

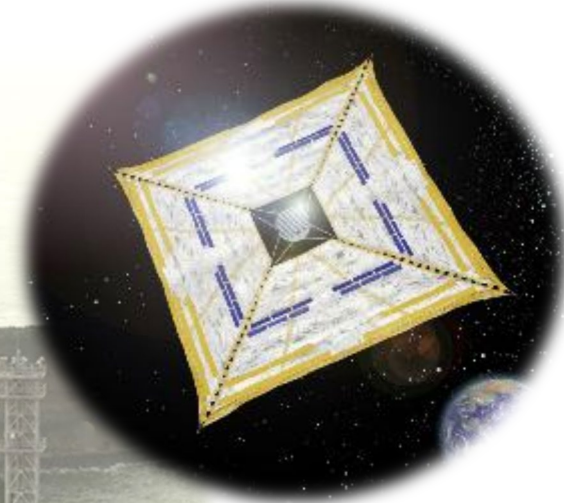
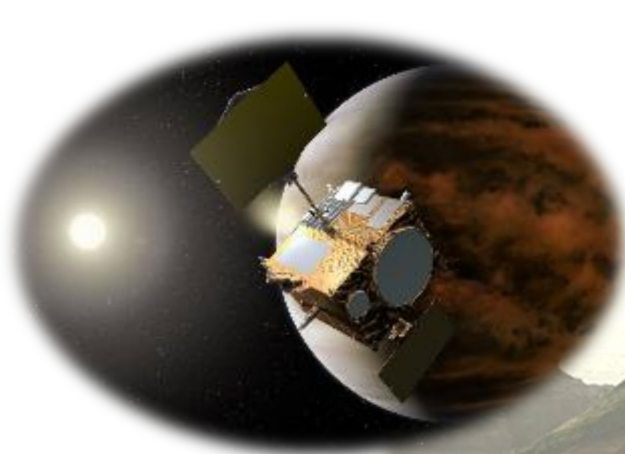
金星探査機「あかつき」 (PLANET-C) の成果について

2026年7月13日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所

- 2010年5月21日金星探査機「あかつき」 (PLANET-C) は、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」と4基の相乗り衛星とともに、H-II Aロケット17号機にて種子島より打上げられた。
- 2025年9月18日に「あかつき」の停波運用を実施し、運用終了となった。
- 「あかつき」の約15年間の運用による成果まとめを報告する



あかつき概要



科学的な背景

地球型惑星（金星・地球・火星）の大気の比較

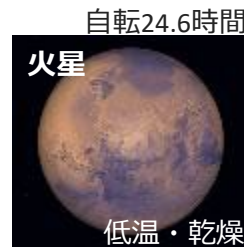
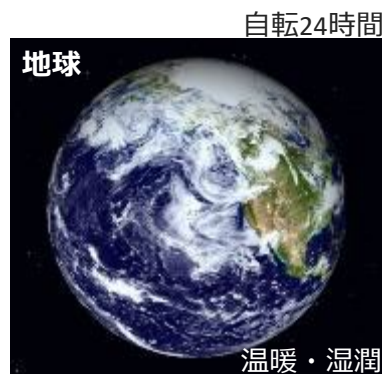
顕著な大気量の差

金星 90気圧 > 地球 1気圧 > 火星 0.006気圧

→結果として放射緩和時定数の差

金星 50年 > 地球 3か月 > 火星 3日

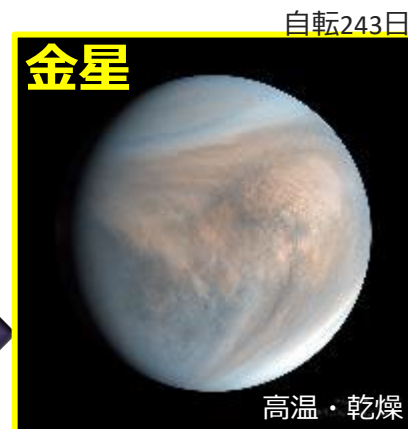
バラエティに富んだ地球型惑星の大気システムの把握のために金星大気の研究が鍵のひとつ



大気の特徴

薄くて熱容量が小さい
地面の熱が直に伝わる
→ 地球の成層圏上層部が地面に接しているイメージ

MMXで観測。火星本星探査へ。

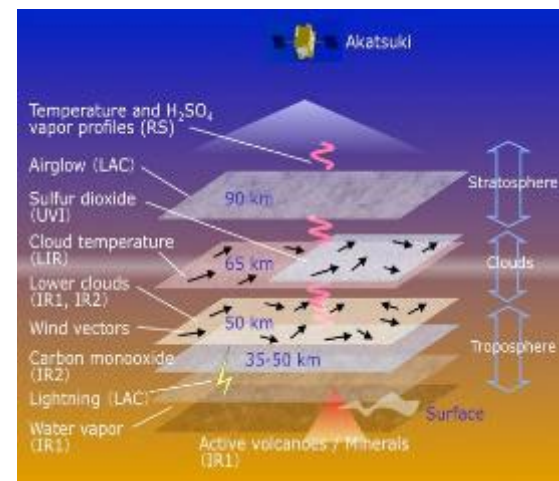
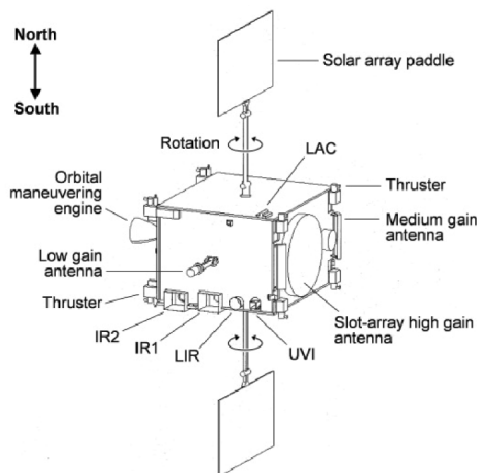


