

參考資料

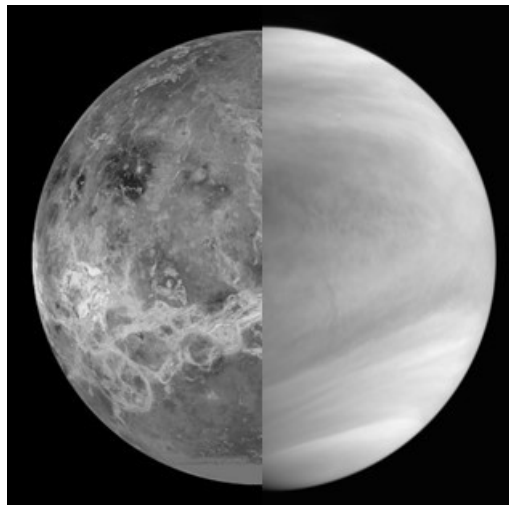
金星の科学

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°C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

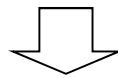


ベネラ着陸機による地表の写真

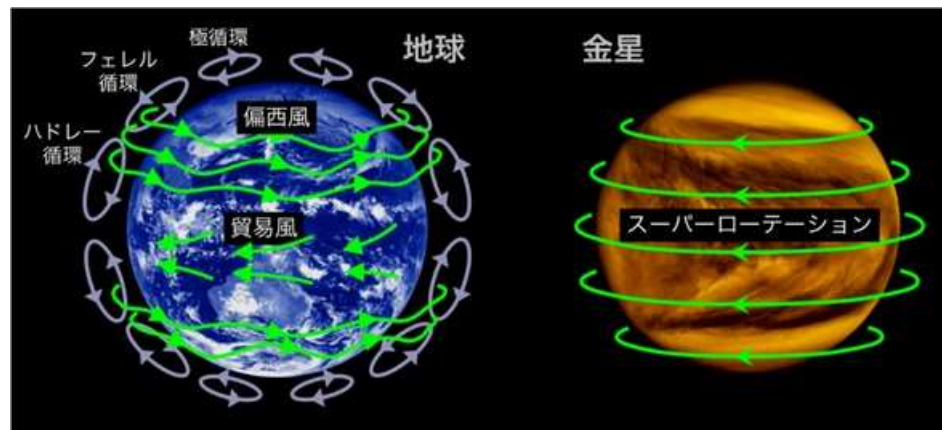
