

# 「あかつき」の金星周回軌道投入失敗に係る原因究明と対策について(その2)

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

2010年12月27日

1

## 目次

- 0. 第2回調査部会報告内容サマリ
  - 1. FTAの詳細化
    - 1.1 システムFTA
    - 1.2 フィルムクーリング噴射方向異常FTA
    - 1.3 スロート後方後燃えFTA
    - 1.4 不安定燃焼FTA
    - 1.5 インジェクタ噴射方向異常FTA
    - 1.6 FTAサマリ
  - 2. CV-F閉塞原因究明
    - 2.1 逆止弁の概要
    - 2.2 推進系の軌道上での履歴
    - 2.3 逆止弁の軌道上環境
    - 2.4 CV-F閉塞量の推定
    - 2.5 逆止弁閉塞の原因推定
    - 2.6 逆止弁閉塞の原因推定のまとめ
  - 3. 逆止弁の閉塞からOME燃焼停止に至るシナリオ
    - 3.1 タンク圧カプロフィールの考察
    - 3.2 VOI-1噴射中の推薬供給量の推定
    - 3.3 加速度プロフィールの考察
    - 3.4 VOI-1噴射中のOME作動履歴
    - 3.5 設計条件を逸脱した燃焼状態(想像図)
    - 3.6 VOI-1噴射中の探査機外乱トルクの推定
    - 3.7 探査機の姿勢異常判定指標の動き
    - 3.8 逆止弁(CV-F)閉塞から燃焼停止に至る推定シナリオ
  - 4. 不具合原因究明のための検証計画
    - 4.1 逆止弁の不具合原因究明
    - 4.2 OMEが受けた影響の評価
    - 4.3 検証スケジュール
  - 5. 第2回調査部会報告のまとめ
- 付録
- A1. 探査機概要
  - A2. 配管系統図
  - A3. 第1回調査部会時のFTA(修正版)

2

# 0. 第2回調査部会報告内容サマリ

第1回宇宙開発委員会調査部会において、あかつき金星周回軌道投入失敗について、下記内容を報告した。

**第1回調査部会における報告内容**  
 あかつきの概要と現状の確認  
 軌道投入制御の計画と実際(事実報告)  
 現在までに取得されている情報の総括(探査機の現在の状況確認を含む)  
 FTA (Fault Tree Analysis: 故障の木解析: 推定原因の洗い出し)

第2回調査部会においては、第1回調査部会で報告したFTAで洗い出された推定原因の詳細ブレイクダウンを行った結果を報告する。また、推定された原因事象から、探査機で計測されたデータとの整合性を確認し、原因事象を検証するための試験などの計画を立案したことを報告する。

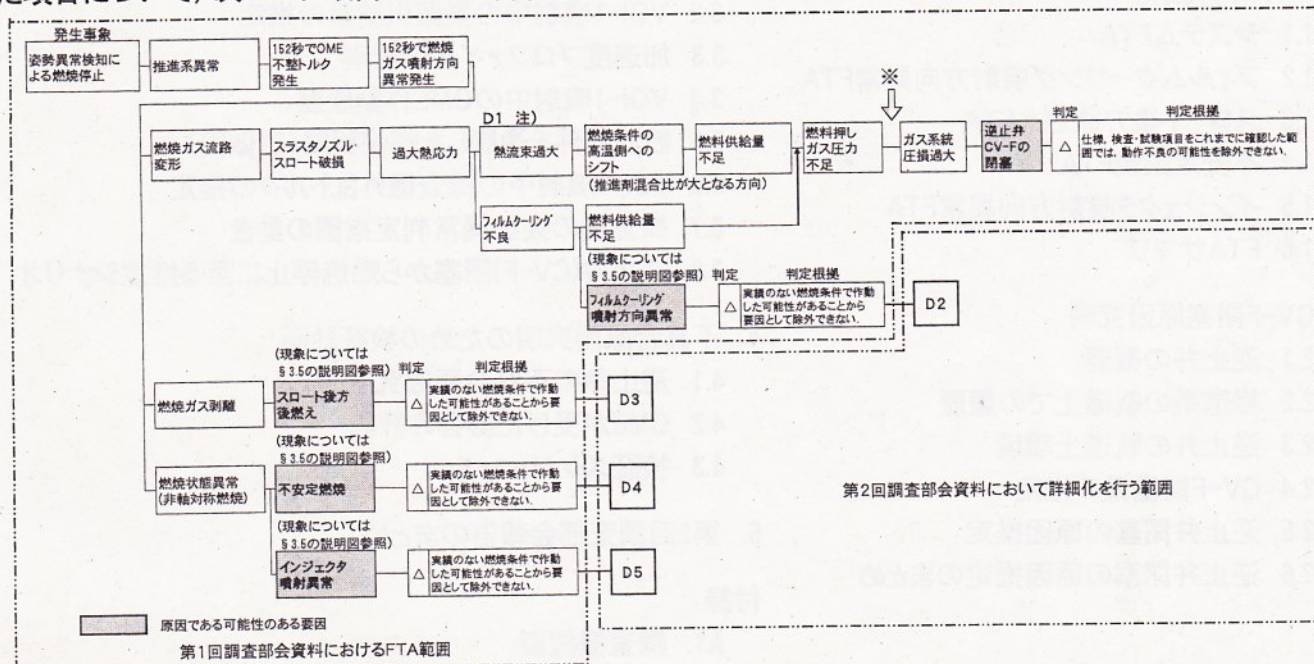
**第2回調査部会における報告内容**  
 FTAで洗い出された推定原因の詳細ブレイクダウン  
 詳細ブレイクダウンから導かれた推定原因である燃料系逆止弁閉塞の原因究明  
 燃料系逆止弁が閉塞したことによる金星軌道投入時失敗の推定シナリオ  
 推定原因究明のための検証計画

3

## 1. FTAの詳細化

### 1.1 システムFTA

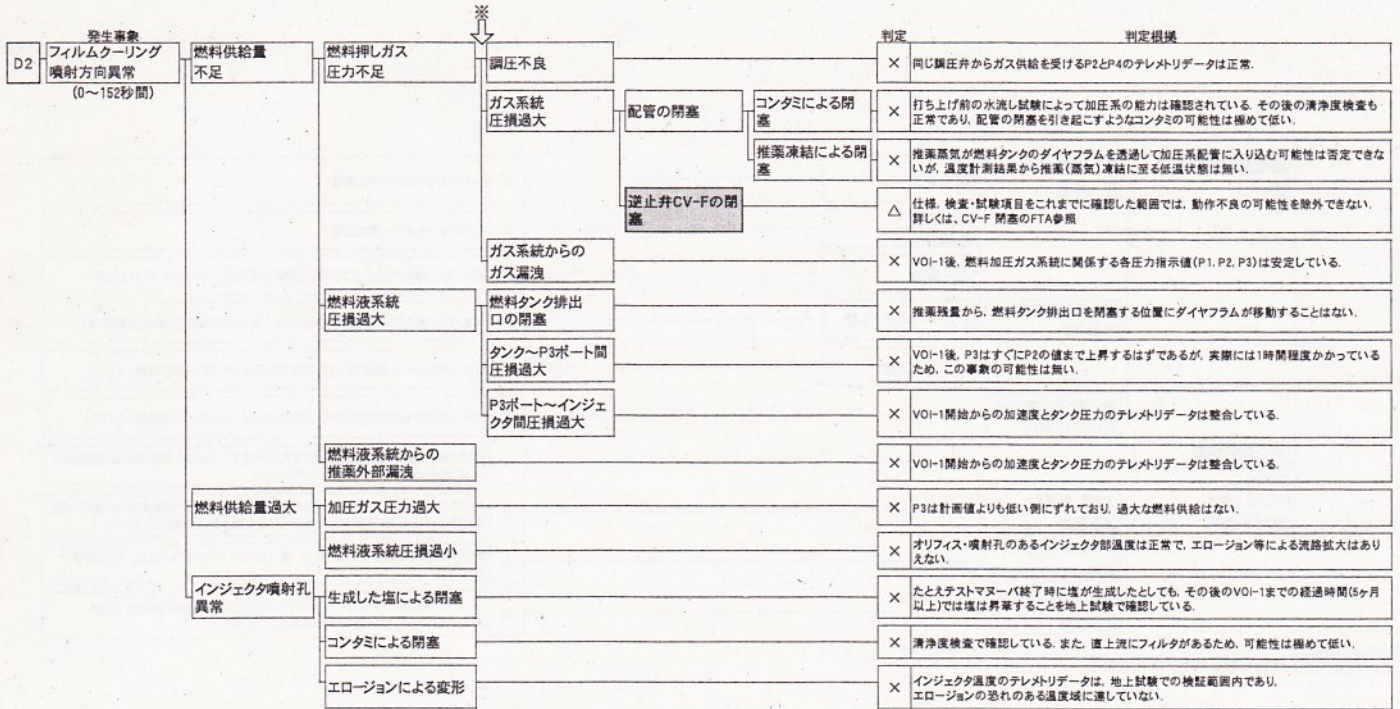
第1回調査部会で報告したFTA(巻末A3参照)において、判定を“△”としたものを下記にまとめる。“△”と判定した項目について、次ページ以降でFTAの詳細ブレイクダウンを実施し、要因事象の絞込みを行った。



※ 今回の原因調査におけるFTAにおいて燃料タンク圧力P3の低下を反映させた箇所を示す。  
 注) D1～D5は、後のFTAおよび検証計画と対応づけるために付与した整理番号である。