大気の特徴

層構造
スーパーローテーション
→ 地球海洋にも匹敵する
膨大な下層大気の上に、
地球対流圏（と気象）が
乗っているイメージ

スーパーローテーションが
確認されているタイタンの
放射緩和時定数も同程度。

「あかつき」は5台のカメラ（紫外イメージャ：UVI、1μmカメラ：IR1、2μmカメラ：IR2、中間赤外カメラ：LIR、雷大気光カメラ：LAC）を搭載し、さらに、電波科学（RS）を行うための超高安定発振器（USO）を備える。各機器は、異なる高度の異なる物理量を観測対象とし、金星大気中出现する気象現象を3次元的に（時間を含めれば4次元的に）観測する。





研究目的

あかつきは「世界初の惑星気象衛星」であり、その目的は金星の気象現象を地球とも対比させながら研究し、惑星気象学という学問分野を打ち立てることである。惑星を取り巻く大気の運動のしくみを本格的に調べる世界初のミッションとして、金星の雲の下に隠された気象現象を、新開発の赤外線観測装置等を用いて周回軌道から精密観測する。これにより、従来の気象学では説明できない金星の大気力学（惑星規模の高速風など）のメカニズムを解明し、惑星における気象現象の包括的な理解を得る。

学術的な意義

1. 金星大気力学の解明

金星周回軌道上から、雲の下まで透視するリモートセンシングによって、大気現象を継続的に観測し、世界に先駆けて金星の大気力学を解明する。

2. 普遍的な気象学の構築

地球大気との比較研究から、惑星大気の形成や進化のメカニズムを理解し、地球を含む多様な惑星環境に適用できる普遍的な気象学の基礎を与える。

3. 「惑星気象学」分野の構築

長期観測データを用いたデータ同化という新たな研究手法を獲得し、新しい研究分野「惑星気象学」の構築を目指す。

4. 密接な国際協力による金星探査

欧州の金星探査機「ビーナスエクスプレス」との密接な協力により、金星探査を国際的に推進する。



©JAXA

形状・寸法：	直方体 1.0m × 1.5m × 1.4m パドル 1.0m × 1.4m (2翼)
重量：	518kg (打上時)
発生電力：	約500W (EOL、金星軌道)
姿勢安定方式：	バイアスモーメントム3軸制御
軌道：	金星周回楕円軌道 (高度約1千km～37万km)
軌道周期：	約11日
打上げロケット：	H-IIAロケット17号機
打上げ日：	2010年5月21日

【ミッション機器】
1μmカメラ (IR1)
2μmカメラ (IR2)
中間赤外カメラ (LIR)
紫外イメージャ (UVI)
雷・大気光カメラ (LAC)
超高安定発振器 (USO)
【バス機器 (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



年月	主要イベント
2010年12月	金星周回軌道投入(VOI-1)に失敗
2015年12月	金星周回軌道再投入(VOI-R1)に成功。 日本初の地球以外の惑星周回機に。
2018年8月	プロジェクト終了審査（定常運用➡後期運用1） 後期運用1（3年）2018/4-2021/3 延長目的：再投入により生じた軌道制約（30日周期➡11日周期）によるデータ不足（電波掩蔽や雷観測は1/10程度に減）に対するリカバリー観測が必要となったため
2021年4月	後期運用延長審査（後期運用1➡後期運用2） 後期運用2（3年）2021/4-2024/3 延長目的：スーパーローテーションの長期変動解明及び雷発光追観測取得のためトータル8年（変動一周期の全体や雷追観測）の観測が必要となったため
2024年4月	後期運用延長審査（後期運用2➡後期運用3） 後期運用3（5年）2024/4-2029/3 延長目的：時間変動する大気現象周期の解析（駆動源の内的要因・外的要因）のため太陽活動（代用的な外的要因）一周期分を優位に上回るデータ蓄積（13年超）が必要のため
2024年4月-2025年8月	精度が高くない姿勢維持制御モードが長く続いたことを発端として通信途絶。1金星年を目途とする期間の探索運用を実施。
2025年9月18日	停波運用を実施。

運用のフェーズが進むにしたがい、あかつきの科学目標は進化してきた。

定常運用（2年3ヶ月）
2015年12月～2018年3月

- A) スーパーローテーション（SR）のメカニズムの解明
- B) 子午面循環の構造の解明
- C) 雲生成のメカニズムの解明
- D) 雷の有無の観測的決定
- E) 地表面放射率測定と活火山探索

後期運用 1（3年）
2018年4月～2021年3月

- A) 雲頂レベルにおける子午面循環強度の定量
- B) SRの生成・維持メカニズム（主機構・副機構の寄与）
- C) 定在重力波の変動性・安定性とSRとの関係
- D) 雷の有無の観測的決定

後期運用 2（3年）
2021年4月～2024年3月

- A) 大気波動の役割の解明
- B) SRの長期変動の解明
- C) 大気構造の長期変動の解明
- D) 雷発光頻度の統計的裏付け

後期運用 3（5年）
2024年4月～2029年3月

- A) 大気波動と対流の役割の解明（観測＋モデリング）
- B) 変動する大気現象（風速場、温度場、UVアルベド、微量気体、鉛直構造）の要因の解明（内部要因か外部要因か）
- C) 雷発光頻度の更新と発光メカニズムの特定

あかつきの金星周回軌道投入は成功したが、当初予定（30時間周期）より大きな長楕円周回軌道（11日周期）となった。

電波掩蔽や雷観測の頻度は1/10程度に減り、長期の積み重ねを要することとなった。風速測定にも制約は増えたが雲追跡手法を工夫するなどし、SRのメカニズム解明に向けた確かな手応えを得た。

