資料44-2

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第44回)H30.11.29

金星探査機「あかつき」(PLANET-C)の定常運用終了とプロジェクト終了審査の結果について

2018年11月29日

宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所

プロジェクト事後評価と本資料の位置づけ

- 金星探査機「あかつき」(PLANET-C) のプロジェクト活動結果等について経営的視点から確認し、プロジェクト終了の妥当性を判断するために、平成30年8月にJAXAとしてプロジェクト終了審査を実施した。

  審査項目は以下の通り：
  1. 探査機の開発
  2. 探査機の軌道投入失敗への対応および軌道投入の再試行
  3. 探査機の観測運用
  4. 探査機による科学成果創出

- 本資料は、宇宙開発利用部会がプロジェクトの終了時に実施する「事後評価」に資するものであり、「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」（平成29年5月9日宇宙開発利用部会決定）における基本的な考え方を踏まえ、JAXA自らが評価実施主体となって実施したプロジェクト終了審査の結果を報告する。

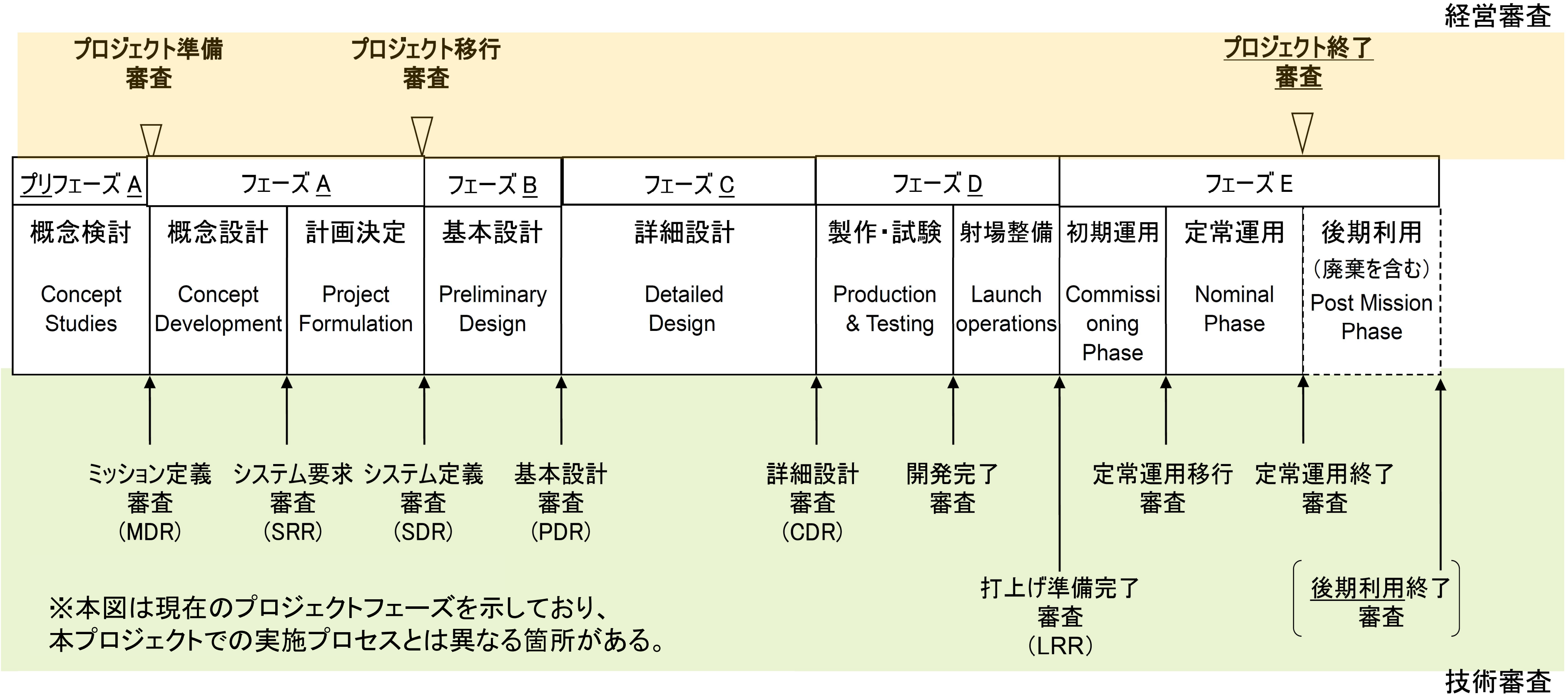
JAXAは、プロジェクトの企画立案と実施に責任を有する立場から、JAXA自らが評価実施主体となって評価を行うことを基本する。これを踏まえ、宇宙開発利用部会では、JAXAが実施した評価の結果について、目的、目標、開発方針、開発計画、成果等についての調査審議を行う。

「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」（平成29年5月9日改訂）

JAXA内審査とプロジェクトフェーズの関係

≪事前評価≫
（宇宙開発委員会推進部会）
平成18年8月31日

≪事後評価≫
（今回）



目次

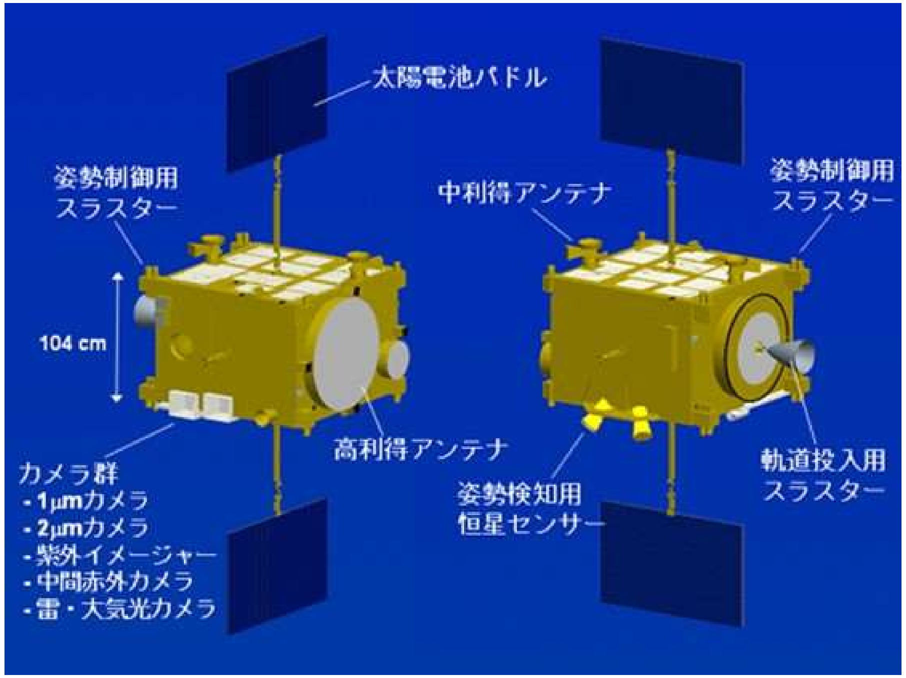
1. 金星探査機「あかつき」（PLANET-C）の開発経緯
2. 「あかつき」の概要
3. サクセスクライテリア
4. 軌道投入失敗の探査機に対する影響等
5. プロジェクト終了審査判定結果
6. まとめ

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ーを用いて、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ー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の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



