

第 24 号科学衛星 (PLANET-C) 「あかつき」の
金星周回軌道への投入失敗に係る
原因究明及び今後の対策について

質問に対する回答

平成 22 年 12 月 27 日

宇宙航空研究開発機構

【本資料の位置付け】

本資料は、平成22年12月17日（金）に開催された第1回調査部会における委員からの質問に対し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の回答をまとめたものである。

目次

質問番号	質問タイトル	ページ
1	燃料タンクと酸化剤タンクの設計思想の違い	3
2	OMEの構造	5
3	OMEテストマヌーバの詳細データ	6
4	圧力センサー出力の結果の正当性	9
5	OME噴射開始時の圧力と加速度のデータ	10
6	RCSについて	11
7	加熱応力と推薬供給過多に関して	13
8	スロート後方後燃え、不安定燃焼、インジェクタ噴射に関して	14
9	加熱応力と燃料供給不足に関して	15
10	0～152秒のFTA	16
11	CV-Fの逆止弁のFTA判定根拠	18
12	スロートより上流のバックデータ	19
13	ΔV に関して	20
14	OME噴射終了後のP3圧力の上昇に関して	21

【質問番号1】燃料タンクと酸化剤タンクの設計思想の違い

【質問内容】

燃料タンク側にはダイヤフラムが入り、酸化剤タンクにはラッチングバルブが冗長で入っている。この設計思想の違いを示すこと。

【資料の該当箇所】調査1-2 9ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

1) RCS : 1液推進系

- ・RCS (姿勢制御用スラスタ) は、実績の多い1液推進系を採用した。
- ・このため、RCSは酸化剤を必要とせず、燃料系統のみから推薬供給を受ける。
- ・2系統にわけ、どちらか1系統だけでも3軸姿勢制御および微小な軌道制御可能なように設計されている。従って、各スラスタ、LV-Fについては冗長構成となっている。
- ・配管等、外的要因無しには故障の可能性が考えられない部分に関しては、冗長構成は採用していない。

2) OME : 2液推進系

- ・OME (軌道変更用スラスタ) は、高性能の2液推進系を採用した。
- ・そのため、OMEには、燃料系と酸化剤系の2系統が存在する。
- ・リソース制約と使用頻度、信頼性をトレードオフし、基本的には単系を採用している。
- ・2液推進系では、酸化剤ガスと燃料ガスが混合すると最悪の場合爆発を起こすので*、高圧ガス供給側での蒸気混合に対する2重の混合防止策をとっている。
 - ・燃料側は、タンク気液分離のためのゴム膜と、逆止弁 CV-F の2つで蒸気が上流に遡ることを防止する。
 - ・酸化剤側は、酸化剤に耐性のあるゴム膜が無いことから、逆止弁 CV-0 と遮断弁 GLV-1, 2 の2つの手段で、蒸気が上流に遡ることを防止する
- * Mars Observer は、この混合で火星軌道投入直前に爆発したと推定されている。
気液分離を金属膜で行うことも可能であるが、酸化剤排出効率が低いこと、複数回作動が不可能で作動試験ができないことからあかつきでは採用しなかった。
- ・逆止弁については、閉故障に対して冗長化していないが、これは、他の宇宙機との比較でも一般的な設計である。
 - * 本項 (2/2) に示すように、冗長系を取らないか、あるいは蒸気混合に対する信頼度は増すが、閉塞のリスクは高まる直列冗長系のシステムがほとんどで、直並列にして、閉塞・リーク双方に冗長系を組んでいるのは、我が国では有人システムである HTV だけである。
- ・遮断弁 GLV-1, 2 については、閉塞に対する冗長性をとるため、並列に2重化している。

3) 高圧ガス系

- ・高圧ガス系のレギュレータ調圧弁、遮断弁については、開・閉いずれの不具合に対しても冗長化している。これは、「はやぶさ」でも採用された設計思想である。

参考) 国産衛星二液推進系における逆止弁冗長度の思想

シングル (単系)

※あかつきと同じ思想

- ・技術試験衛星 VIII 型「きく 8 号」(ETS-VIII)
- ・月周回衛星「かぐや」(SELENE)
- ・超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)
- ・火星探査機「のぞみ」(PLANET-B)
- ・小惑星探査機「はやぶさ」(MUSES-C)
- ・赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)

シリーズ (直列冗長)

※蒸気混合に対する信頼度は増すが、閉塞のリスクは高まる

- ・通信放送技術衛星「かけはし」(COMETS)
- ・データ中継技術衛星「こだま」(DRTS)
- ・運輸多目的衛星 2 号機「ひまわり 7 号」(MTSAS-2)
- ・準天頂衛星初号機「みちびき」

シリーズ・パラレル (直並列冗長)

※蒸気混合・閉塞の両方に対して、冗長構成となる

- ・宇宙ステーション補給機「こうのとり」1号機 (HTV 技術実証機)

