

「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4)

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

2011年9月30日

概要

第3回調査部会までの議論で、金星軌道投入失敗原因の究明と、今後の対応についての検討や実証のための一連の地上試験について報告を行い、投入失敗の直接原因は燃料側高圧ガス供給逆止バルブの動作不良によるものと判断した。また、それに伴う異常な推進薬供給の結果、軌道制御用2液エンジン(OME)燃焼器はスロート付近で破損していると推定した。

これを受け、11月上旬の近日点軌道制御に向けてOMEの軌道上における状態把握を目的とした軌道上試験噴射を9月前半に実施し、その結果を基に今後の軌道制御方針、および探査機運用法を策定した。

本資料では主として以下の点について報告することを目的としてまとめたものである。

- 9月前半の軌道上試験噴射に向けた地上における各種試験検討状況
- 軌道上試験噴射結果、及び姿勢制御用1液エンジン(RCS)を用いた今後の軌道制御方法
- 今後の探査機運用法(酸化剤投棄・軌道計画等)の検討状況

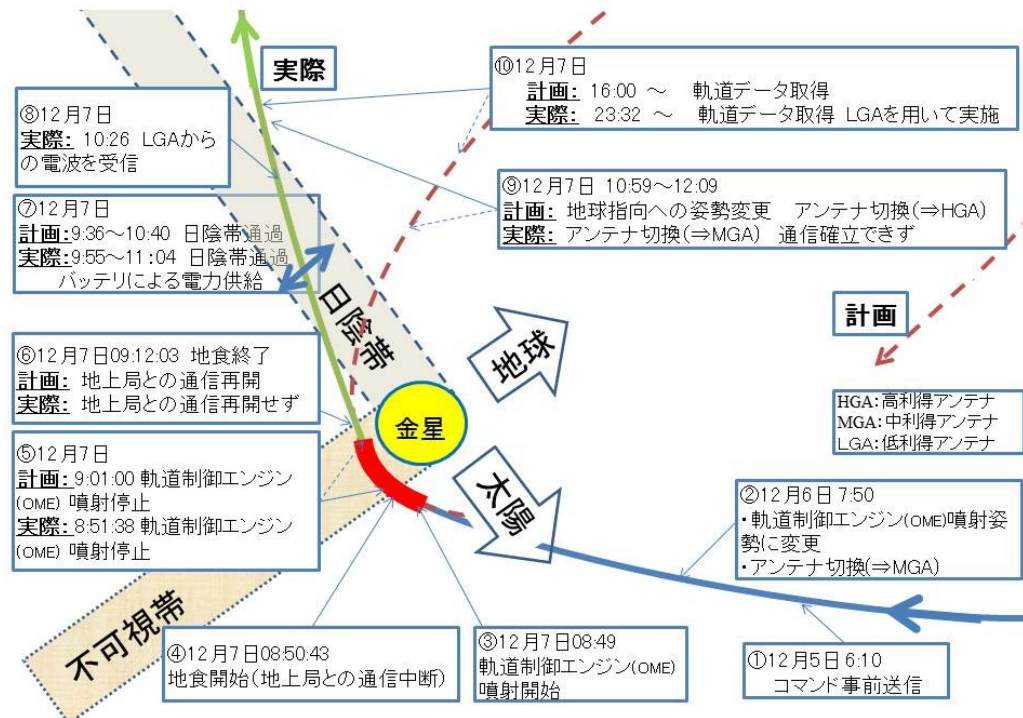
目次

1. 経緯
2. 第3回部会までのサマリ
 - 2.1 VOI-1で発生した事象の理解
 - 2.2 金星軌道再会合運用のトレードオフ
3. OME再噴射のための検討
 - 3.1 着火衝撃緩和条件の探索
 - 3.2 破損燃焼器を用いた着火衝撃緩和燃焼試験
 - 3.3 軌道上試験噴射リハーサル
 - 3.4 OME試験噴射結果
 - 3.5 試験噴射結果を受けた今後の軌道制御法
4. 近日点軌道制御にむけた検討
 - 4.1 酸化剤投棄運用
 - 4.2 RCS長時間噴射に向けた検討
 - 4.3 今後の軌道計画
5. 近日点軌道制御に向けたスケジュール
6. 第4回調査部会報告のまとめ

1. 経緯(1/2)

- 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、計画通り金星に到達。
- 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。軌道制御用エンジン燃焼開始後約152秒後に大きな姿勢変動が発生し、約158秒で燃焼を停止(計画燃焼時間約720秒)。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)

軌道投入マヌーバ(VOI-1)の運用計画・実際



1. 経緯(2/2)

3. 平成22年12月8日宇宙開発委員会において金星周回軌道投入失敗の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.
4. 平成22年12月17日、27日、および平成23年6月30日の3回にわたる調査部会において、金星軌道投入失敗原因の究明と、今後の対応についての検討や実証のための一連の地上試験について報告を行い、投入失敗の直接原因は燃料側高圧ガス供給逆止バルブの動作不良によるものと判断。それに伴う異常な推進薬供給の結果、軌道制御用2液エンジン燃焼器はスロート付近で破損していると推定した.
5. 現在あかつきは太陽周回軌道を飛行中であり、今後の金星再会合及び金星周回軌道への再投入に向けた検討を実施中.
6. 平成23年4月17日には太陽周回軌道の近日点通過。設計条件を上回る熱入力による機器への影響を最小にする運用を実施.

