

# 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 神戸大学 大学院理学研究科

高橋 芳幸 神戸大学 大学院理学研究科

杉本 憲彦 慶應義塾大学 自然科学研究教育センター

高木 征弘 京都産業大学 理学部

檜村 博基 海洋研究開発機構 気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム

石渡 正樹 北海道大学 大学院理学研究院

小高 正嗣 北海道大学 大学院理学研究院

中島 健介 九州大学 大学院理学研究院

はしもとじょーじ 岡山大学 大学院自然科学研究科

松田 佳久 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。我々の研究の目的は、地球型惑星大気における中小規模擾乱の力学的特徴と、その大気大循環への影響を調べることである。金星大気シミュレーションに関しては、これまでより高解像度の実験を実施する一方、現実的な大気構造が得られた昨年度までの実験結果の解析を進展させ、水平運動エネルギースペクトルの新たな定式化を試み、雲頂高度での熱潮汐波やそれに伴う小規模重力波の構造の解析、観測と整合的な周極帯状低温域 (cold collar) や極渦の再現とその構造の解析を行った。得られた結果は、熱潮汐波の力学的効果や現実的な安定度の鉛直分布の考慮とそれらの影響を表現するに足る十分な解像度が金星大気の大気構造の再現に必要であることを強く示唆している。火星大気シミュレーションでは、これまでに行ってきた高解像度計算で見られた最も目立つ大気擾乱の一つである、低緯度における小規模渦の特性を理解するための追実験と解析を進めた。これらの小規模渦は、モデルで表現される対流に起因していると考えられる。そこで、モデル中の水平発散の分布を調べたところ、小規模渦が渦度と同程度の大きさの発散を伴っていることが示された。このことは、上に述べた渦の生成機構を支持する。

キーワード：惑星大気、スーパーローテーション、金星、ダストストーム、火星

## 1. はじめに

惑星大気の大循環構造はそれぞれ大きく異なる。例えば、自転の遅い金星の大気は、地球とは異なりすべての緯度で自転方向に風が吹くスーパーローテーションを示し、火星では、地球では見られないような惑星規模ダストストームが発生することが知られている。これら惑星大気の多様性を理解することは、大気科学および流体力学における重要な課題の一つである。本研究では、AFES[1] を共通の力学コアとする大循環モデルを用いて、惑星大気の大気構造を特徴づける力学過程を理解することを目指す。

## 2. 金星実験

これまで、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な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。しかし我々はこれまで、現実的な太陽加熱強制を用いて、雲層付近 (高度約 45-70km) の大気安定度の低い層の存在に

注目した実験を実行し、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 [4]、同時に、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。中緯度域、極域に見られた大気波動は、それぞれ傾圧不安定、極渦の順圧不安定によって励起される [5][6]。赤道域の大気波動の励起メカニズムは検討中であるが、観測されている惑星規模波 (いわゆる赤道ケルビン波) との関係が示唆される。さらに、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、小規模大気擾乱の特性を調べてきた。

今年度は、金星大気実験のさらなる高精度化として、現実的な加熱冷却率の計算に必要となる精密な放射過程の開発と導入を試みる一方、T159L120 の解像度の数値実験を継続し、得られた雲層上部における大気波動の構造やエネルギースペクトルの成因、高緯度域における極渦やそれを取り巻く周極帯状低温域 (cold collar) の形成メカニズムの解明を目指した。同時に、これまで用いてきた T159L120 の解像度から、それぞれ倍の水平解像度

(T319L120) および倍の鉛直層数 (T159L240) にした実験を行った。以下に主要な成果を示す。

### ①熱潮汐波などの大気波動の構造

数値シミュレーションで得られた熱潮汐波の構造を解析した結果、雲層高度の一日潮は高度 45-70km におよぶ深い夜昼間対流的な鉛直構造をもつことが示された。この夜昼間対流に伴う南北流と鉛直流は、この高度における平均子午面循環よりもずっと大きく (約 10 倍程度)、熱潮汐波が硫酸雲やその原料物質など、雲層高度の物質循環に強く影響する可能性が示された。また、熱潮汐波の水平構造の解析から、紫外光で観察される Y 字構造や弓状構造の形成に、熱潮汐波が寄与する可能性も示唆された。ケルビン波的な空間構造をもつ大気波動や、惑星の大きさに比べてはるかに小規模の重力波も表現された [7] (図 1)。

