

# 一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その49 ～金星大気初のデータ同化への挑戦:あかつき観測と数値計算の融合～

杉本 憲彦<sup>1,2</sup>, 藤澤 由貴子<sup>2</sup>, 安藤 紘基<sup>3</sup>, 高木 征弘<sup>3</sup>,  
AFES-Venusチーム, ALEDAS-Vチーム

(要旨) 金星探査機「あかつき」の観測データを最大限に活用するために、我々の研究グループでは金星大気の全球的な流れを地球シミュレータ上で計算する数値モデル「AFES-Venus」と、局所アンサンブルカルマンフィルタを用いて観測データをAFES-Venusへと同化するデータ同化システム「ALEDAS-V」を開発してきました。前回[1]からの進展として、AFES-Venusでは、超長時間積分による静止状態からのスーパーローテーションの再現、超高解像度計算による熱潮汐波からの大気重力波の自発的な放射の発見、雲物理過程の導入、低安定度層などの温度構造の再現、加熱や安定度の改良によるケルビン波や熱潮汐波の現実的な再現、などに成功しました。また、ALEDAS-Vでは、「あかつき」やVenus Expressの紫外画像で得られた水平風を同化し、金星大気初の現実的かつ時空間的に偏りのないデータセットの公開への準備が進めているほか、仮想的な観測データを同化することにより観測の「有効性」を検証するための観測システムシミュレーション実験なども実施しています。これらの成果を簡単に紹介し、今後の展望についての報告をしたいと思います。

## 1. はじめに

2015年12月に金星周回軌道に投入された金星探査機「あかつき」により、たくさんの興味深い観測成果が得られていることは、本シリーズのこれまでの記事でもよくご存知のことと思います。金星大気シミュレーションは、九州大学の山本勝さんの一連の研究[2,3等]をはじめとして、日本ではいくつかのグループで行われています。数値モデルも複数存在し、国内で相互比較ができるという、世界的に見てかなり活発な状況にあります。そのような中、我々の研究グループでは、あかつきが金星に到着する前から、金星大気の全球的な流れを地球シミュレータ上で計算する数値モデル「AFES-Venus」を開発してきま

した[4]。AFES-Venusは、放射による加熱・冷却の過程を単純化し、雲や化学物質等を含まない力学モデルですが、観測と統合的な大気の静的安定度を導入し、これまでよりも高い解像度での計算を行うことで、スーパーローテーションを含めた現実的な金星大気の循環を再現・維持することに成功してきました[5]。さらに、あかつきの観測データを最大限に活用すべく、局所アンサンブルカルマンフィルタを用いて観測データを取り入れ、AFES-Venusの計算結果を修正する、金星大気初のデータ同化システム「ALEDAS-V」の開発も進めており[6]、試行実験を続けています。本記事では、前回の榎村さんの報告[1]以降に得られた、AFES-VenusとALEDAS-Vの成果について簡単に紹介するとともに、今後の試みについても解説したいと思います。より詳しい研究成果については、参考文献に記載した各論文をご参照いただけると幸いです。

1. 慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室

2. 慶應義塾大学 自然科学研究教育センター

3. 京都産業大学 理学部

nori@phys-h.keio.ac.jp

## 2. AFES-VenusとALEDAS-V

地球の気象や気候など、惑星全体の大気の流れを計算する数値モデルが、大気大循環モデル(GCM: General Circulation Model)です。通常の大気大循環モデルは、大気の運動、熱力学、状態方程式を計算する「力学」部分と、太陽放射や赤外放射などの放射伝達や、雲の凝結や化学物質の組成変化などを計算する「物理」部分からなります。AFES-Venusは、地球シミュレータ向けに最適化された地球の大気大循環モデルAFES(Atmospheric GCM For the Earth Simulator)[7]の力学部分を基に、諸定数を金星版に変更したものです。物理部分の多くを簡略化し、簡易的な太陽放射と赤外放射を計算することで、高分解能長時間計算に挑んできました。基本実験では、初期に理想的なスーパーローテーションを仮定し、それにバランスした(雲層の低安定度層を含む)温度場を導入しました。これにより、超長時間の数値計算を必要とする助走計算を行うことなく、現実的なスーパーローテーションが再現・維持することができ[5]、周極低温緯度帯(コールドカラー)[8]や熱潮汐波[9]など、観測と整合的な現象を得ることができました。地球シミュレータを駆使した高い空間解像度の計算では、あかつき近赤外カメラ(IR2)で観測された惑星規模の筋状構造の再現にも成功しています[10]。

