

金星探査機「あかつき」を振り返って考えたこと

太陽系科学研究系 准教授 山崎 敦
太陽系科学研究系 教授 佐藤 毅彦

1. 「あかつき」と惑星気象学

1.1 惑星気象学における「あかつき」の位置づけ

金星は、地球とほぼ同サイズ・ほぼ同質量の地球型惑星でありながら、表面では温度約 740 K、圧力 9.2 MPa という極端な大気環境の惑星である。その厚い二酸化炭素大気と硫酸雲に覆われた姿は、地球の気候進化を考えるうえで重要な比較対象となる。金星大気では、自転周期(地球と逆向きに約 243 日)に対してはるかに短い約 4 日で上層大気が惑星を一周するスーパーローテーション(風速 100m/s)が卓越し、地球とは異なるエネルギー輸送・波動現象が生じていることが推測される。これらを明らかにするために計画されたのが、金星気候探査機「あかつき」(PLANET-C)である(図1)。

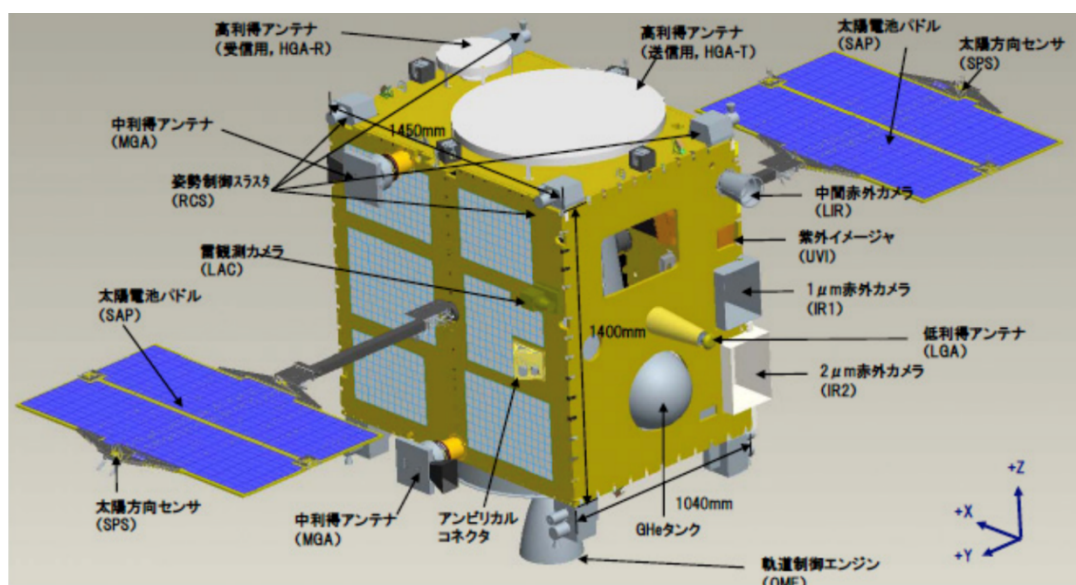


図1. 「あかつき」探査機の概要^[1]

1.2 惑星気象学とは？

地球の気象学は、気象現象の詳細な観測と物理法則での理解が両輪となり、さらに両者を数値計算という車軸がつなぎ、発展してきた。観測が理論の正確さを保証し、理論が観測の意味を読み解く、このルーチンによって、単に天気を観測して予報する学問ではなく、大気という流体の運動や熱・物質の輸送を物理法則で表現する学問となる。

しかし、宇宙には地球とはまったく異なる気候を持つ惑星が存在する。太陽系内にも、薄い大気と巨大砂嵐に特徴づけられる火星、大赤斑に代表される巨大渦や階層化した雲帯を有する木星、そして 100 m/s に達する速さの雲層をもつ金星など、特徴的な惑星が存在する。惑星気象学は、これら多様な気象現象を共通の物理法則で理解しようとする学問で、「あかつき」はそれを力学的な観点から切り拓くことを大目標とした。その上に、固体惑星と大気の相互進化や宇宙物質化学が加わると将来的には、惑星ごとの気候進化や居住可能性 (habitability) の理解へとつながる。

1.3 「あかつき」の戦略

「あかつき」の目的は、金星の気象現象の詳細な観測を実施することにより、金星の気象学を発展させることである。特に、力学的な解釈に着目し、スーパーローテーションをはじめとする大気大循環のメカニズムや雲の生成過程を解明することに注力した。つまり、化学的な解釈に着目した、欧州の Venus Express の科学目的と補完関係となる。「あかつき」が挑む科学テーマとして、次の 5 つを掲げた。

1. スーパーローテーションのメカニズムの解明
2. 子午面循環の構造の解明
3. 雲生成のメカニズムの解明
4. 雷の有無の観測的決定
5. 地表面放射率測定と活火山探索

観測の戦略は、金星赤道面の周回軌道からの多波長リモートセンシングによる厚い金星大気の三次元運動の可視化、とした。搭載機器は、5 台のカメラと電波科学のための超高安定発振器 (表 1) とし、異なる波長で異なる高度の大気を同時観測し、金星大気を三次元構造と捉え、各階層の運動や物質輸送を理解することを目指した (図 2)。1 μm カメラと 2 μm カメラは、各波長の赤外線観測から、水蒸気や雲粒、大気中一酸化炭素の分布を取得し、微細な雲の移動から風速ベクトルを導出する。特に 1 μm カメラは金星地表の熱放射を観測できることから、雲の大元になっていると想像される微量気体を放出する活火山の探索に挑んだ。中間赤外カメラ (10 μm) は、雲頂の温度分布を可視化し、波動や対流活動、夜側での風速を明らかにする。紫外イメージャは、二酸化硫黄や未知の物質の紫外線吸収観測を通じて風速や雲頂の変動を捉える。雷・大気光カメラは、高度 100 km 付近の酸素発光を観測し、昼夜循環や大気波動を可視化、雷放電の超高速撮影による時間分解した発光波形を観測する。さらに、電波掩蔽観測により、気温や雲中の硫酸蒸気の高度分布を取得する。これらの機器で取得されたデータは、緯度・経度にマッピングされ、風速ベクトル、雲量、雲頂温度、微量気体濃度

の二次元データとして解析される。また、数値シミュレーションと連携して解析するデータ同化手法(先に述べた観測と理論をつなぐ車軸がより強化された手法)をとることによって、金星大気の運動・物質輸送が初めて統合的に理解されることとなる。