2016年12月にIR1とIR2が使えなくなり、雲生成や地表面については一年分の限られたデータにもとづく研究を強いられた。

品質の良い風速測定データが順調に蓄積され、SRの維持メカニズムとして赤道や低緯度では「熱潮汐波が重要な役割を果たしている」ことを明らかにした。

熱赤外線で雲頂風速場を昼夜全球でとらえ、子午面循環強度が従来考えられていたより弱いことを明らかにした。1/10頻度の電波掩蔽や雷観測も少しずつリカバーでき、雷と考えられる自然発光現象一発をとらえることに成功した。

ESA/Venus Expressとほぼ並ぶ観測期間に達し、雲頂のSR速度と温度場、UVアルベド、微量気体（SO₂）分布、鉛直温度構造などの「長期変動」を捉えた。単一の金星ミッションとして、目覚ましい成果といえる。トータル8年の観測で見えたこれら長期変動の要因に迫ることが次の課題と識別された。雷発光は二発目が期待できる観測の蓄積に達しつつある。

時間変動する大気現象の周期解析から、その駆動源が内的要因か外的要因かを調べる。海陸などの複雑さをもたない金星では内的要因の支配的な地球と異なる駆動源の可能性もあり、それを明らかにする。この解析を正しく行うために、太陽活動（代表的な外的要因）一周期分を有意に上回るデータを蓄積する。5年プラストータル13年超という期間は、そのために必要である。

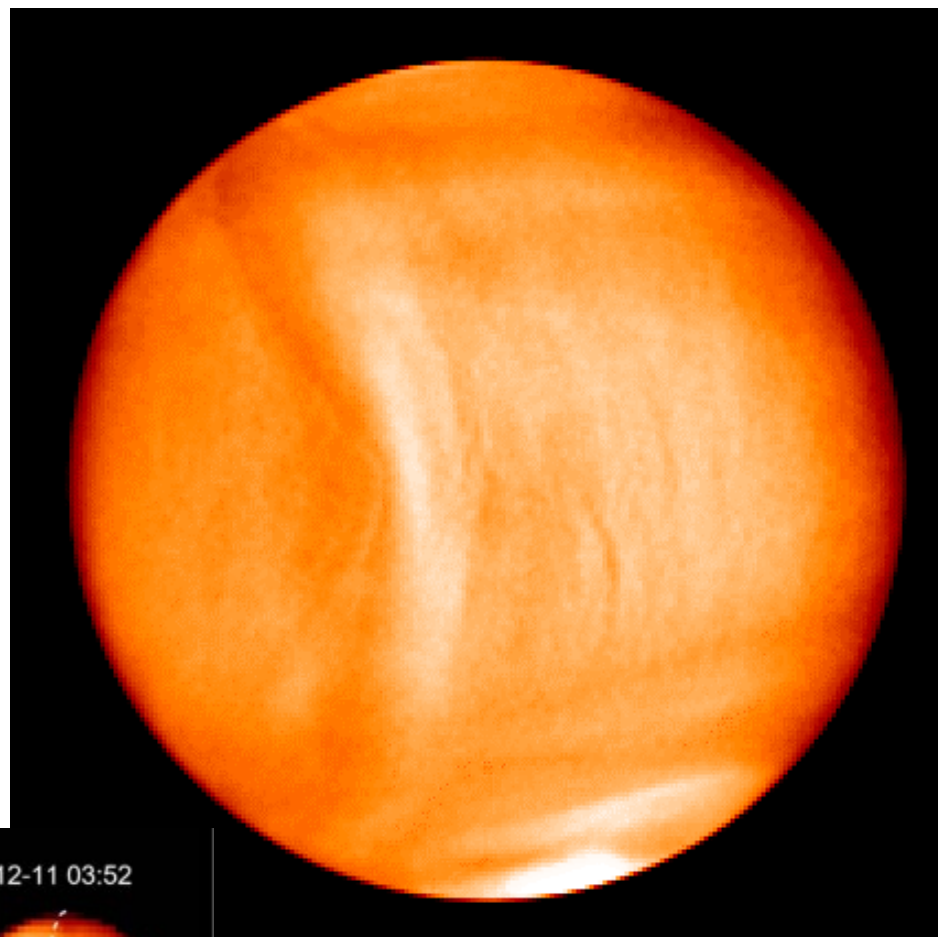
発見と軌道制約からのリカバリー

長期変動トレンドの検出

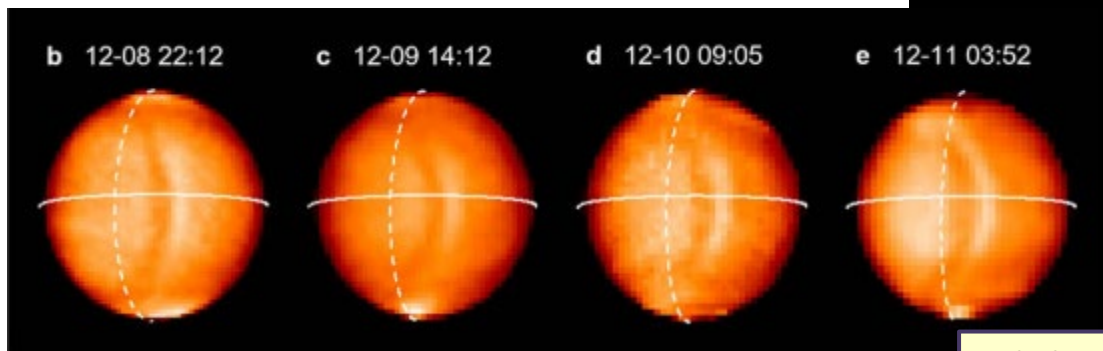
長期変動要因の識別

○地形性重力波のつくる巨大な弓状構造

- 2015年12月7日、VOI-R1成功直後にLIRが取得した金星雲頂の温度マップに、巨大な弓状構造が捉えられた。12月11日まで継続的に見られたが、翌年1月には消失していた。
- この構造はスーパーローテーションとともに移動せず、アフロディーテ大陸上にとどまっていたことが分かった。
- 単純化されたシミュレーションによれば、高度20 kmに発生した気圧擾乱が重力波を発生し、上空へと伝播しながら発達し雲頂に弓状の構造をもたらすという結果が得られた。
- 地形由来の重力波が雲頂高度まで伝播し、巨大な弓状構造を生じることが判明した。



