

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, 高橋 芳幸*¹, 杉本 憲彦*², 藤澤 由貴子*², 高木 征弘*³, 檜村 博基*¹, 石渡 正樹*⁴, 中島 健介*⁵, はしもと じょーじ*⁶, 松田 佳久*⁷

*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, *³京都産業大学理学部, *⁴北海道大学大学院理学研究院, *⁵九州大学大学院理学研究院, *⁶岡山大学大学院自然科学研究科, *⁷東京学芸大学教育学部

大気大循環モデル AFES (AGCM (Atmospheric General Circulation Model) for the Earth Simulator) に基づく GCM を用いて、金星および火星大気の高解像度大気大循環シミュレーションを実施した。金星大気シミュレーションに関しては、軌道投入に成功した探査機「あかつき」による観測結果との比較を行うことを目標に、いくつかのデータ同化実験を試行し、これまで以上の解像度 (T639L260) での実験を実施した。特に、あかつき LIR 観測や電波掩蔽観測で得られた熱潮汐波の位相構造をデータ同化で再現することに成功し、位相構造の改善が全球的な風速改善につながるということがわかった。また、あかつきやヴィーナスエクスプレスの電波掩蔽観測で得られた下層大気温度構造と GCM の結果を比較する解析を進めた。さらに、いくつかの将来観測を想定した観測システムシミュレーション実験を実施した。火星大気シミュレーションに関しては、低緯度で現れる小規模渦の成因を調べることを目指して流れ場の調査を継続中である。

キーワード: 惑星大気, 金星, 火星, スーパーローテーション, ダストストーム

1. はじめに

地球型惑星の大気大循環はお互いに大きく異なっている。火星や金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もっとも興味深く重要な問題の一つである。本課題では、AFES の力学コアを共通基盤に地球型惑星個々の物理過程を導入し拡張してきた GCM を用い、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ず力学的構造を理解することを目指す。

2. モデル

本課題で用いるモデルは、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、金星大気と火星大気を計算するために、それらの条件に適切な放射過程、乱流過程、地面過程を導入したものである。このモデルは、新 ES において、現状では、120 ノードで実行可能(ベクトル化率と並列化効率の敷居値を上回る)であることを確認しており、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ながら、大気循環構造を調べることが可能である。

3. 結果

3.1. 金星大気実験

これまでに、金星大気大循環の大きな謎であるスーパーローテーションの解明を目指して数値実験と解析を行ってきた。過去の研究では、スーパーローテーションの駆動のために大気下層に非現実的に強い加熱強制を与え、低解像度モデルを用いて長時間積分する方法が主流であった。しかし我々は、現実的な太陽加熱強制を用い、また、雲層下部付近の大気安定度の低い層(高度約 55-60 km)の存在に注目して実験を行い、傾圧不安定波が運動量や熱の輸送に重要であることを指摘してきた[2, 3]。また、現実的な太陽加熱によって観測[4]と整合的な緯度分布をもつ雲層高度のスーパーローテーションが維持され、雲層高度で各緯度帯に特徴的な波が存在することを示した[5]。さらに、暖かい極域と周極帯状低温域の現実的な構造の再現[6]、Venus Express の電波掩蔽観測の結果と整合的な極域の温度の時間変動と鉛直構造の再現[7]にも成功した。またモデル内に発生する熱潮汐波の 3 次元構造を解析[8]し、赤道域の温度場の電波掩蔽観測との比較も行った[9]。さらに、水平格子間隔約 79 km、鉛直 120 層 (T159L120) の高い解像度の数値実験にも取り組み、あかつき IR2 観測で得られた下部雲層の惑星規模に延びる筋状構造の再現と物理的解釈を試みた[10]。これら観測とモデル結果の整合性から、世界初となるデータ同化システムの構築も行ってきた[11]。

今年度は、金星大気実験のさらなる高精度化として、精密な放射過程と雲物理過程の開発と導入を試みる一方、T159L120 の解像度から、より高解像度 (T639L260) にした実験を行った。また、T42L60 の中解像度実験で

