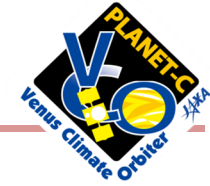


# 目次

---



1. 金星探査機「あかつき」(PLANET-C)の開発経緯
2. 「あかつき」の概要
3. サクセスクライテリア
4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等
5. プロジェクト終了審査判定結果
6. まとめ

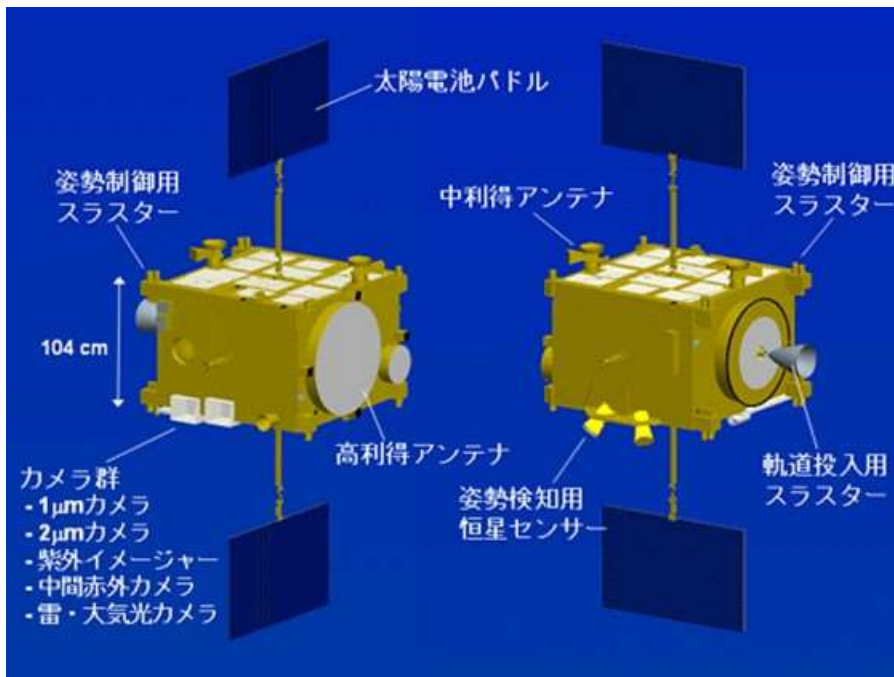
参考資料

# 1. 金星探査機「あかつき」 (PLANET-C) の開発経緯



- 金星探査機「あかつき」 (PLANET-C) は、第24号科学衛星として、金星大気の力学構造の解明を目的に2001年に宇宙科学研究所で開発が承認され2004年からJAXAのプロジェクトとして開発が開始された。
- 当初想定した打ち上げビークルはM-Vであったが、M-Vが8号機にて終結した事によりH2Aで打ち上げられることとなった。
- 6年にわたる開発終了後、打ち上げは2010年5月であり、2010年12月には金星に到達し金星周回軌道投入を試みたが、主エンジンの破壊により続くページに示すように、再び太陽を廻る軌道に入った。
- 新たな太陽周回軌道では近日点での熱入力が金星で想定されていた値の三割増しであり、探査機の各部の温度が想定以上の高温環境に晒された。探査機姿勢を工夫するなどして9回の近日点通過を耐え、探査機は2015年12月に再び金星に接近した。
- 主エンジンが破壊されていたため、軌道制御に姿勢制御用スラスタを用いて、金星周回軌道に進入した。2010年当時は遠金点8万km (軌道周期30時間) を目指していたが、非力な姿勢制御用スラスタで減速したため遠金点は約40万kmとなり、軌道周期も約10.5日となった
- 新たな軌道で観測計画を練り直し、当初の目的である金星大気力学構造解明に挑み、2年間の定常運用でその解明に目処を付けた。この後3年間の延長運用を行い、定量的にさらに精度の高い観測データを取得しようとしている。

## 2. 「あかつき」の概要



### 「あかつき」主要諸元

形状・寸法	2翼式太陽電池パドルを有する箱形 (1.04m × 1.45m × 1.40m)
予定軌道	金星周回楕円軌道 近金点高度: 300km 遠金点高度: 約8万km 軌道周期: 30時間 軌道傾斜角: 172度
ミッション期間	金星到着後 約2地球年
質量	約500kg (打ち上げ時)
発生電力	金星軌道にて約500W (ミッション終了時)

