金星大気「スーパーローテーション」の長期変動を再現
－データ同化技術により断片的な雲頂の観測から大気の 3 次元構造を推定－

慶應義塾大学自然科学研究教育センターの藤澤由貴子研究員、同大学法学部の杉本憲彦教授、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の村上真也主任研究開発員、神戸大学大学院理学研究科のはしもとじょーじ教授、樫村博基准教授、松嶋俊樹特命助教、林祥介名誉教授、同大学大学院海事科学研究科の前島康光准教授、京都産業大学理学部の高木征弘教授、安藤紘基准教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科の今村剛教授、北海道大学大学院地球環境科学研究院の堀之内武教授、同大学大学院理学研究院の石渡正樹教授、京都大学防災研究所の榎本剛教授、国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究センターの三好建正チームプリンシパル（理化学研究所数理創造研究センターチームディレクター兼務）らの研究チームは、金星大気データ同化システム「ALEDAS-V」（※1）を用いて、金星の大気が自転より速く周回する「スーパーローテーション」（※2）の長期的な風速の変動を再現するとともに、観測のない高度も含めた大気の 3 次元構造を推定しました。

本研究では、金星探査機「あかつき」（※3）の紫外線カメラ（UVI）の画像から求めた雲頂付近の水平風を、数値モデルに取り込む「データ同化」を行いました。2017～2022 年のうち風速の異なる 5 つの期間を対象に、モデルの雲頂付近の風速分布を各時期の観測に基づいて補正し、南北差を含む観測の特徴を再現しました。また、推定された南北・上下方向の大気の流れ「子午面循環」（※4）にも、時期による違いが現れました。

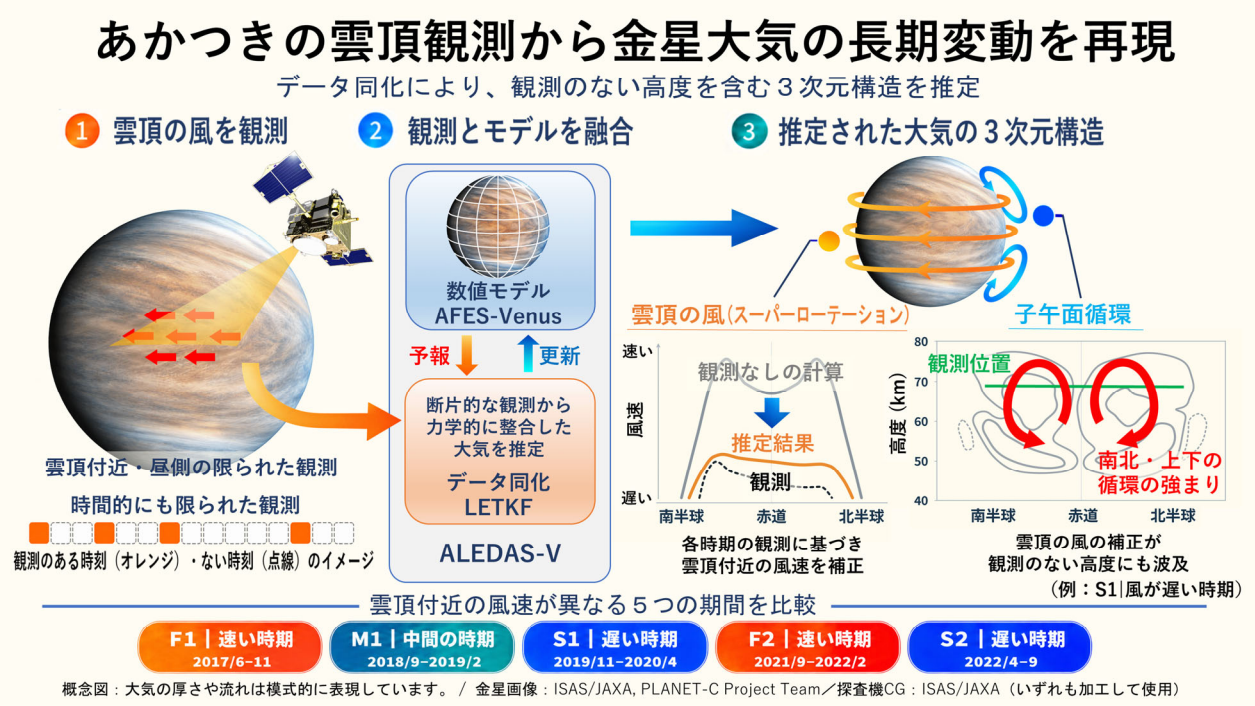
本研究成果は、Nature Portfolio の学術誌『npj Space Exploration』に 2026 年 10 月 23 日（日本時間 18 時）付でオンライン掲載されました。