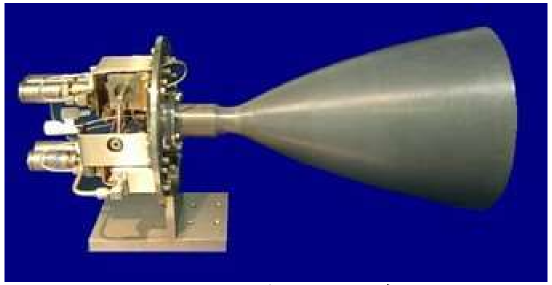
「あかつき」主要諸元	
形状・寸法	2翼式太陽電池パドルを有する箱形 （1.04m×1.45m×1.40m）
予定軌道	金星周回楕円軌道 近金点高度：300km 遠金点高度：約8万km 軌道周期：30時間 軌道傾斜角：172度
ミッション期間	金星到着後　約2地球年
質量	約500kg（打ち上げ時）
発生電力	金星軌道にて約500W （ミッション終了時）

「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

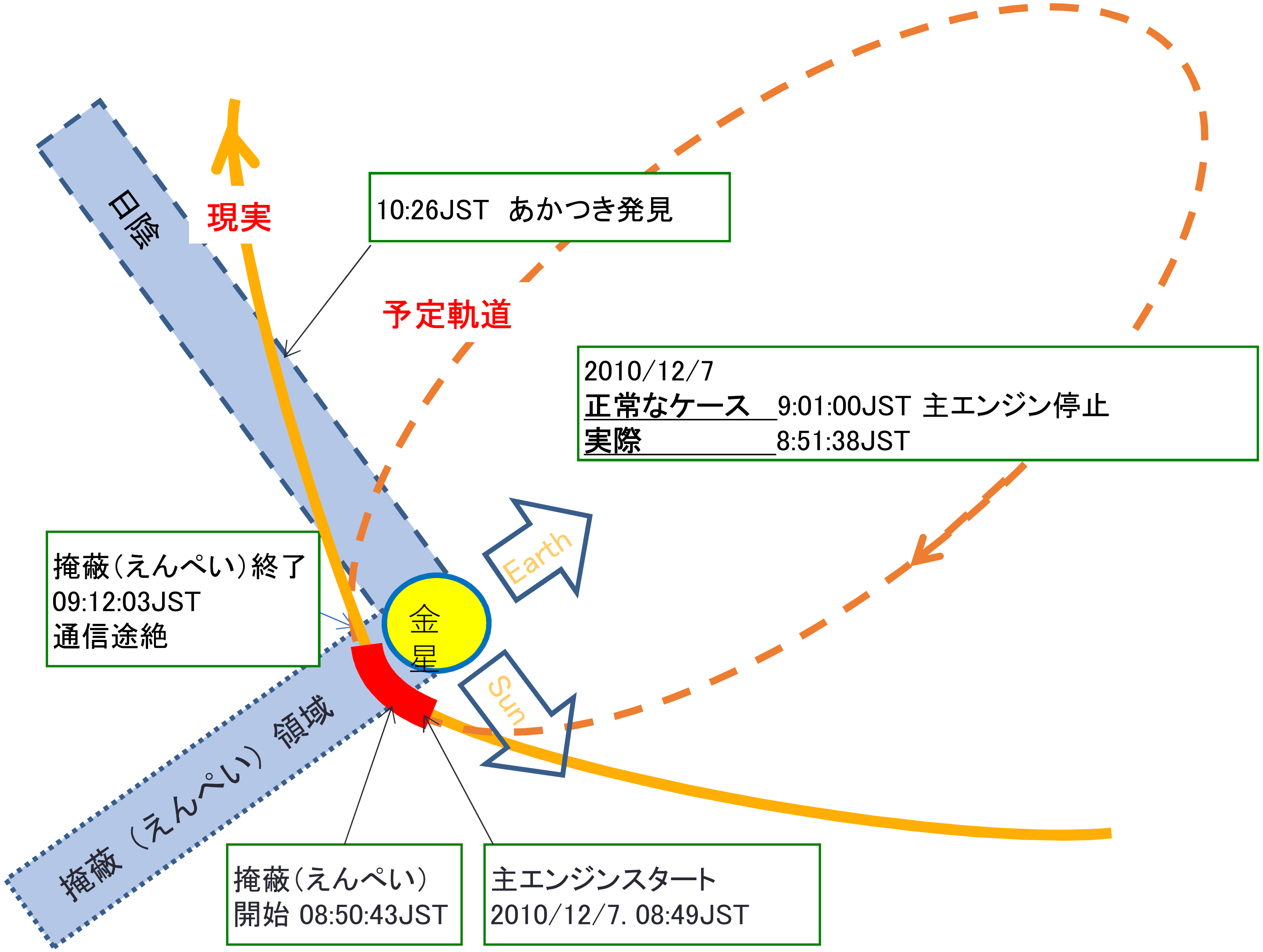
「あかつき」が挑む金星は、地球とほぼ同じ大きさの惑星で「地球の兄弟星」といわれている。しかし，その表層環境は２つの星で大きく異なっている。地球の100倍近い地表圧力をもつ大気は、そのほとんどが二酸化炭素であり、それがもたらす強い温室効果は、地表を460℃という高温にしている。

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。

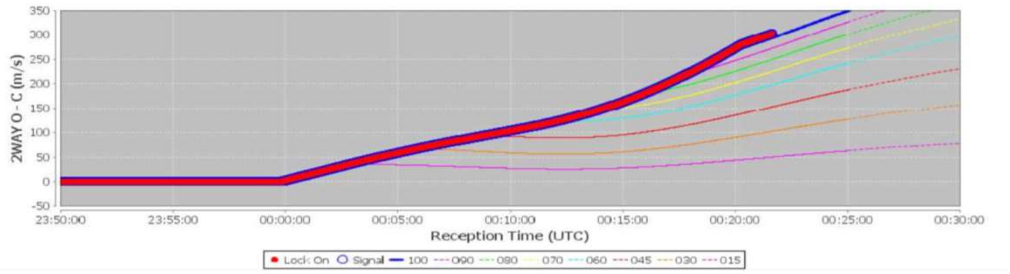
2．「あかつき」の概要（続き）

2010年12月7日 金星周回軌道への投入失敗

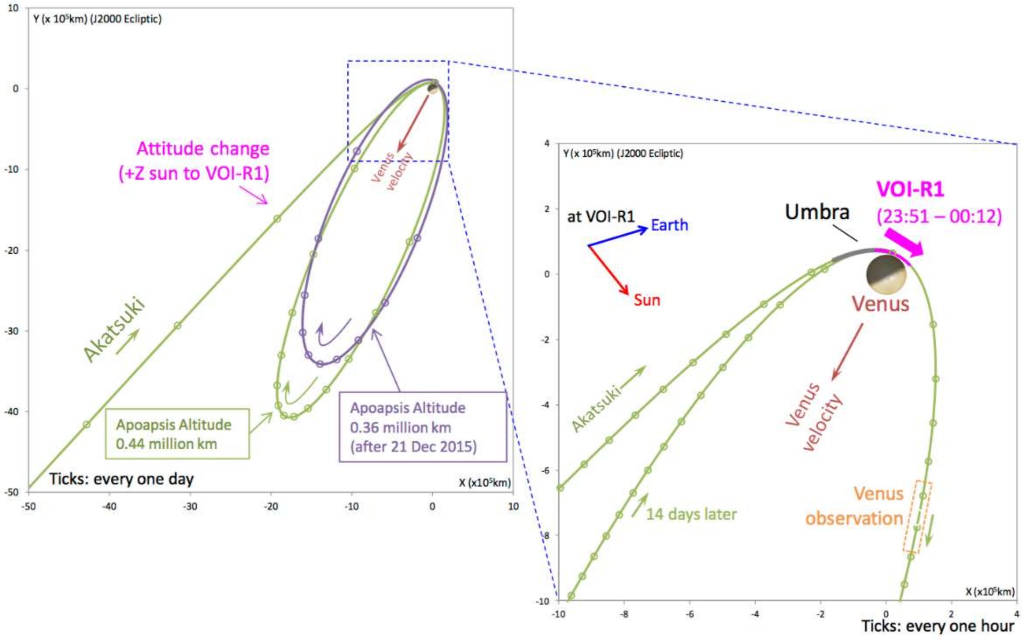


2015／12／7 周回軌道投入成功

当日のドップラーモニター



VOI-R1 Geometry (Venus center)

