

イプシロンロケット6号機 打上げ失敗原因調査状況

令和4(2022)年10月21日
宇宙航空研究開発機構

理事 石井 康夫
宇宙輸送技術部門 事業推進部 部長 佐藤 寿晃

原因究明体制

イプシロンロケット6号機対策本部

本部長 : 理事長 山川 宏
 本部長代理: 副理事長 鈴木 和弘
 本部員 : 理事、理事補佐等

原因究明チーム

イプシロンロケット6号機対策本部の下、データ収集・分析、原因の特定、是正対策、水平展開を実施

チームリーダー : 理事 布野 泰広
 チームリーダー代理: 宇宙輸送技術統括 藤田 猛
 事業推進部長 佐藤 寿晃

チームメンバー:

イプシロンプロジェクトチーム
 イプシロンプロジェクトマネージャ 井元 隆行
 宇宙輸送安全計画ユニット
 宇宙輸送系基盤開発ユニット
 H3プロジェクトチーム
 鹿児島宇宙センター射場技術開発ユニット
 研究開発部門
 S&MA総括
 安全・信頼性推進部
 環境試験技術ユニット
 チーフエンジニア室

連携

IHI ステアリング委員会

IHIエアロスペース
対策本部

IHIエアロスペース
原因究明チーム

三菱重工業(MHI)

H3、H-IIAとの情報共有・水平展開等

姿勢制御系等に関わる専門家参加
 (必要に応じ外部からの参加も検討)

目次

0. 本日の報告内容

1. イプシロンロケット6号機概要

1-1. 打上げ結果概要

1-2. 姿勢制御概要

1-3. 発生事象の内容

1-4-1. 飛行状況

1-4-2. 2段姿勢制御方式

1-4-3. 姿勢角誤差

1-4-4. 2段RCS系統概略

1-4-5. 2段RCS圧力データ

2. 原因究明の状況

2-1. 姿勢異常Fault Tree Analysis(FTA)

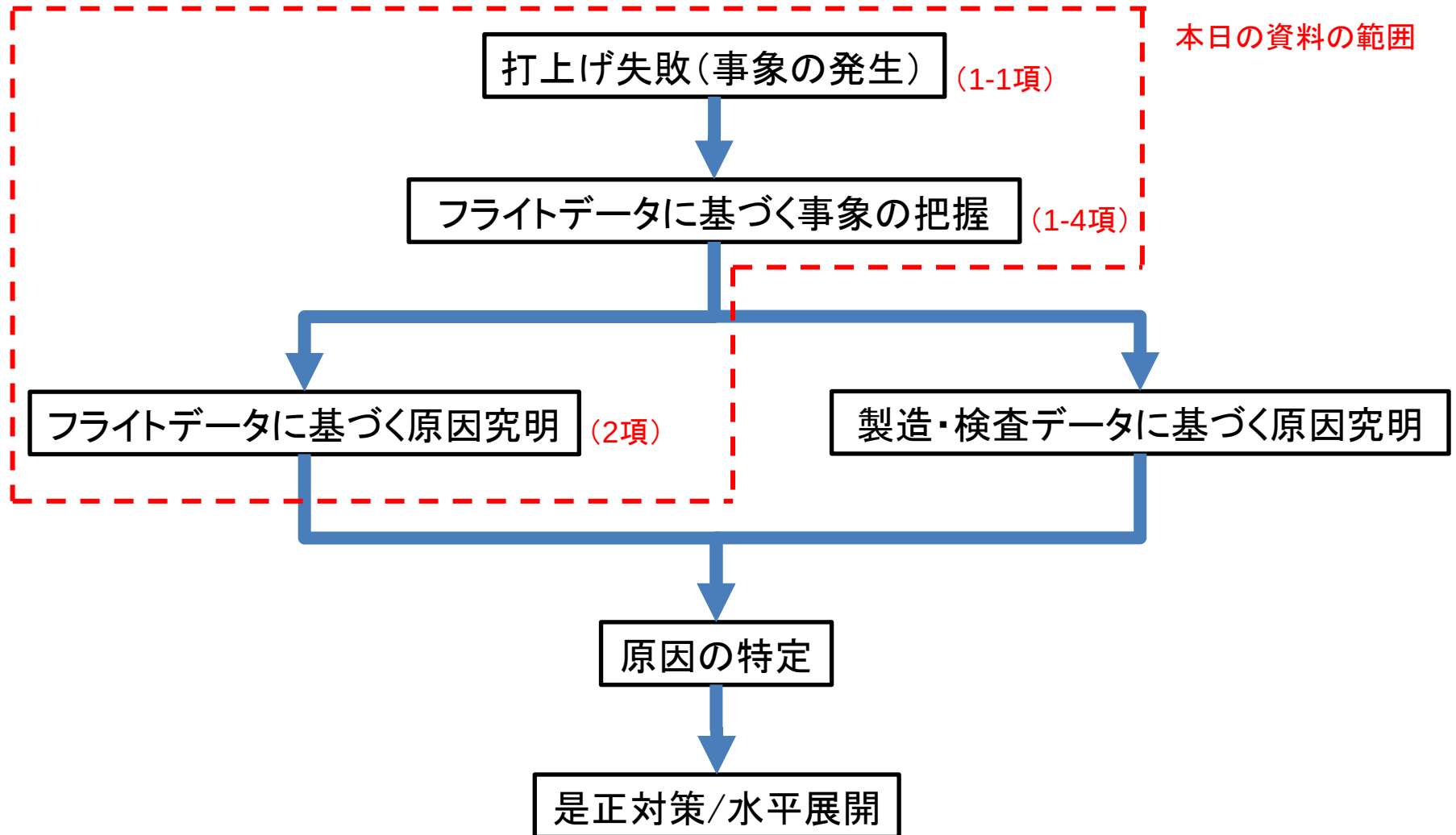
2-2. 圧力異常Fault Tree Analysis(FTA)

3. 今後の進め方

参考資料



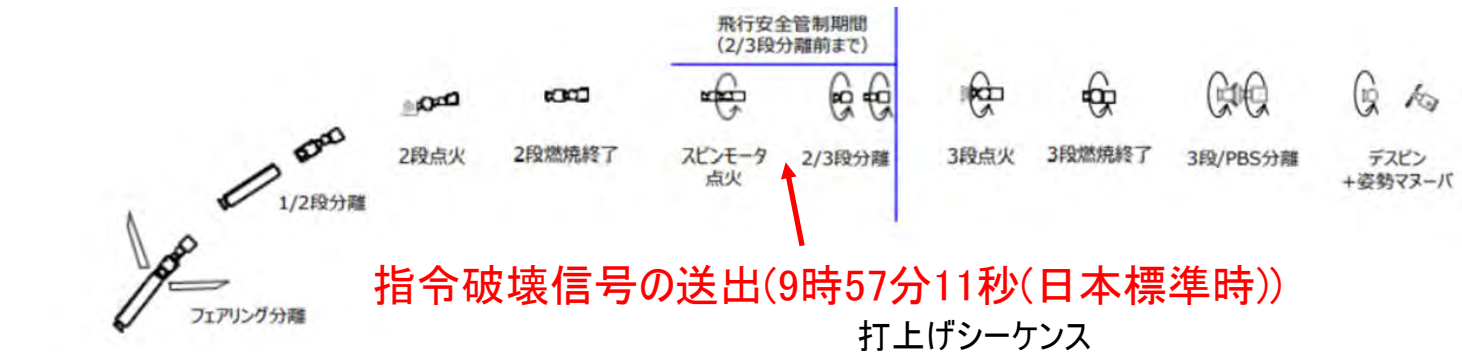
0. 本日の報告内容



1. イプシロンロケット6号機概要

1-1. 打上げ結果

- 2022年10月12日9時50分43秒(日本標準時)に、イプシロンロケット6号機打上げ。
- 2/3段分離可否判断の時点で目標姿勢からずれ、地球を周回する軌道に投入できないと判断し、9時57分11秒にロケットに指令破壊信号を送出し、打上げに失敗。
- 現在、山川理事長を長とする対策本部を設置し、原因究明を進めている。



