

補足資料集

- A. 第2回調査部会で提示した故障の木解析(FTA)結果
 - A.1 故障の木解析(FTA)によるあかつき不具合原因の考察
 - A.2 あかつきFTA

- B. 逆止弁閉塞不具合原因の究明
 - B.1 逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討
 - B.2 弁体の動的な挙動が関係する原因候補の検討
 - B.3 弁体の過挿入が関係する原因候補の検討
 - B.4 摩耗が関係する原因候補の検討
 - B.5 推薬移動速度の評価
 - B.6 あかつき推進系での推薬移動量の推定(燃料)
 - B.7 酸化剤移動に関する過去の不具合事例調査
 - B.8 2液推進系長期使用衛星のガス供給配管例

- C. OMEが受けた影響
 - C.1 解析によるOMEの状態の理解の現状
 - C.2 破損燃焼器の破面・表面観察
 - C.3 VOI-1後半の機体の加速度・角速度履歴
 - C.4 破損燃焼器の推進特性
 - C.5 着火衝撃緩和検討
 - C.6 OME連続噴射の実現可能性検討
 - C.7 酸化剤投棄手法検討

A.1 故障の木解析(FTA)によるあかつき不具合原因の考察

あかつきでは、VOI-1時に、姿勢異常を検知し、それによって、自律的にOME燃焼を停止した。また、その際燃料タンクの圧力(P3)の計測値が低下していることも記録されている。

これらの事実を受けて、「姿勢異常検知によるOME燃焼停止」を頂上現象とし、この現象を引き起こす可能性のある事象を挙げていくことで、不具合原因を考察した。本節のFTAは第2回調査部会までに提示したFTAを再整理し、今回の報告の出発点を明示するために再掲するものである。

A.2で示すように、第2回調査部会までの考察の結果は以下のものであった。

- A.2aに示すように、「姿勢異常検知によるOME燃焼停止」からはじめて、これを引き起こす原因推定を行い、結果として、OMEに何らかの事象が起きたことが原因であると特定している。
- A.2bに示すように、これを受け、OME事象が発生した原因推定を行い、燃料側逆止弁CV-Fの閉塞と特定している。
- A.2cに示すように、参考として、「P3低下」を頂上事象とする原因推定を行い、A.2と同じくCV-Fの閉塞に行き着くことを確認している。
- A.2dに示すように、CV-F閉塞の原因候補の洗い出しを行っている。

A.2a あかつきFTA

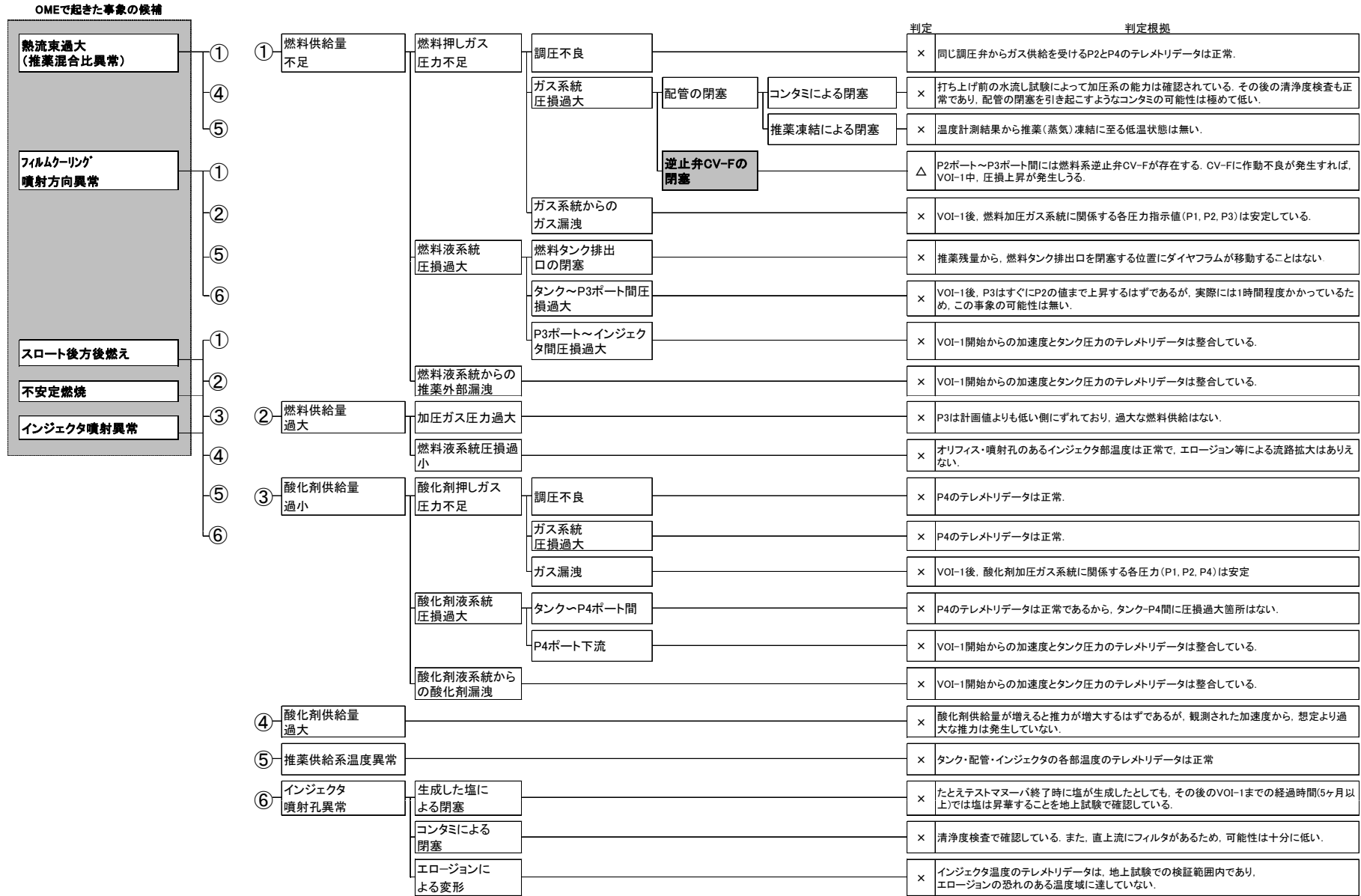
「姿勢異常検知による燃焼停止」は、OMEに何らかの事象(5候補)が起きたことによると推定

発生事象	判定	判定根拠	事象番号	
姿勢異常検知による燃焼停止	×	打上環境は想定以内であった。衛星の姿勢履歴から取付部を变形させるほどの力がかかっている。		
		QTIによる設計確認実施済み。		
		×	フライトと同等負荷を与えるATを実機で実施済み。テストマヌーバでも異常は見られなかった。	
		×	ロケット打上時の環境は正常である。	
		×	金星到着までのメテオロイド衝突確率を計算した結果、想定以上のメテオロイドが衝突する確率は極めて小さい。	
		△	実績のない燃焼条件で作動した可能性があることから要因として除外できない。	D-1
		×	観測された加速度から、想定より過大な推力は発生していない。	
		△	実績のない燃焼条件で作動した可能性があることから要因として除外できない。	D-2
		×	インジェクタ及び推薬弁温度計測の結果、ノズルの強度低下の起因となる温度異常は無い。	
		×	VOI終了直前に概ね一定の加速度が得られており、加速度から推定される推力係数が約1.3に相当することから燃焼室(スロート上流)が破壊した可能性は無い。	
		×	テストマヌーバは正常に実施。以降状態変化する要因が無い。	
		△	実績のない燃焼条件で作動した可能性があることから要因として除外できない。	D-3
		△	実績のない燃焼条件で作動した可能性があることから要因として除外できない。	D-4
		△	実績のない燃焼条件で作動した可能性があることから要因として除外できない。	D-5
		×	テストマヌーバは正常に実施。以降状態変化する要因が無い。	
		×	VOIの直前、及びVOI以降に正常なRCS制御が実施されていることからRCSの機能性能の健全性が確認されている。	
		×	ΔV前後の各部圧力変化は観測された加速度から求められるΔV量と整合しておりP3に影響を及ぼすだけの外部漏洩は考えられない。	
		×	三重冗長構成としており、二台同時異常が発生することは考えられない。	
		×	現在、正常に機能しており、永久故障は発生していない。シングルイベントによる致命的な異常が発生していないことはテレメトリデータにより確認されている。	
		×	事象発生前後を含め、設計通りの動作が確認されている。	
×	152秒の瞬間に衝突する確率はきわめて小さく、かつ探査機に異常は見られない。			