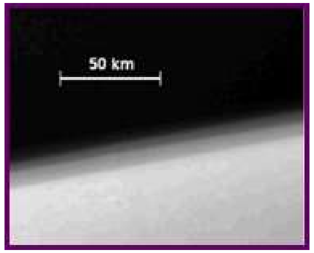


オペレーションの結果
遠金点44万km
（予定は49万km）

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

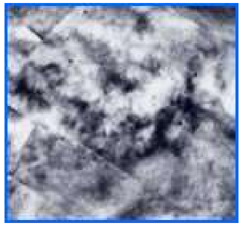


リム観測：
エアロゾルの層構造の変動を捉える

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

＜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

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



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

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。	UVI, IR1, IR2, LIRの全ての搭載カメラで、目標期間・目標頻度の撮影に成功し、全球的な雲画像を作成できた。 →**達成**	
		(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)当初想定の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。	(新1) UVI, LIRで、目標期間・目標頻度の撮影に成功した。 **→達成** IR1, IR2も有用なデータを取得したが、目標期間の半分で機能停止した。 **→部分的達成** これらデータを用いた大気運動の解明は研究が進行中である。 **→部分的達成**	(延1-1) 子午面循環の決定精度を、従来研究より桁レベルで向上する。 (延1-2) SRの年単位変動を観測により捉え、それに寄与するプロセスを明らかにする。 (延1-3) SRの生成･維持メカニズムについて、主機構・副機構を特定し各々の寄与度を決定する。
	(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。 **→達成** （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。 **→達成**	(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4) 定常運用の2地球年までの観測が完了。 **→延長運用へ**	(延4) 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5) 機能停止までにIR1が取得したデータから地表面放射率の解析が進行中である。 **→部分的達成**	（機能停止しており、非該当）
		(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。	(新6) 金星へ向かう航行中に黄道光観測を実施したが、検出器温度が高く、微弱な黄道光を捉えられなかった。 **→不達成**	（機能停止しており、非該当）

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、RS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	**【若手技術職員の設計理解の重要性】** 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。 **【内惑星探査機としての技術検討の充実】** 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。
最初の軌道投入失敗 に付随したもの	**【太陽周回機会を活用した観測での成果】** 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。	**【探査機開発時の技術者の再結集による課題対応】** 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。 **【設計想定を超える環境に対するシステム検討の経験】** 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て、（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。

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	**【多くの制約のもとでの軌道投入運用の構築経験】** 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。
当初計画と異なる金星周回軌道 に付随したもの	**【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】** 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。	**【多くの制約のもとでの軌道周回運用の構築経験】** 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。

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）レッスンズラー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。

参考資料

金星の科学

金星の大きさと質量は地球に極めて近いが、その環境は大きく異なる。

- 濃密な二酸化炭素の大気におおわれ、その温室効果のために地表温度460℃の灼熱世界
- 硫酸の雲が全体をおおう
- 秒速100mの風が金星全体で同じ方向に吹く

地球と金星の違いをもたらすメカニズムこそ、地球のような穏やかな環境が長期間にわたって維持される条件を理解するための鍵

(左)Magellanレーダ画像
(右)あかつき紫外画像

ベネラ着陸機による地表の写真

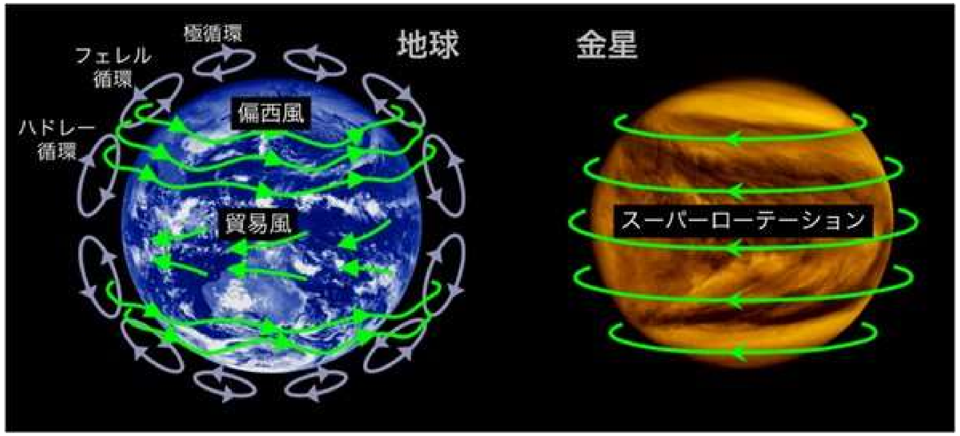
金星の気象学の問題

- 大気が金星全体で西向きに流れ、高度70 km付近で100 m/秒、自転の60倍の速度に達する。この高速大気循環はスーパーローテーションと呼ばれ、太陽系の気象学の最大の謎の一つ。
- 硫酸の雲が生じ、地球と違って金星全体を隙間なくおおっている。入射する太陽光のほとんどを反射してエネルギー収支を支配しているが、その形成過程はよくわかっていない。

