調査1-1

「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3)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 2011年6月30日

概要

第2回の調査部会までの議論で、あかつきの金星軌道投入失敗は、

- 燃料側逆止弁が閉塞したことが原因であり、
- ・ 逆止弁閉塞によってVOI-1中の軌道制御用エンジン(OME)の燃焼状態が設 計条件を逸脱しOMEに何らかの異常が発生した

ことによる、と推定された.

これを受けて、本資料では第2回調査部会後に行った調査検討、解析および各 種検証実験などの結果から、

- ・ 逆止弁閉塞の原因究明の状況報告
- ・ OMEが現在どういう状況にあるかの推定,
- 再度金星周回軌道への投入を試みるための準備の状況

の主として3点について、検討の現状と得られた結果を、第3回部会への報告としてまとめたものである。

目次

- 1. 経緯及びあかつきの現状
 - 1.1 第2回部会までの不具合原因推定シナリオ及び 第3回部会報告内容サマリ
 - 1.2 逆止弁及び軌道制御エンジン(OME)概要
- 2. 逆止弁閉塞原因調查
 - 2.1 逆止弁閉塞原因候補について
 - 2.2 「燃料・酸化剤反応生成物による弁の動作不良」 の検討
 - 2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定
 - 2.2.2 あかつき推進系での推薬移動量の推定
 - 2.2.3 弁体付近の塩生成可能性評価
 - 2.2.4 塩生成による逆止弁閉塞の可能性評価
 - 2.2.5 酸化剤移動に対するあかつきの設計時の 考え方と現在の知見に基づく理解
 - 2.2.6 他衛星の状況
 - 2.2.7 将来ミッションでの対策案
 - 2.3 コンタミ噛み込みの可能性検討
 - 2.4 逆止弁不具合の検証結果(まとめ)

- 3. 逆止弁閉塞に起因してOMEの受けた影響について
 - 3.1 OMEの受けた影響候補について
 - 3.2 インジェクタ噴射状態確認試験結果
 - 3.3 VOI-1を再現した地上燃焼試験 3.3.1 燃焼試験(その1)
 - 3.3.2 燃焼試験(その2)
 - 3.4 OMEの受けた影響の検証試験結果(まとめ)
- 4. 金星軌道再投入に向けた検討
 - 4.1 金星軌道再投入に向けた軌道計画
 - 4.2 金星軌道再投入運用のトレードオフ
 - 4.3 金星軌道再投入運用に向けた検討
 - 4.4 近日点近傍での高温環境への対応について
 - 4.5 次回近日点マヌーバに向けた今後のスケジュール
- 5. 第3回調査部会報告のまとめ

補足資料集

1. 経緯及びあかつきの現状

- 金星探査機「あかつき」は平成22年5月21日にH-IIAロケット17号機で打ち上げられ、 平成22年12月7日金星周回軌道への軌道投入マヌーバ(VOI-1)を実施. 燃焼開始後 約152秒後の大きな姿勢変動の後,約158秒後に燃焼を停止(予定では約720秒後に 燃焼停止). 金星周回軌道投入に失敗し太陽周回軌道を飛行中(下図参照)
- 2. 平成22年12月8日の宇宙開発委員会において原因究明並びにそれらの対策等に必要な技術的事項について調査部会において調査審議することを決定.



軌道投入マヌーバ(VOI-1)の運用計画・実際

- 1. 経緯及びあかつきの現状(つづき)
 - 3. 平成22年12月17日, 27日の2回の調査部会において, 事実確認, FTAを用いた推定 原因の洗い出し及び絞り込みを以下のように実施.
 - ① 故障の木解析(FTA)の結果,不具合の根本原因は,ガス系配管の逆止弁CV-F の閉塞と推定
 - ② 逆止弁CV-F閉塞の結果として, 軌道制御エンジン(OME)の燃焼状態が影響を 受けたと推定
 - ③ OMEが探査機に外乱トルクを与え, 自律制御により燃焼停止に至ったと推定
 - 4. 不具合発生メカニズム推定の詳細化のため,試験・検証を実施.ただし,供試体数に 制約があるため,最大限有益な検証が行えるよう各試験検証を慎重に実施した.試験の進行は,異常な状況の再現における試行錯誤および大幅に設計条件を逸脱した 試験が必要なための設備や試験実施上の安全制約などのため,2回調査部会で提示 したスケジュールよりも多少の遅れが生じた.
 - 5. 平成23年4月13日の宇宙開発委員会において、その時点のあかつきの状況を報告. 4月17日の近日点に向けた運用方針について説明した.
 - 6. あかつきは太陽周回軌道を現在正常に飛行中. 探査機の搭載機器は正常に動作している.



1.2 逆止弁及び軌道制御エンジン(OME)概要



差圧(上流側圧力 -下流側圧力)が規定圧力(ク ラッキング圧)以上になると、逆止弁の弁体が下 流側に動き、上下流の流路が開く.