2. 第3回部会までのサマリ

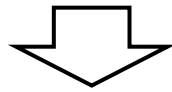
2.1 VOI-1で発生した事象の理解

第1～3回調査部会より、昨年12月の金星周回軌道投入失敗時には以下の不具合シナリオにより発生した事象を説明できると結論した。

燃料側逆止弁(CV-F)上流において弁シールを透過した酸化剤蒸気が燃料蒸気と反応することで塩が生成し、CV-Fが閉塞。



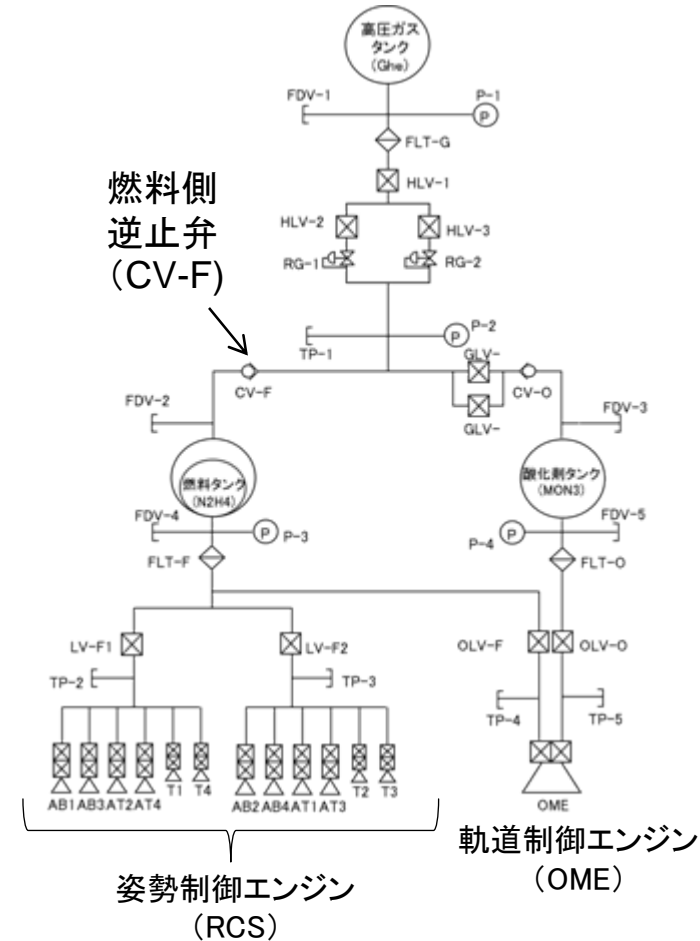
燃料供給圧の低下により燃焼室への燃料流量が低下。OMEの酸化剤/燃料混合比が設計条件を逸脱。



OMEが影響を受け、スラストノズルはスロート部付近で破損。



探査機姿勢に異常が発生し、自律制御によるOME燃焼停止。



あかつき推進系系統図

2.2 金星軌道再会合運用のトレードオフ

第三回調査部会においてOMEの軌道上状態を確認するために軌道上試験噴射を実施することを報告。今後の金星再会合に向けた軌道制御のために、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方法を検討し、試験噴射の結果からどちらかの方法を選び、11月の近日点通過時に軌道変更を行うことを計画していた。

0. OMEによる軌道上試験噴射

複数回の試験噴射により、OMEの健全性および、OME噴射中の姿勢保持機能を確認する。

OME: 軌道制御用2液エンジン(500N級)
RCS: 姿勢制御用1液エンジン(23N級×4)

案1: OME・RCSとも使用できる場合

1. 近日点軌道制御

実施時期: 2011年11月or2012年6月頃

2. 金星軌道再会合マヌーバ:(4日軌道)

実施時期: 2015年11月頃(金星再会合)

3. 観測軌道投入(4日軌道から30時間軌道へ)

実施時期: 2015年11月以降, 近金点で実施

案2: OMEを使用できない場合 姿勢制御エンジン(RCS)によって ΔV を行う

1. 酸化剤投棄

実施時期: (近日点軌道制御前)

2. 近日点軌道制御

実施時期: 2011年11月or2012年6月頃

3. 金星軌道再会合マヌーバ:

実施時期: 2015年11月頃(金星再会合)

3. OME再噴射のための検討

3.1 着火衝撃緩和条件の探索

昨年12月のVOI-1時にOMEは破損したと推定。当初計画していた観測軌道に再投入するためのOMEの再着火に向けた検討を行い、破損の状況を再現し、これを用いて再着火時の挙動を理解するための試験を実施した。



ノズル破損後の燃烧器
(浸透探傷検査にて貫通クラックの存在確認)

着火と同時にスラスタが
全損するケースが発生



再着火後に破損が進行した燃烧器

再着火により破損が進行する場合があることから、着火衝撃を緩和する試みを行った。

定性的には、推薬(燃料・酸化剤)の噴射を同時ではなく酸化剤を若干先行させ、かつ推薬を予めある程度高温にしておくことで着火衝撃は緩和できることが分かった。軌道上にある「あかつき」で実現可能な範囲で最良の方法を地上試験により探索した。