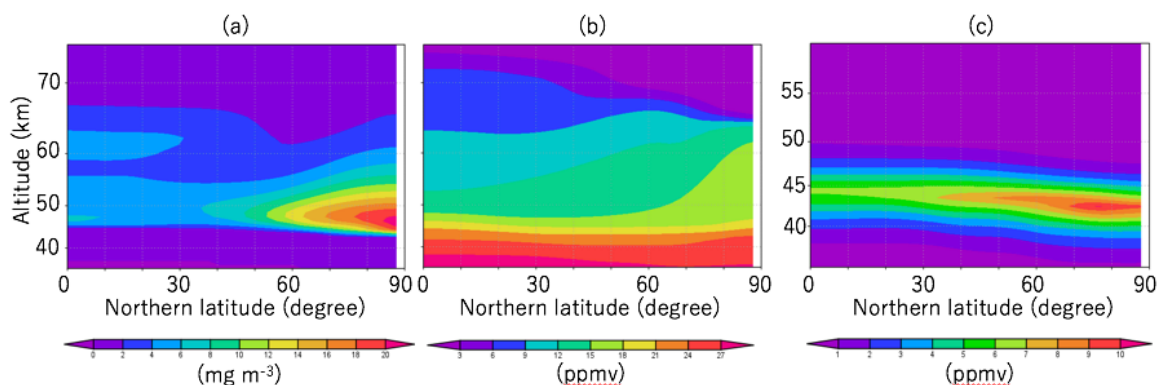


図 1. 時間帯状平均した(a)マスローディング、(b)水蒸気と(c)硫酸蒸気の質量混合比の緯度高度断面図。2 金星日(234 地球日)平均した結果を示す。

は、世界最長の長時間積分を行うほか、あかつき電波掩蔽観測と下層大気温度構造の比較を行った。さらにデータ同化に関しても、実観測データの同化と観測システムシミュレーション実験を行った。以下に主要な成果を示す。

① 超高解像度実験の実施

世界最高解像度となる T639L260 の数値実験を行い、熱潮汐波からの自発的な重力波放射の可能性を示唆する結果を得た。また、あかつき電波掩蔽観測で得られた重力波と考えられる上層の温度擾乱と、数値実験結果の比較を行い、雲層上部で発生した重力波の可能性を示唆する結果を得た。

② 雲物理過程の導入

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の雲物理過程を GCM に導入し、金星の硫酸雲(モード 2 粒子)に対する大気大循環の影響を調査した。その結果、先行研究と大きく異なり、硫酸雲が極域上空で活発に生成される可能性が示された(図 1)。また、Venus Express の電波掩蔽観測で得られている雲底高度での硫酸蒸気の緯度分布も再現され

た。これらの成果をまとめた論文[12]を投稿中である。

③ 超長時間積分の実施

子午面循環メカニズムで、静止状態からのスーパーローテーション生成を、鉛直渦粘性の依存性に着目して行った。3000 地球年というこれまでにない超長時間積分により、鉛直渦粘性が小さければスーパーローテーションが生成される結果を得た[13]。

④ 下層大気温度構造の調査

Venus Express とあかつきの電波掩蔽観測により、雲層下部の下層大気温度構造を調査した結果、高緯度で低安定度層が深くなる可能性が示唆された[14]。この傾向は数値実験でも再現されており、観測との比較とその成因調査を継続中である。

⑤ 実観測データの同化と観測システムシミュレーション実験の実施

あかつきの観測のデータ同化を目標に開発された金星大気データ同化システムを利用して、Venus Express の Venus Monitoring Camera による雲層上端の風速の観測データを同化した。その結果、熱潮汐波の位相構造の改善に成功し、全球の風速場が大きく修正された[15]。