### ②大気中のエネルギースペクトルの成因

数値シミュレーションで得られた流れ場を球面調和関数展開し、回転成分と発散成分に分けて波数間のエネルギーの収支を診断する新しい解析方法を考案し、これまでにない視点での解析を進めた [8]。

### ③周極帯状低温域の成因

暖かい極域と周極帯状低温域の現実的な構造の再現に成功し、極域の恒常的な昇温は大気波動が駆動する子午面循環による熱輸送によりもたらされることを明らかにした。熱潮汐波が存在しない条件での感度実験も行うことで、熱潮汐波が周極帯状低温域の再現に必須であることを示した [6] (図 2)。

### ④極渦の鉛直構造

これまでの電波掩蔽観測結果と統合的な温度の鉛直構造の表現に成功し、その構造が中立のロスビー波で解釈でき、極渦の順圧不安定によって発現する可能性を明らかにした [9]。

上記の成果は、本課題で実施している金星シミュレーションが、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。

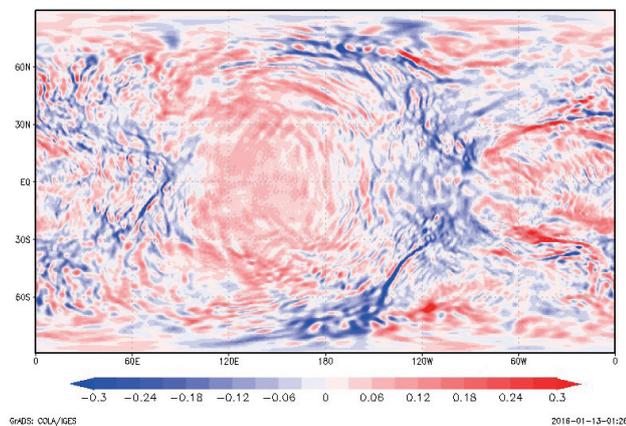


図 1 T159L240 の解像度の金星大気実験で得られた高度 75km の鉛直流 ( $\text{ms}^{-1}$ )。

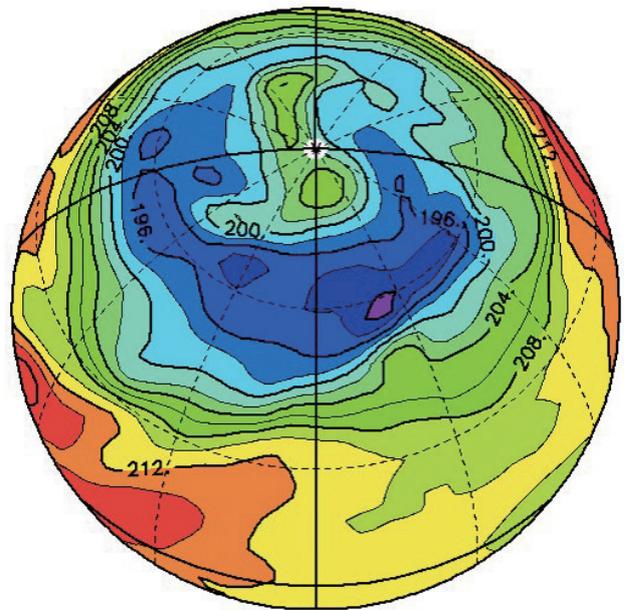


図 2 T42L60 の解像度の金星大気実験で得られた高度 68km 付近の温度 (K)。

## 3. 火星実験

火星では大気中をダストが常に浮遊しており、大気の加熱源として重要な役割を担っている。ダストは中小規模擾乱に伴う風によって大気中に供給されると考えられるため、中小規模擾乱を陽に表現する高解像度全球火星大気実験を実施してきた。昨年度までに、水平格子点間隔約 11km の短期間のシミュレーションを実施し、そこに見られる大気擾乱とそれによるダスト巻き上げ過程について調べてきた。その中で、低緯度に見られる多数の小規模渦がダストの巻き上げにおいて重要な役割を果たしていることが示されていた。今年度は、これら小規模渦の構造を明らかにすることを目指し、その解析を進めた。

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 [10, 11] から物理過程を導入したものである。導入した物理過程は放射、乱流混合、地面過程である。このモデルを用いて、T639L96 の解像度で実験を行った。この解像度は、水平格子点間隔 11km、鉛直層数 96 に対応する。実験においては、水平に一様で、地面での光学的厚さ 0.2 のダスト分布を仮定した。