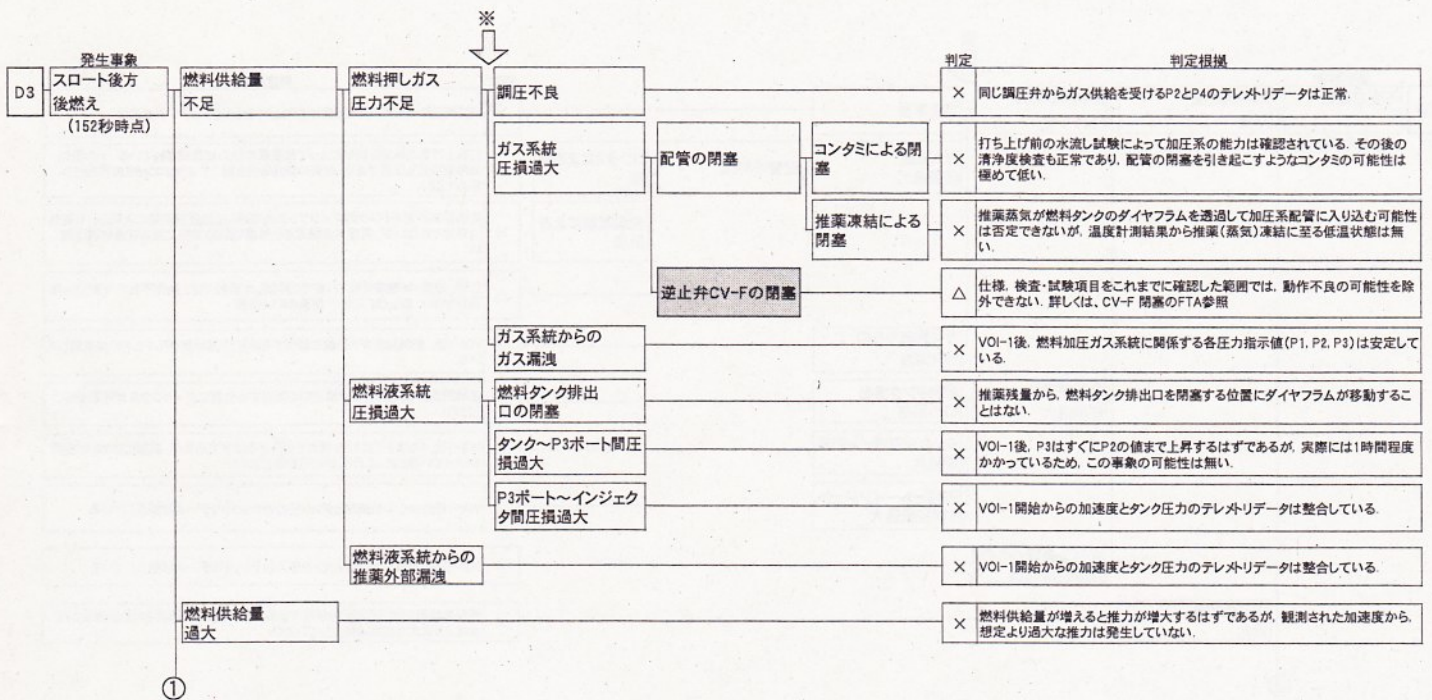
4

# 1.2 フィルムクーリング噴射方向異常FTA



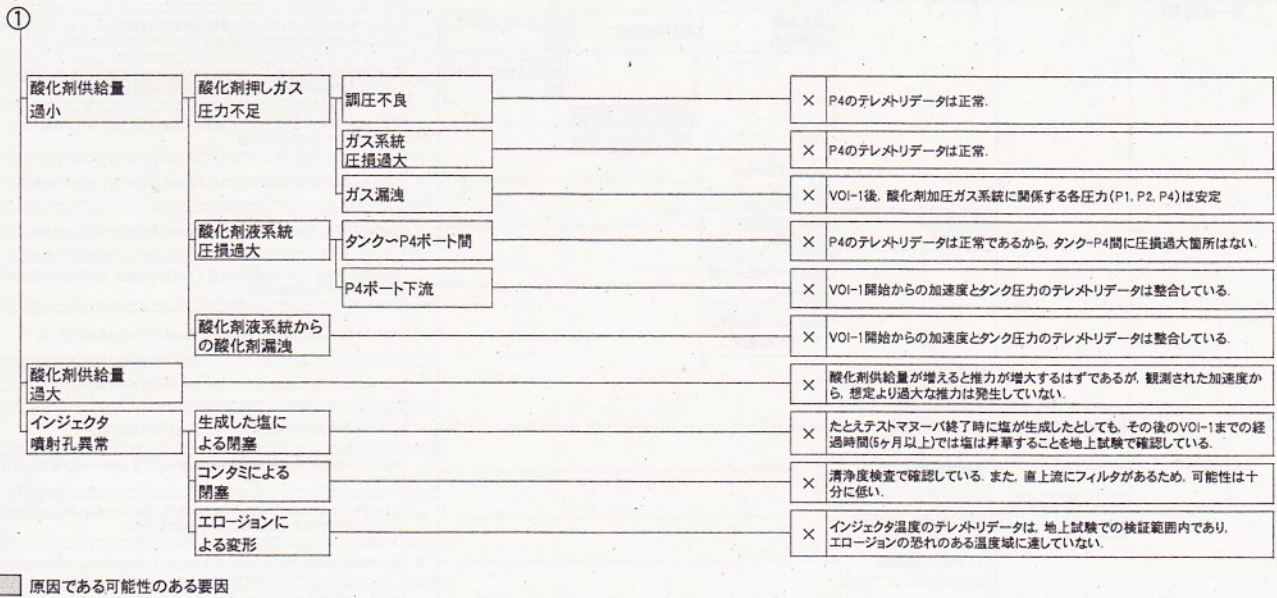
※ このFTAにおいて燃料タンク圧力P3の低下を反映させた箇所を示す  
 原因である可能性のある要因

