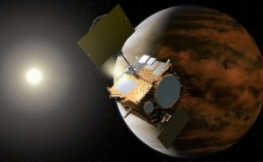


「あかつき」の
これまでとこれから

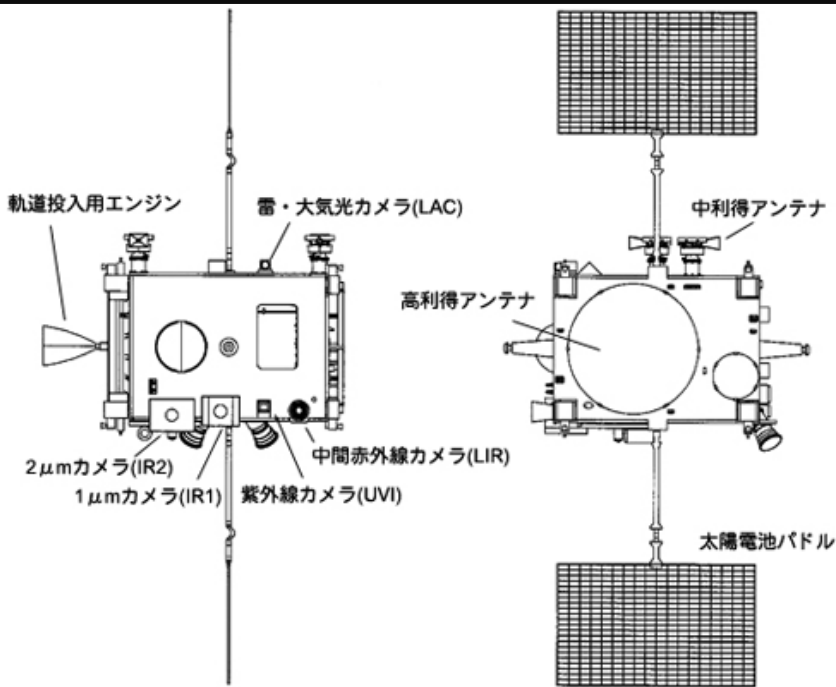
中村正人
ISAS/JAXA

金星探査機「あかつき」打ち上げ前公式発表



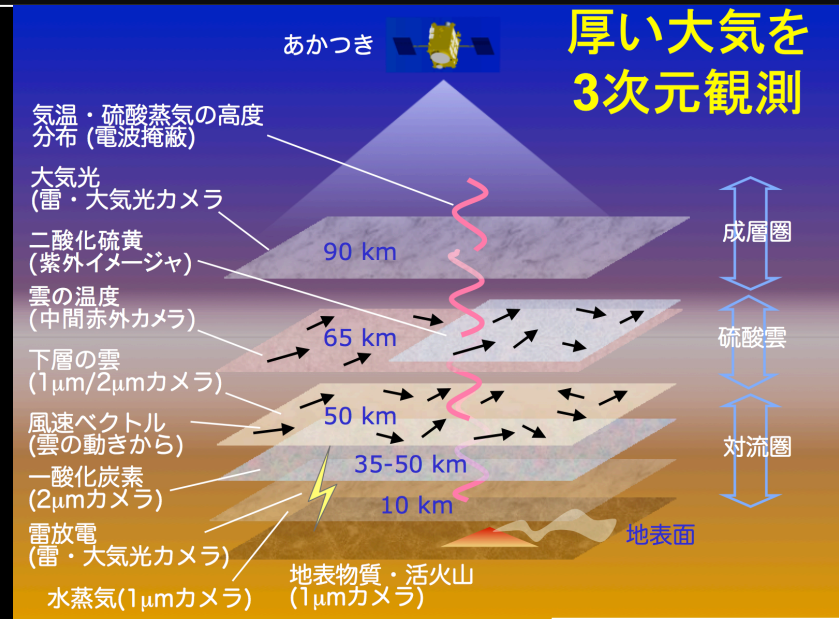
目的

金星の雲層の下に隠された気象現象を、最新の赤外線観測技術により金星周回軌道から観測することにより、地球気象学の常識を超えた高速の大気循環「超回転（スーパー・ローテーション）」を始めとする金星大気力学のメカニズムを解明し、地球気候変動理解の鍵となる惑星気象学の確立に資する。



衛星外観

(注：左図左側部の「軌道投入用エンジン」が破損した)



赤外線や紫外線の多波長カメラと雷センサによる金星気象の3次元データ

金星大気力学の解明

- 惑星気象学の確立
- 地球環境変動の理解

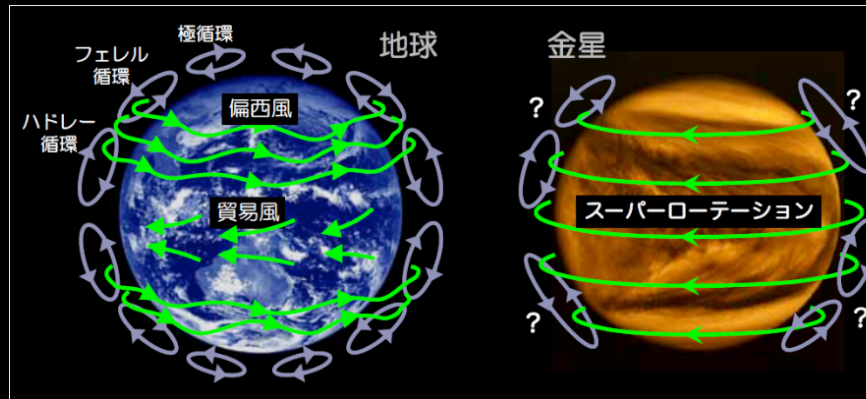
主要諸元 (打上時の想定)

- 重量 約480 kg
- 打上げ 平成22年5月21日
- 軌道 金星周回楕円軌道、高度 約300 km~8万 km
- 金星到達まで 約 半年
- ミッション期間 金星到達後 約 2年以上

スケジュール

平成14-15年度	基礎開発研究
平成16-18年度	衛星試作
平成19-21年度	衛星製作
平成21年度	動作確認試験
平成22年度	打上げ

惑星大気探査の科学的目的(2月プレス発表より)

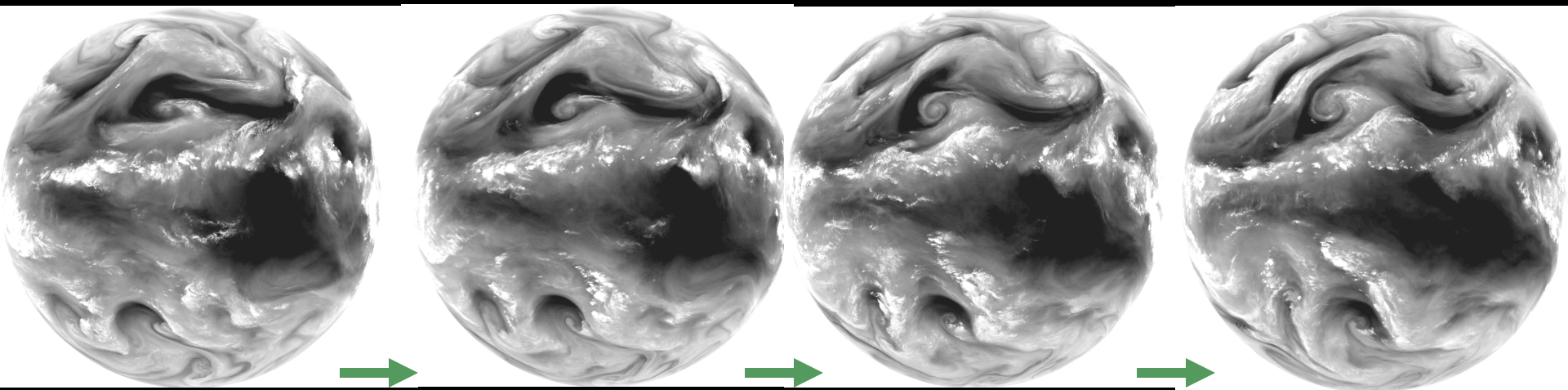


「あかつき」による金星探査の科学的意義

- 地球と大きさがほぼ等しく、太陽からの熱入力も大差ないため双子星と言われる金星だが、その気候は大きく異なる(図)。地球の気象学の知識では、その違いを完全には説明することが出来ない。
- そこで金星の気候力学を周回軌道から雲の下まで透視するリモートセンシングによって解明することを目指す。例えば
 - ・ 高速大気循環「スーパーローテーション」はなぜ起こるのか
 - ・ 子午面循環は気候にどのような影響を与えているか
 - ・ 全球を隙間無くおおおう雲はどう作られるのか
 - ・ 氷晶の生じない大気に雷は起こるか
- これらを理解する事で、地球の気象学では見落とされている危険性のある因子を抽出し、地球気象と金星気象を統一的に理解出来る枠組みを構築する礎とする。将来的には火星気象探査も踏まえ、大気のある内惑星の気象を記述する惑星気象学の構築に繋げる。