「あかつき」に採用された新技術



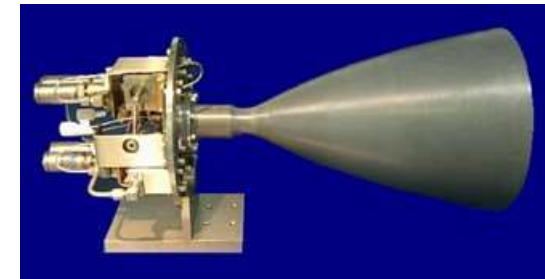
再生測距式トランスポンダ



リチウムイオン電池

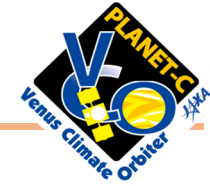


RLSA式平面高利得アンテナ



セラミックスラスタ

## 2. 「あかつき」の概要（続き）



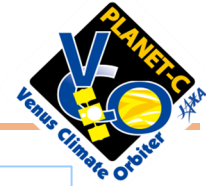
### あかつきの目的、科学的意義

「あかつき」が挑む金星は、地球とほぼ同じ大きさの惑星で「地球の兄弟星」といわれている。しかし、その表層環境は2つの星で大きく異なっている。地球の100倍近い地表圧力をもつ大気は、そのほとんどが二酸化炭素であり、それがもたらす強い温室効果は、地表を460°Cという高温にしている。

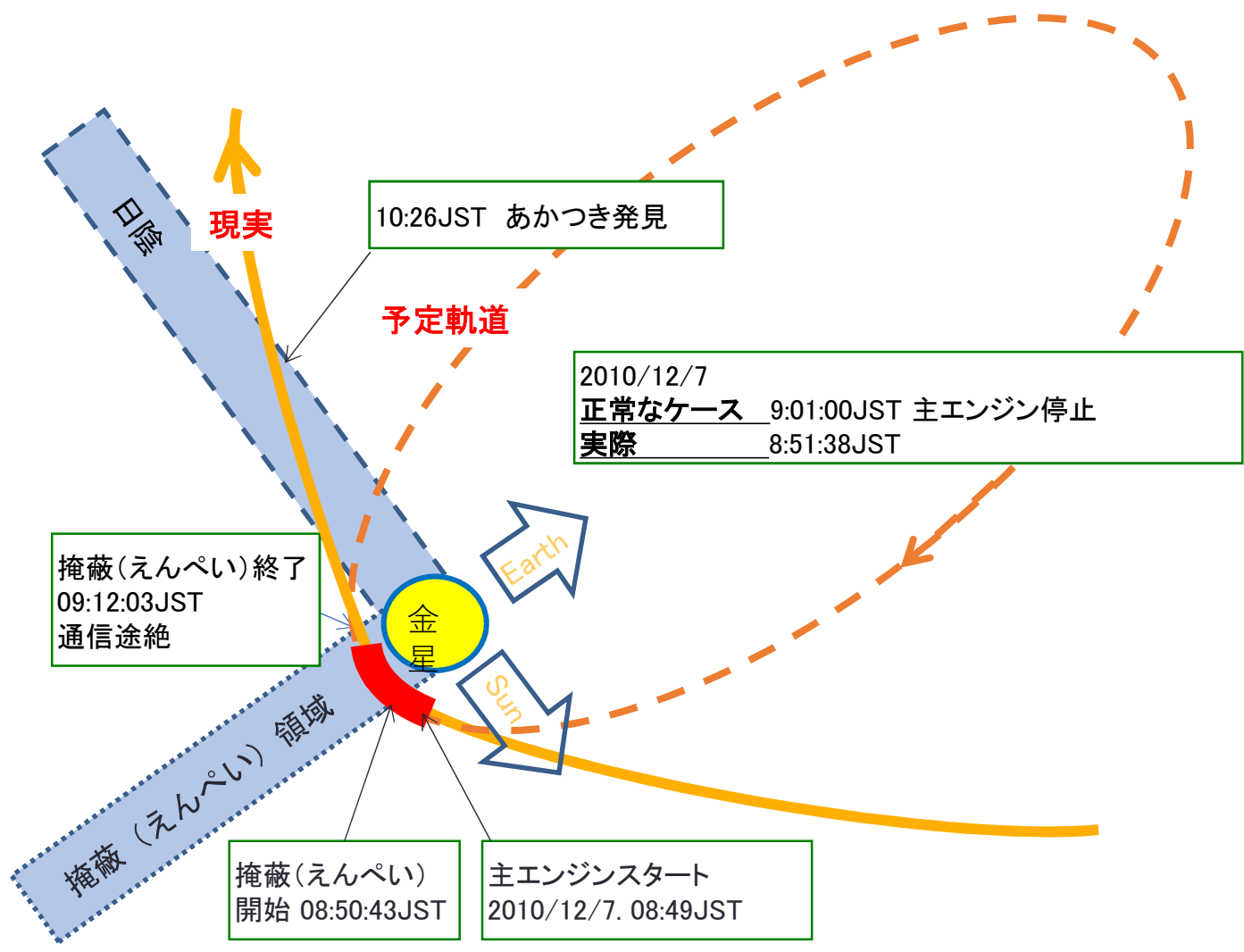
また50-60km上空では秒速100mにも達する「スーパーローテーション」と呼ばれる暴風が吹き荒れるが、その加速や風の維持されるメカニズムはいまだ明らかになっていなかった。金星大気がはらむ様々な謎の中でも、特にこの「スーパーローテーション」の発生メカニズムに代表される金星の大気力学構造を解き明かすべく日本の「あかつき」計画が策定された。

