井元 隆行

目次

1. イプシロンSロケットの概要
 1. 1 イプシロンSロケット機体仕様
 1. 2 イプシロンSロケット2段モータの概要

 2. イプシロンSロケット2段モータ地上燃焼試験
 2. 1 地上燃焼試験の概要
 2. 2 地上燃焼試験結果
 2. 3 原因調査状況

 3. 今後の計画及び進め方について
- (参考)水平展開の状況

1.1 イプシロンSロケット機体仕様 (強化型との比較)



強化型

| ロケットシステム | | 強化型 | | イプシロンS (仕様統一) |
|----------|------|------------------------|----------|----------------------|
| | | 基本形態 | オプション形態 | |
| 全長 | | 約26m | | 約27.2m |
| 段構成 | | 固体3段 | 固体3段+PBS | 固体3段+PBS |
| フェアリング分離 | | 2段燃焼開始前 (機軸方向加速度なし) | | 2段燃焼中 (機軸方向加速度あり) |
| アビオニクス | | H-IIAと共通(一部) | | H3と共通(一部) |
| 3段 | 搭載方式 | フェアリング内 (インポーズ) | | フェアリング外 (エクスポーズ) |
| | 推進薬量 | 約2.5トン | | 約5トン |
| | 姿勢制御 | スピン安定 | | TVC + PBS |
| 2段 | 推進薬量 | 約15トン | | 約18トン |
| | 姿勢制御 | TVC + RCS | | TVC + RCS |
| 1段 | モータ | SRB-A | | SRB-3 |
| | 推進薬量 | 約66トン | | 約67トン |
| | 姿勢制御 | TVC + SMSJ | | TVC + SMSJ |



イプシロンS

フェアリング
カプセル化

3段モータ大型化
3段TVC化

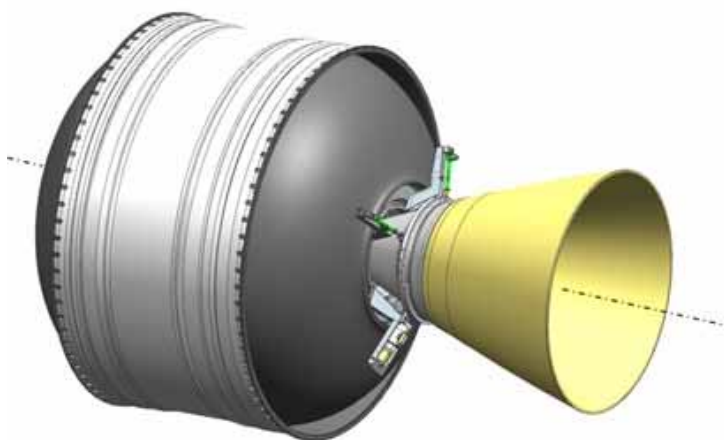
2段モータ大型化

SRB-3適用

PBS: Post Boost Stage (小型液体推進系)
 TVC: Thrust Vector Control (推力方向制御)
 RCS: Reaction Control System (ガスジェット装置)
 SMSJ: Solid Motor Side Jet (姿勢制御用補助推進系)

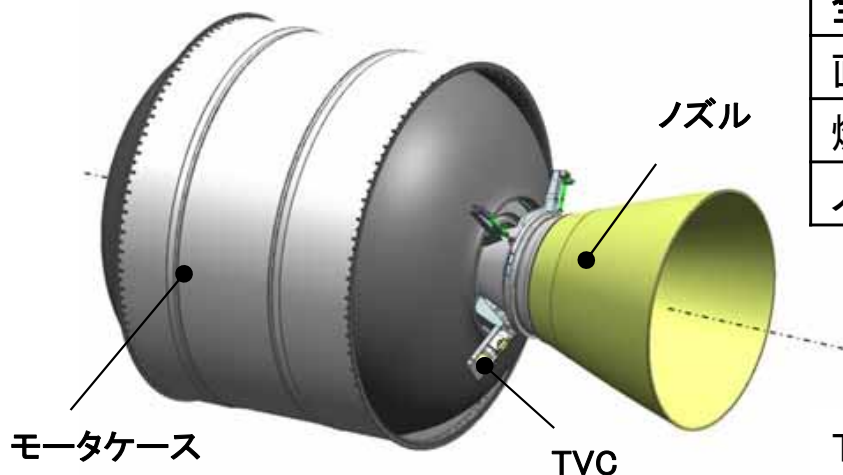
1.2 イプシロンSロケット2段モータの概要 (強化型との比較)