観測と数値モデルの結果を見比べ、モデルの結果を修正する手法がデータ同化です。観測データは時空間的にまばらにしか存在しませんが、データ同化を行うことで、観測と整合的かつ時空間的に均質なデータセットの生成が可能になります。地球大気では、AFESでアンサンブル予報を行い、その予報誤差と観測誤差を見比べて、局所アンサンブルカルマンフィルタ(LETKF; Local Ensemble Transform Kalman Filter)によってデータ同化するシステムが開発されており、既に再解析データ(ALERA; AFES-LETKF experimental reanalysis of atmospheric data)も公開されています。これをAFES-Venusを使って金星化したのがALEDAS-V(AFES-LETKF Data Assimilation System

for Venus)です。これまで、モデルの出力で作成した疑似観測データや、欧州の金星探査機「Venus Express」の観測データを用いた同化テスト実験により、ALEDAS-Vが動作することを確認しています[6]。

## 3. 主要な成果

### 3.1 子午面循環によるスーパーローテーションの再現

AFES-Venusによる中解像度(128×64×60)の数値シミュレーションを、3000地球年というこれまでにない超長時間積分することで、静止状態からのスーパーローテーションの再現に成功しました[11]。これまで、現実的な太陽加熱を用いて、子午面循環による地表からの角運動量の供給で、スーパーローテーションを再現した例はありません。本研究では、熱潮汐波を励起させる太陽加熱の日変化成分を除き、子午面循環のみを駆動する太陽加熱の設定で実験を行いました。その結果、鉛直渦粘性をある程度小さく(0.02 m<sup>2</sup>/s以下に)した場合(従来は地球の成層圏での値が用いられてきました)のみ、超長時間積分によって高速のスーパーローテーションが発現しました。このため、これ以降のAFES-Venusの実験設定では、鉛直渦粘性を小さくする工夫が取り入れられています。

### 3.2 簡略化した雲モデルの導入と解析

金星の硫酸雲に対する大気運動の影響を調査するため、簡略化した雲物理過程をAFES-Venusに導入しました。ここでは、水蒸気と硫酸蒸気の生成・輸送過程と両者の凝結による硫酸雲の生成などを取り入れています[12]。その結果、地上望遠鏡や探査機による赤外観測で示された雲量や水蒸気混合比の緯度分布を再現しました。また、硫酸雲が短周期の擾乱によって極域で活発に生成される可能性を指摘しました(図1)。さらに、赤道域で観測される大規模な雲量の周期的な変化も再現し、雲層下部の赤道ケルビン波に伴う温度変化で生じることがわかりました[13]。

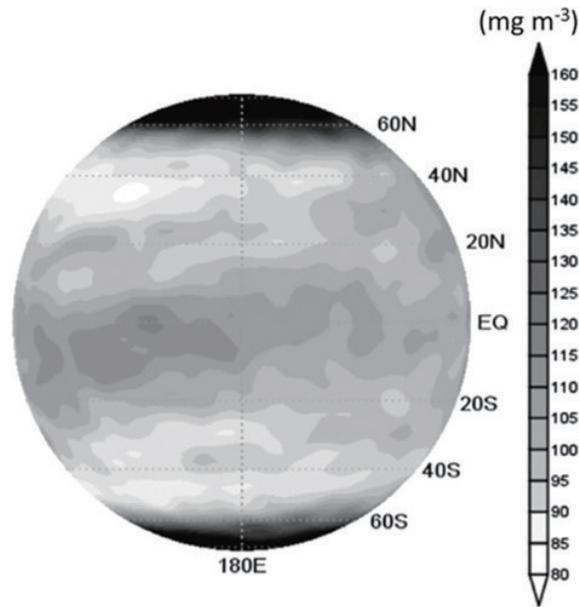


図1: AFES-Venusで再現された雲分布の様子[12]. 鉛直積算した雲密度の水平分布を示しています.