原因である可能性のある要因

A.2b あかつきFTA

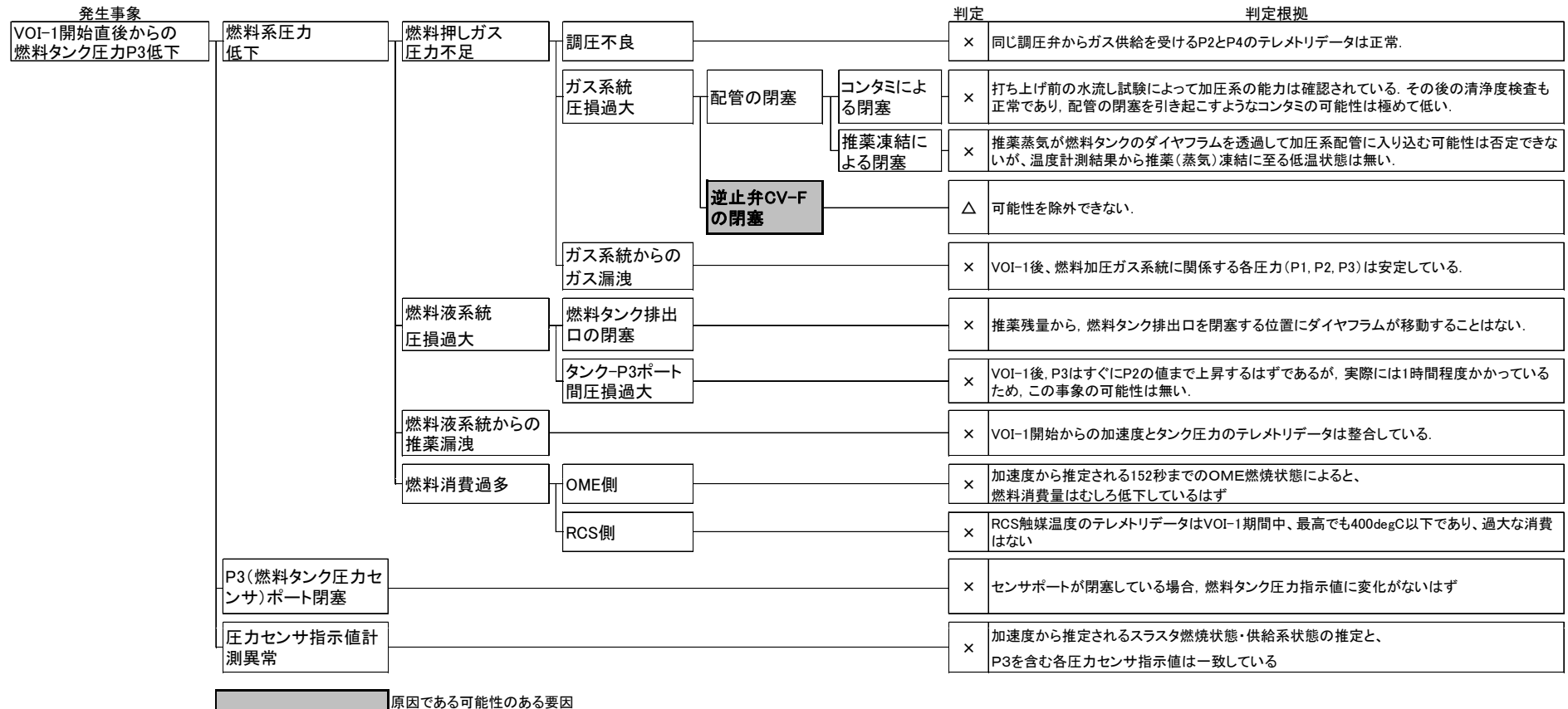
OMEに起きた事象(5候補)の原因推定を行い、「逆止弁CV-Fの閉塞」を特定した



原因である可能性のある要因

A.2c あかつきFTA

参考として、VOI-1時に発生した別の不具合項目「燃料タンク圧力P3低下」の原因推定を行い、A.2b項と同じ「逆止弁CV-Fの閉塞」を特定した

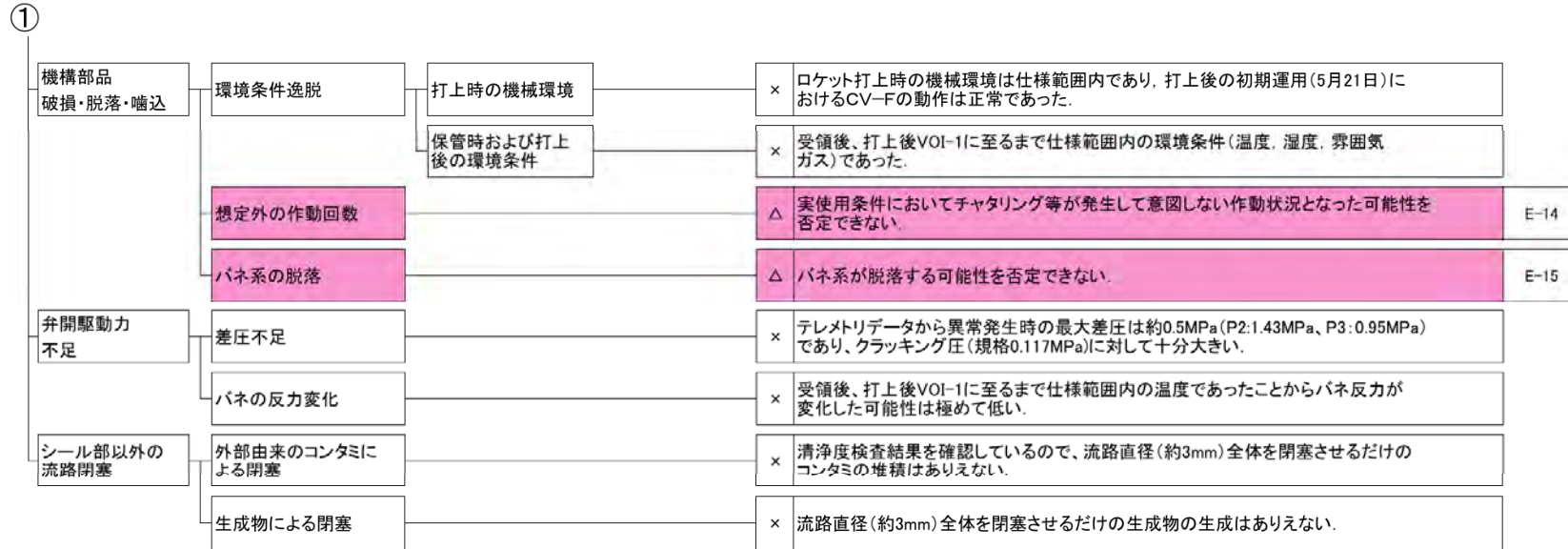


A.2d あかつきFTA

「逆止弁CV-Fの閉塞」の原因候補を絞り込んだ

発生事象	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	△ 試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	E-1		
		温度によるシール材特性変化	× 受入検査後、打上後VOI-11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	△ 要求仕様には入れてないため、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	△ 要求仕様には入れてないため、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)印加後の正常作動を確認した。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	△ 試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	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-11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。	
			バルブモジュール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	
		弁体と本体のアライメント不良	設計・製造不良	△ 認定試験結果、受入試験結果は正常であったが、個体差に起因する可能性は否定できない。フライト品の詳細な検査記録についてはまだ確認できてない。	E-6	
			△ 認定試験結果、受入試験結果は正常であったが、個体差に起因する可能性は否定できない。フライト品の詳細な検査記録についてはまだ確認できてない。	E-7		
		弁体・本体の表面不良	しゅう動による摩耗・表面荒れ	△ 実使用雰囲気下におけるしゅう動特性については未確認であることから、現段階では可能性を否定できない。	E-8	
			材料適合不良 面腐食	△ 実使用雰囲気下におけるしゅう動特性については未確認であることから、現段階では可能性を否定できない。	E-9	
製造不良			△ 受入試験結果は正常であったため、可能性は低いが、完全には否定できない。試験・検査の詳細な記録についてはまだ確認できてない。	E-10		
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ものの、偶発的な発生の可能性は否定できない。	E-16			
しゅう動生成物噛み込み		推奨環境下での生成物生成	△ 燃料蒸気雰囲気下におけるしゅう動部での生成物については未確認であることから、可能性を否定できない。	E-11		
	想定外の作動回数	△ 実使用条件においてチャタリング等により意図しない作動状況となっていないかについては未確認であることから、可能性を否定できない。	E-12			
燃料・酸化剤の生成物による弁作動の阻害	△ 燃料・酸化剤蒸気が混合することにより硝酸塩が発生し、しゅう動抵抗を増大させた可能性を否定できない。	E-13				

A.2d あかつきFTA(つづき)



B.1 逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討

設計・製造・使用材料等に起因する不具合を検証する。バルブメーカーとの協議や工場内の調査を通じて以下の項目について情報が得られた。

E-1) シール部の異材使用による材料適合不良

製造・検査記録を確認した結果、シール部は、設計図面指示通り、推奨適合性のある材料で製造されていることが確認された。

E-4) しゅう動部の異材使用による材料適合不良

E-10) しゅう動部製造不良

製造・検査記録(材料証明や表面処理記録など)から推奨への適合性が確認された。

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

検査記録を確認した結果、規格内で製造されていることがわかった。

E-5) 固定方法不良によるクリアランス悪化

バンド締め付けによるバルブボディの変形量を検討し、その変形量が十分小さいことを確認した。

以上の調査などから、逆止弁の設計・製造情報を確認し、上記が閉塞原因となる可能性は十分に低いと判断する。

B.2 弁体の動的な挙動が関係する原因候補の検討

1. レギュレータ・配管系の共振により、弁体が振動的にしゅう動する可能性の検証

〔E-12)想定外の作動回数によるしゅう動生成物嚙込〕

燃料タンク加圧を想定した動特性シミュレーションおよび試験を実施した。

その結果、レギュレータ同士及びレギュレータと逆止弁の連成振動、コンポーネント単体の振動とも発生しないことが確認された

2. 特定の作動域で逆止弁自体が励振して機構部品が破損・脱落・嚙込む可能性の検証

〔E-12)想定外の作動回数によるしゅう動生成物嚙込

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

フライト履歴の圧力状態を網羅するように逆止弁の上流圧・下流圧を変化させる試験及び解析を実施した。その結果、逆止弁の閉塞やチャタリング、フレットリング、想定外の振動などは検出されなかった

3. 軌道上でのタンク昇圧時の過渡的な応答による励振が機構部品へ与える影響の検証

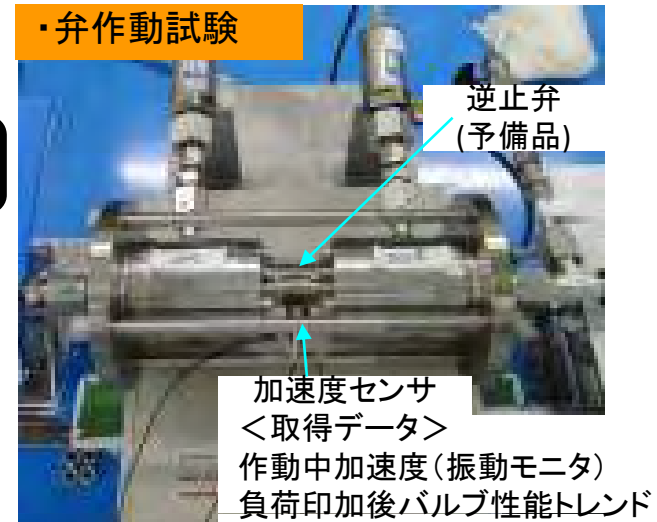
〔E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損・脱落・嚙込