# 1.3 スロート後方後燃えFTA

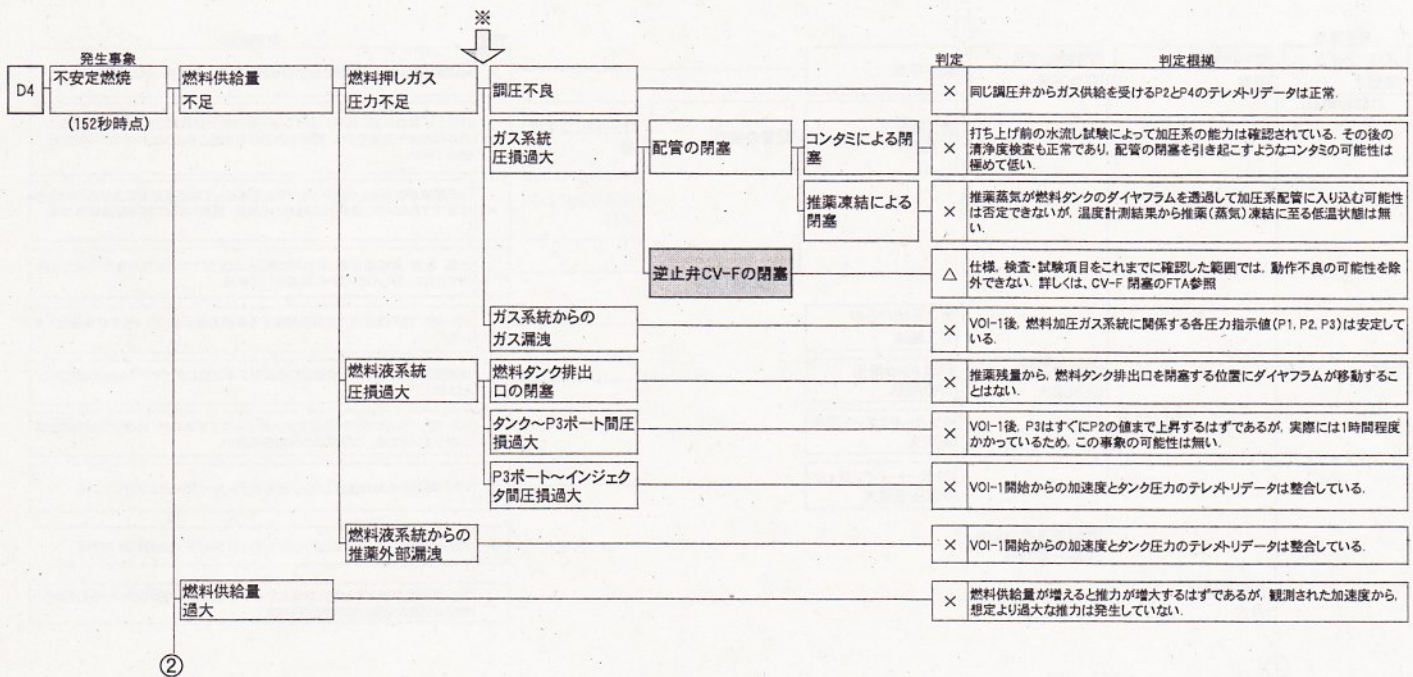


※ このFTAにおいて燃料タンク圧力P3の低下を反映させた箇所を示す  
 原因である可能性のある要因

# 1.3 スロート後方後燃えFTA(つづき)



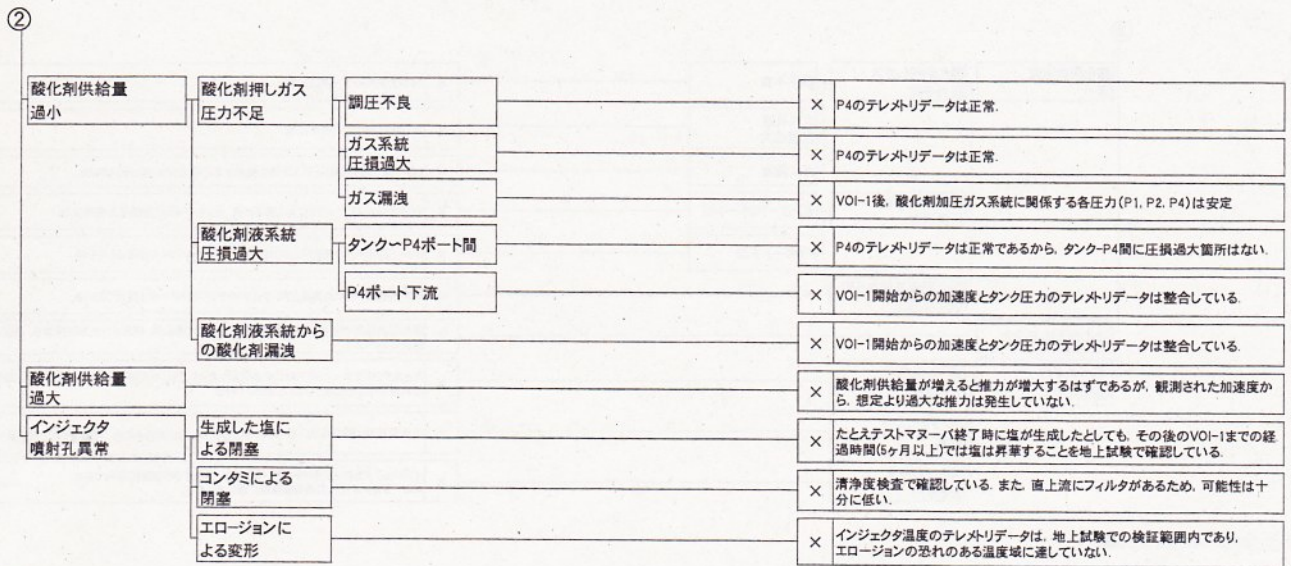
# 1.4 不安定燃焼FTA



※ このFTAにおいて燃料タンク圧力P3の低下を反映させた箇所を示す

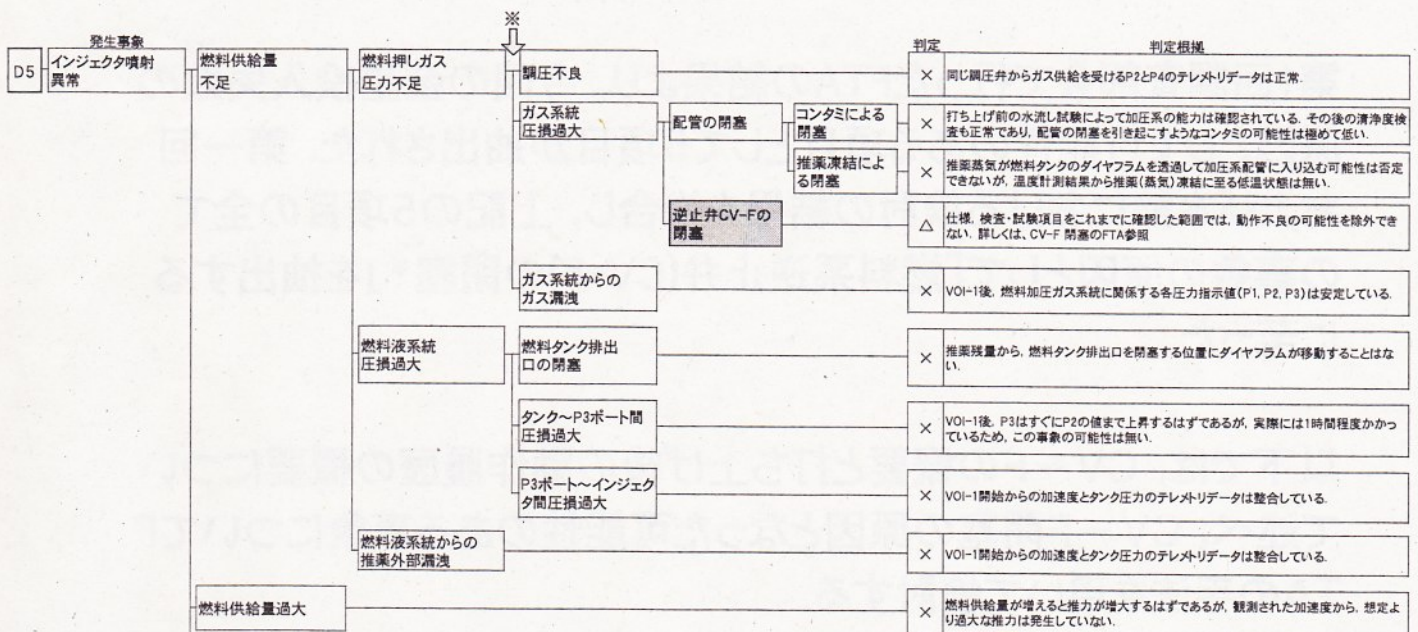
原因である可能性のある要因

# 1.4 不安定燃焼FTA (つづき)



原因である可能性のある要因

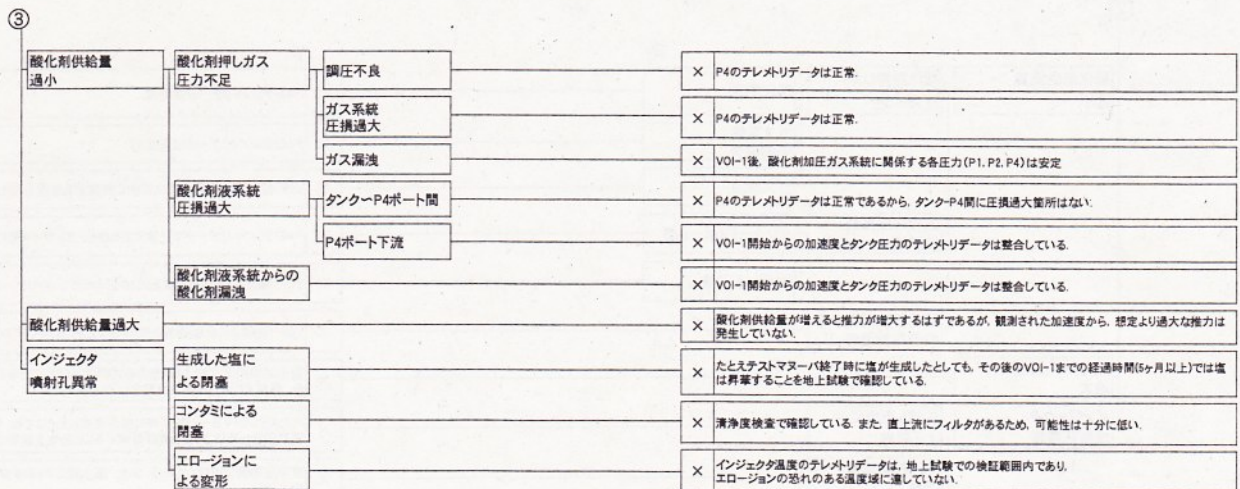
# 1.5 インジェクタ噴射方向異常FTA



※ このFTAにおいて燃料タンク圧力P3の低下を反映させた箇所を示す

原因である可能性のある要因

## 1.5 インジェクタ噴射方向異常FTA (つづき)



原因である可能性のある要因

11

## 1.6 FTAサマリ

第1回調査部会で行ったFTAの結果より、今回の金星投入失敗の原因として可能性のある項目として5項目が抽出された。第一回および本節における検討の結果を総合し、上記の5項目の全ての事象の原因として「燃料系逆止弁(CV-F)の閉塞\*」を抽出するに至った。

以下では、CV-Fの概要と打ち上げ後の動作履歴の概要について述べ、CV-F閉塞の原因となった可能性のある事象についてFTAの手法を用いて検討する。

\*ここで用いる「閉塞」は、完全に流路を遮断する場合、および流路が狭まり流れが予定よりも少なくなる状態も含めている。

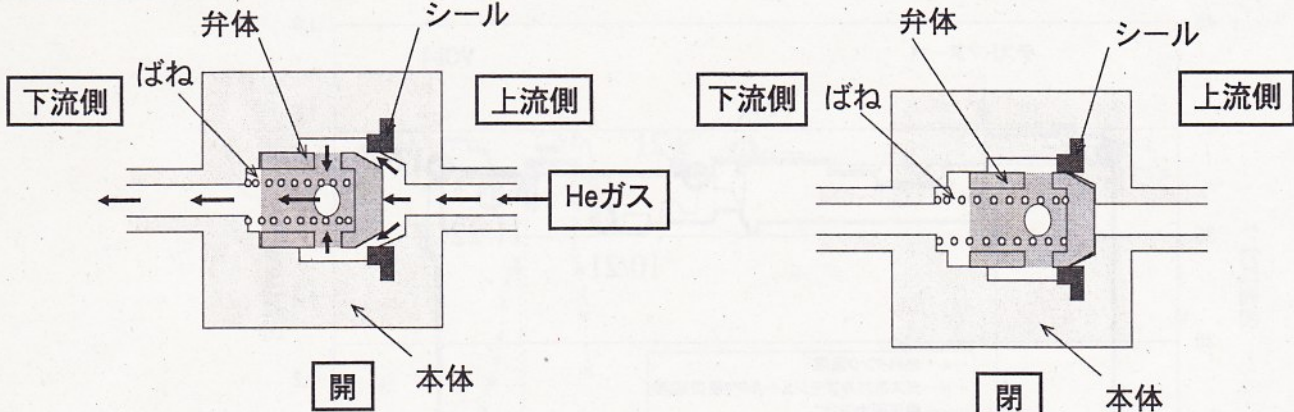
12

## 2. CV-F閉塞原因究明

### 2.1 逆止弁の概要

あかつきのような2液式推進系を採用している宇宙機では、ガス側に逆止弁を配置するのが一般的である。2液式推進系では、自燃式(混合するだけで燃焼する)燃料・酸化剤の組み合わせを使用しているため、燃料・酸化剤の蒸気が高圧ガス供給系側で混合すると、最悪の場合、爆発することも考えられる。そのため、蒸気混合を防止する必要があるため、その防止手段のひとつとして、逆止弁を用いている。

逆止弁とは、流体の逆流を防止するために受動的に動作する弁であり、下図のように動作する。なお、通常は閉状態である。



閉まっている逆止弁の上下流で差圧が発生し、上流側の圧力の方が一定圧力以上(クラッキング圧:0.117MPaD以下[仕様値])になると、逆止弁の弁体が左側に動き、上下流の流路が開く。

開いている逆止弁で、上下流の差圧が小さくなり、上流側と下流側の圧力差が一定圧力以下(リシート圧:0.014MPaD以下[仕様値])になると、弁体がばね力により右側に動いて、上下流の流路は閉じる。