「あかつき」は6台の観測機器を駆使して金星の気象を詳細に観測するミッションで、その結果、金星だけでなくさまざまな惑星に共通する気象の理解、ひいては地球の大気がなぜ今私たちが知るような姿をしているのか、また将来どうなっていくのかについての理解が進むことが期待される。

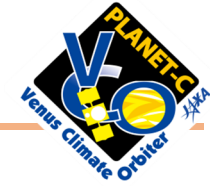
## 2. 「あかつき」の概要 (続き)



# 2010年12月7日 金星周回軌道への投入失敗

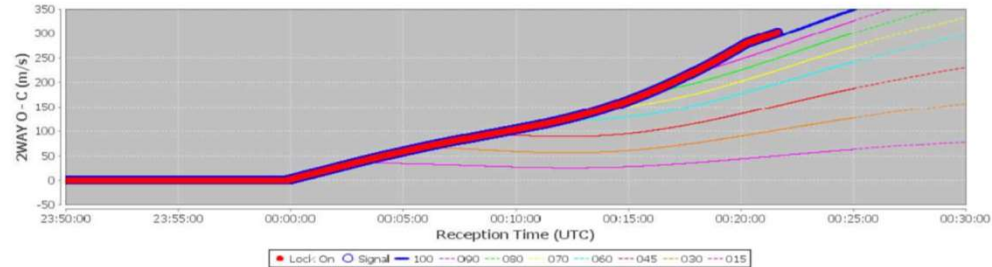


## 2. 「あかつき」の概要 (続き)

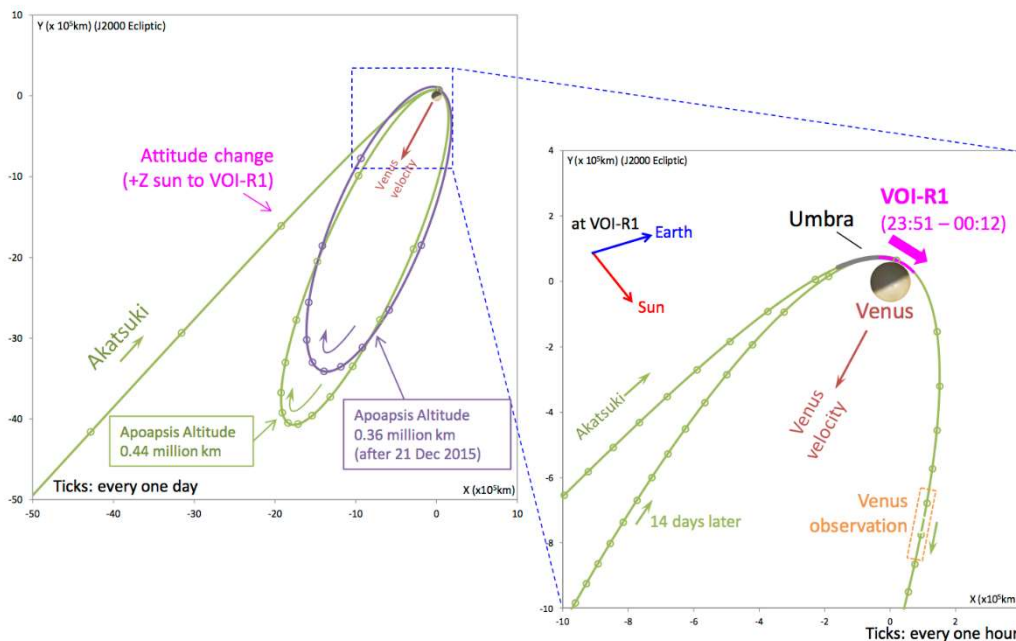


# 2015/12/7 周回軌道投入成功

当日のドップラーモニター



VOI-R1 Geometry (Venus center)



オペレーションの結果  
 遠金点44万km  
 (予定は49万km)

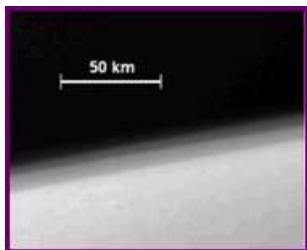
12/20 軌道修正の結果  