1. 本研究のポイント

① **スーパーローテーションの速さが異なる時期の特徴を再現**：従来の特定期間での取り組みを、2017～2022 年のうち風速の異なる 5 つの時期へ広げました。同化を行わない場合に比べ、観測との風速のずれを約 7～8 割減らし、南北差を含む各時期の雲頂の風速分布を再現しました。

② **断片的な観測から 3 次元の大気を推定**：あかつきで得られた雲頂の水平風データを ALEDAS-V を用いて数値モデルに取り込み、観測のない高度も含めた大気の 3 次元構造を推定しました。推定された子午面循環（南北・鉛直方向の大気循環）に時期による違いが現れました。

③ **惑星探査データのさらなる活用へ**：雲頂付近の昼側に限られた観測を活用し、時期ごとの大気状態を推定するデータ同化の有効性を示しました。この成果は、あかつきが蓄積した観測データのさらなる活用に加え、将来の金星探査データの解析や、観測データが乏しい他の惑星の大気研究への応用につながると期待されます。



▲図 1. 本研究の概念図。雲頂付近・昼側の断片的な観測を数値モデルに取り込み、各時期の雲頂の風を再現するとともに、観測のない高度も含めた大気の 3 次元構造を推定する。

2. 研究背景

金星は地球とほぼ同じ大きさの惑星ですが、その大気は、自転の最大 60 倍もの速さで惑星を周回しています。この「スーパーローテーション」については、あかつきの観測などから、大気の波が高速の流れの維持に果たす役割が示されるなど、近年理解が進んでいます［参考文献 1］。また、あかつきによる長年の観測からは、雲頂付近の風速が長期的に変動する様子や、北半球と南半球で風速が異なる様子も明らかになっています［参考文献 2］。しかし、金星は厚い硫酸の雲に覆われているため、雲より下の大気を直接観測することは難しく、探査機による観測も時間的・空間的に限られます。こうした断片的な観測から、時期ごとの大気状態を継続的に推定し、その違いを捉えることが課題となっていました。

研究チームは、地球の天気予報で用いられるデータ同化を金星に応用してきました。スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」(※5) 上で動作する金星大気大循環モデル (GCM) (※6)「AFES-Venus」と、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）を組み合わせた ALEDAS-V を開発しました［参考文献 3、4］。さらに、2018 年 9～12 月のあかつきの観測を同化して、金星大気の客観解析データセット（※7）「ALERA-V v1.0」を作成し、公開しています［参考文献 5、6］。

3. 研究内容・成果

本研究では、従来の特定期間での同化を、風速の異なる 5 つの期間（速い 2 期間、中間の 1 期間、遅い 2 期間）へと広げ、それぞれ約 6 か月間の同化実験を行いました。断片的な観測から各時期の雲頂の風を再現するとともに、観測のない高度を含む大気の 3 次元構造への影響を調べました。

① データ同化による各時期の雲頂の風の再現

今回用いた風のデータは、あかつきの紫外線画像から雲の動きを追跡して求めたもので、雲頂付近の昼側に限られ、時間的にも不連続です。ALEDAS-V では、こうした断片的な観測と数値モデルの予報を統合し、観測のない時刻や高度を含む大気の状態を推定しました（図 1）。

データ同化により、観測を取り込まない計算（フリーラン、FR）で見られた過大な風速が抑えられ、各時期の観測に近い風速分布が得られました（図 2a）。同化に用いた観測値に対する風速の誤差（RMSE）は約 74～80%、系統的な偏り（バイアス）は約 83～86%低減しました。

② 雲頂の風の南北差と、3 次元構造に現れた変化

各期間の解析データを観測や FR と比較した結果、以下の特徴が見られました。

- **東西風の南北差の再現**：今回対象とした風速の遅い 2 期間では、観測で見られた北半球と南半球の東西風の大きな差を再現しました（図 2a）。
- **子午面循環の強化**：同化した高度をまたいで下層から上層まで広がる循環セル（図 2b、c の星印で示した循環）が、FR に比べてすべての期間で強まりました。今回対象とした風速の遅い 2 期間では、速い 2 期間と比べてこの強まりが大きく、南北非対称性も見られました。
- **熱潮汐波の変化**：太陽加熱によって生じる大気の波「熱潮汐波」（※8）の構造にも、今回比較した 5 期間の間で系統的な違いが見られました。赤道付近では、地方時による風速の増減のパターンが、あかつきの観測に近づきました。