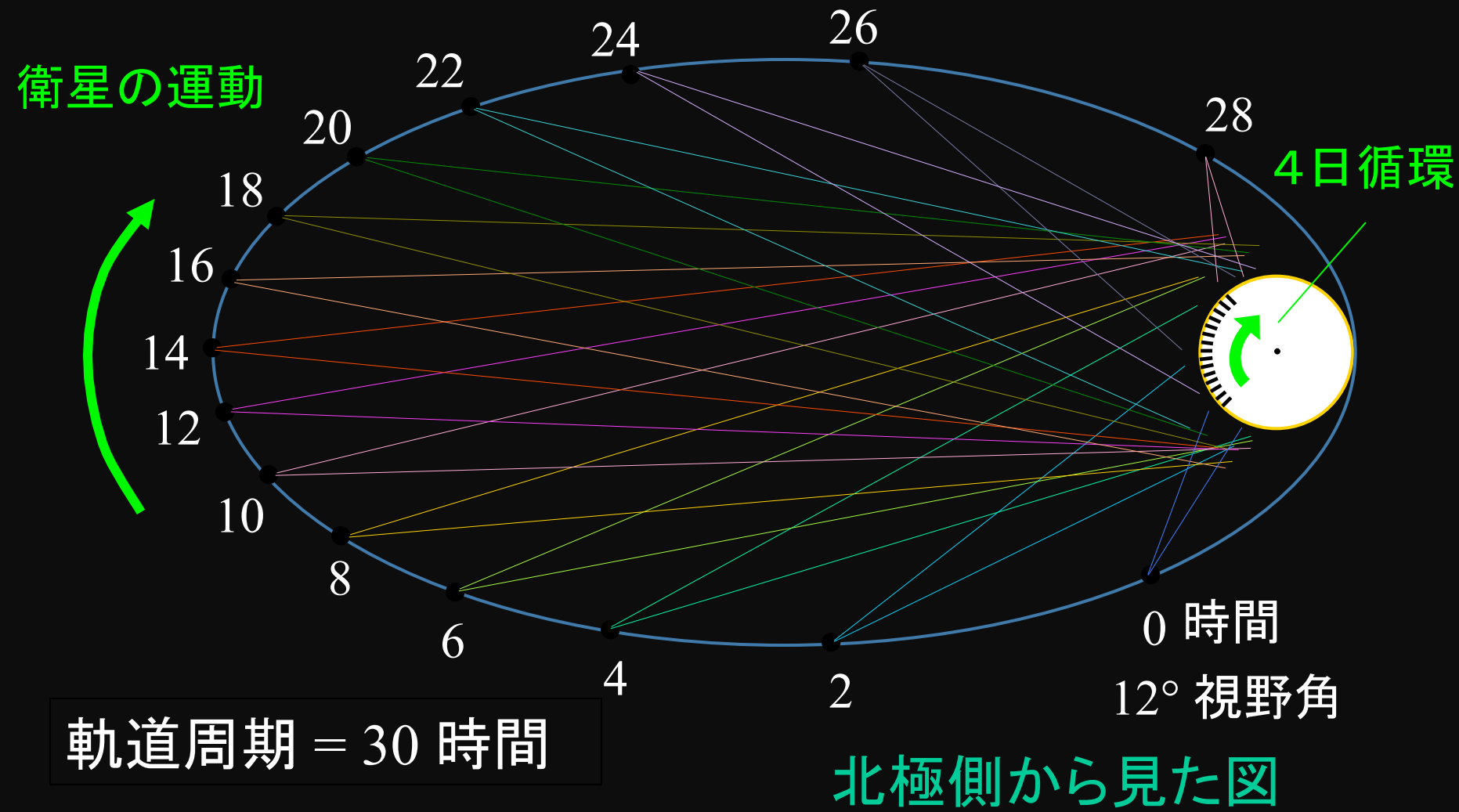
惑星気象をいかに可視化するか？

→ 雲・微量気体の連続撮像



GOES-10による地球の水蒸気画像(12時間間隔)

金星大気運動に連動した衛星軌道

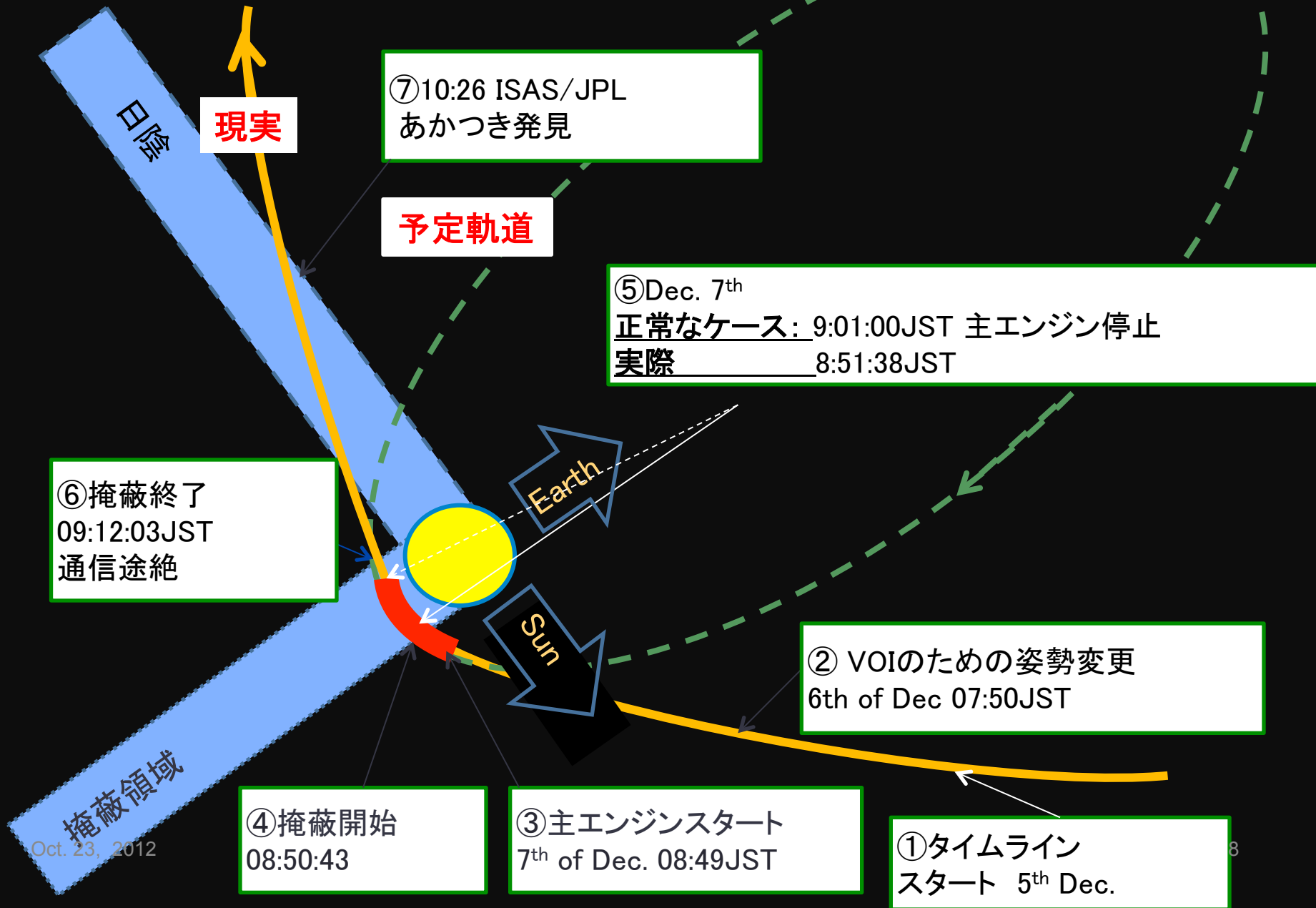


経緯

- 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た。
- 2010年12月7日金星周回軌道への軌道投入マヌーバを実施中、燃焼開始後約152秒後の大きな姿勢変動の後、約158秒後に燃焼を停止し、金星周回軌道投入に失敗した。
- 宇宙開発委員会は、あかつき金星周回軌道投入失敗の原因究明を行い、2012年2月1日、「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」を発表した。
- 報告書の中で、今回の教訓を、同じ失敗を繰り返さないよう全JAXAの知的資産とすることと併に、2015年以降の金星最接近の際の再投入に向けた期待が示された。
- 2011年9月に行った主推進エンジンの動作試験の結果、主推進エンジンはこれ以上稼働させることが出来ない事が判った。代わりに今後は姿勢制御エンジン(Reaction Control System: RCS)を軌道制御に用いる事とした。
- 2011年11月1, 10, 21日の3回に分けてこの軌道変更を行いトータルで約250m/sの軌道制御に成功し、あかつきは2015年冬に金星と会合する軌道に乗った。

- 現在「あかつき」は近日点距離 0.6AUの太陽周回軌道を飛行しており、最悪時の太陽光入射は当初想定約1.4倍である。そのため、表面熱制御材の劣化と温度上昇が心配され、地上試験と機上温度モニタの比較と評価を続けている。
- 現状、近日点付近では、推薬弁温度 70°C以上など、設計仕様を逸脱する機器が発生しているものの、動作は正常で週2回のコマンド運用と週2回のリブ口運用を順調に続けている。
- 2011年から2014年にかけて、複数の投入計画を比較検討(投入時期の選定、金星スウィングバイの実施有無など)した。
- 運用会議を通して、サイエンスコミュニティとの意思疎通を図り、観測の要望を吸い上げ、検討した軌道計画の中から総合的なリスクが小さく、観測成果が最大と判断される投入計画(2015/7下旬 軌道修正、2015/12/7 金星周回軌道投入、西回り赤道面内軌道、当初遠金点 55万km)を選んだ。
- 2015年1月20日に役員説明を行い、JAXAとして投入計画の意思決定をした。

2010年12月軌道投入時に何が起きたか？



推進系の故障

事故の状況

①燃料側逆止弁 (CV-F) の閉塞



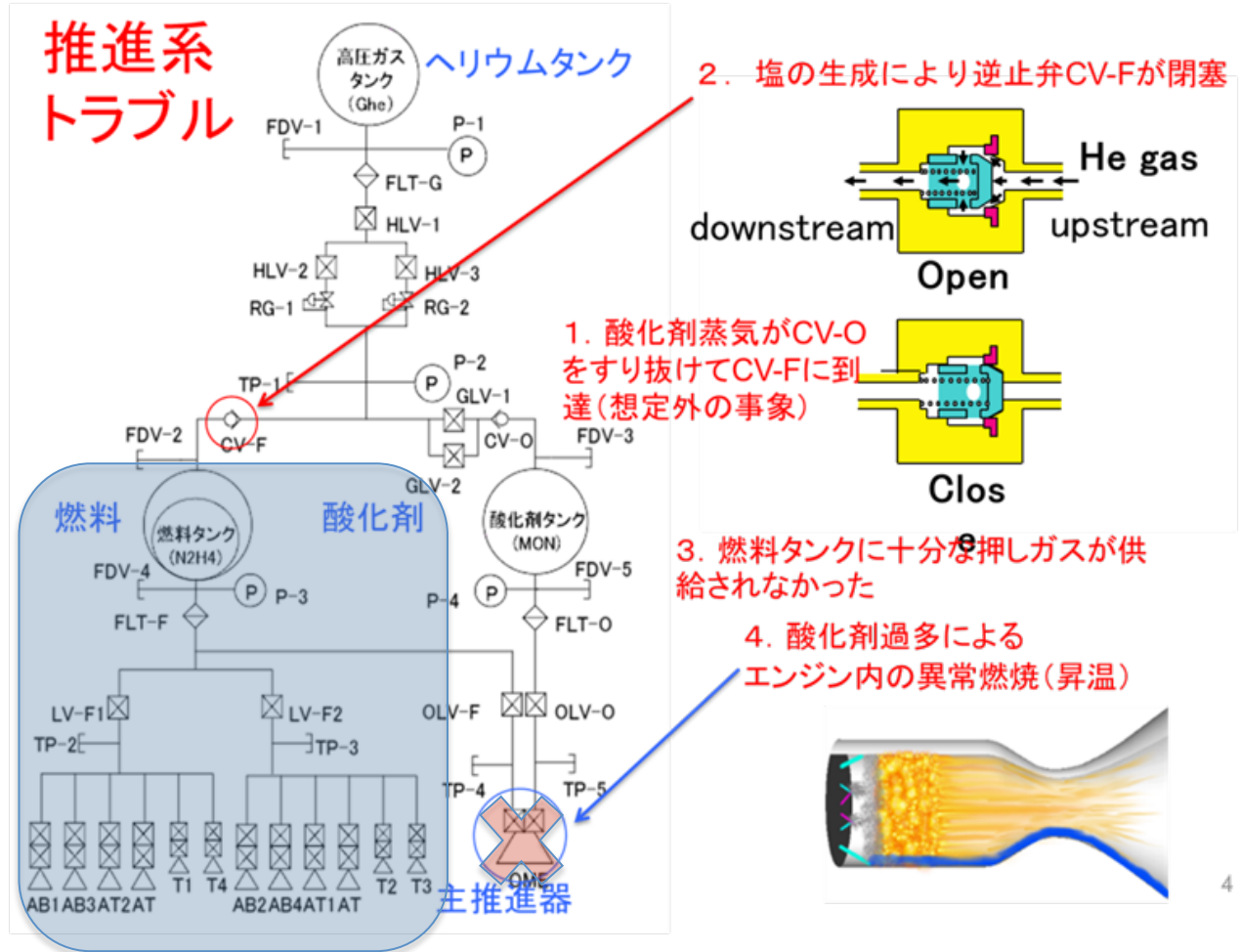
②燃料供給圧の低下により燃焼室への燃料流量が低下し、軌道制御エンジン (OME) の酸化剤/燃料混合比が設計条件を逸脱。