【質問番号2】 OMEの構造

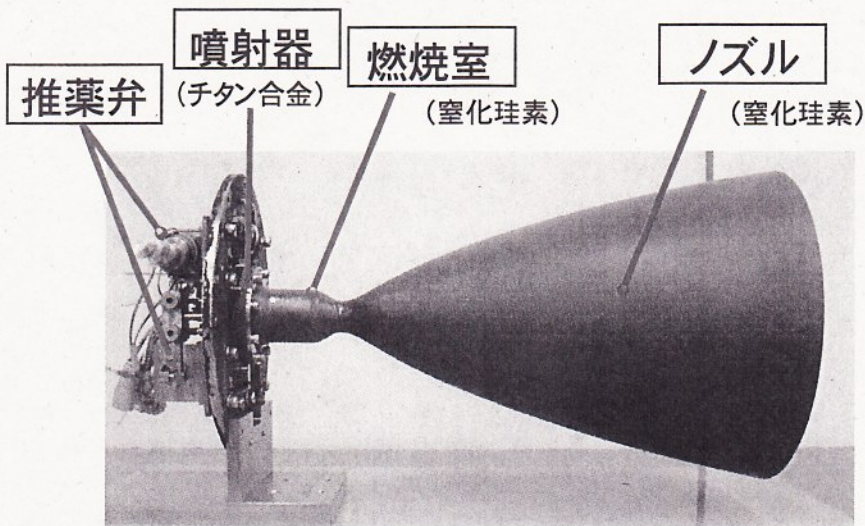
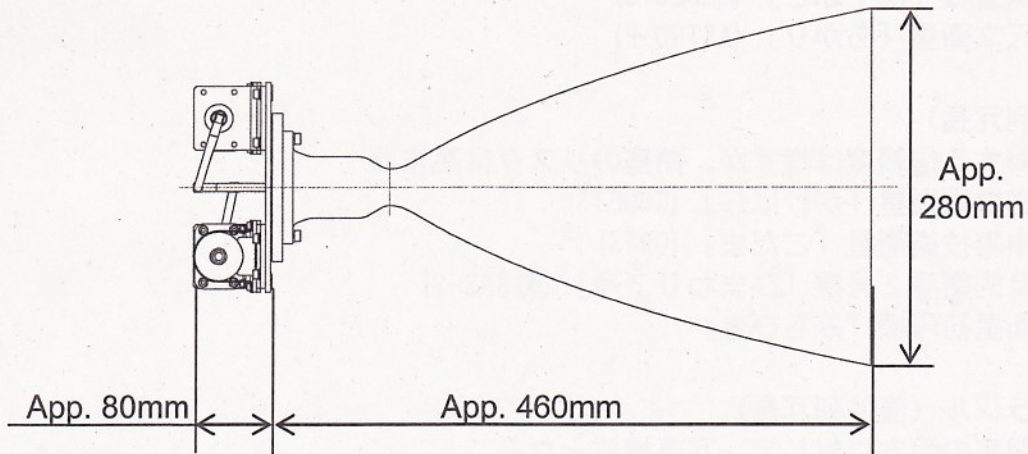
【質問内容】

OMEの構造を示すこと

【資料の該当箇所】 調査1-2

【回答者】 JAXA

【回答内容】



【質問番号3】 OMEテストマヌーバの詳細データ

【質問内容】

OMEテストマヌーバの詳細データを示す。
その際、データの一部が欠損した理由も明記すること。

【資料の該当箇所】 調査1-2 16ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

1. OMEテストマヌーバ実施時の詳細データを次ページ以降に示す。

- (1) 加速度 (8Hz)
- (2) 角速度 (8Hz)
- (3) 姿勢角 (8Hz)
- (4) 推進系圧力 (1/64Hz)

(参考：OMEテストマヌーバ概要)

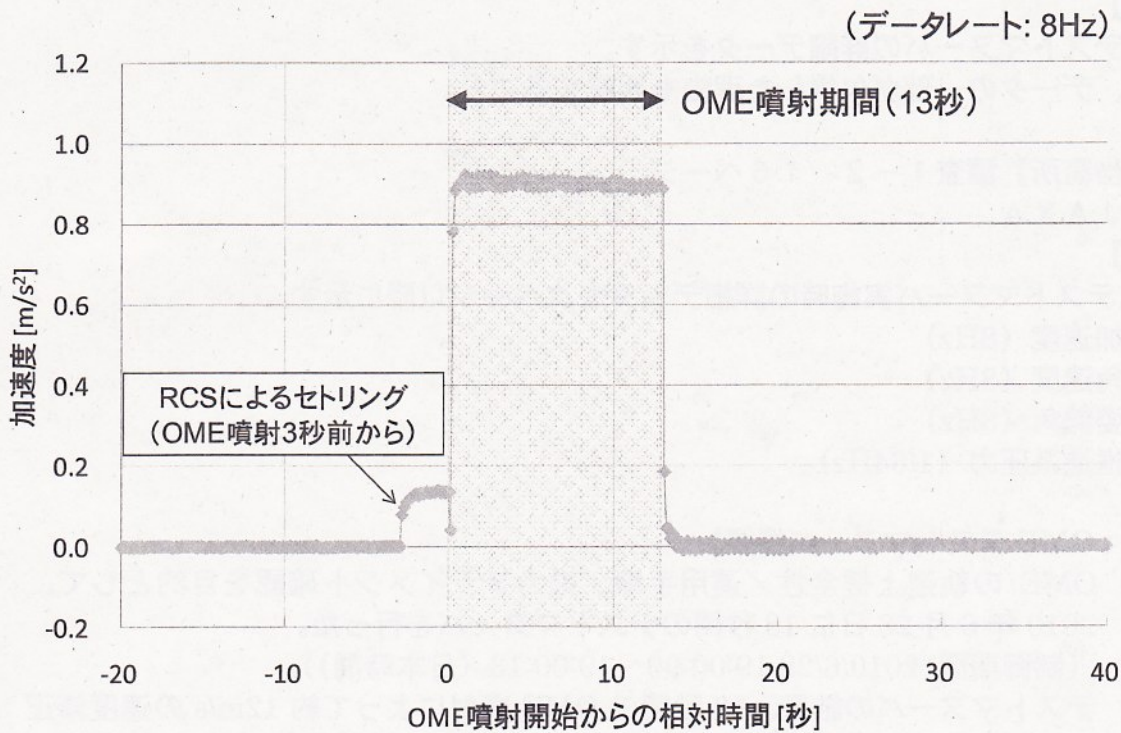
- (ア) OMEの軌道上健全性/運用手順/推力アライメント確認を目的として、2010年6月28日に13秒間のテストマヌーバを行った。
(制御期間: 2010/6/28 19:00:00~19:00:13 (日本時間))
- (イ) テストマヌーバの結果、13秒間のOME噴射によって約12m/sの速度修正が行われ、計画通りの推力が発生していることを確認した。