事象		打上後経過時間			計画値
		時	分	秒	経過秒
(1)	リフトオフ	00	00	0	0
(2)	第1段 燃焼終了	01	49	109	108
(3)	衛星フェアリング分離	02	31	151	151
(4)	第1段・第2段分離	02	41	161	161
(5)	第2段 燃焼開始	02	45	165	165
(6)	第2段 燃焼終了	04	53	293	294
(7)	スピンモータ燃焼開始	06	09	369	370
(8)	スピンモータ燃焼終了	06	14	374	375
(9)	指令破壊	06	28	388	

打上げ時刻

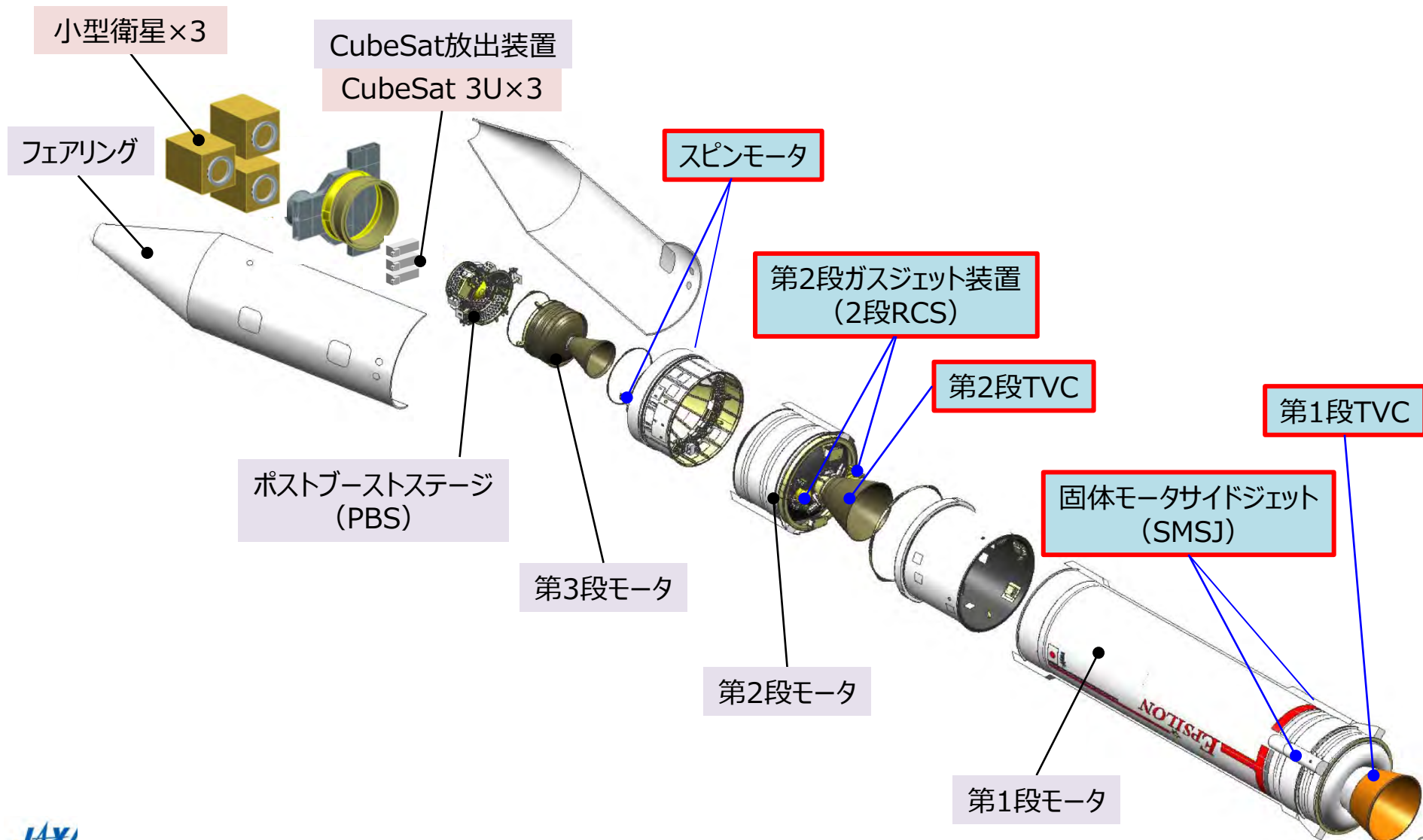
(9時50分43秒(日本標準時))

経過秒は小数点第1位を四捨五入

1. イプシロンロケット6号機概要

1-2. 姿勢制御概要(1)

イプシロンロケットの1段および2段に搭載されている姿勢制御装置を以下の図の赤枠に示す。



1. イプシロンロケット6号機概要

1-2. 姿勢制御概要(2)

2段制御(TVC+RCS)

3段制御(スピン安定)

PBS制御(PBSスラスタ)

2段点火に向けた
目標姿勢変更

3段点火に向けた
目標姿勢変更

2/3段分離可否判断

飛行安全管理期間
(2/3段分離前まで)

2段点火

2段燃焼終了

スピンモータ
点火

2/3段分離

3段点火

3段燃焼終了

3段/PBS分離

デスピン
+姿勢マヌーバ

1/2段分離

フェアリング分離

1段燃焼終了

ロール軸

X_B

0°

270°

ヨー軸

Z_B 180°

ピッチ軸

Y_B 90°

ランチャーブーム

1段点火
垂直打上

1段制御
(TVC+SMSJ)

TVC: Thrust Vector Control

ノズルを可動させることでモータを制御する推力偏向制御システム。1段および2段燃焼時のピッチ軸とヨー軸の制御に使用する。

SMSJ: Solid Motor Side Jet

1段モータ後部にとりつけられた固体推進薬を用いた補助推進系であり、1/2段分離までの3軸制御の機能を有する。ただし、1段燃焼中はロール制御のみを実施する。

RCS: Reaction Control System

2段モータに搭載される1液式ガスジェット装置であり、1/2段分離からスピンモータ点火までの3軸制御の機能を有する。ただし、2段モータ燃焼中はロール制御のみを実施する。

スピンモータ

固体推進薬を用いた補助推進系であり、2/3段分離前にロール軸にスピンを与え、ジャイロ効果によって姿勢の安定性(スピン安定)を確保するために使用する。

イプシロンロケットの座標系

1. イプシロンロケット6号機概要

1-3. 発生事象の内容

飛行状況

- イプシロンロケット6号機の打上げ後、1段モータ燃焼、フェアリング分離、1/2段分離、2段モータ燃焼は正常であり、飛行経路はノミナル経路に対して正常範囲内にあった。
→【1-4-1. 飛行状況】

- 2/3段分離可否判断(※1)の時点で目標姿勢からずれ、地球を周回する軌道に投入できないと判断し、リフトオフから388秒後に飛行中断に至った。

※1: イプシロンロケットの第3段燃焼中はスピンにより機体姿勢の安定を確保している。そのため、2/3段分離前に第3段が軌道投入可能かどうかの判定(2/3段分離可否判断)を行っている。

- 事態発生後、速やかに関係省庁等へ飛行中断の連絡を行うとともに、指令破壊による破片の落下予測域を航空局・海上保安庁に通報し安全の確保に努めた。航空局及び海上保安庁では電子的な警報手段により国際的な周知を図っており、同警報が発信されていたことは航空局及び海上保安庁に確認済。なお、指令破壊後の破片は、予め計画された第2段落下予想区域内に落下したと解析している。
→【1-4-1. 飛行状況】

機体状況

- 1段モータ燃焼中のTVC制御およびSMSJによる姿勢制御は正常に行われ、2段モータ燃焼中のTVC制御も正常。その後RCSによる制御のみになった際に3軸全ての姿勢角誤差がRCS制御終了まで拡大し続けた(2段燃焼終了後姿勢異常)。
→【1-4-2、1-4-3. 2段姿勢制御方式、姿勢角誤差】