差圧(上流側圧力-下流側圧力)が規定圧力(リシー ト圧)以下になると、弁体がばね力により上流側に動いて、上下流の流路は閉じる

- VOI-1において,酸化剤系逆止弁(CV-O)は正常に作動したが,燃料系逆止弁(CV-F)が正常に開かなかった
- 燃料系・酸化剤系では同一の逆止弁を使用している。



- ・あかつきに1基搭載
- ・推力500N級
- ・燃料(ヒドラジン),酸化剤(NTO)を使用した2液推進系
- ・ヘリウムガスを調圧して加圧する調圧式推進系
- ・燃焼器に1体構造の窒化珪素系モノリシックセラミックスを 使用
- ・噴射器(インジェクタ)はチタン合金製
- ・燃焼器内面を燃料で冷却(フィルムクーリング・FC)
- ・噴射器から押し出された燃料・酸化剤を衝突・混合させて 燃焼
- VOI-1において、OME噴射中に探査機に過大 な姿勢擾乱が発生したため、自律制御により燃 焼を停止した

2. 逆止弁閉塞原因調査 2.1 逆止弁閉塞原因候補について

あかつき不具合の原因とされた燃料側逆止弁閉塞について,逆止弁閉塞に至った原因として第1,2回調 査部会でFTAにより以下16項目を抽出(§A.2d). その後,対応する項目について以下のような検討方針 で確認. 第1,0回調本部会で抽出された

第1, 2回調査部会で抽出された 逆止弁閉塞原因候補(16項目)	
E-1) シール部の異材使用による材料適合不良 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-10) しゅう動部製造不良	- ①逆止弁の設計・製造が関係する原因候補 の検討
E-12) 想定外の作動回数によるしゅう動生成物噛込 E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損脱落・ 噛込 E-15) バネ系の脱落	- ②弁体の動的な挙動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	- ③弁体の過挿入が関係する原因候補の検討
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-11) 推薬環境下での生成物の噛込	_ ④摩耗が関係する原因候補の検討
E-13) 燃料・酸化剤反応生成物(塩)による弁動作の	- ⑤燃料・酸化剤反応生成物(塩)が関係する原 因候補の検討
E-16) コンタミの噛込	- ⑥コンタミが関係する原因候補の検討 8

2.1 逆止弁閉塞原因候補について(つづき) 一逆止弁閉塞原因候補検討状況サマリー

①逆止弁の設計・製造が関係する原因候補の検討

バルブメーカの設計・製造情報の確認およびそれをもとにした解析結果から, 原因候補にはなりえないと判断した(§B.1)

②弁体の動的な挙動が関係する原因候補の検討

弁体の動的な挙動の解析および試験の結果より,原因候補にはなりえないと 判断した(§B.2)

③弁体の過挿入が関係する原因候補の検討

長期逆圧印加試験の結果より、原因候補にはなりえないと判断した(§B.3)

④摩耗が関係する原因候補の検討

推薬雰囲気でのしゅう動特性取得試験の結果より,原因候補にはなりえないと 判断した(§B.4)

⑤燃料・酸化剤反応生成物(塩)が関係する原因候補の検討 酸化剤の弁上下流移動測定により原因候補である可能性を確認した(§2.2)

⑥コンタミが関係する原因候補の検討

組立および試験の作業手順・検査記録より,原因候補である可能性は低いが, 完全には排除できない.(§2.3)

2.2 「燃料・酸化剤反応生成物による弁の動作不良」の検討

§2.1⑤項に対応した検討として、燃料酸化剤のガス供給配管内の移動量を見直し、配管内各部での存在量を推定、両者の反応生成物による影響を調べ、逆止弁閉塞との関係を調べる.



①実推薬を用いて弁を通過する推薬蒸気の移動速度を測定(§2.2.1)

②推薬移動速度に係る実験値を用いてあかつき推進系配管での推薬移動量を推定 (8222)

(§2.2.2)

- ③燃料·酸化剤反応による塩生成を確認(§2.2.3)
- ④逆止弁閉塞の可能性について実験的検証を実施(§2.2.4)

2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定(設計時の手法) 設計時には推薬蒸気の移動は、弁体内の隙間を通過する量と考え(リークモデル)、ヘリウ ムの移動量でこれを管理し、推進剤蒸気などへ換算することによって予測していた。

①弁上下流の推薬(酸化剤・燃料)蒸気の移動速度を測定しやすい基準気体を用い, フライトを想定した常温環境で評価することとした



②実際に弁上下流に差圧を立てて基準気体(ヘリウム)移動速度を測定. 孔を仮定し,
 基準気体の移動速度からその孔を通過する等価な孔径(等価オリフィス径)を計算
 ⇒ リークモデル(詳細は§B.5を参照)





2.2.1 弁上下流間の推薬移動速度の推定(再解析)

不具合を受け弁上下流間の移動速度を実推薬を用いて実測し、以下の知見を得た.