LIR 8-12 μm (Dec 7, 2015)



Fukuhara et al., *Nature Geoscience* 10, 85–88, 2017.
2017/01/17 立教大学プレスリリース

○熱潮汐波によるスーパーローテーション駆動

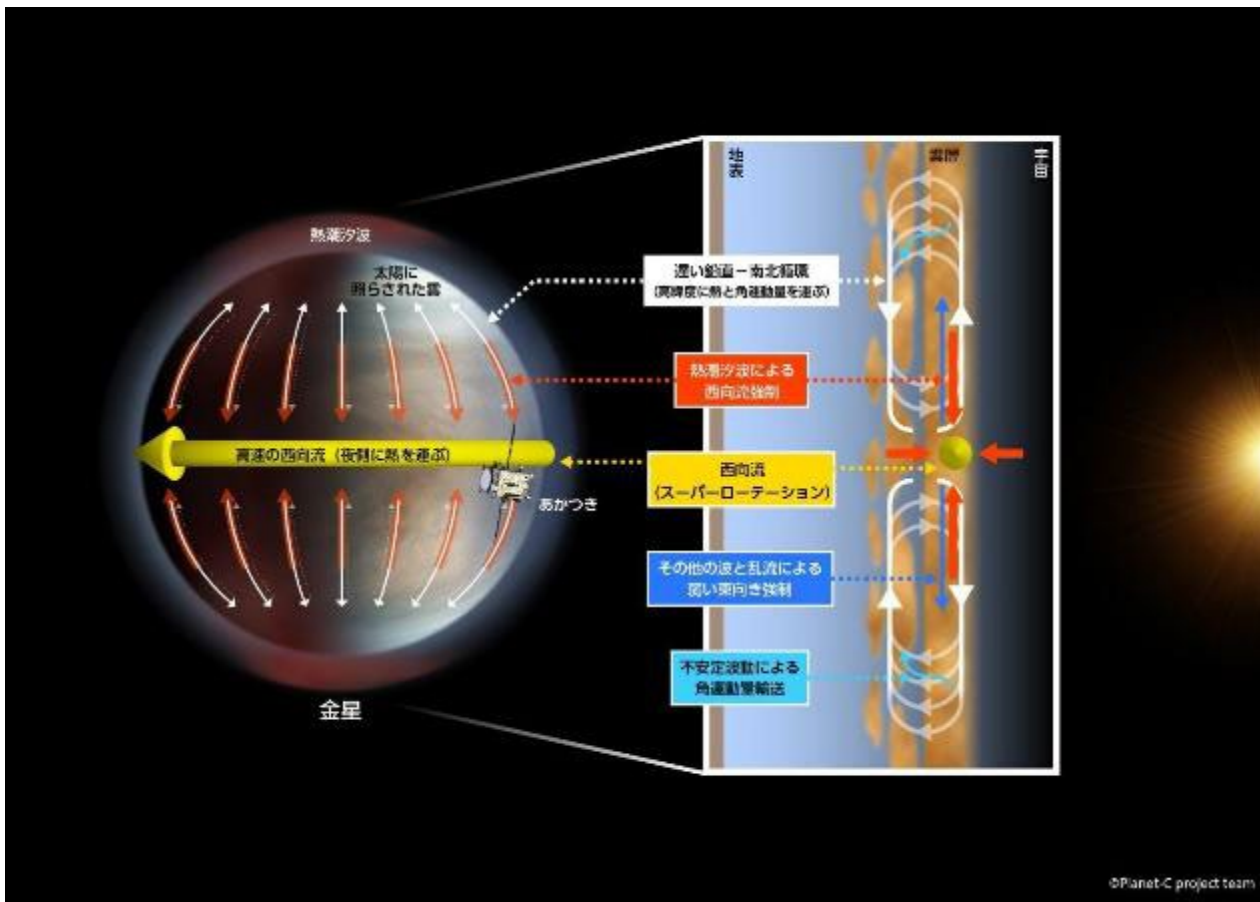
主にUVI紫外線画像を解析し、LIR赤外線画像も補助的に用いた。

低緯度帯で相対的に太陽光が多く吸収されることにより、ゆっくりとした「子午面循環」が生じる（白矢印）。これは、低緯度から「角運動量」を運び去り、スーパーローテーションを弱める働きをもつ。

それに対し、熱潮汐波が低緯度にむけて角運動量を運び（南北方向の赤矢印）、スーパーローテーション強度を強めるように働く。これによって、高速なスーパーローテーションが維持されて、長期間太陽に照らされる昼面から、太陽があたりず冷え続ける夜面へと熱が運ばれる。

熱潮汐波以外の波や乱流は、低緯度の雲頂付近では弱いながら潮汐とは逆に働き（青い矢印）、中高緯度では別の重要な役割を果たす（水色の矢印。角運動量の流れを、子午面循環をバイパスするように運ぶ）。