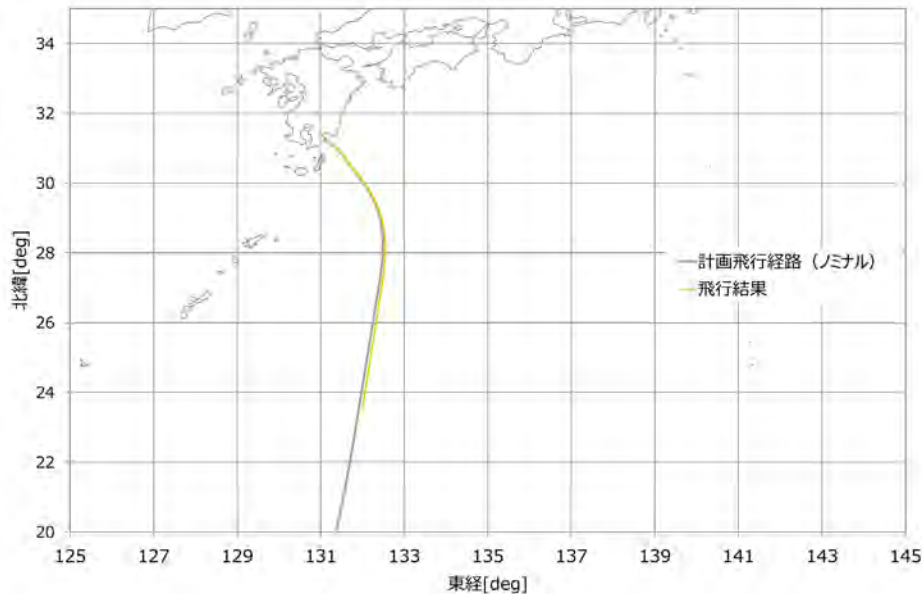
- 2系統あるRCSの1系統(+Y側)の下流配管圧力がタンク圧力まで上昇せず、RCSとして機能しなかった。
→【1-4-4、1-4-5. 2段RCS系統概略、圧力データ】

1. イプシロンロケット6号機概要

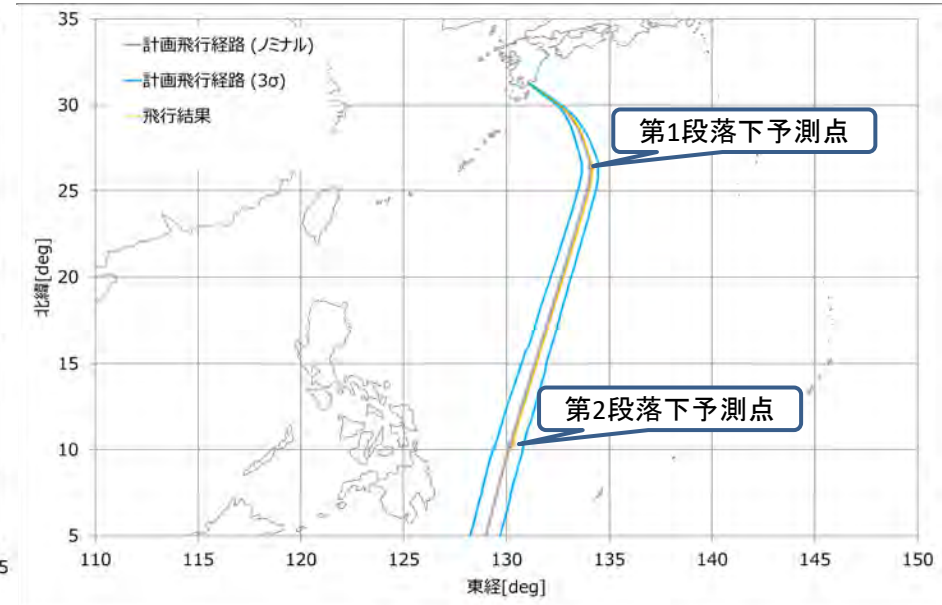
1-4. 発生事象の内容

1-4-1. 飛行状況(1)

飛行経路と第1段および第2段の落下予測点は、リフトオフから飛行中断まで計画の範囲内であり正常であった。



飛行経路
(ロケットの位置)



落下予測点

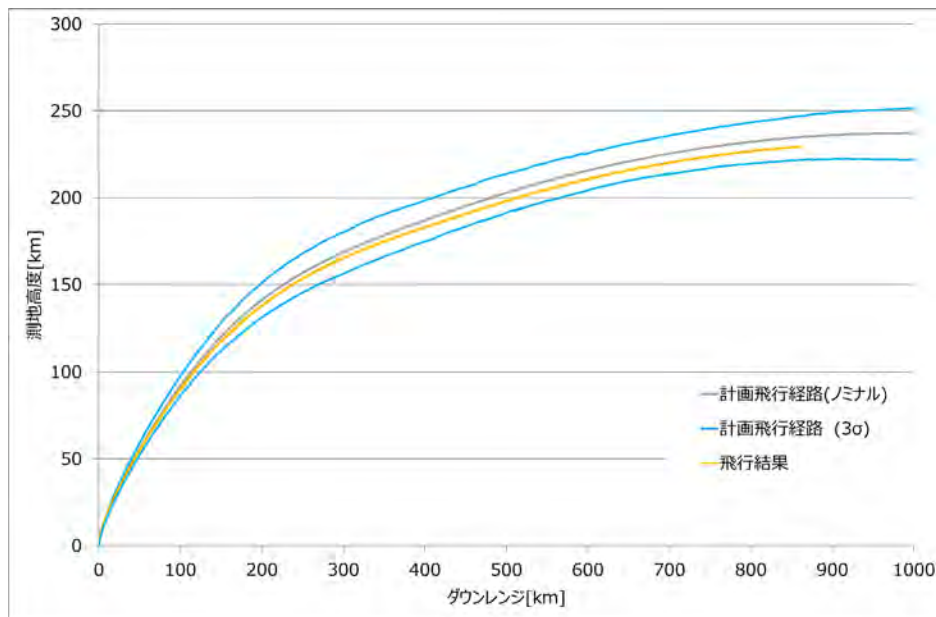
(ある時点でロケットの飛行を中断した場合の、ロケットの落下予測点)

1. イプシロンロケット6号機概要

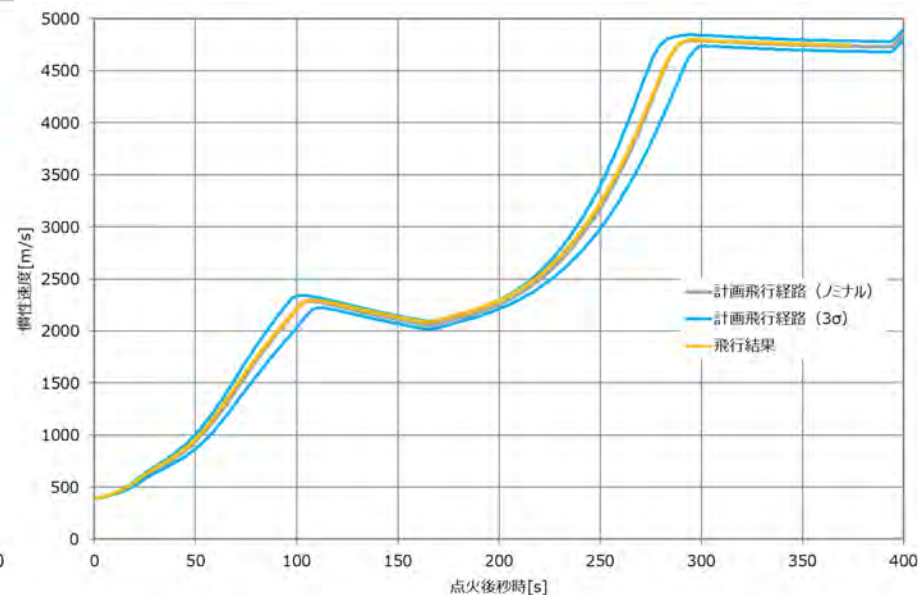
1-4. 発生事象の内容

1-4-1. 飛行状況(2)

