

# 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, 樫村 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. 本年度は主に金星大気のシミュレーションとその結果の解析に注力した. 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, モデルの改良及びデータ同化実験を試行した. 特に, あかつきの雲画像を直接同化するための準備として, 簡略化した雲モデルの開発と導入を行った. この計算結果では, 雲層下部のケルビン波に伴うと考えられる周期的な雲の変動も再現されており, あかつき IR2 画像との比較を行っている. さらに, 世界最高解像度 (T639L260) での数値実験を熱潮汐波の無い条件でも実施し, 熱潮汐波からの自発的な小規模重力波の放射に着目したデータ解析を行った. また, 将来の小型衛星による電波掩蔽観測等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, 得られたデータを解析中である. 火星大気シミュレーションに関しては, 流れ場の解析を継続中である.

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, 火星大気の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す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, それらの条件に適当な放射過程, 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閾値を上回る) 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55-60km)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]と総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総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].

近年では, 水平格子間隔約79km, 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].

これら観測と金星GCMの結果の整合性から, 世界初となるデータ同化システムの構築も行い[11], Venus ExpressのVenus Monitoring Cameraによる雲層上端の

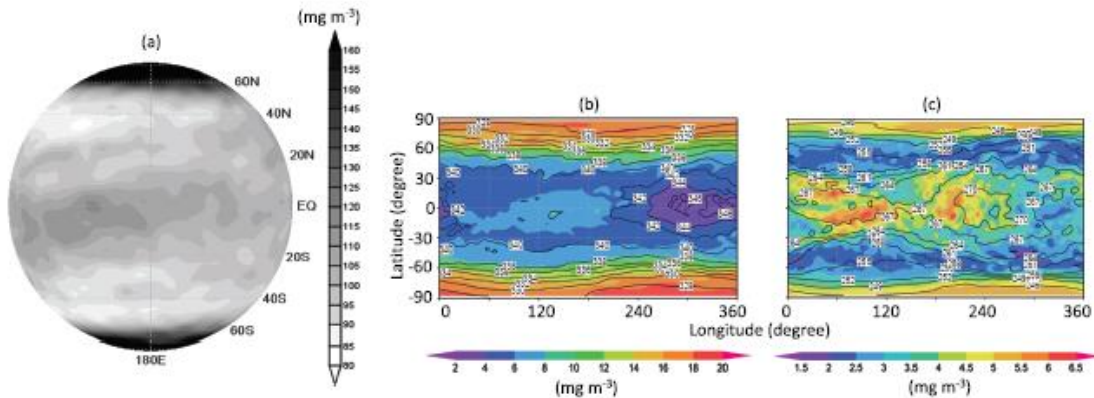


図 1. 雲の鉛直積算量の水平分布(a). 経度 45 度から 225 度を示す。マスローディング (カラー) と温度 (コンター) の高度(b)50km と(c)60km の緯度経度分布。40 地球年積分後の結果。

風速の観測データを同化した結果、熱潮汐波の位相構造の改善と全球の風速場が大きく修正された[12]。また、T42L60の中解像度実験では、世界最長の3000地球年の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]。

今年度は、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行い、雲モデルを導入したGCMで得られた結果を、雲層下部の変動に着目して解析した。またT159L120の解像度から、より高解像度(T639L260)にした数値実験を行い、熱潮汐波の有無に伴う小規模な重力波の発生についての調査を行った。さらに、あかつき電波掩蔽観測で得られた下層大気の温度構造について、GCMと比較した。

データ同化に関しては、あかつきの観測データを同化するために雲追跡による風速データを加工し、解析データの作成準備を進めている。また、観測システムシミュレーション実験を、惑星規模波動の再現に向けたカメラ画像観測と、小型衛星を用いた衛星間電波掩蔽観測の2種類の仮想設定で行った。以下に主要な成果を示す。