2. データ欠損について

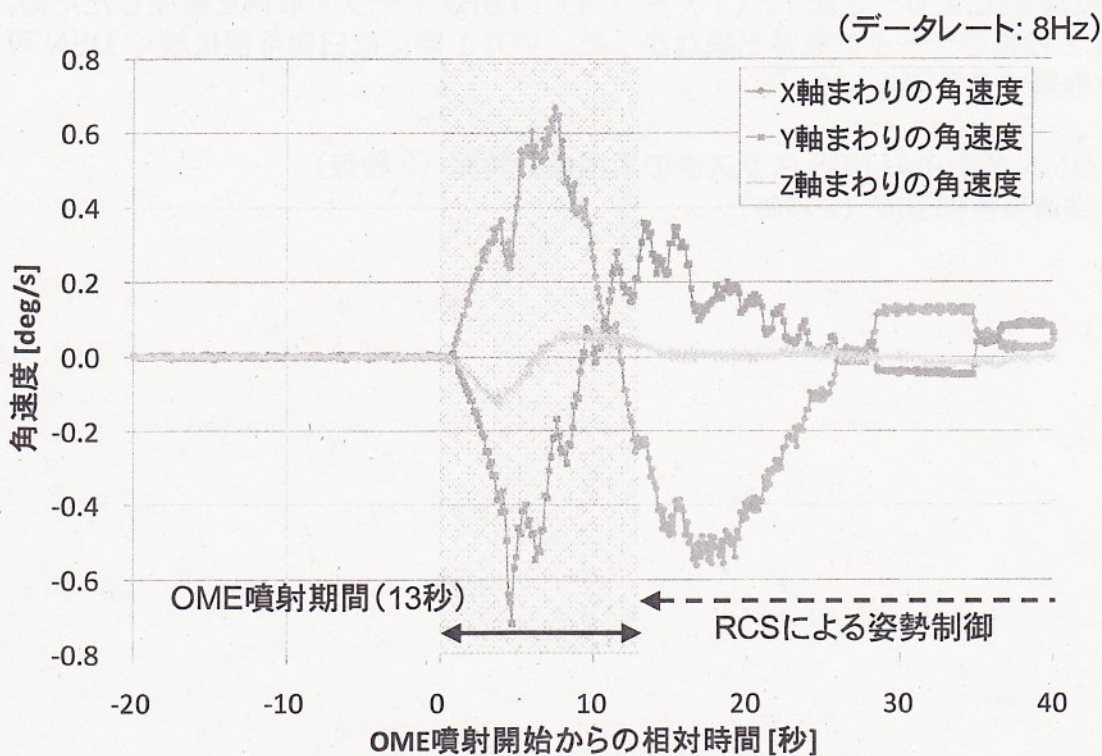
運用時間の制約により、上記1.(1)～(3)の8Hzデータの取得を優先したため、次に挙げる2秒毎のデータは取得出来なかった。VOI-1時には臼田可視に続くDSN可視でデータ取得する計画とした。

- ・ OME噴射中のRCSスラストの累積噴射時間 (2秒毎)
- ・ 推進系各部温度 (2秒毎)