13

### 2.2 推進系の軌道上での履歴

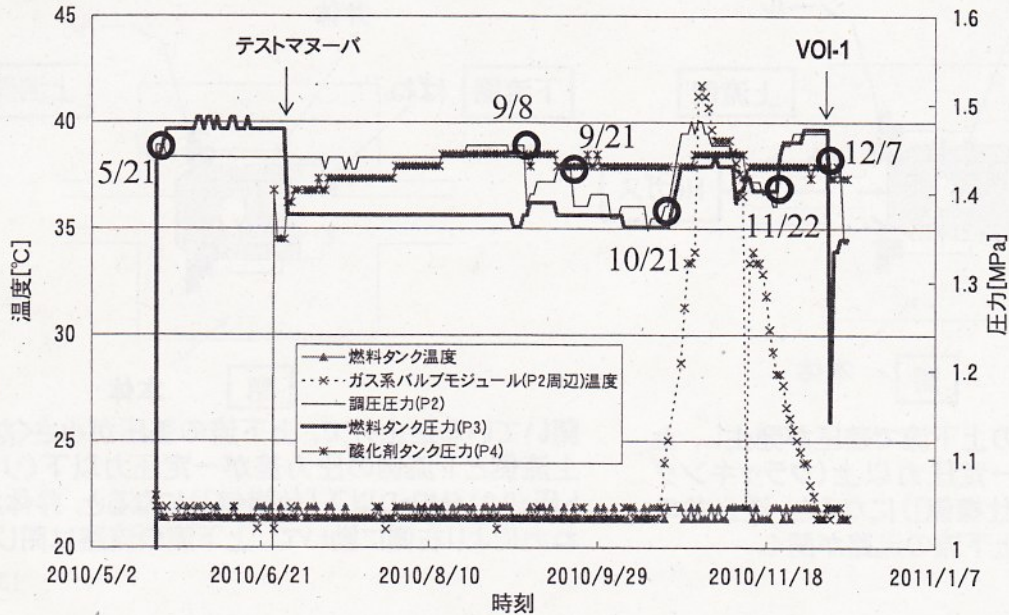
日時	イベント	燃料タンク運用形態	バルブステータス	燃料タンク圧力 P3[MPa]	酸化剤タンク圧力 P4[MPa]
5/21	打上げ前	-	HLV-1以外 close	0.265	0.292
	打上げ後衛星分離/初期運用	調圧	HLV-2,3 close → open → close LV-F1,2 close → open → close	1.458	0.265
ホイールアンローディング(リアクションホイールモーメント低減化のためのRCS噴射 1回当たり数ccの燃料を使用) 4回 プロードダウン運用					
6/24	酸化剤タンク加圧 (24日から25日にかけてHLV-1,2, GLV-1,2をopenにして圧力静定待ち)	調圧	HLV-2,3 close → open GLV-1,2 close → open	1.472 → 1.472	0.251 → 1.362
6/25			HLV-2,3 open → close GLV-1,2 open → close		
6/28	テストマヌーバ	調圧	HLV-2,3 close → open → close GLV-1,2 close → open → close OLV-O,F close → open → close *通常closeのLVをopenにしてテストマヌーバを実施し、終了後closeにした	1.472 → 1.376	1.348 → 1.389
ホイール アンローディング:25回 プロードダウン運用 9/8, 9/21 圧力変化から、ホイールアンローディングに伴う燃料消費で生じた圧力差により、逆止弁が作動したと考えている					
10/21	燃料タンク補加圧	-	HLV-2,3 close → open → close	1.362 → 1.431	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:5回 プロードダウン運用					
11/8	TRM-1 ΔV	調圧	HLV-2,3 close → open → close	1.431 → 1.389	1.444 → 1.417
ホイールアンローディング:3回 プロードダウン運用					
11/22	TRM-2 ΔV	調圧	HLV-2,3 close → open → close	1.403 → 1.444	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:1回 プロードダウン運用					
12/1	TRM-3 ΔV	調圧	HLV-2,3 close → open → close	1.472 → 1.472	1.431 → 1.431
ホイールアンローディング:2回 プロードダウン運用					
12/6	VOI-1準備	調圧	HLV-2,3 close → open GLV-1,2 close → open OLV-O,F close → open → close *VOI-1前日にLVopenを確認し、OME系連断弁のみ再度closeにした	1.472 → 1.472	1.431 → 1.431
12/7 ~ 12/8	VOI-1	調圧	HLV-2,3 open → close → open → close *VOI-1後に自動でcloseしたが、セーフホールド時に自動でopenした。その後closeにした GLV-1,2 open → close *VOI-1噴射後自動でcloseにした OLV-O,F close → open → close *VOI-1噴射前openにし、噴射後自動でcloseにした	1.472 → 1.334	1.417 → 1.417

14

## 2.3 逆止弁の軌道上環境

CV-F閉塞の原因究明を進めるに当たり、打上げ後VOI-1終了までにCV-Fに負荷された圧力と温度の履歴を示す。またCV-Fに流体が流れた可能性があると考えられる箇所を○で示す。

- 1) 5/21: 打上げ直後のタンク加压における挙動は想定通りで逆止弁は正常に機能した
- 2) 6/28(テストマヌーバ): 使用推薬量が少なかったため、逆止弁は作動せず、正常/異常の判断不可
- 3) 9/21, 11/22: 逆止弁上下流の差圧が小さいため、正常/異常の判断不可
- 4) 9/8, 10/21: 判断に必要な高頻度のテレメトリデータなし
- 5) 12/7(VOI-1): § 2.4で解析結果を示すが、閉塞状態にあったと判断



15

## 2.4 CV-Fの閉塞量の推定

VOI-1中のCV-F閉塞の原因究明を進めるに当たり、CV-Fの閉塞量の推定を行った。

軌道上および地上試験時のP3圧力回復状況から、逆止弁等価オリフィス面積を推定した。

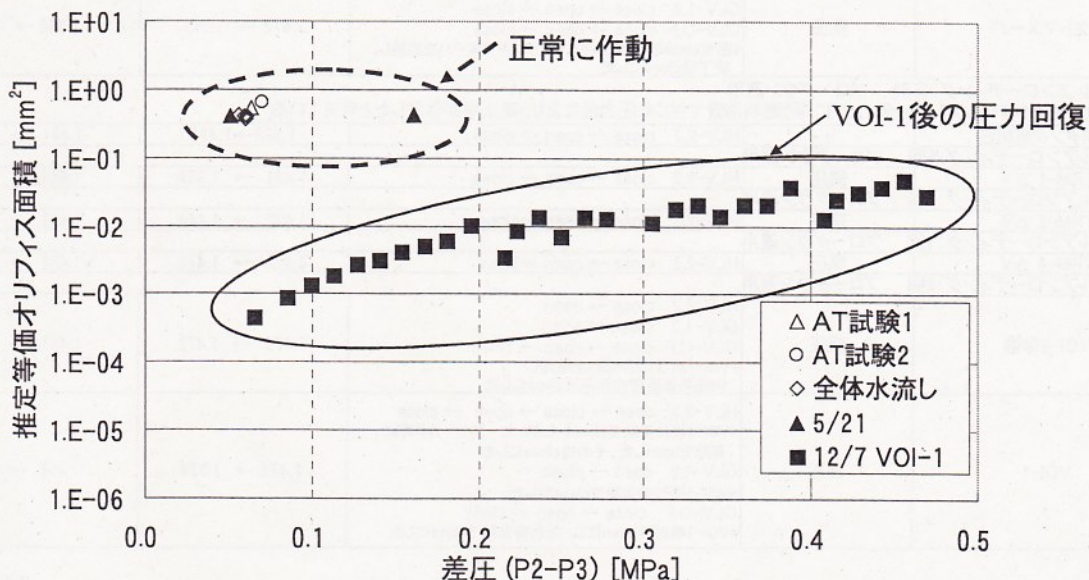
推定材料1) VOI-1直後の燃料タンク空所容積の推定値

推定材料2) 探査機上で計測された調圧圧力(P2)と燃料タンク圧力(P3)の差圧

これらから、燃料タンクに流入するガス流量を評価した。

単体AT時からの換算値:  $0.54\text{mm}^2$

VOI-1後の圧力回復時:  $\sim 0.05\text{mm}^2$



16



# 2.5 逆止弁閉塞の原因推定

逆止弁閉塞の原因を推定するため、FTAを実施した。右端の事象番号は § 4.1 に述べる検証計画に対応している

発生事象	シール部不良	判定	判定根拠	事象番号			
逆止弁(CV-F)の閉塞	シール部不良	異材使用による材料適合不良	△	詳細な検査記録を再確認中	E-1		
		温度によるシール材特性変化	×	受入検査後、打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の温度であったことから可能性は極めて低い			
		経年による材料劣化	×	MSFC-HDBK-527記載のランクA材料を用いていることから、劣化する可能性は極めて低い			
		粘性変形による弁体過挿入	△	現段階では可能性を否定できない	E-2		
		長期逆圧印加による弁体過挿入	△	現段階では可能性を否定できない	E-3		
		過大逆圧による弁体過挿入	×	受入試験でMEOP(2.08MPa)印加後の正常動作を確認した。軌道上での最大逆圧はテレメトリデータから0.045MPaDであったことが確認されており、過大逆圧による弁体過挿入の可能性は極めて低い			
	しゅう動抵抗増大	異材使用による材料適合不良	△	現段階では可能性を否定できない	E-4		
			弁体と本体のクリアランス不良	温度によるクリアランス悪化	×	打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の温度であったことから可能性は極めて低い	
				ボルトジョーグへの固定方法不良によるクリアランス悪化	△	現段階では可能性を否定できない	E-5
				設計・製造不良	△	詳細な試験・検査記録を再確認中	E-6
		弁体と本体のアライメント不良	△	詳細な試験・検査記録を再確認中	E-7		
		弁体・本体の表面不良	しゅう動による摩耗・表面荒れ	△	現段階では可能性を否定できない	E-8	
			材料適合不良 面磨食	△	現段階では可能性を否定できない	E-9	
製造不良			△	詳細な試験・検査記録を再確認中	E-10		
外部由来のコンタミの噛み込み		×	清浄度検査結果を確認しているため、可能性は極めて低い				
しゅう動生成物噛み込み		推奨環境下での生成物生成	△	現段階では可能性を否定できない	E-11		
	想定外の作動回数	△	現段階では可能性を否定できない	E-12			
	燃料・酸化剤の生成物による粘着	△	現段階では可能性を否定できない	E-13			

# 2.5 逆止弁閉塞の原因推定(つづき)

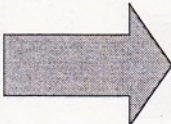
④	機構部品 破損・脱落・噛込	環境条件逸脱	打上時の機械環境	×	ロケット打上時の機械環境は仕様範囲内であり、打上後の初期運用(5月21日)におけるCV-Fの動作は正常であった	
			保管時および打上後の環境条件	×	受領後、打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の環境条件(温度、湿度、雰囲気ガス)であった	
		想定外の作動回数	△	実使用条件においてチャタリング等が発生して意図しない作動状況となった可能性を否定できない	E-14	
		バネ系の脱落	△	現段階では可能性を否定できない	E-15	
		弁開駆動力不足	差圧不足	×	テレメトリデータから異常発生時の最大差圧は約0.5MPa(P2:1.43MPa、P3:0.95MPa)であり、クワッキング圧(規格0.117MPa)に対して十分大きい	
バネの反力変化	×		受領後、打上後VOI-1に至るまで仕様範囲内の温度であったことからバネ反力が変化した可能性は極めて低い			
シール部以外の 流路閉塞	外部由来のコンタミによる閉塞	×	清浄度検査結果を確認しているため、流路直径(約3mm)全体を閉塞させるだけのコンタミの堆積はありえない			
	生成物による閉塞	×	流路直径(約3mm)全体を閉塞させるだけの生成物の生成はありえない			

## 2.6 逆止弁閉塞の原因推定のまとめ

ここでは、逆止弁の不具合原因解析(FTA)の結果、棄却できていない原因候補を以下にまとめる。

- E-1) シール部の異材使用による材料適合不良
- E-2) シール部の粘性変形による弁体過挿入
- E-3) 長期逆圧印加による弁体過挿入
- E-4) しゅう動部の異材使用による材料適合不良
- E-5) 固定方法不良によるクリアランス悪化
- E-6) しゅう動部クリアランスの設計・製造不良
- E-7) 弁体と本体のアライメント不良
- E-8) しゅう動による摩耗・表面荒れ
- E-9) しゅう動部材料適合不良による面腐食
- E-10) しゅう動部製造不良
- E-11) 推薬環境下での生成物の嚙込
- E-12) 想定外の作動回数によるしゅう動生成物嚙込
- E-13) 燃料・酸化剤の生成物によるしゅう動部の粘着
- E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損・脱落・嚙込
- E-15) バネ系の脱落