③ 雲頂以外の高度にも現れ、同化停止後も残る観測の影響

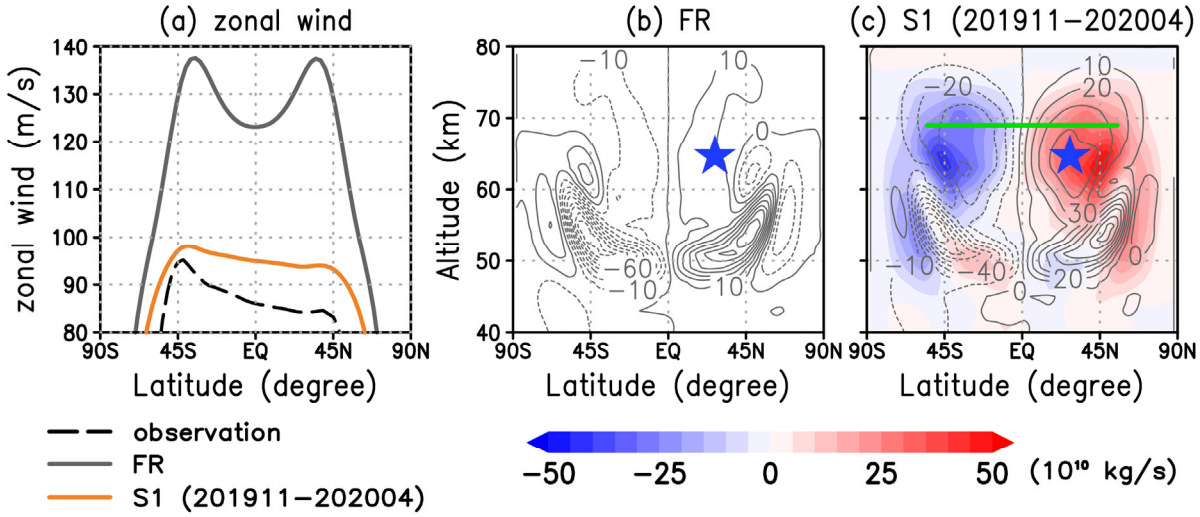
同化の各ステップで予報値に加えられる直接の修正は、主に雲頂付近に限られます。一方、子午面循環の変化はより広い高度範囲に現れており、雲頂の風の修正を受けたモデルの力学的な応答が関わっていると考えられます。

また、観測の取り込みが停止した後も、同化によって生じた FR との差は約 1 か月間持続しました。これは、観測の影響がモデルの大気状態に一定期間保持されることを示しています。観測のない高度の構造はモデルに基づく推定であり、その妥当性の検証と、循環が変化する仕組みの解明が今後の課題です。

4. 今後の展開

本研究は、観測データが時間的・空間的に非常に限られる惑星探査において、データ同化が観測とモデルの双方の強みを引き出し、大気の 3 次元構造を推定する有力な手段となることを示しました。

今後は、今回の 5 つの期間の同化実験で得られた客観解析データを順次公開していく予定です。観測と数値モデルを結びつける本研究の取り組みは、将来の探査計画の検討や、地球以外の惑星の多様な大気環境の理解に向けた新たな観測データの活用にもつながると期待されます。



▲図 2. 雲頂の東西風と子午面循環の比較。(a) 雲頂付近の東西風の緯度分布（単位：m/s）。黒破線は風の遅い時期（S1）の観測値、灰色実線はフリーラン（FR）、橙色実線は S1 の同化実験を示す。計算結果は昼側（地方時 6～18 時）の平均。(b) FR と(c) S1 の子午面循環。灰色の等値線は循環の強さと向きを表す質量流線関数（単位：10^{10} kg/s）で、正値（実線）は図中で時計回り、負値（破線）は反時計回りの循環に対応する。(c)の色は S1 と FR の差（S1－FR）を示す。星印は本文で取り上げた循環セルの位置、緑線は観測を取り込む高度と緯度範囲（高度 69 km、緯度 60°S～60°N）を示す。計算結果は各期間の 117 地球日間平均。原論文の図 3 および補足図 S5 を改変。

＜原論文情報＞

“Reconstructing a long-term atmospheric circulation of Venus from sparse observations”

Y. Fujisawa, N. Sugimoto, N. Komori, S.-y. Murakami, T. Matsushima, H. Kashimura, Y. Maejima, H. Ando, M. Takagi, T. Imamura, T. Horinouchi, G. L. Hashimoto, M. Ishiwatari, T. Enomoto, T. Miyoshi, Y.-Y. Hayashi

npj Space Exploration

・DOI：10.1038/s44453-026-00061-w

＜参考文献＞

(1) How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere, T. Horinouchi, Y.-Y. Hayashi, S. Watanabe, M. Yamada, A. Yamazaki, T. Kouyama, M. Taguchi, T. Fukuhara, M. Takagi, K. Ogohara, S.-y. Murakami, J. Peralta, S. S. Limaye, T. Imamura, M. Nakamura, T. M. Sato, T. Satoh, Science, Vol. 368, Issue 6489 (2020), pp. 405–409.