 遠金点は36万km  
 周期10.5日



## 2. 「あかつき」の概要 (続き)



### 新軌道における観測運用計画



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

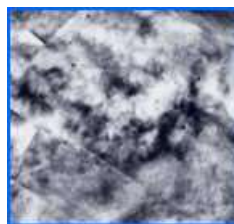
リム観測：  
エアロゾルの層構造の変動を捉える

地上局へ



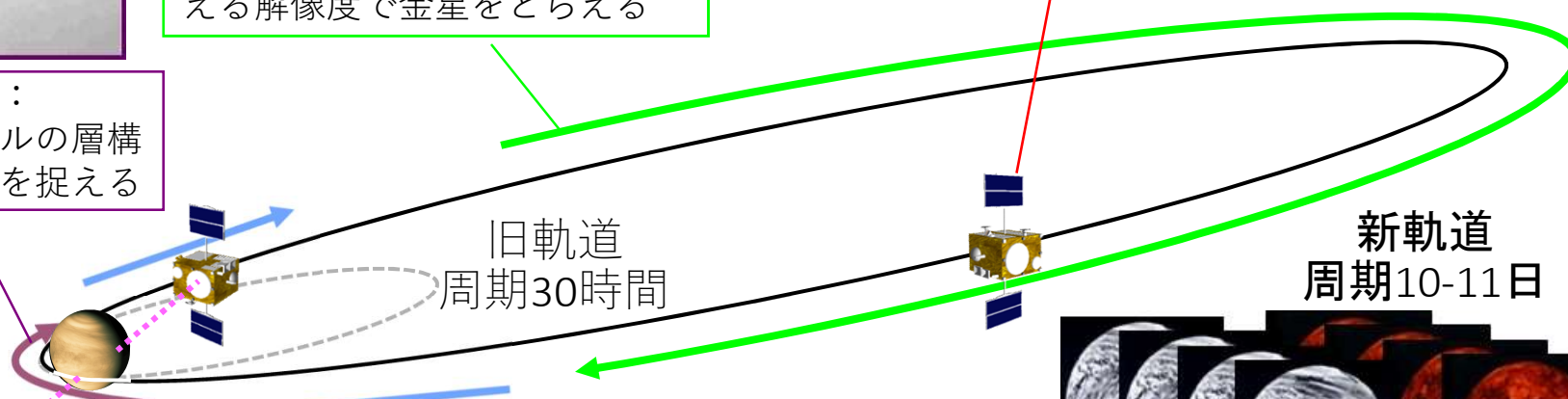
電波掩蔽で気温・硫酸蒸気・電子密度の高度分布をとらえる

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研究のためのデータをここで集中的に取得



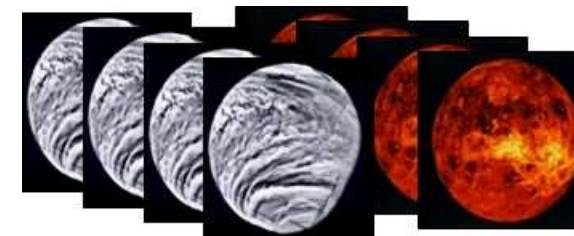
<仮想面垂直制御方式>

探査機Y軸 (= SAP回転軸) に角運動量ベクトルを一致させ、さらに、この軸を太陽-地球-金星を含む面 (仮想面) に垂直にすれば、Y軸回りの回転のみによって金星観測と地球通信を行うことが可能となる