測地高度と慣性速度はリフトオフから飛行中断まで計画の範囲内であり正常であった。



ダウンレンジー測地高度



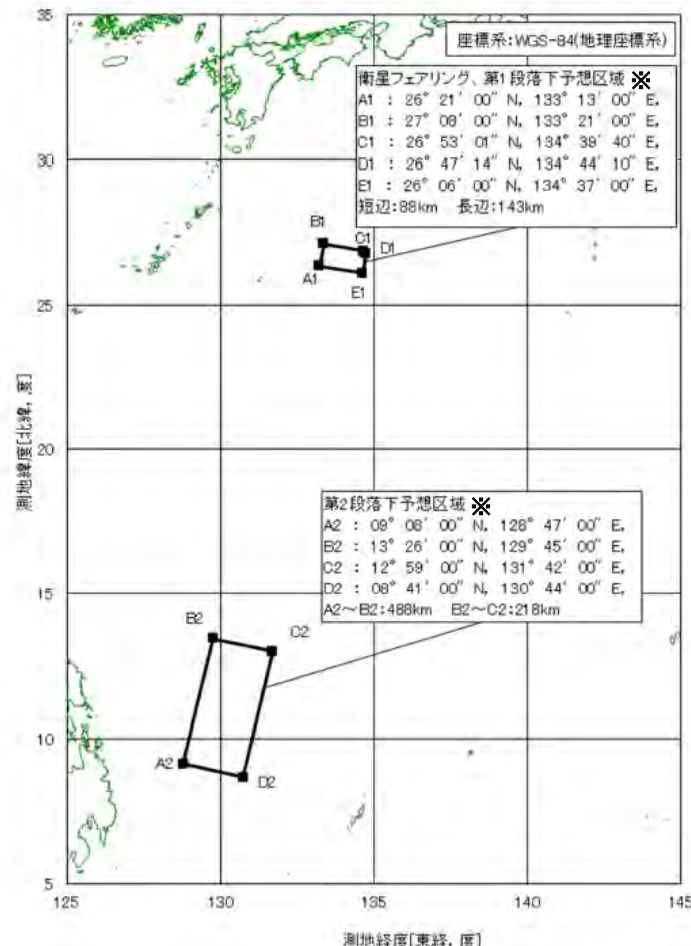
慣性速度

1. イプシロンロケット6号機概要

1-4. 発生事象の内容

1-4-1. 飛行状況(3)

飛行中断は2/3段分離直前であるため、指令破壊後の破片は予め計画された第2段落下予想区域内に落下したと解析している。



※: 落下予想区域は、打上げに係る情報の一部として国土交通省および海上保安庁等に対して事前に通知しているエリアであり、通知先各機関により、航空機および船舶に対する安全確保に係る対応(航行規制および規制情報の周知)を実施頂いているエリアである。

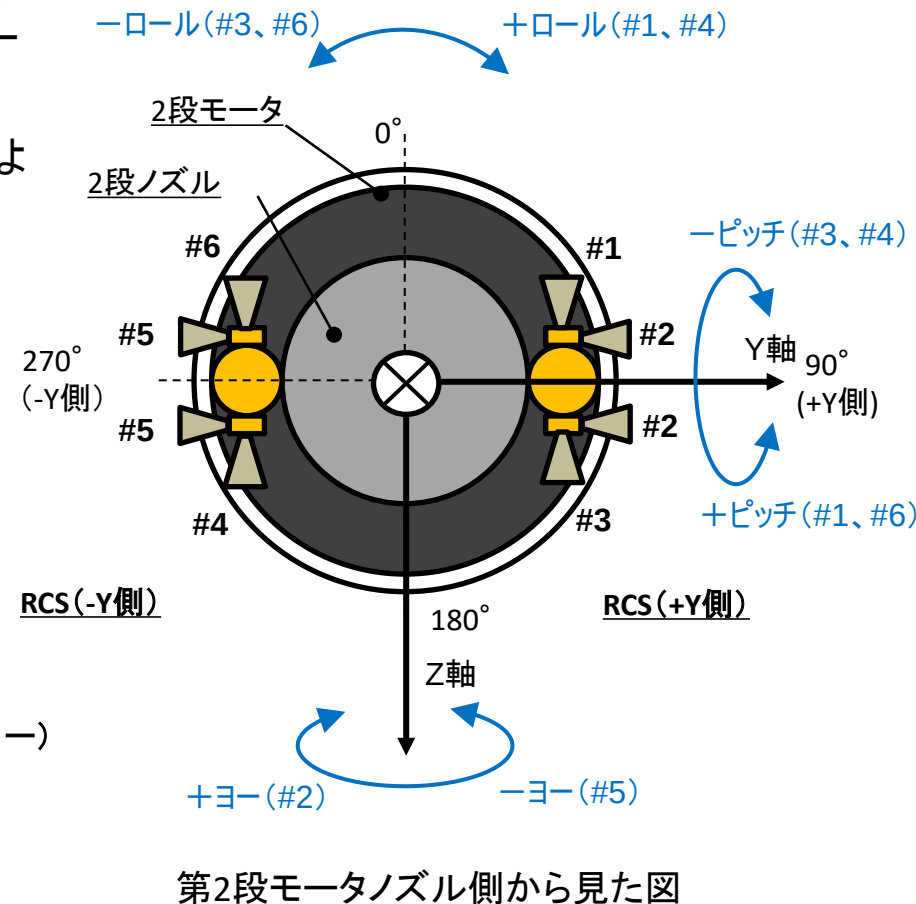
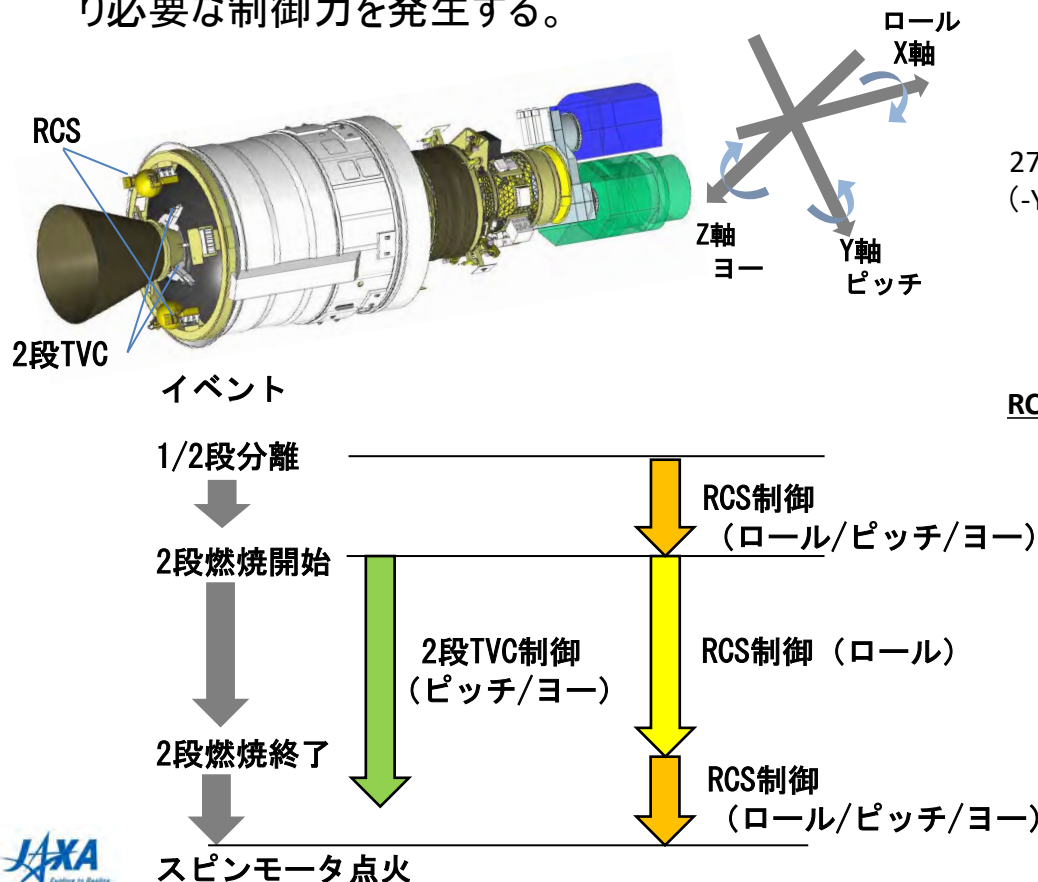
飛行計画に基づく投棄物落下予想区域

1. イプシロンロケット6号機概要

1-4. 発生事象の内容

1-4-2. 2段姿勢制御方式

- 2段燃焼中はTVCによりピッチ軸とヨー軸を、RCSによりロール軸を制御し、2段燃焼前後はRCSにより3軸（ロール軸、ピッチ軸、ヨー軸）を制御する。
- RCSには計8基のスラスタがあり、右図の組み合わせにより必要な制御力を発生する。