表 1 搭載された科学観測機器

観測装置	検出器と視野角	観測波長	観測対象
IR1 (1 μ m カメラ)	Si-CSD/CCD 1024 x 1024 画素 視野角 12°	1.01 μ m (夜) 0.97 μ m (昼) 0.90 μ m (夜) 0.90 μ m (昼)	地表面・雲 水蒸気 地表面・雲 雲
IR2 (2 μ m カメラ)	PtSi-CSD/CCD 1024 x 1024 画素 視野角 12°	1.735 μ m (夜) 2.26 μ m (夜) 2.32 μ m (夜) 2.02 μ m (昼) 1.65 μ m (クルー ジング)	雲・雲粒サイズ 雲・雲粒サイズ 一酸化炭素 雲頂高度 黄道光
UVI (紫外イメージャ)	Si-CCD 1024 x 1024 画素 視野角 12°	283 nm (昼) 365 nm (昼)	二酸化硫黄 未知の吸収物質
LIR (中間赤外カメラ)	非冷却ボロメータ 320 x 240 画素 視野角 12°	10 μ m (昼/夜)	雲頂温度
LAC (雷・大気光カメラ)	8 x 8 multi-anode APD 視野角 16°	777.4 nm (夜) 552.5 nm (夜) 557.7 nm (夜)	OII 雷光 O2 Herzberg II 大気光 OI 大気光
USO (超高安定発振器)	—	8.4 GHz	気温・硫酸蒸気の高度分 布(電波科学)

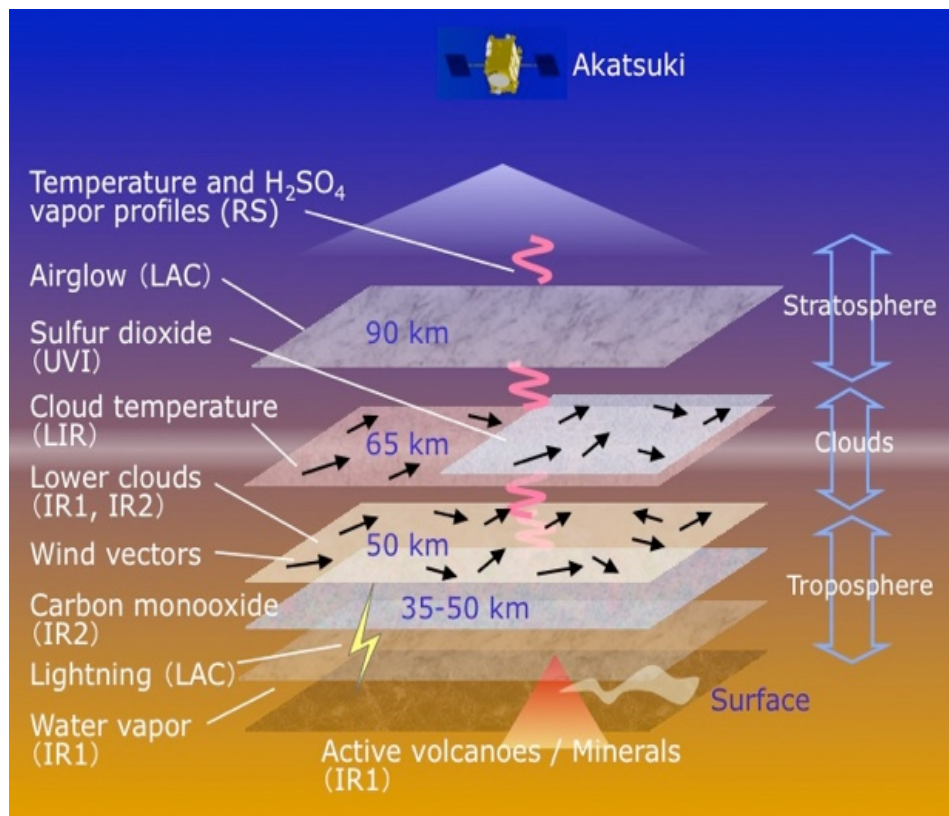


図2.「あかつき」の観測戦略^[2]

2. 最初の軌道投入運用まで

2.1 打ち上げビークルの変更

M-V ロケットの退役に伴い、打ち上げビークルが H-IIA ロケットに変更された。「あかつき」にとっては、構造設計がほぼ完了した段階での変更であり、打ち上げ中の振動条件が設計よりも厳しくなることが判明した。H-IIA ロケットにとっては、それまで経験のない最軽量級探査機の惑星間空間への輸送という初の試みとなる。振動条件を緩和するためには 800kg の追加質量が必要であることが判明し、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」とその搭載アダプタ、かさ上げアダプタ、4 機の小型衛星が、条件緩和の手段として活用された。さらに、H-IIA ロケット、「IKAROS」、「あかつき」の 3 チームで何度も協議を重ね、「IKAROS」搭載構造の剛性を調整して動吸振効果を持たせることにより、最終的な「あかつき」の振動条件を計画値内に収束させることができた。おかげで、2010 年 5 月 21 日に、大型液体燃料ロケット打ち上げによる初のペイロードの惑星間軌道投入が成功し、第 2 段エンジンごと地球重力圏を脱出した。

2.2 1 回目の金星周回軌道投入 (VOI-1)

2010年12月7日に、1回目の金星周回軌道投入運用(VOI-1)を実施した。図3に VOI-1 の運用計画と実際を示す。12月7日8時49分(日本時間)に軌道制御エンジン(OME)の噴射が開始した。103秒後に計画通り、「あかつき」は地球から見て金星の裏側に入り、通信は中断。その後、金星の陰から出る9時12分すぎに通信再開の予定だったが、電波を捉えることができなかった。ここで、「あかつき」の捜索に、米国航空宇宙局(NASA)深宇宙ネットワーク(DSN)の技術力という多大なるご支援をいただいた。当初から異常時に備えて配備されていた DSN マドリッド局で微弱な信号が発見され、続く DSN ゴールドストーン局では軌道決定もなされ、1日後の臼田局での確実な「あかつき」捕捉につながった。結果として、OME 噴射中にスラスタンズルが破損し、計画の約2割の減速しか達成できず金星を通り過ぎてしまったこと、すぐには金星周回軌道に戻す手立てがないことが判明した。VOI-1 は失敗に終わったが、探査機は失うことはなかった。もし、NASA DSN の支援がなければ、探査機全てを失っていただろう。