逆止弁について,実測した推薬移動速度は,そこを通過する推薬量をすべてリーク量とした(リークモデル)場合よりも大きいものであった(下表AとCの比較). (遮断弁については,両者は同程度であった)

⇒ 逆止弁の透過による推薬移動速度が想定以上である可能性が示唆され, 推薬移動が全て透過のみによる(透過モデル)として透過量を評価(下表のB)

逆止弁	A) 設計 (リークモデル※1)	B) 再解析 (透過モデル※1)	C) 実測
酸化剤 @飽和蒸気圧	2x10 ⁻⁸ mg/s	3x10 ⁻⁵ mg/s	0.8x10 ⁻⁵ mg/s
燃料 @飽和蒸気圧	2x10 ⁻¹⁰ mg/s	1x10 ⁻¹⁰ mg/s	7x10 ⁻⁸ mg/s ^{%2}

推薬移動速度のモデル値と実測値の比較



※1:各モデルによる算出法は, §B.5を参照 ※2:燃料移動速度は供試体数の制限により, 類似弁にて実測した.

酸化剤について, 実測された移動速度(C)は, 設計時使用モデルによる推定値(A)よりも大きく, 透過モデルによる再解析結果(B) と同じオーダであった. 燃料については, (A)も(B)も同じオーダーであり, 類似弁にて計測した(C)よりも1ケタ小さい値である. ただし, 燃料移動量の推定は, (C)の値を使っても十分小さい(§B.6). このことより, 今回のケースでは, 酸化剤については透過の効果が支配的であることが明らかとなった.

2.2.2 あかつき推進系での推薬移動量の推定

実測した逆止弁・遮断弁の酸化剤移動速度を使って、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.区間D(燃料側逆止弁下流)に6,000時間(推薬充填 後,VOI-1までの時間)で移動する酸化剤は、フライト前の予想よりも2桁多い値であった.



区間Dには燃料タンクの空所容積も含まれ、その容積は他の区間より3桁大きいことから、 分圧の差が保たれて、燃料側逆止弁での酸化剤移動が継続して起きる、と理解される.

2.2.3 弁体付近の塩生成可能性評価

§2.2.1及び§2.2.2の考察によりあかつき不具合発生時に、燃料側逆止弁の弁体付近 (§2.2.2の区間D:しゅう動部を含む逆止弁下流)で酸化剤・燃料蒸気が混合する可能性がある.

逆止弁内部で酸化剤と燃料の蒸気が混合した場合に、反応生成物として固体の塩の 生成可能性を、実機と類似形状の透明な逆止弁モデルを試作して観察.



シール部付近およびしゅう動部近傍に, 固体の塩生成を確認 なお, 塩の生成は以下の反応による.



2.2.4 塩生成による逆止弁閉塞の可能性の観察

§2.2.3において, 逆止弁での塩生成が確認されたため, 閉じた弁の上下流から, それぞれ ヘリウムガス+酸化剤蒸気・燃料蒸気を供給することで, 逆止弁内部に塩を生成させ, 一定 時間経過後, 弁を作動させ動作不良や閉塞する可能性を検証するための実験を行った.



逆止弁閉塞再現試験の様子

弁作動試験を§2.2.3の透明逆止弁モデルを使用して実施した.

軌道上経過時間を模擬(酸化剤移動量を合わせる)した状態で,塩が生成していることを目視 で確認した後,直接弁体を押し込んで弁動作を確認した.

塩生成前に必要な押し込み力(クラッキング圧力に相当)が160gf程度であるのに対して、塩 生成後は10回中3回、その2.5倍までの力を加えても弁は動作せず、閉塞状態が観察された、

塩生成	弁の閉→開に必要な押し込み力 (gf)									
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
前	160	160	160	160	160	157	158	156	160	162
後	400以上※	160	<mark>400以上※</mark>	160	<mark>400以上※</mark>	170	160	170	160	180

※弁体に400gfまでの荷重を掛けたが動作せず

15

2.2.5 酸化剤移動に対するあかつき設計時の考え方と 現在の知見に基づく理解

<u>設計時の考え方</u>

- 1. 配管内での推薬蒸気混合による「爆発的圧力上昇」を抑止する事を条件とする
- 2. 推薬蒸気の弁上下流移動量の推定は,基準気体(ヘリウム)移動の実測値から求めら れる等価なオリフィスを酸化剤蒸気が通過する「リーク」というメカニズムを仮定して推定

今回の検討によって得られた知見

- 1. 弁を通過してガスが漏れるメカニズムは、大きく分けて以下の2種類があり、弁の構造に よっては、後者の影響が支配的になる場合がある
 - 微小な隙間からガスが流れ出す(「リーク」)
 - 弁シール部の高分子材料の内部をガスが透過する(「透過」)
- 2. 特に酸化剤の場合は、等価オリフィスを用いたリーク速度の検討だけではなく、透過を 考慮する必要があった.
- 3. 酸化剤蒸気・燃料蒸気の混合により塩が生成する可能性がある.
- 4. 塩の生成によりバルブの動作不良・閉塞の可能性がある.

*酸化剤移動に関する過去の不具合の調査結果の例を§B.7に示す.

2.2.6 他衛星の状況

あかつきを含めて日本の各衛星は、2.2.5節で記した考え方で設計 されてきた.