これらの各原因候補を個別に検証するために、以下の作業を実施する。

- 
- 1) 設計・製造情報の確認・解析
  - 2) 要素試験
  - 3) 実バルブ使用試験

具体的な検証作業の内容は § 4.1 に示す

## 3. 逆止弁の閉塞からOME燃焼停止に至るシナリオ

本報告の1. では、FTAの手法により、姿勢異常による燃焼停止の原因を、CV-Fの閉塞に絞り込むことが可能であることを示した。これを受けて2. では、CV-F閉塞の原因についてFTAの手法により推定を行い、複数の原因候補に絞り込んだ。

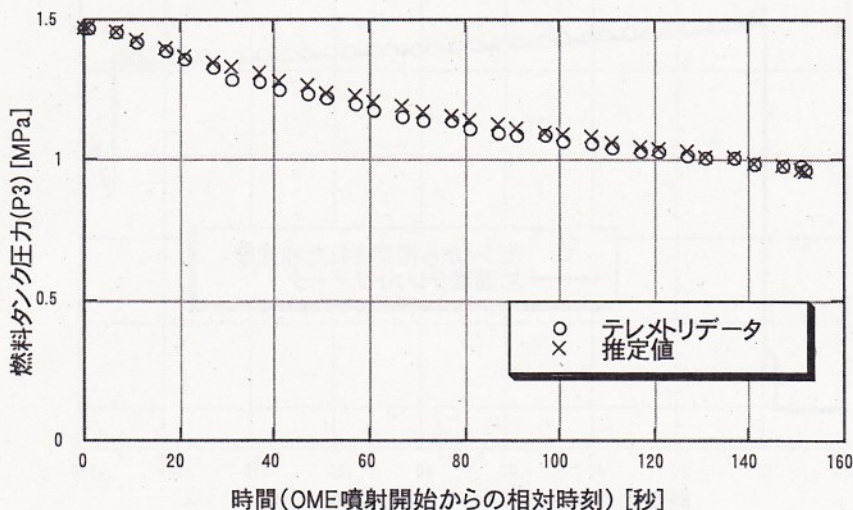
本節では、CV-Fの閉塞が起きた際に起こりうる事象の再現を試みるとともに、金星軌道投入時に生じた様々な事象の整理と、一連の事象をシナリオの形にまとめる。

### 3.1 タンク圧カプロファイルの考察

CV-Fがほぼ閉塞(§ 2.4)していたと仮定すると、燃料タンク圧力低下が定量的に説明できる。

OME噴射中の加速度テレメトリデータより、燃焼圧・推薬消費量変化・タンク空所容積変化・燃料タンク圧力(P3)を逐次的に推定した(注)。P3の履歴を再現すると、テレメトリデータと概ね一致する。

(注) この推定には、OME噴射開始前の探査機状態(質量予想値、タンク空所容積予想値およびタンク圧カテレメトリデータ)を使用した



### 3.2 VOI-1噴射中の推薬供給量の推定

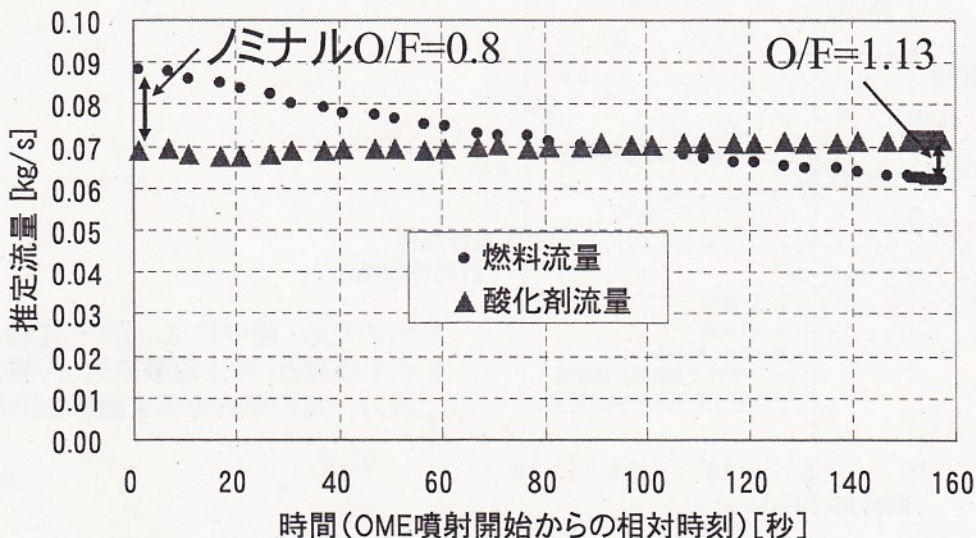
燃料タンク圧力の低下が起こると、OMEに供給される推薬量、および燃料と酸化剤の混合比(O/F)が変化する。探査機上で得られたデータを基にVOI-1中のOMEへの推薬供給量を推定した。

探査機上で計測された燃料・酸化剤タンク圧力および加速度を用いて推力を推定し、その値を元に燃焼圧力を推定。



供給圧力と燃焼圧力の差圧から燃料・酸化剤のそれぞれの供給量を推定。

燃料タンク圧力の低下にともない、OMEへの燃料供給量が減少した。一方で酸化剤供給は正常に行われたため、O/Fが、ノミナル値(0.80)から152秒時点で1.13程度まで上昇したものと推定される。

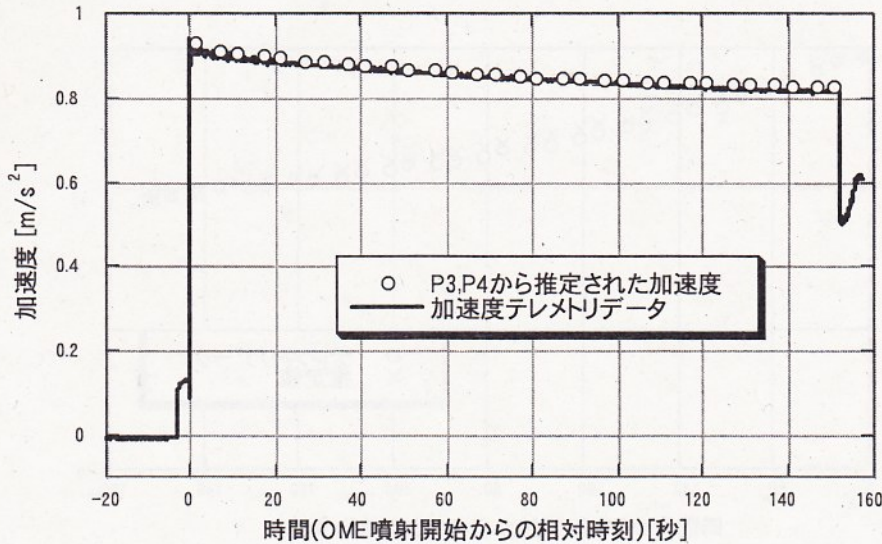


### 3.3 加速度プロファイルの考察

燃料タンク圧力低下により、加速度が低下したことは、定量的に説明できる。

OME噴射中の燃料タンク圧力(P3), 酸化剤タンク圧力(P4)より, 地上燃焼試験・解析から予想されたOME推力・OME燃料消費量を用いて, OME噴射中の加速度を逐次的に推定した(注)。加速度の推定結果は, テレメトリデータと概ね一致した。

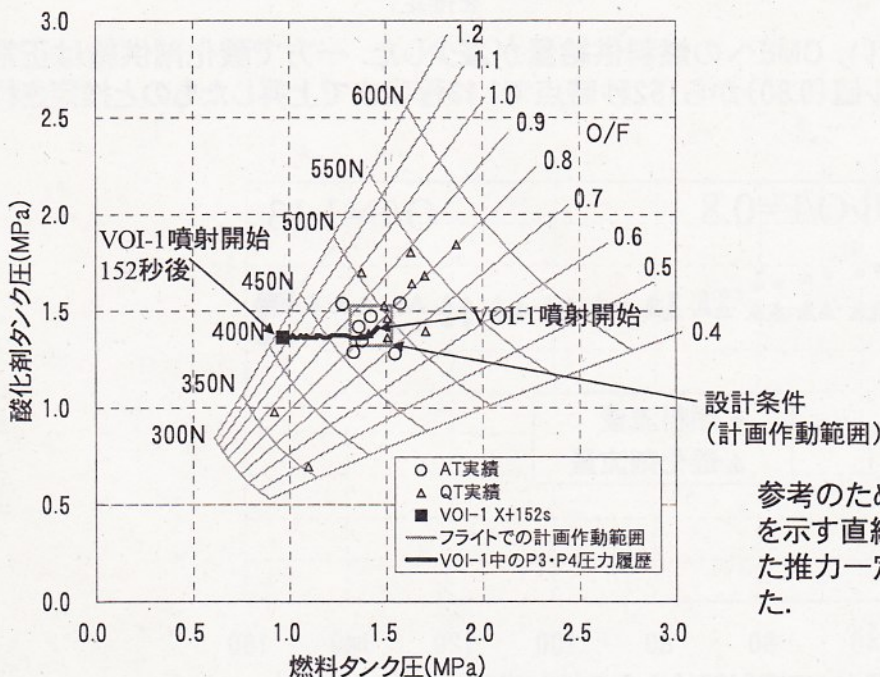
(注)推定の初期値として, OME噴射開始前の探査機質量予想値を使用した



23

### 3.4 VOI-1噴射中のOME作動履歴

開発段階の地上燃焼試験で実施した試験パラメータの図に, 今回のVOI-1時の推定履歴を示す。これから事前の確認試験の範囲を逸脱した状況で運転が行われていたことがわかる。



参考のため, 図中には, O/F一定の条件を示す直線と, 地上試験結果より推定した推力一定の条件を示す曲線を記入した。

24

### 3.5 設計条件を逸脱した燃焼状態 (想像図)



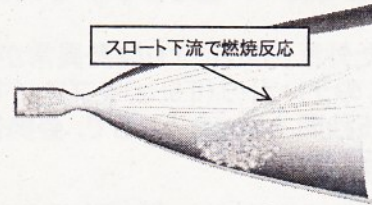
熱流束過大によりスロート近辺に過大熱応力が発生し、ノズル・スロート近辺の破損が生じ、不整トルク発生の可能性はある。