① 雲物理過程の導入と解析

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簡略化した雲物理過程を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。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(図1)。これらの成果をまとめた論文[14]が出版された。さらに開発したモデルの結果を雲層下部に着目して解析したところ、ケルビン波に伴うと考えられる周期的な雲の変動も再現されており、あかつきIR2画像との比較と成因の調査を行っている[15]。

② 超高解像度実験の実施と解析

世界最高解像度となるT639L260の数値実験では、熱潮汐波を含まない計算を新たに行い、これまでの熱潮汐波からの自発的な重力波放射の可能性をサポートする結果を得た[16]。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。

③ 下層大気の温度構造の調査

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の温度構造を調査した結果、高緯度で

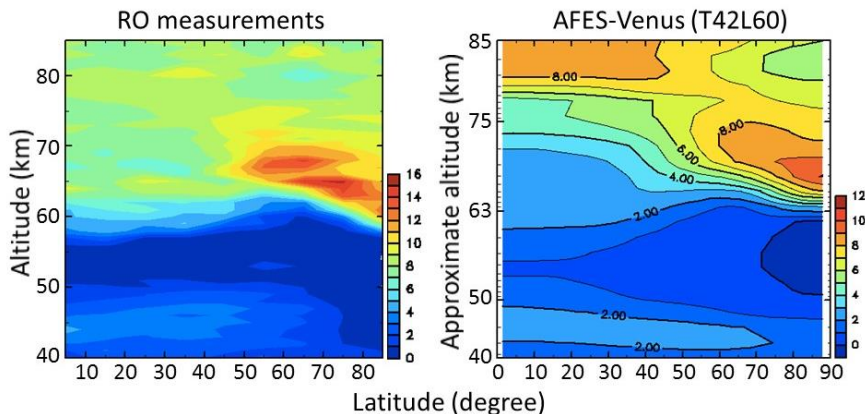


図 2. 電波掩蔽観測 (左) と GCM (右) で得られた、大気安定度の緯度高度断面図。北半球を示す。

低安定度層が深くなる可能性が示唆された[17]. この傾向は数値実験でも再現されており (図2), 観測との比較とその成因調査を継続中である.

#### ④ 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, まずはUVIから雲追跡で導出された風速データの加工を行い, これまでに開発してきた金星大気データ同化システムへのテスト同化を実施している. また, 小型衛星を用いた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[18]. その結果, 2-3機の小型衛星があれば, 周極帯状低温域の再現が可能であることが示唆されたため, 実軌道を考慮したより現実的なデータ同化による調査を行っている[19]. さらに, 惑星規模の波動の再現に向けたカメラ画像を意識した観測シミュレーション実験を実施し, 高度70kmで6h毎の観測があれば, ケルビン波が再現可能であることを見出している[20].

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.

#### 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., 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] 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.  
[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., Takagi, M., Sugimoto, N., Sagawa, H., and Matsuda, Y., “Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model”, *J. Geophys. Res., Planets*, 125, e2019JE006208, 2020.
- [15] Ando, H., Takagi, M., Sugimoto, N., Sagawa, H., and Matsuda, Y., “Quasi-temporal variation of the lower cloud in the Venusian low-latitudes induced by atmospheric waves”, in preparation.
- [16] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Kashimura, H., Noguchi, K., Kuroda, T., Takagi, M., and Hayashi, Y.-Y., “Gravity wave radiation from thermal tides in the Venus atmosphere simulated by an ultra-high-resolution GCM”, in preparation.
- [17] 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.*, 10, 3448, 2020.
- [18] 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.
- [19] Fujisawa, Y., Sugimoto, N., Hosono, A., Ando, H., Takagi, M., Garate-Lopez, I., Lebonnois, S., and Ao, C., “Reproduction of the cold collar in the Venus atmosphere by temperature data assimilation assuming radio occultation measurements among small satellites with real orbit”, in preparation.
- [20] 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”, in preparation.