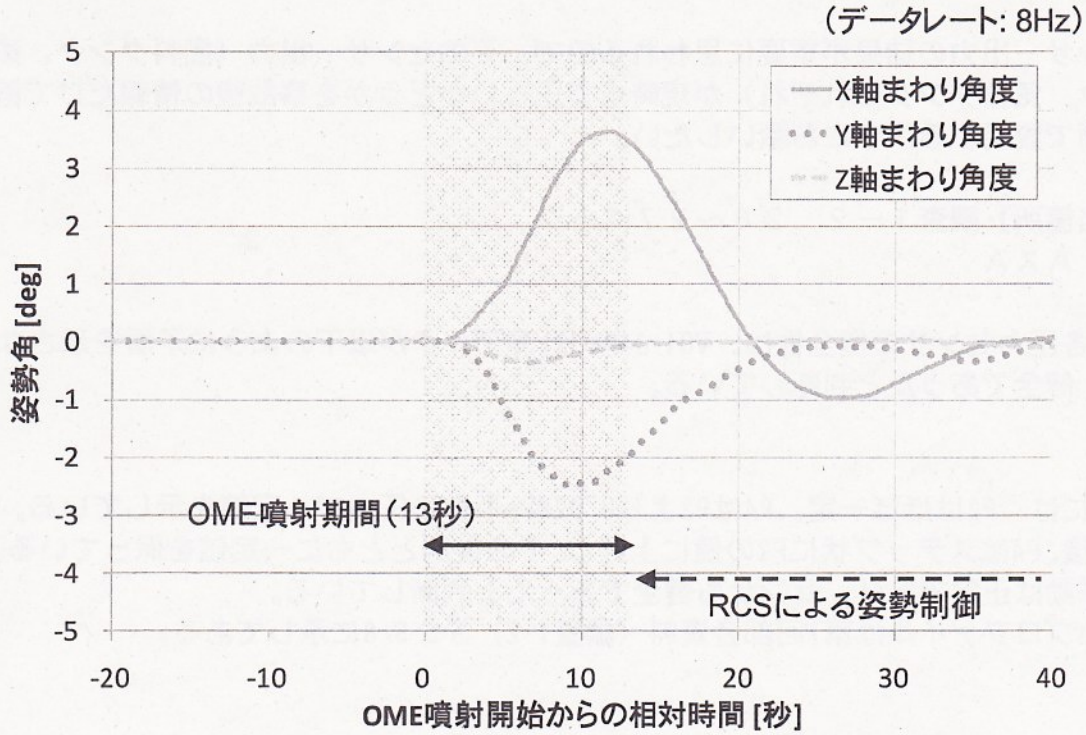
(1) 加速度履歴



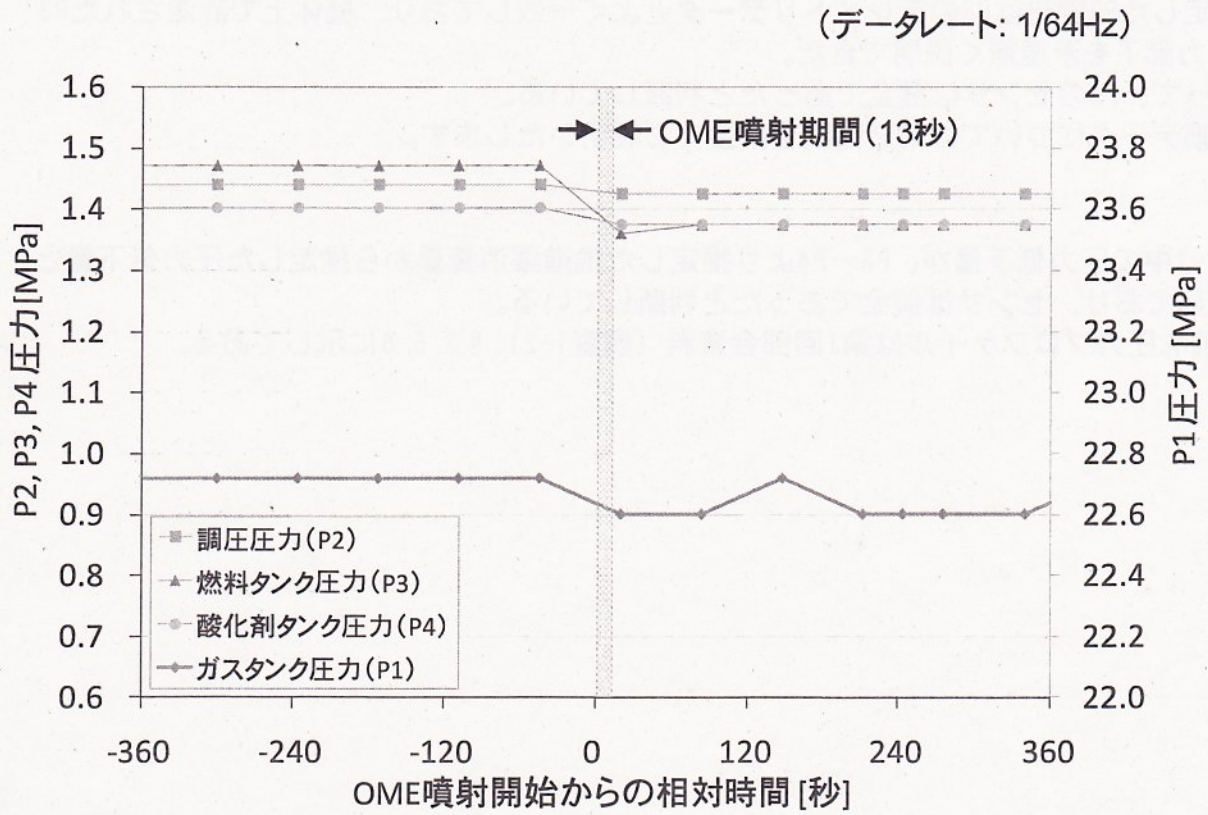
(2) 角速度履歴



(3) 姿勢角履歴



(4) 推進系圧力履歴



【質問番号4】 圧力センサー出力の結果の正当性

【質問内容】

圧力センサー出力の結果が重要に思われるので、そのセンサー出力（燃料タンク、酸化剤タンク、気蓄タンクそれぞれ）が現時点で正しいかどうかを事故後の情報だけで論理的に書面で説明するようお願いしたい。