D1) 熱流束過大によるスラストノズルの破損



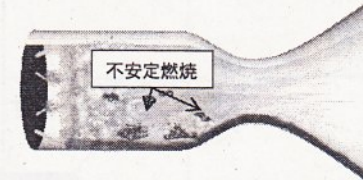
フィルムクーリングの噴射方向が変化してスラストの冷却が不足し、スラストノズル破損、不整トルク発生の可能性はある。

D2) フィルムクーリング噴射方向異常によるスラストノズルの破損



スロート後方後燃えにより燃焼ガスの剥離が生じ、不整トルクが発生した可能性がある。

D3) スロート後方後燃え



燃焼室内の燃焼状態が不安定になり、不整トルクが発生した可能性がある。

D4) 不安定燃焼



インジェクタから噴射された推進剤の流れに異常があり、正常な混合、燃焼に至らず、不正トルクが発生した可能性がある。

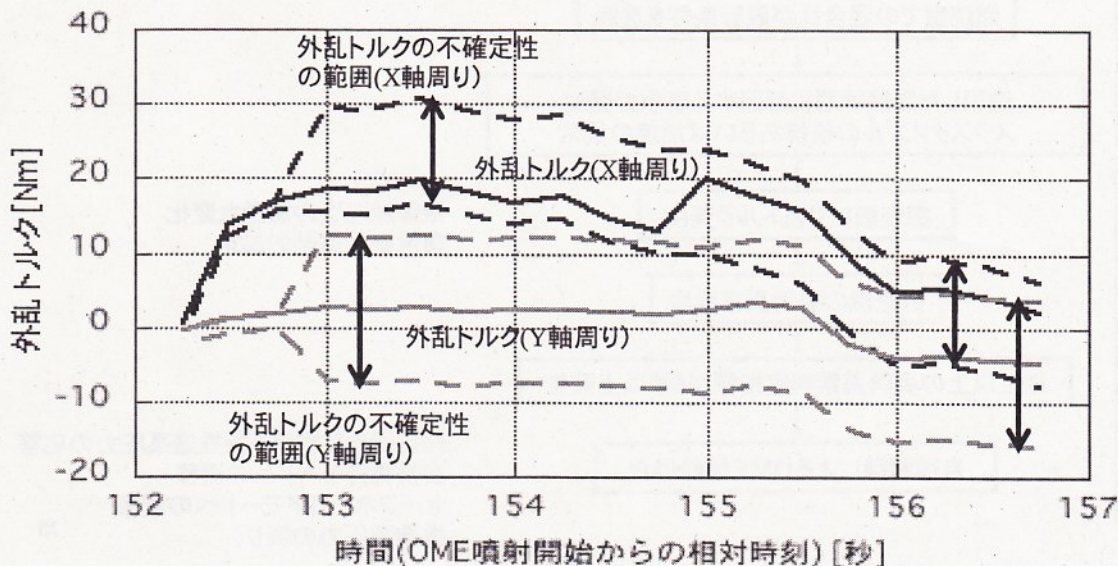
D5) インジェクタ噴射方向異常

### 3.6 VOI-1噴射中の探査機外乱トルクの推定

§ 3.5の要因により探査機に作用したと考えられる外乱トルクを推定する。

テレメトリデータには、角速度が毎秒8回、とRCS累積噴射時間が2秒に1回記録されている。これらを用いて、機体の角速度をもとに算出されるトルクから、RCS噴射による姿勢制御トルクを減算し、探査機に作用した外乱トルクを推定した。

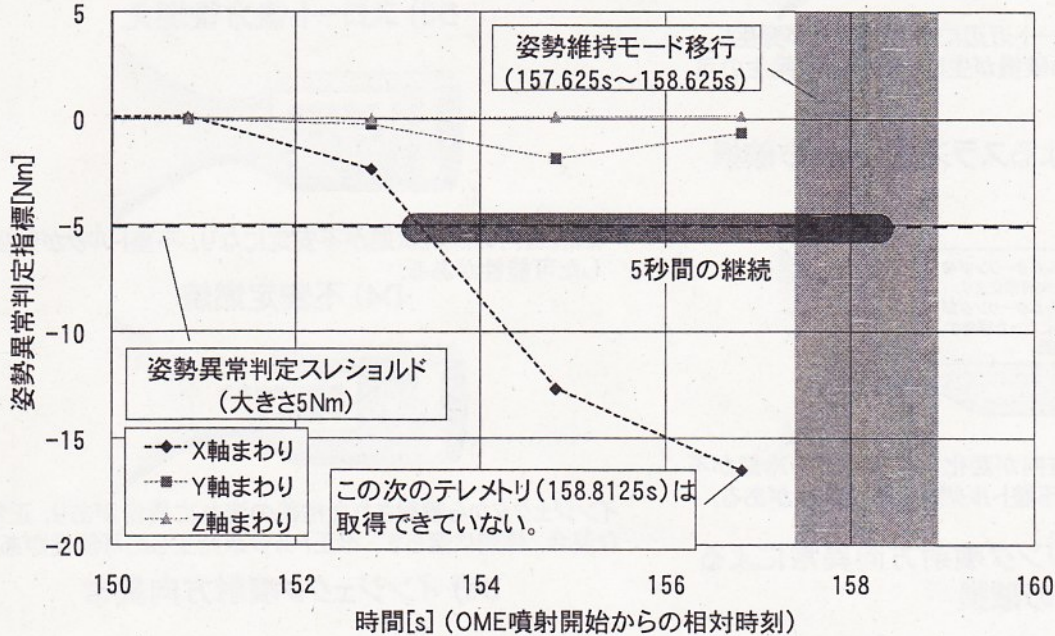
ただし、姿勢制御トルクの推定に際しては、2秒間隔の内のRCS噴射の履歴は記録されないことから、その正確な履歴を知ることは出来ない。このため、上記2秒に一回更新される累積噴射時間から算出される姿勢制御トルクがこの2秒間一定に作用した場合の他、2秒間の中で偏って作用する場合も考慮した。推定に幅があるのはこの偏りの仮定のしかたに自由度があるためである。



### 3.7 探査機の姿勢異常判定指標の動き

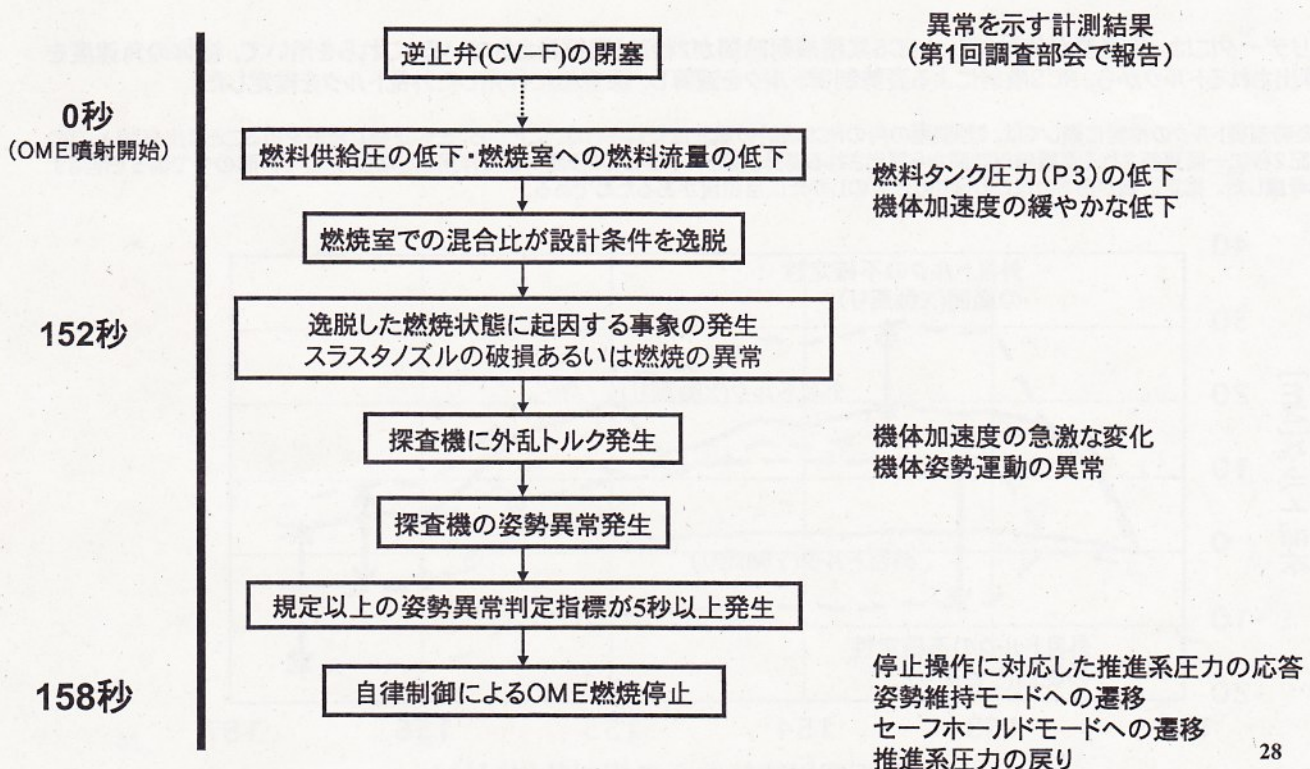
前頁で推定された外乱トルクにより姿勢異常が発生した。下図は、姿勢角誤差、角速度誤差を元に算出する姿勢異常判定指標<sup>(\*)</sup>のテレメトリ(0.5Hz)をプロットしたものである。同指標が規定値(X, Y軸まわりは5Nm, Z軸まわりは2.5Nm)を連続5秒間上回ったところで、姿勢保持を継続できないと判断するロジックになっており、実際に姿勢維持モードに移行した。

(\*) 資料「調査1-2」のP.10では、「制御トルク」という表現を用いていたが、他の要素(積分項等)も考慮して算出する実際の姿勢制御トルクと混同を避けるため、「姿勢異常判定指標」という用語を用いることとした



### 3.8 逆止弁(CV-F)閉塞から燃焼停止に至る推定シナリオ

以上の考察結果を基にCV-F閉塞からOME燃焼停止に至る推定シナリオは以下の通りと考えられる。またこれにより付随して起きた計測結果の異常を矛盾なく説明できる。



## 4. 不具合原因究明のための検証計画

- ・「あかつき」の金星周回軌道投入失敗は、燃料逆止弁の閉塞故障により、燃料タンク圧力が計画値から低下した結果、OMEへの燃料供給が減少し、燃料と酸化剤の混合比が計画で想定した範囲を逸脱したため、OMEの燃焼異常を引き起こしたことによると推定される。
- ・上記不具合メカニズムを検証するため次の試験などを計画する。
  - 逆止弁不具合メカニズム検証のための検討・再現試験
  - 設計燃焼条件逸脱時のOME燃焼状態と、燃焼器・ノズルへの影響検証のための解析・再現試験