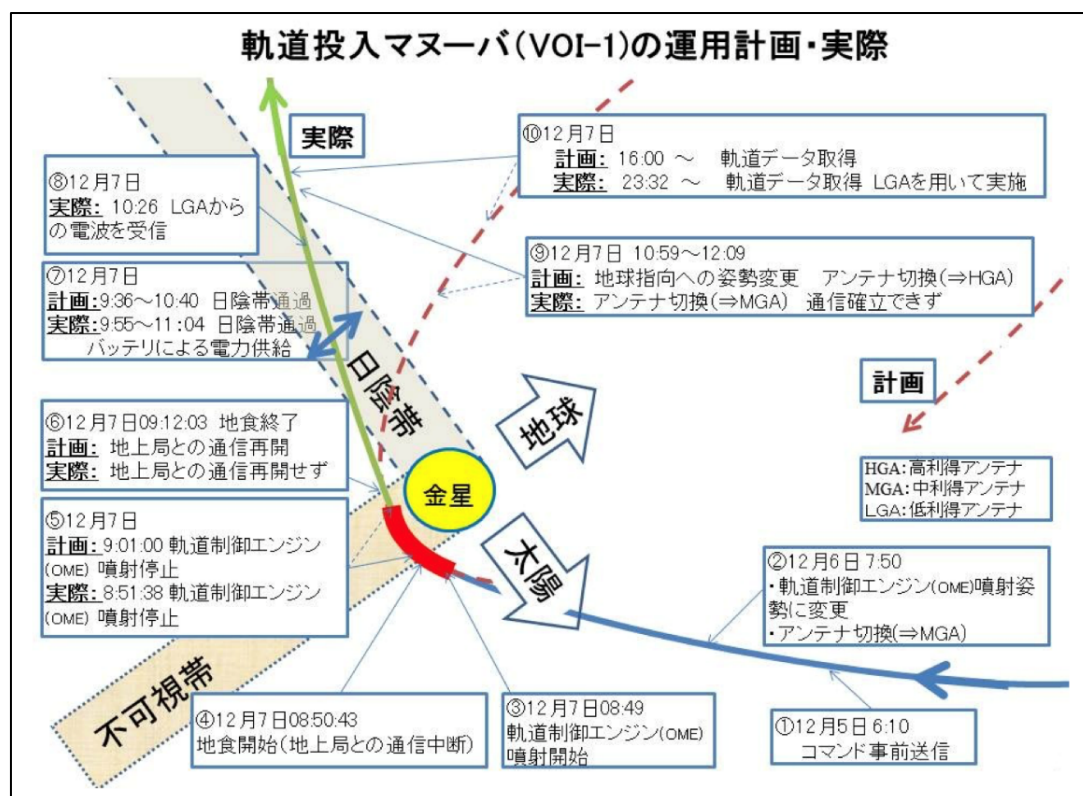


図3. 軌道投入マヌーバ(VOI-1)の運用計画と履歴^[1]

3. リカバリ案

3.1 リカバリ軌道

翌日臼田局で受信したテレメトリデータは、OME 以外は健全そのもので、ミッションは失われたわけではなかった。ここであかつきチームは、前代未聞の金星

周回軌道再投入 (VOI-R1) に挑戦する決意を固めることとなる。「あかつき」を再び金星に届けるために、金星より内側を通して金星に再び追いつく方法と、金星より外側を通して金星に追いつかれる方法があるが、燃料をすでに一部使用していたため、前者を選択し、2015 年 11～12 月の金星再会合へ向けて軌道変更を進めることとなった(図4)。

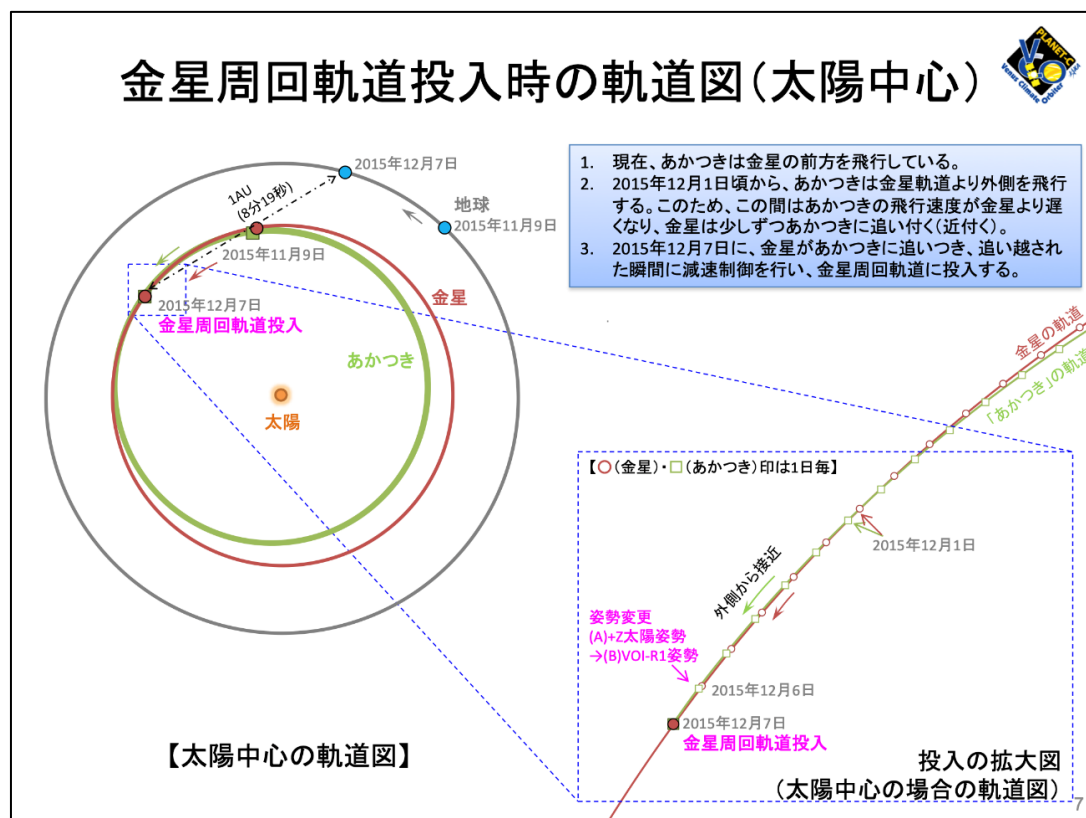


図4. 金星再会合に向けたリカバリ軌道^[3]

3.2 金星周回軌道の選定

当初設計であった一周回 30 時間の軌道投入の実現は、OME 再点火の可否にかかっていた。2011 年 9 月に OME 点火試験を実施したが、想定推力は発生しなかったため点火不可能と判明し、姿勢制御用エンジン(RCS)で周回軌道投入を試みることで、周回軌道は長楕円軌道にすることを判断した。直後の 10 月には、OME 点火にのみ使用し、RCS 噴射には使用しない酸化剤を投棄し、探査機重量を削減した。続く 11 月には、RCS 長時間連続噴射による推力を実測した。

一方、周回軌道が逆行軌道に投入できるか検証を開始した。逆行軌道は、科学チームからの要望で、金星の自転方向と同じ向きに「あかつき」を周回させることで、金星大気との相対運動が遅くなり、より精度が高い観測が可能となるからである。逆行軌道に投入された「あかつき」を金星に落下させないようにするための

シミュレーション解析を無数に実施し、太陽重力による摂動を考慮して、周回軌道投入のタイミングを選択すると成立解が得られることが判明し(図5)、軌道計画チームの努力の賜物となった。