旧軌道  
周期30時間

新軌道  
周期10-11日



連続的に低緯度領域を観測し、大気の動きを把握する。  
欧州宇宙機関の金星探査機ビーナス・エクスプレスは大気の成分観測が主目的であったため、極軌道を選択した。

### 3. サクセスクライテリア

サクセスレベル	サクセスクライテリア	軌道周期11日の新軌道に対応した再表現 (当初計画は軌道周期30時間)	達成状況 (再表現にて整理) ※延長運用のクライテリアを導くため	延長運用 サクセスクライテリア
		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。	金星周回の新軌道の特徴を踏まえ、雲が東西方向に1周することに対応して、1週間にわたって、金星周回の新軌道上から、次の観測を行う。  (新1) いずれかのカメラによって画像を連続的(2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、次のすべての観測を行う。	雲領域の大気構造が変動する時間スケールである2地球年(3.2金星年)にわたって、金星周回の新軌道上から、次のすべての科学成果を得る。		定常運用2年に加えて延長運用3年(ともに地球年)の観測データ蓄積を図り、次のすべての科学成果を得る。
		(新0)当初想定4.6倍の遠金点(37万km)からの撮影に応じた空間分解能の低下を補う手法を創出する。また、新軌道の特徴を踏まえた観測対象を見出す。	(新0)分解能低下を補う雲追跡手法を開発し、風速場データ等の取得に成功。 →達成 新軌道がとらえやすい金星地面に同期した現象として、LIRで巨大な弓状構造(定在重力波)を発見。 →達成	(延0)あかつきが発見した定在重力波について、昼夜/午前午後の変化や安定性を定量的に示す。



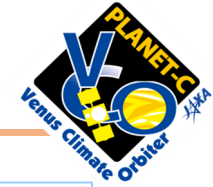
### 3. サクセスクライテリア（続き）

サクセス レベル	サクセス クライテリア	軌道周期11日の新軌道に対応した 再表現 (当初計画は軌道周期30時間)	達成状況（再表現にて整理）  ※延長運用のクライテリアを 導くため	延長運用 サクセスクライテリア
		フル サクセ ス	(1) IR1, IR2, UVI, LIRによって金星の画像を連続的（数時間毎）に取得し、3次元的な大気運動を明らかにする。	(新1) IR1, IR2, UVI, LIRによって金星の画像を連続的（2時間毎）に取得し、スーパーローテーション(SR)および子午面循環等の3次元的な大気運動を明らかにする。
	(2) 金星で雷放電が起こっているか否かを把握するためにLACを用いた観測を行う。	(新2) LACでの観測（頻度：最大0.1回/日）により、金星での雷放電の有無を実確認する。	(新2) 新軌道に対応した目標頻度の観測に成功した。 → <b>達成</b> (従来学説による1発雷あたり時間の45%まで観測蓄積)	(延2) LAC観測を継続し、金星での雷放電の有無を実確認する（従来学説による1発雷あたり時間の90%まで観測蓄積）
	(3) 電波科学により金星大気の温度構造を観測する。	(新3) 電波掩蔽手法により、金星大気の温度構造データや硫酸蒸気分布データを取得し（頻度は観測シーズンに約11日毎、回数19回/2年）、大気運動や雲生成との比較を可能とする。	(新3) 新軌道に対応した目標頻度の観測に成功した。 → <b>達成</b>	(延3) 電波掩蔽観測を継続し、撮像データと組合せ、温度構造と大気運動との関係を調べたり、鉛直伝搬する波に関するデータを得るなどして、(延1-3)を達成する。