1. イプシロンロケット6号機概要

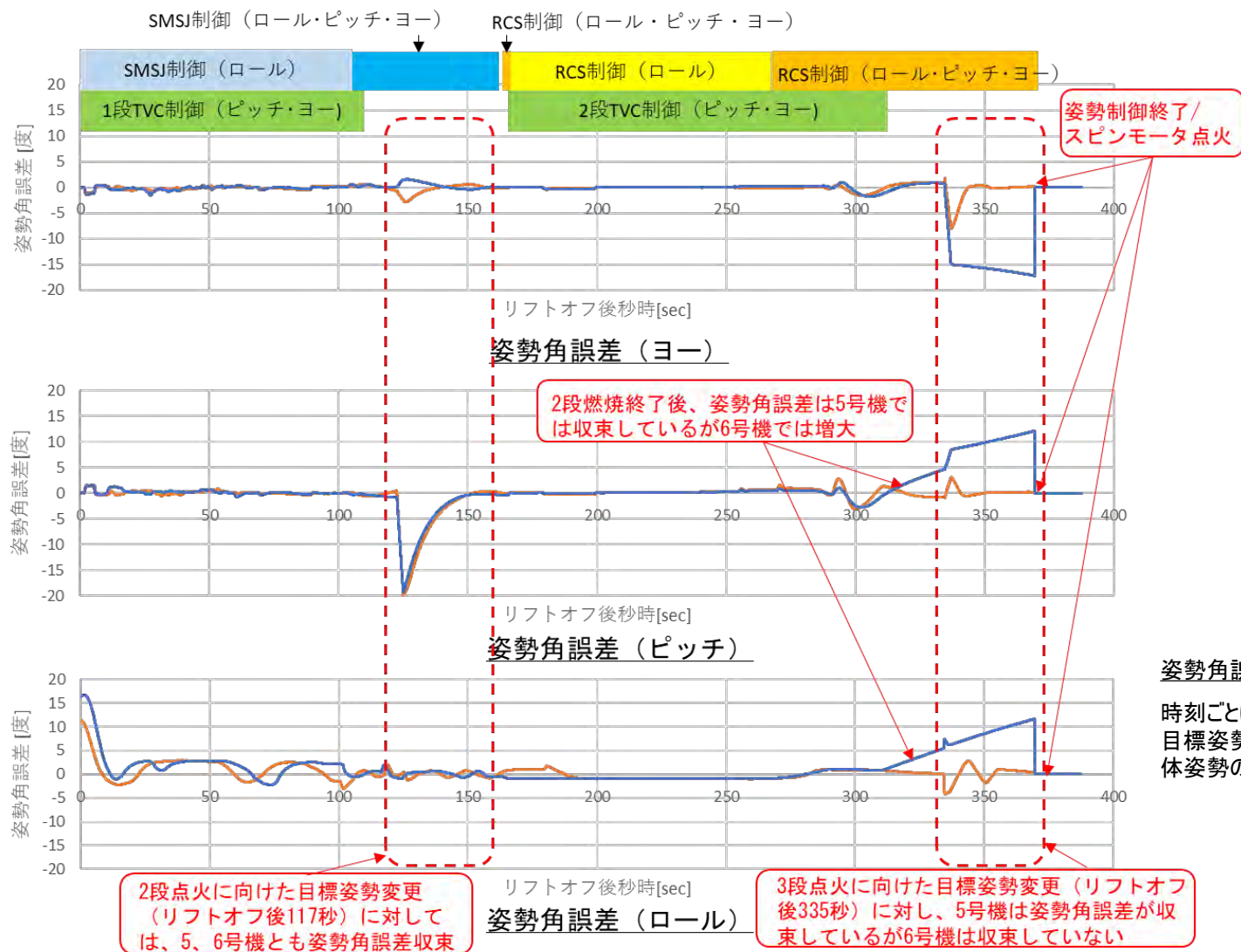
1-4. 発生事象の内容

1-4-3. 姿勢角誤差(1)

(参考) 5号機との比較

— 5号機

— 6号機

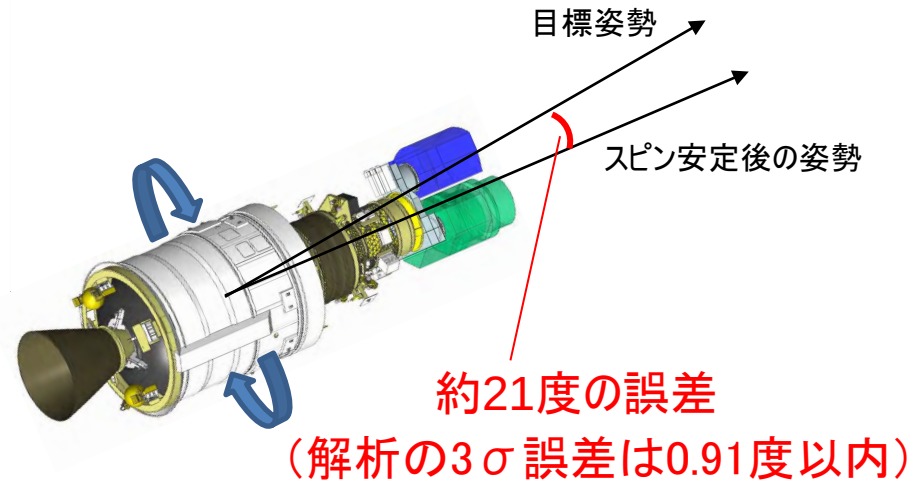
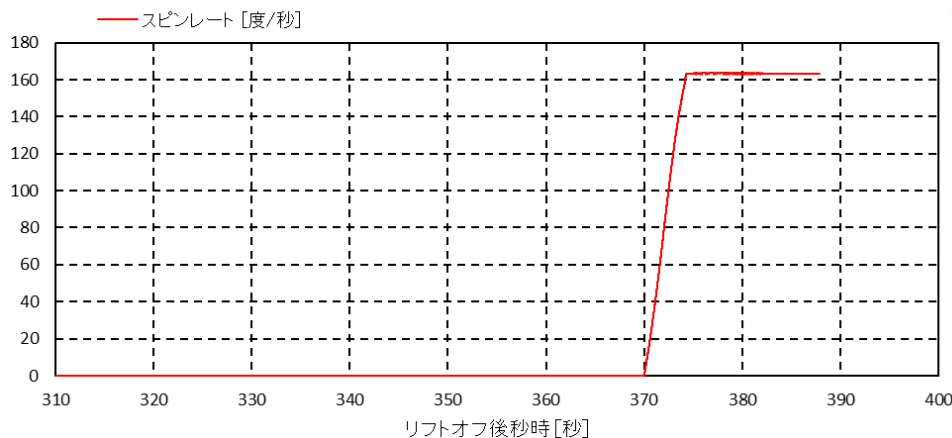
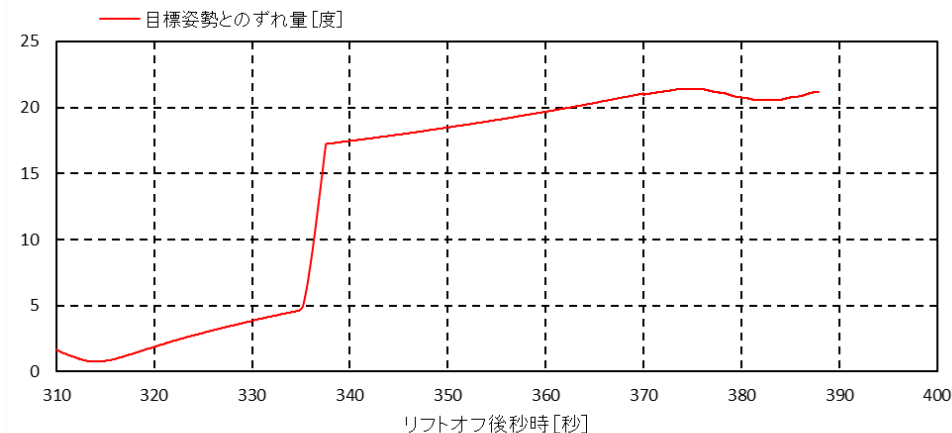