金星の気象学の問題

- 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

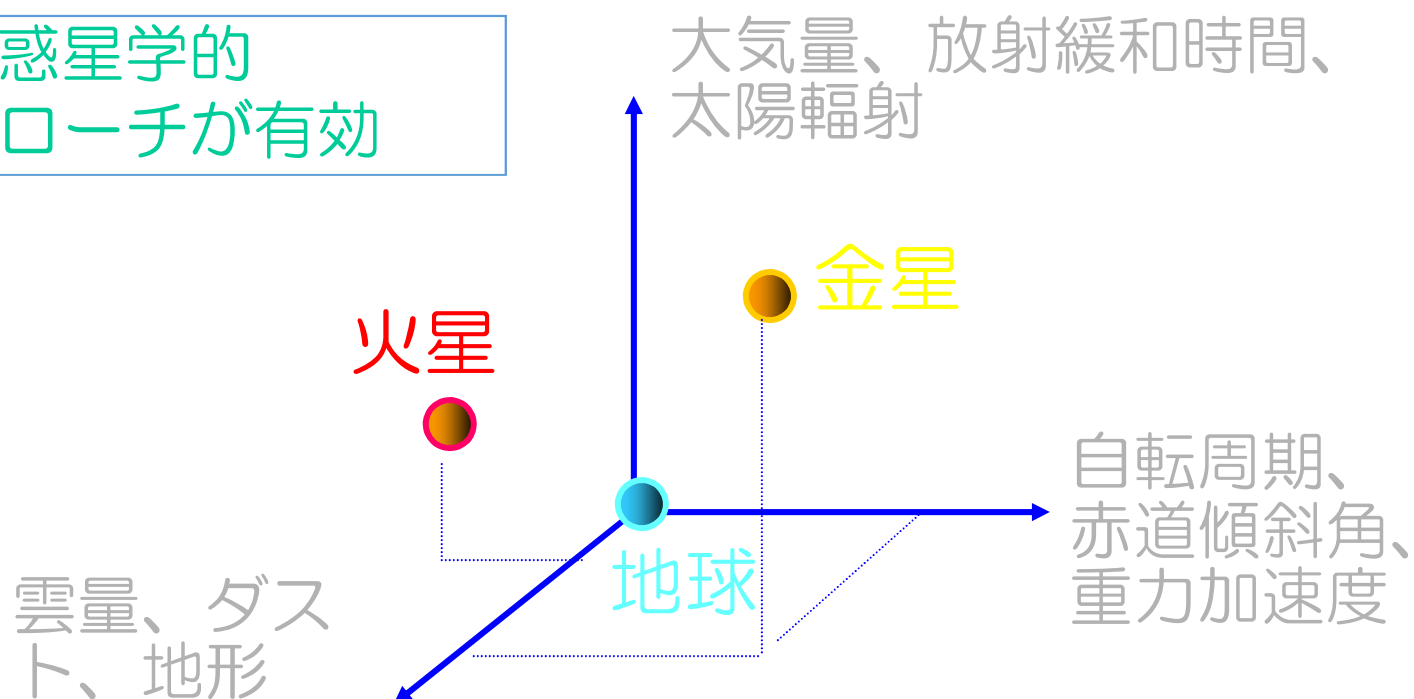
「あかつき」の方向性

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

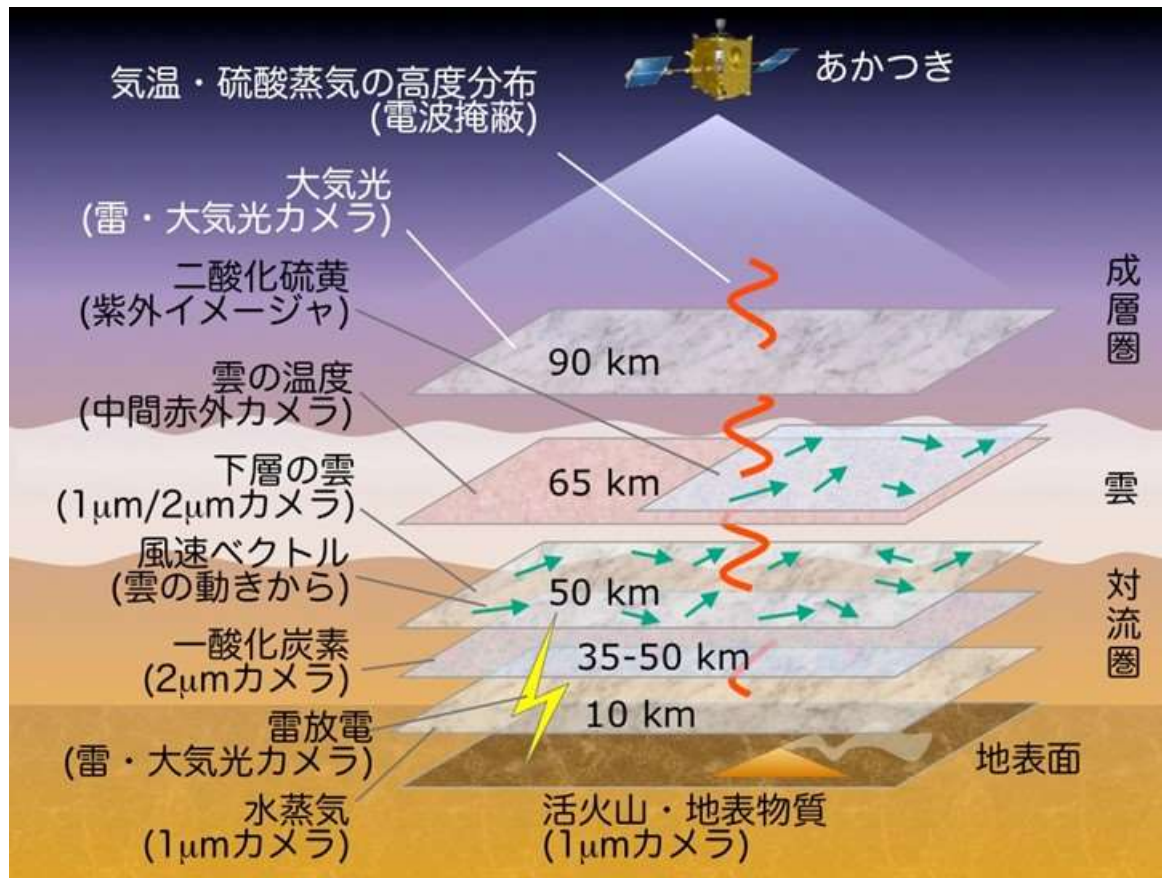
1. 地球の気候の宇宙における位置付けを知りたい
2. あらゆる惑星・時代を自由に行き来したい