試験にあたっては、まず着火衝撃を高応答で計測可能な金属スラスタを製作し、パラメトリックに実験を実施した後、その条件をセラミックスラスタに適用することとした。

地上燃烧試験(計195回)の結果見出された着火衝撃緩和条件

OMEインジェクタ温度:	150°C以上	
OME推薬弁温度*:	65~74°C	*:温度が高すぎても
OME配管温度*:	57~68°C	着火衝撃が大きくなる
酸化剤先行噴射:	100~400ms	

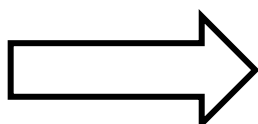
3.2 破損燃焼器を用いた着火衝撃緩和燃焼試験

得られた着火衝撃緩和条件を用いて複数の破損燃焼器で燃焼試験を実施。燃焼試験は今後の運用を考慮して、短秒時の繰返し再着火試験を行った。

破損進行の例



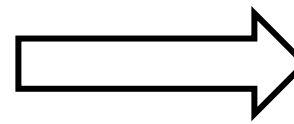
(初期状態)
スロート近傍で破損した
燃焼器



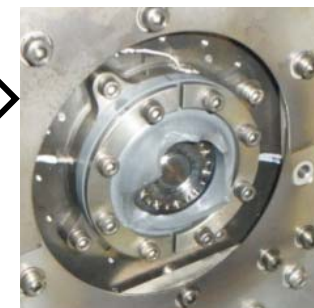
再着火
↓
破損進行する
ケースあり



破損進行した
燃焼器



破損進行後
再着火
↓
全損に至る
ケースあり

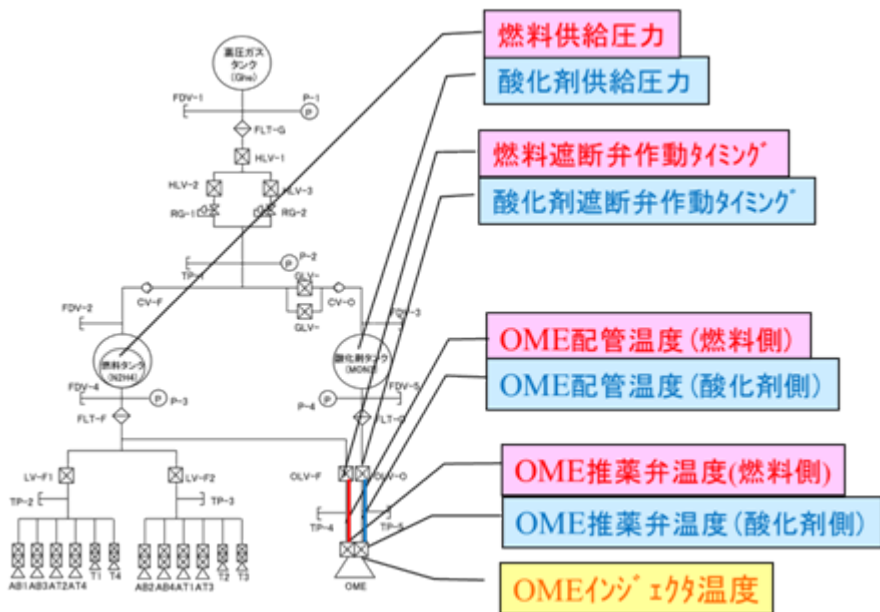


全損した燃焼器

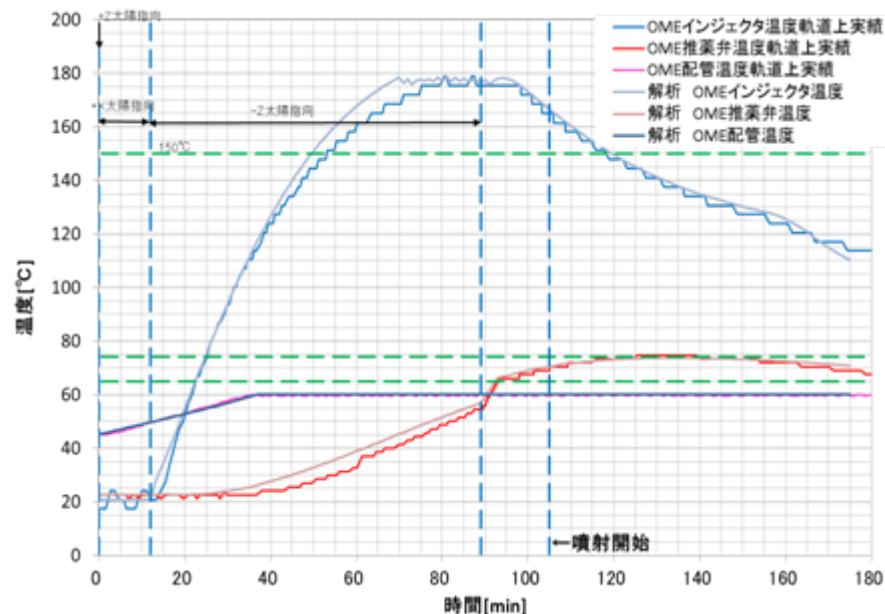
これらの試験結果から、着火衝撃緩和条件を用いても破損が進行する可能性があることが分かった。OMEを使った望ましい観測軌道への投入の可能性追求のため、着火衝撃緩和を考慮しつつ探査機のエンジンを用いた試験噴射を行いOME再噴射の可否判断を行うこととした。

