

# 科学衛星・探査機推進系の信頼性向上活動について

About the reliability improvement activity of a propulsion system for the scientific satellite and the probe vehicle

宇宙科学研究所推進系グループ

○中塚潤一 澤井秀次郎 成尾芳博 梶原堅一(研開推進 G)

## 概要

あかつきの金星周回軌道投入失敗の教訓をふまえ、今後の衛星推進系の信頼性を向上させる活動を行う。本活動においては、推進系を使用するシステムやサブシステムとも協力できるように、意見交換を行うなど、より使いやすくわかりやすい推進系を目指す。その最初のステップとして、科学衛星・探査機および利用衛星で蓄積した経験を整理する。ミッション横断的に科学衛星・探査機推進系のバルブ等に関して、その使い方の特異性も踏まえてこれまでに得た技術的な知見から、新たな課題を抽出した。本稿では、これらの活動内容および抽出した課題について紹介する。

## 1. はじめに

金星探査機「あかつき」は2010年12月7日に金星周回軌道への軌道投入マヌーバ（VOI-1：Venus Orbit Insertion -1）を実施した。VOI-1では、ヒドラジンとMON-3を推薬とする2液式500N級の軌道制御エンジン(OME：Orbit Maneuver Engine)を約720秒噴射する計画であった。しかしながら、燃焼開始から約152秒後に大きな姿勢変動があり、約158秒後に探査機の自律判断により燃焼を停止した。その結果、減速量が足りずに金星周回軌道投入に失敗し、金星をパワードスウィングバイした。現在、あかつきは、公転周期約203日、近日点距離約9000万km、遠日点距離約1億1000万kmの太陽周回楕円軌道を飛行している<sup>[1]</sup>。

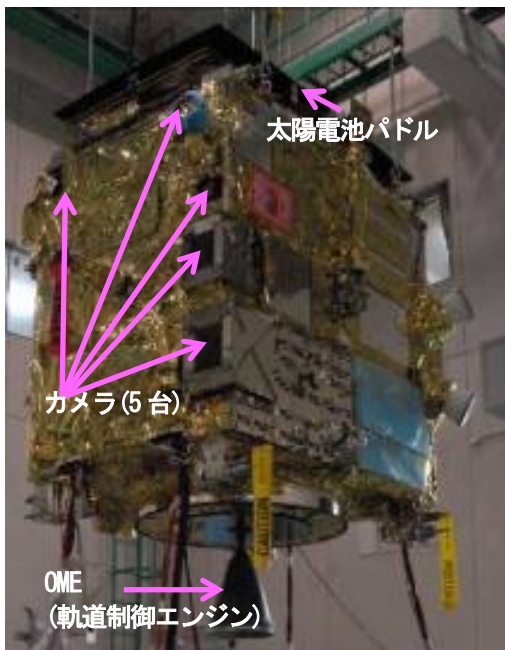


図1：金星探査機あかつき<sup>[1]</sup>

VOI-1の失敗後に原因究明を行い、軌道投入失敗の根本原因は、ガス系の燃料側逆止弁の閉塞によるものと結論した<sup>[2]</sup>。

本稿では逆止弁の閉塞に至った背後要因の分析結果<sup>[3]</sup>を基に、科学衛星・探査機推進系の信頼性向上のために行うべき活動についてまとめる。

## 2. VOI-1で発生した事象の理解

VOI-1失敗の原因究明を行った結果、軌道投入失敗の根本原因は燃料側逆止弁の閉塞であった。原因究明を行った結果、図2に示すように、酸化剤蒸気は弁のシール材を透過することが分かり、酸化剤蒸気は燃料側逆止弁に至った。一方、燃料蒸気は燃料側逆止弁のシール材で止められていた。燃料側逆止弁において燃料と酸化剤蒸気が混合した結果、内部に塩(硝酸アンモニウム)を生成させた。その塩が逆止弁の動作を阻害したため、燃料タンクに正常にガスが供給されなかった。その結果としてOMEに正常に推薬が供給されず、異常燃焼を起こして燃焼器が破損したと推測している。

