

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}, 高木 征弘^{*2}, 松嶋 俊樹^{*3},
 檜村 博基^{*3}, 中島 健介^{*4}, 黒田 剛史^{*5}, 鎌田 有紘^{*6}, 石渡 正樹^{*7},
 はしもと じょーじ^{*3}, 林 祥介^{*3}, 松田 佳久^{*8}

^{*1} 慶應義塾大学自然科学研究教育センター, ^{*2} 京都産業大学理学部, ^{*3} 神戸大学大学院理学研究科, ^{*4} 九州大学大学院理学研究院, ^{*5} 東北大学大学院理学研究科, ^{*6} 東京科学大学未来社会創成院, ^{*7} 北海道大学大学院理学研究院, ^{*8} 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、雲層下部の不安定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, 23]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おり、水循環の表現に必要な物理過程の導入にも取り組んできた[24]。

2. 金星大気実験

今年度は、実観測データの同化結果の公開作業および、他期間のあかつき風速同化と再現された波動の解析を進めた。また衛星間電波掩蔽の OSSE を実施した。さらに、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解析を行った。AFES-Venus の改良として、放射と雲の物理過程の結合を試行した。以下に主要な成果を示す。

① 客観解析の公開作業と他期間の同化

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た公開作業を進め、論文化を行った[25]。また、他期間の風速を同化したところ、スーパーローテーションの長期間変動の再現と、各期間で再現される惑星規模波の違いを見出し、解析を進めている。

② 衛星間電波掩蔽観測の OSSE

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 を実施した。合成観測には、AFES-Venus でスーパーローテーションが遅くなる設定で作成した温度場を用いた。探査機の個数や軌道等、観測条件を変化させた一連の実験により、全球の温度のみならず、スーパーローテーション(東西風速)の大

幅な改善が可能であることを発見し、これらの結果をまとめた成果を論文化した[26].

③ 超高解像度実験における自発的な重力波放射

AFES-Venus の超高解像度 (T639L260) 計算の結果から、低緯度の熱潮汐波[9]の他にも、中高緯度の傾圧波から自発的に重力波が放射されることが見出された。さらに、雲層の弱安定層の安定度を変化させて傾圧波の発生を抑制した数値実験を行い、自発的放射が弱まることを確認した。また、この重力波がもたらす運動量や熱フラックスの波数別解析や中解像度計算との比較から、下層のスーパーローテーションの構造に大規模波動から自発的に放射される微細な重力波が寄与することを明らかにした(図1)。これらの結果を論文化した[27].

④ AFES-Venus への精緻な放射と雲過程の結合

昨年度までにモデルの改良として、精緻な放射過程および雲物理過程のそれぞれの導入とテスト計算を進めてきた。今年度は、これらの放射と雲の相互作用の導入に向けた開発を進めた。また、諸物理過程の導入に伴う計算コストの増加に対応するため、計算アルゴリズムとプログラムコードの両面で最適化をはかった。結果、無事に結合が完了し、現在はテスト計算を実施中である。

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。

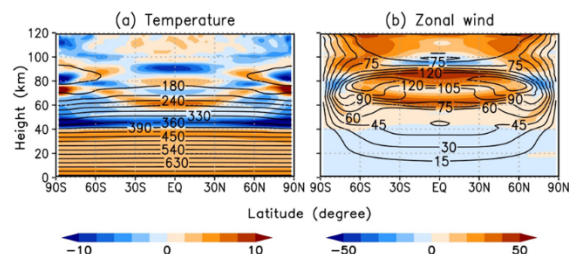


図1. 東西平均した(a)温度[K](等値線)と(b)風速[m/s](等値線)の緯度高度断面。それぞれの色は、中解像度(T42L60)の結果との差を表す。

3. 火星大気実験

今年度は、昨年度に引き続き、高解像度実験で見出された熱潮汐の高波数成分について調べた。まず、現実的な火星地形を含む実験の結果から熱潮汐を抽出し、その構造を調べた。すると、熱潮汐の波数帯・振幅・位相・現れる緯度帯について、地形を含む地表面パラメタを東西一様にした理想化実験と良く似た特徴の高波数成分が見出された。また、この理想化実験の熱潮汐について、北半球の真冬を解析し、北半球の秋(昨年度に解析)と比較した。結果、熱潮汐の波数帯・振幅・位相は両季節でよく似ていたが、現れる緯度帯は異なっていた。具体的には、低波数成分と同様に、日射が強い夏半球側での振幅が大

きいことがわかった。以上の結果から、過去に火星着陸機が観測した同様の気圧変動は、局所的な地形が駆動するものではなく、高周波潮汐であることがますます強く示唆される。したがって数値モデル中の励起機構の理解の必要性が高まっており、これは今後の課題である。

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、ダスト及び水循環過程に絡む雲微物理スキームを導入し、同化の物質循環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「波と対流が形作る金星大気大循環：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, 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).
- [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,” *Geos. 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.*, 2024GL112663, (2025).
- [24] 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).
- [25] 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., Hayashi, Y.-Y., “ALERA-V version 1.0: an objective analysis dataset of the Venus atmosphere,” *Geosci. Data J.*, 13, e70080, (2026).
- [26] 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.*, 13, 14, (2026).
- [27] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Kashimura, H., Komori, N., Kuroda, T., Takagi, M., and Hayashi, Y.-Y., “Spontaneous gravity wave radiation in the Venus atmosphere,” *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, in press.