3.3 軌道上試験噴射リハーサル

地上で得られた着火衝撃緩和条件を軌道上で満たすべく、ヒータによる温度制御に加え、探査機の姿勢変更(太陽熱入射変更)も用いた温度制御を実施。以下に探査機に要求される制御値、および予測値・軌道上試験結果の比較を示す。その結果着火衝撃緩和条件を満たせることを確認。



探査機に要求される制御値

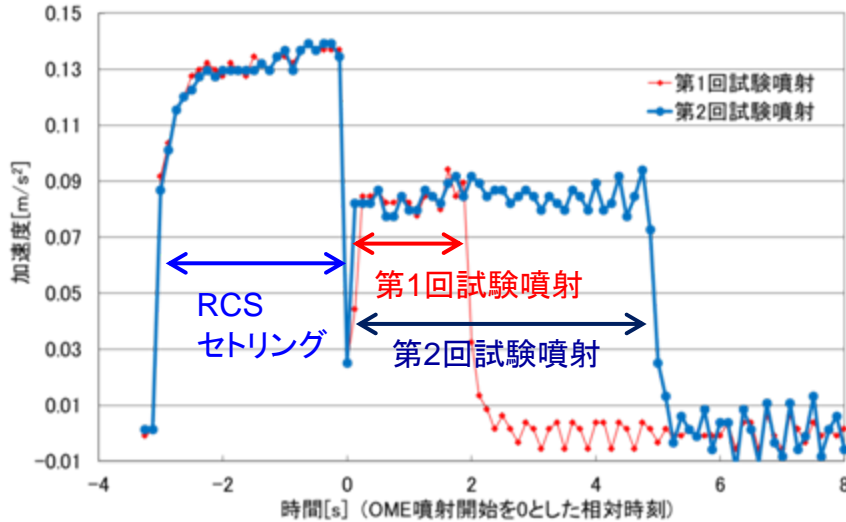


予測値及び軌道上リハーサルの比較

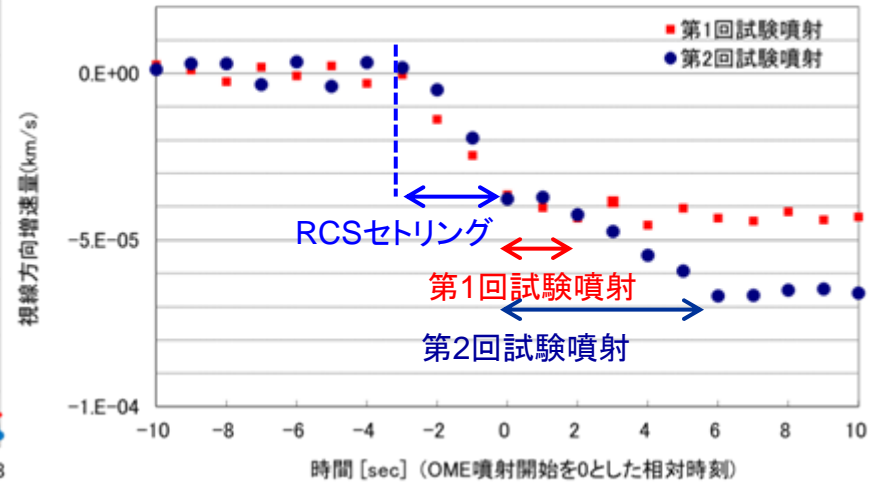
	要求値		軌道上リハーサル結果
OMEインジェクタ温度	150°C以上	⇒	164.9°C
OME推薬弁温度	65~74°C	⇒	70.4°C
OME配管温度	57~68°C	⇒	59.5°C

3.4 OME試験噴射結果(1/3)

9月7日及び9月14日にそれぞれ2秒及び5秒程度の軌道上試験噴射を計画通り2回実施。



第1, 2回試験噴射加速度データ



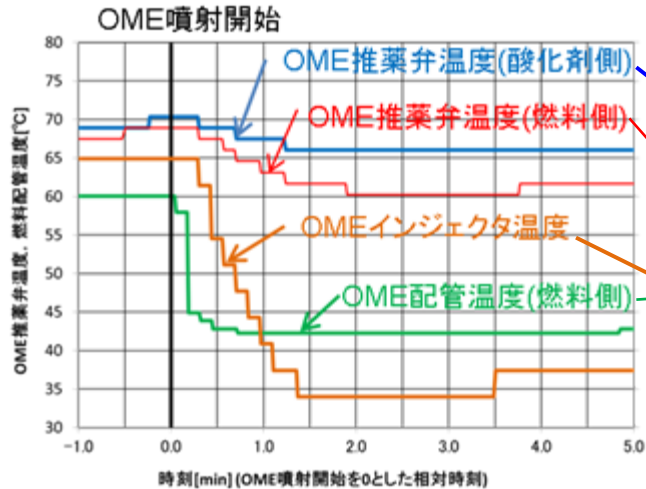
第1, 2回試験噴射ドップラモニタ

2度の軌道上試験噴射で加速度・ドップラモニタともほぼ同じ事象が観察された。

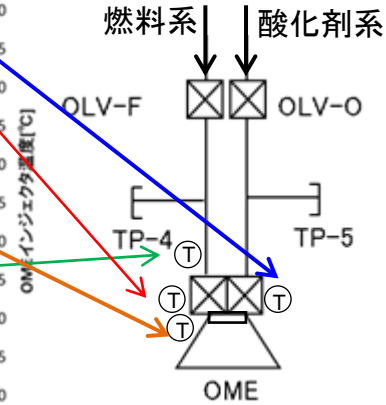
- OME噴射に先立ち、3秒間RCSスラスタ4基(計約70N)を噴射することでタンク内推薬を排出ポート側に寄せる「RCSセトリング」は正常に実施されたことが観測された。
- その後のOME噴射で得られた加速度は想定約1/9であり、推力は約40Nであった(RCSで得られた加速度は想定通りであり、計測は妥当と判断)。
- ドップラモニタから得られた視線方向増速量も加速度データと整合していた。