29

### 4.1 逆止弁の不具合原因究明

分類	対応事象番号	試験名	供試体	検証作業内容
情報確認・解析	E-1, 4, 6, 7, 10	設計・製造情報確認 解析	なし	製造メーカーにおける逆止弁の設計・製造情報を確認、評価 →フォースバランス、シール、機構設計、各部の共振周波数、しゅう動部クリアランスなどを確認する。 →外部荷重等の影響について解析を行う。 →情報開示の都合によって、必要な追加の検証試験を検討する。 →製造メーカーとは、試験結果・検討の情報交換を協力して継続する。
要素試験	E-8, 9, 11	燃料雰囲気 摩擦試験	等価材料	燃料蒸気が摩擦・しゅう動特性に与える影響の評価 →燃料雰囲気中でピンオンディスク試験(注)を実施する。 その後、しゅう動面の観察、生成物捕集・分析を実施する。 →まず1ヶ月程度の試験を実施する。 引き続き、必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験)。 注:回転するディスク試験体上にピン試験体押し付けてしゅう動状況を模擬する試験
	E-13	塩生成状況 確認試験	なし	燃料、酸化剤蒸気の逆止弁・遮断弁上流への拡散と塩生成の影響の評価 →推進薬蒸気の逆止弁・遮断弁上流への拡散量を解析・評価する。 →推進薬飽和蒸気を透明なカラム内で反応させ、生成物(硝酸塩)の発生状況を確認する。 このとき、両系統の逆止弁が正常・開故障の場合を模擬した流量にて行う。 →生成物の発生状況を確認後、実バルブを使用した作動試験の要否を検討する。
実バルブ 使用試験	E-5,12,14,15	作動試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	逆止弁の実作動条件での作動状況の確認 →逆止弁単体および必要なサブシステム状態で上下流圧、流量等実機の軌道上作動条件相当で作動状況を確認する。 チャタリング等想定しない作動状況の有無を、加速度計等の非破壊的手法でモニタする。
	E-2, 3	長期逆圧 印加試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	逆止弁に長期間逆圧が負荷されたことによるシール部の劣化の確認 →実機環境模擬(温度、圧力)で長期逆圧印加後、供試体の作動試験(クラッキング/リシート圧計測試験等)を行い、作動状況を確認する。 →まず1ヶ月程度の試験を実施する。 引き続き、必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験)。
	E-11,13	推進雰囲気 作動試験	逆止弁 (フライト予備品 および同等品)	推進雰囲気の逆止弁作動への影響の確認 →本試験は、燃料雰囲気摩擦試験および、塩生成状況確認試験の結果により試験要否を判断する →逆止弁上流側から酸化剤蒸気、下流側から燃料蒸気を供給する。 可能であれば、ポート部から内部観察し、塩の生成状況を確認する。 雰囲気中および塩生成後、作動試験(クラッキング/リシート圧計測試験等)を行い、作動状況を確認する。 →まず1ヶ月程度の試験を実施する。 引き続き、必要により更に半年程度を継続する(実機経過時間再現試験)。

## 4.2 OMEが受けた影響の評価

分類	対応事象番号	試験名	供試体	検証作業内容
インジェクタ 水流し試験	D2 D5	インジェクタ 水流し試験	同一設計 インジェクタ (新規製作)	低燃料供給圧条件でのインジェクタ水流し試験を行う ・燃料側単独の噴射状態を確認 →フィルムクーリング噴射方向変化の可能性評価 ・燃料/酸化剤の衝突状態を確認 →インジェクタ噴射方向変化の可能性評価
地上燃焼 試験		スラスタ作動特性 取得試験	同一設計 インジェクタ (新規製作) + セラミックスラスタ (予備品および 新規製作)	燃料/酸化剤供給圧を幅広く振ったOME燃焼試験を行う ・設計条件を逸脱した状態での燃焼挙動、性能特性の取得 →以下の試験の準備および安定した燃焼を示す範囲の確認
	D1 D3 D4 (D2) (D5)	異常事象 再現確認 試験		VOI-1末期の燃料供給圧条件でのOME燃焼試験を行う VOI時-1の異常が発生するかを確認する ・スロート後方後燃え:燃焼圧・推力プロファイルで確認 ・不安定燃焼:燃焼圧・推力プロファイルで確認 ・ノズル・スロート部破損:監視カメラで確認 →スラスタ破損が確認された場合、次の破損後性能評価と 破壊確率評価を実施する
	D1	破損後 性能評価試験		異常現象再現確認試験でスラスタが破損した場合 破損したスラスタにおけるスラスタ性能を取得する →VOI-1開始後156~158秒における推定推力との比較評価
燃焼解析	D1 D2 D3 D4 D5	スラスタ燃焼の 数値流体解析		燃料/酸化剤供給圧を幅広く振った条件で、 スラスタ燃焼状態の数値流体解析コードを整備して解析を実行する
破壊解析	D1	スラスタの 破壊確率評価		異常現象再現確認試験でスラスタが破損した場合 スラスタ温度分布より、熱応力解析、強度評価解析を行う 同時に破損位置の確認を実施する

31

## 4.3 検証スケジュール

			2010	2011								
			12	1	2	3	4	5	6	7	8	
逆止弁関連	E-1, 4, 6, 7, 10	情報確認・解析		■								
	E-8, 9, 11, 13	要素試験 実機経過時間再現試験		■	■	■	■	■	■	■	■	■
	E-2, 3, 5, 11, 12, 13, 14, 15	実バルブ試験 実機経過時間再現試験			■	■	■	■	■	■	■	■
OME関連	D-2, 5	インジェクタ水流し試験		■								
	D-1, 3, 4	地上燃焼試験			■	■						
	D-1, 2, 3, 4, 5	燃焼解析		■	■	■	■	■	■	■	■	■
	D-1	破壊解析		■	■	■						

\* 現段階での計画および予定見積もりであり今後変わり得る。

\* 今後軌道再投入の可否判断を目的とする試験があり得るがここには示していない。

32



## 5. 第2回調査部会報告のまとめ

第1回調査部会で抽出された「姿勢異常の検知によるエンジン停止」につながる複数の原因候補について、FTAの手法によりさらなる詳細化を行い、第1回調査部会で示した原因候補のいずれにおいても、金星軌道投入失敗の原因が燃料の「逆止弁(CV-F)の閉塞」に帰結し得ることを示した。

燃料側逆止弁(CV-F)の閉塞をトップ事象とするFTA解析によりその原因となり得る事象を抽出した。

「逆止弁閉塞」により引き起こされる金星軌道投入時のOME燃焼停止に至る一連の異常事象をシナリオの形に整理し、計測結果を説明できることを示した。

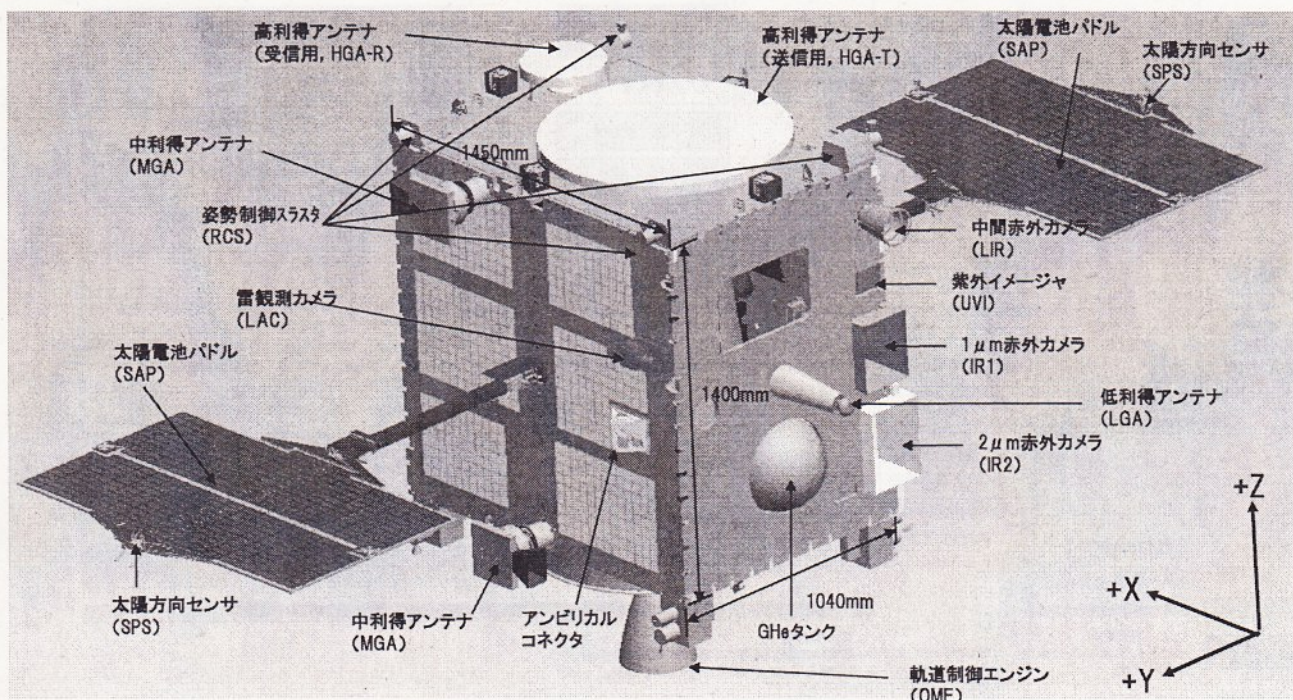
これらの考察をもとに、逆止弁閉塞の原因究明およびOMEの想定外の運転状況の再現とその結果もたらされる事象の検証のための試験計画を立案した。