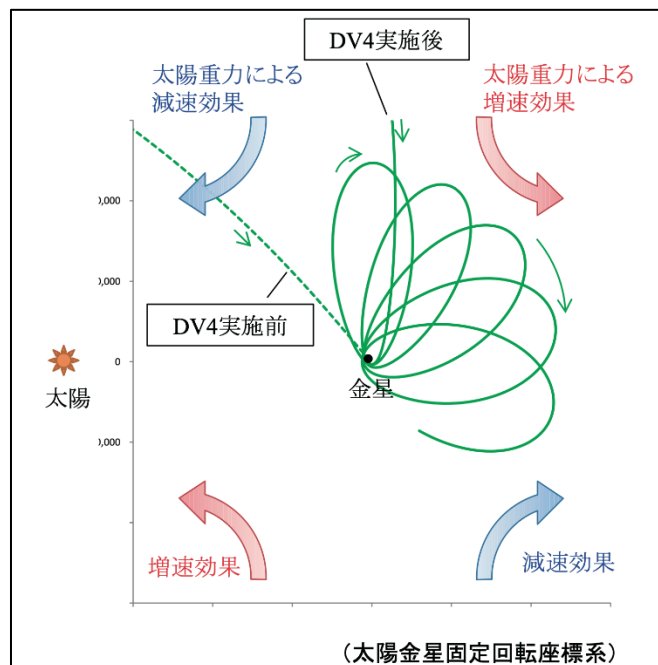


図5. 逆行軌道投入の検討結果^[4]。右上と左下の領域では、太陽重力による増速効果が期待されるため、逆行軌道でも金星に落下しないことが判明した。

3.3 熱対策

太陽を周回するクルージング期が5年間となった「あかつき」の課題は熱対策だった。金星軌道での太陽からの熱入力は地球軌道の2倍であり、これに合わせて熱設計されていた。ところが、クルージング期の軌道は金星軌道より内側(最も近い時で0.63AU)を通るため、太陽からの熱入力には地球軌道の3倍となった。つまり、「あかつき」が経験する熱入力は設計の1.5倍となり、太陽に最接近する回数も5年間に9回を数えた。設計では想定されていなかったこの厳しい熱環境に耐えるため、熱に強い面(+Z面)を太陽に向け続ける方針をとったが、当然のことながら表面の塗装や材料は急速に劣化した。ただある程度劣化したところで進行は止まり、金星周回軌道に入った後も、温度データを継続して細かく確認し、さらなる劣化進行がないことを慎重に見極めながら運用を続けた。ここには、丁寧な「あかつき」の製造工程が背景にあったと考えられる。製造マージンを残した丁寧な製造工程があったからこそ、結果的に、想定の1.5倍の熱入力にも耐えられる探査機に仕上がったのだろう。

4. 2回目の軌道投入結果、それに応じた観測計画の変更

4.1 2 回目の軌道投入 (VOI-R1)

VOI-1 から 5 年後の 2015 年 12 月 7 日に、VOI-R1 を実施した。本来は短時間の噴射で探査機の姿勢を制御するために使用する RCS を、同時に 4 台、約 20 分間連続して噴射するという、設計目的外の方法で挑戦した。結果は、周回軌道投入に成功、「あかつき」は、遠金点 38 万 km、軌道傾斜角が変化する長楕円軌道に投入された。

4.2 観測計画

周回軌道での観測運用を成立させるためには、太陽電池への太陽光入射、地球との高利得アンテナでの通信、搭載カメラでの金星観測を、最低限の燃料消費で実施する必要がある。「あかつき」は Y 軸周りの回転でこれらを成立させる設計であるため、「あかつき」から見た太陽・地球・金星の三つの方向が、Y 軸に垂直であること、つまり、ある面(仮想面)上に存在することが成立条件である。当初の設計軌道では、軌道傾斜角を小さくし、Y 軸を軌道面に垂直に保つと成立する条件である。ところが、実際に投入に成功した軌道では、仮想面は刻一刻変わるものとなり、かつ、成立する仮想面の解が存在しないという時期もあった。そのため、Y 軸方向を事前に自動的に決定することは難しく、測定された軌道に合わせて細かく調整する手作業が必要となった。まず予測軌道に合わせてラフな仮想面計画を立て、次に Y 軸方向をその面垂直方向に合わせ、観測計画を立案し、最後に詳細な検証を実施する手順が必要となった。運用チームの技術と工夫が、計画立案ツール(PCNAV)の大幅な改修と確実な実装につながり、金星観測の成立として実を結んだ。

4.3 特殊イベント運用(長時間日陰運用と Y 軸反転運用)

当初設計では、日陰時間は最大 90 分という条件であり、バッテリー容量もこの条件で決められた。しかし、実際の軌道ではこれを大きく超える長時間日陰が発生することとなった。そこで、長時間の日陰が発生する直前に、バッテリーの満充電を実施するとともに、探査機全体を昇温し日陰中はヒーター電力を低減化する準備を行い、電力不足を防いだ。

また、Y 軸を反転するイベント運用を任意の時期に実施する必要性が生じた。-Y 面に太陽光を当てないという搭載機器の熱設計条件から、「あかつき」から見た太陽の緯度に応じて探査機 Y 軸を反転させる運用が必要であった。当初の周回軌道であれば、実施するタイミングの予測が正確で、毎回同じコマンド列で実行できるように設計されていた。実際には、仮想面に合わせた Y 軸制御のため、必要な Y 軸反転運用の実施時期・反転角度・修正すべきパラメータが毎回異なる、手間のかかる作業となった。

これらの特殊イベント運用にも手作業が含まれるため、人為的ミスを防ぐ目的で、長時間日陰運用・Y 軸反転運用とも、PCNAV に改めて実装し直し、正確な計画作成機能を新たに整備し、年に 1～2 回の不定期イベントであったとしても、安全かつ確実なコマンドを作成できるようにした。

5. 「あかつき」の理学成果：ノミナル

「あかつき」の科学目標は図6に示すとおり、運用のフェーズに伴い、「発見と軌道制約からのリカバリ」、「長期変動トレンドの検出」、「長期変動要因の識別」と進化した。各フェーズの科学目標を A) から E) 項目として示している。当初考えていたノミナルの科学目標は、軌道制約による観測データ量の減少もあり、定常運用と後期運用 1 の一部の期間で達成された。