【資料の該当箇所】 調査1-2 26～27ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

V01-1中の各圧力センサの健全性は、V01-1中の計測データが以下のように矛盾を示さないことから、健全であったと判断している。

・ P2, P4 :

V01-1中には、P2はほぼ一定、P4はP2より0.02MPa小さい圧力で一定値を示している。

V01-1直後、P4はステップ状にP2の値に上昇し、その後P4とともに一定値を保っている。これらの挙動は正常であり、センサも健全であったと判断している。
詳細な圧力プロファイルは第1回部会資料（調査1-2） § 3.5.6 に示してある。

・ P3 :

燃料タンク圧力P3の変化を以下のように推定した。

- ・ ある瞬間の燃料タンク空所容積をそれまでの推薬消費量推定値から算定し、P3の変化を逐次推定していった。

推定したP3変化はP3のテレメトリデータとよく一致しており、機体上で計測されたP3の圧力低下を矛盾無く説明できた。

従って、P3のセンサは健全であったと判断している。

詳細データについては第2回調査部会でご説明いたします。

・ P1 :

V01-1中の圧力低下量が、P2～P4より推定した推進薬消費量から推定した圧力低下量と一致しており、センサは健全であったと判断している。

詳細な圧力プロファイルは第1回部会資料（調査1-2） § 3.5.6 に示してある。

【質問番号5】 OME 噴射開始時の圧力と加速度のデータ

【質問内容】

OME 噴射開始時に、タンク圧が下がる前に加速度が下がっているように見える。時刻を揃えて圧力と加速度のデータを整理して示す。

【資料の該当箇所】 調査1-2 26ページ

【回答者】 JAXA

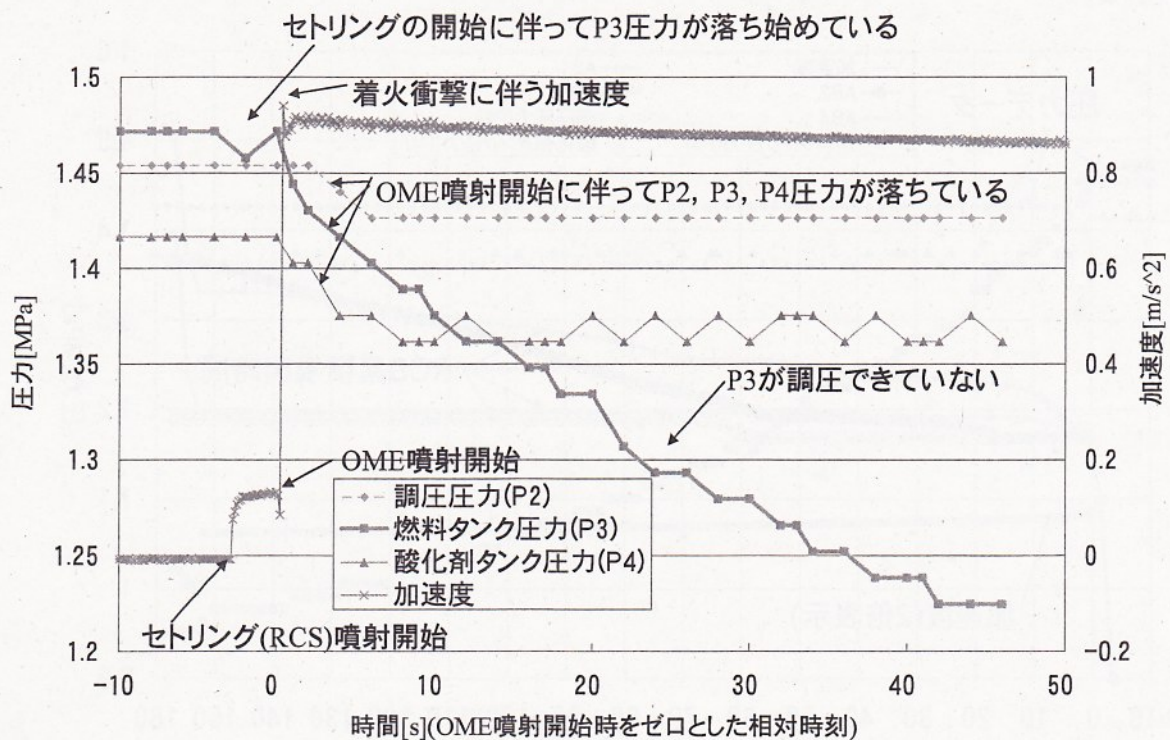
【回答内容】

下図に OME 噴射時の加速度・圧力履歴を示す。

OME 噴射直前（3秒前）のセtringで少量の燃料を使用している。

P3（燃料タンク圧力）は、セtring開始から降下するのは想定通りである。

なお、P3のデータは2秒ごと（第1回部会資料§3.5.6は4秒ごと）、加速度データは1/8秒ごとである。



【質問番号6】 RCSについて

【質問内容】

- (1) OMEテストマヌーバとVOI-1のOME噴射開始以降のRCSの作動実績を機体加速度、P-2、P-3と同じグラフに同じ時刻歴で示してください。
- (2) RCSとOMEが同時に作動しているときに、P-3が低下し、OMEのO/Fバランスがずれると考えられますが、ずれた場合のO/Fの想定値とO/Fの開発仕様の要求範囲を示してください。