熱潮汐波はまた、鉛直の伝搬によっても、スーパーローテーション強度を強めるように働く（赤い矢印のうち左右に伸びるもの）。



©Planet-C project team

Horinouchi et al., *Science* 368, 405-409, 2020.
2020/04/24 宇宙航空研究開発機構他共同プレスリリース

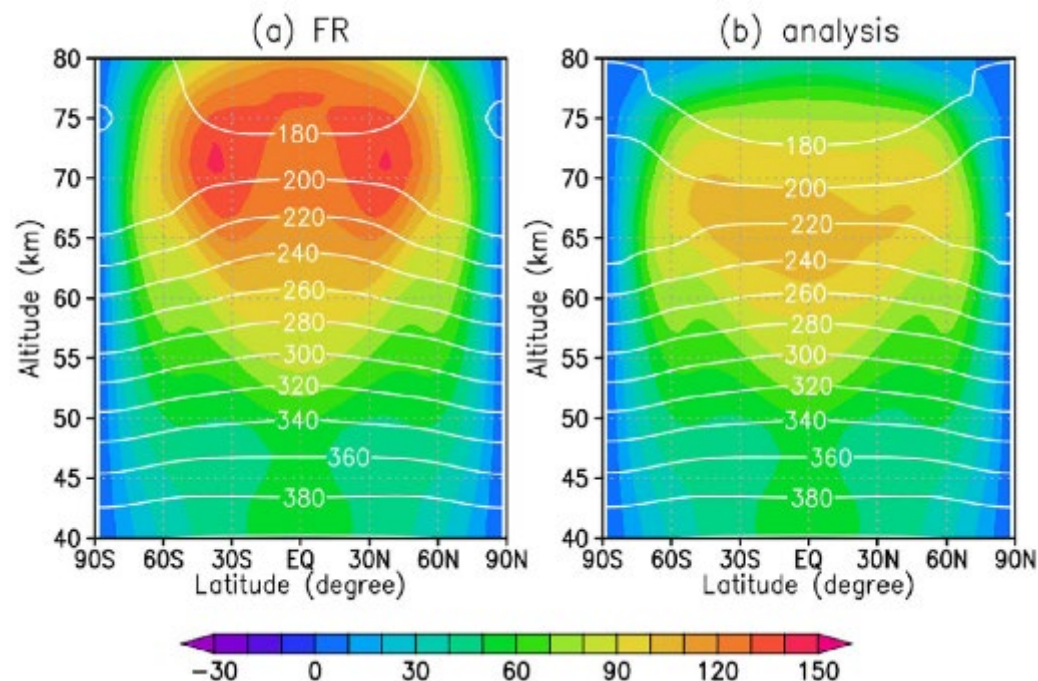
○データ同化：金星大気へ世界初の実用的応用

データ同化は、時間発展する数値モデル計算に「実観測データによる拘束（修正）」を挿入することで、モデルの振舞いを現実に即した妥当なものへと改良してゆく手法である。地球気象では実用化されている技術であるが、惑星大気では長く実験段階にとどまっていた。

Sugimoto et al. (2019)はVEx/VMCデータをデータ同化の入力に用いたテスト計算を行い、データ同化により東西風の分布がフリーランよりも実観測データへ近づけられることを示していた。

Fujisawa et al. (2022)ではついに、あかつき雲頂風速場データを同化に用い、その出力が単に雲頂の物理量改善にとどまらず、その上下の物理量へも波及して、より現実の金星大気に近いと思われる再現を行えることを示した。

こうして得られる再解析データは一般に向けて公開され、世界中の金星気象研究者による今後の研究を推進するものとなる。



図：数値計算結果（左：フリーラン、右：データ同化）
東西風速はカラスケール、大気温度は白の等高線で表示している。FRでは秒速150メートルと過大だった風速が、データ同化により110メートルほどに落ち着き、また風速のピークが雲頂付近で起きるように改良された。

Fujisawa et al., *Scientific Reports* 12, 14577, 2022.
2022/09/02 慶應義塾大学他共同プレスリリース

他のミッションとの連携観測により更なる科学成果創出へ

2020年10月15日のBepiColombo金星フライバイ時には3機で、金星近傍の太陽風モニターからプラズマ直接計測、MPOのPHEBUS/MERTIS、あかつきUVI/LIR、ひさき極端紫外線分光を駆使した共同観測を実施。

➡下層大気と熱圏大気の力学的結合を論じることができるデータを取得できた。

2020年8月末から9月初め、BepiColombo (BC)が10月の金星フライバイへと向かう少し前にまだ距離は遠いものの、ディスク積分での金星測光キャンペーン観測を実施した。このキャンペーンには惑星分光観測衛星「ひさき」、そして複数の地上望遠鏡も参加し、一大イベントとなった。波長の短い方から、「ひさき」～BC/PHEBUS～「あかつき」UVI～地上望遠鏡群、という広帯域分光データ取得が試みられた。

➡波長350-450 nmに特徴的な吸収の波長依存性は2007年のMESSENGERフライバイ時とよく似ていることが確認された。

(Lee et al., The Planetary Science J. 3, 209, 2022)

2021年3月に、あかつきとBepiColomboがほぼ同時に外合を迎えた。この貴重な機会を活かして両ミッションの電波科学チーム間で連携し、太陽コロナ電波掩蔽の協調観測を実施した(図1)。ひので衛星データとも比較研究を進めた(図2)。

➡太陽風の流れに沿って上流側と下流側を2機で同時に観測することにより、太陽風速度を導出するとともに、流れに沿った電磁流体波動や乱流の時間発展の情報を得ることができた。

(Cappuccio et al., MNRAS 533, 1560, 2024)