得られたテレメトリデータはOMEの推力が想定よりも有意に小さいことを示唆している。

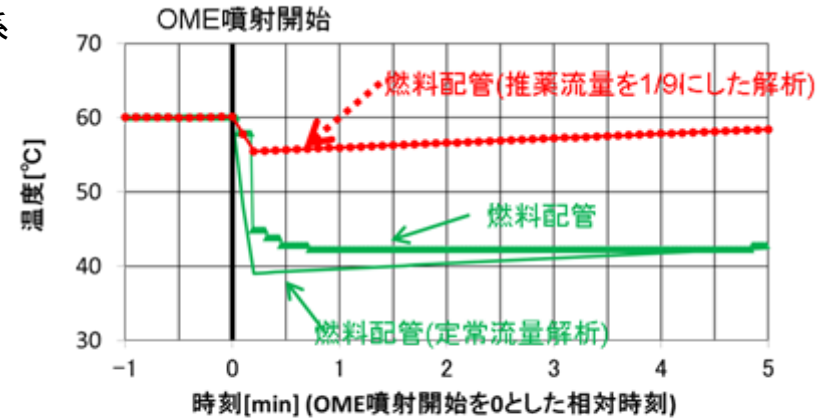
3.4 OME試験噴射結果(2/3)



第1回試験噴射時の推進系各部温度



OME周りの配管系統図



第1回試験噴射時の燃料配管温度(解析と実測)

エンジン噴射試験中の推薬供給系の状況を以下のように確認。

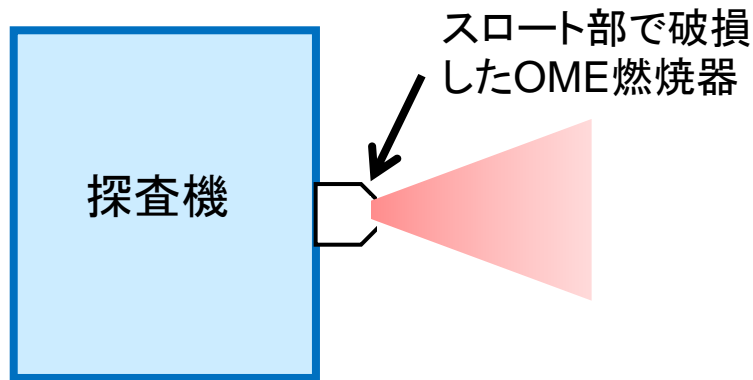
- 噴射中のバルブ状態モニタは正常であった。
- OME噴射時の推進系各部温度変化履歴は想定通り(20°Cの推薬が流れることによる温度低下を検知)で、9月7, 14日の両試験噴射ともに同じ傾向を示した(左図)。
- 推薬供給系各部の温度履歴に対して、温度低下の推薬流量感度解析を実施。定常流量が流れた場合をシミュレートした配管温度と軌道上配管温度の変化履歴は定量的に一致しており、試験噴射時の推薬供給量は概ね正常と判断(右図)。

以上から、エンジン試験噴射時の推薬供給は正常と判断できる。

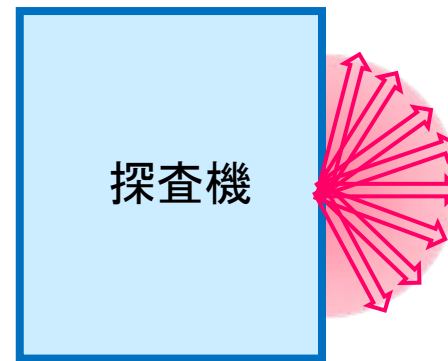
3.4 OME試験噴射結果(3/3)

エンジン試験噴射発生推力の評価

仮に、OME破損が進行して燃焼器が完全に消失したケースを考え、あかつきの底面を平面として、自由空間で燃焼したガスが底面を押し出す力を見積もる。



スロート部で破損したOME
約350N程度の推力を想定



OME燃焼器が完全に消失したケース
理想的に等エントロピー流れで燃焼ガスが
広がると仮定すると50N程度の推力と推算

実際の流れや燃焼状態はより複雑であるが、試験噴射でOME破損がさらに進行し、燃焼器として機能していない、として計測された推力は説明できると考えられる。

単位質量推薬あたりの加速能力(比推力)を比較すると、OMEよりもRCSに切り替えた方が効率的。

3.5 試験噴射結果を受けた今後の軌道制御法

前頁までの議論より、以下の理解が得られた

- OME 燃焼器では今後の軌道制御に有効な比推力が得られない。
- これまで行った地上燃焼試験結果から、着火衝撃緩和の工夫を施したが、燃焼器破損がさらに進行した可能性が高いと考えられる。