これら気象学の問題に挑むには、多地点での連続的なデータが必要。少数の着陸機による観測では解けない。

⇩

世界初の惑星気象衛星としての金星探査機「あかつき」



地球と金星の大気循環のイメージ

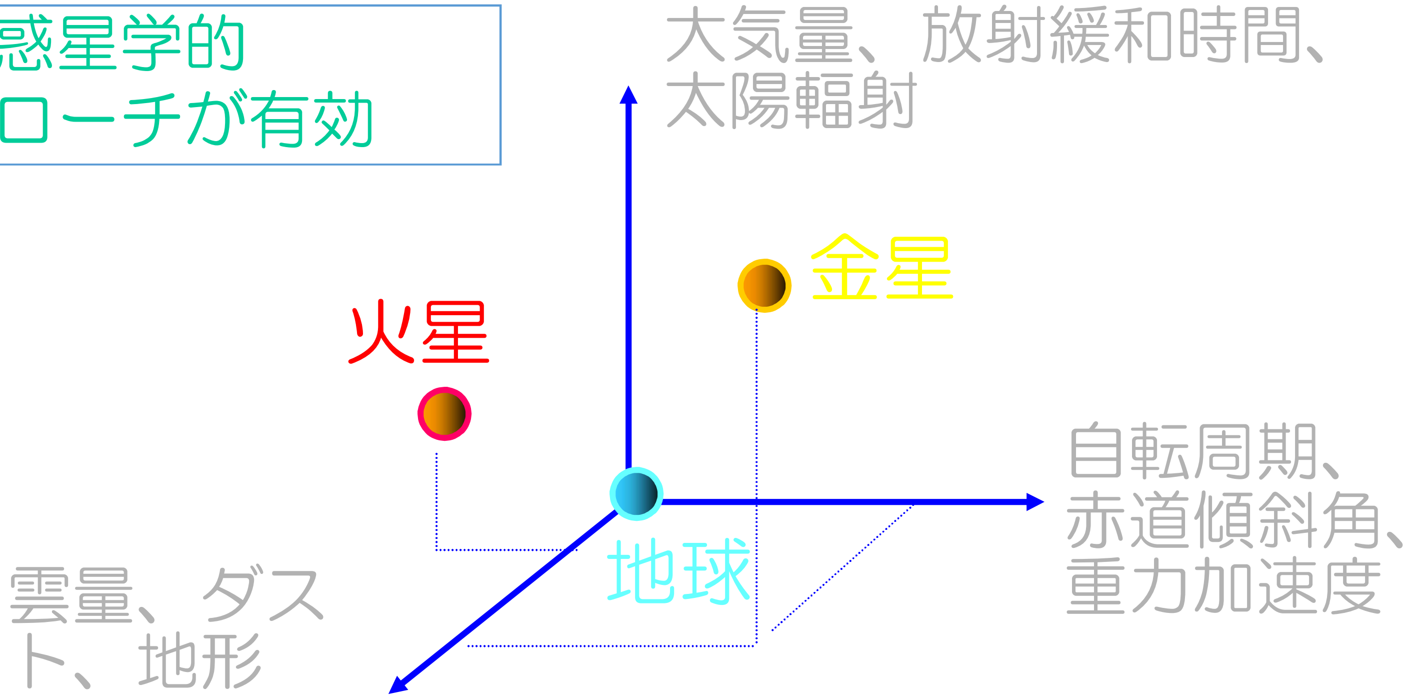
「あかつき」の方向性

金星大気全体の動きを調べ、地球の兄弟星の気候の成りたちに迫り、惑星気象学といえる学問分野を開く

惑星気象学の将来

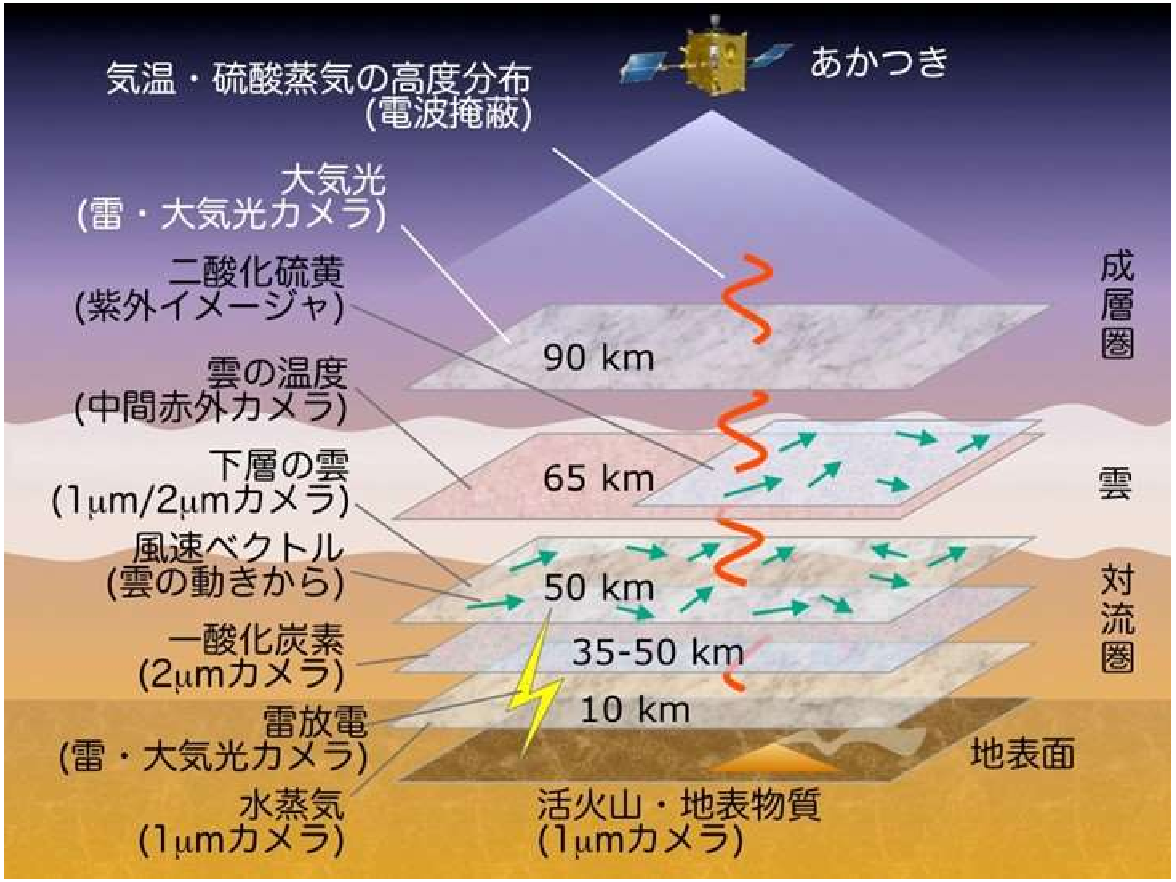
1. 地球の気候の宇宙における位置付けを知りたい
2. あらゆる惑星・時代を自由に行き来したい

比較惑星学的
アプローチが有効



ミッションの手法

金星周回軌道からのリモートセンシングにより厚い大気層の内部の3次元運動を映像化（連続的に画像を取得）



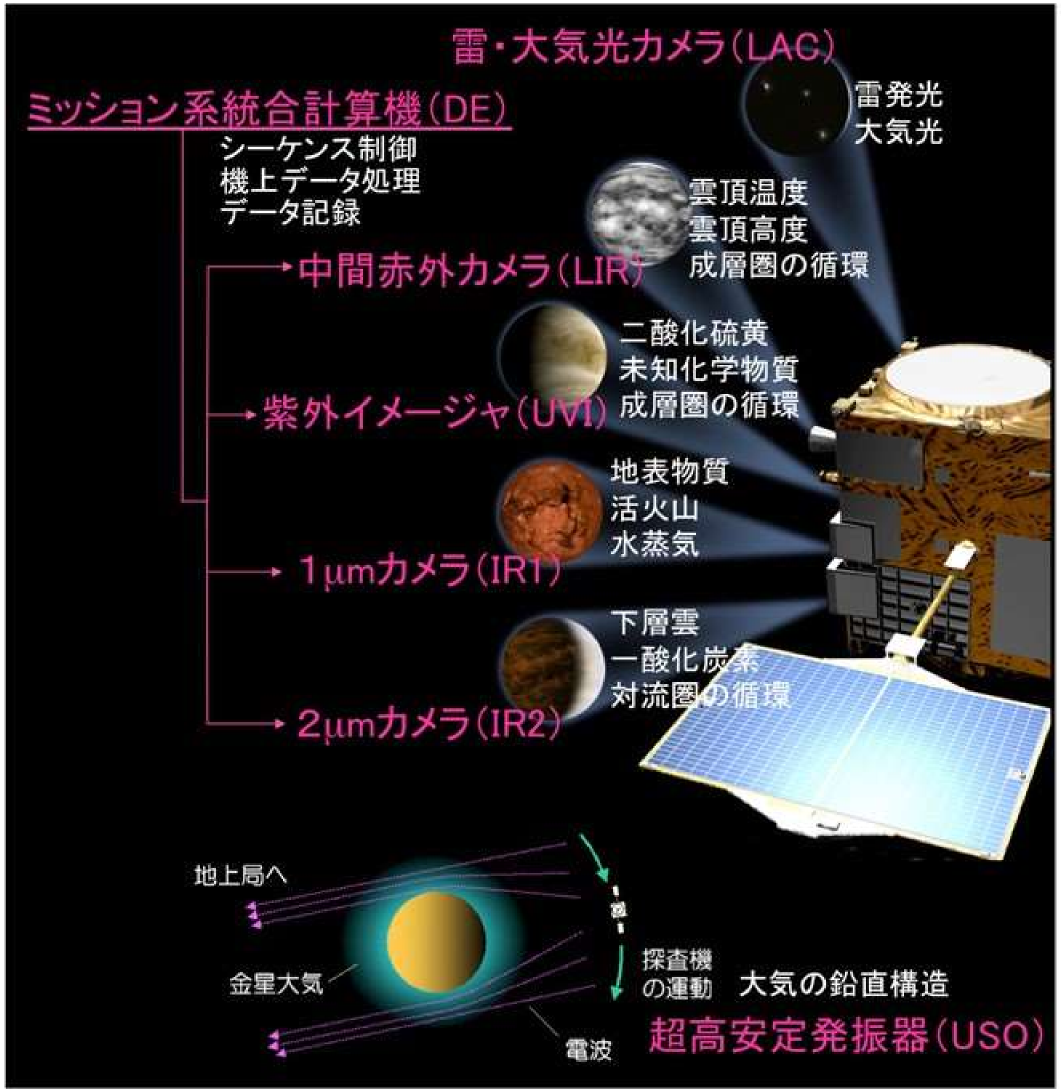
[3次元観測のイメージ図]