【資料の該当箇所】 調査1-3 27ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

(1) OME噴射中のRCS累積噴射時間、機体加速度、圧力履歴

- ・テストマヌーバについては、A/I-22-1-C-1に示す。(RCS累積噴射時間は取得していない)
- ・VOI-1については、下記図1に示す。(圧力、RCS累積噴射時間：2秒ごと、加速度：1/8秒ごと)

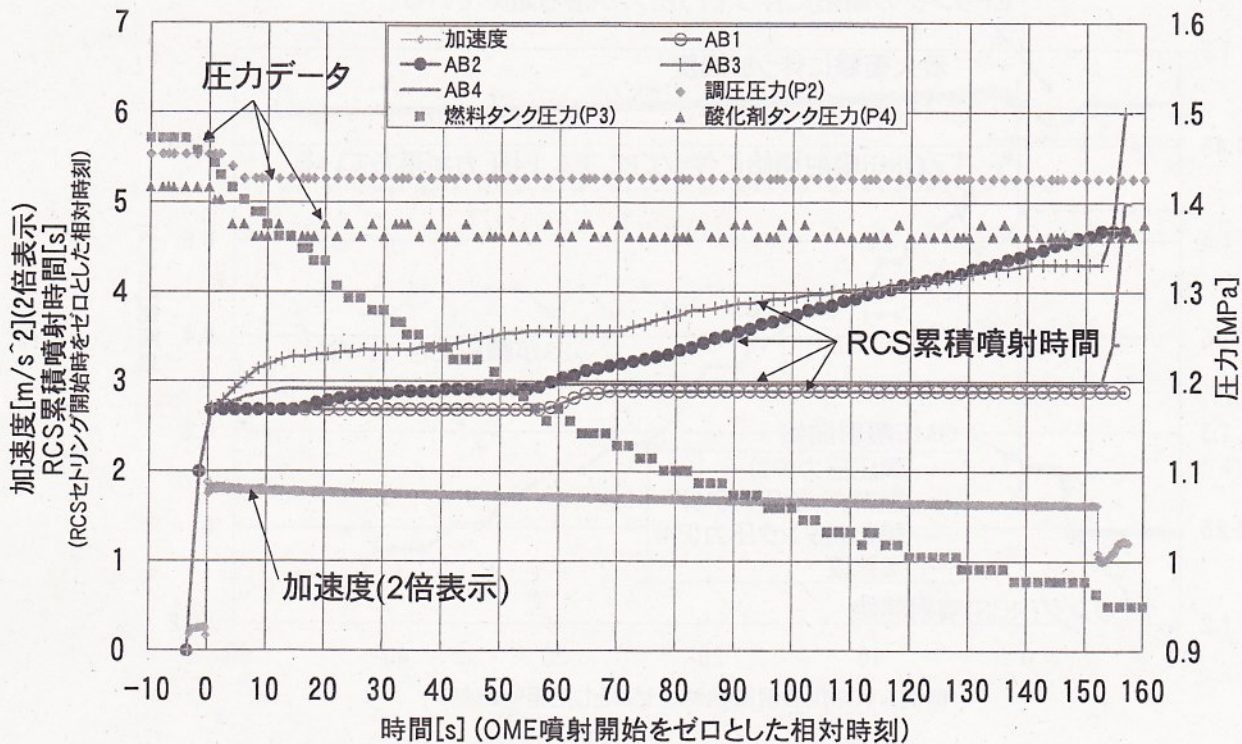


図1：OME噴射中のRCS累積噴射時間、機体加速度、圧力履歴

OME噴射の-10秒時点から噴射開始後375秒までのRCS累積噴射時間を図2示す。RCS累積噴射時間(2秒ごと)は打上げ後からの累積噴射時間である。VOI-1では、OME噴射の3秒前から3秒間AB系スラスト4基を噴射した後に、OME噴射が開始される。OME噴射中においては、姿勢制御のためにRCSを噴射している。OME噴射終了後の姿勢維持モードではホイールを使用するため、RCSの噴射は行わない。