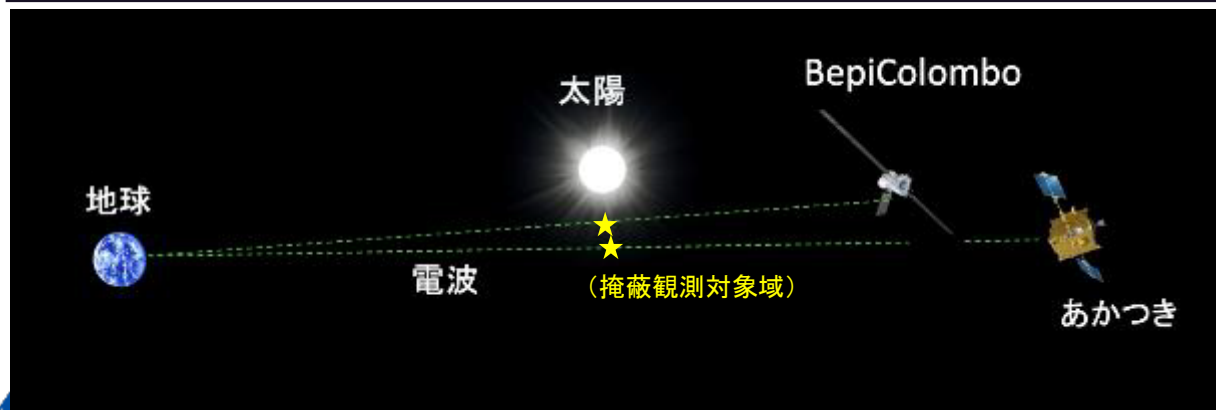


図1.太陽コロナ電波掩蔽協調観測の概念図

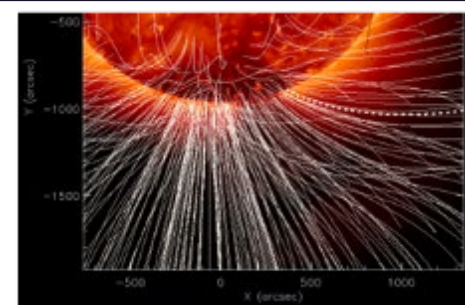


図2.同時期のひのでXRT画像と周辺のポテンシャル磁場

Participating Scientists Program (PSP)

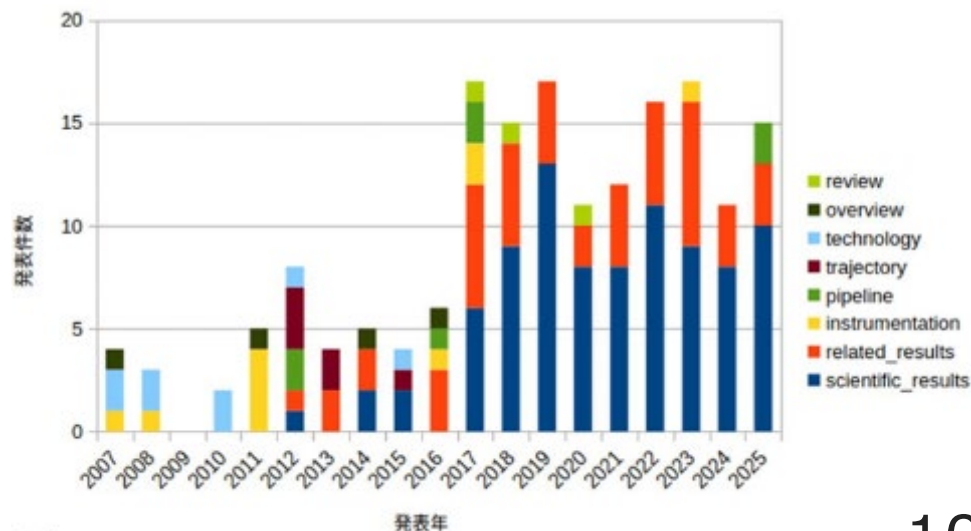
- ✓ NASAとJAXAはLoAを交わし、米国内で選抜されたParticipating Scientistsをあかつきサイエンスメンバーとして受入（第1期：8名、第2期：4名）。あかつきデータをPDS3フォーマットにアーカイブする作業やあかつきデータのPDS4フォーマット化促進協力し効率的に実施。

電波掩蔽における海外局の協力

- ✓ 「あかつき」電波掩蔽では、これまで培ってきた電波掩蔽分野の国際協力体制を活用し、インドISROの深宇宙局(IDSN)とドイツの深宇宙局のひとつ(Weilheim局)の協力を得て、臼田局だけを用いた場合に比べて数割多い観測を実施できた。
- ✓ これらの国際協力は、データの増加だけでなく、「あかつき」電波掩蔽データを用いた研究ヘインドとドイツから新たに研究者が参入する大きなきっかけともなった。
- ✓ このような基盤は、外惑星探査実証機OPENS-0の電波掩蔽における国際チームの構築にも活かされている。

人材育成等

- ✓ 修士号取得者数計41名、博士号取得者数 計17名
- ✓ 平成29年度文部科学大臣表彰 科学技術賞（研究部門）をはじめとする19個の賞を受賞
- ✓ 論文もNature, Science誌はじめ多数掲載



出典 <http://akatsuki.isas.jaxa.jp/en/papers/>

波及効果（他ミッションへの波及）



技術的な継承の例（*延長ミッションでの成果）

○観測機器の継承

「あかつき」搭載の非冷却ボロメータ型中間赤外カメラ LIR を、その仕様が科学目的とほぼ合致していたため小惑星探査用に適用し、「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ TIR へ継承した。さらに、ESAの二重小惑星探査計画 Heraと小惑星アポフィス探査計画RAMSESの搭載機器に発展し、LIRを基礎とする科学の進展がますます見えてきた。（*）

○データ処理システムの継承

観測機器の動作制御・画像処理・データ転送のため開発されたミッション機器制御計算機 DE の技術が、イメージセンサが多く搭載され同様の画像処理が必要となる「はやぶさ2」搭載デジタルエレキ DE に引き継がれている。

○平面高利得アンテナ「ラジアルライン給電スロットアレイアンテナ」(RLSA)の採用

パラボラアンテナと比較して、軽量であり熱を集めにくいという利点がある。軽量化を狙う探査機へ継承されている。

○ディジタルトランスポンダ（ISAS開発）の採用

惑星周回軌道投入に必須なDORをTLM変調信号で実証した。通常のダウンリンク信号でDORが可能となり、NASA/JPL支援を受け軌道投入が実現した。また、再生測距方式を初めて実証した。このトランスポンダは、「IKAROS」、「はやぶさ2」、「BepiColombo/MMO（みお）」へも継承され深宇宙探査機のスタンダードとなり、次世代版に発展しDestiny+に採用された。