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)

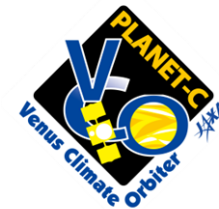


[3次元観測のイメージ図]

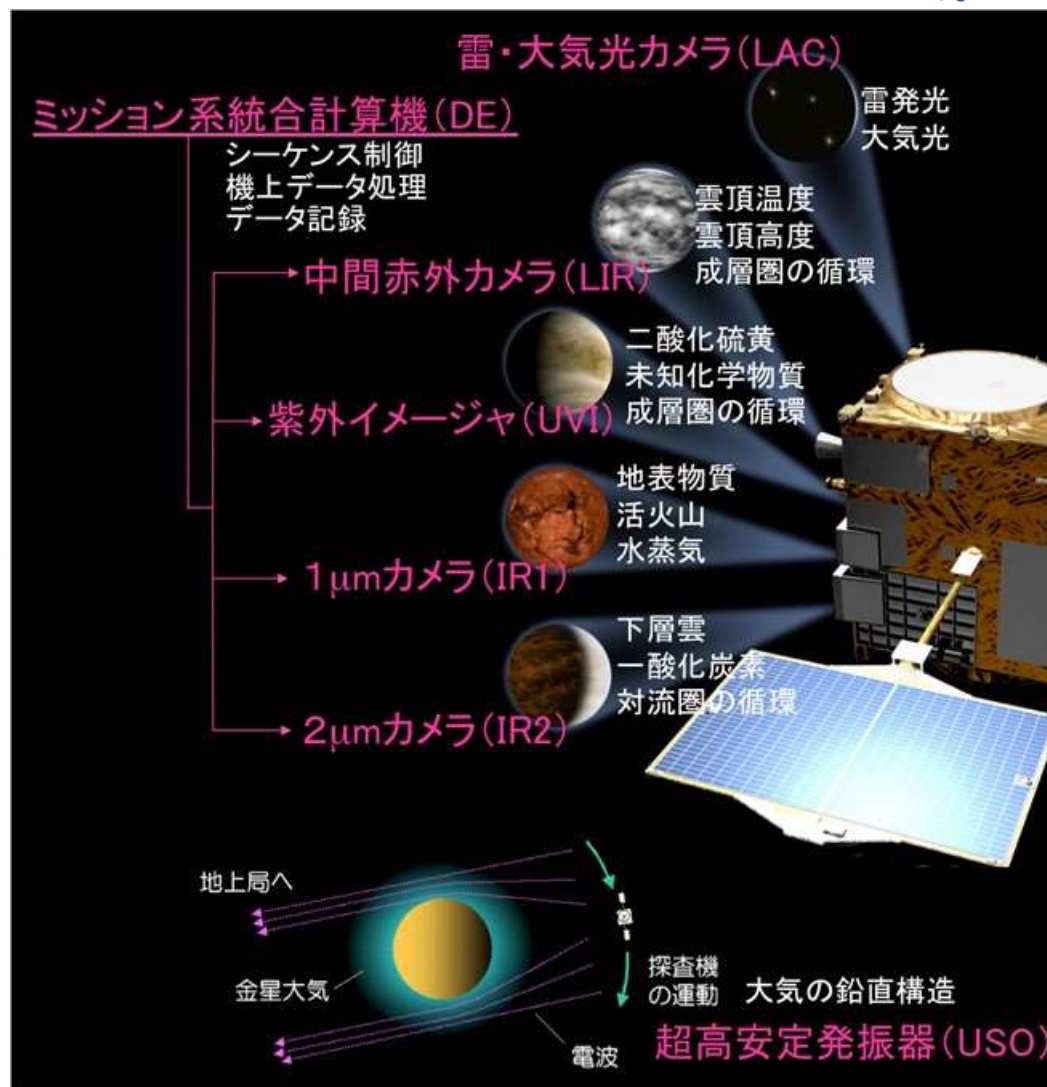
研究課題