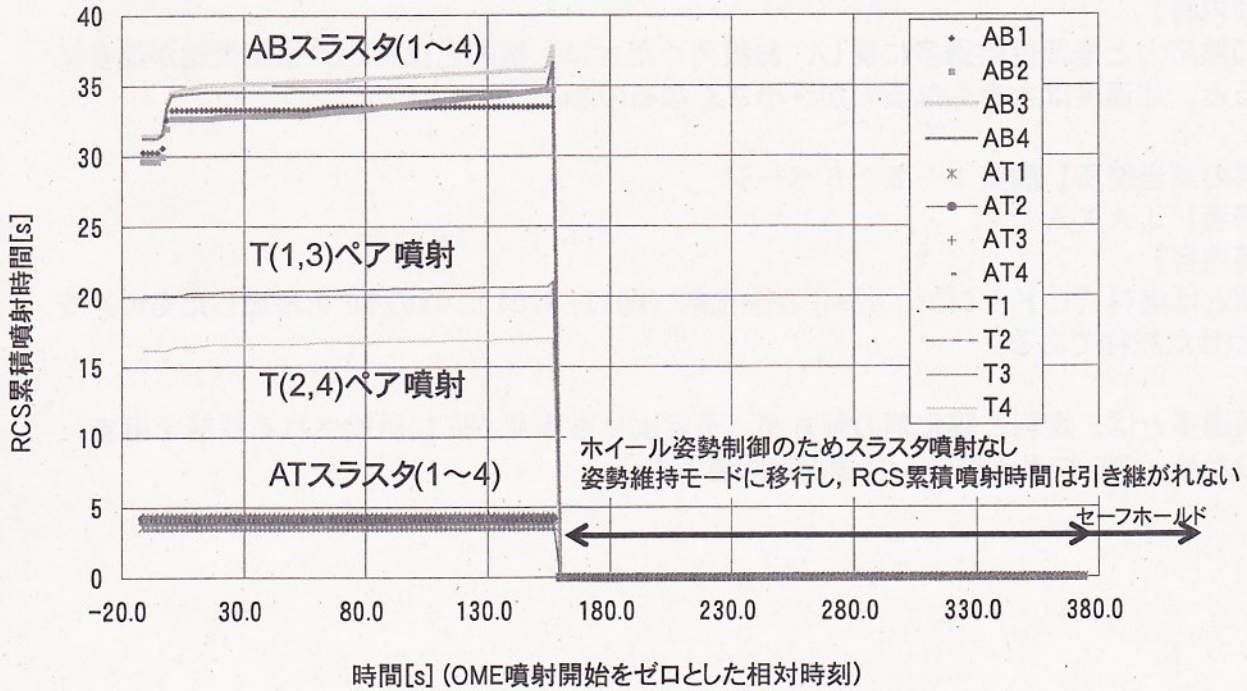


図 2 : V01-1 時の RCS 累積噴射時間

(2) RCS 噴射による OME 作動条件の影響

- OME の推薬流量 154g/s (ノミナル値) に対し RCS の推薬流量は 8g/s (23N デューティ 100%1 基あたりノミナル値) と小さいものであり、OME と RCS 同時噴射に於いても推薬供給系のガス圧は調圧される設計となっており、OME の作動条件 (0/F 等) への影響はない。

【質問番号7】加熱応力と推薬供給過多に関して

【質問内容】

加熱応力と推薬供給過多に関し、お教えてください。推薬とは何か。推薬供給が過多になると、加速度は大きくなるのか、小さくなるのか。

【資料の該当箇所】調査1-3 5ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

- ・推薬とは燃料（ヒドラジン； N_2H_4 ）と酸化剤（ MON_3 ； N_2O_4 に3%の NO を添加したもの）を合わせた総称である。
- ・推薬過多とは、燃料と酸化剤の両方が、予定よりも多くOMEに供給される状態を指す。そのため、OMEによる推力、加速度は大きくなる。

【質問番号 8】 スロート後方後燃え、不安定燃焼、インジェクタ噴射に関して

【質問内容】

スロート後方後燃え、不安定燃焼、インジェクタ噴射は、燃料供給不足と関係するの
かお教えてください。

【資料の該当箇所】 調査 1-3 4～5 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

- ・ 第 1 回部会で、可能性のある要因として残された表記事象に対して、更に考察を深めるため、詳細な FTA を行っている。
- ・ その結果、各候補事象とも、燃料供給不足のみが要因となりうると考えている。
- ・ 詳細な FTA については第 2 回調査部会でご説明いたします。

【質問番号 9】 加熱応力と燃料供給不足に関して

【質問内容】

加熱応力と燃料供給不足に関し、お教えください。燃料供給不足になると、燃焼ガスは高温になるのか、低温になるのか。また、燃料供給不足になると、加速度は大きくなるのか、小さくなるのか。さらに、燃料押しガス圧力不足は圧力 P3 の低下と同じであるのか。

【資料の該当箇所】 調査 1 - 3 5 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

- ・ OME では、燃料と酸化剤を混合させて燃焼ガスを生成しているが、ノミナルの設計混合比は燃料過剰（混合比 O/F は 0.8）に設定している。
- ・ インジェクタの設計などにも依存するが、混合比 O/F=1.4 程度で燃焼ガス温度は最高となる。
- ・ すなわち、あかつきのノミナル設計点（O/F=0.8）から、酸化剤供給量が一定のまま燃料供給不足になると、相対的に酸化剤が多くなることになり、燃焼ガス温度は上がる傾向になる。
- ・ 一方、燃料と酸化剤を合わせたトータルの推薬供給量は減少するので、推力は下がる傾向となる。
- ・ なお、P3 は、燃料押しガスによって押された燃料の圧力を示しているため、燃料押しガス不足は、P3 低下と同じ意味として記述している。