以上より、以下の方針で今後の運用を行うことが妥当と考える。

- 今後の金星再会合および再投入に向けた軌道制御は、姿勢制御用1液スラスタ (RCS, ヒドラジン燃料のみを使用) によって行う。
- 11月の近日点軌道制御に向けて、無駄な重量を投棄するために、全酸化剤の排出を10月中旬までに行う。
- なお、今後の運用計画は、燃料側高圧ガス供給逆止バルブの動作不良が継続していること、および微量な押しガス供給が維持されていることを前提としている。

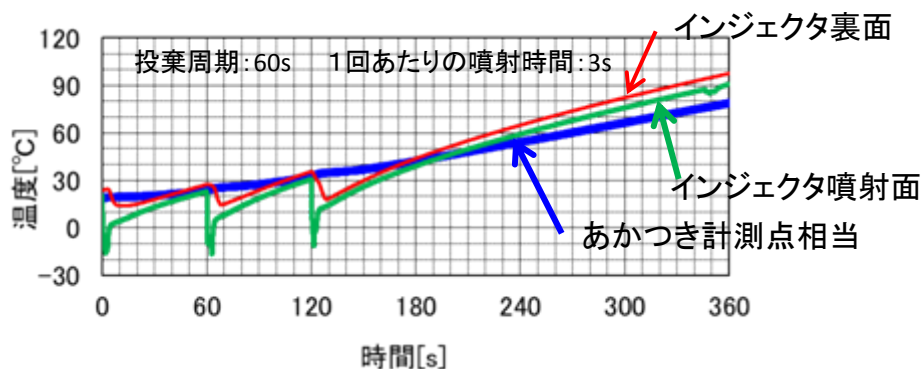
4. 近日点軌道制御にむけた検討

4.1 酸化剤投棄運用

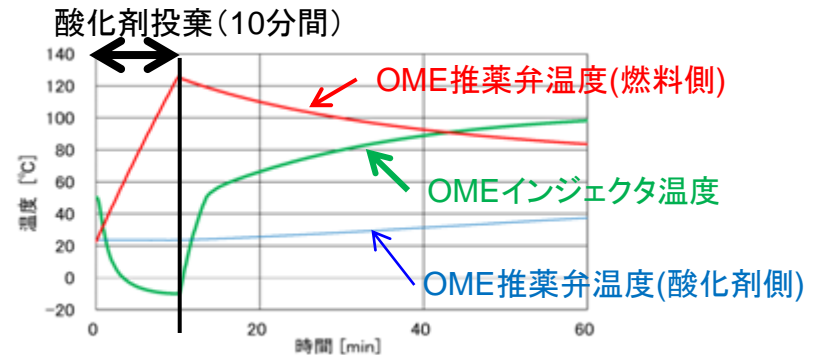
前節よりRCSによる軌道制御を実施することが妥当であると考えられる(§ 2.2金星軌道再会合運用のトレードオフにおける案2)。RCSによる軌道制御を有効に実施するためには、探査機重量を軽くするため、不要となった酸化剤の投棄が必須である。

酸化剤投棄運用においては、真空中へ液体(酸化剤)噴射することによりインジェクタが凍結する可能性や、推薬弁を含めた探査機各部の温度が許容範囲を逸脱する可能性に注意して実施する必要がある。そのため、下図のように地上実験(左図:3秒間の投棄を60秒間隔で3回実施した例)や熱解析(右図;600秒連続投棄させた例)などを実施し、酸化剤投棄を安全に実施する方策を検討中である。今後、軌道上でのデータ取得を経て、10月初中旬に酸化剤投棄運用を実施する。

インジェクタ各部の温度履歴(地上実験例)



酸化剤投棄に伴うOME周りの温度履歴(熱解析例)



4.2 RCS長時間噴射に向けた検討

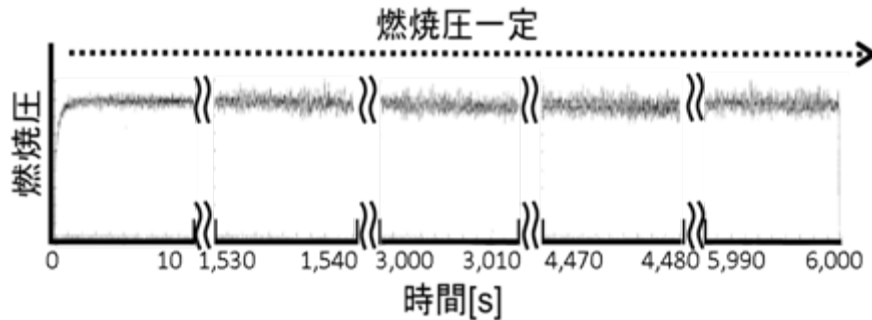
RCSの噴射性能に関する検討

RCSは1液式スラスタであり、燃料を触媒分解でガス化して推力を得る。そこで、長時間噴射した場合の触媒破損・劣化や、触媒保持機構の焼損等による推力の低下および不安定化の可能性を検討した。