1. イプシロンロケット6号機概要

1-4. 発生事象の内容

1-4-3. 姿勢角誤差(2)

RCS制御終了/スピンモータ点火時点(リフトオフ後370秒)で目標姿勢とのずれ量は約21度であった。その後スピンモータは計画通り正常に燃焼し、前述の目標姿勢とのずれ量は維持されたままスピン安定姿勢となった。

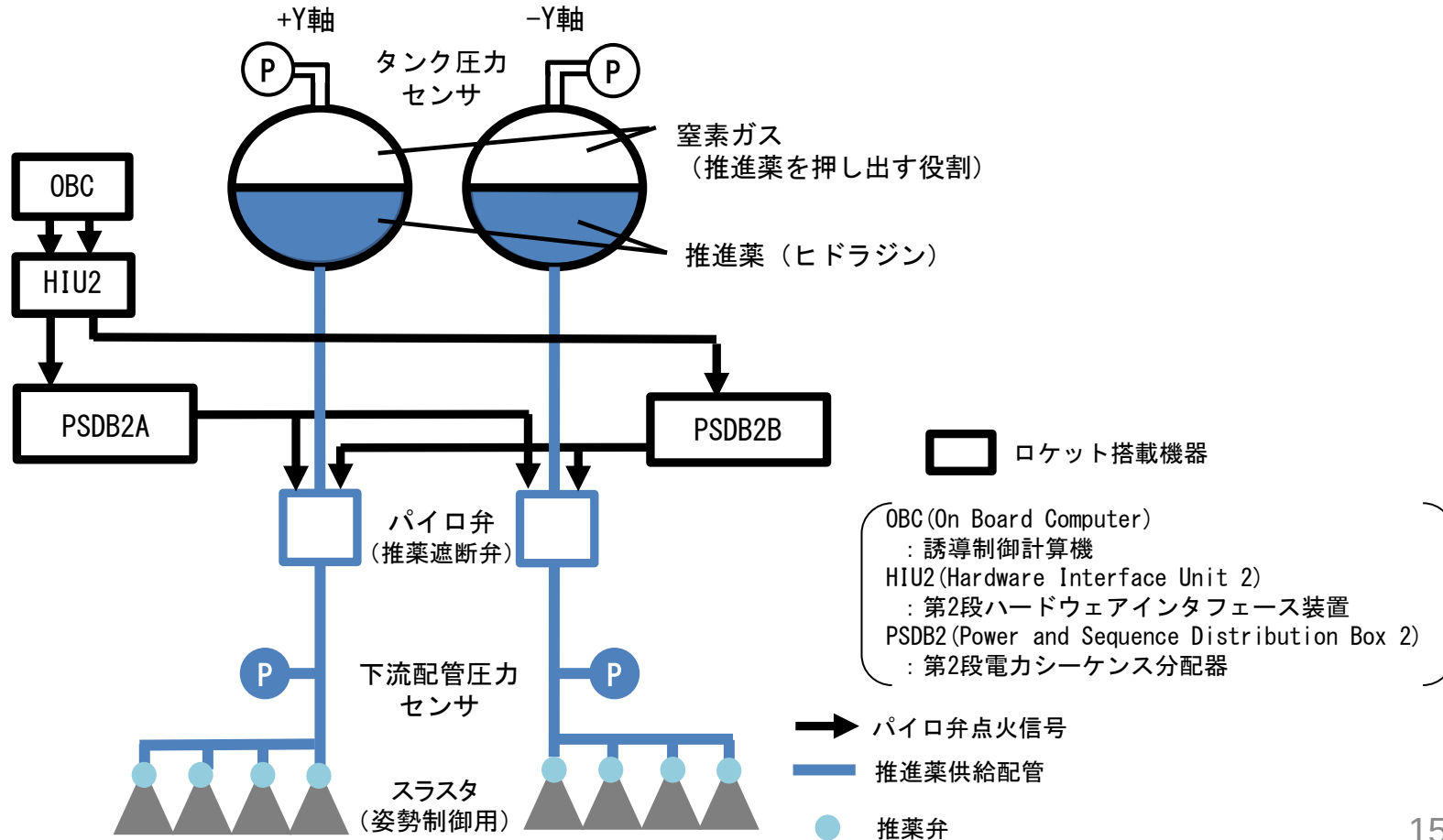


1. イプシロンロケット6号機概要

1-4. 発生事象の内容

1-4-4. 2段RCS系統概略

- 射場では安全のために推進薬をパイロ弁（推薬遮断弁）で遮断しており、飛行中に誘導制御計算機からの信号（点火信号系統は冗長構成）でパイロ弁を開にしてスラスト直近まで推進薬を送る。
- 誘導制御計算機からの信号により推薬弁を開閉させ、触媒反応による燃焼により推力を発生させる。