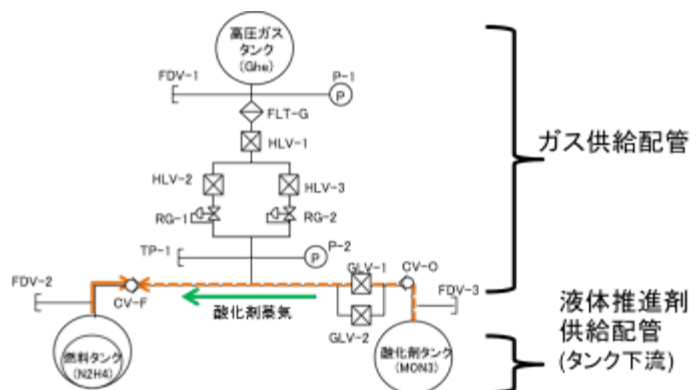


図2：配管内での推薬蒸気混合経路

### 3. あかつき推進系で取るべきであった対策

あかつきの金星周回軌道投入失敗は、結果として弁の内部に生成された塩が逆止弁を閉塞したことが原因であると結論された。一方で、軌道上で運用されている2液式推進系を搭載した宇宙機は数多くあるものの、それらで同様の不具合は報告されていない。同様の不具合に至っていない理由を、これまでの原因究明で得た知見を基に考察した。

#### 3.1 タンクの構造で酸化剤蒸気を遮断しているもの

タンクの構造で酸化剤蒸気を遮断している例として、はやぶさの配管系統を図3に示す。

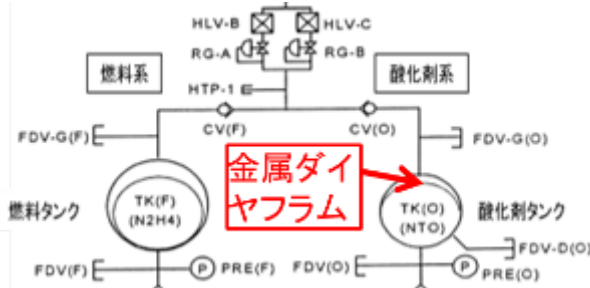


図3：はやぶさの配管系統図

はやぶさの系統において、酸化剤タンクにはステンレス製のダイヤフラムが組み込まれている。本来の目的は、加速度の方向が変化しても、推薬をポートに保持できるようにするためのものであったが、結果として、酸化剤蒸気がガス系配管に流れ込むのをステンレスダイヤフラムが防いでいた。

#### 3.2 酸化剤蒸気の濃度上昇を防いでいたもの

酸化剤蒸気の濃度上昇を防いでいた例として、HTVの配管系統を図4に示す。

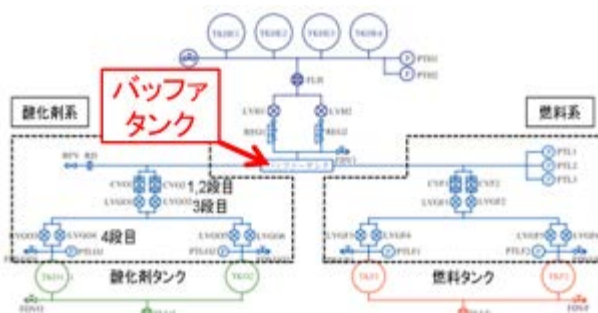


図4：HTVの配管系統図

HTVは、そもそも軌道上運用期間が惑星探査機と比較しても十分に短く、硝酸アンモニウムが仮に生成したとしても微量であり、問題にはならない。さらにHTVは調圧弁の性能範囲内の微量リークに対応するために、パuffアタンクが配置されている。これにより、酸化剤蒸気が酸化剤側の弁類を透過したとしても、燃料側