研究課題

- 波動や乱流の網羅的観測とそれらの超回転への寄与の解明
- 子午面循環の構造の解明
- 雲層内の物質循環とその雲層維持における役割の解明
- 雷放電の時空間分布と発生過程の解明
- 大気光の時空間変動と上層大気循環の解明

観測機器

- 「あかつき」には6台の観測装置が搭載されている。
  - 紫外線～中間赤外線までの様々な波長の放射をとらえる5台の観測カメラ (IR1, IR2, LIR, UVI, LAC)
  - 電波掩蔽観測のための基準信号源 (USO)
- LAC以外の4カメラは全てミッション系統合計算機(DE)によって制御・処理・記録される。
- 探査機全体の質量約500kgに対し、6台の観測装置とDEを合わせた質量は約37kgである。

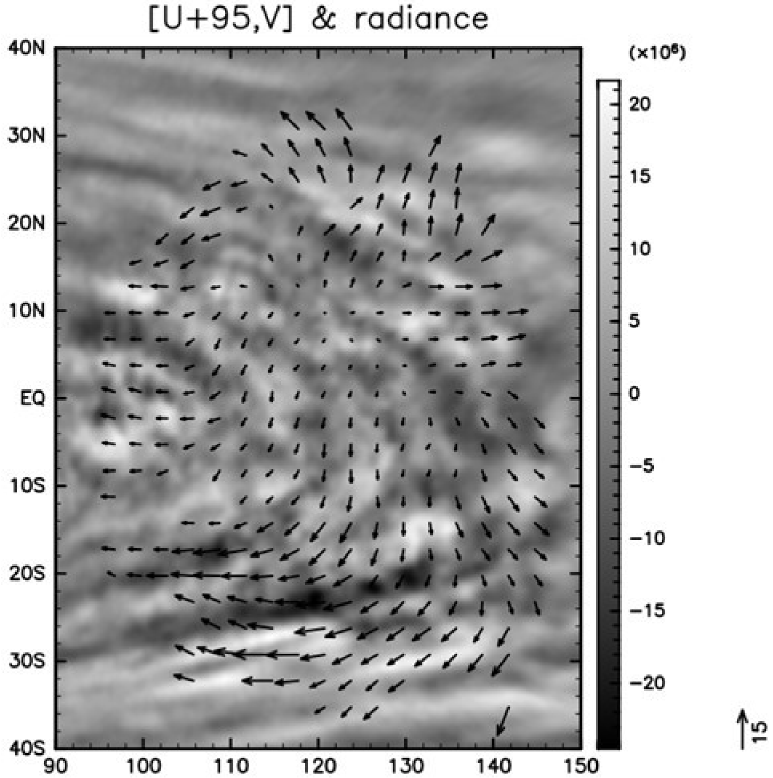


プロジェクトの当初目標と実際の差異

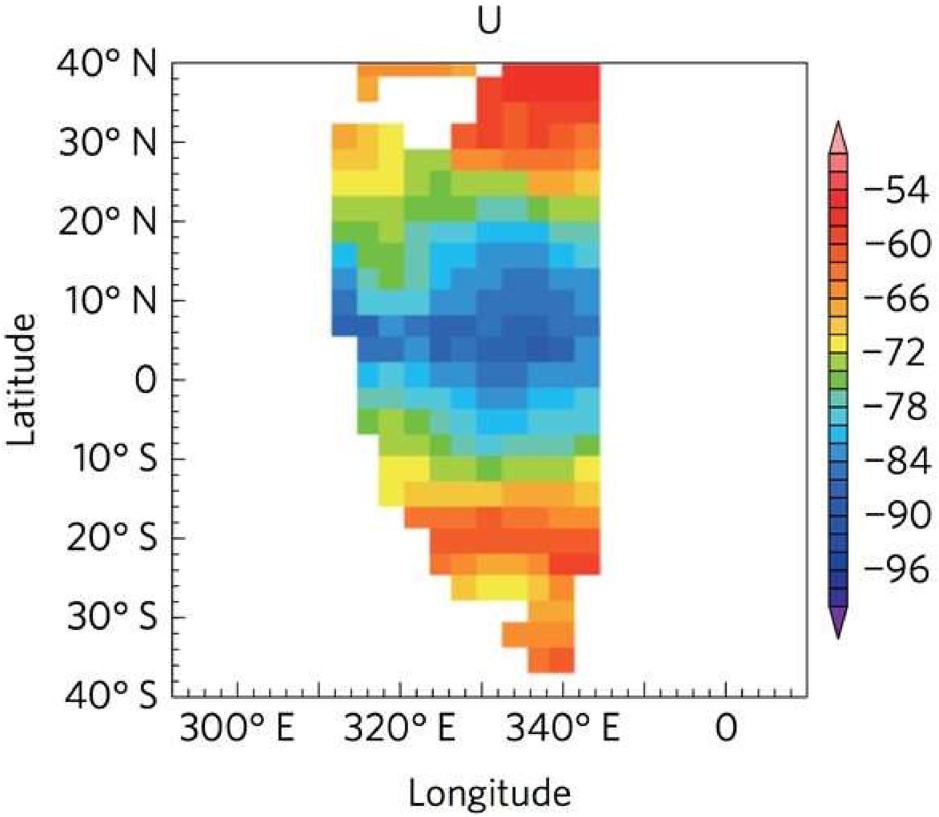
	軌道・姿勢条件の違い	影響	対策・結果・効果
(1)	太陽周回軌道の近日点が0.6AUとなった(当初計画:0.7AU)	過大な熱入力となり高利得アンテナ(HGA)レドーム用白色塗装など、一部の熱制御材の劣化が進んだ	熱入力に対する耐性が最も高い+Z面を太陽方向に向け、探査機内部への熱流入を最小限にした結果、すべての機器で温度の上限を超えることなく正常な状態を維持することができた
(2)	金星周回軌道の遠金点高度が約37万kmとなった(当初計画:約8万km)	遠金点付近で探査機からの金星視直径が小さく、軌道周期が約11日(当初計画:30時間)になった	観測運用計画を全面的に見直し、当初の遠金点付近における大気観測に加え、近金点付近における観測を充実させた
(3)	金星周回軌道の軌道傾斜角が25度となった(当初計画:13度)	太陽光入射角の制限により、軌道面垂直姿勢を採用することができなくなった	太陽、地球、金星の3天体を含む仮想面を設定し、探査機角運動量を仮想面垂直とする姿勢制御計画を立案した
(4)	上述の理由により、観測運用（金星観測⇔地球通信の繰返し）では、仮想面垂直姿勢制御方式を採用した(当初計画:軌道面垂直制御)	リアクションホイール(RW)のばらつきが増大し、制御系異常(RWトルク不足)と判定された	Y軸反転時などに、ホイールランナップを行い、4台のRWの回転数をそろえることで、トルク不足を回避、同一事象の発生を防止した
		恒星センサ(STT)の金星干渉範囲が拡大し、制御系異常（STT出力異常）と判定された	STT金星干渉が予想される近金点通過時に、STT出力を無効化する時間を十分に取ることで、STT出力異常を回避、同一事象の発生を防止した
(5)	遠金点付近に金星の影が発生する(当初計画:遠金点付近を金星の影から南北方向に外すことができた)	本影約150分（半影約230分）など長時間の日陰が回避できない期間が存在する	探査機温度解析、電力解析など、これまでの実績ベース（設計マージンの取り崩し）での解析を行い、長時間日陰を乗り切るための省電力運用計画を策定した

