

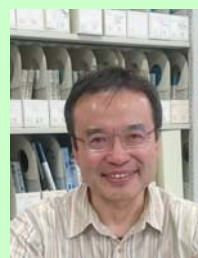
**あかつきデータ同化が明らかにする金星大気循環の全貌**

**Comprehensive picture of the atmospheric circulation of Venus revealed by AKATSUKI data assimilation**

課題番号：19H05605

林 祥介 (HAYASHI Yoshi-yuki)

神戸大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、金星探査機「あかつき」による観測と大気大循環モデルによる数値計算とをデータ同化の手法を用いて融合し、観測と矛盾せず力学的に辻褃のあった大気循環場を生成、これを解析することで金星大気スーパーローテーションの謎に迫る。生成された循環場は、世界初の金星大気客観解析データ『あかつき』金星気象データセット』として世界に公開する。

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：金星大気大循環モデル、金星探査機「あかつき」、スーパーローテーション、データ同化

1. 研究開始当初の背景

金星大気の大気循環構造は未だあまりよく理解されていない。金星大気循環の最も顕著な特徴として、「スーパーローテーション（4日循環）」、すなわち、雲層上部で約100m/s（4日で金星を一周する風速）に達する高速東西流の存在がある。これは金星本体の自転（周期243日）の数十倍の超回転状態であり、ゆっくり自転する固体惑星から大気へと角運動量を汲み上げ、これを維持する循環構造の解明が気象学の基本的な課題として残されていた。計算機の進歩に対応して金星大気の数値シミュレーションも進歩しつつあったが、再現すべき大気構造の観測が少なく、とりわけ高度45-70km付近にある厚い雲層に阻まれ大気下部の状況はほとんどわかっていないため、モデル開発は手探りで理論的に進めていくしかなかった。

これに対し、金星大気観測の質と量を圧倒的に改善するべく、我が国の金星探査機「あかつき」は世界初の本格金星気象衛星として金星低緯度周回軌道に投入され、紫外カメラ（UVI）、中間赤外カメラ（LIR）、赤外カメラ（IR1、IR2）の4種類の撮像カメラによって金星大気異なる深さの情報収集を行ってきた。

2. 研究の目的

以上の状況の中、「あかつき」で得られた鮮明な画像と、我々が開発を進めている、地球シミュレータ上の金星大気大循環モデル



(AFES-Venus) による高解像度数値計算結果との間に驚くべき類似性が見いだされ、観測とモデルの直接的な比較が可能であること

図1 「データ同化」による観測とモデルの融合イメージ。

が示唆された。我々は数値計算がそこまで到達しているとは思っていなかったのである。本研究の目的は、数値モデルと観測とを結びつける今日的な手法を導入することで、観測の解析とモデルの開発とを促進し、金星大気の大気循環構造の謎（スーパーローテーション）に迫ることにある。

3. 研究の方法

「あかつき」観測・解析と AFES-Venus の開発・数値実験とを「データ同化」の手法を導入する (Sugimoto et al., 2017) ことにより融合・推進し、観測と矛盾せず力学的に辻褃のあった金星大気大循環場の生成を実現する (図1)。「あかつき」による電波掩蔽観測、撮像画像群とそこから生成される雲追跡風ベクトルを活用、さらには、雲・放射過程など素過程モデル群を開発導入し「あかつ

き」観測シミュレーションを実現することによりこれを進める。

#### 4. これまでの成果

この2年間は、データ同化の準備として「あかつき」観測データを精練、雲追跡風ベクトル場を生成し、そこから大気諸相の特徴を抽出すること、および、データ同化の有効性を検証することに注力して研究を進めてきた。

大気諸相の特徴を抽出する研究で得られた成果の1つは雲層低緯度でのスーパーローテーションの維持機構を史上初めて観測から定量的に明らかにしたことである。UVIデータからの雲追跡風ベクトル場、LIRデータからの雲頂温度場、さらに、過去の探査機データをも活用し、各種大気波動による角運動量輸送量を求めることに成功した(論文1)。結果、低緯度の角運動量分布の極大の維持には大気熱潮汐波による水平および鉛直の輸送が支配的であることが示された。過去の研究で示唆されてきた大規模な乱流や熱潮汐波以外の波動による輸送は弱くむしろ逆に働いていた(図2)。この結果は今後のデータ同化実験に供され、得られた同化データの解析によってこれをもたらす循環構造が解明されていくことが期待される。