今回得られた知見を基に、2液推進系を搭載したJAXAの各衛星で、2液推進系使 用期間中に塩生成による弁閉塞が起こりえたかを、改めて定量的に概算した、そ の結果、下記の理由により、その他の衛星では不具合が生じる可能性がなかっ たことが確認された、(のぞみについては後述)

今回の知見に基づく理解:

- 2液推進系の使用期間が短い衛星(地球周回衛星など)では、酸化剤の移動 が弁等に影響する前に使用期間が終了している。
- 上記以外の衛星では、弁の個数・配置・配管構成上、燃料・酸化剤の混合の 影響が十分小さいことが分かった。

§B.8に,2液推進系の使用期間が長いJAXA衛星のガス供給配管例を示す. また,参考までに海外衛星の例も示す.

2.2.6 他衛星の状況(つづき) 「のぞみ」不具合の概要

<u>のぞみの不具合原因</u>

のぞみはあかつき同様,調圧式の推薬供給系であり,OME噴射中,燃料タンク圧力 (P3),酸化剤タンク圧力(P4)はともに1.4MPa程度を保持する仕様であった.

不具合発生時, OME噴射中のP3は保持されたものの, P4は保持できず下降を続けた. そのため, 推力・加速度が想定以上に低下し, 増速不足となった. その原因として, ガス 供給配管の<u>酸化剤側遮断弁</u>で閉塞が起こったと結論した(下図参照).



のぞみ推進系の設計思想

逆止弁・遮断弁を燃料・酸化剤タンクの上流に配置することで燃料・酸化剤の蒸気混合 を防ぎ、「爆発的圧力上昇」を防止する設計。

2.2.6 他衛星の状況(つづき)

「あかつき」逆止弁不具合と「のぞみ」不具合との関係のぞみの不具合が塩生成による閉塞であった可能性について

今回の知見から、のぞみ配管内部にも塩が生成していたと考えられる.しかし、塩が生成するのは燃料側の弁であるため、塩生成は、のぞみの不具合とは直接の関係はない.

あかつきに反映したのぞみ不具合からの教訓

- 単純な直列冗長系統(=流路が開かなくなる可能性が高まる)を極力排除する.これに従い,酸化剤側では遮断弁を並列に配置.また,燃料側は燃料タンク内に気液分離膜を配置したことから,遮断弁を廃止.
- ・ 遮断弁の型式変更.
- 遮断弁の位置を逆止弁の上流側に配置変更.(酸化剤蒸気の影響が少なくなるように配慮)
- その他、あかつきでは、調圧弁を冗長化するなど、のぞみ当時と比べて信頼性向上を 意図した設計変更を実施。



2.2.7 今後のミッションにおける推進系設計での対策案

2液推進系を搭載する今後のミッションでは、ガス供給配管で、酸化剤蒸気と燃料蒸気が混合・反応することを防止するための設計を行う必要がある。

燃料/酸化剤蒸気混合による不具合発生防止策(案)

- 推薬蒸気移動については、リークと透過の両方の効果を考慮する.
- 特に酸化剤蒸気の移動については実液,実バルブなどによる実測に 基づいた定量化が必須である。
- 塩生成により弁動作不具合を引き起こす可能性があることを考慮して、
 採用する弁の特性・個数・配置・配管構成などを運用期間に対して適切に設計する.

2.3 コンタミ噛み込みの可能性検討

§2.1で示した6項目の検討のうち、「⑥コンタミが関係する原因候補の検討」は、以下のように行った.

コンタミ源として考えられるものと、その評価は次のとおりであり、コンタミ噛込の可能性は低いと評価する

- (1) 製造時から存在したコンタミについて 清浄度検査の結果は、逆止弁を閉塞させるようなものではない.
- (2) 地上整備中に混入したコンタミについて 探査機に流体アクセスする場合、フィルタを通す手順となっているため、 逆止弁を閉塞させるコンタミは混入しない
- (3) 他バルブ作動時に発生したコンタミについて 逆止弁上流にある可動機器として,調圧弁があるが,調圧弁出口には フィルタが装着されているため,逆止弁を閉塞させるコンタミは発生しない.

ただし、コンタミの噛込は、完全に排除できる性質のものではなく、偶発的に発生する可能性を否定できない、そのため、今後の開発では、たとえば、設計段階でフィルタ配置をより慎重に検討する、配管洗浄方法の更なる改善の可能性を検討するなど、コンタミ噛み込みの可能性低減に継続的に取り組むこととする.

2.4 逆止弁不具合の検証結果(まとめ)

逆止弁を閉塞させる原因候補として抽出された16項目について検討を加え, 塩の生成とコンタミの噛込みの2項目が原因の可能性として残った.またこれ らの原因究明を通して以下の理解が得られた.