これまでに得られた科学成果の例

大気の三次元運動

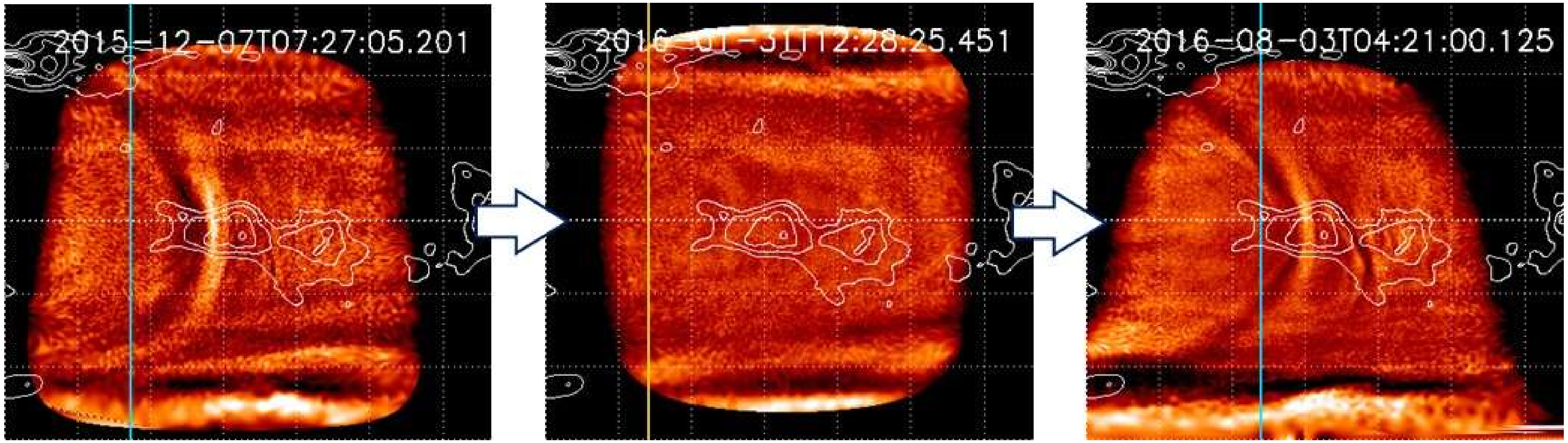


紫外画像を用いて雲追跡を行って得た雲頂での風速ベクトル。スーパーローテーション成分を差し引いて、それ以外の細かな大気の動きを可視化している。背景の紫外線模様はコントラスト強調されている。



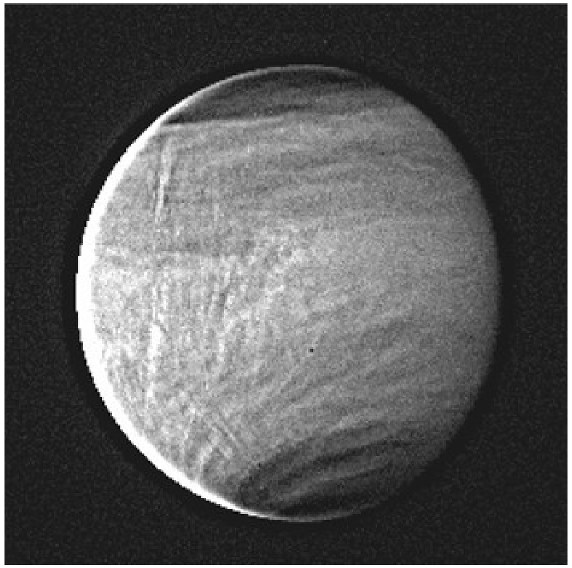
近赤外画像を用いて雲追跡して得られた、雲層下部でのスーパーローテーション速度の分布（青いところで速い）。赤道域にジェット構造があることが発見された。スーパーローテーションの生成に関わる可能性がある。

大気・地面カップリングを示す波動



上） LIRで、ほぼ同じ領域を異なる3つの時期に観測して得た雲頂温度分布。**アフロディーテ大陸上空に中心を持つ大小の弓状構造**が2015年12月7日（左）と2016年8月3日（右）には同じ場所に発生し、2016年1月31日（中）には存在しなかった。

下） IR2（波長2.02 μm）でとらえた地形由来の構造（左）。引っかき傷のような雲の模様はベータ地域（右の地形マップで#4と示したもの）に固定されていた。その他、全部で6ヶ所の地形に由来する波動を検出している。



データ公開

データ概要

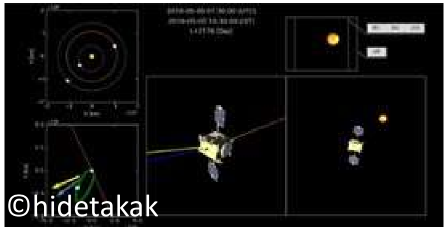
・観測機器6つによるデータと探査機の軌道・姿勢等データをアーカイブ
・観測データは以下の種類がある
生データ、較正済みデータ、緯度・経度格子マッピングデータ、雲追跡風データ