【質問番号10】 0～152秒のFTA

【質問内容】

0～152秒の燃料タンク圧力の低下（機体加速度緩慢な低下）をトップ事象としたFTAも考慮すべき。

【資料の該当箇所】 調査1-2 26ページ

【回答者】

【回答内容】

次ページに燃料タンク圧力の低下をトップ事象としたFTAを示す。

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 低下	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	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	△	仕様、検査・試験項目をこれまでに確認した範囲では、誤動作の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 口の閉塞	×	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はないはず			
		圧力センサ指示値計測異常	×	加速度から推定されるスラスラ燃焼状態・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			

【質問番号 1 1】 CV-F の逆止弁の FTA 判定根拠

【質問内容】

FTA の判定根拠に『テストマヌーバは正常。以降状態変化する要因がない。』という記述があるが、CV-F の逆止弁も同じではないのか？テストマヌーバ最終時の冷却段階で変化したと考える余地はないのか。要因を除去するときにテストマヌーバで正常というのは論理的でないと思われる。

【資料の該当箇所】 調査 1 - 3 4 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

テストマヌーバについて

スラスタが V01-1 前最後に作動したのはテストマヌーバであり、軌道情報から速度増分を算出し、そこから算出したスラスタ推力はノミナル値どおりであったので、正常に燃焼したと考えられる。

FTA 上で、テストマヌーバを理由に可能性を棄却したのは、以下の 2 項目である。

- ・ ノズル内面異常
- ・ 燃焼室内面異常

この 2 項目は、スラスタ素材がエロージョンなどにより変化する可能性を想定したものであるが、今回使用しているセラミックスは、その特性上考えられない。

CV-F については、テストマヌーバでは使用推薬量が少なかったため、CV-F 上下流の差圧が作動圧に達せず、CV-F は作動していない。したがって、CV-F の判定にはテストマヌーバは用いていない。

【質問番号12】スロートより上流のバックデータ

【質問内容】

スロートより上流（燃焼室）は関係ないというのであれば、そのバックデータを示すこと。

【資料の該当箇所】調査1-3 4ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

152秒で急激に機体加速度が減少した後、152秒から158秒の間には機体の有意な加速度が観測されている。この加速度低下が、スラスタ燃焼室が破損したことに起因したとすると、燃焼圧が立たないため有効な推力は発生しないと考えられる。とくに156秒から2秒間の加速度を生む推力は302Nであり、これは152秒時の推力の約0.75倍である。この推力低下がスラスタノズル・スロート破損で生じたとすると、推力係数はおよそ1.3となり、この値はノズル開口比1.0のときの値である。

【質問番号13】 ΔV に関して

【質問内容】

17日の調査部会において、「 ΔV 前後・・・外部漏洩は考えられない」について質問しましたが、内容をもう一度お教えてください。特に、次のことを含めてお教えてください。

- ① 加速度からどのようにして ΔV を求めるのか。
- ② 圧力P3に影響を及ぼす外部漏洩があると、加速度は大きくなるのか、小さくなるのか。

【資料の該当箇所】 調査1-3 4ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

1) 加速度のテレメトリデータから、 ΔV を求める方法

加速度の時間積分により、 ΔV (速度変化量) を算出している。

実際には、機体姿勢角の影響も受けるが、今回の場合には、ほとんどの時間帯で機体姿勢は正常に保たれているため、加速度データの単純な積算だけで ΔV の概略値を算出可能である。なお、正確な ΔV 量については、軌道決定値から算出されるが、今回、機上での加速度計出力による積分と軌道決定結果から算出された ΔV 量は1.5%以内の精度で整合している。

2) 外部漏洩と加速度の関係

燃料タンク圧力P3の変化を以下のように推定した。

- ・ある瞬間の燃料タンク空所容積をそれまでの推薬消費量推定値から算定し、P3の変化を逐次推定していった。
- ・推定したP3変化はP3のテレメトリデータとよく一致しており、機体上で計測されたP3の圧力低下を矛盾無く説明できた。(詳細データについては第2回調査部会でご説明いたします。)
- ・一方、燃料系統の外部漏洩があると、その分、推薬(燃料・酸化剤)のOMEへの供給量が減少するため、OMEによる加速度は低下する。
- ・外部漏洩による反力は、OME燃焼による反力よりも(比推力の意味で)効率が悪いいため、たとえ外部漏洩による反力が推力方向に寄与したとしても、それはOMEによる加速度低下を完全に補うことはできず、結果として、機体加速度は減少することになる。
- ・そのため、仮に外部漏洩があると、上記のP3推定値はP3のテレメトリデータと食い違うはずである。

【質問番号 1 4】 OME 噴射終了後の P3 圧力の上昇に関して

【質問内容】

資料 1-2 の 27 ページにおきまして、OME 噴射終了後に P3 圧力が上昇し、正常値に戻っている過程を解析し、その内容をお教えください。

【資料の該当箇所】 調査 1 - 2 27 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

ご指摘の点については、第2回調査部会資料にてご説明いたします。