高解像度シミュレーションにおいて低緯度に見られる小規模渦は、モデルで表現される対流活動に起因していると考えてきたが、その特徴を明らかにするために、これまでの渦度の調査に加えて流れの発散の分布を調べた (図 3, 4)。小規模渦の分布は、同じ空間スケールの流れの発散を伴っており、渦度と発散の値はほぼ同じオーダーであることが示された。このことは、小規模渦がモデルで表現される対流運動の結果として生じていることを支持するものである。

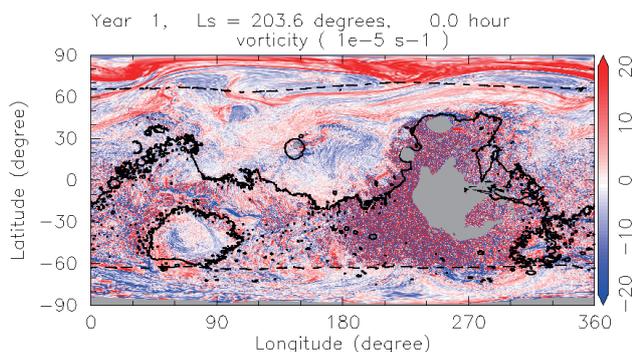


図3 解像度 T639L96 での 4hPa 気圧面における渦度分布。渦度の単位は  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  である。実線は火星地形の 0m の等高線、破線は極冠境界を表す。また、灰色の領域は、地形の起伏によって 4hPa 気圧面が存在しない領域を表す。

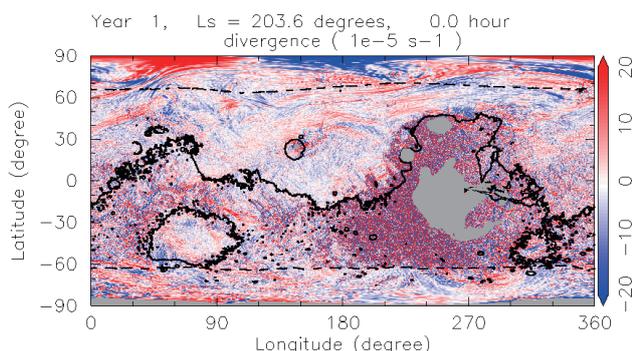


図4 解像度 T639L96 での 4hPa 気圧面における発散分布。発散の単位は  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  である。図の書式は図3と同じ。

## 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 Venesian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model”, *Nature Communications*, 7, 10398, 2016.

[7] Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., and Y. Matsuda, “Neutral waves at the cloud top in the atmosphere of Venus simulated by general circulation model”, in preparation.

[8] Kashimura, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Ohfuchi, W., Enomoto, T., Takahashi, Y. O., and Hayashi, Y.-Y., “Energy spectrum of atmospheric motions of Venus simulated by a high-resolution general circulation model”, in preparation.

[9] Ando, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Imamura, T., Kashimura, H., Matsuda, Y., Tellmann, S., Pätzold, M., and Häusler, B., “Vertical structure of the axi-asymmetric feature of Venus polar vortex, Part 2: Comparison of radio occultation measurement and GCM”, in preparation.

[10] 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.

[11] 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 Earth and Planetary Sciences, Kobe University

Authors

Yoshi-Yuki Hayashi Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

Yoshiyuki O. Takahashi Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

Norihiko Sugimoto Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University

Masahiro Takagi Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Hiroki Kashimura Project Team for Risk Information on Climate Change, Japan Agency for Marine Earth Science and Technology