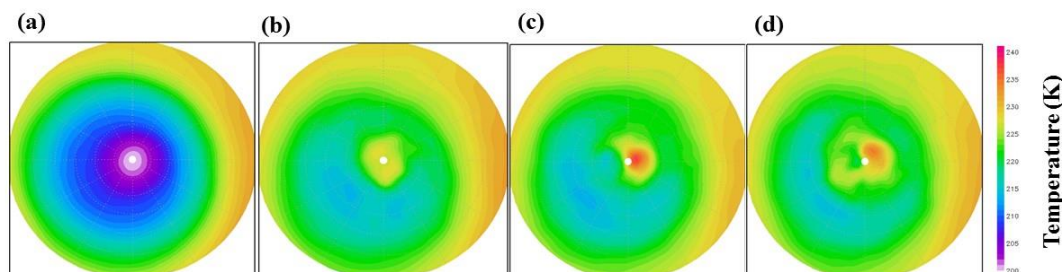


図 2. 衛星間電波掩蔽を想定してフランスの金星 GCM の温度場を、T42L60 の解像度の 31 メンバーにデータ同化した実験で得られた、高度 70 km 付近の温度の水平断面図。北緯 30 度以北を示す。(a) 同化なし、(b)1 点観測を 2 時間毎、(c)2 点観測を 4 時間毎、(d)3 点観測を 6 時間毎に同化した結果。

さらに衛星間電波掩蔽観測のミッション立案にむけ、極域温度の観測システムシミュレーション実験を行った [16]。その結果、2-3 機の小型衛星があれば、極域の cold collar の再現が可能であることが示唆された (図 2)

上記の成果は、本課題で実施している金星大気実験が、あかつきや地上望遠鏡による観測結果の理論的・力学的解釈を可能にし、雲層付近の大気スーパーローテーションの維持メカニズムと大気擾乱の特徴の解明に非常に有益であることを示している。さらに、このモデルにデータ同化技術を活用することにより、あかつき観測を最大限に活用した大気循環データの生成が期待される。

3.2. 火星大気実験

中小規模擾乱が火星大気中に浮遊する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ことを目指して数値実験と解析を行ってきた。数値実験では、水平格子点間隔約 11 km の解像度 (T639) までの複数の解像度で数値実験を実施し、その中で低緯度に現れる多数の小規模渦に注目し、その成因の解析を継続して実施している。

火星実験に用いたモデルは、AFES に、別途構築してきた火星大気大循環モデル [17, 18] から物理過程を導入したものである。実験においては、水平に一樣で、地面での光学的厚さ 0.2 のダスト分布を仮定した。また、火星の現実的な地形分布を与えて行った実験に加えて、擾乱の構造の調査を容易にするために地形、アルベド、熱慣性といった地表面特性を一樣にして行った実験の結果も解析した。

実験から得られた流れ場や温度分布の構造を詳細に調べ、低緯度の小規模渦の生成消滅の様子を記述し、成因を明らかにしつつある。

文献

[1] Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 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] 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.

[3] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM”, J. Geophys. Res., Planets, 119, 1950-1968, 2014.

[4] Machado, P., Widemann, T., Luz, D., and Peralta, J., “Wind circulation regimes at Venus’ cloud tops: Ground-based Doppler velocimetry using CFHT/ESPaDOnS and comparison with simultaneous cloud tracking

measurements using VEx/VIRTIS in February 2011”, Icarus, 243, 249-263, 2014.

[5] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Waves in a Venus general circulation model”, Geophysical Research Letters, 41, 7461-7467, 2014.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Ando, H., Takagi, M., Fukuhara, T., Imamura, T., Sugimoto, N., Sagawa, H., Noguchi, K., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Murata, Y., Takeuchi, H., Yamazaki, A., Toda, T., Tomiki, A., Choudhary, R. K., Kumar, K., Ramkumar, G., Antonita, M., “Local time dependence of the thermal structure in the Venusian equatorial upper atmosphere: Comparison of Akatsuki radio occultation measurements and GCM results”, J. Geophys. Res., Planets, 123, 2970-2980, 2018.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Ando, H., Takagi, M., Sugimoto, N., Sagawa, H., and Matsuda, Y., “Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model”, J. Geophys. Res., Planets, revision submitted.