### 3.3 熱潮汐波からの自発的な重力波放射の発見

金星大気における小規模重力波の振る舞いを調べるために、世界最高解像度(1920×960×260)の数値実験を実施しました。熱潮汐波の有無による小規模重力波の発生の違いを検討するために、太陽加熱の設定を変更した2種類の実験を実施しました。その結果、熱潮汐波から重力波が自発的に放射されることを初めて発見し、スーパーローテーションの運動量の再分配を担っていることがわかりました(図2)。また、地球と同じように、ジェット出口での励起メカニズムが働いていることがわかりました[14]。あかつき電波掩蔽観測からも、雲層上部において重力波の存在が示唆されていますが、熱潮汐波から自発的に放射された重力波の可能性がります。

### 3.4 雲層下部の温度構造の調査

Venus Expressとあかつきの電波掩蔽観測から、低安定度層が極域で高度42 km程度まで深く広がっていることが示されています[15]。この傾向は、AFES-Venusの数値実験でも再現されており、観

測との比較やその成因の調査を行いました。その結果、大気大循環と波動による力学的な寄与が、この低安定度層の生成・維持に重要であることが示唆されました[16]。

### 3.5 加熱や成層度を変化させた感度実験

AFES-Venusでは雲層上端で観測される約4日周期のケルビン波がうまく再現できていませんでした。また、あかつきの中間赤外カメラ(LIR)画像から得られる熱潮汐波の位相にも大きなずれが存在しています。これらの波はスーパーローテーションの再現や構造の維持に重要な働きを持つと考えられているため、その再現性を高めるために、加熱分布や成層度を変更した感度実験を行いました。その結果、雲層上端に4日周期のケルビン波に相当する波が再現され、ロスビー波とケルビン波の結合によってもたらされるシア不安定で励起されることが明らかになりました[17]。また、熱潮汐波についても、観測とより整合的な位相構造を持つ再現結果が得られつつあります[18]。

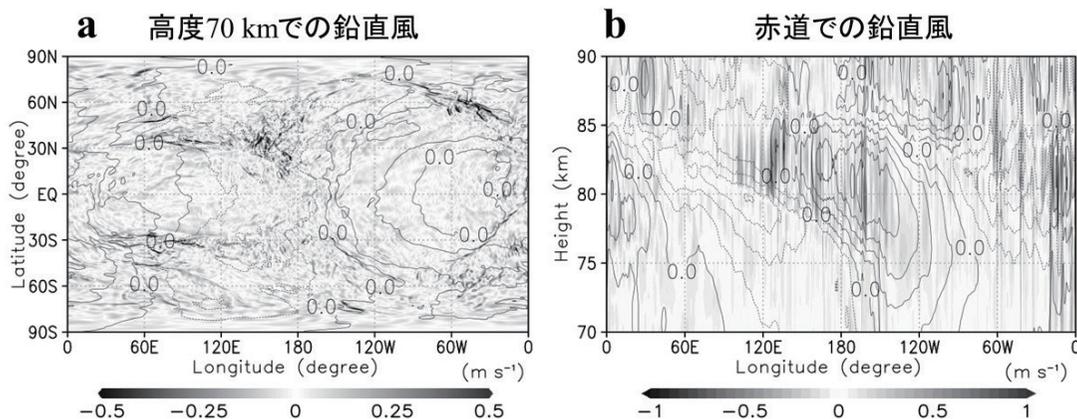


図2: AFES-Venusの超高解像度計算で得られた金星大気重力波の様子[14]. 鉛直速度をトーン, ジオポテンシャル偏差を等値線(間隔は  $1000[m^2/s^2]$ )で示しています. (a)は高度70 kmでの水平分布, (b)は赤道での東西鉛直分布を示しています.