(2) Long-term variability of mean winds and planetary-scale waves around Venusian cloud top observed with Akatsuki/UVI, T. Horinouchi et al., Journal of Geophysical Research: Planets, Vol. 129 (2024), e2023JE008221.

(3) Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere, N. Sugimoto, A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, Scientific Reports, Vol. 7 (2017), 9321.

(4) Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM, N. Sugimoto, M. Takagi, and Y. Matsuda, Journal of Geophysical Research: Planets, Vol. 119 (2014), pp. 1950-1968.

(5) The first assimilation of Akatsuki single-layer winds and its validation with Venusian atmospheric waves excited by solar heating, Fujisawa, Y., Murakami, S.-y., Sugimoto, N., Takagi, M., Imamura, T., Horinouchi, T., Hashimoto, G. L., Ishiwatari, M., Enomoto, T., Miyoshi, T., Kashimura, H., Hayashi, Y.-Y., Scientific Reports, Vol. 12 (2022), 14577.

(6) ALERA-V version 1.0: an objective analysis dataset of the Venus atmosphere, Fujisawa, Y., Murakami, S.-y., Sugimoto, N., Komori, N., Takagi, M., Imamura, T., Horinouchi, T., Hashimoto, G. L., Ishiwatari, M., Enomoto, T., Miyoshi, T., Kashimura, H., Matsushima, T., Hayashi, Y.-Y., Geoscience Data Journal, Vol. 13(3) (2026), e70080.

＜用語説明＞

※1 データ同化と ALEDAS-V：観測データを数値モデルに取り込み、それぞれの不確かさを考慮して大気の状態を推定する手法。地球では天気予報や季節予報の初期値作成などに用いられる。金星大気データ同化システム ALEDAS-V（AFES-LETKF Data Assimilation System for Venus）は、海洋研究開発機構の地球大気大循環モデル AFES をもとにした金星大気大循環モデル AFES-Venus と、同化手法 LETKF（Local Ensemble Transform Kalman Filter：局所アンサンブル変換カルマンフィルタ）を組み合わせたもの。ALEDAS-V で作成した客観解析データが ALERA-V である。

※2 スーパーローテーション（超回転）：惑星の大気が、自転よりも速く惑星を周回する現象。金星では高度約 70 km の雲頂付近で西向きの風が秒速約 100 メートルに達し、自転の最大 60 倍の速さになる。

※3 あかつき：金星大気の謎を解明するために開発された日本の金星探査機。2010 年 5 月 21 日に打ち上げられ、同年 12 月の金星周回軌道投入には失敗したが、2015 年 12 月 7 日に再挑戦して成功した。日本初の地球以外の惑星周回機として、複数の波長帯のカメラなどで金星大気を観測し、2024 年 4 月に通信が途絶するまで 8 年以上にわたる観測データを蓄積した。2025 年 9 月に運用を終了した。

※4 子午面循環：南北方向と高さ方向に広がる大気の循環。熱や角運動量（回転の勢い）を運ぶ。地球のハドレー循環も子午面循環の一種である。

※5 地球シミュレータ：海洋研究開発機構（JAMSTEC）が運用するスーパーコンピュータ。地球全体の気候変動や大気・海洋循環などの大規模な数値計算に用いられ、本研究の金星大気の計算にも使用した。

※6 大気大循環モデル（GCM）：流体力学や熱力学の方程式に基づいて、大気の流れや温度などを計算する数値モデル。AFES-Venus は地球の大気大循環モデルをもとに金星用に開発され、放射による加熱・冷却などを簡略化して扱い、スーパーローテーションをはじめとする金星大気の循環を計算する。

※7 客観解析データ：観測と数値モデルの予報を統合して推定した大気の状態を、一定の時間間隔と共通の格子上にまとめたデータ。時間的・空間的にまばらな観測を用いても、観測のない領域を含めて大気の変化を調べられる。ALERA-V は金星大気の客観解析データセットの名称。

※8 熱潮汐波：太陽の加熱が昼側に偏ることで生じ、太陽の動きに伴って移動する大気の波。金星ではスーパーローテーションの維持に重要な役割を果たすと考えられている［参考文献 1］。