E-15) バネ系の脱落

軌道上での急激なタンク昇圧時のテレメトリデータに基づいて、逆止弁上流圧をコントロールし、下流については配管径・配管長さ、ボリュームを同等にした試験を行った。

試験の結果、クラッキング圧、リシート圧の分散が0.002MPaD以内であり、閉塞に至らないことが確認された。

・弁作動試験



弁体の動的な挙動の解析・試験結果から、上記可能性は閉塞原因となる可能性は十分低いと判断した。

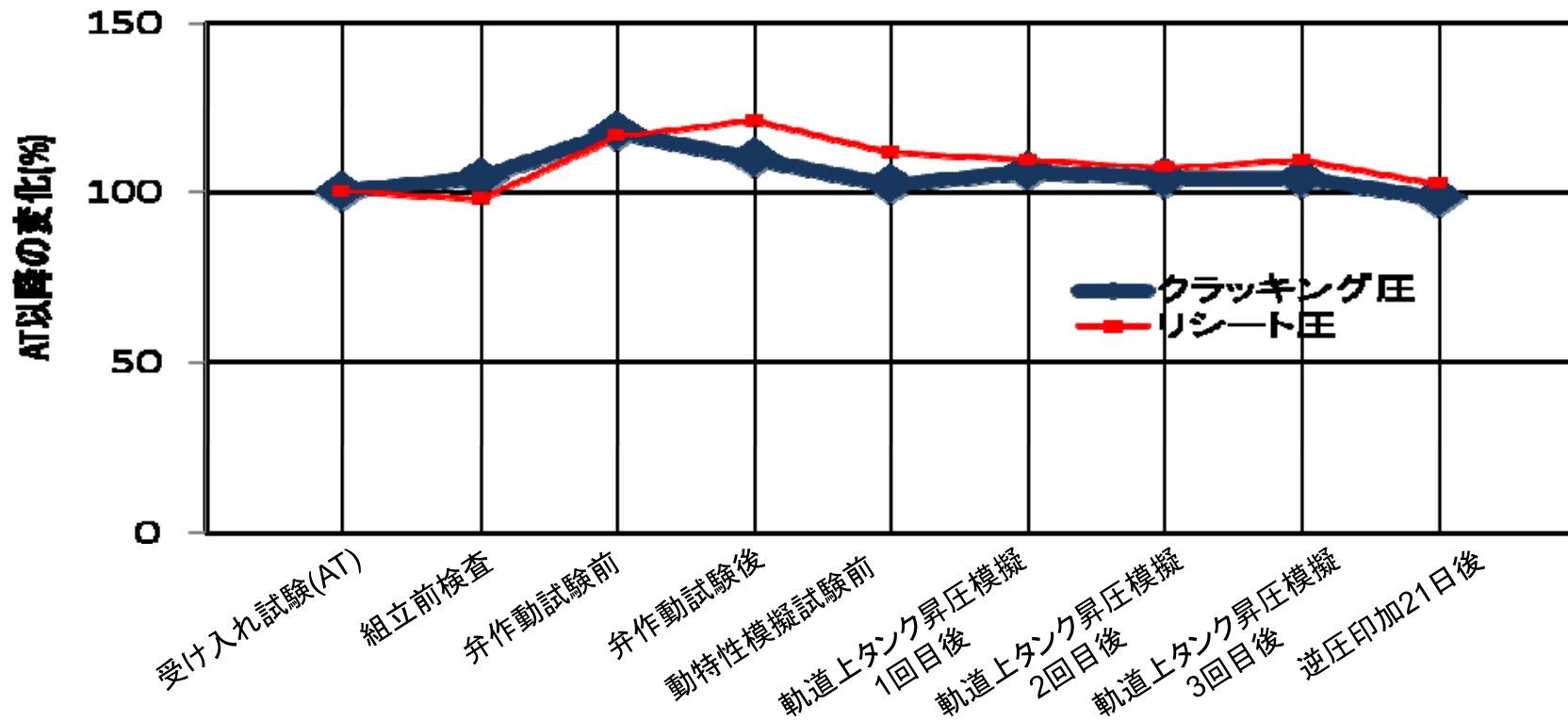
B.3 弁体の過挿入が関係する原因候補の検討

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

軌道上で35日間続いた逆圧状態を、軌道上データの1.5倍の圧力で21日間で模擬した。
試験前後において、クラッキング圧(逆止弁が閉→開になる圧力)、リシート圧(逆止弁が開→閉になる圧力)は下図の結果となった。(注:逆止弁の動作については、§ 1.2を参照のこと)

試験結果より、弁体の過挿入(弁体が正規の位置以上に閉側に入り込み、シールを過剰に押し込んだ状態)は観測されず、上記可能性は閉塞原因とならないと判断した。



B.4 摩耗が関係する原因候補の検討

バルブの健全性を確認するための地上試験の多くは、ヘリウムガス雰囲気で行われた。しかしながら、実際の動作時には推薬蒸気などが混入した雰囲気となる。この差異(推薬蒸気の混入により摩擦・摩耗が増加するか)の影響を検証した。

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

燃料雰囲気摩擦試験により確認した。本試験は、ピンオンディスク試験装置を用い、ヘリウムガス環境下あるいは推薬蒸気環境へ浸漬させた供試体をしゅう動させ、静止/動摩擦係数、摩耗量、摩耗粉を観察した。

その結果、むしろヘリウムガス環境下での試験の方が顕著に大きくなる結果が得られており、推薬雰囲気による悪化は観測されなかった。

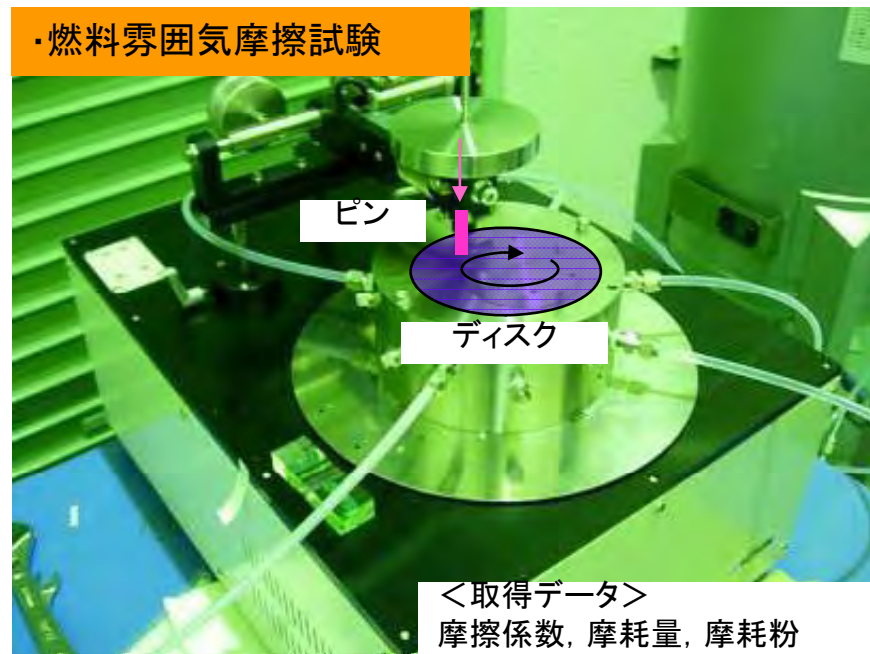
E-11) 推薬環境下での生成物の嚙込

ディスク摩耗量計測

供試体ディスクのしゅう動痕溝深さはヘリウム環境下では5~10 μm であった。一方、燃料雰囲気下では最大でも4 μm であり、燃料雰囲気で悪化することはなかった。

推薬環境下での生成物

しゅう動試験の結果、金属同士がこすれあって発生する金属粒子が計測されたものの、燃料もしくはその他との化合生成物は見られなかった。



推薬環境が摩耗に対して悪影響を与える事象は観察されず、これらの可能性は閉塞原因としないと判断した。

B.5 推薬移動速度の評価

逆止弁の推薬移動速度の推定について、1)設計時に採った手法と、2)今回の不具合後の知見による透過モデルによる評価手法のそれぞれを以下に示す

1) 設計時の評価:リークモデルに基づく評価

- 1-1) Heリーク速度から、等価オリフィスを流れる粘性流を仮定し、等価オリフィス径を推定した。
Heリーク測定では、1成分系で、弁下流を加圧、弁上流を真空としているため、粘性流を仮定した

粘性流の式
$$Q_{\text{mass}}^{\text{Flow}} = \pi \rho \frac{d^4}{128 \mu L} \Delta P$$

$Q_{\text{mass}}^{\text{Flow}}$: 流れの質量速度 (mg/s)
 ρ : 上下流圧の平均での密度 (g/m³)
 μ : 粘性係数 (Pa·s)
 d, L : 孔直径, 長さ (mm)
 ΔP : 差圧 (MPa)

- 1-2) 推薬移動速度として、(He+推薬)2成分系での分圧差によるオリフィス内拡散による評価を行った。
推薬移動速度測定では、全圧一定(1気圧)の(He+推薬)2成分系において、弁下流は飽和推薬蒸気、弁上流の推薬濃度はゼロ、というコンフィグレーションになる。
そこで、オリフィス内を分圧差により推薬が拡散するとして、推薬リーク速度を評価した。

拡散の式
$$Q_{\text{mass}}^{\text{Leak}} = D_{\text{gass}} \frac{\pi d^2}{4 L} \Delta P \frac{M}{RT}$$