③OMEの温度が上がり、スラスタノズルが破損



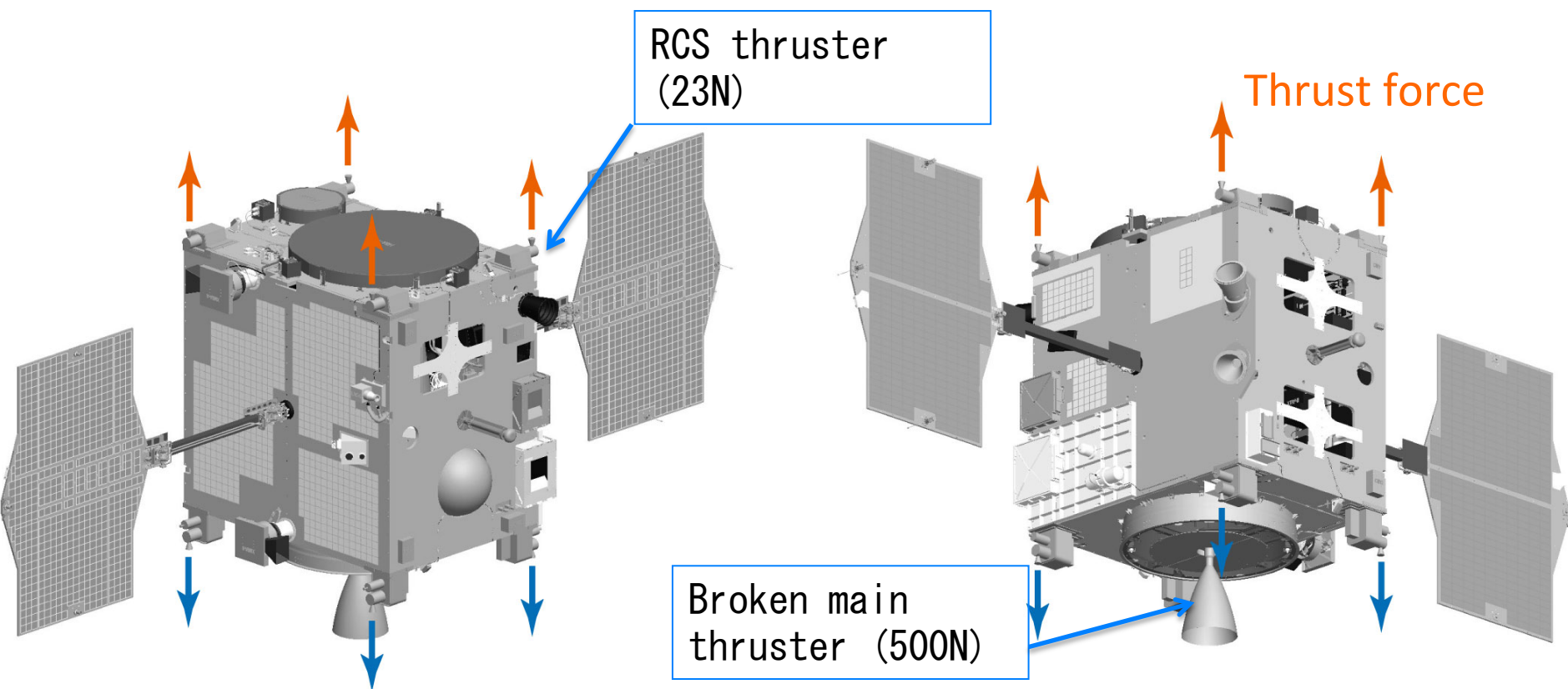
④探査機姿勢に異常が発生し自律制御によるOME燃焼停止。



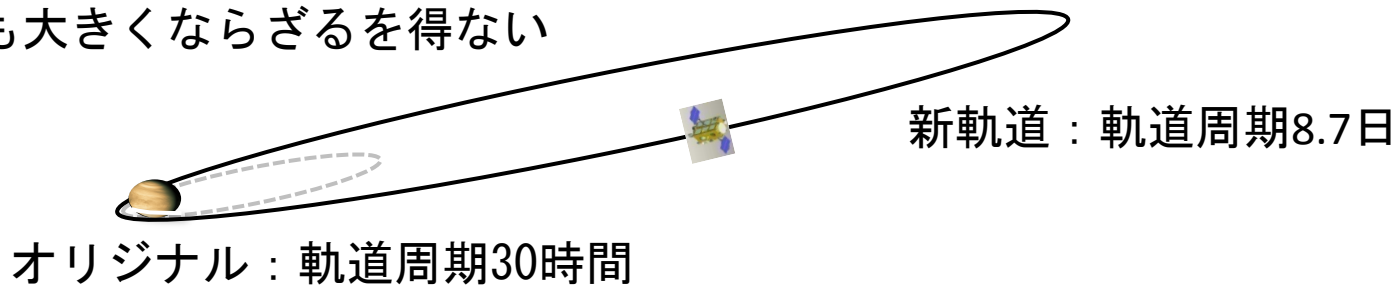
使用可能

金星探査機「あかつき」の姿勢制御エンジン

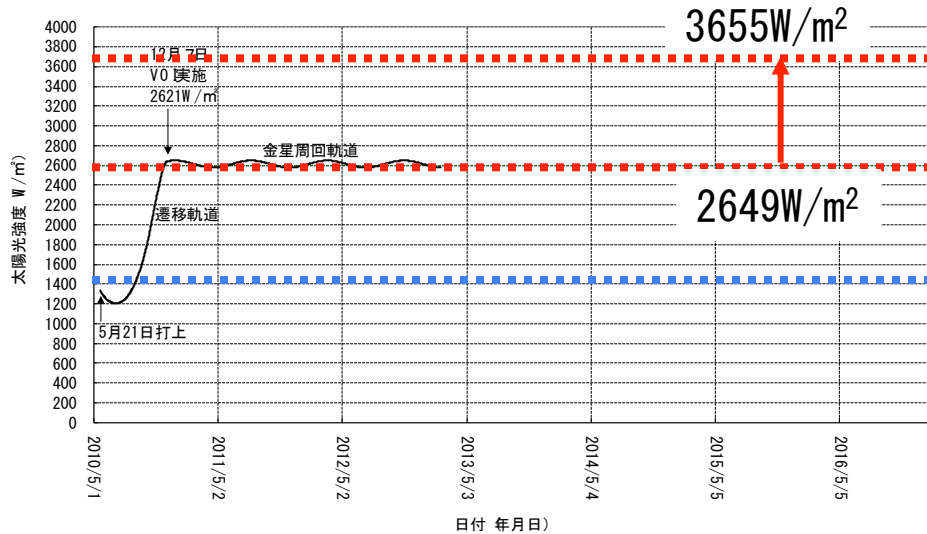
(計 8 本のうち 4 本を金星周回軌道投入時の軌道制御に使用)



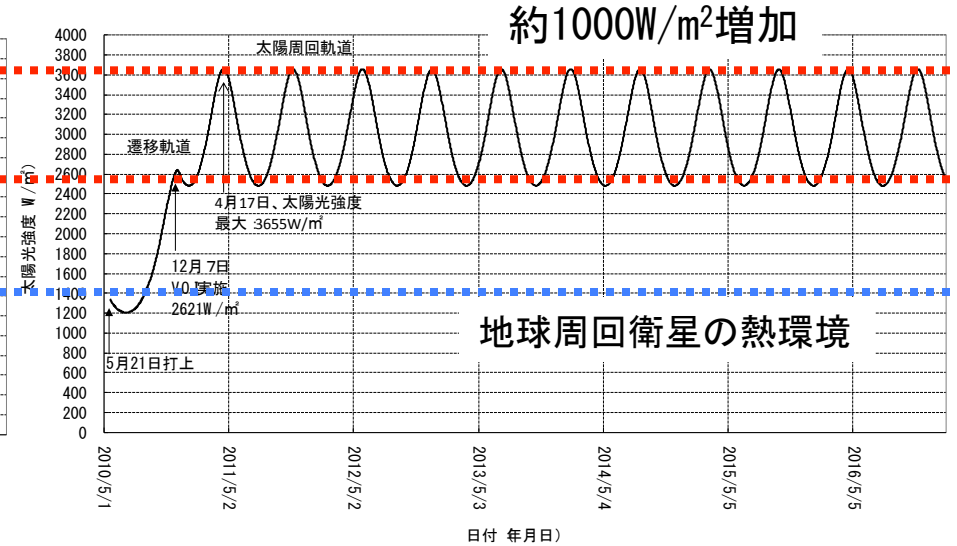
- 4つのエンジンの総力は主推進器の20%程度。このため投入軌道は当初予定よりかも大きくならざるを得ない