- 弁の上下流を移動する酸化剤蒸気の量は、設計時に想定していたような、基準気体が等価オリフィスを移動する、というリークモデルによる推算手法では 不十分であり、弁シール材の透過を考慮する必要があることが分かった。
- 酸化剤蒸気・燃料蒸気がガス供給配管内で混合すると塩が発生し、弁が閉塞または弁の動作を阻害する可能性があることが分かった。
- これらの知見に基づいて、他の衛星における推進系の推薬移動量の評価、
 今後の同種の衛星推進系の設計に際しての対応策の抽出などを行った。
- コンタミの混入と噛込は、完全に排除できる性質のものではないことから、今後も可能性低減に継続的に取り組むこととする。

3. 逆止弁閉塞に起因してOMEの受けた影響について 3.1 OMEの受けた影響候補について

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, FTA解析によりOMEが以下の状況となったと推定した(§A.2a).

D-1) 熱流束過大によるスラスタノズルの破損
D-2) フィルムクーリング噴射方向異常によるスラスタノズルの破損
D-3) スロート後方後燃え
D-4) 不安定燃焼
D-5) インジェクタ噴射方向異常

更なる絞り込みのため以下の実験的検証を中心に実施した.

- インジェクタ噴射状態確認試験による推薬の噴射方向に起因する異常(D-2,5)の検証(§3.2)
- 2. 燃焼試験による,設計範囲を超えた燃焼状態での挙動(D-1,3,4)の検証 (§3.3)

3.2 インジェクタ噴射状態確認試験結果

VOI-1時には弁閉塞により燃料供給圧力が設計圧力と比較して大幅に低下した.この結果, インジェクタからの噴射状態の変化が燃焼の異常や冷却の不良を来す可能性がある.特 に,低燃料供給圧下での,フィルムクーリング噴射及びインジェクタ噴射方向異常の可能性 が否定できないため,検証試験を実施した(影響候補:D-2, D-5に対応)



VOI-1の作動点においてもフィルムクーリング噴射方向角, コア推薬(燃料・酸化剤)噴射 方向角, コア推薬が衝突した後のファン角に対して異常は認められずほぼ設計値通りで あった.

以上より以下2項目は原因候補として可能性が低いと判断できる.

D-2) フィルムクーリング噴射方向異常によるスラスタノズルの破損 D-5) インジェクタ噴射方向異常

3.3 VOI-1を再現した燃焼試験

D-1, D-3, D-4の原因候補の検証のため, 金星投入時(VOI-1)の推薬(燃料・酸化剤)供給系の状態を再現して, 地上燃焼試験を実施した.



VOI-1における軌道上燃焼
 VOI-1再現の燃焼試験(その1)
 VOI-1再現の燃焼試験(その2)
 フライト計画作動範囲(設計点)
 燃焼試験(その1)での燃焼器破損時の条件



燃焼試験の様子

- 酸化剤供給圧力はほぼ一定圧力に調圧
- ・燃料供給圧力は逆止弁閉塞の影響により燃焼時間の経過とともに徐々に低下
 → 酸化剤・燃料混合比(O/F)は燃焼開始より時間の経過とともに上昇

3.3.1 燃焼試験(その1):燃焼器が破損したケース

OMEが受けた影響候補のうち, D-1, D-3, D-4を検証するため, 不具合が発生したVOI-1 を再現した地上燃焼試験を実施した



設計条件を逸脱した燃焼条件で燃焼器が破損した

- 燃焼器が破損したときは、着火直後の急激な温度上昇が終わり、燃料供給減少によるO/F 変化に伴い準静的に温度が上昇していく過程であった。
- 燃焼試験後の破面観察で破壊の起点が確認され、起点近傍で明確な材料欠陥は観察されなかった、すなわち、この破損は単純な製造不良では無いと言える(§C.2)

この結果により燃焼条件の逸脱による熱負荷の増大により燃焼器の破損が起こりうることが 示された.

3.3.2 燃焼試験(その2): 燃焼器が破損しなかったケース 燃焼試験(その1)とは異なる燃焼器を使って, 燃焼試験(その2)を実施した.



燃焼試験(その1)と(その2)の差異の考察

- 2つの燃焼器で燃焼試験を実施し、その うちの片方でスラスタノズルが破損。
- ・設計範囲をどの程度超えると破損するかについては、燃焼器の個体差による。
- 燃焼試験その1とその2で破損する・しないの差異が生じたのは、この個体差に起因すると推定される。
- なお、フライト品は計画作動範囲でのAT 試験で燃焼器の健全性を確認した後、フ ライトに供した。

燃焼試験(その2)での燃焼器外壁最高温度の履歴

試験の結果,軌道上で不具合が発生した条件(O/F=1.13)を超えても,以下のように各候 補事象は再現しなかった

- ・燃焼器の破損はなかった(D-1,2)
- ・燃焼効率の低下は認められずスロート後方での後燃えはなかった(D-3)
- ・燃焼状態(温度分布・燃焼圧)は安定しており、燃焼器内での異常な燃焼は無かった(D-4,5)

これらの結果, D-3, D-4が原因候補となる可能性は十分低いと判断される.