$Q_{\text{mass}}^{\text{Leak}}$: リーク速度 (mg/s)
 D_{gass} : 気体の相互拡散定数 (m²/s)
 RT : 気体定数 (8.3 J/mol K) × 温度 (K)
 ΔP : 分圧差 (= 飽和蒸気圧) (MPa)

1-3) 評価結果

	燃料	酸化剤
$Q_{\text{mass}}^{\text{Leak}}$	2×10^{-10} mg/s @0.0014MPa	2×10^{-8} mg/s @0.1MPa

§ 2.2.1中の表「推薬移動速度のモデル値と実測値の比較」の(A)項:透過を無視できると仮定して全量リークで推算

B.5 推薬移動速度の評価(つづき)

2) 再検証時の評価:透過モデルに基づく評価

2-1) シール材(高分子材料)の透過係数の実測および文献調査

	実測	文献値		
	透過係数 P_{er} ($m^2s^{-1}MPa^{-1}$)	透過係数 P_{er} ($m^2s^{-1}MPa^{-1}$)	溶解度 S (MPa^{-1})	拡散係数 D_{solid} (m^2s^{-1})
酸化剤蒸気	6×10^{-10}	3×10^{-10}	110	3×10^{-12}
燃料蒸気	2×10^{-11}	—	—	—
He	—	9×10^{-11}	1.1	8×10^{-11}

文献出典 Polymer Handbook, 3rd ed., J. Brandrup and E.H. Immergut, John Wiley & Sons, 1989

高分子材料における気体分子の透過係数は、溶解度(接する気体の分圧に比例する)と拡散係数の積に比例する。拡散係数は分子量に正の相関があるが、溶解度は分子種(極性等)に大きく依存する。そのため、Heよりも燃料の透過係数の方が大きくなっている。

なお、透過係数の絶対値は高分子材料の結晶度(プロセス依存)に強く依存し、実測値と文献値で異なることがある。

$$P_{er} = S D_{solid}$$

P_{er} : 透過係数 ($m^2/sMPa$)
 S : 溶解度 ($1/MPa$)
 D_{solid} : 固体中の拡散係数 (m^2/s)

2-2) 透過によるバルブ透過速度の評価

透過の式に基づき、He移動速度からシール材の幾何学パラメータ(A/t)を推定し、推薬の透過速度を評価した。

透過の式 $Q_{mass}^{Per} = P_{er} \frac{A}{t} \Delta P \frac{M}{RT} P$

Q_{mass}^{Per} : 透過速度 (mg/s)
 A, t : シール材のガス接触面積 (m^2), 厚み (m)
 ΔP : 分圧差 (=飽和蒸気圧) (MPa)
 P : 平均分圧 (= (1/2)飽和蒸気圧) (MPa)

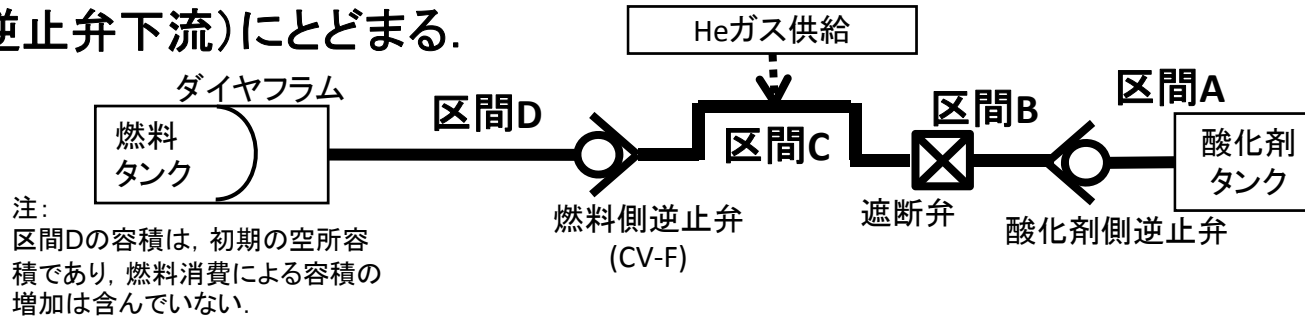
2-3) 評価結果

	燃料	酸化剤
Q_{mass}^{Per}	$1 \times 10^{-10} \text{ mg/s}$ @0.0014MPa	$3 \times 10^{-5} \text{ mg/s}$ @0.1MPa

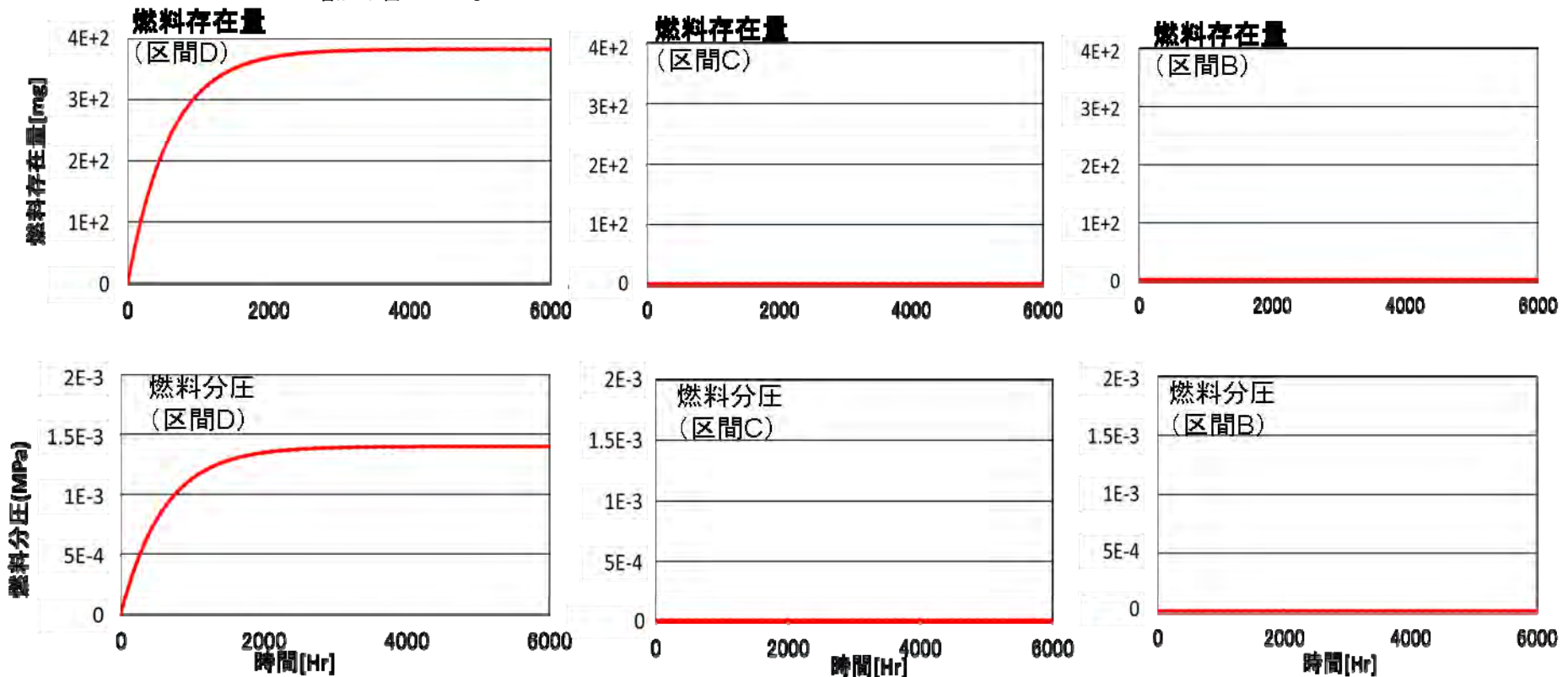
§ 2.2.1中の表「推薬移動速度のモデル値と実測値の比較」の(B)項:弁上下流の移動を全てシール材内部の透過と仮定したモデル

B.6 あかつき推進系での推薬移動量の推定(燃料)

実測した弁, ダイヤフラムの燃料移動速度を使って, あかつき推進系のガス供給配管を移動する推薬蒸気の量を算出した. 逆止弁を越えて移動する燃料蒸気はほぼ0であり, 区間D(燃料側逆止弁下流)にとどまる.



— 実測値解析
 .. フライト前解析



注) 実測値, フライト前解析ともに全区間でほぼ一致

B.7 酸化剤移動に関する過去の不具合事例調査

今回の不具合を受け、飛翔中および地上試験を含む、軽微な不具合事例まで範囲を拡げて調査を実施。塩の生成が直接的にミッション喪失に繋がる事例はないものの、燃料がMMH (モノメチルヒドラジン)の場合に塩の析出の事例があった。

▶衛星喪失につながった重大不具合例 —設計時に反映—

- **Mars Observer** (1992年9月打上げ 93年8月火星に接近 燃料:MMH 酸化剤:NTO※)
フライト中、ガス系配管の冷えた箇所での凝縮・液化した酸化剤が、パイロ弁を開いた時に燃料側に流れ、反応・爆発したと推定された。

▶軌道上での異常事例(ミッションは達成)

- **Viking-1** (1975年8月打上げ 76年6月火星到着 燃料:MMH 酸化剤:NTO※)
フライト中に調圧弁の内部漏洩が観測された。塩の析出がその原因であると推定された。
- **Intelsat-603** (1991年打上げ 燃料:MMH 酸化剤:NTO※)
フライト中、1回目のマヌーバ中に調圧弁が内部漏洩した。2回目、3回目のマヌーバで燃料側逆止弁閉塞が観測された。想定外のミッション長期化による、塩の析出がその原因であると推定された。

▶地上燃焼試験での不具合例

- **Marienr-9** (1971年5月打上げ, 11月に火星到着, 燃料:MMH 酸化剤:NTO※)
地上燃焼試験中に逆止弁が閉塞した。分解調査で鉄硝酸塩の析出が確認されたが、不具合原因としてはTFEの膨潤と推定された。