- ❖ 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。



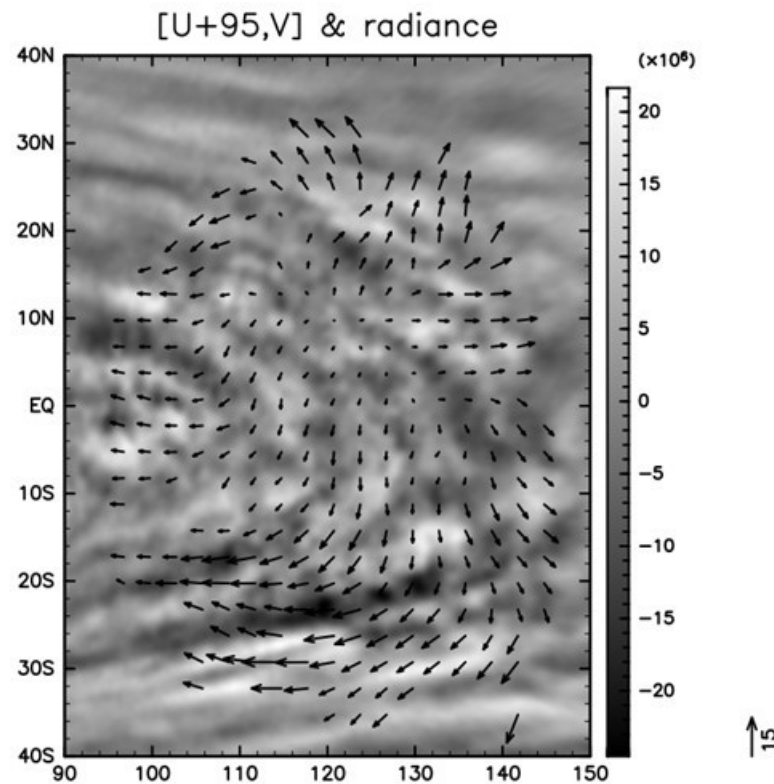
プロジェクトの当初目標と実際の差異

	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

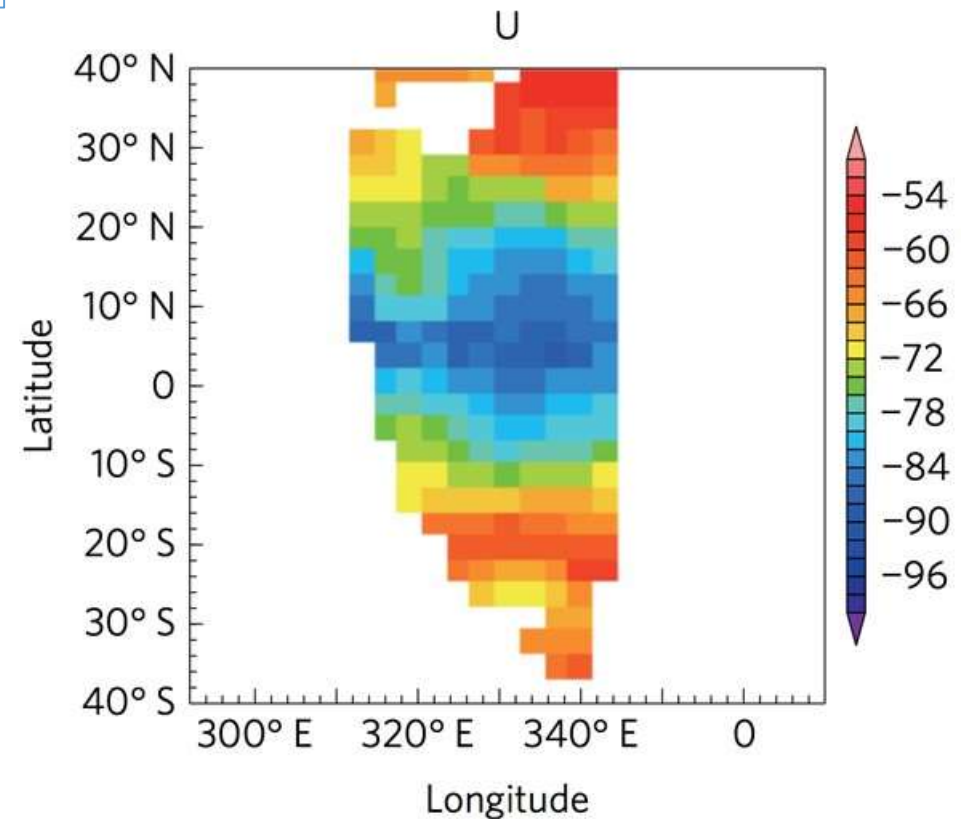