熱環境



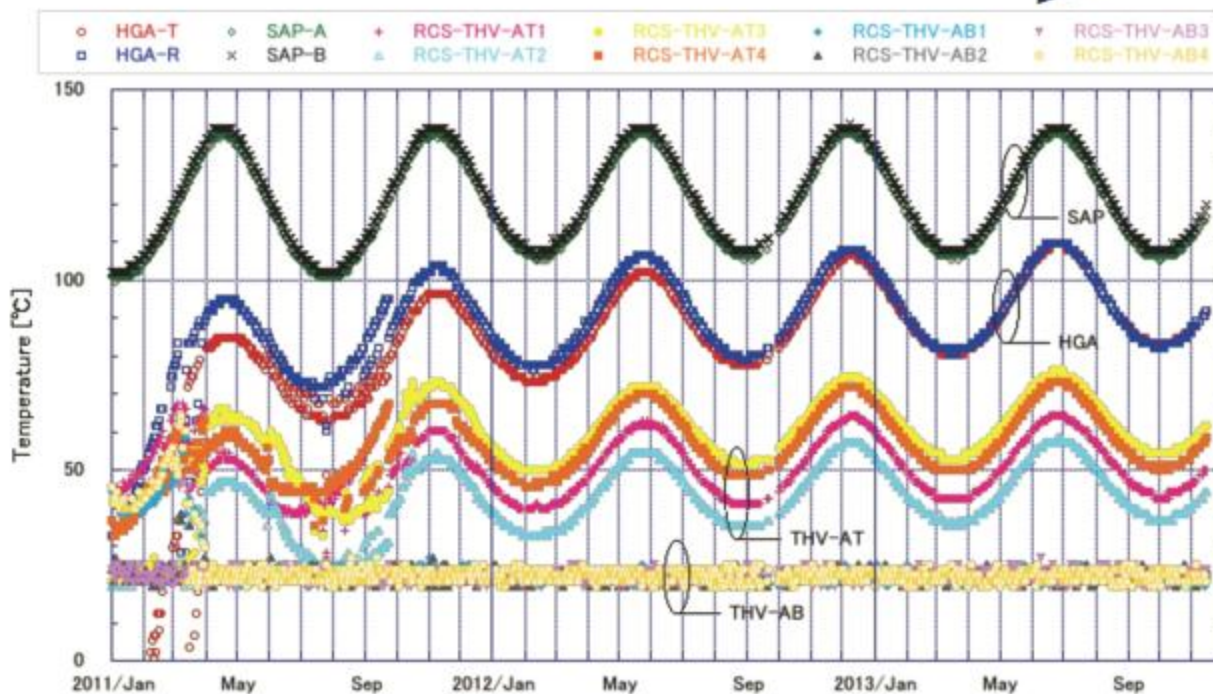
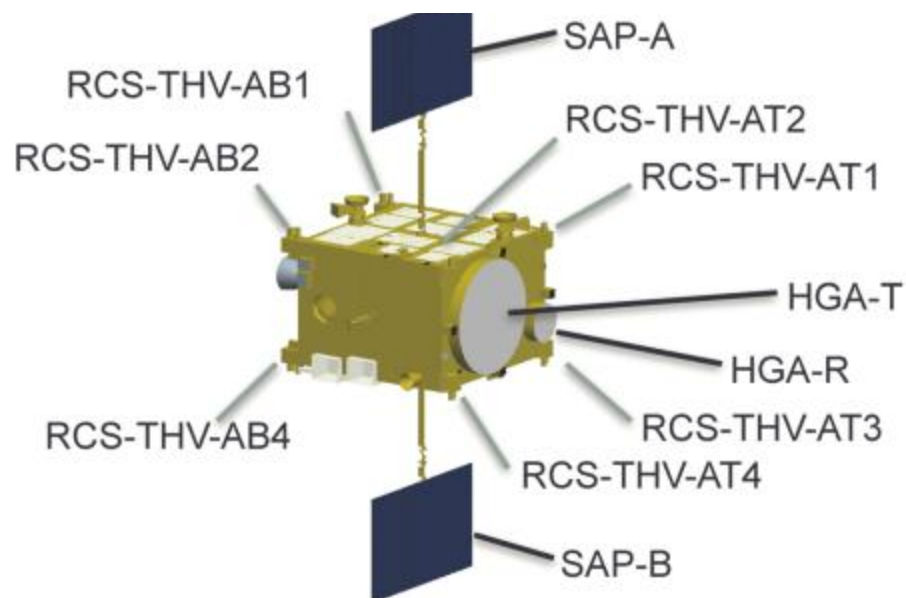
金星周回軌道上の熱環境



実際の熱環境（近日点
0.6AU）

- 地球軌道上の太陽光入力は約1,400W/m²
- 金星周回軌道上（当初予定）では、2,649W/m²
（設計時に想定した最大熱入力は2,800W/m²）
- 金星投入に失敗し、太陽周回軌道に入ったが、その軌道上で想定される最大熱入力は3,655W/m²で、金星周回軌道上の熱入力に対し、約1,000W/m²大きい

- 右図の探査機の各機器の熱環境をモニター中。
- 一部機器は設計マーヅンを超える熱入力にさらされており、油断できない状況。（例としてSAP, HGA、THV-AT等、以下のグラフ参照）温度



金星周回軌道投入の概要

1. 軌道制御用メインエンジン(OME, 推力500N)が使用できないため、姿勢変更用スラスタ(RCS, 同20N)4基を用いて軌道投入を実施する。
2. 現在具体化中の軌道投入計画では、達成可能な遠金点高度は30~40万km(周期8~10日)で、当初予定(約8万km, 周期30時間)より金星との距離が大きくなるため、解像度低下と観測頻度減少は免れない。
3. しかしながら、現状では金星大気のグローバルな運動解析を行う等のミッションサクセスクライテリアの概ねの達成は可能である見込みと考えている。

姿勢変更用スラスタの実績

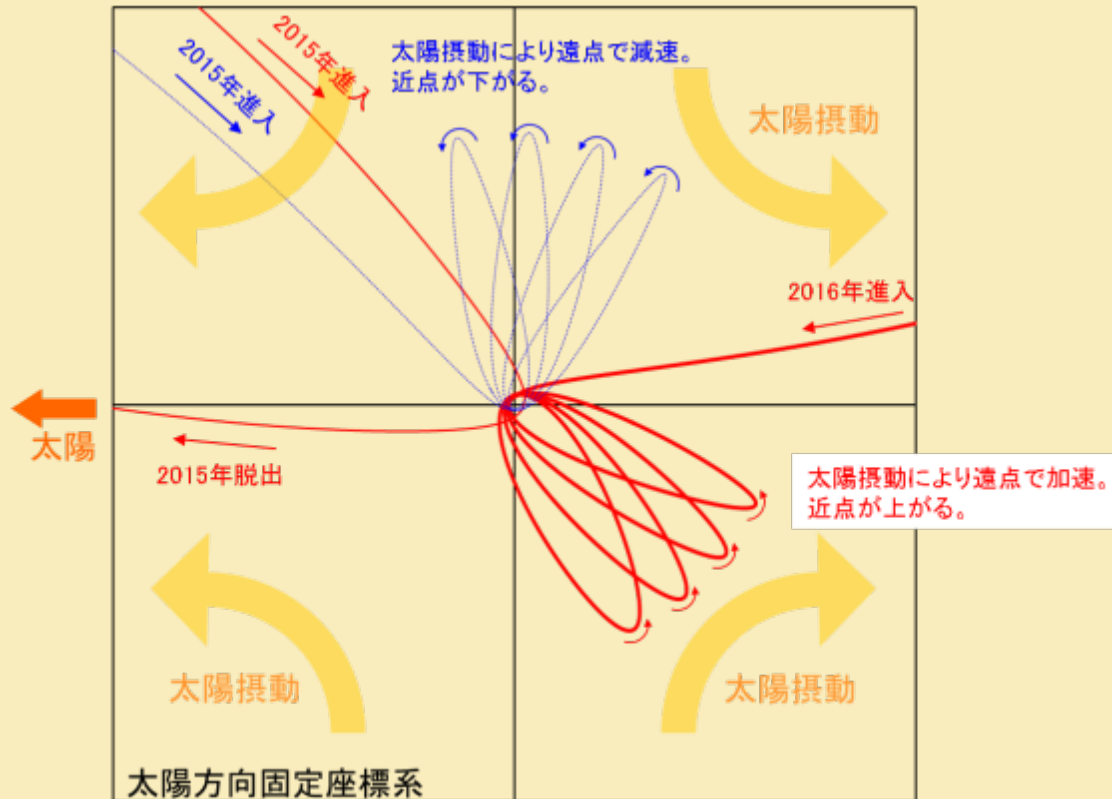
- 軌道制御用メインエンジン(OME, 推力500N)が使用できないため、姿勢変更用スラスタ(RCS, 20N)4基を使って軌道投入を実施する。
- 最大1200秒の連続噴射が必要となるが、これまでの実績の範囲内であり、リスクはない。

<RCSスラスタ 連続燃焼時間 実績>

		最大連続燃焼時間	実施日	累積燃焼時間
QT品	地上試験	6,000秒	1991.5	23,000秒
GEOTAIL	軌道上	1,577秒	1995.12.20	6,714秒
SFU	軌道上	1,324秒	1996.1.13	3,912秒
すぎく	軌道上	960秒	2005.7.20	3,403秒
ひので	軌道上	686.5秒	2006.10.1	1,713.6秒
あかつき	打上げ前	189秒	2010.4.12	2,702秒
あかつき	VOI失敗後	実施無し		