⇒ あかつき搭載のRCSは、科学衛星でフライト実績のある既開発品。
あかつきでは累積4,000秒程度(連続では高々2,000秒)の噴射が必要となる予定。

これに対して

QT試験では累積23,000秒(連続では6,000秒)の地上燃焼試験実績がある。噴射中の燃焼圧は安定しており、触媒劣化などの兆候も観測されていない。



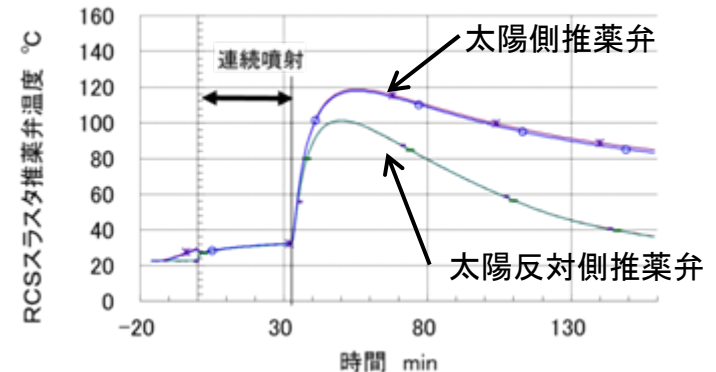
6,000秒連続噴射試験時(QT)の燃焼内圧履歴(結果例)



RCS触媒(イメージ)

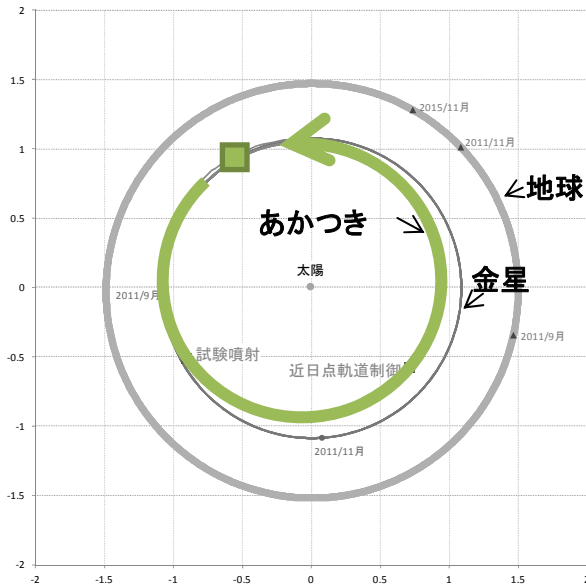
RCSおよびその周辺温度に関する検討

- RCSは長秒時噴射が可能な設計になっており(上述)、探査機本体にも熱的影響の少ない設計になっている。
- 噴射終了後のヒートソークバックによるRCS(特に推薬弁)の温度上昇について、許容温度逸脱の可能性を検討した。
⇒熱解析により、RCS噴射後も推薬弁温度などが許容範囲内にとどまることを確認した。



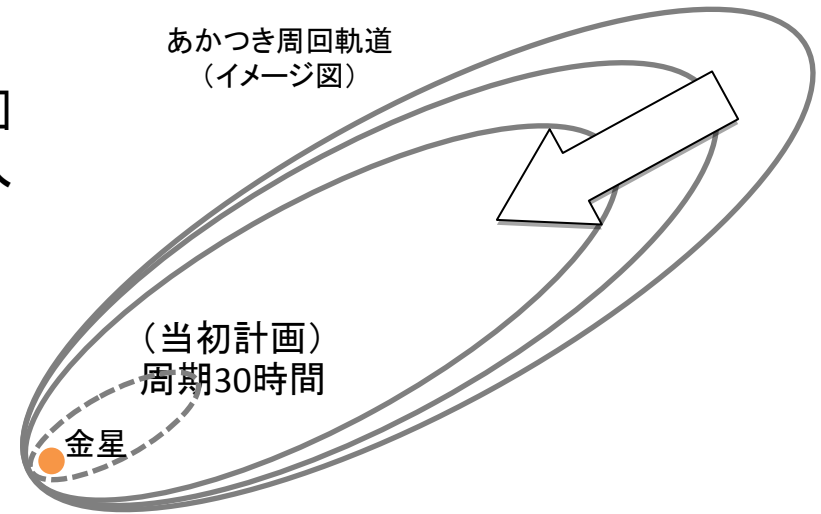
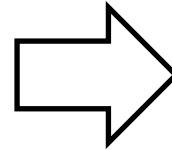
2000秒のRCS連続噴射前後の推薬弁温度履歴(解析)