- 打上げ能力最適となる推進薬量(強化型2段モータをサイズアップ)。
- 強化型2段モータとSRB-3開発成果を活用し、高信頼性・低コスト化を追求。



強化型 2段モータ

| 項目 | 強化型2段モータ | イプシロンS 2段モータ |
|---------|-----------|--------------|
| 固体推進薬 | コンポジット推進薬 | コンポジット推進薬 |
| 真空中推力 | 約470 kN | 約610 kN |
| 性能(Isp) | 295 s | 294.5 s |
| 固体推進薬量 | 約15 ton | 約18 ton |
| 全長 | 4.0 m | 4.3 m |
| 直径 | φ 2.5m | φ 2.5m |
| 燃焼時間 | 130 s | 約120 s |
| ノズル駆動方式 | TVC | TVC |



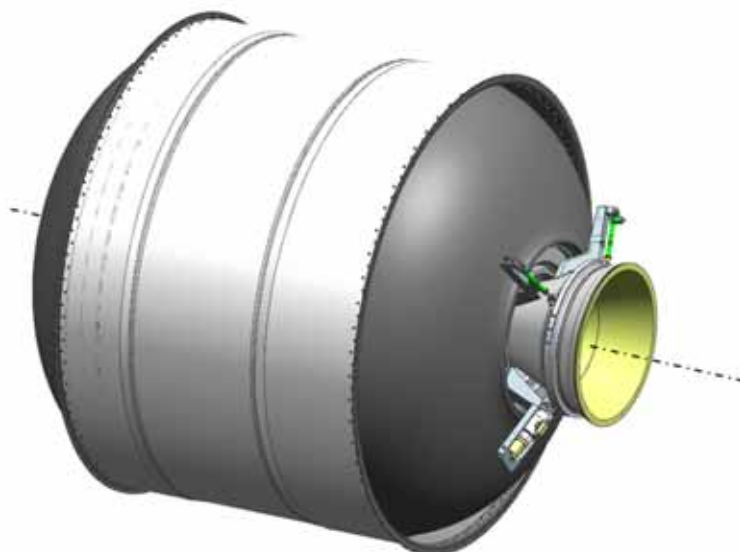
イプシロンS 2段モータ

TVC: Thrust Vector Control

2.1 地上燃焼試験の概要

- 試験目的 : 以下の技術データを取得し、設計妥当性を確認する。
 - ① モータ着火・燃焼・推進特性
 - ② モータ・ノズル構造特性、断熱材特性
 - ③ TVCシステム性能
 - ④ 振動・衝撃等の環境
- 試験場所 : 能代ロケット実験場 真空燃焼試験棟
- 燃焼時間 : 120秒程度
- 供試体 : 短ノズル型
(大気圧下で試験を行うため、ノズル内部流れの剥離防止として短ノズルを使用)
- 計測項目 : 推力、燃焼圧力、各部温度・歪・加速度等の**約170点**

実機／燃焼試験仕様差異



燃焼試験仕様

| 項目 | 実機仕様 | 燃焼試験仕様 |
|----------------|----------------|-------------------------|
| 固体推進薬 | コンポジット推進薬 | コンポジット推進薬 |
| 真空中推力 | 約610 kN | 約560 kN |
| 性能(Isp) | 294.5 s | 267.3 s |
| 固体推進薬量 | 約18 ton | 約18 ton |
| 全長 | 4.3 m | 3.2 m (短ノズル型のため) |
| 直径 | φ 2.5m | φ 2.5m |
| 燃焼時間 | 約120 s | 約120 s |
| ノズル駆動方式 | TVC | TVC |

2.2 地上燃焼試験結果 (実施状況・被害状況)