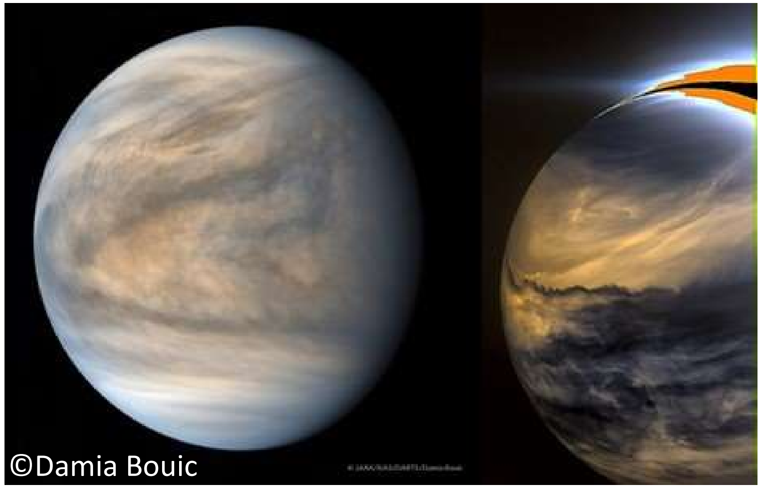
データアーカイブ・公開スケジュール

・現在未来を問わず、人類共有の資産としてデータをアーカイブし公開する
・生データ・較正済みデータはNASA PDS(惑星探査データを所掌する部署)のPDS3規格に準拠
・2017年7月にJAXAデータアーカイブData ARchives and Transmission System(DARTS)より
データ公開を開始した(軌道投入後1年7か月後)
・半年ごとに半年分のデータを順次公開している(2017年12月、2018年6月)
・NASA PDSによるレビュー完了後、NASAからも配布される予定

反響（シチズンサイエンス）

・複数の一般の方が疑似カラー画像を作成(右)
・軌道・姿勢データを用いて動画を作成した方も(下)


©hidetakak


©Damia Bouic

所内審査ミッション分科会での（海外の専門家を含む）外部評価

・「あかつき」の学術的成果については次のような成果が認定されるとともに、延長運用を支持する答申がなされた。

(1) 周回軌道が当初予定と異なるものとなったが、近金点付近では大気の微細構造を、遠金点付近では全球撮像データを取得し、今後数年にわたり重要な科学結果を導くであろう雲追跡（風速測定）を行えることを示した。IR1とIR2は2016年12月にダウンしたものの、それまでの1金星年以上にわたり高解像度のデータを取得した。軌道周期が長いため電波掩蔽観測の頻度が少なくなっているが、チームはインドの科学者と協力することで、それをカバーしている。

(2) ミッションの成果は、27本の機器等に関する論文、14本の科学論文として発表済みである。また、2017年12月時点でEarth, Planets, and Space誌に「あかつき」特集が組まれ、8本の論文が査読中となっている。チームが得た成果は、惑星科学のコミュニティにとって興味深く驚くべきものであった。特に「地形由来の巨大な重力波構造の発見」は、あかつき以前には想像もされていなかったものであり、スーパーローテーションなど金星大気運動を考える上で今後重要なものとなる。（註：今日現在では論文数は総計６２本）

(3) 以上のことから、ミッション分科会の審査委員は、「あかつき」ミッションはミニマムサクセスは完全に達成し、フルサクセスは部分的に達成したと認定する。（註：審査時期は、2016年4月の定常観測開始から2年未満で行われているため、動いているUVI, LIRカメラであってもまだ「2年間にわたって」の条件をクリアしていなかった）

(4) チームから提案されている延長運用は、その期間における観測機会と期待される科学成果から判断して、妥当なものである。延長期間における科学観測に対する技術的な障害も少ないと考えられ、審査委員は「あかつきミッションを延長する」ことを薦める。

国際的貢献状況や波及効果

年月	学会・研究会	Session	口頭	ポスター
May 2010	日本地球惑星科学連合	"Akatsuki departed for Venus to initiate planetary meteorology" (Union session)	11	
Apr 2016	Int'l Venus Conf. (Oxford, UK)	"Akatsuki: First results" (PM, and 6 PIs were invited to present the first results)	7	6
Oct 2016	日本気象学会	あかつきが拓く惑星気象学	12のうち10	0
May 2017	日本地球惑星科学連合	"Latest results of Venus science with Akatsuki in orbit for 1 year"	15	21
Oct 2017	Venera-D Modeling Workshop (Moscow)	"Akatsuki" (invited to present latest info and to discuss Venera-D mission plan)	4	N/A
Oct 2017	日本気象学会	惑星大気研究の今：観測・モデリング・理論	17のうち10	0
Sep 2018 (upcoming)	Int'l Venus Conf. (Niseko, Hokkaido)	Conference hosted by Akatsuki members, expecting a large number of attendees from all over the world	(71)	(46)

- 続く金星探査ミッション（例：ロシアが計画中のVenera-D）にも、科学目標の設定や観測手法の選択などで、影響を与えている。特に「あかつき」搭載のカメラから得られる情報の重要性から、同様あるいは同じ機器を後継ミッションに搭載し、大気の動きを捉える観測などが検討されている。
- プロジェクトの功績（特に挑戦的な技術を用いた金星周回軌道投入の再チャレンジとその成功）に対して、読売テクノフォーラムからゴールドメダル特別賞が授与されている。

2018 COSPAR総会における堀之内准教授（北大）のハイライト講演

アウトリーチ（１）

- 日本の探査機で初めて惑星周回軌道への投入に成功したこと、一度投入失敗した探査機で再チャレンジして成功したこと、女性職員が活躍したことなどが注目され、社会的、政策的にインパクトがあった。
- 「あかつき」の成功は、国会本会議における安倍首相の施政方針演説でも触れられ、平成29年4月に文部科学大臣賞表彰を受け、平成29年度小学校教員向け道徳指導用教材にも採用されている。
- 軌道投入後、新聞66件、テレビ29件、ラジオ6件、雑誌等出版2件、その他ネットメディア等36件以上、と多数取りあげられた。
- 得られた成果は、宇宙学校（下図左）・トークライブ（下図中と右）・講演会（次ページ右上）などさまざまな機会を通じて、専門家以外の一般にもわかりやすく発信されている。

アウトリーチ（2）

- 「成果が一般へ分かりやすく発信」された良い例として、文溪堂より出版された児童書・一般書『「あかつき」一番星のなぞにせまれ！ 』が挙げられる。これは中村（衛星主任）、佐藤（プロジェクトサイエンティスト）が監修し、ライターの山下美樹さんが執筆されたもので、2017年9月に刊行された（右下が書籍表紙）。
- 小学校中学年からの読者を対象に、探査機を擬人化して書かれている。しかし、探査機の打ち上げから2010年12月の周回軌道投入失敗、その後の5年、そして2015年12月の成功から初期科学成果まで、本質は曲げず（記述されている数字は極めて正確である）かつ平易に伝えられるよう、プロジェクトとライターが時間をかけ議論し出来上がった共同成果物である。
- 加えて2018年夏の相模原キャンパス特別公開で『「あかつき」からの手紙』（A4版4ページ）として、刊行後の成果のフォローアップも行った（以下、手紙から抜粋）。
  - 赤道ジェットの発見： 2017年8月29日には、この現象に「赤道ジェット」という名前がついたと発表されたよ。
  - 弓状構造の周期性の発見： 「弓状のもよう」は金星の大きな山脈の上に次つぎと現れることがわかったんだ。地球の2～3か月に1回くらいのペースで、…

人材育成結果（１）

＜プロジェクト内での活躍＞

・開発初期（ミッション提案時）から、サブシステムの主担当として技術的な検討の中心的役割を担い、メーカを主導した。JAXA入社１～３年目の比較的若手職員を中心に検討を開始し、週に１回のペースで各自の結果を報告した。

・まずは直近の惑星探査機である「はやぶさ」をベースに、それと同じ設計を踏襲した場合、何が（どこで）問題になるかをサーベイすることで、探査機の飛行条件（宇宙環境）とサブシステム設計との関連やその物理的背景を理解した。

