

AFES を用いた金星・火星大気循環の全球高解像度計算とデータ同化

課題責任者

杉本 憲彦 慶應義塾大学自然科学研究教育センター

著者

杉本 憲彦*¹, 藤澤 由貴子*¹, 小守 信正*¹, LIANG Jianyu*², 高木 征弘*³,
松嶋 俊樹*⁴, 樫村 博基*⁴, 高橋 芳幸*⁴, 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, 林 祥介*⁴, 松田 佳久*⁹*¹ 慶應義塾大学自然科学研究教育センター, *² 理化学研究所計算科学研究センター, *³ 京都産業大学理学部, *⁴ 神戸大学大学院理学研究科, *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

惑星の大気はその表層環境を規定する要素であり、液体の水ひいては生命の存在を考察する上でも重要な要素である。しかしながら、大気科学は地球大気を対象として発展してきたため、その理解が惑星一般に通ずるか定かではない。また同じ理由により、地球大気の特異性・普遍性に関する理解も不十分である。そこで、地球以外の観測可能な実例である金星・火星を対象に、シミュレーションやデータ同化を通して大気科学の知見を検証し、発展させ、一般化する必要がある。これまでの観測・探査により、金星大気のスーパーローテーションや巨大弓状構造、火星大気中の鉛直対流やダストストームといった、地球には見られない大循環や中小微細規模擾乱、気候状態が実現していることが知られている。しかし、それらの様態、メカニズム、実現条件は未だ十分には明らかになっていない。すなわち、地球を対象に発展してきた大気科学の新たな展開の可能性がそこにある。

我々は、地球シミュレータに最適化された大気大循環モデル「AFES」(AGCM (Atmospheric General Circulation Model) for the Earth Simulator) [1]を基に、金星と火星大気の状態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、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、金星・火星大気循環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]、赤道ジェット変動[10]の存在を示唆してきた。また、数値計算結果の妥当性についても検討してきた[11]。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すとともに、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。

また、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[12]、金星探査機「Venus Express」や「あかつき」の観測データの同化を実現してきた[13-15]。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) [16-21]やbred vector解析[22]も実施してきた。こうした金星大気データ同化の経験を踏まえ、火星大気用のデータ同化システムの開発にも着手している。

2. 金星大気実験

今年度は、データ同化システムを用いた金星大気擾乱の調査を継続し、そのエネルギーサイクルを調べた。実観測データの同化結果の公開作業を進め、いくつかのOSSEも実施した。AFES-Venusの改良として、放射と雲の物理過程をそれぞれ導入した。また、超高解像度実験における傾圧波からの自発的な重力波放射を解析した。以下に主要な成果を示す。

① AFES-Venusの大気擾乱のエネルギーサイクル

AFES-Venusにおいて、bred vectorを用いた各種大気擾乱(傾圧不安定、順圧不安定、ロスビー・ケルビン不安定)の調査[22]を発展させ、エネルギー変換について調べた。特に有効ポテンシャルエネルギーの式を新たに導出し、傾圧エネルギー変換が順圧エネルギー変換に比べて雲層の中高緯度で大きくなること、熱潮汐波が傾圧・順圧エネルギー変換を強化することを示した[23]。

② 客観解析データの公開作業と各種OSSEの実施

あかつきの風速データを同化した、金星大気初の客観解析データ[14]について、データやモデルを整備し公開する作業を進めている[24]。また、あかつきの中間赤外カメラから得られる温度の同化を試行し、OSSEによる観測頻度や緯度帯の感度調査を継続している。今後の探査計画立案に向けて、小型衛星を用いた衛星間電波掩蔽観

測[17]を想定した OSSE により、全球の温度やスーパーローテーションの改善についても調査中[25]である。

③ AFES-Venus への精緻な放射と雲過程の導入と試算モデルの改良として精緻な放射過程を導入した。その結果、これまでと同様なスーパーローテーションの再現(図 1)のみならず、熱潮汐波の位相や周極低温域の再現性も高まった。また雲物理過程も導入し、観測と整合的な分布を得ることに成功した。現在、これらのモデルについて感度実験を行うとともに、放射と雲の相互作用の導入に向けた開発を進めている。

④ 超高解像度実験における傾圧波からの自発的な重力波放射の調査

AFES-Venus の超高解像度 (T639L260) 設定では、低緯度の熱潮汐波[9]以外にも、中高緯度の傾圧波からも自発的に重力波が放射されていた。この自発的放射について、雲層の不安定層の安定度を変化させ、傾圧波の発生を抑制すると自発的放射が弱まることがわかった。この重力波がもたらす運動量や熱フラックスの定量化を波数ごとに分解して調査中である。

このように、今年度も AFES-Venus によるデータ同化と OSSE、数値実験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。