※1,000秒の連続噴射で、推薬弁等の温度は平衡状態になる

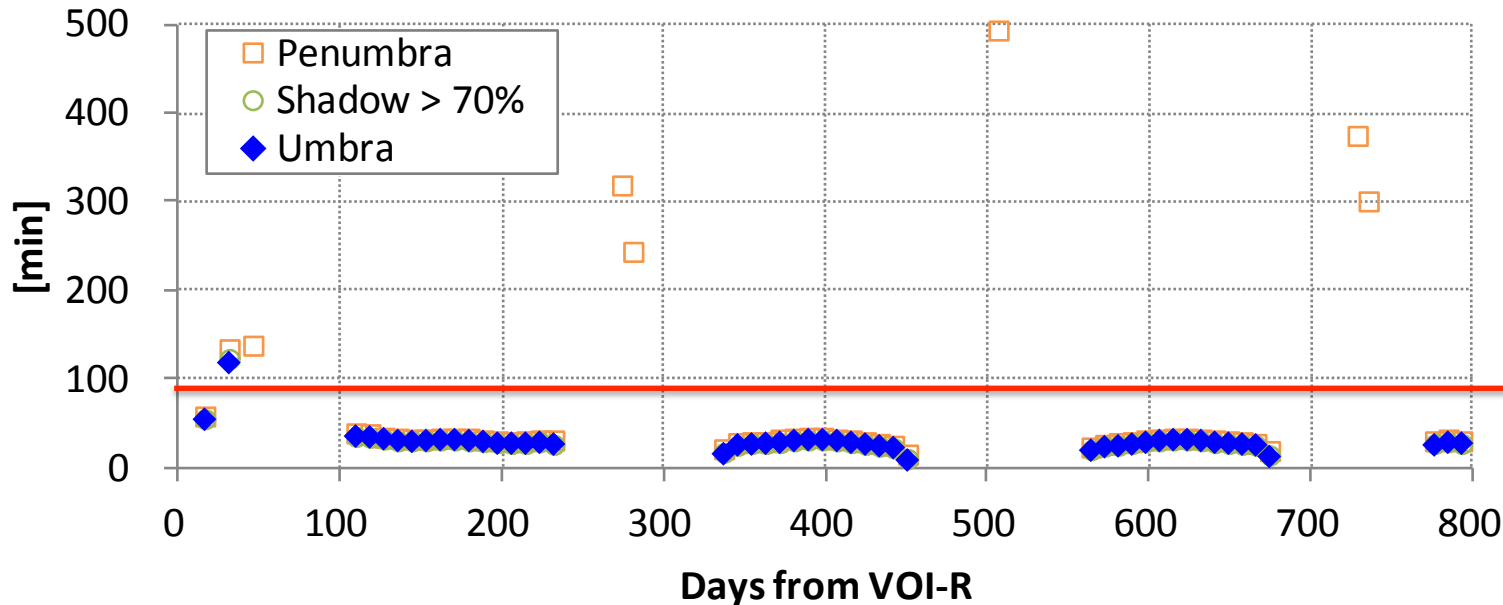
投入時の問題：太陽重力による摂動



軌道が大きくなることにより太陽重力による潮汐力が軌道に影響する。投入タイミングによってはすぐ金星に墜落する

投入後の問題：長時間日陰

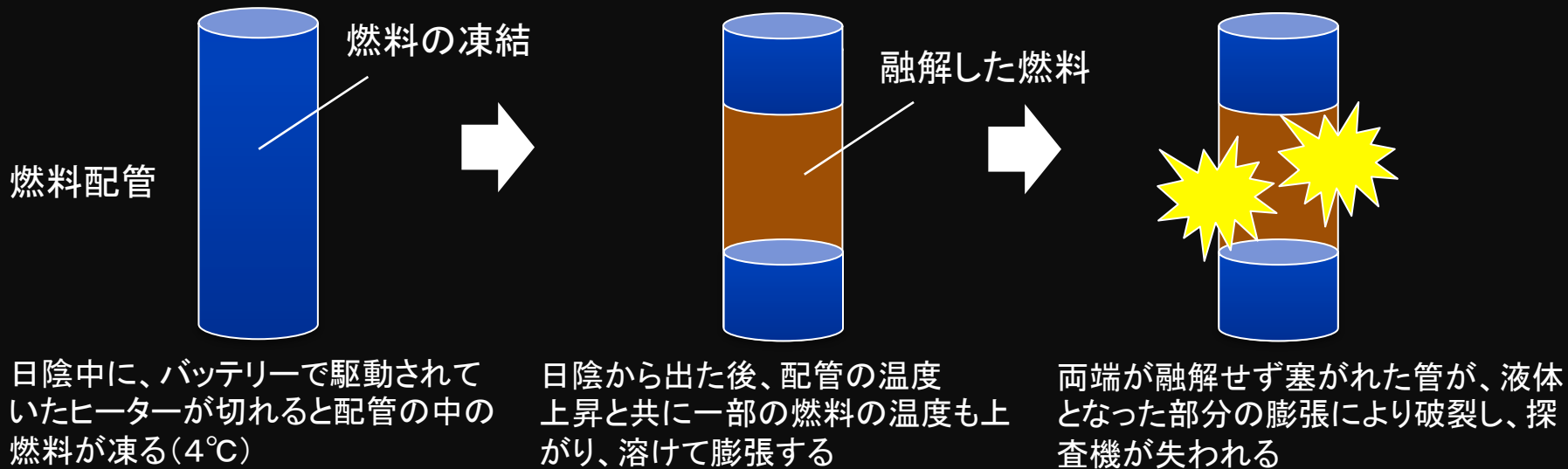
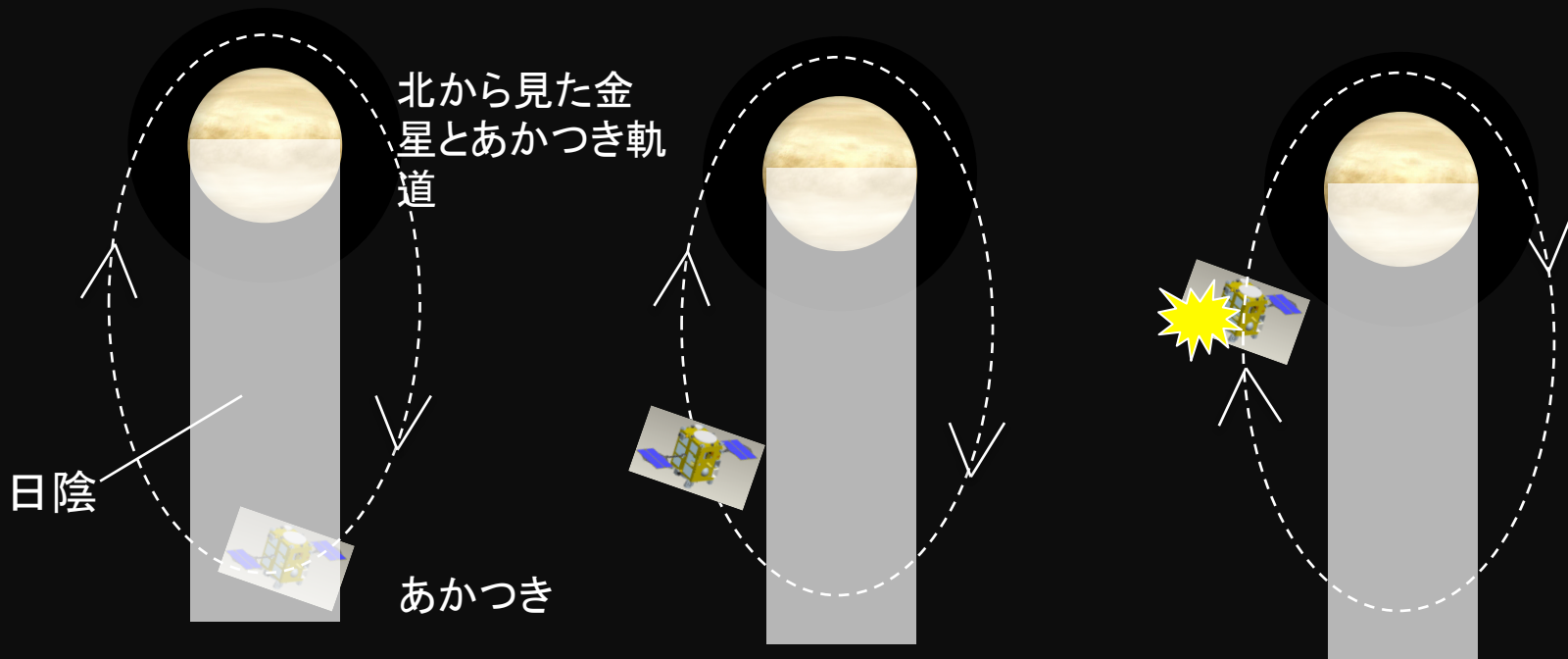
- 当初軌道計画では、最長90分の日陰を想定し、これに対応したバッテリー容量(23AH)を設定した。
- 新軌道では、軌道周期が長くなる(当初予定の30時間から現状8-10日)ため、長時間の日陰が発生しやすい。
- このため、投入後の軌道周期と軌道傾斜角を調節することにより、長時間日陰を回避する。



金星周回軌道上の日陰時間の推移 (軌道再投入から800日間)

- ・ 軌道周期調整の最適化によって、半影(Penumbra)の発生時間低減をはかる予定。

バッテリー持続時間より長い日陰が発生するときのトラブルの一例



再投入計画立案に当たって考慮した周回軌道の制約条件

	関連事項	要求	軌道設計方針	運用方針
科学要求 (観測からの要求)	遠金点高度	観測上、金星に近い(遠金点高度が低い)ほど良いが、現在の軌道制御能力から、遠金点高度は30~40万kmとなる。それ以下に下げることができない。		
	軌道面	赤道域を探索する観測の性質上、軌道面を金星公転面(~赤道面)に近づけることが望ましい	長時間の日陰を回避する必要性のため軌道傾斜角を13度程度まで許容する →25度に緩和	軌道運動に合わせ、金星カメラ視野内に連続的に金星が入るようにY軸周りに姿勢を回転
探査機運用要求(探査機の健全性を維持する為の要求)	排熱	排熱のため、放熱面(±Y面)への太陽光入射角が上下方向13度以下であること	姿勢制御の制約からY軸を軌道面垂直とする運用を前提として、軌道傾斜角を13度程度以下とする →25度でも衛星姿勢制御でカバー	軌道傾斜角(季節により変動)が最大13度以上の軌道を選んだ場合、13度を超える期間は太陽光入射を抑える探査機姿勢をとる
	消費電力 (バッテリーを消費するとヒータが使えなくなり、探査機の熱コントロールができなくなる)	日陰時消費電力がバッテリーの定格容量(23AH)を超えない事	連続日陰時間を90分(23AHを全消費)以下とする	日陰時の温度低下を緩和するべく探査機姿勢を制御し、太陽からの熱入力を積極的に利用

軌道計画案

- 下記3つの軌道投入計画を検討した。

	金星周回軌道への投入時期	金星周回軌道周回方向	金星会合前軌道制御量	軌道投入制御量
(A)	2015年11月	逆行軌道(西向き)	約2m/s	約200m/s
(B)	2015年12月	逆行軌道(西向き)	約90m/s	約200m/s
(C)	2016年6月	順行軌道(東向き)	約2m/s	約270m/s

- 昨年度まで重点的にA案を検討してきたが、高い軌道制御精度が要求される(軌道制御誤差に対する許容範囲が非常に狭い)ことが判明
- B案において前ページに示した周回軌道設計上の全ての制約条件を満たす軌道を金星周回軌道投入後の軌道周期の組合せを最適化する事で確定した。

様々なあかつき金星軌道投入シナリオ

	1st approach	2nd approach	3rd approach	Venus Circular Orbit			
				maintaining altitude	Ha [km] x 1000	Period [days]	
(1a)	VOI (approach from inside of Venus's orbit)						
				NA	—	—	
				NA	—	—	
				OK	310	8.4	
(1b)	VOI (Hohmann Transfer Method)						
				OK	420	13	
				NA	—	—	
				OK	—	—	
(1c)	VOI (Gravity Break Method)						
				OK	320	8.8	
(2a)	Swingby θ 170° r 16,000km	→ VOI					
		→ Retrograde			NA	—	—
		→ Direct			OK	310	8.4
				OK	410	13	
(2b)		→ Swingby					
		→ VOI			NA	—	—
		→ Retrograde			OK	—	—
				OK	410	13	
(3a)	Swingby θ 0° r 150,000km	→ VOI					
		→ Retr			NA	—	—
		→ Dire			OK	—	—
				OK	410	13	
(3b)		→ Swingb					
		→ VOI			NA	—	—

Summary

1. 西向き軌道 (ホーマン遷移軌道)
2. 西向き軌道 (重力ブレーキ方式)
3. 東向き軌道

VOI

Ha (x1000) [km]