[13] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Fully developed super-rotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM”, Geophysical Research Letters, 46, 1776-1784, 2019.

[14] Ando, H., Imamura, T., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Sugimoto, N., Takagi, M., Sagawa, H., Limaye, S., Matsuda, Y., Choudhary, R., and Antonita, M., “Thermal structure of Venus atmosphere from sub-cloud region to the mesosphere observed by radio occultation”, Sci. Rep., 2020, in press.

[15] Sugimoto, N., Kouyama, T., and Takagi, M., “Impact of

data assimilation on thermal tides in the case of Venus Express wind observation”, *Geophysical Research Letters*, 46, 4573–4580, 2019.

[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] Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, H. Fukunishi, M. Odaka, Y.-Y. Hayashi, and S. Watanabe, “Topographically induced north-south asymmetry of the meridional circulation in the Martian atmosphere”, *J. Geophys. Res.*, 108, 5018, doi:10.1029/2001JE001638, 2003.

[18] Takahashi, Y. O., H. Fujiwara, and H. Fukunishi, “Vertical and latitudinal structure of the migrating diurnal tide in the Martian atmosphere: Numerical investigations”, *J. Geophys. Res.*, 111, E01003, doi:10.1029/2005JE002543, 2006.

High Resolution General Circulation Simulation of Venus and Mars Atmosphere Using AFES

Project Representative

Yoshi-Yuki Hayashi

Department of Planetology, Kobe University

Authors

Yoshi-Yuki Hayashi ^{*1}, Yoshiyuki O. Takahashi ^{*1}, Norihiko Sugimoto ^{*2}, Yukiko Fujisawa ^{*2}, Masahiro Takagi ^{*3}, Hiroki Kashimura ^{*1}, Masaki Ishiwatari ^{*4}, Kensuke Nakajima ^{*5}, George L. Hashimoto ^{*6}, Yoshihisa Matsuda ^{*7}

^{*1}Department of Planetology, Kobe University, ^{*2}Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, ^{*3}Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, ^{*4}Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ^{*5}Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ^{*6}Department of Earth Sciences, Okayama University, ^{*7}Faculty of Education, Tokyo Gakugei University

High resolution simulations of the Venus and Mars atmospheres have been performed by using General Circulation Models (GCMs) based on AFES (Atmospheric GCM for the Earth Simulator). In simulations of the Venus atmosphere, we have adopted higher resolutions (T639L260) than previous experiments in order to make comparison with observations of Venus Climate Orbiter/AKATSUKI, and proceeded with several types of test data assimilation. We have succeeded in reproducing the realistic thermal tides similar to those observed by AKATSUKI LIR images and radio occultation (RO) measurements and found that zonal mean zonal flow was also significantly modified globally. In addition, investigations about the vertical temperature structures below the cloud have also been made to compare those observed by Venus Express and AKATSUKI ROs. Observing system simulation experiments (OSSE) have been also conducted to propose future Venus observation missions. In simulations of the Mars atmosphere, detailed analyses of distributions of velocity around small-scale vortices have been continued.

Keywords : planetary atmospheres, Venus, Mars, super-rotation, dust storm

1. Introduction

The structure of the general circulation differs significantly in each of the atmospheres of terrestrial planets. Understanding physical mechanisms causing such a variety of features in the general circulations of those atmospheres is one of the most interesting and important open questions of the atmospheric science and fluid dynamics. The aim of this study is to understand dynamical processes that characterize the structure of each planetary atmosphere by performing simulations of those planetary atmospheres by using GCMs with a common dynamical core of AFES [1]. Appropriate physical processes are adopted for each planetary atmosphere [2, 3].