に透過するだけの分圧にならないものになっていた。

#### 3.3 混合経路を遮断していたもの

混合経路を遮断していた例として、図5に土星探査機Cassiniの配管系統図を示す。

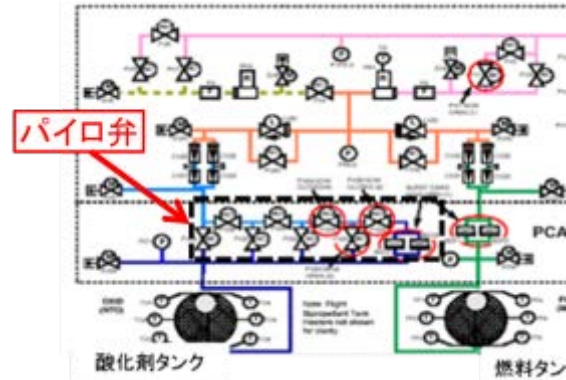


図5：Cassiniの配管系統図

Cassiniの配管系統では、酸化剤タンクへのガス供給系に対して、開閉を行うパイロ弁が多段に組み込まれている。これが塩の生成防止の意味で配されたものかは不明だが、恐らく燃料と酸化剤の混合による爆発を危惧したものであると思われる。この配管系統は、パイロ弁を複数個配置することで、かなり重いシステムになっているが、結果として酸化剤蒸気のガス系配管への侵入経路を遮断し、塩が生成することを防止できている。

#### 3.4 あかつき推進系の考え方

あかつきの推進系は、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に設計し、塩の生成については知見が無かった。今後、不具合を繰り返さないために、信頼性向上活動に取り組む。

#### 4. 衛星推進系の信頼性向上にむけた改善事項

あかつきの不具合原因究明活動を通して、金星周回軌道への投入失敗に至った背後要因を分析した。その結果、主に以下の改善事項が抽出された。

##### 4.1 フライト実績の捉え方

今回あかつきで不具合を起こした逆止弁は、軌道上へのフライト実績を有する物であったが、その実績を過大評価していた。実環境模擬やend-to-end試験を省略しつつも、当時の知識・経験から不具合を未然に防止できる網羅的な試験検証計画の立案に努めた。しかし、結果的には今回の予想外の不具合事象・故障モードを洗い出すものとなっておらず、使用環境・使用期間・システムコンフィグレーションを含む使用条件について、十分に精査を行うべきであった。

## 4.2 部品選定・調達の信頼性向上

選定したコンポーネントについての知見および、試験による検証が不十分であった。あかつきに搭載した逆止弁について、ベンダで実液の移動量の規定を試験において検証することは困難であった。一方で、過去にJAXAで実液試験を行った逆止弁では、その透過量も含めた推葉の移動量がヘリウムを使用したリーク量で管理できるという結果を得ており、本バルブについてもヘリウムのリーク量で管理した結果、透過と塩の生成という複合事象である今回の不具合は予見できなかった。これは、結果的に要求仕様の規定の仕方は問題を回避できるものとなっていなかったことによる。

また、あかつきに搭載された逆止弁は海外調達品であるため、設計が”ブラックボックス”であった。搭載するに当たって、現地コンサルタントの活用等により、ブラックボックスの範囲を最小化すべきであった。また、バルブベンダは、製造実績の蓄積に加え、他ミッションへの供給経験を通して得られたノウハウを有している場合がある。そのため、バルブ調達にあたっては、最低限の仕様の提示にとどまらず、実際の運用におけるバルブの使用環境・条件などを含め、可能な範囲で情報共有を図ることが、ベンダ側のノウハウの最大限の活用を図るべきであった。

## 4.3 推進系の技術力向上および技術情報の共有

上記に挙げた項目以外にも、推進系システムの信頼性向上のために、基盤的な技術、知見の一層の蓄積・共有を行い、潜在的な不具合事象の洗い出しについては、技術者・研究者の経験や想像力および技術の継承など、人材を育成することが必要であると考えられる。

## 5. 信頼性向上に向けたデータ蓄積

洗い出された改善事項を基に、今後の科学衛星・探査機推進系の信頼性を向上させるための具体的な活動として、これまでに蓄積されたデータの再整理と今後必要となるデータ蓄積内容について洗い出しを行った。