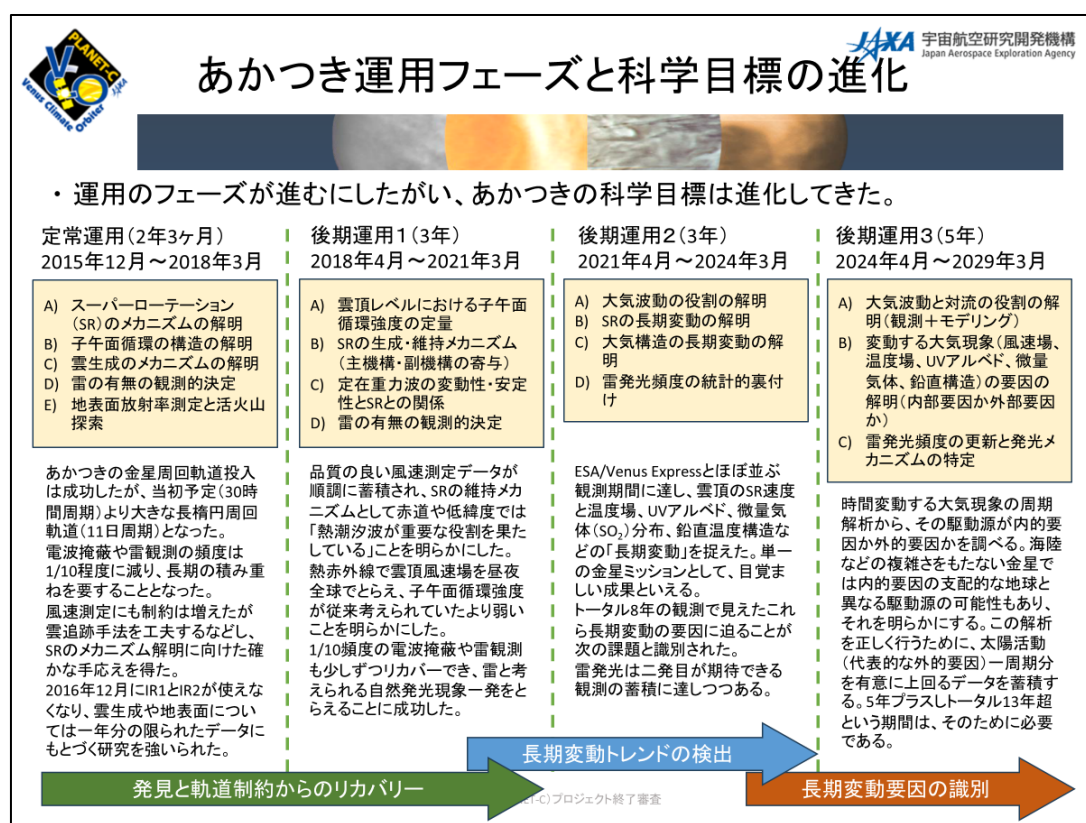


図6. 「あかつき」の運用フェーズと科学目標の進化^[2]

5.1 定常運用期間

まず、2016年12月初旬までに4台のカメラを用いて雲頂付近の風速分布を取得し、複数高度面における風速場を導出し、運動量輸送の評価を可能とした。その結果、A)とB)に関わる「スーパーローテーションおよび子午面循環を規定するバランス」を、定量的に示した。IR2カメラによる大気窓領域の夜面観測では、雲

層の中・下部の大気運動を捉え、特に 2016 年 7～8 月の観測データから、赤道付近で西風が強まる「赤道ジェット」を発見した。また、電波掩蔽法による大気観測では、金星赤道付近から低緯度域において高度 40 km 付近までの大気温度構造の導出に成功し、金星下層大気の理解が進展した。

また、C)とE)の雲粒子の生成・性質に関する成果として、金星雲層からの反射光強度について位相角依存性を詳細に解析し、小位相角で確認される「後光 (glory)」観測から雲粒子サイズを推定した。これにより、太陽周回中の 2011 年および金星周回軌道入り後の 2016 年における雲粒子サイズの比較が可能となり、長期的な雲物理環境の変動を捉えた。また、IR1・IR2 カメラによる大気窓領域の夜面観測を継続し、雲粒子サイズと地表面放射率推定を可能とするデータを取得した。

D)の雷観測課題については、LAC がノミナル運用を開始した 2016 年 10 月から 2017 年 8 月までの期間に、雷発光イベントは 1 件も検出されなかった。過去の発生頻度^[6]から観測時間と観測領域の総量に基づいた統計的推定からは、LAC が雷発光を少なくとも 1 度捉えられる確率は 35%であった。しかしこの期間の雷発光は未検出であるという結果は、金星における雷発生頻度の再評価につながる重要な知見となった。

さらに、想定外の重要な成果として、アフロディーテ大陸上空において、南北方向に約 1 万 km に及ぶ定常的な弓状巨大重力波構造が LIR 画像から検出された。これは、金星表面の地形が重力波を介し上層大気へ直接影響を及ぼすことを示した初めての観測的証拠となった。また、この重力波が午後から夕方の地方時だけに発達するという特徴は、従来の金星気象学では説明が難しい現象でもあった。

金星観測に加え、太陽コロナの電波掩蔽観測でも成果を挙げた。クルージング期の 2011 年 6 月の外合時には、プラズマ密度変動から音波の分布と太陽風速度を導出し、コロナ加熱および太陽風加速メカニズム解明への重要な手がかりとなった。さらに、2016 年 6 月の外合では、従来の右偏波観測に加えて左右両偏波での観測も実施した。

なお 2016 年 6 月の外合後、「はやぶさ2」からの技術継承により、観測画像のサブフレーム (Region of Interest = ROI) をデータレコーダへ保存し地上へ下ろすことができるようデータレコーダ統合デジタルエレキ (DE) のプログラムが改修され、観測プログラムの定型化と合わせデータの取得効率が大きく向上した。また、2016 年 12 月初旬に IR-AE (IR1、IR2 を制御する共通エレキ) が不調となり、以降この二つのカメラは残念ながら休眠となった。

5.2 後期運用1

まず、後期運用1のフェーズで設定した課題 A)について、UVI 観測から昼間の熱潮汐波の振幅に比べて子午面循環の強度が1桁以上小さいことを示した。一方、LIR 観測から得られる昼夜全球の解析については、LIR の画素数が他のカメラに比べ著しく少ないため、解像度の不足から信頼度の向上を図る必要があり、引き続きデータの蓄積と解析を進める必要があることが明らかとなった。

次に、課題 B)については、UVI や LIR 観測により、低緯度では熱潮汐波がスーパーローテーション(SR)を維持する主要なメカニズムであることを識別した。一方、中高緯度域については、その他の波動との関連性について課題が残った。

また、課題 C)に関わるスーパーローテーションの年単位の長期変動を、「あかつき」と Venus Express (VEx) の両者のデータから捉えることに成功した。スーパーローテーションの速さと雲のアルベドの長期変動の間に興味深い相関が見られたが、断定的な結論には時期尚早であり、さらに長期のデータ蓄積が必要であるとされた。

課題 D)の雷現象については、2020 年 3 月に LAC 観測により金星大気中の自然発光現象を捉え、雷・流星・その他の発光源を含めた多角的な検討を進めた。

本期間の成果の特徴として、各種現象の長期変動トレンドが観測され始めた点が挙げられ、結果の信頼性向上や断定的な結論を得るためには、さらなる長期データの蓄積が必要であることがあきらかとなった。

