

AFES を用いた金星・火星大気の高解像度大循環シミュレーション

課題責任者

林 祥介 神戸大学大学院理学研究科

著者

林 祥介*¹, 杉本 憲彦*², 藤澤 由貴子*², 小守 信正*², Liang Jianyu*³,
高木 征弘*⁴, 檜村 博基*¹, 高橋 芳幸*¹, 中島 健介*⁵, 黒田 剛史*⁶,
鎌田 有紘*⁶, 石渡 正樹*⁷, はしもと じょーじ*⁸, 松田 佳久*⁹*¹ 神戸大学大学院理学研究科, *² 慶應義塾大学自然科学研究教育センター, *³ 理化学研究所計算科学研究センター,
*⁴ 京都産業大学理学部, *⁵ 九州大学大学院理学研究院, *⁶ 東北大学大学院理学研究科, *⁷ 北海道大学大学院理学
研究院, *⁸ 岡山大学大学院自然科学研究科, *⁹ 東京学芸大学教育学部

キーワード: 惑星大気, 金星, 火星, データ同化, 鉛直対流

1. はじめに

地球型惑星の大気大循環の多様性を再現し、これを包括的に理解することは未だ道半ばの問題である。金星や火星の大気の動態は惑星探査や数値計算によって徐々に調べられてきたが、金星大気のスーパーローテーション、火星大気ダストの存在や全球ダストストームの発生といった、地球では見られない現象の発生機構は未だ理解されるには至っていない。このような大気大循環の特徴の違いがどのような力学によってもたらされているかを理解することは大気科学あるいは流体力学の最も興味深く重要な問題の1つである。本課題では、共通の大気力学コアを持つ金星・火星大気大循環モデルを開発し、地球と同じ力学的枠組みの下で、金星と火星の大気循環・擾乱を調査・記述し、大循環の多様性をもたらす力学的構造を理解することを目指す。

我々は地球シミュレータ上で高速に実行できるように最適化されてきた大気大循環モデル AFES (AGCM (Atmospheric General Circulation Model) for the Earth Simulator) [1] を基に、金星と火星大気条件にあわせた放射過程、乱流過程、地表面過程をそれぞれ導入した AFES-Venus と AFES-Mars を開発してきた。これらのモデルを地球シミュレータで実行することで、金星・火星において惑星規模循環から、0(10 km)の水平スケールを持つ小規模擾乱までを同時に表現した、大気循環構造の計算を実現してきた。特に、金星大気において、極域の周極低温域[2, 3]や、雲層下部の惑星規模筋状構造[4]、熱潮汐波[5]や赤道ケルビン波[6]など、観測されている現象と整合的な構造の再現に成功してきた。数値計算の結果からは、雲層下部の低安定度層付近で生じる傾圧不安定[7, 8]や、熱潮汐波からの自発的な重力波放射[9]の存在を示唆してきた。火星大気においては、日周期の太陽加熱に伴う中小規模擾乱が無数に生じることを示してきた。また、これらの擾乱が大気へのダストの重要な供給過程であることを念頭に置き、擾乱の特徴を調べるための数値実験と解析を行ってきた。数値実験は、水平格子点間隔が約 11 km の解像度 (T639) までの複数の解像度

で実施し、特に高解像度計算の中で低緯度域に現れる多数の小規模渦に注目し、その成因を解析してきた。これまでの解析により、これらの小規模渦は数値モデルで解像された熱対流と鉛直シアの相互作用の結果として生じていることが明らかになっている。

一方、AFES-Venus に LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter) を応用した、金星大気データ同化システム ALEDAS-V (AFES LETKF Data Assimilation System for Venus) も構築し [10]、欧州宇宙機関の金星探査機「Venus Express」の観測データの同化を実現してきた [11]。また ALEDAS-V を利用した観測システムシミュレーション実験 (OSSE; Observing System Simulation Experiment) も実施し、次期金星探査計画の検討に貢献してきた [12-15]。

2. 金星大気実験

今年度は、大気安定度と太陽加熱の分布を観測されるものにより近づける改良を施した AFES-Venus で計算を実施し、その中の様々な波についての詳細な解析を進めた。データ同化に関しては、実観測データの同化結果の解析を継続し、いくつかの OSSE も実施した。以下に主要な成果を示す。

① 改良版の AFES-Venus 中の波動の解析

大気安定度と太陽加熱分布の改良により、金星探査機「あかつき」の中間赤外観測結果と整合的な熱潮汐波の再現に成功した(図 1)。さらに、熱潮汐波は熱や角運動量の南北輸送も担っていることが分かった。つまり、大気安定度分布は、熱潮汐波を介してスーパーローテーションの強さに影響を与えることが示唆された [16]。また、様々な短周期の波動が存在することも分かった。短周期波動とスーパーローテーションの関係を調査中である。