### 5.1 これまでの信頼性向上活動

利用衛星に搭載されている推進系については、これまで定常的に不具合の未然防止に取り組み、推進系の信頼性向上活動を行った結果、地上および軌道上での不具合の減少に寄与している。一方、科学衛星・探査機については、過去に起きた不具合事象リスト化して管理してきた一方で、経験の少ない探査機開発に関してはこの取り組みは不十分であったと考えられる。

### 5.2 科学衛星・探査機推進系の信頼性向上に向けて

科学衛星は、観測する対象によって軌道などが異なる

り、それぞれがオーダーメイドである、さらに、惑星探査機に至っては、温度や時間などの運用環境が広範囲にわたる。そのため、図5に示すように、科学衛星・差惑星探査機の信頼性向上に向けて、知見の一層の蓄積が必要と考えられる。データ取得範囲を温度・時間・回数の観点で拡大するべき項目について抽出した結果、図6に示す差分が洗い出された。

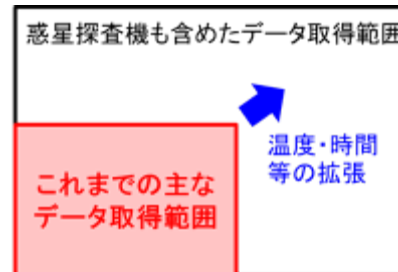


図5: データ取得範囲の拡大イメージ

	利用衛星 (周回・静止) 科学衛星(周回)	惑星探査機	データ取得範囲として追加すべき項目
温度の観点	地球近傍での温度サイクル	内惑星の高温環境 ないしは 外惑星の低温環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 長期間の温度変化</li> <li>・ 温度変化に伴う圧力変化による逆圧 など</li> <li>・ 推進蒸気の混合</li> <li>・ 透過度の計測 など</li> <li>・ 長期保管後の動作保証 など</li> </ul>
時間の観点	目標軌道まで数日で到達する	対象の天体まで年単位の巡航	
回数の観点	目標軌道までの一連の運用	地球離脱、軌道修正、軌道投入等、長期的間隔を空けた複数回運用	

図6: 利用衛星と科学衛星・探査機のデータ比較

## 6. これまでの不具合情報の分析

今後のデータ蓄積に向けて、これまでの推進系に関する不具合について分析を行った。2007年までの利用衛星・科学衛星・探査機に関する不具合データベースを整理した。

### 6.1 推進系不具合の比較

利用衛星と科学衛星・探査機に関する推進系不具合について、不具合が発生時期を比較する。図6に利用衛星における、不具合の発生時期を、図7に科学衛星・探査機における不具合の発生時期を示す。

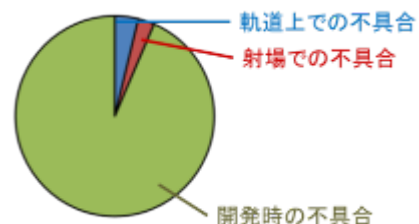


図6: 不具合発生時期(利用衛星)



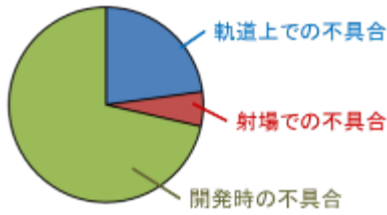


図7: 不具合発生時期(科学衛星・探査機)

各々の不具合発生時期を比較すると、利用衛星においては不具合を開発時に洗い出すことに概ね成功している。一方で、科学衛星・探査機は軌道上での不具合がまだ多い。これは、衛星ごとに軌道が異なり、新規開発を繰り返している難しさでもある。そこで、不具合を未然に防止するために、科学衛星・探査機の推進系について、不具合を発生させている要素を調査した。