2. Results

2.1. Venus simulation

×In the previous years, we have achieved the following results with the AFES-Venus. Starting from an idealized super-rotation, the model atmosphere reaches a quasi-equilibrium state. The meridional distribution of the zonal flow agrees very well with observations [4] and planetary scale waves consistent with observations appear at each latitude in the cloud layer [5]. The cold collar of the polar vortex is well reproduced for the first time [6] and vertical structures of the polar vortex similar to Venus Express ROs is

also reproduced [7]. Three dimensional structures of thermal tides reproduced in GCM are also investigated [8] and compared to AKATSUKI ROs [9]. The high-resolution simulations T159L120 which are equivalent to a horizontal grid size of about 79 km with 120 vertical layers reproduced planetary-scale streak structures consistent with AKATSUKI IR2 night-side observations at the lower cloud levels [10]. Based on these results in good agreement with observations, we have constructed the first Venus atmosphere data assimilation system [11].

In this fiscal year, we proceeded with the following experiments. Development and implementation of radiative and cloud physical processes are continued. The Highest resolution experiments are extended from T159L120 to T639L260, which are equivalent to a horizontal grid size of about 20 km with 260 vertical layers ($dz \sim 250$ m at most). Regarding with medium resolution runs with T42L60, we have performed the longest numerical simulation of 3000 Earth years. In addition, we have compared temperature structure below the cloud in GCM with AKATSUKI ROs. Using the data assimilation system, actual observations are assimilated and observing system simulation experiments have been performed. The main results are as follows.

1) Ultra high resolution experiment: We have performed the highest resolution Venus GCM runs (T639L260) in the

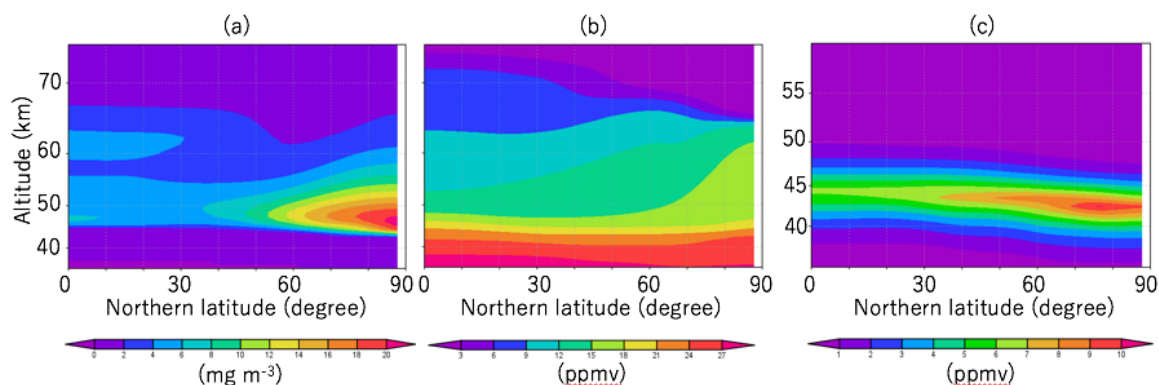


Fig. 1. Latitude-height distribution of the zonally and temporally averaged (a) mass loading, (b) H₂O vapor and (c) H₂SO₄ vapor mixing ratios. The data are averaged for 2 Venus days (234 Earth days).

world and suggest that gravity waves might be radiated from thermal tides. Numerical results were compared with the temperature disturbances of the upper layer observation obtained by AKATSUKI ROs, which indicates that gravity waves are emitted from the cloud layer.

2) Cloud physical process: The effect of general circulation on the Venus H₂SO₄ cloud (mode 2) was investigated by introducing cloud physical processes into the GCM. In contrast to previous studies, preliminary results show that the H₂SO₄ cloud is produced in the upper polar atmosphere, and the distributions of H₂SO₄ vapor near the cloud deck observed by Venus Express and AKATSUKI ROs are well reproduced in the GCM (Fig.1). These results are under reviewing for publication [12].