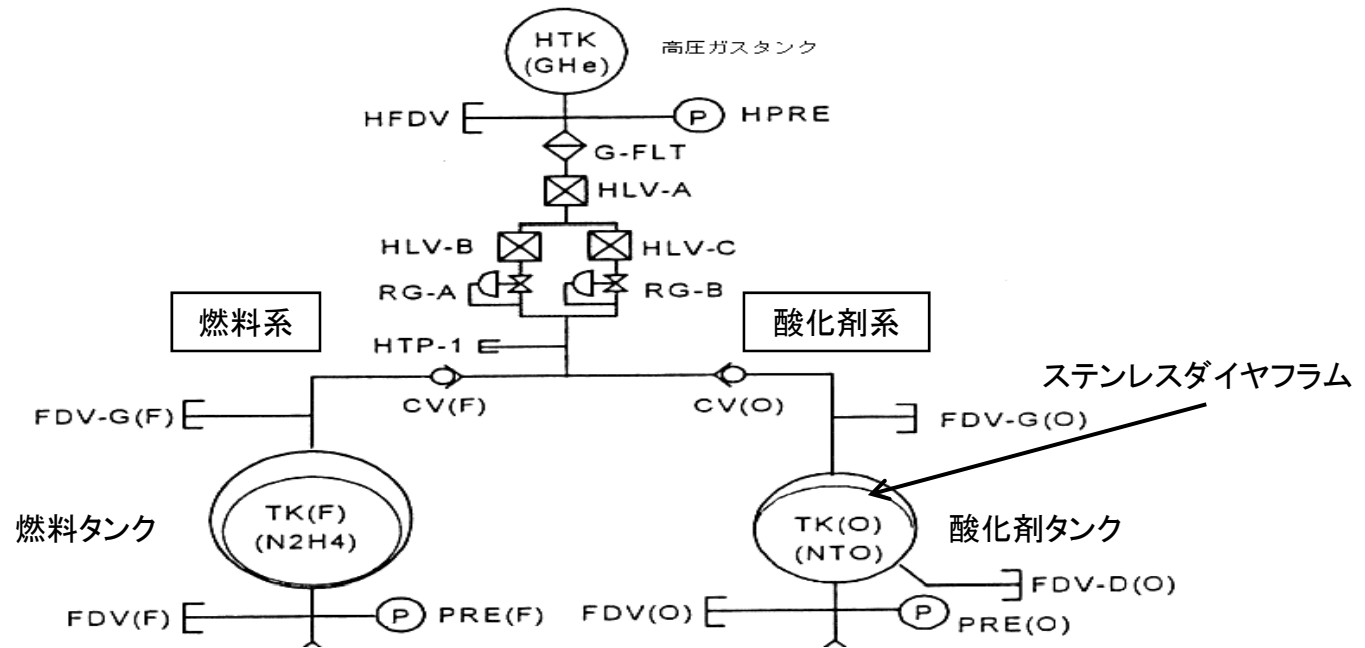
※NTOは四酸化二窒素(N_2O_4)の略称である。

実際の宇宙機への使用の際には、金属腐食性の緩和などを目的に、添加物(NOなど)を加えることが多い。
あかつきでは、NTOの名で N_2H_4 にNOを3%添加したMON-3を使用している。

B.8 2液推進系長期使用衛星のガス供給配管例

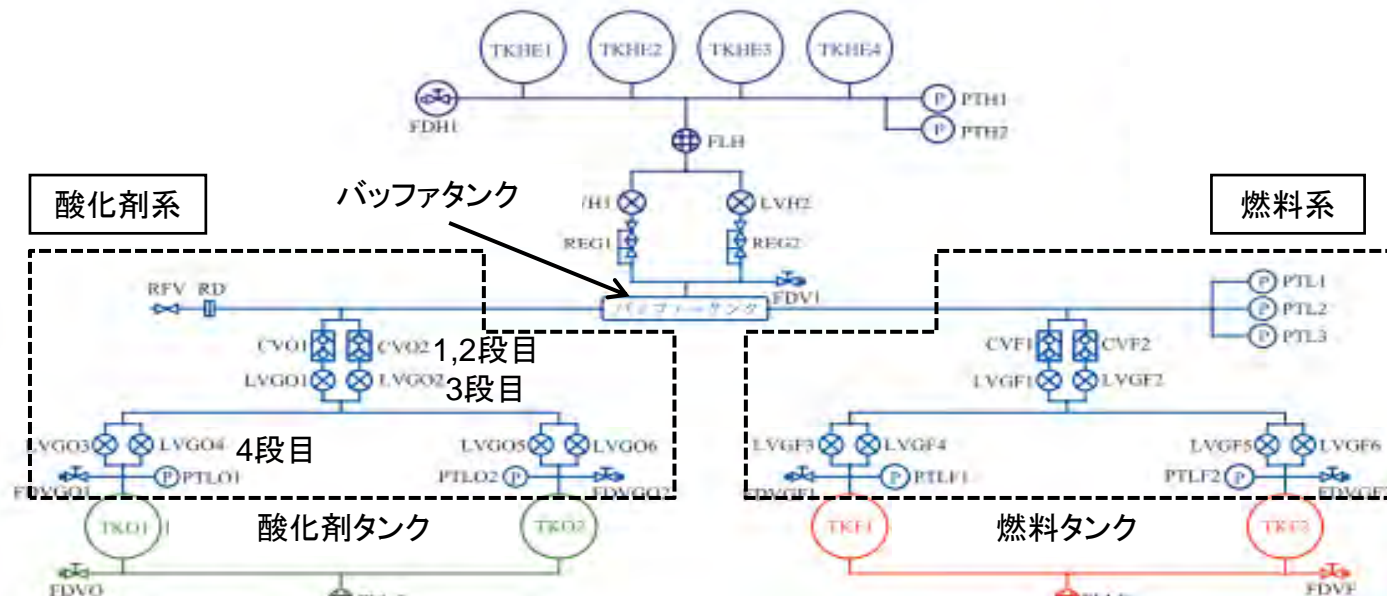
(a)はやぶさ

小惑星へのタッチダウンの際に確実に推進剤をエンジンに供給するためにステンレスダイヤフラムを配置した設計。
結果として、配管内での酸化剤蒸気の移動を遮断できている。



(b)HTV

有人ミッションの信頼性要求から弁を多段に配置し、また、ガス供給系配管の圧力上昇を緩和するためにバッファタンクを配置した設計である。
その結果、配管内での推進剤蒸気の移動を抑制できている。

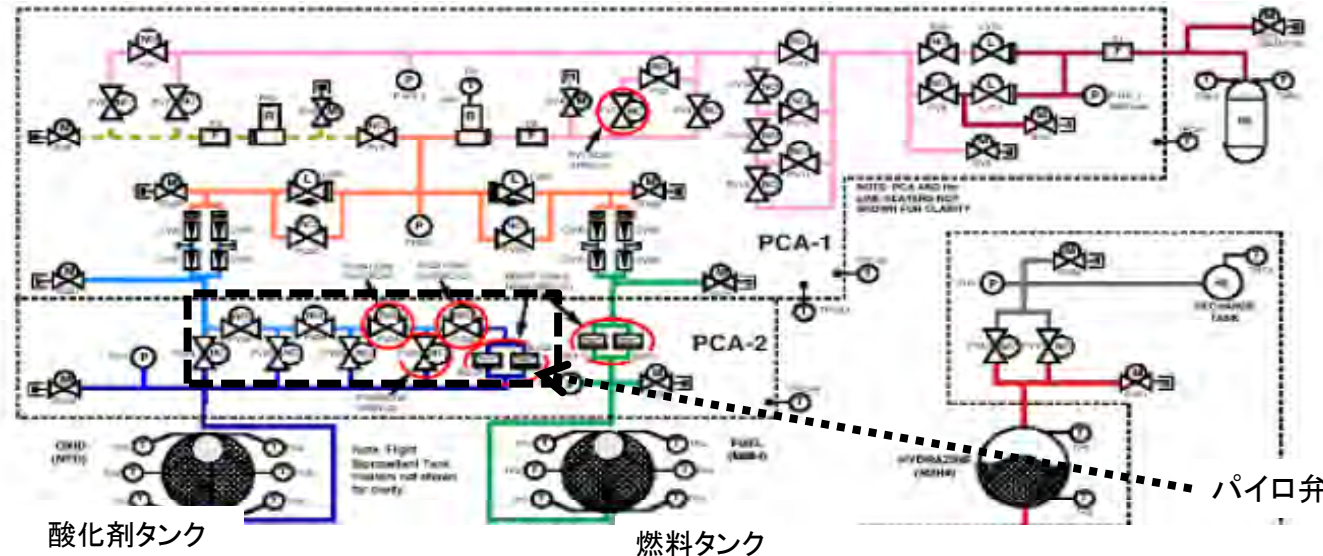


B.8 2液推進系長期使用衛星のガス供給配管例(つづき)

(c) Cassini (NASA 土星探査機)

出典: T. J. Barber, R. T. Cowley, "Initial Cassini Propulsion System IN- Flight Characterization", AIAA 2002-4152