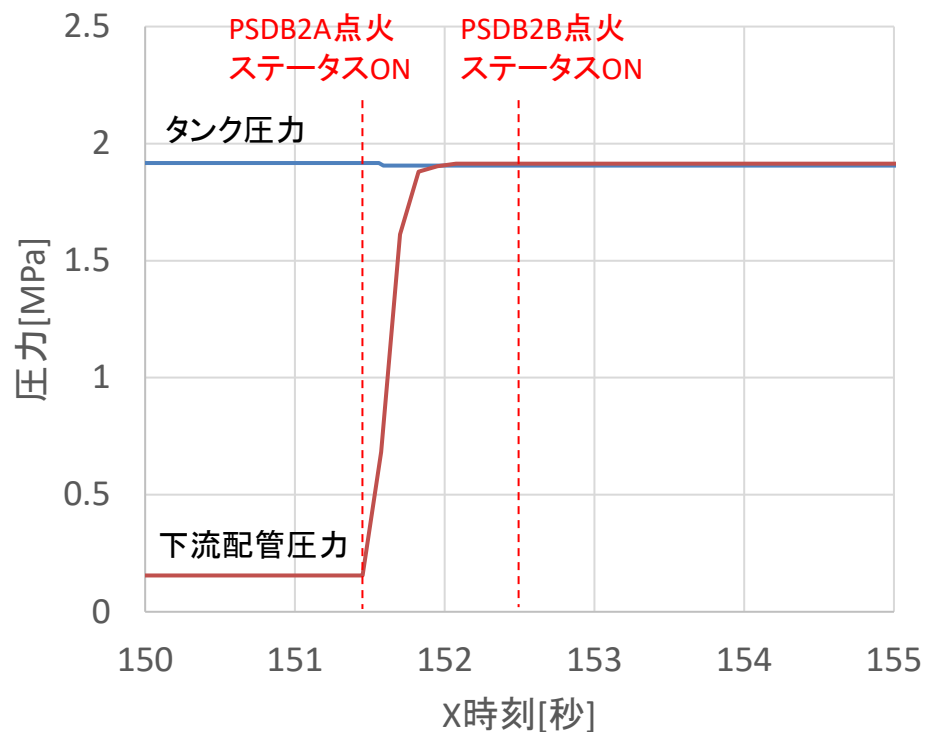


1. イプシロンロケット6号機概要

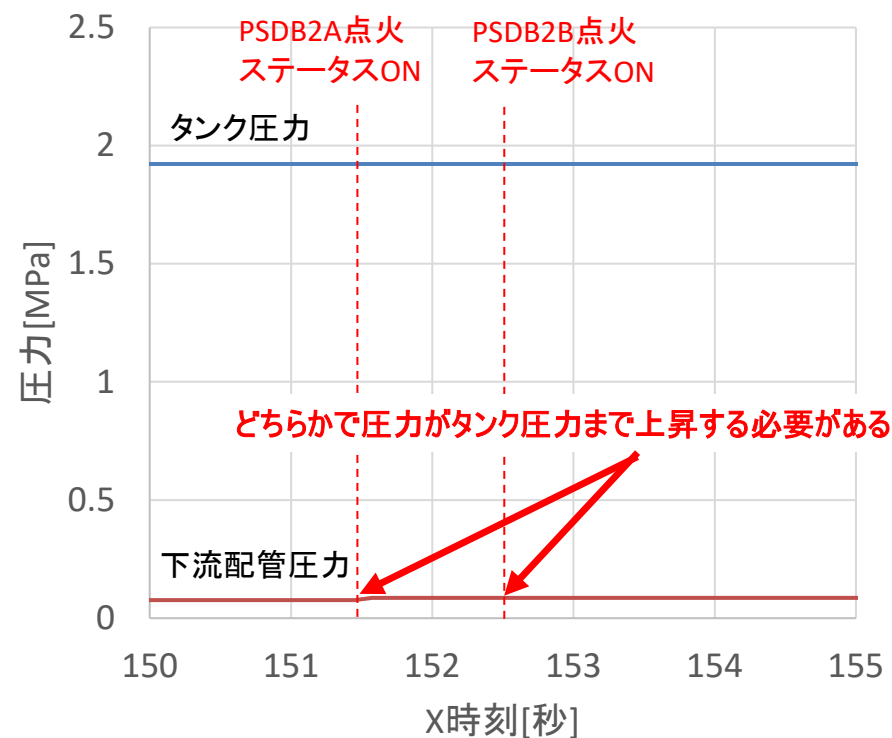
1-4. 発生事象の内容

1-4-5. 2段RCS圧力データ

- 本来であれば、X+151.5秒、X+152.5秒に送出されたパイロ弁点火信号のどちらかの信号によりパイロ弁が開動作し、タンク側からパイロ弁下流配管にヒドラジンが流入することにより、下流配管圧力がタンク圧力まで上昇する。
- 6号機では、2つのRCSの内、片方の-Y軸側(左図)は上記圧力挙動を示しているが、もう片方の+Y軸側(右図)はPSDB2からのパイロ弁点火信号送出後も下流配管圧力がタンク圧力まで上昇していない。



-Y軸側



+Y軸側

2. 原因究明の状況

2-1. 姿勢異常Fault Tree Analysis(FTA)

2段燃焼終了後姿勢異常に対してFTA(Fault Tree Analysis ※)を実施し、飛行中に取得したフライトデータに基づいて要因の絞り込みを行った。
結果として、2段RCSの片方が機能していない(片方の+Y軸側の下流配管圧力がタンク圧力まで上昇してない)ことが原因であると特定した。

事象	1次要因	フライトデータ確認結果
2段燃焼終了後姿勢異常	2段TVC異常	× 2段TVC制御期間中、正常に姿勢制御できている。
	2段RCS異常	○ 2段燃焼終了後のRCSのみの3軸制御フェーズで姿勢誤差が増大している。 パイロ弁点火信号発出後も+Y軸側(90°側)の下流配管圧力がタンク圧力まで上昇していない。
	スピンモータ異常	× スピンモータ点火前に姿勢異常が発生している。 スピンモータの燃焼パターンは予測と一致している。
	計測異常	× 姿勢制御に必要な慣性センサ(IMU)の出力は、飛行中断まで他のセンサの位置・速度・姿勢データと傾向が一致している。

(凡例)

○:原因である

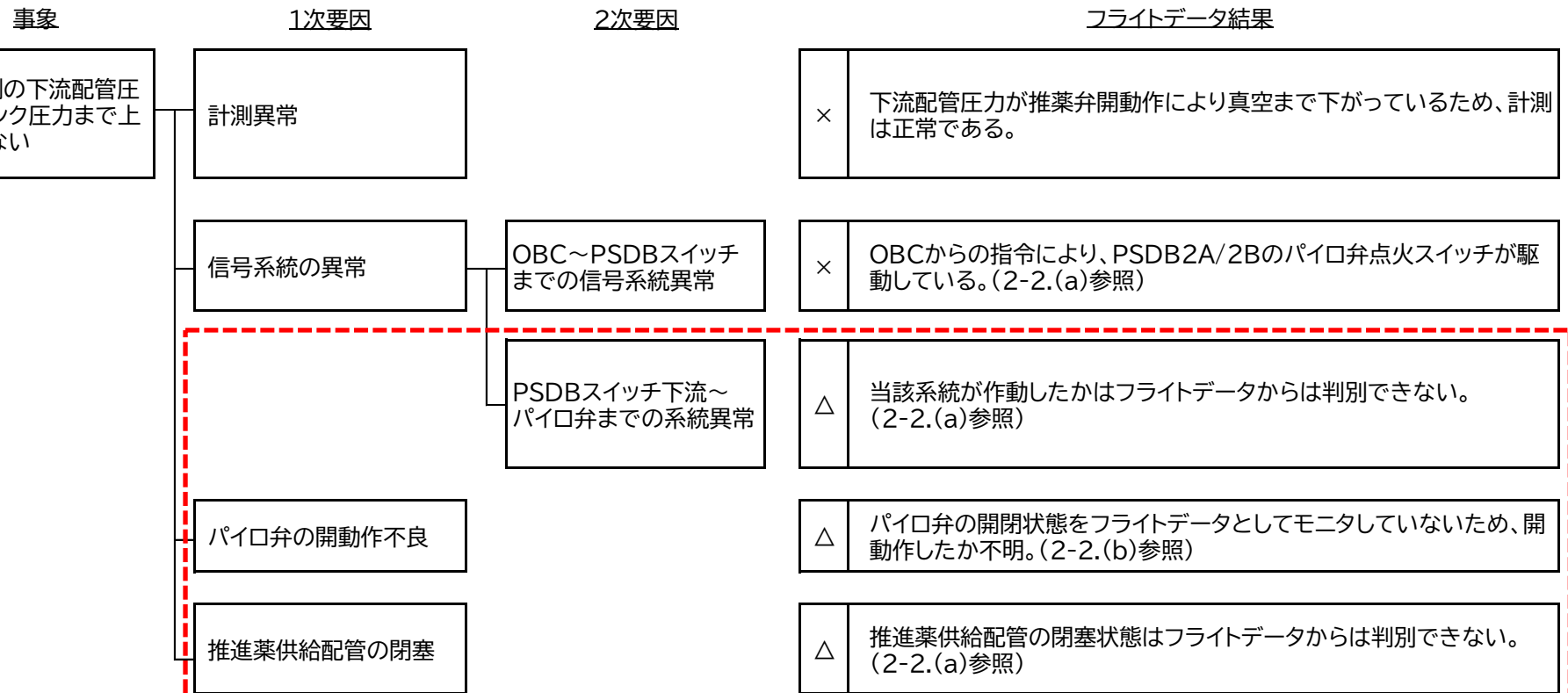
△:原因の可能性を否定できない

×:原因ではない

2. 原因究明の状況

2-2. 圧力異常Fault Tree Analysis (FTA)

- +Y側モジュールの下流配管圧力がPSDBからのパイロ弁点火信号送出後もタンク圧力まで上昇していない事象についてFTAを展開し、フライトデータに基づき、「PSDBスイッチ下流～パイロ弁までの系統異常」、「パイロ弁の開動作不良」、「推進薬供給配管の閉塞」の3要因に絞り込んだ。



(凡例)