Masaki Ishiwatari Department of CosmoSciences, Hokkaido University

Masatsugu Odaka Department of CosmoSciences, Hokkaido University

Kensuke Nakajima Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

George L. Hashimoto Department of Earth Sciences, Okayama University

Yoshihisa Matsuda Faculty of Education, Tokyo Gakugei University

High resolution simulations of the Venus and the Mars atmospheres have been performed by using a General Circulation Model (GCM) based on AFES (Atmospheric GCM for the Earth Simulator). Our aim is to have insights into the dynamical features of small and medium scale disturbances in the Earth-like atmospheres and their roles in the general circulations. As for the simulation of the Venus atmosphere, atmospheric superrotation consistent with observations is reasonably reproduced with a realistic solar heating. Analyses of a polar vortex with realistic cold collar, neutral waves, and the thermal tide at the cloud levels as well as spectral analyses of the horizontal kinetic energy are performed. The results indicate that the vertical distribution of static stability, dynamical effects of the thermal tide, and the sufficient model resolution to represent those features and their effects are crucial for reproducing realistic structures of the Venus atmosphere. As for the simulation of the Martian atmosphere, nature of small scale vortices which have been observed in our previous high resolution simulations is examined. Those small scale vortices in the low latitudes are one of the most prominent features in our model and are anticipated that those are generated as a result of convective activity represented in the model. Analysis of vorticity and divergence near the ground shows that the small scale vortices are associated with horizontal divergence of almost the same size. This result supports the convective generation hypothesis written above.

**Keywords:** planetary atmospheres, superrotation, Venus, dust storm, Mars

## 1. Introduction

The structure of the general circulation differs significantly in each of the planetary atmospheres. For instance, the atmospheres of the slowly rotating Venus exemplifies the states of superrotation where the equatorial atmospheres rotate quite faster than the solid planets beneath, while the equatorial easterly and the strong mid-latitude westerly jets form in the Earth's troposphere. The global dust storm occurs in some years on Mars, while a similar global storm does not exist in the Earth's atmosphere. Understanding physical mechanisms causing such a variety of features in the general circulations of the planetary 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. Venus simulation

In order to understand the physical mechanisms generating superrotation in the Venus atmosphere, low-resolution GCMs have been used to simulate phenomena in the Venus atmosphere in the past two decades. In this study, we perform simulations with very high resolutions to investigate properties of disturbances in a wide range of scales in the Venus atmosphere. The atmospheric waves are important targets to take advantage of a high resolution model.

A Venus model includes simple physical processes[2,3], i.e., vertical eddy diffusion with a constant diffusion coefficient of  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ , the Newtonian cooling, and the Rayleigh friction at the lowest level representing the surface friction. In the upper

region above about 80 km, a sponge layer is assumed; the friction increasing gradually with altitude acts to damp the eddy component only. In addition, the model includes a 4th-order horizontal diffusion ( $\nabla^4$ ).

The Venus simulation starts from an idealized superrotation, and the model atmosphere reaches a quasi-equilibrium state. The meridional distribution of zonal flow agrees very well with observations [4, 5]. The highest resolution is extended from T159L120 to T319L120 and T159L240, which are equivalent to a horizontal grid size of about 40 km with 120 vertical layers ( $dz \sim 1$  km) and about 79 km with 240 vertical layers ( $dz \sim 500$  m), respectively. The main results are as follows.

- (1) Realistic atmospheric superrotation and the Y-shape and/or the Bow-shape structures consistent with observations are reproduced at the cloud levels in the model, and it is suggested that the thermal tide contributes to their structures. Also, Kelvin-type and small-scale gravity waves appear in the high resolution simulations (Fig. 1). Detailed analyses of these waves are in progress [6].
- (2) A new method formulated in the spherical harmonics space is tested, which enables us to investigate the energy cascade process between rotational and divergent components at each wavenumber [7].
- (3) Mean meridional circulation driven by the waves produces continuous warming in the polar vortex, and it is also confirmed that this process does not work in the run without thermal tides [8] (Fig. 2).
- (4) Vertical and temporal structures of temperature field reproduced in the model agrees very well with the Venus Express radio occultation measurements, and it is considered that neutral Rossby waves caused by barotropic instability explain its structure [9].

The results described above indicate that the Venus simulation performed in this study is quite helpful to elucidate the atmospheric phenomena observed at the Venus cloud levels, and the generation mechanism of the Venus atmospheric superrotation.

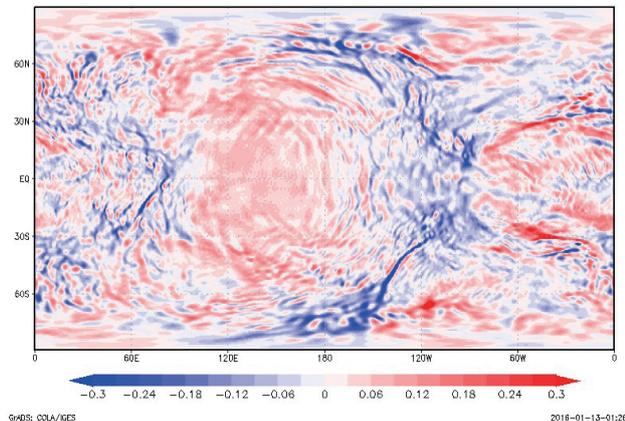


Fig. 1 Horizontal distribution of vertical flow ( $\text{ms}^{-1}$ ) at 75 km simulated in AFES Venus simulation with T159L240 resolution.