【実施状況】

点火日時： 2023年7月14日(金) 09:00

試験場所： 能代ロケット実験場 真空燃焼試験棟

結果：

- ① 予定時刻に点火し燃焼試験を開始。
- ② 点火後約20sあたりから燃焼圧力が予測圧力から乖離。
- ③ 点火後約57sの時点で燃焼圧力約7.5MPaでモータが爆発(燃焼圧力は最大使用圧力(8.0MPa)及び耐圧試験の圧力(10.0MPa)以下)。
- ④ モータ爆発までノズル駆動は正常。
- ⑤ モータ爆発により真空燃焼試験棟で火災発生。消防隊による消火活動により約2時間後に鎮火。
- ⑥ 第2段モータの大部分は立入規制区域内である真空燃焼試験棟内外に飛散した。安全の観点から真空燃焼試験棟外の一部飛散物を回収。

【被害状況】

- 人的被害：被害報告なし
- 第三者物的被害：被害報告なし
- JAXA設備の損傷：真空燃焼試験棟及びその内部設備の損壊、実験場内隣接建屋の破損(窓ガラス、扉等)

2.2 地上燃焼試験結果 (爆発前後の真空燃焼棟映像)

- 正常燃焼(左図)から1/60s後に爆発・火炎が広がる(右図)。



異常発生直前(南側)



異常発生直後(南側)



異常発生直前(北側)



1/60s後



異常発生直後(北側)

2.2 地上燃焼試験結果 (損壊状況)

- 真空燃焼試験棟の損壊状況を以下に示す。
- 屋根・壁の崩落の危険があるため、真空燃焼試験棟内立ち入り禁止処置中。



真空燃焼試験棟(燃焼前)



真空槽内(燃焼前)



真空槽(爆発後)



真空燃焼試験棟(爆発後)



真空槽内(爆発後)



2.2 地上燃焼試験結果 (圧力・推力データ)

FX : モータ機軸方向推力
 PIG : イグナイタ圧力
 PC : モータケース圧力

- ① 56.970s手前から圧力が変動し、5ms程度でゼロまで降下。
- ② 推力は増加し、56.971sまでに精度を保証している計測機器の校正範囲(500kN)を超過。
- ③ 高速度カメラ画像では56.972sまで正常で、1ms後の56.973sの画像で黒煙が発生。
- ④ 高速度カメラ画像では56.973sまでの間、ノズル出口部は形状を保っている。