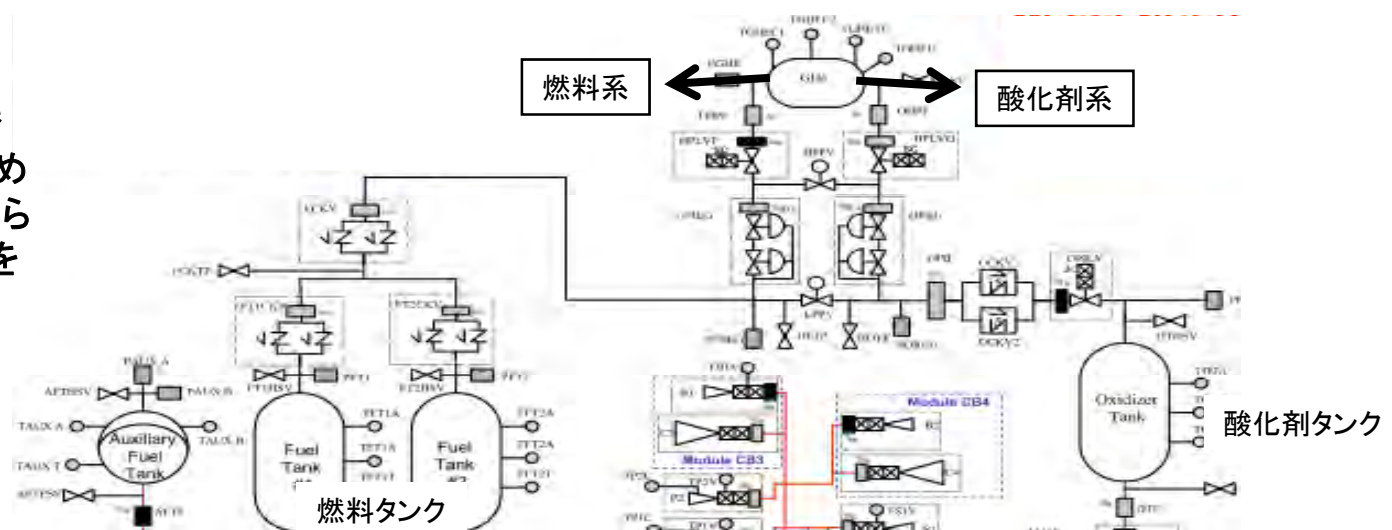
酸化剤蒸気の配管内での移動を抑止するために、多数のパイロ弁を配置した設計例



(d) Messenger (NASA 水星探査機)

出典: San Wiley, Katie Domer, "Design and Development of the Messenger Propulsion System", AIAA 2003-5078

推進蒸気の配管内での移動を抑止するために、高圧ガスタンクから燃料・酸化剤の配管を分けた設計例

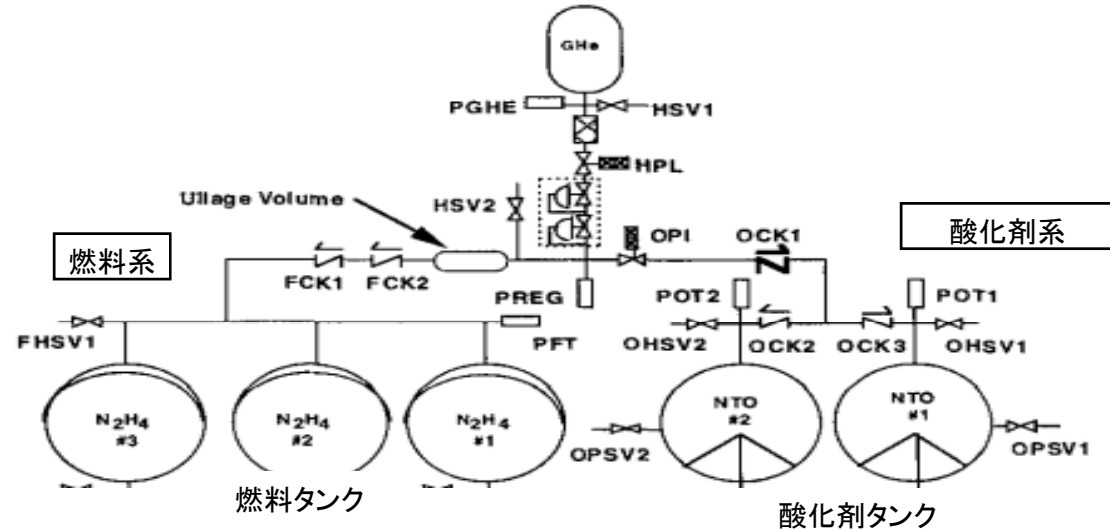


B.8 2液推進系長期使用衛星のガス供給配管例(つづき)

(e) NEAR (NASA 小惑星探査機)

出典: S. Wiley, G. Herbert, L. Mosner, "Design and Development of the NEAR Propulsion System", AIAA 95-2977

酸化剤蒸気の配管内での移動を抑止するために、逆止弁および遮断弁を配置した設計例

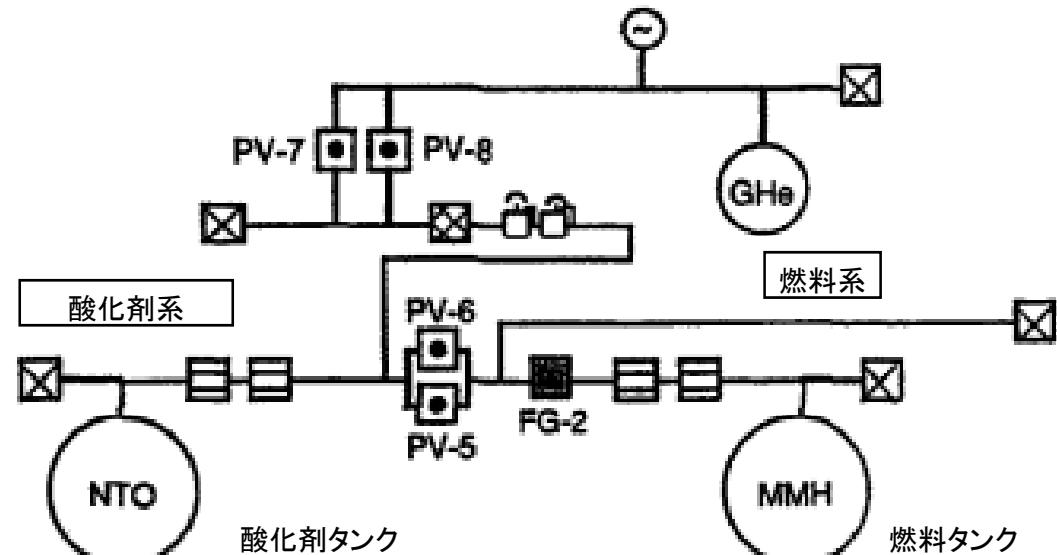


(f) Mars Observer (NASA 火星探査機)

出典: Carl S. Guernsey, "Propulsion Lessons Learned from the Loss of Mars Observer", AIAA 2001-3630

酸化剤蒸気の配管内での移動を抑止するために、逆止弁およびパイロ弁を配置した設計例

探査機喪失につながった最も確からしい不具合原因として、ガス系配管の冷えた箇所での凝縮・液化した酸化剤が、パイロ弁を開いた時に燃料側に流れ、反応・爆発したと推定されている。



C.1 解析によるOMEの状態の理解の現状

燃焼器内の現象は非常に複雑でモデル化の試みがなされているが、絶対値を定量的に議論するには冷却のモデル化などに課題が残されている。また燃焼器構造の強度や耐熱性を議論するための応力分布、破壊確率の解析も同様に定性的理解には役立つ状況にあるが、定量性および非定常性まで議論する状況にはなお研究が必要である。

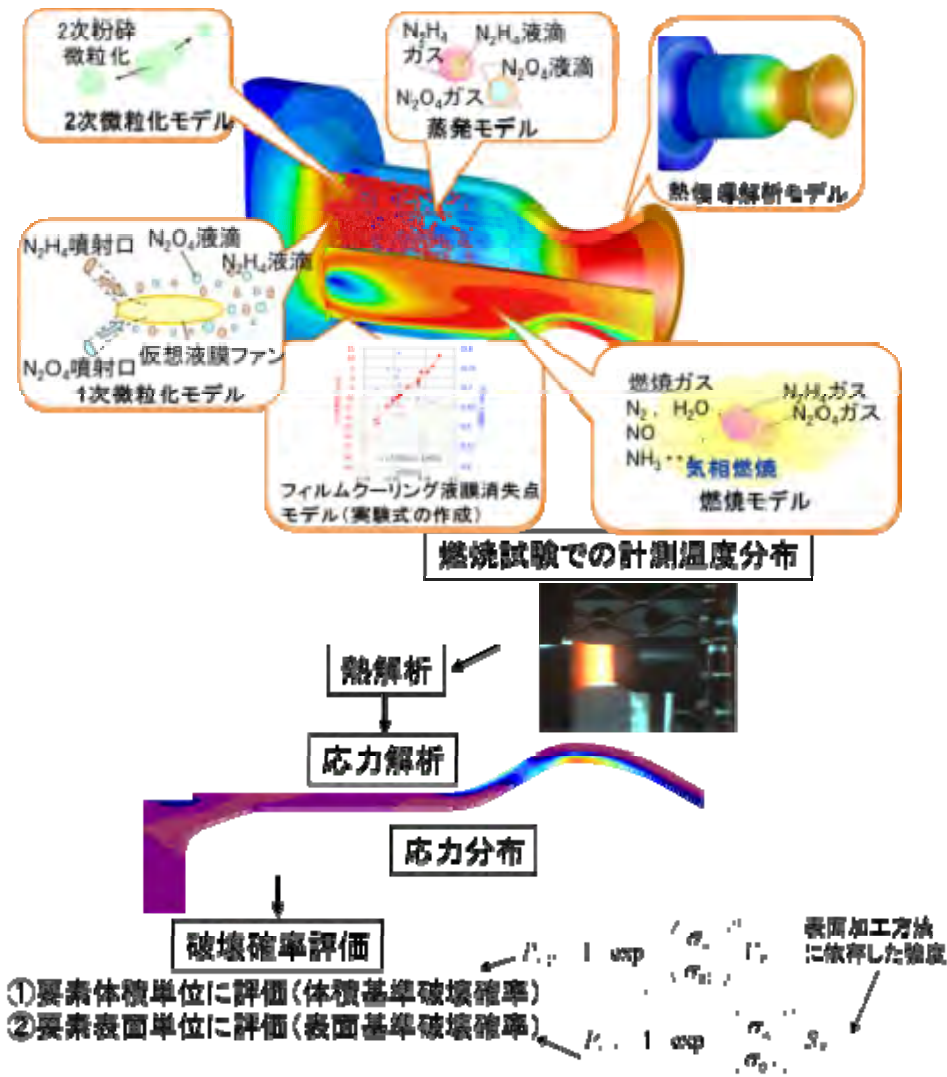
あかつき開発前からの長期的な研究テーマとして以下の解析を行っている。今回、設計条件を逸脱した燃焼でのデータが得られたことより、特に燃焼解析のモデル精度向上に向けた知見が得られると期待される。