これまでに得られた科学成果の例



大気の三次元運動

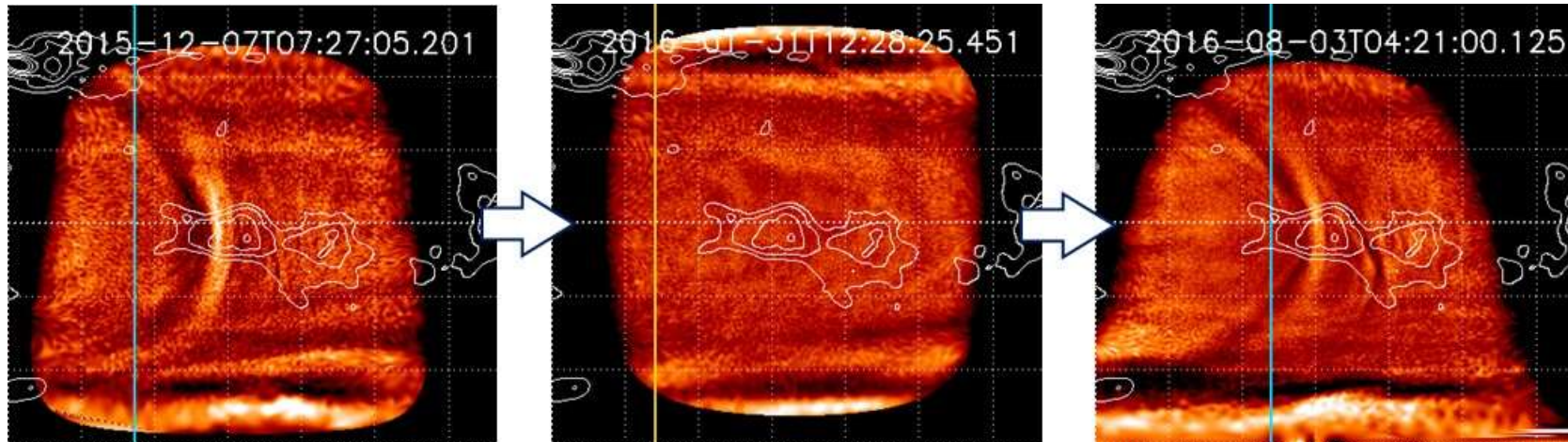


紫外画像を用いて雲追跡を行って得た雲頂での風速ベクトル。スーパーローテーション成分を差し引いて、それ以外の細かな大気の動きを可視化している。背景の紫外線模様はコントラスト強調されている。