○推薬供給システムの信頼性向上

あかつきの1回目の金星軌道投入マヌーバでは、長期間の休止状態の後、推薬供給系の不調が発生した。この不具合事原因究明活動を通して、供給システムの設計方法の見直しが提言された。この結果は、「はやぶさ2」、「SLIM」を含めた後続のJAXA衛星推進系設計に活用された。

○残推薬量推定技術の継承（*）

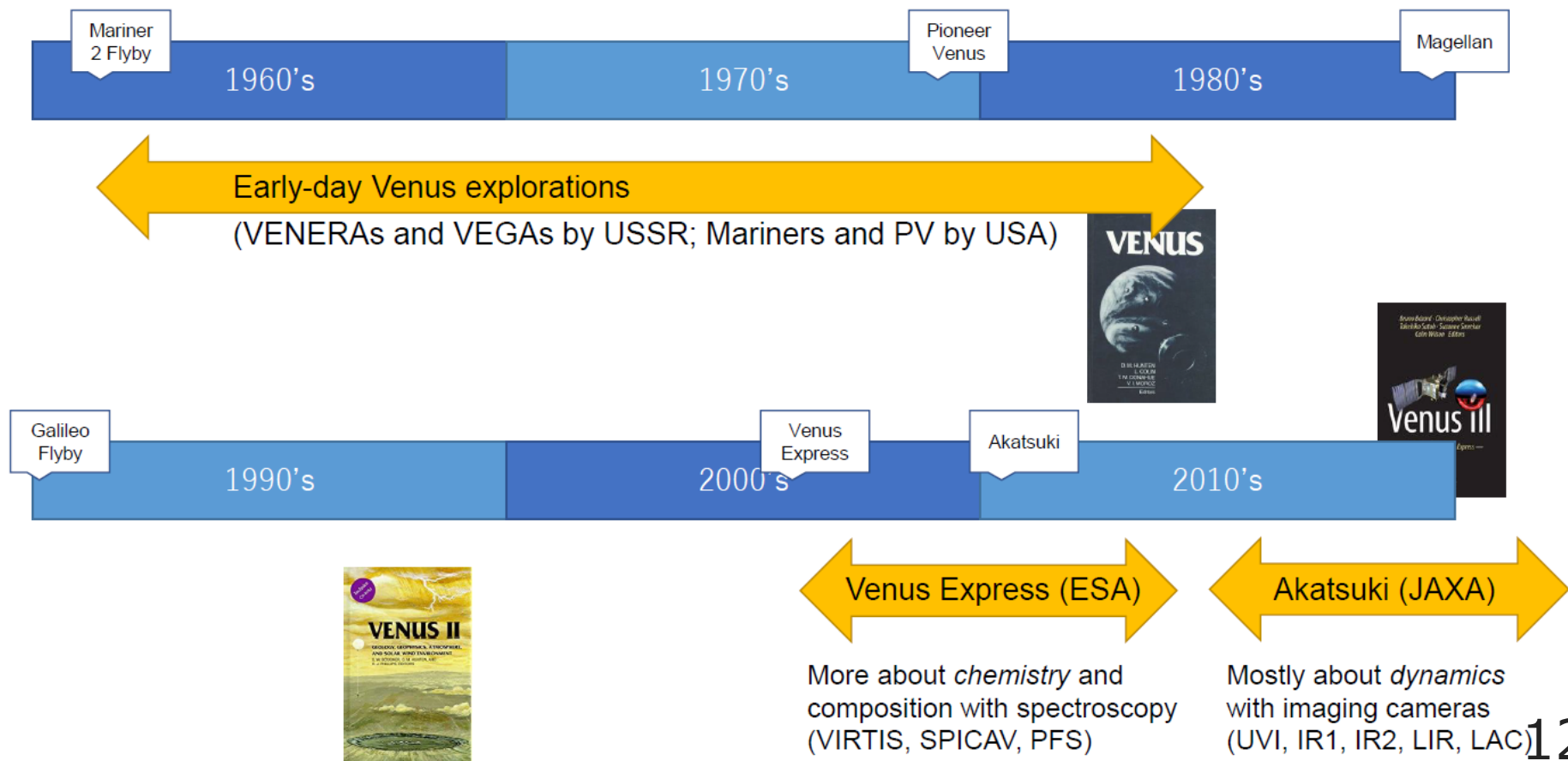
枯渇する直前まで推薬を使用する稀な状況下でのより詳細な燃焼試験データの読み取り方等、スラストを深く理解できる機会を利用し、開発時の試験実績等を使用した従来のスキームに運用実績データを加味した精密な残推薬量推定方法を構築した。この手法は「SLIM」でのブロードダウン運用に適用され、より正確な圧力変化及び推力推定を達成し、ピンポイント着陸に貢献した。

将来の金星探査へ



金星探査ミッションの背景

1960年代に始まった金星探査は、大気組成・大気圧の直接測定から始まり、周回機による電離圏観測、合成開口レーダーを用いた全球的な地形マッピングが実施された。2000年代になり、大気化学に重点を置いた Venus Express では、極軌道から大気中に含まれる様々な化学物質の分布を測定し、硫酸の雲を作り出す化学反応や大気と地表面の間で起こっている化学反応に関わる研究を進めた。続くあかつきは、低緯度周回軌道から大気力学に重点を置き、特にスーパーローテーションに着目し、その生成・維持メカニズムを解明することを課題とした。さらに、「世界初の惑星気象衛星」として金星の気象現象を地球とも対比させながら研究をすすめ、惑星気象学という学問分野を打ち立てることを大目標とした。