# 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 <sup>\*1</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi <sup>\*1</sup>, Norihiko Sugimoto <sup>\*2</sup>, Yukiko Fujisawa <sup>\*2</sup>, Masahiro Takagi <sup>\*3</sup>, Hiroki Kashimura <sup>\*1</sup>, Masaki Ishiwatari <sup>\*4</sup>, Kensuke Nakajima <sup>\*5</sup>, George L. Hashimoto <sup>\*6</sup>, Yoshihisa Matsuda <sup>\*7</sup>

<sup>\*1</sup>Department of Planetology, Kobe University, <sup>\*2</sup>Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, <sup>\*3</sup>Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, <sup>\*4</sup>Department of CosmoSciences, Hokkaido University, <sup>\*5</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, <sup>\*6</sup>Department of Earth Sciences, Okayama University, <sup>\*7</sup>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 this fiscal year, we have focused on simulations and analyses of Venus atmosphere experiments. In simulations of the Venus atmosphere, we improved the model to compare with the observations by the Venus Climate Orbiter/AKATSUKI, and tried data assimilation experiments. A simplified cloud model was introduced into the model and the results could reproduce the periodic cloud fluctuations that are considered to be associated with Kelvin waves in the lower cloud layer observed by AKATSUKI IR2 camera. In addition, numerical experiments at the world's highest resolution (T639L260) were conducted excluding thermal tides, and data analysis focusing on the spontaneous radiation of small-scale gravity waves from the thermal tides was performed. We also conducted observation system simulation experiments assuming future missions, e.g., radio occultation measurements among small satellites. In simulations of the Mars atmosphere, detailed analyses of distributions of velocity around small-scale vortices have been on going.

**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].

## 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 [2] and planetary-scale waves consistent with observations appear at each latitude in the cloud layer [3]. The cold collar of the polar vortex is well reproduced for the first time [4] and vertical structures of the polar vortex similar to Venus Express radio occultation (RO) is also reproduced [5]. Three dimensional

structures of thermal tides reproduced in GCM are also investigated [6] and compared to AKATSUKI RO [7]. 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 [8].

Based on these results in good agreement with observations, we have constructed the first Venus atmosphere data assimilation system [9]. As a result of assimilating the horizontal winds at the cloud top derived by the Venus Express Venus Monitoring Camera, the phase of thermal tides was improved and the zonal mean zonal wind is significantly modified in global scale [10]. In addition, in the T42L60 medium resolution experiments with the world's longest ultra-long-term integration of 3000 earth years, super-rotation is generated from motionless state when the vertical eddy viscosity was sufficiently small [11].

In this fiscal year, we continued to develop and introduce radiative and cloud physical processes, and analyzed the results obtained by the GCM with simple cloud physics, focusing on the fluctuations in the lower cloud layer. We carried out numerical experiments with the world's highest resolution (T639L260) to investigate the generation of

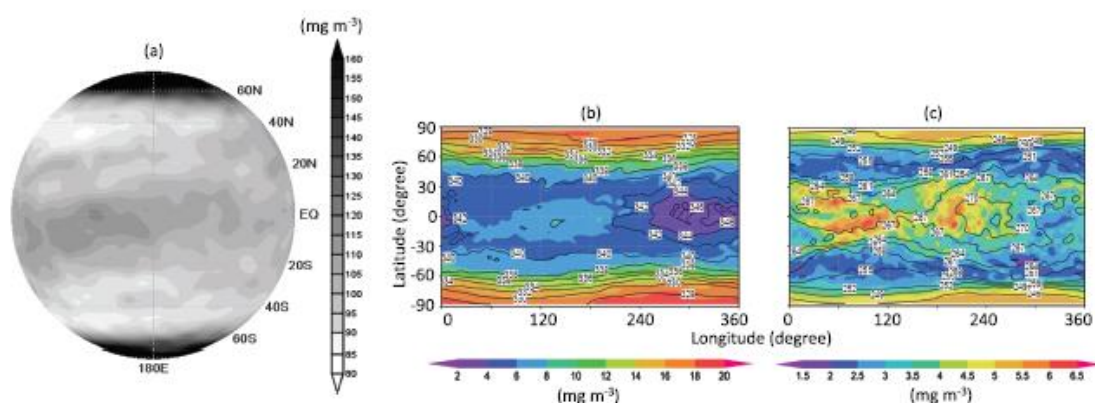


Fig. 1. Horizontal distribution of the column mass abundance of the cloud (a). The longitudinal range is fixed to be 45-225 degrees. Longitude-latitude distributions of the temperature (contour) and the mass loading (color shade) at 50 and 60 km altitudes are shown in (b) and (c), respectively. The time is 40 Earth years.