3.4 OMEの受けた影響のFTA検証結果(まとめ)

インジェクタ噴射状態確認試験、燃焼試験(その1)、燃焼試験(その2)を総合して以下の結論を得ることができる

	D−1 熱流東過大によ るスラスタノズル の破損	D−2 フィルムクーリング噴 射方向異常によるス ラスタノズルの破損	D−3 スロート後方後 燃え	D−4 不安定燃焼	D−5 インジェクタ噴射方 向異常	
噴射状態確認試験	N/A	×	N/A	N/A	×	× :発生せず
燃焼試験(その1)	0	0	N/A	N/A	N/A	O:発生の可能性あり N/A:判定材料なし
燃焼試験(その2)	×注1	× ^{注1}	×	×	×	◎:可能性大
総合判定	Ô	-	-	-	-	─: □ 能′′£′低

注1:燃焼器の個体差により破損しなかった可能性がある

燃焼試験(その1), (その2)から, D-1, D-2が候補になりうる. D-2は可視化ができる噴射状態確認試験により, 起きる可能性は小さいと判断される.

また, 燃焼試験(その1)でD-1の事象が起きた後の推力変動の時間履歴は, 金星投入時 に観察された推力履歴と似た変化をしている.(想定される破損の様子と金星投入時に得ら れたデータとの整合は § C.3, C.4に示した)

これらを総合して, OMEが受けた影響は"熱流束過大によるスラスタノズルの破損"(D-1)である可能性が高いと結論する.

以上より軌道再投入に向けては破損した燃焼器の再点火の必要があり、この可否について 次節に詳述する.²⁸

4. 金星軌道再投入に向けた検討

金星投入失敗後の推進系のデータおよび § 2の考察から,推進系のガス供給配管では,逆止 弁は閉塞しているが,微小なガス供給量は維持されていると考えられる.この前提で,以下に 述べる金星軌道再投入に向けた運用方法を検討している(なお現在も§2で述べた燃料・酸化 剤の混合が続いている可能性により閉塞の状況が変わっていることもあり得る).

・現在のあかつきの状況を考慮した新たな軌道計画の検討(§4.1)

あかつきのOMEはスラスタノズル部で破損したと想定されるが、以下の2つの可能性について検討(§4.2)

①破損したOMEを用いた再噴射による軌道変換

②OMEを使用せず,姿勢制御エンジン(RCS)による金星周回軌道投入

①②の両者について推進系および探査機の運用方法を検討.(§4.3)

現在のあかつきの軌道は、近日点側がO. 6AUで、設計条件を超えた熱環境に晒されることに対する対応を検討(§4.4)

地上試験・解析などの検討を行った上で、本年9月に軌道上でのOMEのテスト噴射を実施し、 11月の近日点において金星会合に向けた軌道変更を行うことを計画。

4.1 金星軌道再投入に向けた軌道計画

金星軌道再投入に向けた軌道変更計画の検討状況を以下に示す.

今後,実際の軌道変更計画の立案に向けて,

- 軌道上テスト噴射結果等をふまえたΔV計画
- マヌーバ実施時の姿勢制約(熱制約等)

等を考慮しながら、運用計画を詳細化していく予定.

合計ΔVを抑制する観点から,第2~3回の近日点通過周辺で軌道調整を実施し,2015年11月に 金星に再会合させることを計画中.



- (注1) ΔVはインパルス換算. 多体解析結果より.
- (注2) 金星再会合の欄には、4日周期軌道への投入に必要なΔVを記載している.
- (注3) 試験噴射は記載していない.

ケースAの軌道計画例

4.2 金星軌道再投入運用のトレードオフ

OMEの現在の状態を軌道上テスト噴射により確認する.テスト噴射の結果から、OMEが再 噴射可能な場合と不可能な場合の両ケースについて以下の二つの軌道変更方法を検討中.



当初計画の観測軌道に投入可能

案2の方法により達成できるΔV量では、当初予定 の観測軌道までは到達できない.

4.3 金星軌道再投入運用に向けた検討

§4.1,4.2で述べた再投入運用を行うために以下の実験によってエンジン運転のための情報を取得中.

a)着火衝撃緩和の検討(§C.5)

スラスタノズルが破損した破損燃焼器を用い,再着火試験を実施した結果,破損が 進行したケースが発生し,場合によっては再着火の衝撃に耐えられない可能性があ ることがわかった.燃料・酸化剤の噴射タイミングを調整するなどにより,着火衝撃を 緩和する可能性を検討中.

なお,再着火によりOME破損が進行した場合に探査機に与える影響も検討中.

b) ブローダウンによるOME噴射の検討(§C.6)

VOI-1では逆止弁閉塞により酸化剤・燃料混合比が設計条件を逸脱したと考えられる. そのため, 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)を確立するための実験を実施中.

c) 酸化剤投棄手法の検討(§C.7)

OME噴射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. RCSは1液式推進系のため性能が低く, かつ酸化剤が必要ないため, 酸化剤を 投棄し衛星重量の軽量化を図る必要がある. 酸化剤の排出手法の確立のための実 験を実施中.