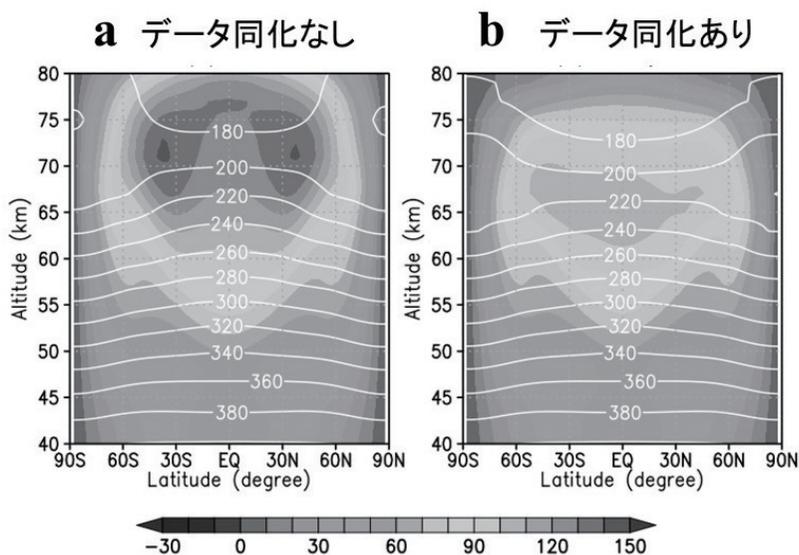


図3: ALEDAS-Vによって, あかつき紫外線観測画像から得られた水平風をデータ同化して得られた東西平均場の南北鉛直分布の様子[20]. (a)はデータ同化なし, (b)がデータ同化ありの結果で, 東西風をトーン [m/s], 温度を等値線[K]で示しています.

### 3.6 衛星観測で得られた風速のデータ同化

ALEDAS-Vを用いて, Venus Express の紫外カメラ(UV)画像の雲追跡によって導出された雲頂高度での風速データを同化しました. その結果, 熱潮汐波の位相構造が改善され, 全球の風速場も修正されました[19]. 次に, 赤道域かつ, より観測頻度

が高い, あかつきのいくつかの観測期間について, UV画像から得られる雲追跡風の同化を行いました. その結果, 熱潮汐波の位相構造が改善されただけでなく, 全球の風速や温度場も大きく修正されました[20] (図3). この結果はモデルが表現できていない構造を考察する上で大きな手掛かりを提供する, データ同化の大きな成果であると思っています. ま

た、ケルビン波やコールドカラーの再現性も高くなっていることがわかりました。現在、この世界初の金星客観解析の公開を目標に、データの整備を行っています。

### 3.7 観測システムシミュレーション実験 (OSSE)

ALEDAS-Vでは、観測データをモデルの出力から仮想的に作成し、それらを観測データとして同化した際に、どれくらいの改善がもたらされるかを調べる、観測システムシミュレーション実験(OSSE; Observing System Simulation Experiment)を行うことができます。まず、今後の金星探査で有望視されている小型衛星間の電波掩蔽観測を想定したOSSEを行いました。その結果、2-3機の極軌道の小型衛星を配置できれば、コールドカラーの再現が可能なることを発見しました[21]。現在、さらに実軌道へ拡張[22]したOSSEとその解析を行っています[23]。また、UV画像で得られる雲追跡風のOSSEを行い、データ同化でケルビン波やロスビー波を再現するために必要な観測条件を調べました。その結果、高度70 kmでの水平風速が6時間毎に存在すれば、ケルビン波が再現可能[24]であることがわかりました。現在、再現されたケルビン波がスーパーローテーションにもたらす、加速・減速効果の定量化[25]とロスビー波への拡張実験を行っています。