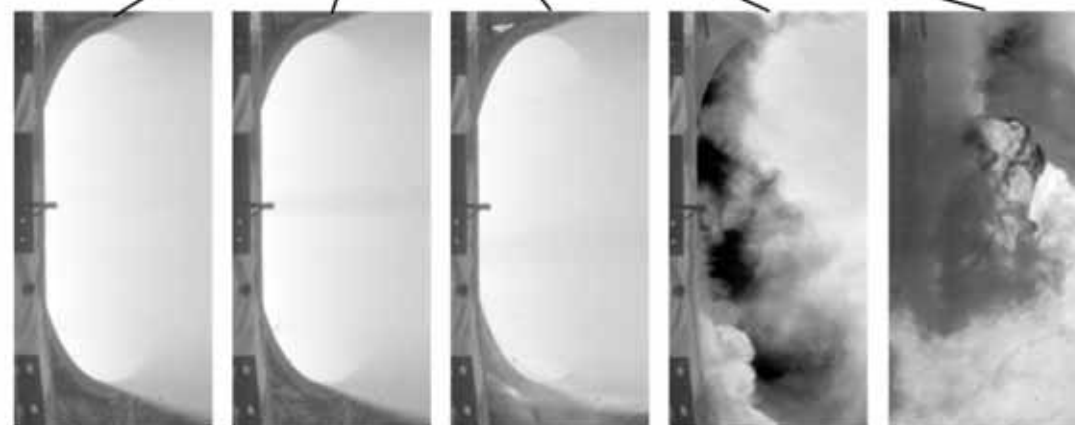
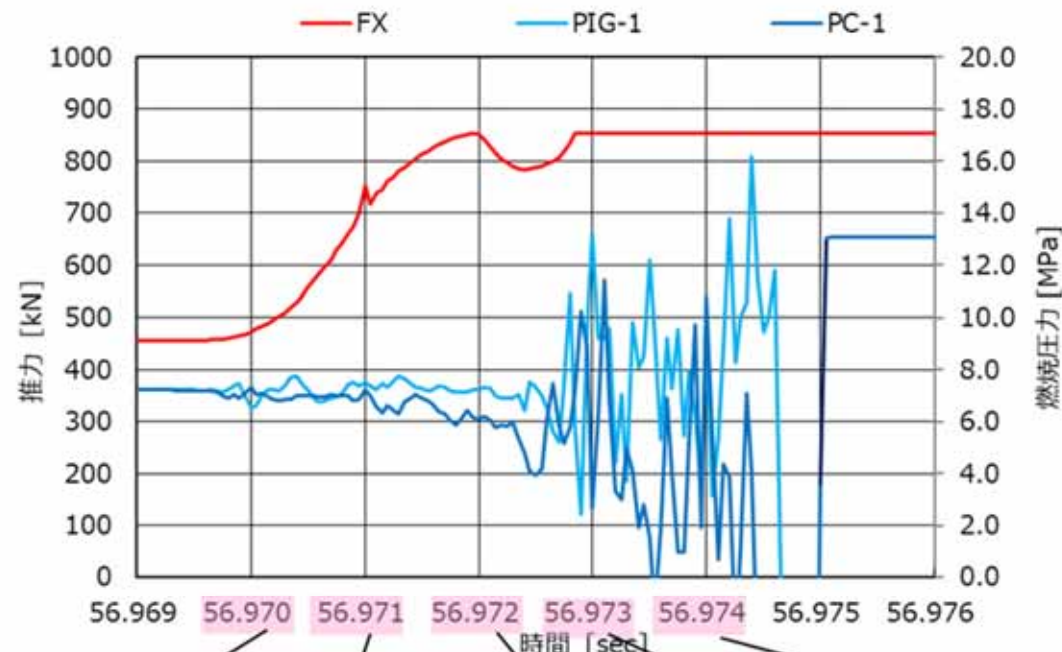
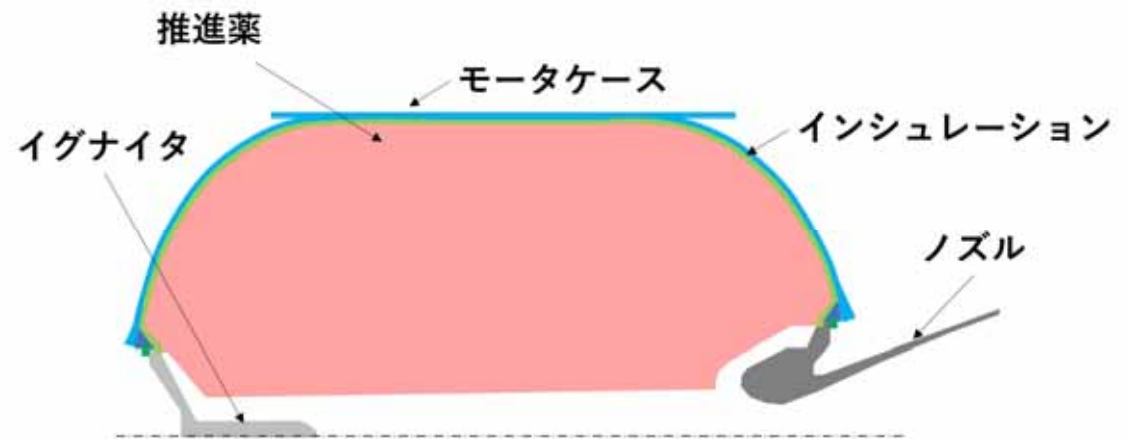
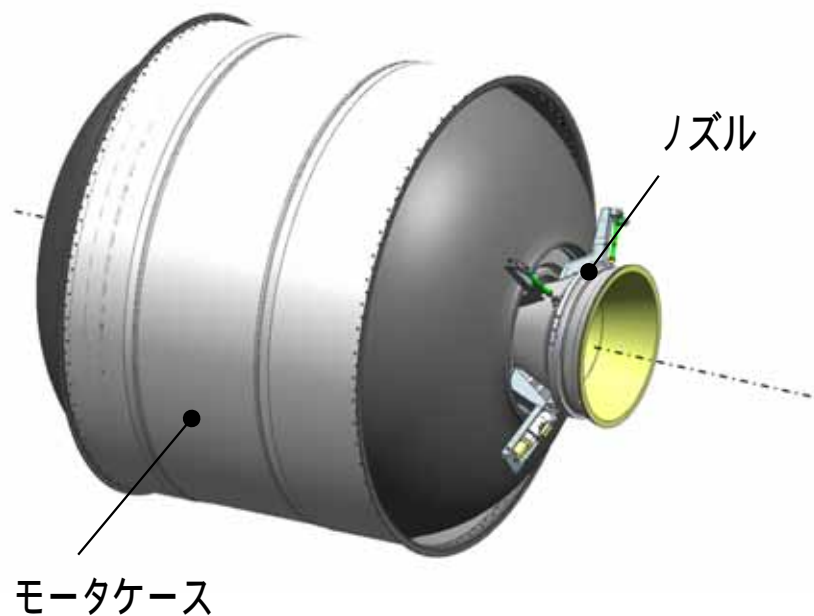