### 3. サクセスクライテリア（続き）

サクセス レベル	サクセス クライテリア	軌道周期11日の新軌道に対応した 再表現 (当初計画は軌道周期30時間)	達成状況（再表現にて整理）  ※延長運用のクライテリアを 導くため	延長運用 サクセスクライテリア
		エクストラ サクセス	次のいずれかを達成する。 (4) 太陽活動度の変化に伴う大気構造の変化を捉えるために、4地球年を超えて金星周回観測を行う。 (5) 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。 (6) 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。	次のいずれかを達成する。  (新4) 同左：4地球年を超えて金星周回観測を行い、太陽活動度の変化に伴う大気構造の変化を捉える。  (新5) 同左：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。  (新6) IR2により地球軌道より内側での黄道光の分布を観測し、内部太陽系のダスト分布に関する情報を得る。

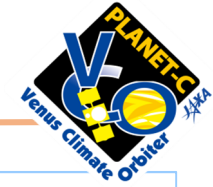
## 4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等



### 2010年12月における最初の金星周回軌道投入失敗の探査機に対する影響

- 2010年12月7日の金星周回軌道への投入失敗により探査機は当初の計画と異なる状況に置かれ、受けた影響は特に以下の二点が大きなものであるが、いずれも探査機運用の工夫によって大きな問題を生ずること無く2015年からの金星観測を成功裏に行う事が出来た。
  1. 太陽を周回する軌道に入り、近日点付近で過大な太陽熱入力を受けたため、一部の熱制御材の劣化が進行したが、熱入力に対する耐性が最も高い姿勢を工夫することで、5年に渡りすべての機器で、温度上限を超えることなく、正常状態を維持することができた。
  2. 2015年12月7日に金星周回軌道への投入に成功したが、当初計画より大きな楕円軌道となったため、飛翔前に検討されていた「軌道面垂直制御方式」というシンプルな姿勢制御方法に代え、「仮想面垂直制御方式」を導入、近金点付近における観測を充実させるなど、観測運用計画等を全面的に見直し、大気運動に関する遠方（全球）と近傍（微細）における多彩な画像データを取得している。

## 4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等（続き）



### 2010年12月における最初の金星周回軌道投入失敗により金星観測開始が2015年まで遅れたことによる目標達成への影響

- (1) 最大の影響は、周回軌道が当初予定（遠金点距離約8万km, 30時間周期）よりも大きな長楕円（遠金点距離約37万km, 11日周期）となったことによるデメリットであり、金星から遠ざかる分、カメラ群の撮像における空間分解能が低下する。また、軌道周期が長いことから、LACによる雷観測、RSIによる電波掩蔽観測の頻度も下がる。プロジェクトでは大気運動研究の要である「雲追跡」手法を改良し、距離約37万kmからの撮像データでもスーパーローテーションのメカニズム解明に使える風速場測定を実現している。雷観測、電波掩蔽観測は「衛星を長生きさせる」ことでリカバーは可能と考えている。これにより周回軌道が変わったことによるデメリットは限定的と考えている。
- (2) 上記のデメリットがある一方、この長楕円軌道では金星の固体地面に同期した現象（LIRが発見した巨大な弓状構造など）をとらえやすいというメリットもあり、十分に価値の高い科学データと成果を創出することができる。
- (3) 2016年12月にIR-AEが機能喪失（そのため、IR1, IR2の科学観測を休止）したことは、金星軌道投入が遅れたことによるハードウェア寿命であるかも知れない。その他の機器にも劣化があるはずであるが、金星画像データを見ても劣化は見られず、高品質のデータを創出できている。
- (4) ESAのVenus Express (VEx)は、2006年4月から2014年5月まで金星周回軌道から観測データを送ってきた。しかし、VExは金星を南北にまわる極周回軌道をとっていたため、赤道や中低緯度の大気運動を連続観測するのには向いていない。そのため「VExに先んじられた＝あかつきの成果とならなかった」ことは、大気運動に関する限りほとんどない。その証拠にあかつきは、地形（低緯度の高地）に由来する巨大な重力波構造の発見や、中下部雲層における赤道ジェットの見発見といった重要な科学成果を挙げることができている。
- (5) 2010年12月の周回軌道投入失敗の後、太陽周回をしている間の2011年6月、電波観測装置を用いて太陽コロナの掩蔽観測を実施した。プラズマ密度の変動から音波の分布と太陽風速度を導出し、コロナ加熱と太陽風加速のメカニズムの手がかりを得ることができた。金星軌道投入時期の遅れを単なる時間の無駄に終わらせない科学成果を挙げている。