6. 「あかつき」の理学成果：ノミナル成果を踏まえて実施した延長計画におけるもの

6.1 後期運用2

後期運用2のフェーズで設定した課題 A)について、UVI・LIR・RS(電波科学)を用いて、金星大気における熱潮汐波の三次元構造およびその時間変化を明らかにすること、熱潮汐波以外の波動がスーパーローテーションに果たす役割を特定すること、金星特有の Y 字模様の起源を解明することを目標に掲げた。その結果、UVI・LIR 観測による雲追跡により、熱潮汐波の構造とスーパーローテーションへの寄与を明らかにした。また、UVI の風速データの長期時系列解析により、Y 字模様と関連する金星大気で代表的な惑星規模の波動である 4 日波・5 日波の発生源の高度について新たな示唆を得た。気象学研究では、良質で高密度の時空間カバレッジをもつ観測と現象再現性の高い数値シミュレーションの相互進化が鍵であり、「あかつき」データの蓄積が前者を満たす一方、数値計算グループも大いに活躍した。特に「データ同化」の金星大気への応用を世界で初めて成功させたのは特筆すべきことである。

課題 B)について、スーパーローテーションの長期変動の有無を判断し、加速・減速などのトレンドを明らかにすること、UV アルベドの長期変動の有無とそのトレンドを把握すること、SO₂ 濃度や太陽活動との関連性を調べることを目標に掲げた。結果、スーパーローテーションの速さに年～十年スケールの長期変動が存在することを明確に示すことに成功した。また、UV アルベドの長期的変化を検出し、雲頂 SO₂の時間変動についても初期的な成果が得られた。時系列データの変動をスペクトル解析したところ、どこか特定の周波数が卓越する(外部に要因があることを示唆)のではなく、ブラウンノイズ的なスペクトルが得られている。これは金星大気の長期変動が、惑星自身がもつ自励的な振舞いによって引き起こされている可能性を示唆している。

課題 C)について、RS 観測を用いて、金星大気温度構造の長期的変動の有無およびトレンドを明らかにすること、電離層プロファイルの太陽活動依存性を解明することを目指した。結果、大気温度構造と硫酸蒸気混合比の長期変動を捉えることに成功した。特に Venus Express の VeRa と合わせた長期変動は、そのメカニズムを今後理解してゆく上で貴重な情報となった。また、電離層プロファイルについては継続的にデータを蓄積した。

課題 D)に関して、LAC 観測を継続したが、追加の発光現象を捉えられなかった。これまでの雷発光頻度の上限値を更新しつつあり、金星の雷発生頻度に関する従来の推定値を再評価につながった。

6.2 後期運用3

後期運用3のフェーズで設定した A)～C)の科学目標に対して、本期間のデータ蓄積とデータ同化手法により、長期変動要因の識別を目標に掲げたが、開始直後通信が途絶したため未達成に終わった。

7. 「あかつき」の工学成果

過去の探査機開発で培われた技術の継承と改善を重ねながら、深宇宙探査技術の信頼性と性能を大きく向上させた。例として、通信技術、推進系、観測機器・データ処理、運用技術の柔軟性について記載する。

7.1 通信技術

ラジアルライン給電スロットアレイアンテナ(RLSA)の採用した平面高利得アンテナを開発し、パラボラアンテナより軽量かつ熱の影響を受けにくいアンテナ構造

を実現した。「あかつき」以降の軽量化が求められる探査機で標準的技術として利用されるようになった。

ISAS 開発のデジタルトランスポンダを初めて搭載した。NASA/JPL 支援下で通常のダウンリンク信号を用いて、現在では惑星周回軌道投入に必要な技術である DOR を実証し、惑星周回投入を成功に導いた。また、今では普通に使われている再生測距方式が初めて搭載され、実証、その有用性を示した。このトランスポンダは、「IKAROS」「はやぶさ2」「BepiColombo/MMO」に提供され深宇宙探査のスタンダード技術となり、「DESTINY+」では次世代版が開発された。

7.2 推進系

推進供給システムの信頼性向上が成果として挙げられる。「あかつき」初回軌道投入失敗の原因解析を通じて設計手法が改善され、その知見は「はやぶさ2」「SLIM」など後続ミッションの推進系設計に活用された。また、残推進量推定技術が発展し、運用実績データと試験データを組み合わせた高精度推定手法を構築し、SLIM のブローダウン運用に適用したことで、推力推定精度を向上させピンポイント着陸に貢献した。

7.3 観測器技術の継承

非冷却ボロメータ型中間赤外カメラ LIR が、小惑星探査に適用し、「はやぶさ2」搭載の TIR へと発展した。さらに、この観測器の技術は、ESA の二重小惑星探査計画（Hera）や小惑星アポフィス探査（RAMSES）にも展開され、中間赤外観測技術の国際的発展に寄与し、LIR を基礎とする科学の進展がますます見えてきた。また、ミッション観測機器の制御と画像処理システムは、「あかつき」のデータレコーダ統合デジタルエレキ DE で確立し、「はやぶさ2」搭載デジタルエレキ DE に継承され、多数のイメージセンサを扱う高機能な処理系が構築された。さらに、LIR で開発された DE 間との電氣的インターフェースのアーキテクチャは、現在もスタンダードに採用されている。

7.4 運用技術の柔軟性

1 回目の金星周回軌道投入（VOI-1）で軌道制御エンジン（OME）を失ったが、姿勢制御用エンジン（RCS）での金星周回軌道投入に成功するという、惑星探査史上まれにみる失敗からの復活を遂げた。運用の技術と工夫に裏付けられた柔軟性の高い運用技術として、今後の探査機運用に活用できる。

8. 将来発展の観点

現在進行中の課題として、データ同化手法をさらに発展させてゆくことが挙げられる。これまでに「雲頂風速場」データを同化する試行、「雲頂温度場」データを同化する試行が手がけられている。より多くのデータ同化実績を積み重ねて、「あかつき」観測データの解析研究を深化させることができよう。特に、大気波動と対流が金星大気の基本構造（風速場、温度場）形成に果たす役割を明らかにすることが重要な柱となる。データ同化のプロダクトである再解析データをしっかりアーカイブし、多くの気象研究者の使用に供し続けることも「あかつき」チームが引き続き負う責務である。

将来的には系外惑星研究への応用が鍵となるであろう。系外惑星の発見からもたらされる研究が成熟期を迎えている昨今において、今後の重要課題のひとつは、系外惑星の大気に関わる研究となる。重要なポイントは、化学的な大気組成と動力学的な大気大循環と考える。金星研究者が培ってきた、Venus Express での化学的な解釈と、「あかつき」が挑んだ力学的な解釈の流れを汲んだ展開である。