3) Ultra long time integration: Super rotation generated from the mean meridional circulation mechanism was investigated focusing on the dependency of the vertical eddy viscosity. An unprecedentedly long time integration of 3,000 Earth years has been achieved. The results indicate that, if the vertical eddy viscosity is enough small, super rotation is generated from motionless state [13].

4) Temperature structure of the lower atmosphere: Using Venus Express and AKATSUKI RO observations, the temperature structure of the lower atmosphere below the cloud layer was investigated. As a result, it is suggested that the low stability layer may become deep at high latitudes [14].

5) Assimilation of actual observations and observing system simulation experiment (OSSE): Using the Venus atmosphere data assimilation system, which is developed for the assimilation of AKATSUKI observations, we assimilated horizontal winds at the cloud top observed by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express. As a result, the phase structure of the thermal tide has been successfully improved, and the zonal mean zonal wind is significantly modified in global scale [15]. In addition, assuming radio occultation measurements among small satellites, the

observing system simulation experiments (OSSE) of temperature field in polar region are performed [16]. The results show that the cold collar is successfully reproduced by assimilating at least 2 or 3 vertical temperature profiles (obtained by only 2-3 small satellites) in the polar region.

These results described above indicate that the Venus simulations performed in this project are quite helpful to interpret the Akatsuki and ground-based observations in terms of dynamics, and elucidate the atmospheric phenomena observed at the Venus cloud levels and the generation mechanism of the Venus atmospheric super-rotation, and the model must be useful to synthesize data from AKATSUKI observations by the data assimilation technique.

2.2. Mars simulation

We have been performing high resolution (T639L96) simulations of Martian atmosphere to reveal the features of small and medium scale disturbances in the Martian atmosphere and its effects on dust lifting. The resolution is equivalent to a horizontal grid size of about 11 km with 96 vertical layers ($dz \sim 1\text{km}$). We have been trying to reveal the generation mechanism of small-scale vortices in the low latitudes by continuing the analysis of the circulation and temperature fields especially focusing on vertical transports of momentum and vorticity of the background field due to the thermal convection

References

- [1] Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 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] 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.
- [3] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM”, *J. Geophys. Res., Planets*, 119, 1950-1968, 2014.
- [4] Machado, P., Widemann, T., Luz, D., and Peralta, J., “Wind circulation regimes at Venus’ cloud tops: Ground-based Doppler velocimetry using CFHT/ESPaDOnS and comparison with simultaneous cloud tracking measurements using VEx/VIRTIS in February 2011”, *Icarus*, 243, 249-263, 2014.
- [5] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Waves in a Venus general circulation model”, *Geophysical Research Letters*, 41, 7461–7467, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Ando, H., Takagi, M., Fukuhara, T., Imamura, T., Sugimoto, N., Sagawa, H., Noguchi, K., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Murata, Y., Takeuchi, H., Yamazaki, A., Toda, T., Tomiki, A., Choudhary, R. K., Kumar, K., Ramkumar, G., Antonita, M., “Local time dependence of the thermal structure in the Venusian equatorial upper atmosphere: Comparison of Akatsuki radio occultation measurements and GCM results”, *J. Geophys. Res., Planets*, 123, 2970–2980, 2018.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ando, H., Takagi, M., Sugimoto, N., Sagawa, H., and Matsuda, Y., “Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model”, *J. Geophys. Res., Planets*, revision submitted.
- [13] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Fully developed super-rotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM”, *Geophysical Research Letters*, 46, 1776–1784, 2019.
- [14] Ando, H., Imamura, T., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Sugimoto, N., Takagi, M., Sagawa, H., Limaye, S., Matsuda, Y., Choudhary, R., and Antonita, M., “Thermal structure of Venus atmosphere from sub-cloud region to the mesosphere observed by radio occultation”, *Sci. Rep.*, 2020, in press.
- [15] Sugimoto, N., Kouyama, T., and Takagi, M., “Impact of data assimilation on thermal tides in the case of Venus Express wind observation”, *Geophysical Research Letters*, 46, 4573–4580, 2019.
- [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.