以上を纏めると、金星軌観測道投入時期が遅れたことによる目標達成への影響は限定的であると言える。

## 4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等（続き）



開発フェーズ、軌道投入の失敗と再挑戦、それに伴う計画変更からの教訓、想定外の成果、その中での人材育成

得られた成果・経験等	科学成果	技術マネジメント経験
開発フェーズに付随したもの	N/A	<p><b>【若手技術職員の設計理解の重要性】</b> 開発初期から、入社3年目程度までの若手職員を中心メンバに含め、飛行条件(宇宙環境)と探査機設計との関連やその物理的背景を丁寧に指導しつつ技術検討を進めたことで、その後の失敗対応にも貢献し得る人材を育成できた。</p> <p><b>【内惑星探査機としての技術検討の充実】</b> 太陽に近い設計条件に対して、熱、電源、通信、姿勢制御、推進など、主要なサブシステムすべてで技術課題が顕在化し、その対策を設計段階で十分に検討していたことが、その後の失敗対応に活かされた。</p>
最初の軌道投入失敗に付随したもの	<p><b>【太陽周回機会を活用した観測での成果】</b> 太陽周回をしている間の2011年6月、電波観測装置を用いて太陽コロナの掩蔽観測を実施した。プラズマ密度の変動から音波の分布と太陽風速度を導出し、コロナ加熱と太陽風加速のメカニズム検討に資するデータを得ることができた。</p>	<p><b>【探査機開発時の技術者の再結集による課題対応】</b> 当初計画とは全く異なる飛行条件が発生したため、軌道計画を中心に姿勢制御、推進、熱、電源、通信などのサブシステム担当者を再結集し、不具合原因の究明のみならず、探査機生存の技術検討を精力的に実施した。</p> <p><b>【設計想定を超える環境に対するシステム検討の経験】</b> 太陽にさらに近くなり、想定の1.5倍近い太陽光照射を受ける飛行条件となったため、設計時の想定を大幅に超える厳しい環境に対するシステム検討を結果的に経験できた。 この検討から、探査機への影響を最小限とするような運用上の工夫と、それを裏付ける地上試験の結果とを組み合わせ、(金星軌道投入までの)5年間の想定外飛行でも探査機を生き延びさせることが出来た。</p>



## 4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等（続き）



開発フェーズ、軌道投入の失敗と再挑戦、それに伴う計画変更からの教訓、想定外の成果、その中での人材育成

得られた成果・経験等	科学成果	技術マネジメント経験
軌道再投入の挑戦 に付随したもの	N/A	<p><b>【多くの制約のもとでの軌道投入運用の構築経験】</b> 再投入の軌道計画検討のみならず、この運用に関するあらゆるリスク評価や、それを踏まえたコンティンジェンシー運用計画の立案まで、軌道投入に関する網羅的な技術検討をあらためて経験することが出来た。 当初計画での金星周回軌道投入に比べて、はるかに制約の多いなかでのこれら技術検討は、運用に関する検討能力の向上に繋がった。</p>
当初計画と異なる金星周回軌道 に付随したもの	<p><b>【新軌道の特徴を生かした観測による想定外の大気現象の発見】</b> 金星大気のスーパーローテーション(SR)と軌道周回角速度を同期させていた当初計画とは異なり、結果的にSRとは非同期となり、遠金点が5倍近く遠くなったことで観測の空間分解能も1/5となった。しかし、雲追跡手法のアルゴリズムを改良する技術的工夫によって、SRメカニズム検討に資するデータを獲得できている。 また、SRに非同期となったが故に、同じ地面経度を見続けている間に上層の雲が流れてゆく観測となり、地形由来の重力波が金星雲頂高度にまで影響を及ぼしていることを発見した。(最初の発見はアフロディーテ大陸上の現象であったが、その後のデータから多数の中低緯度高地に同様の現象が存在する(逆に高緯度や極付近には見られない)、いずれも地方時に依存する、なども発見している。</p>	<p><b>【多くの制約のもとでの軌道周回運用の構築経験】</b> 撮像対象である金星と探査機ならびに地球局との位置関係が当初計画から大きく変わったため、軌道周回運用(撮像運用ならびに地球との送受信運用)のための技術検討をあらためて実施することとなり、経験値を増すことが出来た。 その際、当初計画でのシンプルな方式とは異なる新たな探査機姿勢制御方式を創出して対応した。</p>