図 高速度カメラ画像(ノズル付近拡大)

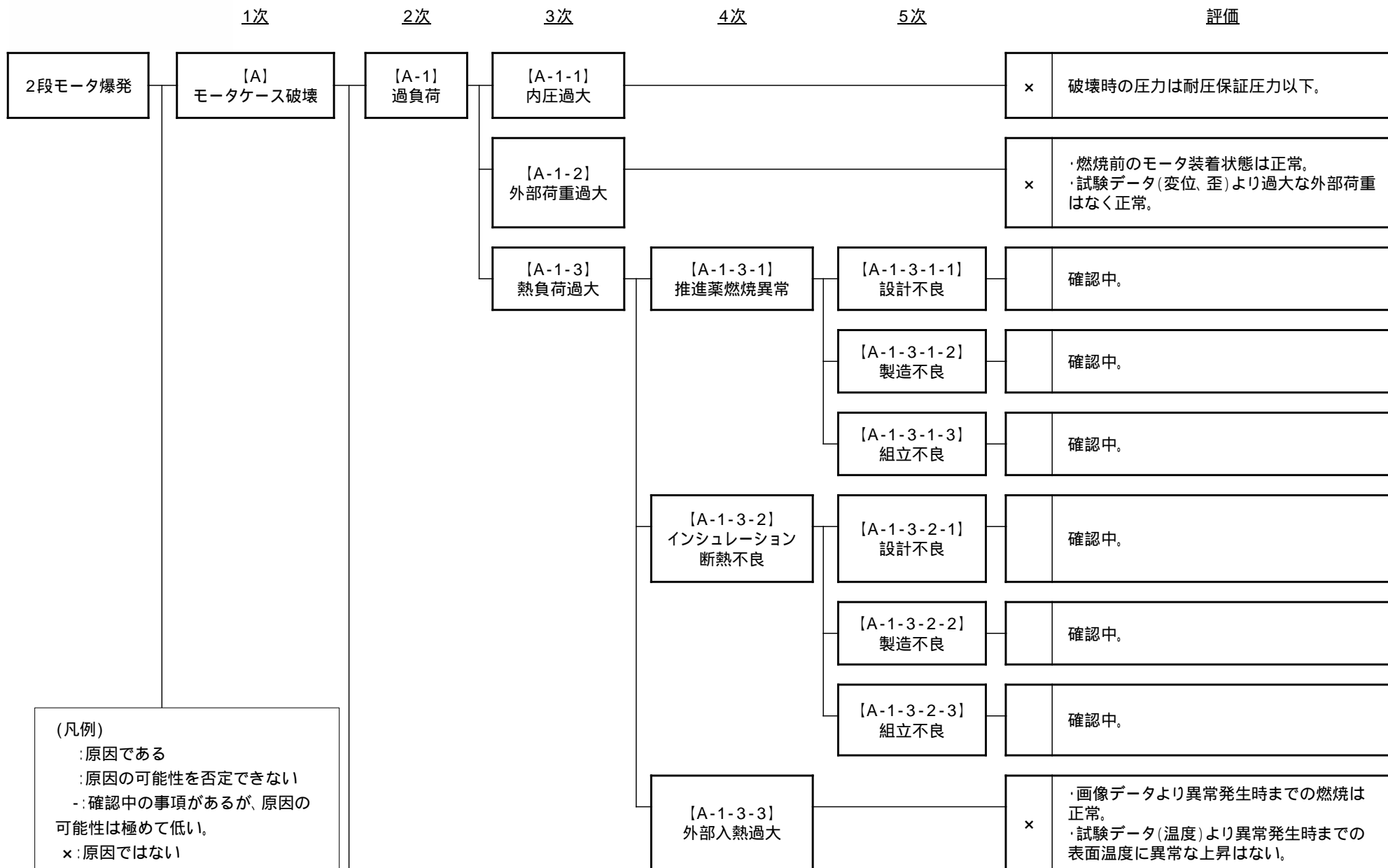
2.3 原因調査状況 (原因に関連する判明事象)