② AFES-Venus の水平渦粘性性と自転軸傾き依存性の調査

金星 AGCM において、スーパーローテーションが水平渦粘性の大きさに強く依存することが報告された [17]。これを受けて、AFES-Venus におけるスーパーローテーションの水平渦粘性依存性の調査を始めた。予備的な結果と

して、中解像度設定では、水平渦粘性の大きさがある範囲内のときは、スーパーローゼーションは水平渦粘性に依存しないことが確認された。また、これまで省略していた自転軸の傾き(約 2.6°)を導入した実験を新たに開始し、有意な季節変化(南北非対称性)が現れることを確認した。

③ 実観測データ同化の解析と OSSE の実施

あかつきの紫外観測画像から雲追跡法で導出された水平風速を同化した金星客観解析データセットの作成と熱潮汐波の解析に関する論文を出版した[18]。さらに、この客観解析データにおける周極低温域の解析を実施した。また OSSE では、あかつき中間赤外観測の同化による熱潮汐波の位相改善効果(図 2)と大気大循環へのインパクトの調査も行った[19]。

このように、今年度も AFES-Venus による数値実験およびデータ同化と OSSE を着実に進めてきた。我々は、あかつきや地上望遠鏡による観測と密に連携することで、金星大気現象の理論的・力学的解釈に寄与するとともに、AFES-Venus のさらなる改良にも繋げている。また、金星大気客観解析データの生成によって、今後の金星大気研究の裾野の広がりが期待される。さらに、OSSE を実施することで次期金星探査計画の検討にも貢献している。

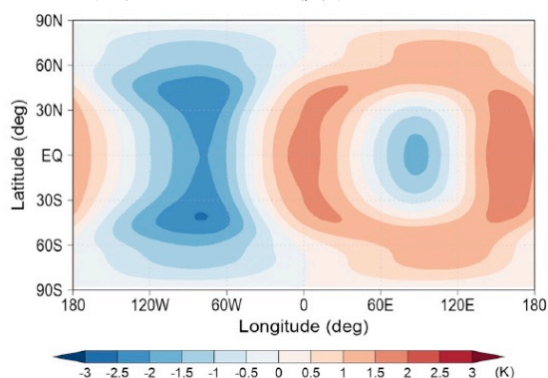


図 1. 改良版 AFES-Venus で計算された輝度温度の擾乱成分(東西平均からのずれ)の水平構造。あかつき中間赤外カメラで想定される加重関数を用いた鉛直積算値。

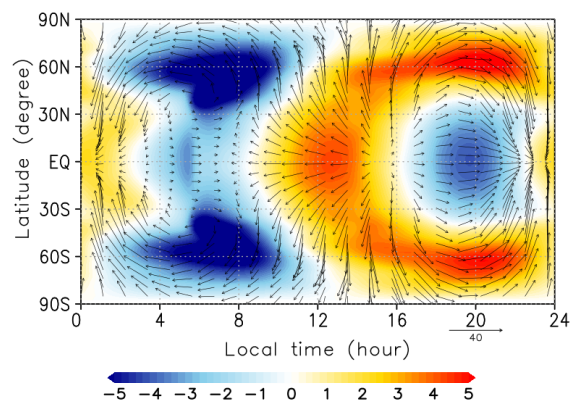


図 2. あかつき中間赤外カメラによる毎時の昼面観測を想定した OSSE で計算された水平風(m/s, 矢印)と温度(K, 色)の擾乱成分の水平構造。対数シグマ高度 70 km の合成図。

3. 火星大気実験

今年度は、日周期の太陽加熱に伴う地表付近の多数の小規模渦が総体として行う熱・運動量輸送の構造と解像度依存性の把握を目指し解析を行った。熱輸送に関しては高解像度ほど早い地方時で生じていることが見出された。これは小規模渦の出現特性と整合的である。ところが、運動量輸送に関しては一貫した結果が得られなかった。大規模場の水平風鉛直シアーの時空間変化も運動量輸送に関係すると考えられるが、その関係の詳細な解析には高い時間解像度での計算結果出力が必要であることが分かった。今後、これら小規模渦による輸送特性の総体と密接に関わる大気潮汐波と東西平均大気構造も再調査し、解像度依存性の総合的把握を進める予定である。また、火星衛星探査計画(MMX)への貢献を念頭に、客観解析データの作成に向けて、AFES-Mars についても LETKF を応用したデータ同化システムの構築に取り掛かった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 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」の助成を受けたものです。