## 5. プロジェクト終了審査判定結果

### 金星探査機「あかつき」(PLANET-C) プロジェクト終了審査 判定結果

平成30年8月6日  
審査委員長 山本静夫

「あかつき」プロジェクトは、当初予定していた金星軌道への投入に失敗したが、再度金星軌道への投入機会を見出して5年後の再チャレンジを成功させ、金星の観測運用を実施できた。当初計画した2年間の定常観測運用を遂行したことから、プロジェクトマネジメント規程に基づき、以下の項目に沿ってプロジェクト終了審査を行った。審査の結果、要処置事項を期限内に処置することを条件として、プロジェクトの終了は妥当と判断した。

#### <審査項目>

- (1) プロジェクト目標の達成状況の確認
- (2) 科学的成果、社会的貢献状況や波及効果の確認
- (3) 投入した経営資源、実施体制、スケジュール実績の評価
- (4) レッスンズラウンドの取り込み状況
- (5) 機構横断的に継承すべき教訓・知見等の識別状況
- (6) 人材育成結果
- (7) プロジェクト終了後の事業の妥当性

#### <特記事項>

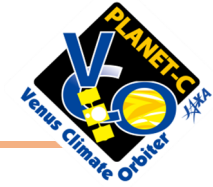
##### サクセスクライテリア達成状況に関する評価

最初の軌道投入に失敗したことや、4つの観測機器のうち2機器(IR1, IR2)が定常運用開始から1年後に故障したことを勘案すると、フルサクセスの達成は限定的と評価する。なお、当初のサクセスクライテリア(成功基準)の設定そのものに改善の余地があると考えられ、今後のプロジェクトに反映されるべきとした。

##### 人材育成

最初の金星軌道投入の失敗にもかかわらず、粘り強く対応を続け、最終的には再挑戦の機会を見出すなど、困難な状況を経験した。この過程で、各サブシステム担当者が一致協力して探査機維持のための検討にあたることで専門知識(姿勢制御、推進系、熱、電源、通信等)を深化させ、若手の技術者・研究者が成長する機会となった。失敗の一方で、人材育成の一つとできたことは、大変重要である

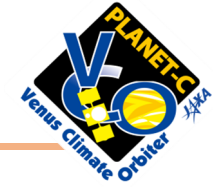
## 6. まとめ



- (1) 金星探査機あかつきは2010年の金星周回軌道投入失敗を克服し、2015年12月に金星周回軌道に進入し、そこから2018年3月まで定常運用を行いミニマムサクセス、フルサクセスを達成した。金星軌道投入時期が遅れたことによる影響はリカバー可能な範囲である。
- (2) 学術的成果は、外部評価を受け、その妥当性を認定された。プロジェクトは社会的/政策的に大きな波及効果をもたらし、国際的貢献も大きく行っており、それらは適切にアーカイブされている。一般へのアウトリーチも積極的・効果的に行われた。
- (3) プロジェクト実施による人材育成は大きな成果を挙げた。
- (4) 延長運用ではエクストラサクセスを達成し、金星スーパーローテーションのメカニズムに迫る科学成果が期待される。具体的に達成すべき以下の目標を定める
  1. 雲頂レベルにおける子午面循環の強度を、あかつき以前に予測されていた値に比べ高精度（桁での向上）に決定する。
  2. スーパーローテーションの生成・維持メカニズムについて、その主機構および副機構とを明らかにし、さらにそれらの寄与度を定量的に決定する。
  3. スーパーローテーションの長期（年単位）変動をとらえ、それに寄与する物理プロセスを明らかにする。

## 6. まとめ（続き）

---



4. 定在重力波について、その金星日毎の変化または安定性（ローカルタイム依存性）を定量的に示す。また、それがスーパーローテーションに対してどう寄与しているのかを物理的に理解する。
  5. 金星の雷を検出する。または検出されない場合には、従来の「雷発生頻度」上限値を有意に更新する。
- (5) 延長運用に当たっては各機器の故障に加えて、太陽電池やバッテリーの性能劣化、熱制御材劣化による温度条件の逸脱、燃料枯渇による姿勢制御不可、などのリスクを識別済みである。また太陽重力や大気抵抗などの摂動を考慮した軌道解析を行った結果、今後数年（3年以上）に渡り、安定な軌道が維持できることを確認済みである。