## 4. おわりに

ここまで、簡単にAFES-VenusとALEDAS-Vの最新の成果を紹介しました。金星大気中の放射伝達モデルや硫酸蒸気の生成・輸送・凝結過程のモデル開発も現在進行中です。また、あかつきの観測データを同化した、金星客観解析データでの個々の現象の解析も進みつつあります。あかつきの観測データが大量に蓄積されており、データ解析も進行しています。AFES-Venusのモデル開発と相互に連携することで、更なる研究の進展が期待できるでしょう。一方で、今後の金星探査計画の検討のためには、ALEDAS-Vのデータ同化を用いたOSSEの実施が必要不可欠になってくると考えています。我々AFES-Venus, ALEDAS-V両チームは、あかつき

の観測とより密接に連携しながら、金星大気モデルとデータ同化システムの精緻化をはかり、これからも金星大気の謎に挑んでいきたいと考えています。

## 謝辞

本研究は、地球シミュレータ利用課題『AFESを用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』及び『AFESを用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション』と文部科学省科学研究費補助金 基盤研究B(19H01971)『階層的数値モデルによる金星大気重力波の励起、伝播、散逸過程の解明』、基盤研究S(19H05605)『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』、基盤研究C(20K04064)『金星大気の衛星間電波掩蔽観測計画に向けた観測システムシミュレーション実験』の一環として実施しました。AFES-Venusの高解像度計算には、海洋研究開発機構の支援のもと地球シミュレータを使用しました。最後に、金星探査機あかつきに関わる全ての方に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 榎村博基ほか, 2018, 遊星人 27, 314.
- [2] Yamamoto, M. and Takahashi, M., 2003, *J. Atmos. Sci.* 60, 561.
- [3] Yamamoto, M. et al., 2021, *Icarus* 355, 114154.
- [4] Sugimoto, N. et al., 2014, *J. Geophys. Res.-Planets* 119, 1950.
- [5] Sugimoto, N. et al., 2014, *Geophys. Res. Lett.* 41, 7461.
- [6] Sugimoto, N. et al., 2017, *Sci. Rep.* 7, 9321.
- [7] Ohfuchi, W. et al., 2004, *J. Earth Simulator* 1, 8.
- [8] Ando, H. et al., 2016, *Nature Comm.* 7, 10398.
- [9] Takagi, M. et al., 2018, *J. Geophys. Res.-Planets* 123, 335.
- [10] Kashimura, H. et al., 2019, *Nature Comm.* 10, 23.
- [11] Sugimoto, N. et al., 2019, *Geophys. Res. Lett.* 46, 1776.
- [12] Ando, H. et al., 2020, *J. Geophys. Res.-Planets* 125, 6208.

- [13] Ando, H. et al., 2021, *J. Geophys. Res.-Planets* 126, 6781
- [14] Sugimoto, N. et al., 2021, *Nature Comm.* 12, 3682.
- [15] Ando, H. et al., 2020, *Sci. Rep.* 10, 3448.
- [16] Ando, H. et al., under minor revision, *J. Geophys. Res.-Planets*.
- [17] Takagi, M. et al., under minor revision, *J. Geophys. Res.-Planets*.
- [18] Suzuki, A. et al., submitted, *J. Geophys. Res.-Planets*.
- [19] Sugimoto, N. et al., 2019, *Geophys. Res. Lett.* 46, 4573.
- [20] Fujisawa, Y. et al., to be submitted, *Nature Geo.*
- [21] Sugimoto, N. et al., 2019, *J. JSCE (J. Applied Mech.)* 75, 477.
- [22] 山本智貴ほか, 2021, *日本航空宇宙学会論文集* 69, 179.
- [23] Fujisawa, Y. et al., under revision, *Icarus*.
- [24] Sugimoto, N. et al., 2021, *Atmosphere* 12, 14.
- [25] Sugimoto, N. et al., 2022, *Atmosphere* 13, 182.