small-scale gravity waves with and without thermal tides. Furthermore, the temperature structure of the lower atmosphere obtained by AKATSUKI radio occultation was compared with GCM.

Regarding data assimilation, we are processing horizontal winds derived by cloud tracking of AKATSUKI UVI in order to create first analysis data. Two types of observing system simulation experiments have been also performed assuming radio occultation observations among small satellites and camera images. The main results are as follows.

1) Cloud physical process: A cloud physical process that simplifies the generation and transport process of water vapor and sulfuric acid vapor and the formation of a sulfuric acid cloud by the condensation of both was introduced into GCM [12]. The latitude distribution of the sulfuric acid vapor at the cloud bottom altitude observed by the Venus Express RO was reproduced (Fig. 1). Focusing on the lower cloud layer, periodic cloud fluctuations associated with Kelvin waves have also been reproduced and compared with AKATSUKI IR2 images [13].

2) Ultra-high-resolution experiments: Numerical experiments of T639L260, which has the highest resolution in the world, are newly performed without thermal tides. Results supported that the possibility of spontaneous gravity wave radiation from thermal tides [14]. In addition, the temperature disturbance in the upper layer, which is considered to be a gravity wave observed by AKATSUKI RO, was compared with the numerical results.

3) Temperature structure of the lower atmosphere: The temperature structure below the cloud observed by Venus Express and AKATSUKI ROs suggested that the low static stability layer becomes deep at high latitudes [15]. This tendency was also reproduced in GCM and comparisons are ongoing.

4) Data assimilation: With the goal of data assimilation for

AKATSUKI, we first produce horizontal winds derived by the cloud tracking of UVI, and carry out test assimilation. For future missions, we conducted observing system simulation experiments of polar temperature assuming ROs among small satellites [16]. We are conducting a more realistic data assimilation study that considers the actual orbit [17]. Furthermore, we carry out observing system simulation experiments of horizontal winds assuming camera images for the reproduction of planetary-scale waves. The results suggest that Kelvin waves can be reproduced if observed at every 6 h at the altitude of 70 km [18].

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 performed 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 are trying to analyze features of small-scale vortices in the low latitudes.

## Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 19H05605, "Comprehensive picture of atmospheric circulation of Venus revealed by AKATSUKI data assimilation".

## 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] 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.
- [3] Sugimoto, N., Takagi, M., and Matsuda, Y., “Waves in a Venus general circulation model”, *Geophysical Research Letters*, 41, 7461–7467, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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*, 125, e2019JE006208, 2020.
- [13] Ando, H., Takagi, M., Sugimoto, N., Sagawa, H., and Matsuda, Y., “Quasi-temporal variation of the lower cloud in the Venusian low-latitudes induced by atmospheric waves”, in preparation.
- [14] Sugimoto, N., Fujisawa, Y., Kashimura, H., Noguchi, K., Kuroda, T., Takagi, M., and Hayashi, Y.-Y., “Gravity wave radiation from thermal tides in the Venus atmosphere simulated by an ultra-high-resolution GCM”, in preparation.
- [15] 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.*, 10, 3448, 2020.
- [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] Fujisawa, Y., Sugimoto, N., Hosono, A., Ando, H., Takagi, M., Garate-Lopez, I., Lebonnois, S., and Ao, C., “Reproduction of the cold collar in the Venus atmosphere by temperature data assimilation assuming radio occultation measurements among small satellites with real orbit”, in preparation.
- [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”, in preparation.