○:原因である

△:原因の可能性を否定できない

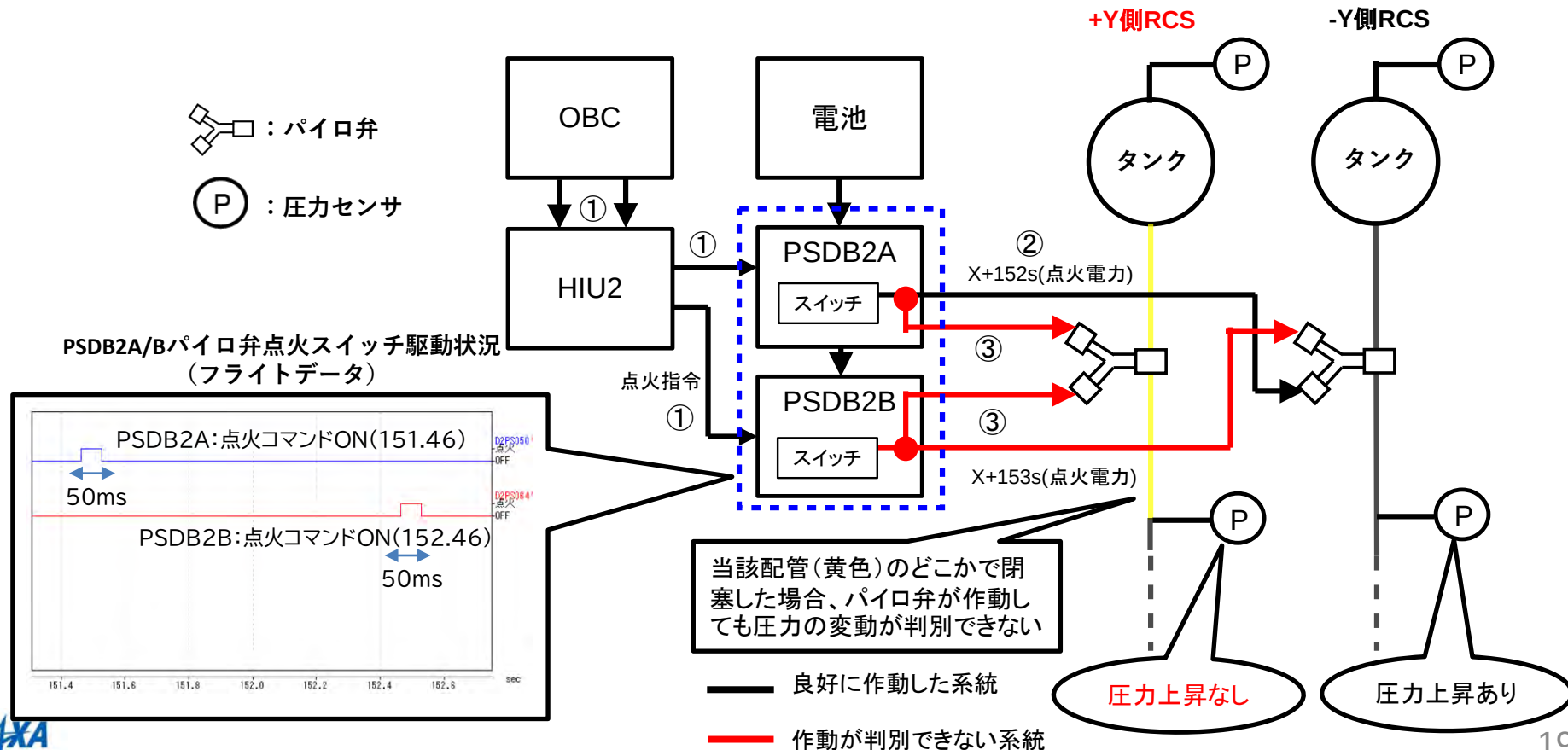
×:原因ではない

2. 原因究明の状況

2-2. 圧力異常Fault Tree Analysis(FTA)

(a) パイロ弁点火信号系統

- PSDB2A/2Bの点火コマンドがONになっているため、OBC～PSDB2A/2Bの点火指令系統は正しく作動した(下図①)。
- -Y軸の下流配管圧力がタンク圧力まで上昇したことから、PSDB2A～-Y軸パイロ弁の系統は正しく作動した(下図②)。
- 上記以外の系統の作動はフライトデータ上は判別できない(下図③)。

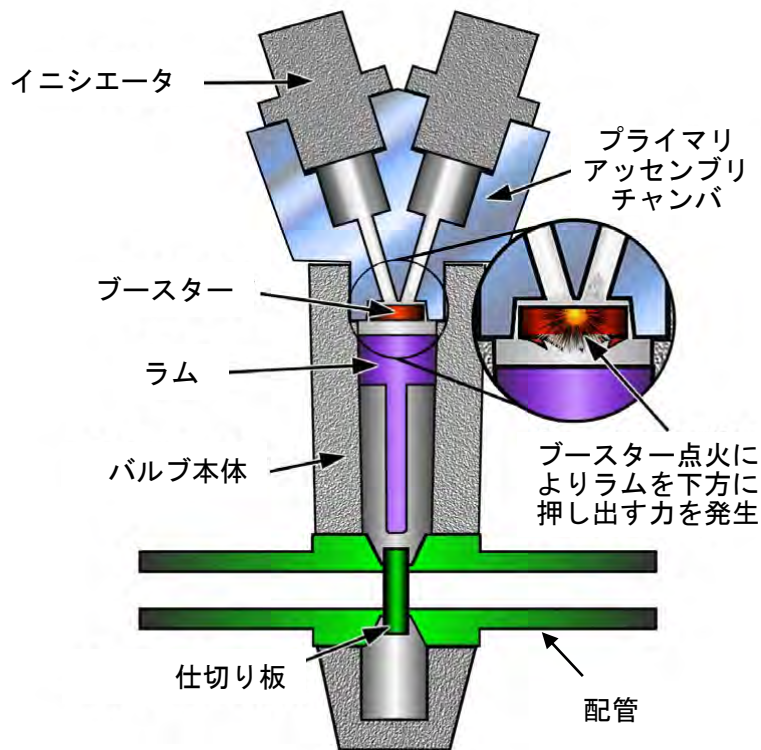


2. 原因究明の状況

2-2. 圧力異常Fault Tree Analysis(FTA)

(b) パイロ弁の概要

- パイロ弁は、飛行前は推進薬を遮断し、飛行中に火工品（イニシエータ、ブースター）の点火により流路を開通させるバルブ。
- イニシエータは冗長構成であり、2つのうち1つが点火すれば流路は開通する。



【動作原理】

- ① イニシエータに点火
- ② ブースターに点火
- ③ ラムを下方へ押し出す
- ④ 配管の仕切り板をラムが打ちぬく
- ⑤ 流路が開通する

パイロ弁の構成・動作イメージ図

『NASA Engineering and Safety Center Technical Bulletin No. 10-02』より抜粋

3. 今後の進め方

- フライトデータを基に2段燃焼終了後姿勢異常に対する要因分析を行った結果、+Y側(2系統の内の1系統)の2段RCS(ガスジェット装置)が機能しなかったことが判明した。(姿勢異常の原因箇所として特定)
- 2段RCS(ガスジェット装置)が機能しなかった要因として、+Y側のRCSの下流配管圧力がタンク圧力まで上昇していなかった。これまでの原因究明の結果、その上昇のきっかけとなるパイロ弁点火信号(信号は発信されたことを確認)送出後に以下の3つの要因の可能性が否定できない状況。
 - ✓ PSDBスイッチ～パイロ弁までの系統異常
 - ✓ パイロ弁の開動作不良
 - ✓ 推進薬供給配管の閉塞
- 引き続き、フライトデータの詳細な分析と製造・検査データの確認を進め、更なる原因究明、是正対策/水平展開の検討を進めていく。

<参考>

- ✓ H3の1段CFT(1段実機型タンクと1段エンジン(LE-9)を組み合わせた地上燃焼試験)は上記の事象とは直接関係しないため計画通り11月に実施予定。
- ✓ イプシロンSロケット適用に向けて開発中の冗長複合航法システム(RINS)の飛行実証については当初よりリフトオフから2段スピナップ前までのフライトデータを用いて評価する計画であり、評価に必要なフライトデータを良好に取得した。今後詳細データ評価を実施する。

参考資料

イプシロンロケット6号機 機体諸元

■ 6号機はオプション形態（小型液体推進系（PBS）付）。複数衛星搭載に対応。



項目		機体諸元
全長		26m
直径		最大径: $\phi 2.6$
全備質量		96ton
段構成		固体3段式 + PBS
衛星分離		小型実証衛星3号機: Lightband*1、受託衛星: Lightband*2、キューブサット: E-SSOD*3
衛星搭載		複数衛星搭載構造Ⅲ型(IA新規開発)
フェアリング		投棄部: 9187mm、非投棄部: 450mm
PBS	推進薬タンク	$\phi 650 \times 1$ 基(1液ヒドラジン)
	姿勢制御	PBSスラスタ(3軸)
第3段	モータ	KM-V2c (ノズル非伸展)
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	スピン安定
第2段	モータ	M-35 ($\phi 2.6$ m) (ノズル非伸展)
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	TVC+RCS
第1段	モータ	SRB-A
	推進薬	ポリブタジエン系コンポジット
	姿勢制御	TVC + SMSJ

*1) Planetary Systems Corporation社製Lightband® 18.25 inchタイプ、*2) Planetary Systems Corporation社製Lightband® 15 inchタイプ、*3) キューブサット放出装置(E-SSOD:Epsilon Small Satellite Orbital Deployer)、