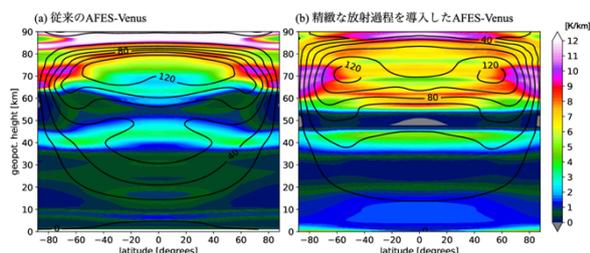


図 1. (a)従来の AFES-Venus と (b)精緻な放射過程を導入した AFES-Venus で計算された平均東西風(等値線)と大気安定度(色)の分布。

3. 火星大気実験

今年度は、東西一様な地表面パラメタに理想化された解像度実験に現れる熱潮汐の構造について詳細に吟味した。これまでに、波数 1, 2 の惑星規模熱潮汐の地表面気圧場については解像度依存性が小さいことがわかっていった。しかし、より詳細に比較すると、波数 7 程度で緯度約 40 度より低緯度側に捕捉された構造が、高解像度計算で強く発現していることがわかった。その構造の解像度依存性から、波数 7 構造は高解像度で顕著に出現する熱対流的な小規模擾乱が地方時 12 時前後に急激に強まることによる集中的な大気加熱により励起されていると推定される。興味深いことに、火星のランダーが観測した気圧日変化でも、この波数 7 構造に対応する時間スケールの変動が見出される。従来、これはランダー近傍の局所

的な地形が駆動するものと解釈されてきたが、今回の結果はより遠隔的な励起の可能性を示唆する。今後、現実的地形での計算も含めて波数 7 構造の励起機構を考察する予定である。

また、火星衛星探査計画「MMX」に貢献し、火星のダスト天気予報実現においても有用となる火星大気客観解析データの作成に向けて、金星大気で経験を積んだ LETKF を AFES-Mars に応用したデータ同化システムの構築も進めている。今年度は、水循環に地面のレゴリスによる水吸着、表層と大気とのやり取り[26]を導入し、同化の水循環計算に与える影響について試算を行った。

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」と 24H00021「波と対流が形成する金星大気大循環：地表から超高層大気まで」、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212U「火星における天気予報の実現と水環境マップの構築」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-symmetric 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] Takagi, M., Ando, H., Imai, M., Sugimoto, N., and Matsuda, Y., “Formation and quasi-periodic variation of equatorial jet caused by planetary-scale waves in the Venusian lower cloud layer,” *J. Geophys. Res. Planets*, 128, e2023JE007922, (2023).
- [11] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Komori, N., Kashimura, H., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Super-rotation independent of horizontal diffusion reproduced in a Venus GCM,” *Earth, Planets and Space*, 75, 44, (2023).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Ando, H., Fujisawa, Y., Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Cold collar reproduced by a Venus GCM with Akatsuki horizontal wind assimilation,” *J. Geophys. Res. Planets*, 128, e2022JE007689, (2023).
- [16] 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).
- [17] Yamamoto, M., 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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,” *Geosci. Lett.*, 9, 44, (2022).
- [21] Fujisawa, Y., Sugimoto, N., Ao, C., Hosono, A., Ando, H., Takagi, M., Garate Lopez, I., and Lebonnois, S., “Evaluation of new radio occultation observations among small satellites at Venus by data assimilation,” *Icarus*, 402, 115728, (2023).
- [22] Liang, J., Sugimoto, N., and Miyoshi, T., “Analyzing the Instabilities in the Venus atmosphere using bred vectors,” *J. Geophys. Res. Planets*, 129, e2023JE008067, (2024).
- [23] Liang, J., Sugimoto, N., and Miyoshi, T., “Unveiling energy conversions of the Venus atmosphere by the bred vectors,” *Geophys. Res. Lett.*, 52, e2024GL112663, (2025).
- [24] Fujisawa, Y., Murakami, S., Sugimoto, N., Komori, N., Takagi, M., Imamura, T., Horinouchi, T., Hashimoto, G. L., Ishiwatari, M., Enomoto, T., Miyoshi, T., Kashimura, H., and Hayashi, Y.-Y., “ALERA-V version 1.0: an experimental objective analysis dataset of Venus atmosphere generated by Akatsuki UVI cloud tracking data and LETKF data assimilation system (ALEDAS-V),” *Geosci. Data J.*, in preparation.
- [25] Sugimoto, N., Fujisawa, N., Komori, N., Ando, H., Takagi, M., Ikari, S., Kawabata, Y., and Imamura, T., “Assimilation impact of the temperature observed by cross-link radio occultation measurements of the Venus atmosphere on the super-rotation,” *Geosci. Lett.*, in preparation.
- [26] Kobayashi, M., Kamada, A., Kuroda, T., Kurokawa, H., Aoki, S., Nakagawa, H., and Terada, N., “Large water inventory in highly adsorptive regolith simulated by a Mars global climate model,” *J. Geophys. Res. Planets*, 130, e2024JE008697, (2025).