燃焼解析

燃焼器内部での定常燃焼状態を解析した。内部の複雑な燃焼を計算しており、現時点では、燃焼試験結果を反映したフィルムクーリング(FC)消失点位置を与えることで、試験結果をほぼ再現できている。今後の長期的な取り組みとして、FCのモデル化および、非定常解析が課題となっている。

強度解析

燃焼試験あるいは燃焼解析で得られた燃焼器温度分布から、燃焼器内部の熱応力を解析し、破壊確率を評価している。



C.2 破損燃焼器の破面・表面観察

燃焼試験(その1)で破損した燃焼器について、破面観察を行った結果を示す。破面観察を行った結果、破壊の起点が確認され、起点近傍に明確な材料欠陥等は確認されなかった。すなわち、燃焼試験(その1)での燃焼器破損は、単純な製造不良によるものではないと判断できる。



a)低倍像



b)観察箇所1の組織



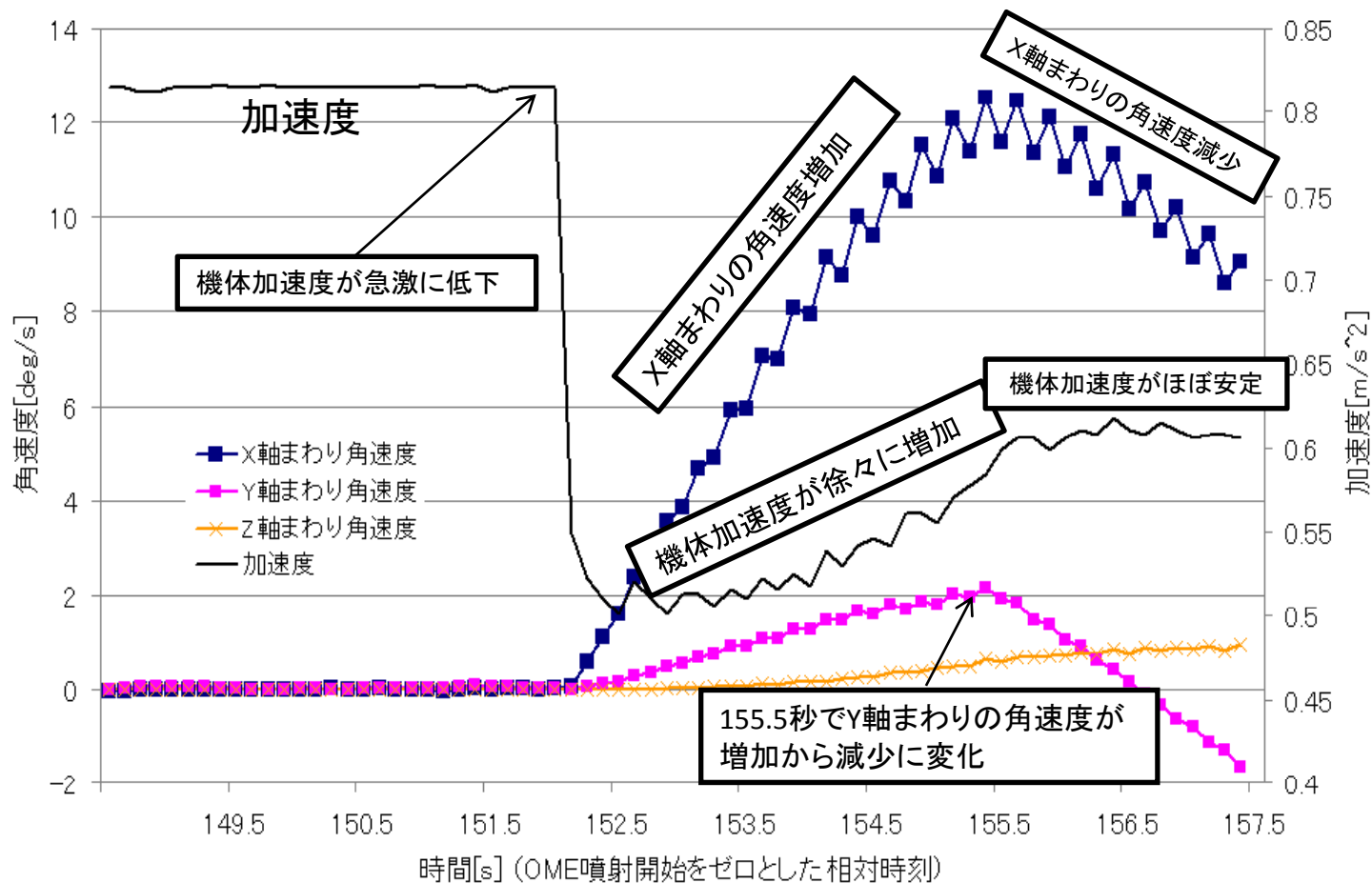
c) 起点近傍の拡大像



d) 起点近傍の拡大像2

C.3 VOI-1後半の機体の加速度・角速度履歴 (第1回調査部会)

OMEが受けた影響を検証した燃焼試験のデータと比較するために、第1回調査部会資料から金星投入において異常発生したときの機体加速度および姿勢などの諸量の履歴を再掲する。



C.4 破損燃焼器の推進特性

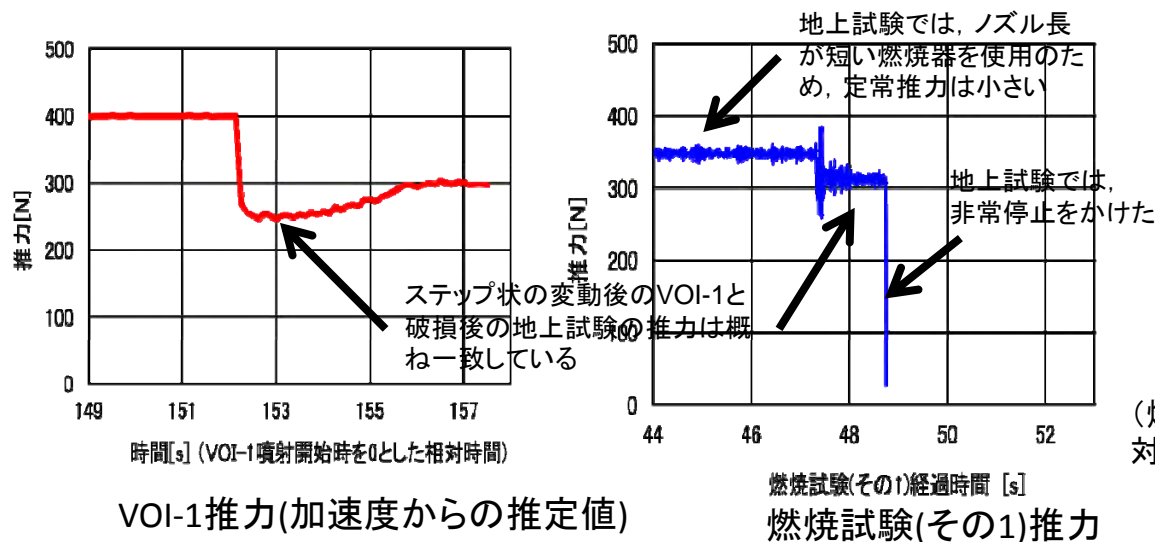
燃焼試験(その1)で計測された、スラストノズルでの破損後推力と、VOI-1での挙動(加速度テレメリーデータからの推定推力)を比較した。

VOI-1での挙動(テレメリーデータ)；

- 噴射開始後152sでステップ状の推力低下が観測され、その後、2段階の推力変化が見られた。

燃焼試験(その1)での挙動；

- 燃焼試験(その1)では、破損時にVOI-1で観測されたようなステップ状の推力低下が見られた。
- 他の破損事例では、周方向クラックが確認された例があり、このような破損形態で燃焼を継続すればさらに破損が進行してVOI-1で観測されたような推力の変化が起こり得ることを示唆している。



ほぼ半周する周方向クラック

ノズル破損時のクラック例

(燃焼試験(その1)とは別試験での破損燃焼器に対する蛍光浸透探傷の様子)

VOI-1の噴射開始後152s以降の推力の振る舞いは、燃焼器破損によって説明しうる。

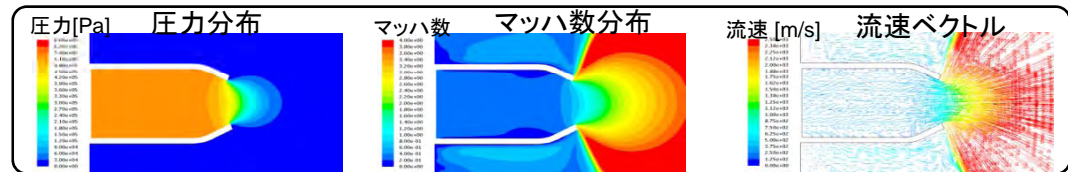
C.4 破損燃焼器の推進特性 (つづき)

フライトに供した燃焼器とスラストノズル部で破損した燃焼器の写真, および破損前後での推進特性の比較を示す. 横方向推力については, 破損した燃焼器形状データをもとにCFDで推算を行った. 第2回調査部会で報告した, VOI-1の異常発生時に計測されたX軸周りの角加速度テレメトリデータから推定した横推力(§ C.3)と, 概ね一致する結果となった.