・特に「あかつき」は内惑星探査機であったため、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課題（問題）が顕在化し、その対策を皆で議論した。高利得平面アンテナ、広角レンズアンテナ、再生測距装置、大容量リチウムイオン電池、高温用太陽電池セル、セラミックスラスタなど、新規技術を提案し、小型軽量の内惑星探査機が誕生した。

・特に、2010年に金星周回軌道への投入が失敗したことで、当初計画とは全く異なる環境が発生したため、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が集結、不具合原因の究明を精力的に行うとともに、探査機生存の最適な方策を議論し、2015年の再チャレンジに向けて知恵を絞った。

人材育成結果（２）

＜プロジェクト外での貢献＞

・プロジェクトが進むにつれ、プロジェクト外へ異動する者が増えていったが、主な異動先の半数は、プロジェクト系(利用衛星、輸送系、科学衛星など)で、残りの半数は、専門技術を有するDisciplinary Engineering (DE)組織(相模原＆筑波)として引き続き自身の専門知識を生かしたプロジェクト支援等を継続している。

・これらプロジェクトにはNASAやESAが主導する海外プロジェクトへの積極的な参画も含まれている。

・筑波DEへ異動後、自身の希望で大学での教育者を選択した者もいる。

＜宇宙科学人材の育成結果＞

・2018年1月現在で、9名の若手があかつきプロジェクトと関わり博士学位を取得したりプロジェクト研究員として研鑽を積んだ。修士号の取得者は8名である。今後は、あかつきデータを主題材として学位を取得する者が増える予定。

ASTRO-H運用異常を踏まえた考察（１）

「あかつき」の失敗の要因は推進系システム（特に高圧ガス供給側）において、低温環境における酸化剤蒸気と推進剤蒸気の挙動（バルブシール材の透過および塩析出のメカニズム）に関して、理解不足と情報共有の不足であり、その後の対策として、それぞれの背後要因から教訓を抽出し、今後のミッションにおいて取り組むべき改善事項をまとめた。
以下のとおり、ASTRO-H背後要因は「あかつき」においては当てはまらなかったことを確認した。

（１）プロジェクトチーム体制における不明確さ
○「あかつき」では、プロジェクトマネージャの他に、プロジェクトエンジニア、プロジェクトサイエンティストを置き、役割分担を明確にした。

（２）役割分担と責任関係が不明確
○「あかつき」では、「のぞみ」、「はやぶさ」などの過去の惑星探査機をベースに内惑星探査機の課題を抽出、JAXAサブシステム担当者（教育職およびISAS DE他）の役割と責任を明確化し、プロジェクトが総合的に見渡した。

（３）第三者による確認の仕組みや手法が不十分
○「あかつき」では、軌道姿勢制御系、推進系、熱制御系、電源系など、他プロジェクトの有識者や経験者も交えた設計の検討および確認を行い、プロジェクト横断的に課題の抽出と解決のための仕様調整を行った。

（４）安全に運用する意識不足、及び体制不備／（５）確実に運用するための基本動作が出来ていなかった
○「あかつき」では、運用計画書と作業手順書を作成したうえで、プロジェクト及び運用支援業者で「事前の確認会」を実施し、運用手順の確認および作業分担を明確化している。
○クリティカル運用時（軌道修正やY軸反転運用など）には、必ず下記すべてを運用要員に含めている。
①プロマネ ②プロジェクトエンジニア　③当該サブシステム担当（主として軌道計画系や姿勢制御系）
④関連するサブシステム担当者（通信系や電源系、熱制御系ほか）
○使用するコマンドに関しては、地上でシミュレータ等により　事前検証を行い、人的ミス・検証の漏れを防止している。

（６）運用よりも開発が優先され、運用準備が後回しにされた
○「あかつき」では、最もクリティカルな運用として打上げ直後（ロケット分離→太陽捕捉→3軸姿勢確立）および金星周回軌道投入を想定し、打上げ前から運用手順の確認と練習を行い、探査機システムへのフィードバックを行った。

ASTRO-H運用異常を踏まえた考察（２）

（1）安全に運用する意識不足、及び体制不備

JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び運用支援業者とも衛星を安全に運用する意識が十分でなく、安全かつ慎重に運用を行う体制（プロジェクト体制や第三者による評価等）が引かれていなかった。

・スラスタ制御パラメータ設定がクリティカルな運用であるという認識、初期確認フェーズは衛星及び運用がまだ安定していない状況であるという認識の共有が不足していた。

・運用において、リスク対応を含めた充実した体制が整備されていなかった。

（2）確実に運用するための基本動作が出来ていなかった

JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び運用支援業者とも、確実に運用するための基本動作が出来ていなかった。

・「人的ミス」・「検証の漏れ」を防ぐために、運用手順書・ツールを整備し、運用訓練を行うことが十分に行われず、品質記録も整備されなかった。

・運用が複雑かつ高度化して規模が大きくなり、経験豊富な人材を中心にした少数精鋭の体制による運用では対応できなくなった。

【あかつき運用での具体的な対応状況】

あかつきの姿勢制御運用及び観測運用では、以下のとおり、安全かつ確実な運用を行っている。

○運用計画書と作業手順書を作成したうえで、プロジェクト及び運用支援業者で「事前の確認会」を実施し、運用手順の確認および作業分担を明確化している。

○クリティカル運用時（軌道修正やY軸反転運用など）には、必ず下記すべてを運用要員に含めている。

①プロマネ　　②プロジェクトエンジニア

②当該サブシステム担当（主として軌道計画系や姿勢制御系）

③関連するサブシステム担当者（通信系や電源系、熱制御系ほか）

○使用するコマンドに関しては、地上でシミュレータ等により 事前検証を行い、人的ミス・検証の漏れを防止している。

ASTRO-H運用異常を踏まえた考察（３）

（３）ISAS内のマネジメントの見直し

ISAS内プロジェクト体制およびその管理・運用に関して、プロジェクトマネージャだけでなく、サブマネージャ、システムマネージャ等のプロジェクト管理及びシステム責任を負うものについては、その経験や能力等の要件を明確にする。なおPMをはじめ枢要なプロジェクト要員は専任化を就任への前提とする。

【あかつき運用での具体的な対応状況】

（ひとみ事象以前、あかつき開発フェーズから）プロジェクトマネージャ（PM）と、理学チームの代表であるプロジェクトサイエンティスト（PS）と、探査機システムの技術統括であるプロジェクトエンジニア（PE）を明示的に分離して配置し、かつ経験豊富な人材を充てており、健全なプロジェクト運営に必須の（着実性と挑戦性の）緊張構造を実現している。定常運用フェーズ以降も、同じ体制を維持している。（金星周回軌道投入等の運用時は、実質的に専任状態となっていた）

（４）ISASプロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底

審査会、運用等の意思決定の共有を図るため、また不具合時の原因究明の根拠とするため、ISASおよび企業間で管理の役割分担を明確にした上で、両者にてそれぞれの品質記録を徹底する。これにより、システムの安全性に課題が発生した時に原因究明と対策の迅速な実行を可能とする。

【あかつき運用での具体的な対応状況】

あかつきの姿勢制御運用及び観測運用では、

○プロジェクト及び運用支援業者で、運用の「事前の確認会」を実施。【運用の意思決定の共有】

○また、各運用時には必ず運用報告書を作成し、プロジェクト及び運用支援業者の双方が確認し、保管している運用報告書では、入感時と消感時の探査機の状態やエラー表示の記録、送信したコマンド履歴、次の運用者への引継ぎ項目などを記録している。【記録の徹底】