【FTAの分析状況】

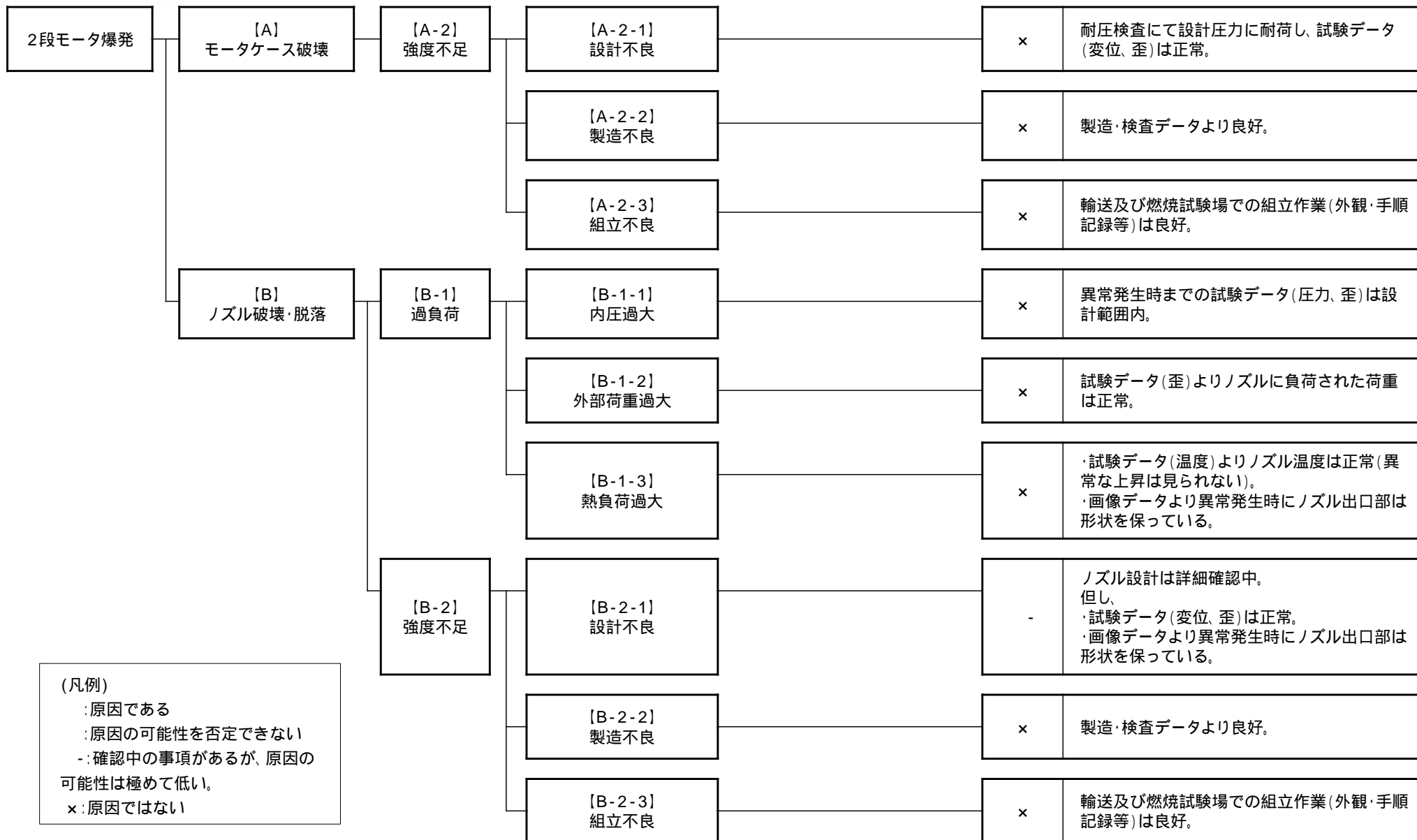
- 「2段モータ爆発」についてFTAを展開し、「モータケース破壊」と「ノズル破壊・脱落」の2要因に分解し、製造・検査データ、試験データに基づき詳細な分析を実施しているところ。
- 現時点においては、何らかの理由でモータケースに熱的に過大な負荷がかかり、構造部材が強度を維持するための許容温度を超えたことで破壊に至った可能性が高いと分析しており、供試体起因としては、「推進薬燃焼異常」「インシュレーション断熱不良」が要因として残っている。詳細について継続して調査を進める。