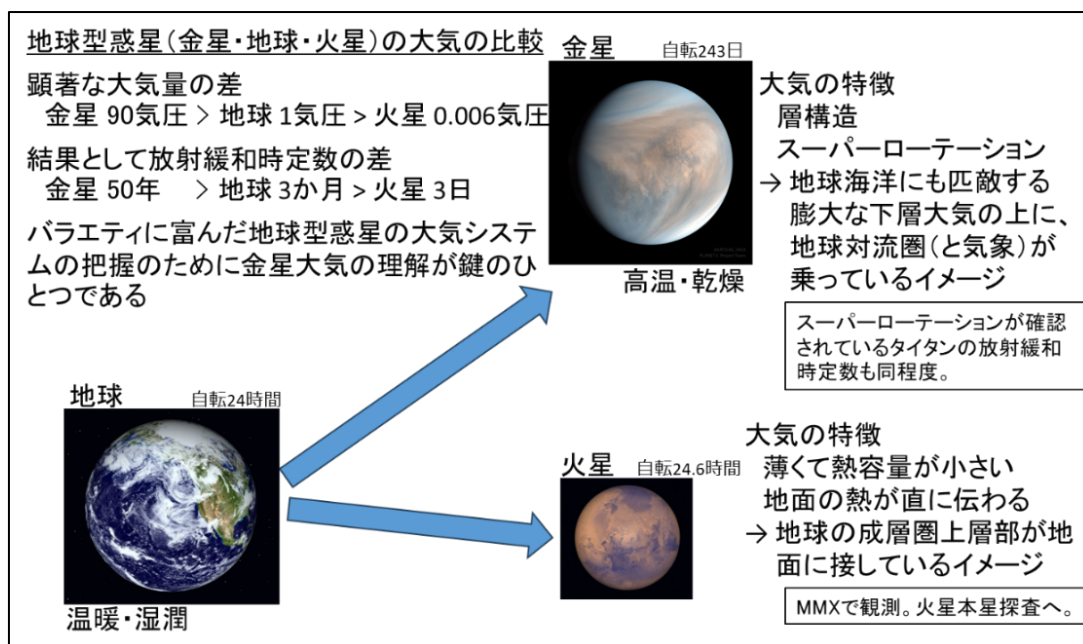


図7. 地球型惑星の大気の比較

大気組成と大気大循環について、地球と金星の比較は次のように知られている。地球大気は 78.1%の窒素と、20.9%の酸素、1%程度の水蒸気、そして微量の二酸化炭素・メタンなどからなる(松田, 2014)^[6]。一方で、金星大気は 96.5%の二酸化炭素と、3.5%の窒素、そして微量の水蒸気・アルゴンなどからなる(松田, 2014)^[6]。海はなく、大気中の水蒸気は 0.003%程度とかなり乾燥している。また、大気量の差も顕著である。地球表面では、気圧は 0.1MPa で、平均温度は約 290K であり、金星表面では、気圧 9.2MPa に、温度約 740K に達する。これは、放

射緩和時定数の差にも現れる。放射緩和時定数は、地球で約 3 か月であるが、金星では約 50 年とされる(図7)。

大気の大きな流れとしては、大気と惑星表面の間には摩擦が働くので、一義的には自転から大きく外れない運動をするものと予想される。地球の場合はまさにそのケースで、偏西風は 30 m/秒程度であっても、これは赤道での自転速度 460 m/秒の 1 割にも満たない。一方、金星の自転周期は 243 地球日と長く、赤道での自転速度は 1.6 m/秒と極めて遅いが、表面から 70 km 上空の雲の高度を中心に 100 m/秒もの速さで大気が自転方向に流れていることを探査機観測が明らかにした^[7]。約 4 地球日で 1 周という、実に、自転の 60 倍もの速さである(スーパーローテーション)。

この特異な大気運動であるスーパーローテーションを解釈するキーワードの一つが、熱収支である。地球では、太陽光の 31%がアルベド、49%が地球表面で吸収され、残りの 20%が大気に吸収されるが、金星では、太陽光のアルベドが 76%、3%が金星表面に到達し、残りの 21%が厚い雲に吸収される^[8]。

「あかつき」の成果から、厚い雲で吸収される 21%の太陽光が、熱潮汐波を生み出し、少なくとも赤道をはさむ低緯度地域ではスーパーローテーションを維持する主要なメカニズムであることが明らかとなった。熱収支が大気大循環を制約する要因であることが観測的に裏づけられたのである。しかしながら、「あかつき」の長期観測によって、この大気循環は変動することも明らかとなり、太陽の熱入射(外的要因)だけでは説明がつかず何らかの内的要因があることが示唆されている。このことは、系外惑星観測で現状評価可能な、惑星大気の大気組成や中心星と惑星大気の熱収支だけでは、系外惑星の気象現象は十分には説明できないことを意味している。

近年のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)などの系外惑星観測が進み、スペクトル・光度変動が取得されつつある。将来の系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画(ARIEL)などの開発も進んでいる。「あかつき」の多波長観測の成果は、系外惑星の気象現象を理解する上で、惑星がもつ内的要因に関する研究・考察の必要性を示唆するものとなる。

9. 学術研究以外の観点でのインパクト

9.1 継続している寄稿

日本惑星科学会の学会刊行物「遊・星・人」(季刊)^[9]に、あかつき(PLANET-C)の紹介「一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦」を 2007 年から長期間連載中である。科学の狙いや科学的成果、搭載機器開発などの報告だけでなく、金星周回軌道への投入運用・再投入運用や後期運用期間の長時間日陰時の熱系・電源系運用などの工学的成果の報告も 10 件程度含まれる。高校生が理解でき

る内容で公開されているため、一般向け解説の意味を持った。サイエンスコミュニティへの活動報告の意味合いも兼ねていて、大学生・大学院生の進路選択にも効果があった。

9.2 「あかつき」トークライブ

2012 年 8 月から 2015 年 10 月にかけて相模原市立博物館の協力を得て、隔月偶数月に計 20 回、「あかつき」の紹介を兼ねた現状報告イベントを開催した。金星周回の再投入軌道が決定した後から企画し、再投入運用の直前まで開催した。太陽を周回する 5 年間のクルージング期においても、「あかつき」の挑戦を忘れ去られることなく継続的に注目を集め、軌道再投入の実施を後押しする要因となった。

9.3 X(当時 twitter)での発信

打ち上げ前の 2010 年 4 月開始、現在も継続中。フォロワー数は約 6.6 万(2025 年 11 月現在)。「あかつき」の最新情報・日常情報を随時発信し、一般向けのコミュニケーションツールとして活用されている。開設当初は、宇宙科学分野における広報活動として SNS を活用し始めたばかりであり、衛星・探査機による情報発信は「イカロス」のみが実施している状況であった。時を同じくして、「はやぶさ」がアカウントを開設し、複数の探査機チームによる交流が広報活動の活性化につながった。チームの声が直接公開されることで、信頼できる情報源として認知度が向上した。とりわけ、チームが直接情報を発信する場を設けたことは、日常業務を文章化することを促し、活動内容を客観的に見直す契機にもなった。



図7. Xプロフィール画面^[10]