4.4 近日点近傍での高温環境への対応について

あかつきは,金星軌道投入失敗により当初想定していない軌道を航行することになったため,近 日点近傍で機器が高温になる恐れがある(下図を参照).そのため,想定外の高温に晒される表 面熱制御材が劣化し,探査機内部の温度が上昇する懸念がある.

なお,近日点近傍では機器温度を許容値以下に保つために,探査機姿勢に制約を受けることに なり以下を実施.

- 4月17日の近日点では,探査機の+Z面を太陽指向とすることで,許容温度範囲に維持した.
- 近日点マヌーバは、噴射姿勢を維持できる許容時間を考慮して計画する。



金星周回軌道に投入した場合の熱環境

実際の熱環境(近日点0.6AU)

注:近日点マヌーバを実施しない場合の軌道上環境予測

上図は近日点マヌーバを実施しない場合の熱環境の時間履歴を示している.近日点マヌーバは,近日点高度を変えず,遠日点高度を下げるものである.したがって,近日点マヌーバを実施しても,それ以降の高温側の熱環境は大きく変化しない.

なお、熱制御材劣化について、今後の近日点通過を考慮した寿命の検証試験を実施中.

4.5 次回近日点マヌーバに向けた今後のスケジュール



軌道上テスト噴射の実施時期の制約条件:

- ・軌道面変更マヌーバを兼ねるため、昇降点付近で実施する
- ・近日点マヌーバまでの十分な準備期間を確保する
- ・軌道上温度環境が穏やかである

5. 第3回調査部会報告のまとめ

- 1. 逆止弁を閉塞させる原因を検証した結果,以下の結論を得た.
 - 酸化剤の弁シールの透過を考慮することが必要であること。
 - 逆止弁は燃料・酸化剤反応で生成される塩により、動作が阻害される可能性がある こと。
- 2. 弁閉塞によりOMEが受けた影響を検討し、金星投入に向け以下の結論を得た.
 - VOI-1時にスラスタノズルが破損した可能性が高いこと.
 - 破損したスラスタノズルを再着火させる事の可否を地上試験および搭載エンジンの 試験噴射により見極め、結果に応じて金星軌道再投入操作の実施に向け準備する.
- 3. 金星軌道再投入の実現に向けた軌道変更のための運用計画
 - ・ 軌道制御エンジン(OME)テスト噴射
 → 本年9月上旬
 - 試験噴射結果などを受け噴射方法を決定し近日点での軌道変換 → 本年11月

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 酸化剂投棄手法検討

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ようであった.

- 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	推進系異常	152杪でOME不整 トルク発生	٦						
		- 152秒で 取付異常発生					×	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変形 させるほどの力はかかっていない。	
			燃焼ガス 流路変形	スラスタノズル・ スロート破損	強度不足	設計不良	} ×	QTによる設計確認実施済み。	
						製造不良	- ×	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。	
					過大外カに よる強度低下	打上時の過大 機械環境	- ×	ロケット打上時の環境は正常である。	
						_メテオロイド 衝突	×	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。	
					過大熱応力	熱流東過大 (推薬混合比異常)	- Δ	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
						推薬供給 過多	×	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。	
						フィルムクーリング 噴射方向異常	- Δ	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
						外部熱入力	×	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。	
				燃焼室破損]		×	VOI終了直前に概ねー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)が破損した可能性は無い。	
			燃焼ガス剥離	ノズル内面異常]		×	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。	
				スロート後方後燃え]		Δ	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
			燃焼状態異常 (非軸対称燃焼)	不安定燃烧]		Δ	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
				インジェクタ噴射異常]			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
				_燃焼室内面 異常]		×	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。	
	-	152秒でRCS異常発生					×	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。	
	L	— 152秒で流体噴出発生					×	△V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△V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。	
	姿勢軌道制御系 (AOCS)異常	152秒で姿勢 センサ異常発生					×	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。	
		152秒で姿勢制御系 ハードウェア異常発生					×	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。	
		152秒で制御演算異常 発生					×	事象発生前後を含め、設計通りの動作が確認されている。	
	大 大 オ わ れ ・ 衝 突 し に よ る 外 カ						- ×	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 異常が見られない。	