1st approach

420

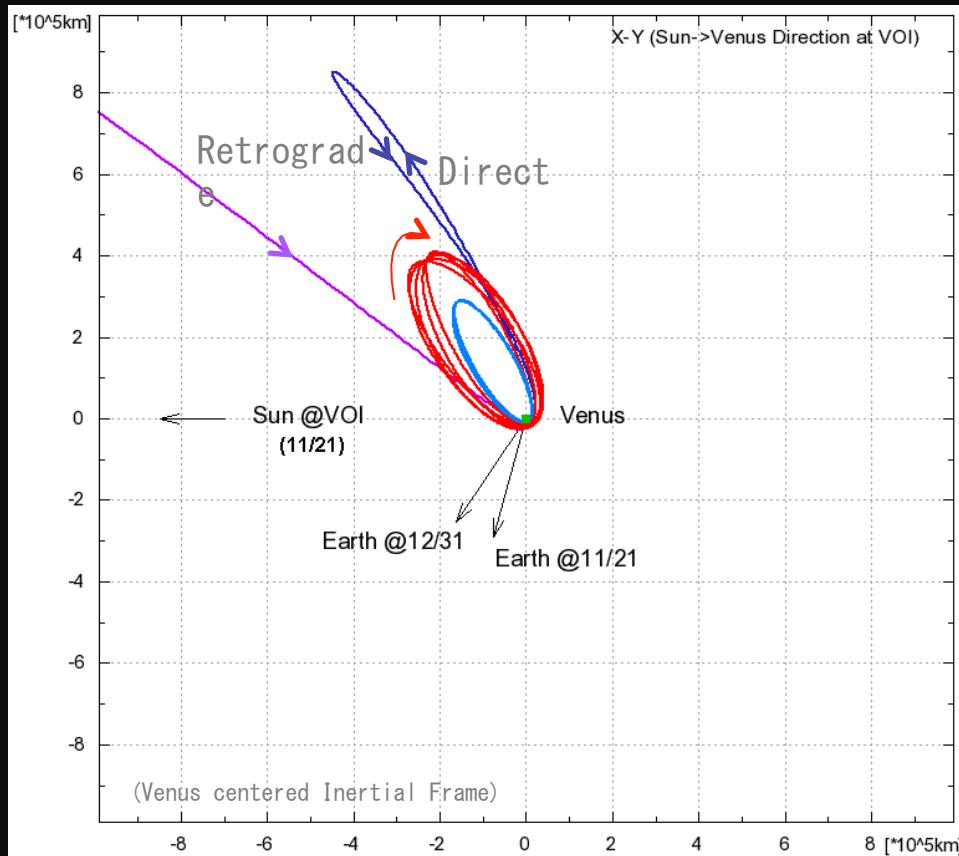
1st approach

320

2nd approach

310

A案) 西向き周回軌道に入れる為の重力ブレーキ方式



重力ブレーキによるVOI (Inertial Frame)

太陽重力の摂動を最大に利用する方式；

1. 東向き軌道 → 西向き軌道

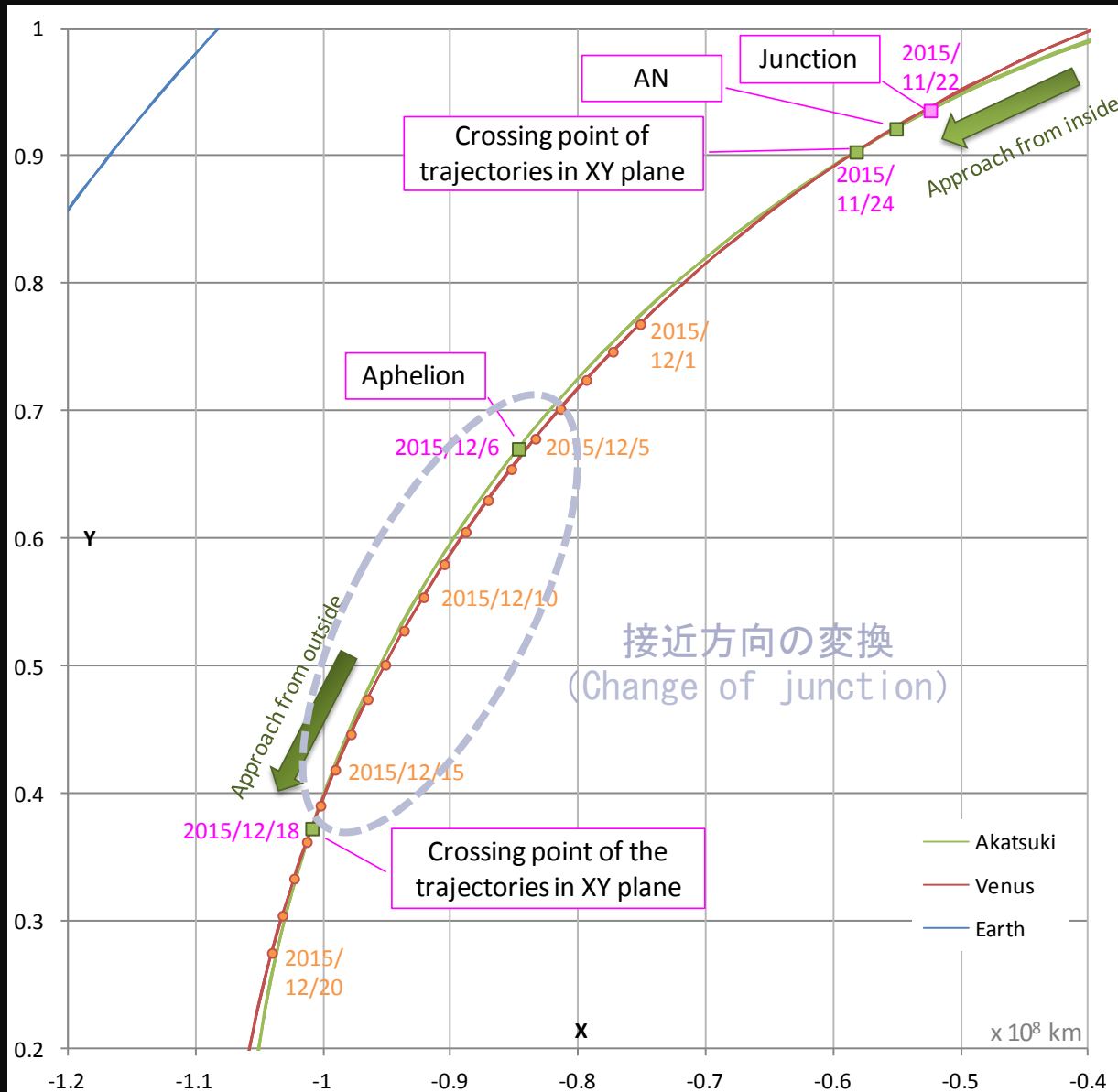
金星のヒル半径 (1,000,000km) に近い東向き軌道 (960,000km) に入れた後、太陽重力の擾乱のみを利用して西向き軌道に遷移させる。

2. 2段階の減速マヌーバー

西向き軌道に遷移した後、太陽重力の擾乱を利用した加速と減速による2段階で減速マヌーバーを実施し、遠金点高度を下げる。

※ ヒル半径: ある小さな物体 (この場合は「あかつき」) が太陽重力の摂動を受けている間に、物体が金星の近くにいながら金星を周回できる最大の軌道半径

B案) 西向き軌道に入れるためのホーマン遷移軌道



接近方向の変換

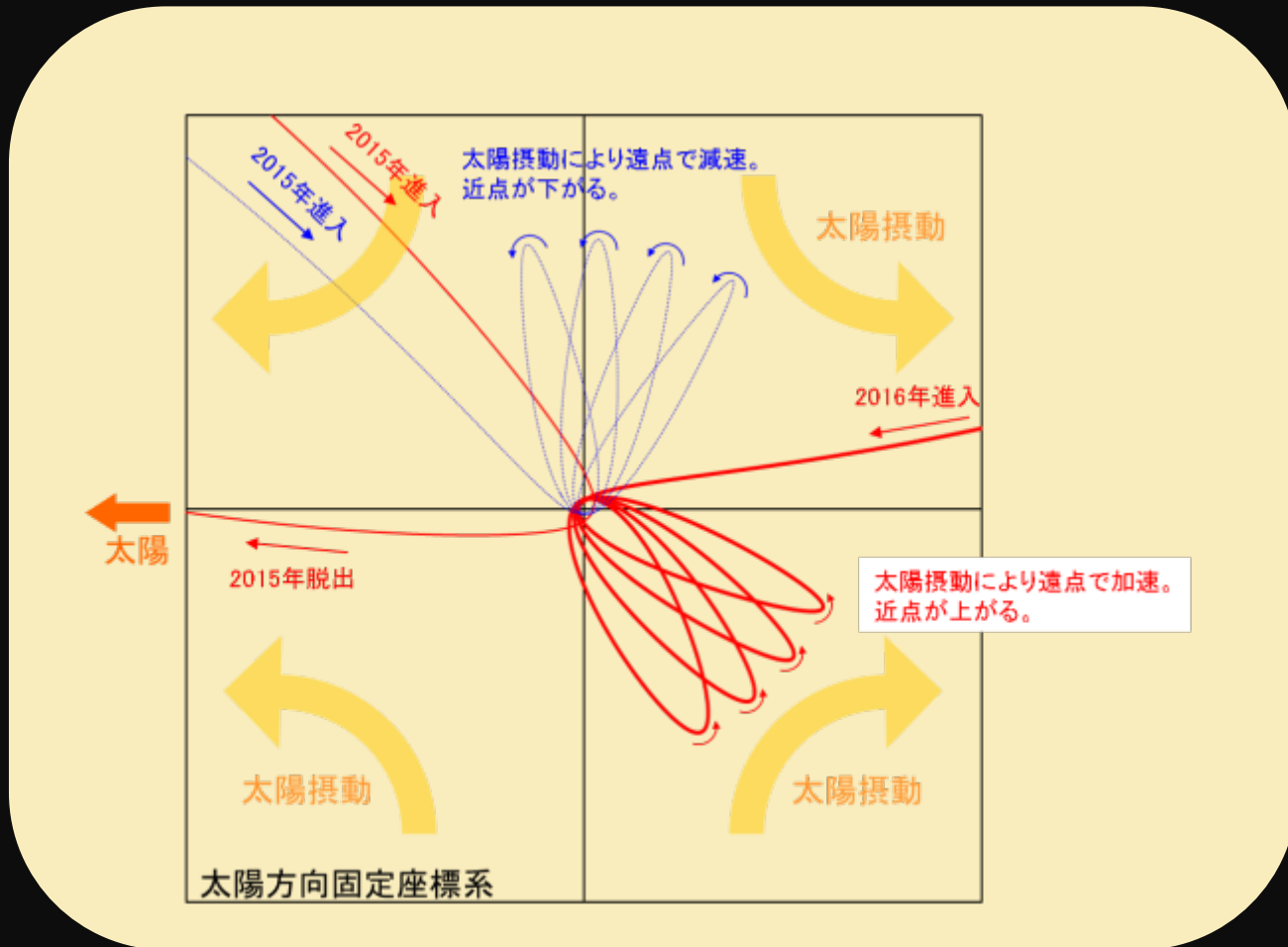
||

-Change of junction -

- 遠日点 → 低下する (in-track maneuver)
- 周期 → 短縮される (in-track maneuver)
- 昇交点 → 反時計周りに動く (cross-track maneuver)