9.4 TV 番組・教育教材・一般書・児童書

複数のメディア・書籍に題材として取り上げられた。NHK のサイエンス ZERO、コズミックフロント☆NEXT、逆転人生や明治図書の道德教育、文溪堂の書籍な

ど、科学技術テーマだけでなく、プロジェクトに取り組む姿勢が道德教育のテーマとしても取り上げられた。また、小学校 4 年生「国語」教科書（光村図書）の「この本、読もう」コーナーにも文溪堂の書籍が紹介された。

9.5 一般からのサポート

一般のみなさんからの数多くの応援にも支えられた。打ち上げ前の「お届けします! あなたのメッセージ 暁の金星へ」キャンペーンには、約 26 万人分もの思いが寄せられた。思いが焼き付けられたアルミプレートは、探査機の重量バランスを調整するための「バランスウェイト」として機能し、金星に届けられた。

1 回目の軌道投入失敗の後には、たくさんの応援メッセージ、応援キャンペーンで SNS を含めて励ましをいただいた。一般の有志の方々から 1 週間で 200 人分もの数をあつめた応援のイラストやメッセージが印刷された 90cm × 120cm の寄せ書きタペストリーが、閉館 3 週間前の JAXA 情報センター「JAXA i」が企画した「千のあかつき」キャンペーンから”数“千のあかつきペーパークラフトが、届けられた。

失敗できないという心地よいプレッシャーとともに、チーム全体前向きな気持ちを持つことができた。おかげで 2 回目の金星周回軌道投入成功につながった。

10. まとめ

金星探査機「あかつき」は、バラエティに富んだ気象現象を共通の物理法則で理解しようとする惑星気象学を力学的な観点から切り拓くことを大目標としたミッションであった。地球型惑星の大気システムの理解のために金星大気の研究が鍵のひとつであると考え、5 台の多波長カメラと電波掩蔽により金星大気の三次元構造観測に挑んだ。

紆余曲折を経験したが、設計想定外の課題を柔軟な運用上の工夫で克服し、姿勢制御用エンジンのみを用いた前例のない方法で金星周回軌道への再投入に成功した。

科学成果として、赤道ジェットや弓状巨大重力波構造など数多くの発見、熱潮汐波がスーパーローテーション維持の主要要因であることなど、金星大気力学の理解を大きく進展させた。スーパーローテーションやアルベドに年～十年スケールの長期変動が観測され、データ同化の金星大気への初適用を達成しその効果を証明した。

工学的には、平面アンテナ・トランスポンダ・推進系設計・観測機器技術が後続探査機へ継承され、深宇宙探査技術の向上・実証に貢献した。

長期変動の原因を判別するために、外的要因と内的要因を切り分けを始められる段階での通信途絶、運用終了となったが、太陽との熱収支だけでは説明できない長期変動もとらえ始めており、将来の系外惑星大気研究にもつながる知見が蓄積された。

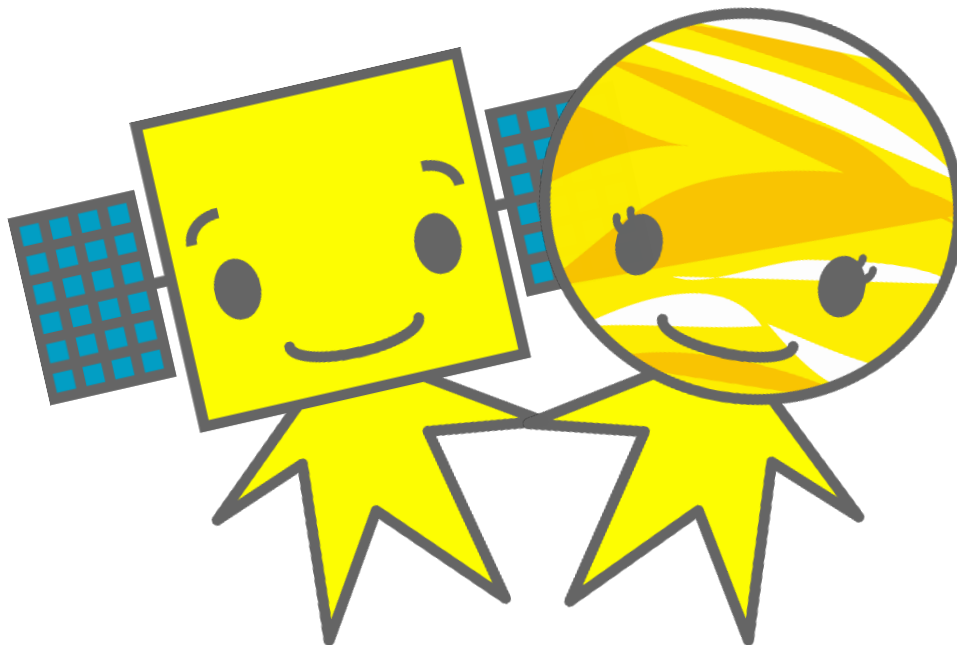
さらに、長期連載、トークイベント、SNS 発信、書籍化など多様な形で社会的影響も大きく、失敗から再挑戦に至る過程は教育的価値も高く評価された。広く一般からの応援は、再投入成功を支える精神的基盤となるとともに、客観視する契機にもなった。

謝辞

本プロジェクトが無事に任務を完遂し、所期の目的を達成できましたのは、ひとえに関係各位からのかけがえのないご支援によるものです。長年にわたるご支援、ご協力、ご声援に、心より深く感謝申し上げます。

参考資料

1. 「あかつき」の金星周回軌道投入失敗の状況について, 2010 年 12 月, 宇宙開発委員会報告資料.
2. あかつき(PLANET-C)プロジェクト終了審査資料, 2025 年 10 月, 宇宙理学委員会審査資料.
3. 金星探査機「あかつき」の金星周回軌道投入及び観測計画について, 2015 年 11 月, 金星探査機「あかつき」金星周回軌道投入に関する説明会資料.
4. 廣瀬ほか, 一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その 24 ~再び金星へ~, 2015 年, 日本惑星科学学会誌「遊星人」, Vol.24, No.2.
5. Hansell, S. A., et al., 1995, Icarus, 117, 2, 345, doi:10.1006/icar.1995.1160.
6. 松田, 2014 年, 気象学入門, 東京大学出版.
7. Schubert, G., 1983, Journal of Geophysical Research, 85, A13, 8007, doi:10.1029/JA085iA13p08007.
8. Limaya, S. S., 2018, Space Science Reviews, 214:102, doi:10.1007/s11214-018-0525-2.
9. 日本惑星科学学会誌「遊・星・人」, 総目次, www.wakusei.jp/book/pp/CumulativeContents.html.
10. X アカウント, 「あかつき」チーム, @Akatsuki_JAXA.



「あかつき」に関する情報は以下のサイトからご覧いただけます。

<https://akatsuki.isas.jaxa.jp>