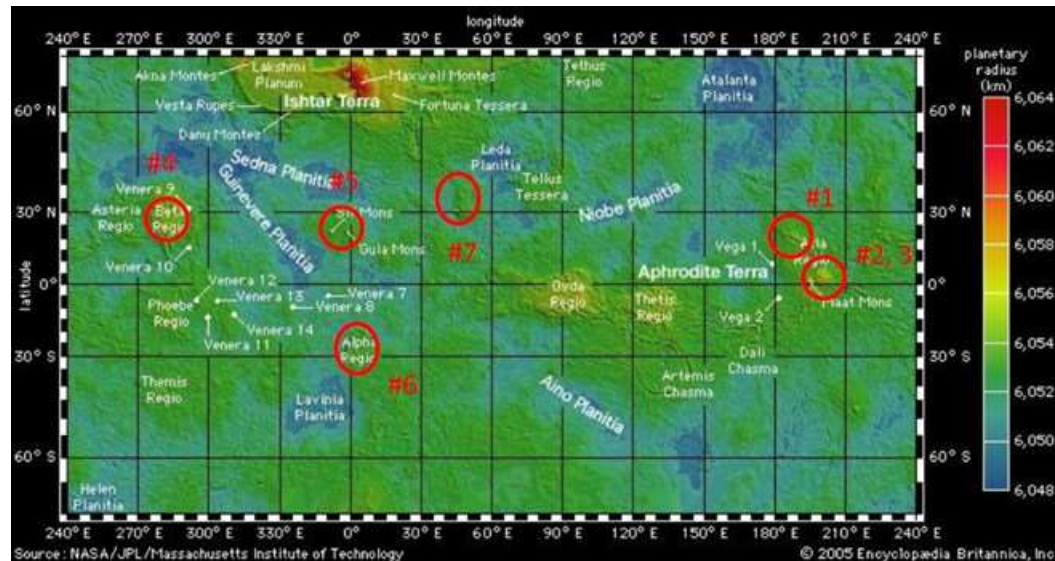
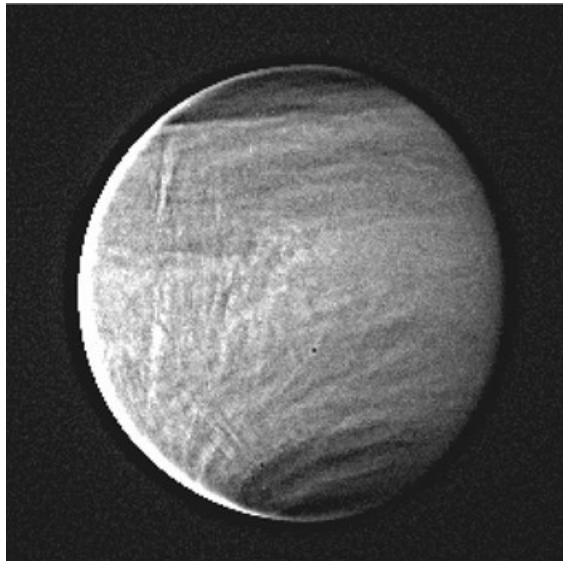
近赤外画像を用いて雲追跡して得られた、雲層下部でのスーパーローテーション速度の分布（青いところで速い）。赤道域にジェット構造があることが発見された。スーパーローテーションの生成に関わる可能性がある。

大気・地面カップリングを示す波動

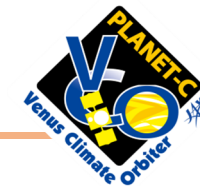


上) LIRで、ほぼ同じ領域を異なる3つの時期に観測して得た雲頂温度分布。アフロディーテ大陸上空に中心を持つ大小の弓状構造が2015年12月7日(左)と2016年8月3日(右)には同じ場所に発生し、2016年1月31日(中)には存在しなかった。

下) IR2(波長 $2.02\text{ }\mu\text{m}$)でとらえた地形由来の構造(左)。引っかけ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、校正済みデータ、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

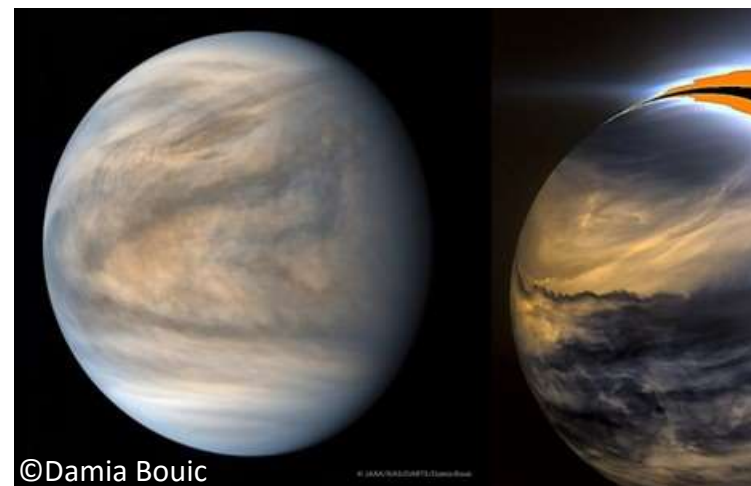
- ・現在未来を問わず、人類共有の資産としてデータをアーカイブし公開する
- ・生データ・校正済みデータはNASA PDS(惑星探査データを所掌する部署)のPDS3規格に準拠
- ・2017年7月にJAXAデータアーカイブData ARchives and Transmission System(DARTS)よりデータ公開を開始した(軌道投入後1年7か月後)
- ・半年ごとに半年分のデータを順次公開している(2017年12月、2018年6月)
- ・NASA PDSによるレビュー完了後、NASAからも配布される予定

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)

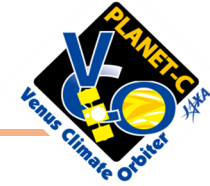


©hidetakak



©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詳細構造を、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。軌道周期が長いこと電波遮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。（注：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。（注：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。

- ・スラスト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】