今後は、本報告の方針に沿って、上記検証活動を実施することとしたい。また軌道再投入の可能性についても検討を深める。

33

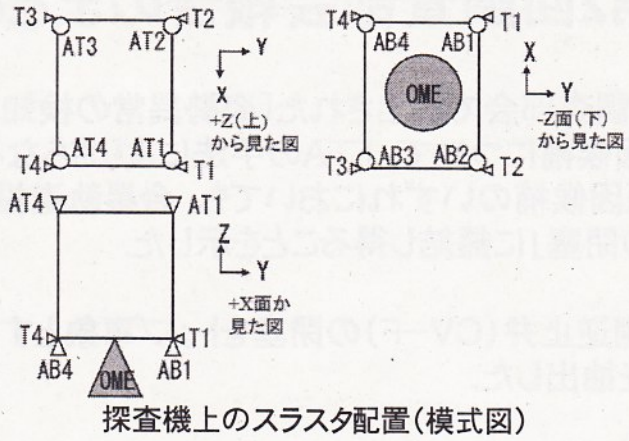
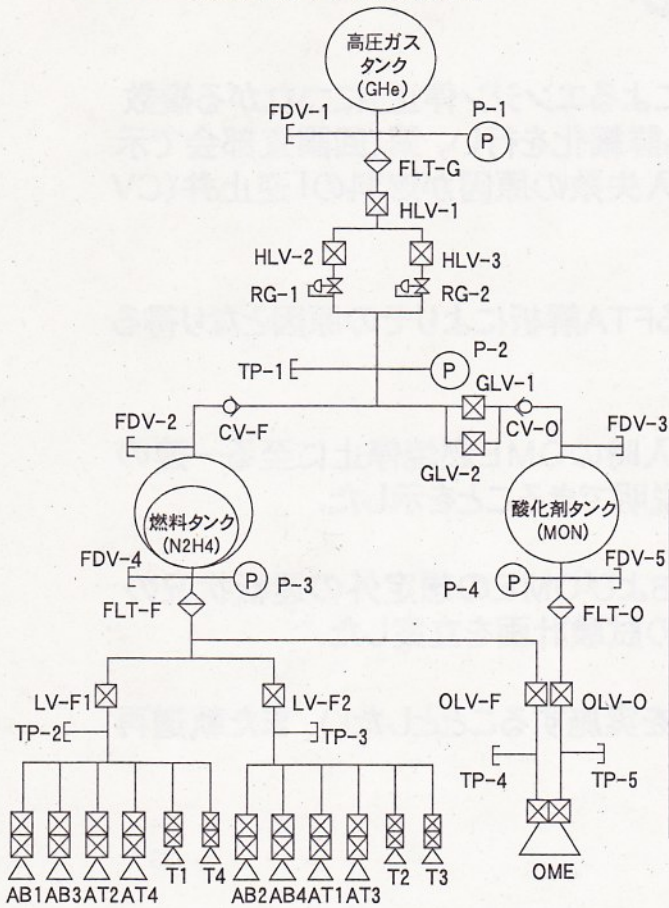
## A1. 探査機概要

探査機の座標系は、以下の通り。軌道制御エンジン(OME)は-Z面についており、+Z方向に推力を発生する。太陽電池パドルは±Y方向、低利得アンテナ(LGA)は±X面についている。



34

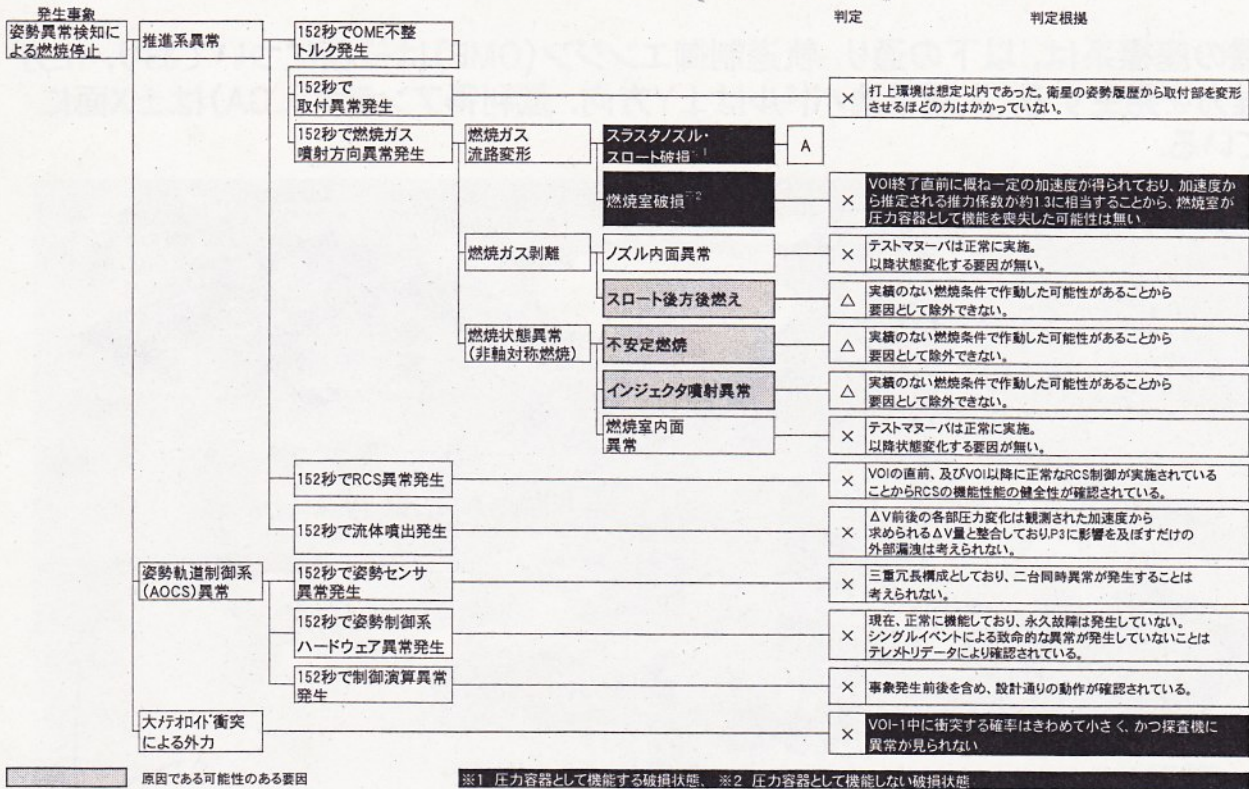
# A2. 配管系統図



凡例

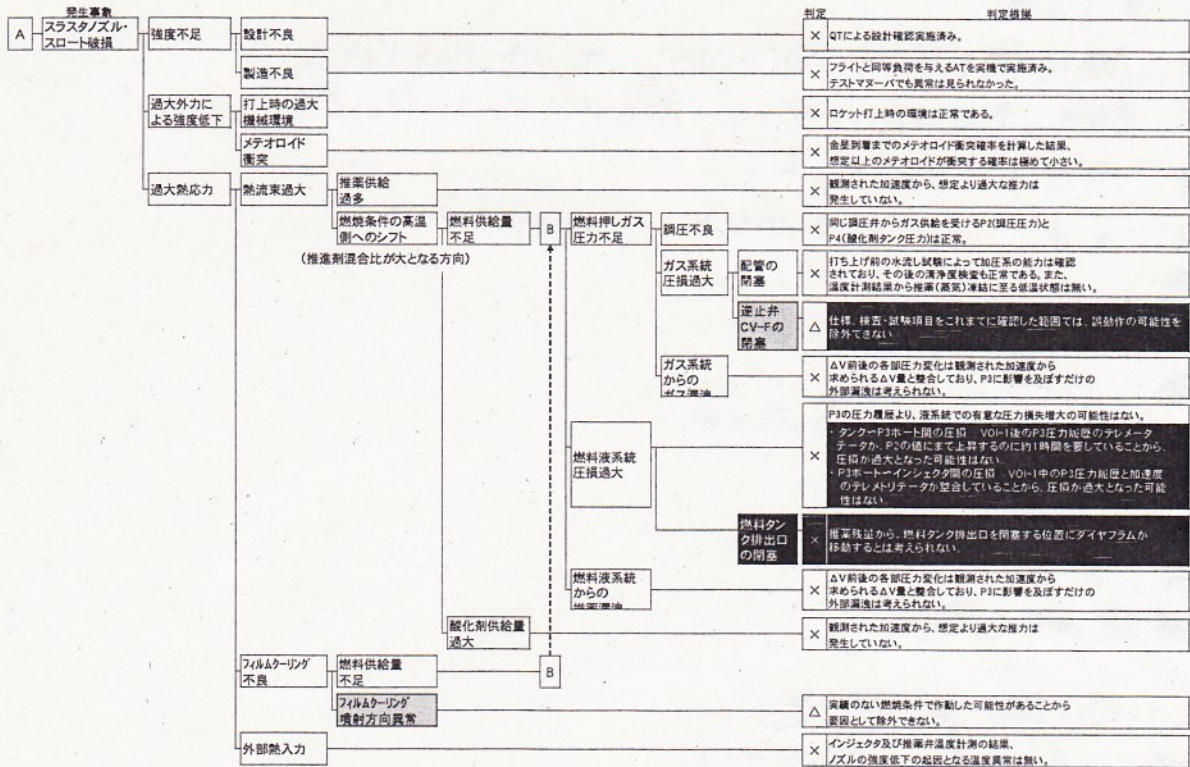
*LV-*: 遮断弁	RG-*: 調圧弁
FDV-*: 注排弁	AB-*: 姿勢制御スラスタ(RCS)
TP-*: テストポート	AT-*: [1液式 23N級]
P-*: 圧力変換器	T-*: 姿勢制御スラスタ(RCS)
CV-*: 逆止弁	[1液式 3N級]
FLT-*: フィルタ	OME: 軌道制御エンジン
	[2液式 500N級]

# A3. 第1回調査部会時のFTA(修正版)



原因である可能性のある要因	修正理由
修正箇所 判定根拠	修正理由
・スラスタノズル・スロット破損	スラスタノズル・スロット、燃焼室の区分を明確にするため注釈を追加する。
・燃焼室破損	スラスタノズル・スロット、燃焼室の区分を明確にするため注釈を追加し、判定根拠を明確化するため修正する。
・大メテオロイド衝突による外力	判定根拠として適切な表現でなかったため修正する。

# A3. 第1回調査部会時のFTA(修正版 つづき)



原因である可能性のある要因

修正箇所  
修正した要因、判定根拠

- ・ 逆止弁CV-Fの閉塞
- ・ 燃料タンク排出口の閉塞
- ・ 燃料液系圧損過大

修正理由

判定根拠として適切な表現でなかったため修正する。  
この要因は、第1回部会では、ガス系統圧損過大の下に位置していたが、燃料系統圧損過大の下の現象であるので、位置を修正する。  
この要因は、第1回部会では、「P3の圧力履歴より、液系統での有意な圧力損失増大の可能性はない」という根拠で判定していたが、異なる位置の閉塞箇所に対して一つにまとめた記述であるので、二つの場合に分けて根拠を書き下した。