あかつき後継機（案）：CROVA

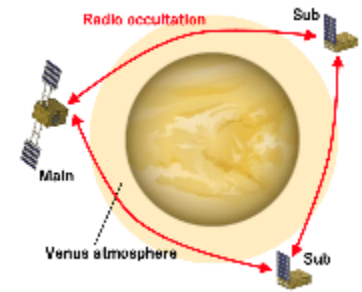
「あかつき」が価値を高め問題意識を深化させてきた金星への次期探査実現を目指し、リサーチグループ（RG）活動をあかつきチームメンバーが加わり2021年末より実施している。

- ✓ 理学テーマと新たな工学技術の融合、海外ミッションとのシナジーを意識して議論し、科学課題として「大気力学」「大気化学」「大気散逸」を抽出。
- ✓ 様々なミッション形態を検討したうえで、衛星間電波掩蔽（CROVA= Cross-link Radio Occultation of Venus Atmosphere）をコアとする方針を決定。

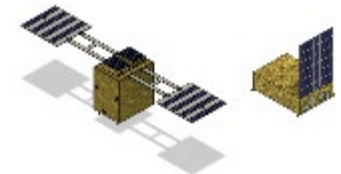
CROVAは金星周回衛星間の電波掩蔽で金星大気を3次元的に観測し、雲層直下から電離層までの高度範囲を高い鉛直分解能で空間的に密にカバーし、大気力学情報の質的な飛躍をもたらす。

- ✓ 衛星システム、軌道設計、軌道決定精度などの検討を深宇宙小型探査機の実績をもとに進めている。
- ✓ 電波掩蔽以外の搭載観測装置も検討中。

あかつきが主に雲頂高度を対象としたのに対し、CROVAはより低高度までの3次元探査を行う。金星SRの複数のメカニズムをそれにより観測的に明らかにするとともに、大気密度・温度・惑星（大気）回転効果などの物理条件が地球と大きく異なる世界（金星、タイタン、系外惑星）の大気物理学を拓き、あかつきが目指した惑星大気の普遍的理解を深化・汎用化させる。



CROVAによる多地点
電波掩蔽観測の概念図



主衛星・子衛星の形態と周
回軌道の案

■金星探査からさらに遠方対象探査への流れ

あかつき電波科学で獲得した観測技術と国際協力体制をもとに、外惑星探査実証機OPENS-0における電波掩蔽観測を提案。金星大気のさらなる長期変動データの獲得、土星大気観測、土星リング観測の実施を目指している。

将来の金星探査へ



■**後続の金星ミッション**：大気化学の Venus Express ～ 大気力学の「あかつき」がきっかけで続いた金星探査が、雲層から地表・地形まで含めた鉛直方向の大気循環に研究課題が移っている。合成開口レーダーによる地形マッピングと大気測定を同時に実施する複数のミッションと大気の起源を狙うミッションの計画・開発が続いている。

✓ NASA：2機のDiscoveryクラスミッションを採択

VERITAS：地形と内部構造の探査

DAVINCI：大気の成り立ちと進化（フライバイと降下プローブによる探査）

✓ ESA：1機のMクラスミッションを採択

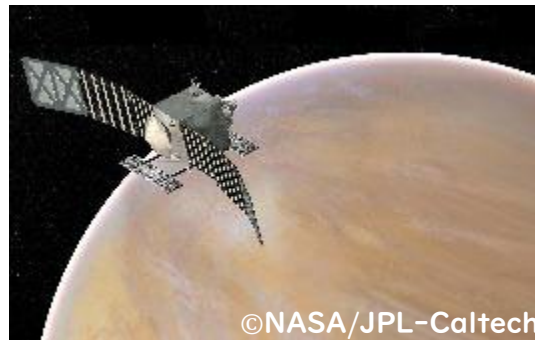
EnVision：内部構造・地表・上層大気の統合探査

✓ インド：1機の探査機を開発中

Venus Orbiter Mission (Shukrayaan-1)：表面と地下・大気・宇宙環境まで含めた総合観測

✓ 民間による金星探査ミッション（米国Rocket Lab）

EnVision



VERITAS
(Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy)



DAVINCI

(Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging)

Venus Orbiter Mission
(Shukrayaan-1)





「あかつき」は2015年12月の再挑戦を経て、日本で初めて地球以外の惑星を周回する人工衛星となることに成功し、その後2024年4月まで金星軌道上での科学データ取得により数多くの優れた研究成果を挙げた。これからもデータにもとづく解析研究が続くことが期待される。

- 地形由来の重力波が雲頂高度まで伝播し、巨大な弓状構造を生じることが判明した。
- UVI, LIR雲追跡、LIR雲頂温度、RS温度鉛直分布から、熱潮汐波の構造とスーパーローテーション（SR）への寄与を明らかにした。
- データと数値計算を組み合わせたデータ同化による金星気象学研究を推進した。

こうした顕著で着実な成果は、低緯度周回軌道から大気力学に重点を置き、水平方向の運動から金星大気に出現する気象現象を3次元的に（時間を含めれば4次元的に）理解するというあかつきの科学戦略がはまったことを示している。

さらに、重力波が地形から雲頂高度まで層構造をなす金星大気を伝搬するという事実は、地形と鉛直対流の関係の重要性を示した。深化したこの問題意識に基づき、国内では「あかつき後継機」構想がRGで検討され、米国（NASA）、欧州（ESA）、インド（ISRO）では次世代の金星ミッションを促した。

「あかつき」の成果により、世界における日本の金星科学コミュニティの存在感は増してきており、機関間だけでなく個々の研究者レベルでのさまざまな連携活動を醸成し、あかつきミッションが終了した後にもまた幅広い協力的活動が可能となる下地を残している。

このような成果を得られたのは、ひとえに2回目の金星軌道投入の機会をいただけたおかげです。改めて感謝を申し上げます。