文献

- [1] Ohfuchi, W., Nakamura, H., Yoshioka, M. K., Enomoto, T., Takaya, K., Peng, X., Yamane, S., Nishimura, T., Kurihara, Y., and Ninomiya, K., "10-km Mesh Meso-scale Resolving Simulations of the Global Atmosphere on the Earth Simulator - Preliminary Outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator) -," *Journal of the Earth Simulator*, 1, 8, (2004).
- [2] Ando, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Kashimura, H., Imamura, T., and Matsuda, Y., "The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model," *Nature Communications*, 7, 10398, (2016).
- [3] Ando, H., Imamura, T., Sugimoto, N., Takagi, M., Kashimura, H., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., and Matsuda, Y., "Vertical structure of the axi-asymmetric temperature disturbance in the Venusian polar atmosphere: comparison between radio occultation measurements and GCM results," *J. Geophys. Res. Planets*, 122, 1687–1703, (2017).
- [4] Kashimura, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Ohfuchi, W., Enomoto, T., Nakajima, K., Ishiwatari, M., Sato, T. M., Hashimoto, G. L., Satoh, T., Takahashi, Y. O., and Hayashi, Y.-Y., "Planetary-scale streak structure reproduced in a Venus atmospheric simulation," *Nature Communications*, 10, 23, (2019).
- [5] Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., and Y. Matsuda, "Three dimensional structures of thermal tides simulated by a Venus GCM," *J. Geophys. Res., Planets*, 123, 335–352, (2018).
- [6] Takagi, M., Ando, H., Sugimoto, N., and Matsuda, Y., "A GCM Study on the 4-Day and 5-Day Waves in the Venus Atmosphere," *J. Geophys. Res. Planets*, 127, e2021JE007164, (2022).

- [7] Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Takahashi, Y. O., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., “Baroclinic modes in the atmosphere on Venus simulated by AFES,” *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 61, 11–21, (2013).
- [8] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM,” *J. Geophys. Res. Planets*, 119, 1950–1968, (2014).
- [9] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Kashimura, H., Noguchi, K., Kuroda, T., Takagi, M., and Hayashi, Y.-Y., “Generation of gravity waves from thermal tides in the Venus atmosphere,” *Nature Communications*, 12, 3682, (2021).
- [10] Sugimoto, N., Yamazaki, A., Kouyama, T., Kashimura, H., Enomoto, T., and Takagi, M., “Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere,” *Sci. Rep.*, 7, 9321, (2017).
- [11] Sugimoto, N., Kouyama, T., and Takagi, M., “Impact of data assimilation on thermal tides in the case of Venus Express wind observation,” *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4573–4580, (2019).
- [12] Sugimoto, N., Abe, M., Kikuchi, Y., Hosono, A., Ando, H., Takagi, M., Garate-Lopez, I., Lebonnois, S., and Ao, C., “Observing system simulation experiment for radio occultation measurements of the Venus atmosphere among small satellites,” *Journal of Japan Society of Civil Engineers A2: Applied Mechanics*, 75(2), 477–486, (2019).
- [13] Yamamoto, T., Ikari, S., Ando, H., Imamura, T., Hosono, A., Abe, M., Fujisawa, Y., Sugimoto, N., Kawabata, Y., Funase, R., and Nakasuka, S., “惑星大気の衛星間電波掩蔽観測のための最適軌道に関する研究 (Orbit Design Optimization for Planetary Crosslink Radio Occultation),” *日本航空宇宙学会論文集 (Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences)*, 69(5), 179–186, (2021).
- [14] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Shirasaka, M., Hosono, A., Abe, M., Ando, H., Takagi, M., and Yamamoto, M., “Observing system simulation experiment to reproduce Kelvin wave in the Venus atmosphere,” *Atmosphere*, 12(1), 14, (2021).
- [15] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Shirasaka, M., Abe, M., Murakami, S., Kouyama, T., Ando, H., Takagi, M., and Yamamoto, M., “Kelvin wave and its impact on the Venus atmosphere tested by observing system simulation experiment,” *Atmosphere*, 13(2), 182, (2022).
- [16] Suzuki, A., Takagi, M., Ando, H., Imai, M., Sugimoto, N., and Matsuda, Y., “A sensitivity study of the thermal tides in the Venusian atmosphere: their structures and dynamical effects on the superrotation,” *J. Geophys. Res. Planets*, 127, e2022JE007243, (2022).
- [17] Yamamoto, M. and Takahashi, M., “Sensitivities of general circulation and waves to horizontal subgrid-scale diffusion in long-term time integrations of a dynamical core for Venus,” *J. Geophys. Res. Planets* 127, (2022).
- [18] Fujisawa, Y., Murakami, S., Sugimoto, N., Takagi, M., Imamura, T., Kashimura, H., Horinouchi, T., Hashimoto, G. L., Ishiwatari, M., Enomoto, T., Miyoshi, T., and Hayashi, Y.-Y., “Venus’ thermal tides in assimilation of Akatsuki single-layer winds,” *Sci. Rep.*, 12, 14577, (2022).
- [19] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Komori, N., Ando, H., Kouyama, T., and Takagi, M., “Akatsuki LIR observing system simulation experiments evaluated by thermal tides in the Venus atmosphere,” *Geos. Lett.*, 9, 44, (2022).