## 6.2 科学衛星・探査機の不具合発生要素

科学衛星・探査機の推進系について、不具合を発生させている要素を調査した結果を図8に示す

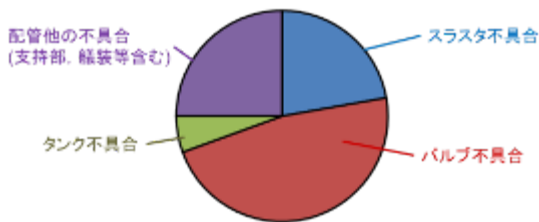


図8: 科学衛星・探査機の不具合発生要素

図8からわかるように、不具合を発生させている要素のほぼ半数がバルブの不具合である。バルブは主に海外調達品であり、前述の通り中身がブラックボックスであることや、技術情報の規制などにより、ユーザーが管理することが困難である。しかしながら、推進系の信頼性を向上させるためには、ブラックボックスでありつつも、不具合をコントロールする必要がある。特にバルブは推進系のキー技術であるため、厳重な管理が求められる。そこで、さらに、バルブの不具合要因について調査を行った。

## 6.3 バルブの不具合要因

バルブ不具合要因について調査した結果を図9に示す。

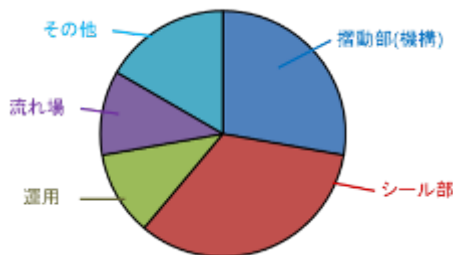


図9: バルブの不具合発生要因

バルブの不具合発生要因を調査した結果、シール部の不具合が最も多いことが分かった。また、摺動部(機構)に起因する不具合も多いことが分かった。

## 7. 衛星推進系の信頼性向上に向けたデータ取得

科学衛星・探査機で起きた不具合を調査した結果、バルブについて、そのシール部、摺動部(機構)に関するものが多いことが分かった。そこで、シール部、摺動部(機構)に着目して、現在進められている推進系の開発を鑑みて、早急にデータ取得を実施する項目を抽出した。その結果、表1の項目についてデータ取得が必要であることが分かった。不具合を未然に防止するために、この項目についてデータ取得を行っていく。

表1: データ取得が必要と抽出された項目

項目	[1]	[2]	[3]
目的	通常接液しない設計の箇所に透過した推薬が与える影響 ⇒不具合を回避する設計・運用に反映	逆圧がかかった時の故障モードを把握 ⇒不具合を回避する設計・運用に反映	地上試験時 ⇒不具合を回避する設計・運用に反映
対象コンポーネント	逆止弁、遮断弁、調圧弁、気液分離膜	逆止弁、調圧弁、遮断弁	・注排弁
対象部材	・テフロン系シール材 ・ゴム系シール材 ・ゴム系膜材 ・テフロン系膜材	・テフロン系シール材 ・ゴム系シール材	・疑似推薬(純粋・IPA等)
データ取得項目	材料の透過係数	材料のクリープ特性	フィルム成分分析

※ 疑似推薬の注液でバルブシール面が汚染が堆積したもので、リーク源になりうる

## 8. 終わりに

あかつきの不具合をトリガとして、科学衛星・探査機の推進系の信頼性向上にむけて、これまでの不具合情報を分析した結果、以下のことが分かった。

- ・ 利用衛星と比較して、科学衛星・探査機は地上試験で不具合を洗い出しきれていなかった。
- ・ 科学衛星・探査機は特にバルブの不具合が多い
- ・ バルブの不具合の中でも、シール部・摺動部に不具合が多くみられる
- ・ バルブのシール部・摺動部に着目した結果、早急にデータ取得が必要な項目が洗い出された。

これらの結果を基に、継続的に科学衛星・推進系の信頼性向上に取り組む。

## 参考文献

- [1] 調査1-2 「あかつき」の概要と金星周回軌道投入失敗の状況について(その1~3), 宇宙開発委員会 調査部会(平成22年)(第1回), 宇宙航空研究開発機構, 2010
- [2] 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)(1~2), 宇宙開発委員会 調査部会(平成23年)(第1回), 宇宙航空研究開発機構, 2011
- [3] 調査1-1 あかつき金星周回軌道投入失敗の原因究明結果を受けた今後の改善事項, 宇宙開発委員会 調査部会(平成24年)(第1回), 宇宙航空研究開発機構, 2012