2.3 原因調査状況 (FTA分析) 1 / 2



2.3 原因調査状況 (FTA分析) 2/2



3 今後の計画及び進め方について

【開発計画について】

- イプシロンSロケットは2024年度下半期の実証機打上げを目指して開発しているところ。
- 今回発生した2段モータの燃焼試験の爆発事故の影響については、原因調査と並行して開発計画を再精査した上で、打上げ時期の見直しが必要かどうか検討を進める。

【今後の進め方】

- 今回発生した事象の原因調査を進め、2段モータの試験計画を早期に再設定する。
- 原因調査の進捗を踏まえつつ、イプシロンSロケットへの水平展開として、1段モータ(イプシロンS用のSRB-3可動ノズル型)及び3段モータの評価を実施する。

(参考) 水平展開の状況

水平展開として、E-21と同じくコンポジット推進薬を用いる固体モータであるH-IIAロケット用SRB-A、H3ロケット用SRB-3に対する影響評価の状況を示す。

「モータ爆発」をトップ事象としてFTAを展開し要因の絞り込みを実施中のところ、要因の可能性として供試体起因で残る項目について、E-21とSRB-A、SRB-3の共通点／差異を明確にした上で、SRB-A、SRB-3の影響の懸念が排除できるかの確認を実施。現時点、供試体起因で残る項目としては、下記の2点。

- ① 推進薬燃焼異常
- ② インシュレーション断熱不良

各モータの主要諸元ならびに要因にかかる共通点／差異 赤字がE-21との共通点

| | | E-21 | SRB-A | SRB-3 |
|-----------|--------------|---|----------|---|
| 主要諸元 | モータ長さ(m) | 2.6 | 10 | 10 |
| | モータ代表径(m) | 2.5 | 2.5 | 2.50 |
| | 薬量 (ton) | 18 | 65 | 67 |
| | 最大燃焼圧力 (MPa) | 8 | 11.8 | 11.8 |
| 推進薬 | 形状 / 燃焼速度 | 各モータ固有 | 各モータ固有 | 各モータ固有 |
| | 組成 | 各モータ固有 材料の一部 (バインダ (燃料) がSRB-3と共通 (SRB-3で開発) | 各モータ固有 | 各モータ固有 材料の一部 (バインダ (燃料) がE-21と共通 (SRB-3で開発) |
| | 製造・検査 | SRB-A、SRB-3と装置類・工程は異なる (場所も異なる) | E-21と異なる | E-21と異なる |
| インシュレーション | 形状 | 各モータ固有 | 各モータ固有 | 各モータ固有 |
| | 材料 | E-21 / SRB-3共通 (強化型イブシロンで開発) | E-21と異なる | E-21 / SRB-3共通 (強化型イブシロンで開発) |
| | 製造・検査 | SRB-A、SRB-3と装置類・工程は異なる | E-21と異なる | E-21と異なる |