➔ これらの変化を与えるためには、約半周回前に -85m/s のマヌーバー (約9分間の噴射) を追加することが必要。

3) 2015年スイングバイー2016年再投入



東向き軌道になる観測上の問題。さらに一年間太陽を廻る軌道に置くことのリスク（探査機寿命、放射線による劣化、熱環境の悪化など）を評価しなければならない

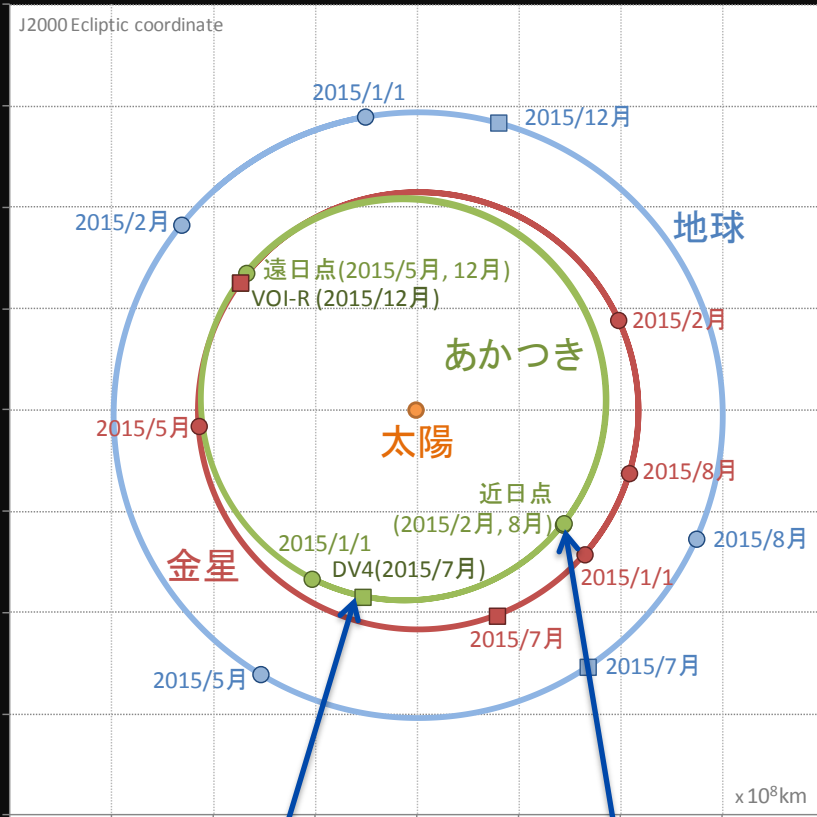
検討結果サマリー

- プロジェクトにて最適な投入シナリオを検討した結果「軌道面の設計方針」を「運用方法」によって緩和できる事が判明した。
- この為、全ての制約条件を満たす軌道投入計画としてB案が纏まった。
- (A)案は推力の誤差に敏感であり、投入時の推力2%の誤差で金星周回軌道に入れられない事がわかったので棄却する
- (C)案は(B)案のバックアッププランであったので、(B)案で軌道投入できる目処がたった以上、これ以上の検討は行わない。

イベント	T(UTC)	曜日	$\Delta V(m/s)$	遠金点
DV4	2015/07下旬(3日間)	金	89	
VOI-R1	2015/12/07	月	198	49万km
PC1	2016/03/26	土	28	32万km
PC2	2017/06/14	水	2	31万km

軌道計画

①金星周回軌道再投入準備（現在-2015/11）



軌道制御マニューバ(DV4)
2015/07E ΔV 89m/s
金星会合を11/22から12/7に変更

9回目(最後)
の近日点
2015/8

2015年12月の金星周回軌道への再投入に向けて、熱や姿勢、通信など、探査機の運用制約を加味した制御シーケンスを具体化し、課題の洗い出しと対策の立案を2014～2015年度に実施する

(1) 軌道制御(DV4)計画の立案

金星再会合の日付を2015年12月に設定するとともに、長時間の日陰が発生せず、かつ近日点高度が下がらない「最適な」金星周回軌道を達成するための軌道制御マニューバ(DV4)を2015年7月に計画している

(2) 姿勢系作業

DV4実現のための姿勢変更&制御シーケンスの策定および惑星間航行中の太陽指向姿勢や地球通信姿勢などにおける3軸姿勢制御パラメタの設定

(3) 軌道検討・運用支援作業

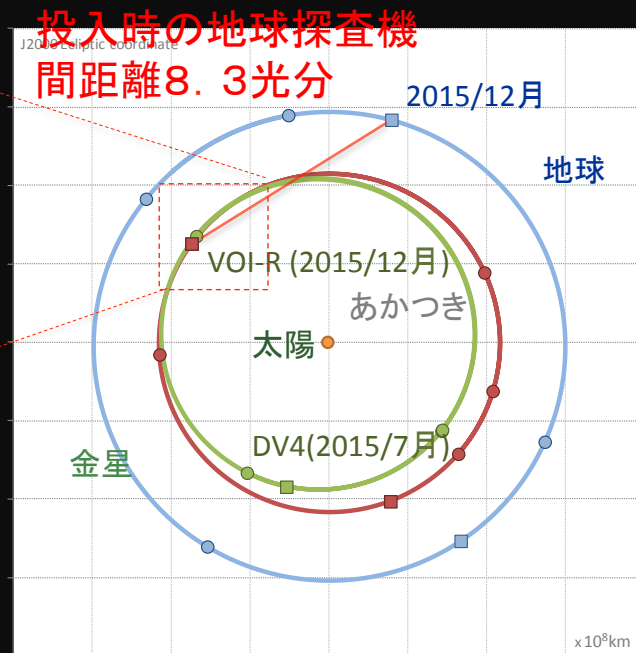
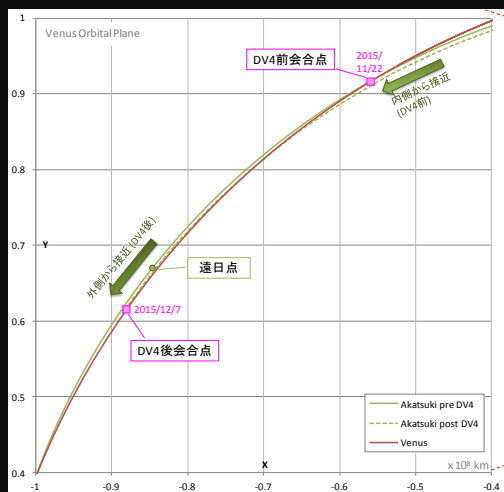
NASA DSN局との連携による精確な軌道伝搬モデルの構築、太陽周回軌道上における詳細な軌道制御方針の策定、誤差分散解析の実施、コンティンジェンシープランの立案

(4) 熱系検討

DV4姿勢や地球通信姿勢などにおける熱的成立性の検討、ヒータ電力などシステム要求の明確化

軌道計画

②金星周回軌道投入(2015/12のVOI前後2週間)



軌道投入マニューバ(VOI-R1)

2015/12/07

ΔV 198m/s 遠金点約55万km

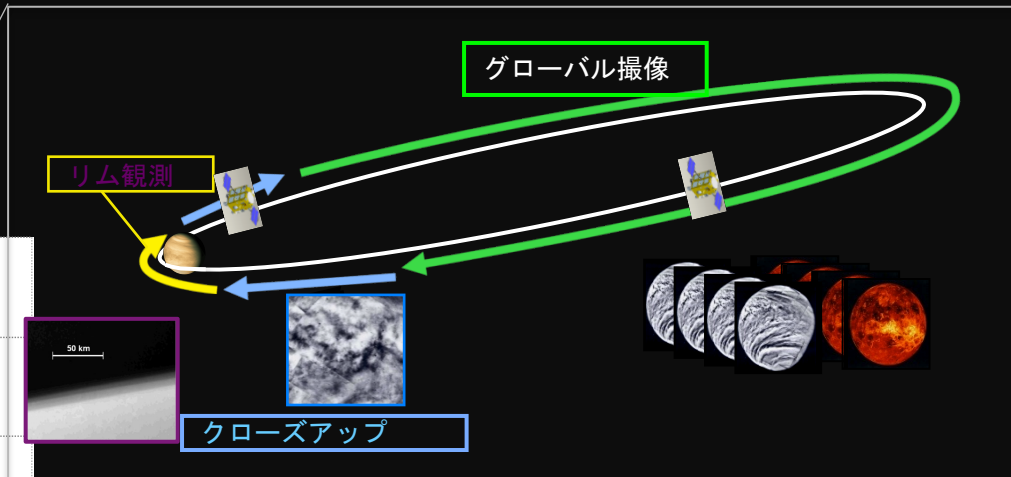
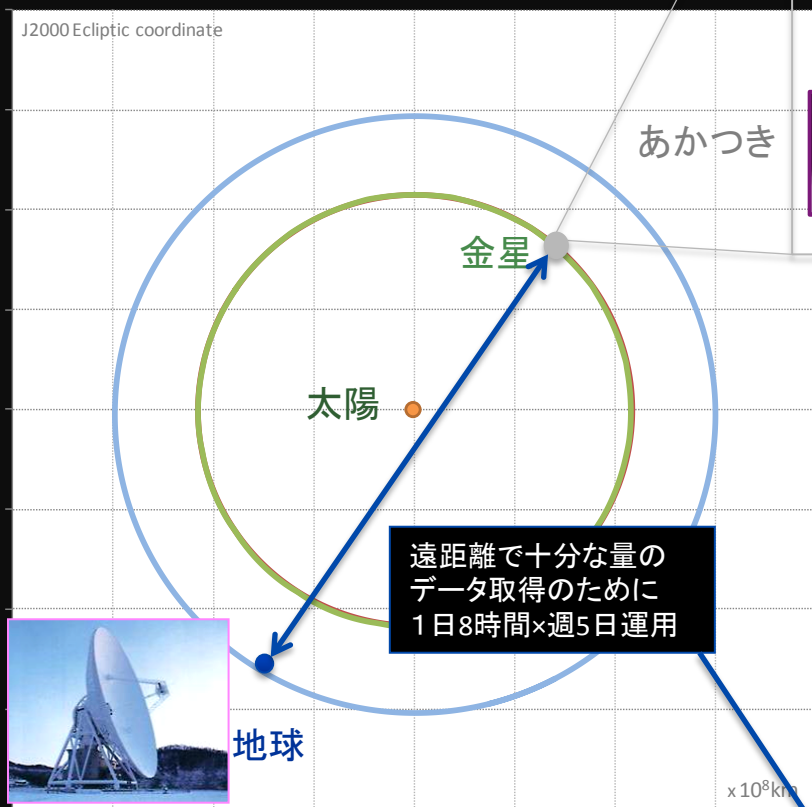
23Nスラスタ4本を使って実施

軌道投入マニューバ(VOI-R1)の確実な実現に向け、詳細なシステム/サブシステムの検討を行う

- (1) 精密な金星再会合条件を満足させるための軌道微調整(7日前、3日前、1日前)の実行と実績評価
- (2) NASA DSN局との連携による精密な軌道伝搬モデルの構築、DDORを利用した精密な軌道決定
- (3) 熱、電力、通信等のシステム制約を加味した上での、VOI-R1姿勢への姿勢変更&制御シーケンスの策定
- (4) VOI-R1時の誤差分散解析とコンティンジェンシープランの立案
- (5) 衛星運用シナリオの具体化とコマンド計画の作成
- (6) VOI-R1姿勢や地球通信姿勢などにおける熱的成立性の検討、ヒータ電力などシステム要求の明確化