燃焼器フライトモデル

破損燃焼器の横方向推力の推定(CFD結果例)



フライト燃焼器と破損燃焼器の推進特性



検証試験で破損した燃焼器
(燃焼試験その1)

	フライト燃焼器		地上試験(その1)燃焼器 破損後	
	VOI-1 開始時	VOI-1 OME噴射152s以降	燃焼試験データ	CFDによる推算
推力[N]	476	300	315	307
横推力[N]	0	5~20	(計測データなし)	14

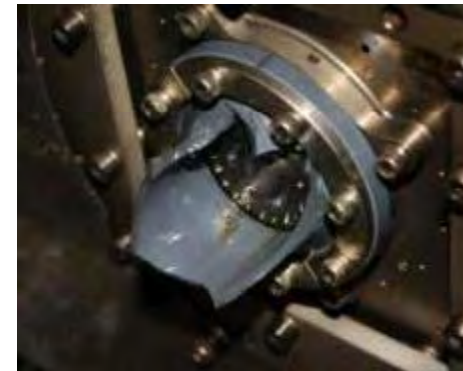
C.5 着火衝撃緩和検討

OMEの再着火に向けた検討のため、破損した燃焼器を用いて再着火試験を実施中。



ノズル破損後の燃焼器
(浸透探傷検査の結果のノズル破損で
貫通クラックの存在確認)

着火直後にスラストが全
損するケースが発生



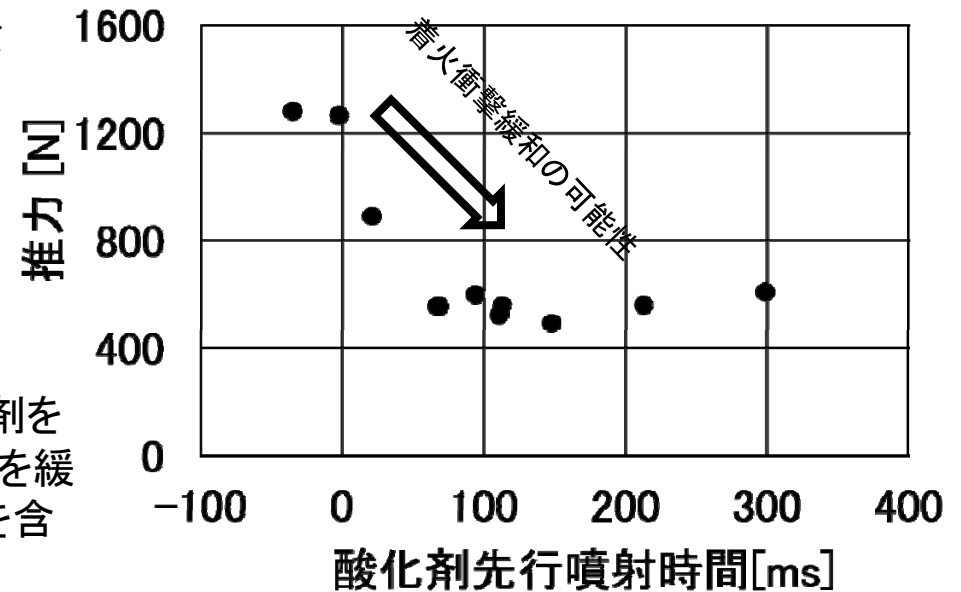
再着火後に破損が進行した燃焼器

再着火の着火衝撃に耐えられない可能性がある。軌道上の燃焼器の状態(貫通クラックの有無等)は現時点では不明である。



着火衝撃を緩和する運転条件の検討

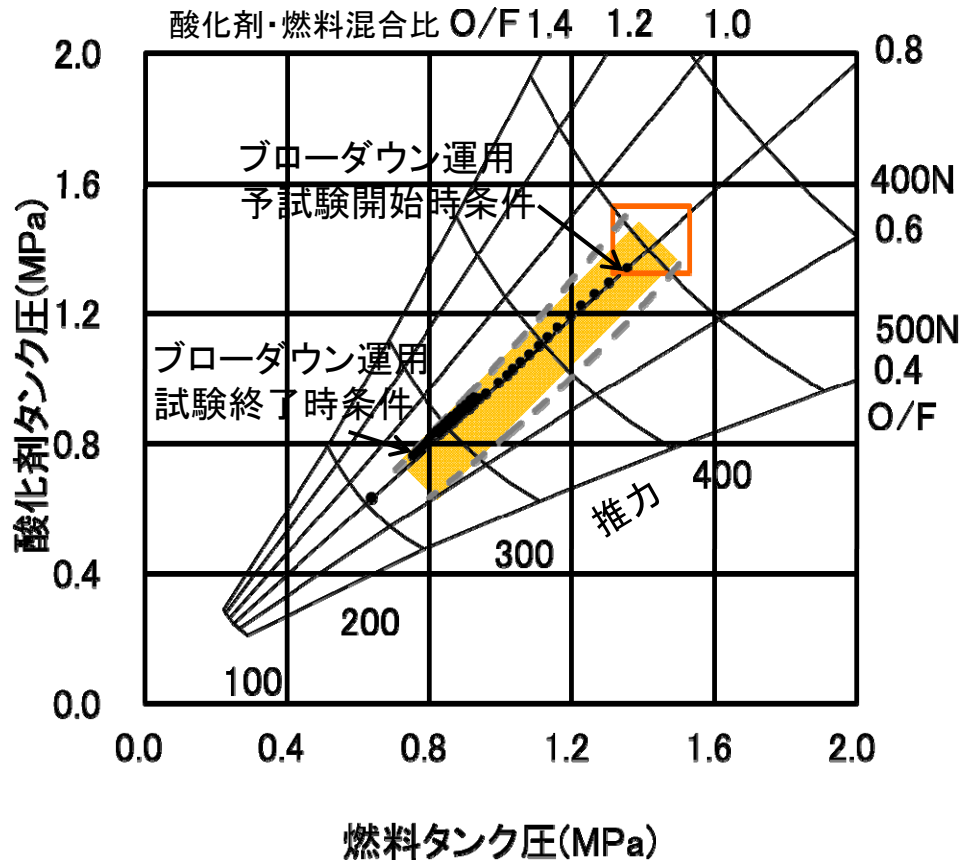
着火衝撃を計測した結果、100~200ms酸化剤を早めに噴射させて着火させることで、着火衝撃を緩和できる可能性があり、実機での実施可能性を含め検討中。



C.6 OME連続噴射の実現可能性検討

VOI-1では逆止弁閉塞により燃料・酸化剤混合比が設計条件を逸脱し、OMEに影響（破損の可能性）を与えたと考えられる。

⇒ 次回近日点マヌーバを考慮し、逆止弁閉塞下でも設計混合比を維持する手法（燃料・酸化剤タンクのブローダウン運用）を燃焼試験にて検討中。



マヌーバ模擬試験その1では燃焼器に変化は見られず、燃焼は正常に行われた

これまでの計画作動範囲外での運用になるため、実施可否について継続検討中

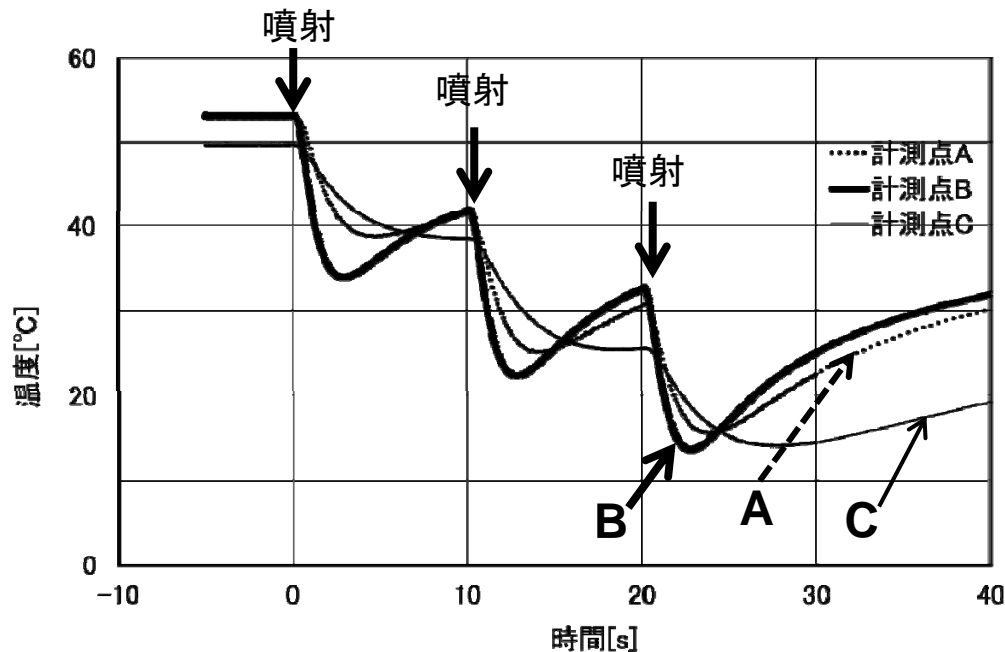
- フライト計画作動範囲(設計点)
- ブローダウン運用予備試験結果
- 今後の軌道上運用で推定される作動範囲

C.7 酸化剤投棄手法検討

今後OMEによる金星周回軌道投入が不可能になった場合、RCSによる金星周回軌道投入を考慮することになる。その際、RCSは1液式スラスタのため酸化剤を投棄し探査機のイナータ重量を減らす必要がある。

⇒ 酸化剤の排出手法(凍結防止等)の検討を予備実験により実施中

予備実験によるOME各部の温度変化の例を以下に示す。



温度計測点

この例では、1s程度以下のパルス噴射であれば酸化剤が凍結せずに排出運用が可能である見込みが得られているが、今後、燃焼器が完全に破損している場合の排出可能性を含め、引き続き実験的検討を実施予定。

酸化剤投棄による推力への寄与は理想的な膨張を仮定できる場合でも比推力が数十秒のレベルであり、現実には軌道変換への寄与は小さい可能性が高い。