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

OMEで起きた事象の候補



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

発生事象						判定	判定根拠
VOI−1開始直後からの 燃料タンク圧力P3低下	燃料系圧力	燃料押しガス 圧力不足	調圧不良			×	同じ調圧弁からガス供給を受けるP2とP4のテレメトリデータは正常.
			ガス系統 圧損過大	一配管の閉塞	コンタミによ る閉塞	×	打ち上げ前の水流し試験によって加圧系の能力は確認されている. その後の清浄度検査も 正常であり, 配管の閉塞を引き起こすようなコンタミの可能性は極めて低い.
					推薬凍結に よる閉塞	×	推薬蒸気が燃料タンクのダイヤフラムを透過して加圧系配管に入り込む可能性は否定できな いが、温度計測結果から推薬(蒸気)凍結に至る低温状態は無い.
				逆止弁CV−F の閉塞		Δ	可能性を除外できない。
			ガス系統からの ガス漏洩			×	VOI-1後、燃料加圧ガス系統に関係する各圧力(P1, P2, P3)は安定している.
		燃料液系統 圧損過大	燃料タンク排出 ロの閉塞			×	推薬残量から、燃料タンク排出口を閉塞する位置にダイヤフラムが移動することはない.
			タンク-P3ポート 間圧損過大			×	VOI-1後, P3はすぐにP2の値まで上昇するはずであるが、実際には1時間程度かかっている ため、この事象の可能性は無い.
		燃料液系統からの 推薬漏洩				×	VOI-1開始からの加速度とタンク圧力のテレメトリデータは整合している.
		燃料消費過多	OME側			×	加速度から推定される152秒までのOME燃焼状態によると、 燃料消費量はむしろ低下しているはず
			RCS側			×	RCS触媒温度のテレメトリデータはVOI-1期間中、最高でも400degC以下であり、過大な消費 はない
	P3(燃料タンク圧力センサ)ポート閉塞					×	センサポートが閉塞している場合, 燃料タンク圧力指示値に変化がないはず
	圧カセンサ指示値計 測異常					×	加速度から推定されるスラスタ燃焼状態・供給系状態の推定と、 P3を含む各圧力センサ指示値は一致している

原因である可能性のある要因

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-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		Δ	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		Δ	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-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.	
			バルブモジュールへの 一固定方法不良によ 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		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
		弁体と本体の アライメント不良		Δ	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	Δ	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ので、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	推薬環境下での 生成物生成	Δ	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
(\mathbb{D}					

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,推薬適合性のある材料で製造 され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)から推薬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噛込】

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・噛込む可能性の検証 (E-12)想定外の作動回数によるしゅう動生成物噛込

E-14) 想定外の作動回数による機構部品の破損・脱落・噛込

LE-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,フレッティング,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・噛込 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 耗・摩擦が増加するか)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.

<u>E-11) 推薬環境下での生成物の噛込</u>

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 5~10µmであった.一方,燃料雰囲気下では最大でも4µm 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 ならないと判断した.

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

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

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	$Q_{\rm mass}^{\rm Leak} = D_{\rm gass} \frac{\pi d^2}{4 L}$	$\frac{d}{dr} \Delta P \frac{M}{RT} \qquad \begin{array}{c} Q_{\text{mass}}^{\text{Leak}} \\ D_{\text{gass}} \\ RT \\ RT \\ \Delta P \end{array}$	リーク速度 (mg/s) 気体の相互拡散定数(m²/s) 気体定数(8.3 J/mol K)×温度(K) 分圧差(=飽和蒸気圧)(MPa)
1-3)評価結果		燃料	酸化剤	
	O Leak	2x10 ⁻¹⁰ mg∕s	2x10 ^{-∗} mg∕s	§ 2.2.1中の表「推薬移動速度のモデル値
	$\mathcal{Q}_{\mathrm{mass}}$	@0.0014MPa	@0.1MPa	│ 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 Per	透過係数 Per	溶解度 S	拡散係数 Dsolid
	$(m^2s^{-1}MPa^{-1})$	$(m^2 s^{-1} MPa^{-1})$	(MPa ^{⁻1})	$(m^2 s^{-1})$
酸化剤蒸気	6x10 ⁻¹⁰	3x10 ⁻¹⁰	110	3x10 ⁻¹²
燃料蒸気	2x10 ⁻¹¹	—	—	—
He	_	9x10 ⁻¹¹	1.1	8x10 ⁻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.

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

Per: 透過係数(m²/sMPa) S: 溶解度(1/MPa)

D_{solid}: 固体中の拡散係数(m²/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
$$Q_{\text{mass}}^{\text{Per}} = P_{\text{er}} \frac{A}{t} \Delta P \frac{M}{RT} P$$

Q^{Per}_{mass}: 透過速度 (mg/s)

A, t: シール材のガス接触面積 (m²), 厚み (m)

△P: 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	
	OPer	1x10 ⁻¹⁰ mg/s	$3 \mathrm{x} 10^{-5} \mathrm{mg/s}$	§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
	$\mathcal{Q}_{\mathrm{mass}}$	@0.0014MPa	@0.1MPa	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.



49

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(N₂O₄)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N₂H₄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



51

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



(d) Messenger (NASA 水星探査機)

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



推薬蒸気の配管内で 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)

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

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



(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.

<u>燃焼解析</u>

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.

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.



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, スラスタノズルでの破損後推力と, VOI-1での挙動(加速度 テレメトリーデータからの推定推力)を比較した.

VOI-1での挙動(テレメトリーデータ);

・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。



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タ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ー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.



破損燃焼器の横方向推力の推定(CFD結果例)



燃焼器フライトモデル

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 着火衝擊緩和検討

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.

着火直後にスラスタが全 損するケースが発生







再着火後に破損が進行した燃焼器



59

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 酸化剂投棄手法検討

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 機のイナート重量を減らす必要がある.

С

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.





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.