4.3 今後の軌道計画



「あかつき」軌道制御時の探査機と金星，地球の位置関係
太陽周回軌道（現在の軌道）

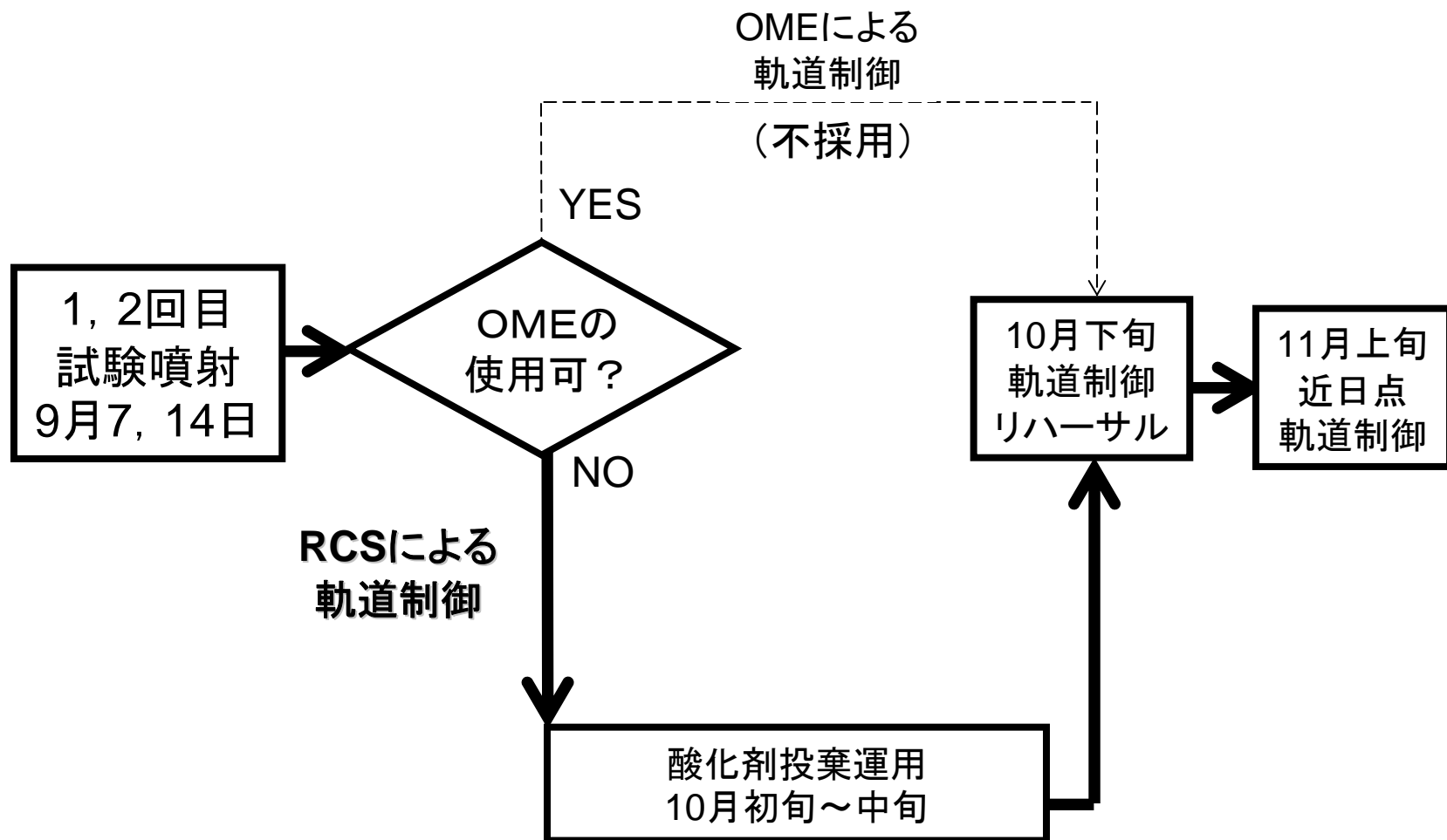
金星周回
軌道投入



金星周回軌道

- 2011年11月上旬に2015年の金星再会合に向けたRCSによる軌道制御を実施予定。探査機は設計条件を超える熱環境に曝され想定寿命を超える運用を余儀なくされるが，最大限の緩和を考慮しつつ運用を実施予定。金星周回軌道への再投入は2015年以降に実施することを計画。
- 健全なOMEより性能の低いRCSを使用するため，現状の予測では当初計画に比べ遠金点高度の高い周回軌道になる。RCSの最新の推進性能は今後の軌道制御運用で得られるデータによって更新される。
- 投入される軌道の寿命・遠金点高度・周期などは，RCS性能，残燃料に依存。今後の軌道変更の結果や探査機の状態によって変わり得る。軌道傾斜角の選択や複数回の金星会合の後に周回軌道投入することなども視野に入れ，科学コミュニティにおける検討を踏まえて観測成果が最大となる軌道へ投入することを目指す。

5. 近日点軌道制御に向けたスケジュール



6. 第4回調査部会報告のまとめ

1. 今後の軌道制御に向けてOMEによる地上試験を含め以下のことを実施。
 - 破損した燃焼器に再着火すると、着火衝撃により破損が進行する可能性がある。
 - 着火衝撃の特性取得のための実験結果から可能な衝撃緩和条件を求め、探査機上でもこれを達成できる見込みが得られたため、OMEの使用可否判断のための試験噴射計画を立案した。
2. 9月7, 14日に軌道上試験噴射を実施した結果以下の結論に達した。
 - OME推力は40N程度であり、今後の軌道制御に有効な比推力が得られない。
 - OME燃焼器は、破損が進行したと考えられ、今後の使用は断念する。
 - 今後はRCSによる軌道制御によって金星再会合および再投入を目指す。
 - RCS(一液触媒燃焼方式)による運用のため酸化剤を全て投棄する。
3. 今後の運用計画と金星再会合・再投入に向けた計画。
 - 酸化剤投棄運用に続きRCSによる近日点軌道制御を実施(11月上旬)
 - 金星再会合および再投入に向けては、今回の近日点における軌道変更以降、探査機の状況、RCS運用結果などに応じて、観測成果を最大化する軌道と投入方法を科学コミュニティにおける検討を踏まえて決定していく。