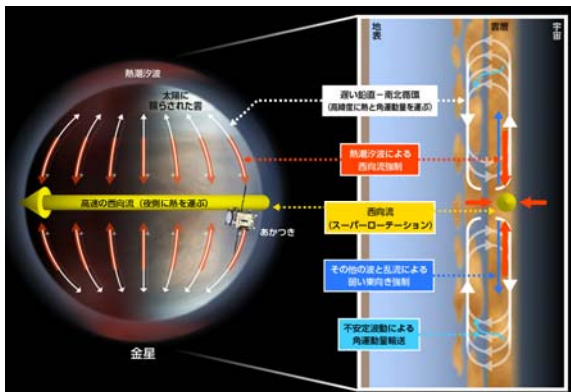


図2 本研究で明らかにされた金星スーパーローテーション維持機構の概念図。

データ同化の有効性を検証する研究の成果の1つは、同化実験における雲層上端の惑星規模ケルビン波の再現可能性を示したことである。金星を紫外線で観測すると顕著なY字模様が見えることは以前から知られていた。このY字模様を維持する構造として雲層上端に惑星規模赤道ケルビン波が存在することが想像されてきた。赤道ケルビン波は角運動量輸送にも大きく寄与していると予想され、金星大気の循環構造を理解する上で重要な大気波動の1つであると考えられている。しかし、金星大気モデルで雲層上端にケルビン波を再現した例はこれまで報告されていなかった。この問題に対して、本研究では雲追跡風ベクトルを模した疑似観測データを与え、データ同化による観測システムシ

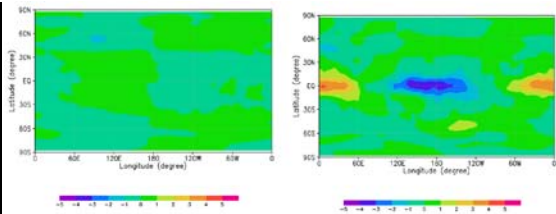


図3 雲頂上端付近(70km)における東西風(m/s)の解析結果。左は同化無し、右は風速データを同化して得られた結果。

ミュレーション実験を行った。その結果、雲層上端の赤道域南北15度の範囲で6時間ごとの風速データがあれば、ケルビン波がデータ同化により表現できることがわかった(論文2、図3)。これにより、「あかつき」観測の中に雲層上端のケルビン波をとらえているデータが存在すれば、モデルの不完全性を観測が補完し、あるいは、不完全性の原因を追求できる可能性があることが示された。

#### 5. 今後の計画

「あかつき」観測は継続しており、本研究においては引き続きデータの精練と雲追跡風ベクトルの生成や解析を続け、特徴現象の抽出を行う。得られた特徴現象を鍵にして、データ同化実験を行い、同化データの解析から現象の置かれた循環構造を明らかにする。AFES-Venusの現状は人為的な熱的強制による力学モデルであるが、順次、雲モデルや放射モデルを開発実装し、並行して同化システムの開発・改良をすすめ、雲・放射場の同化を実現、同化データは金星大気客観解析プロダクト(『あかつき』金星気象データセット)として公開し、その解析から大気循環構造を解き明かし、スーパーローテーションの謎に迫る。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. [Horinouchi, T., Y.-Y. Hayashi, S. Watanabe, M. Yamada, A. Yamazaki, T. Kouyama, M. Taguchi, T. Fukuhara, M. Takagi, K. Ogohara, S. Murakami, J. Peralta, S. S. Limaye, T. Imamura, M. Nakamura, T. M. Sato, and T. Satoh](#), How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere, *Science*, 368, 405-409 (2020).
2. [Sugimoto, N., Y. Fujisawa, M. Shirasaka, A. Hosono, M. Abe, H. Ando, M. Takagi, and M. Yamamoto](#), Observing system simulation experiment to reproduce Kelvin wave in the Venus atmosphere, *Atmosphere*, 12, 14, (2021).

#### 7. ホームページ等

<https://www.cps-jp.org/~akatsuki/pub/dataassim/kibanS/>

研究代表者連絡先 shosuke@gfd-dennou.org