(参考) 水平展開の状況

SRB-Aについて下表に示す通り、今回の事象からの反映が必要な懸念事項はないと評価した。さらに、H-IIAF47用SRB-Aについては万全を期すため、要因として残る項目に関する製造・検査データを再確認したが、懸念事項はない。

| 要因(供試体起因) | 評価内容 |
|---------------|---|
| 推進薬燃焼異常 | <ul style="list-style-type: none"> E-21とSRB-Aは推進薬の形状、組成ともに異なり、製造・検査工程を含め共通要因の観点で懸念はない。 E-21は開発段階のモータであり、今回が初めての燃焼試験でモータとしての推進特性は本試験での主要検証項目。このため現時点で検証は完了していない状況。 一方、SRB-Aは、14回の地上燃焼試験(うち、高圧燃焼モータ(H-IIAF47適用モータ)での試験8回)及び90本以上の打上げ実績がある。フライトでの燃焼圧力履歴は設計上想定されるばらつきの範囲内であることを確認している。以上の通り設計、製造の妥当性を十分に検証済みである。 H-IIAF47用SRB-Aは製造検査記録から推進薬を含め良好に製造されていることを確認済みである。なお、推進薬の燃焼特性、及び機械的特性については実機推進薬からのサンプリングにより確認済み。 |
| インシュレーション断熱不良 | <ul style="list-style-type: none"> E-21とSRB-Aはインシュレーションの形状、材料ともに異なり、製造・検査工程を含め共通要因の観点で懸念はない。 E-21は開発段階のモータであり、今回が初めての燃焼試験でモータとしての断熱特性は本試験での主要検証項目。このため現時点で検証は完了していない状況。 一方、SRB-Aは、14回の地上燃焼試験(うち、高圧燃焼モータ(H-IIAF47適用モータ)での試験8回)及び90本以上の打上げ実績がある。地上燃焼試験においては、試験後に必要インシュレーション板厚が適切に残存していることも確認しており、フライトではモータケースの温度計測により断熱性能が正常であることを確認している。以上の通り設計、製造の妥当性を十分に検証済みである。 H-IIAF47用SRB-Aは製造検査記録からインシュレーション含め良好に製造されていることを確認済みである。なお、インシュレーションは単体での製造検査の他、モータケース内面と推進薬間に施工されることから接着特性を実機製造と同時に製造するテストピースにより確認済みである。 |

(参考) 水平展開の状況

SRB-3について下表に示す通り、今回の事象からの反映が必要な懸念事項はないと考えるものの、要因で残る項目にE-21との共通点があることから、原因調査の進捗を踏まえつつ評価を継続する。

| 要因(供試体起因) | 評価内容 |
|---------------|--|
| 推進薬燃焼異常 | <ul style="list-style-type: none"> E-21とSRB-3は推進薬の形状、組成ともに異なり、製造・検査工程にも共通要因の観点で懸念はない。燃焼パターンなど推進薬燃焼特性にかかる共通点もなく懸念はないと考えるが、推進薬を構成する材料の一部(SRB-3で開発したバインダ)は共通である。 E-21は開発段階のモータであり、今回が初めての燃焼試験でモータとしての推進特性は本試験での主要検証項目。このため現時点で検証は完了していない状況。一方、SRB-3は、3回の地上燃焼試験及びTF1(2本)の打上げ実績がある。フライトでの燃焼圧力履歴は設計上想定されるばらつきの範囲内であることを確認している。以上の通り設計、製造の妥当性を検証済みである。 |
| インシュレーション断熱不良 | <ul style="list-style-type: none"> E-21とSRB-3はインシュレーションの形状は異なり、製造・検査工程にも共通要因の観点で懸念はない。インシュレーションの材料特性に異常は確認されておらず、形状は異なり懸念はないと考えるが、材料(強化型イプシロンで開発しSRB-3に適用)は共通である。 E-21は開発段階のモータであり、今回が初めての燃焼試験でモータとしての断熱特性は本試験での主要検証項目。このため現時点で検証は完了していない状況。一方、SRB-3は、3回の地上燃焼試験及びTF1(2本)の打上げ実績がある。地上燃焼試験においては、試験後に必要インシュレーション板厚が適切に残存していることも直接確認しており、フライトではモータケースの温度計測により断熱性能が正常であることを確認している。以上の通り設計、製造の妥当性を検証済みである。 |