軌道計画

③④チェックアウト&定常観測フェーズ (2015/12-2018/3)



遠金点付近での長時間日陰を避ける為に定常観測期間中に遠金点高度変更(=周期調整)のための ΔV を計画

PC1 : 2016/03/26 ΔV 約33m/s 遠金点 32万km
PC2 : 2017/06/14 ΔV 約2m/s 遠金点 31万km

2015/12-2016/3 初期チェックアウト

IR1,UVI,LIR 電源投入, 出力画像CHK

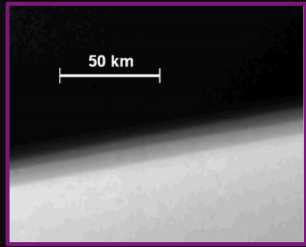
IR2 冷凍機投入、カメラ系電源投入、出力画像CHK

LAC 高圧電源投入試験、出力画像CHK

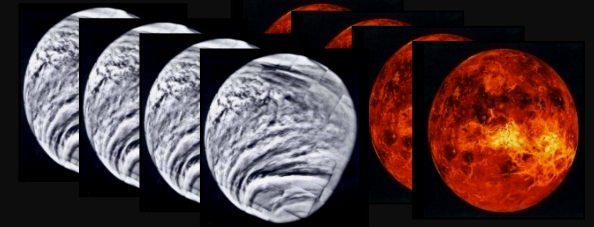
2016/4-2018/3 定常観測

複数高度での大気運動を可視化するために、少なくとも2時間おきに平均3波長で撮像する。このとき画像圧縮のうえパケット化すると1週間で200MB程度となる。これを平均的なビットレート16kbpsで1週間のうちに送るためには、1回の運用でのデータ転送時間を5時間として、週5日運用が必要。

観測計画概要



グローバル撮像：新軌道でも常に60km/pixelを越える解像度で金星をとらえる。解析結果によれば、この解像度でも主目標である雲移動ベクトル算出は可能であり、研究計画に大きな変更はない。



リム観測によりエアロゾルの層構造の変動をとらえる



旧軌道
周期30時間

新軌道
周期8-10日

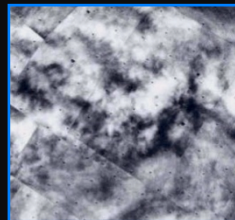


地上局へ

クローズアップ：旧軌道で予定していた微細構造の発見的な研究のためのデータをここで集中的に取得



電波掩蔽で気温・硫酸蒸気・電子密度の高度分布をとらえる



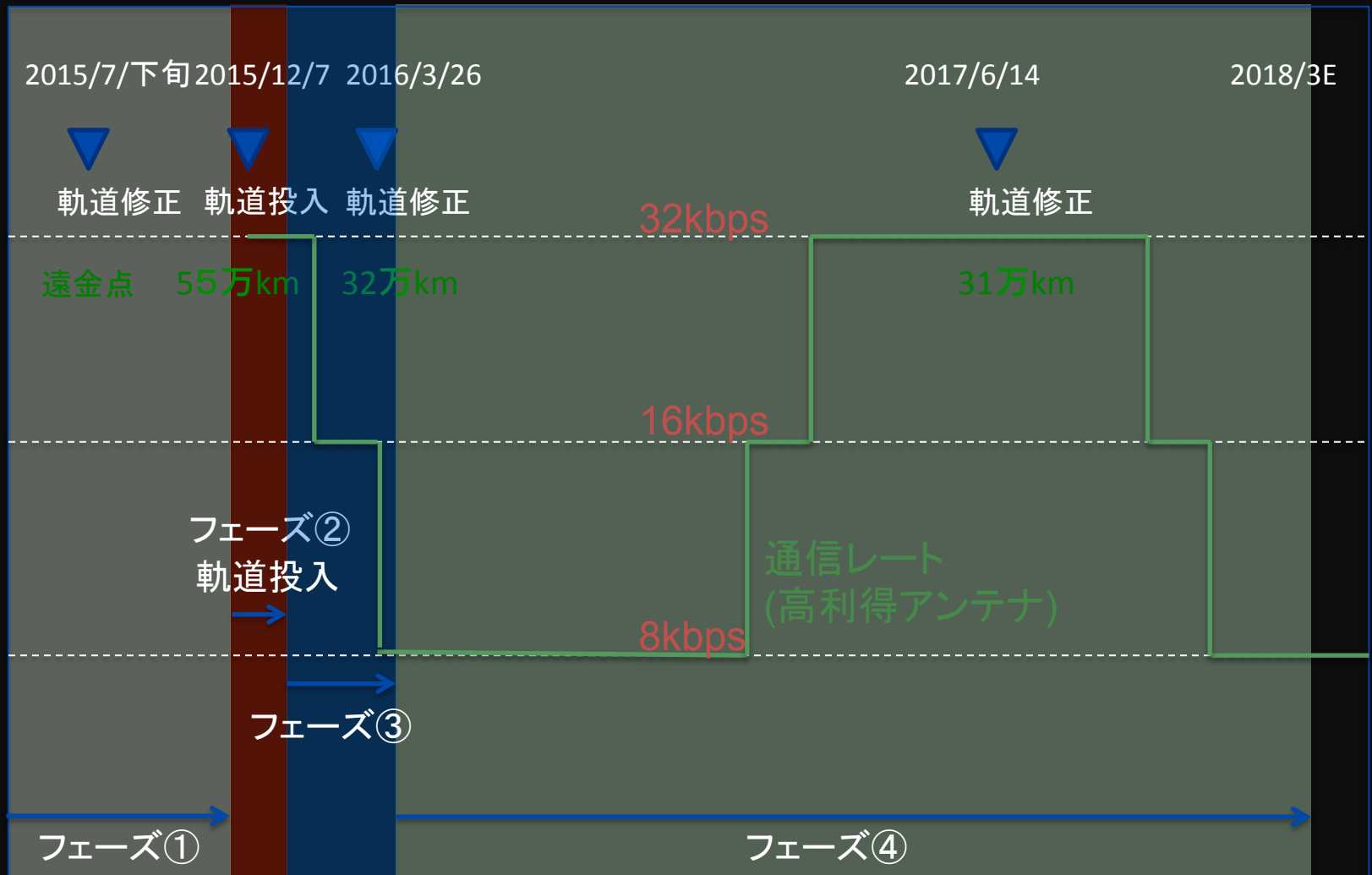
新軌道のメリット・デメリット

- 1週間連続でグローバル撮像が可能であり、またグローバル撮像が可能な期間が増えるため、大規模現象を把握しやすくなる。
- 予定していた高い解像度を軌道上の一部分でしか達成できない。
- 大気運動の精密観測のために軌道運動を大気の回転と同期させることができない。
- 電波掩蔽観測の頻度が低下する。
- 雷観測の頻度が低下する

軌道投入に成功した場合の サクセスクライテリア達成予測

		周回軌道投入成功	
		全機器正常	一部機器劣化
ミニマムサクセス	雲が東西方向に1周する1週間にわたって、金星周回軌道上からいずれかのカメラによって画像を連続的（数時間毎）に取得し、全球的な雲の構造を捉える。	○	○
フルサクセス	雲領域の大気構造が変動する時間スケールである2年間にわたって右の全ての観測を行う	○ ただし空間分解能1/5	△
	金星で雷放電が起こっているか否かを把握するために雷・大気光カメラ（LAC）を用いた観測を行う	○ ただし観測頻度1/10	×
	電波科学により金星大気の温度構造を観測する	○ ただし観測頻度1/10	×
エクストラサクセス	右のいずれかを達成する	○	△
	1μmカメラ（IR1）により金星の地表面物性あるいは火山活動に関するデータを得る	○	×
	2μmカメラ（IR2）により地球軌道より内側での黄道光の分布を観測する	×	※0

スケジュールサマリー



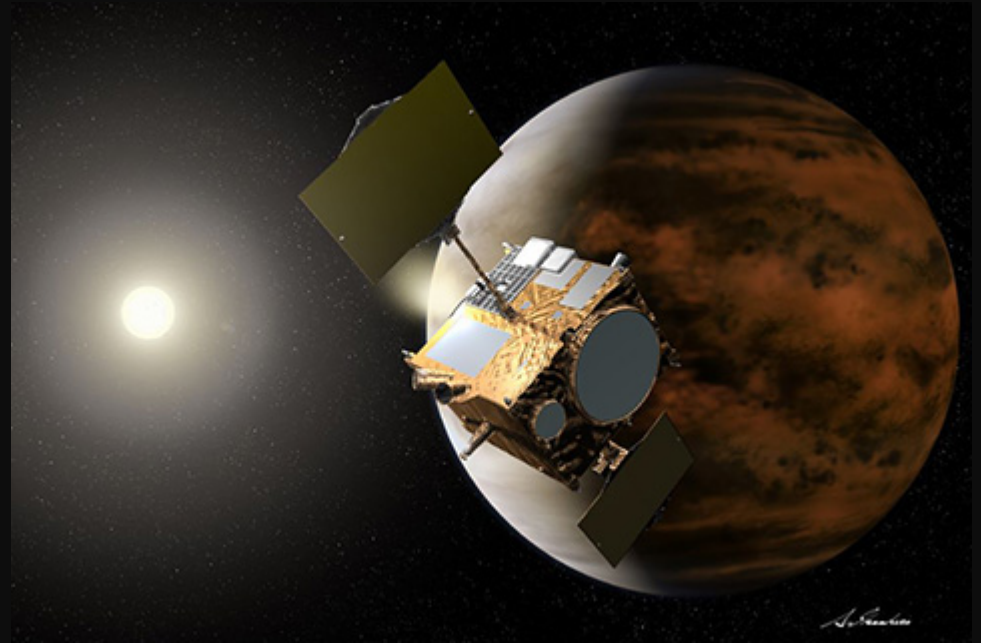
フェーズ①軌道投入準備、フェーズ
フェーズ③初期チェックアウト、フェーズ

②軌道投入、
④定常観測

さらなる検討

- 現状の計画では姿勢制御のための燃料が800g足りない
 - DV4の最適化
 - アンローディング量の節約
 - 12/7の最接近高度を下げる
- VOI-Rは日陰で始まり日照で終わる
 - 電圧変動の影響について調べる
- VOI-Rの途中で噴射が途絶えたときのリカバリープラン
 - 2-3分で判断しなければならない
 - リカバリー姿勢にデフォルトで持って行く
- VOI-Rの前後でカメラを動かすか？
 - 姿勢と機器の温度と運用の危険性を天秤
- 見落としは無いか。。。

まとめ



- ミッションの目的：金星の大気の運動をグローバルに観測し、大気循環メカニズムを解明する
- 2015年12月7日に再度金星周回軌道へ投入を試みる
- 観測装置が期待通りに動き、地球との高速通信回線が機能すれば、金星気象に新たな知見を得る
- これにより、地球を含む汎惑星気象学を構築する礎となる