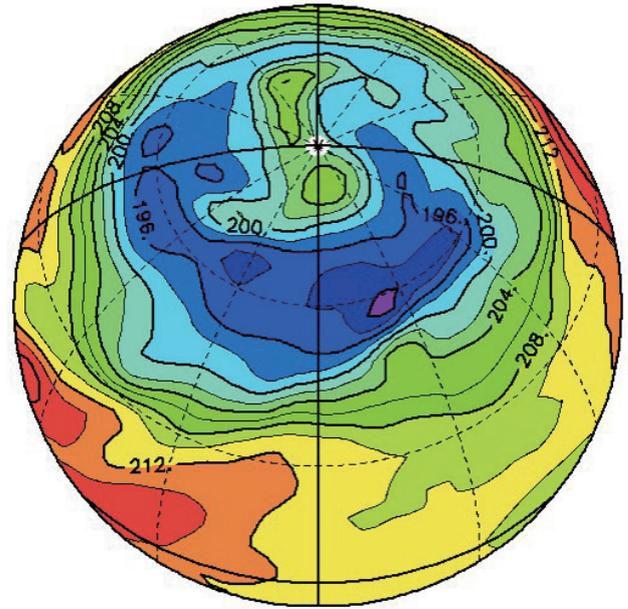


Fig. 2 Horizontal distribution of temperature (K) at 68 km in the polar region simulated in AFES Venus simulation with T42L60 resolution.

### 3. Mars simulation

Radiative effect of dust suspended in the Martian atmosphere has important impacts on the thermal and the circulation structures of the Martian atmosphere. However, it has not been well understood what kind of dynamical phenomena contribute to dust lifting from the ground into the atmosphere. We have been performing medium and high resolution simulations of Martian atmosphere by using our model to reveal the features of small and medium scale disturbances in the Martian atmosphere and its effects on dust lifting. In this fiscal year, we investigate another physical value associated with those small scale vortices observed previously in the low latitudes in the model.

A Mars model includes physical processes introduced from the Mars GCM [10, 11] which has been developed in our group. The implemented physical processes are radiative, turbulent mixing, and surface processes. With these physical processes, effects of subgrid scale convection are evaluated by the turbulent mixing parameterization based on Mellor and Yamada [12] level 2.5.

Mars simulations are performed with a resolution of T639L96 which is equivalent to about 11 km horizontal grid sizes, and 96 vertical layers. The main result is as follows. Figures 3 and 4 show snapshots of distributions of relative vorticity and divergence at 4 hPa pressure level of the T639L96 experiment, respectively. Here, we focus on the low latitudes. It is shown that the small scale vortices observed in the low latitude are accompanied by divergence with the same size. In addition, the magnitude of divergence is as large as that of vorticity. These support the hypothesis that the small scale vortices are generated by thermal convection represented in the model.

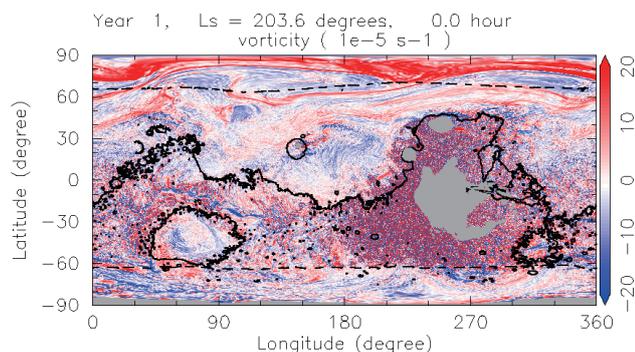


Fig. 3 Global distribution of vorticity at 4 hPa pressure level at northern fall with the resolution of T639L96 without convective adjustment. Unit of vorticity is  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Also shown is the areoid (solid line) and low latitude polar cap edge (dashed line). Gray areas represent mountains at the 4 hPa pressure level.

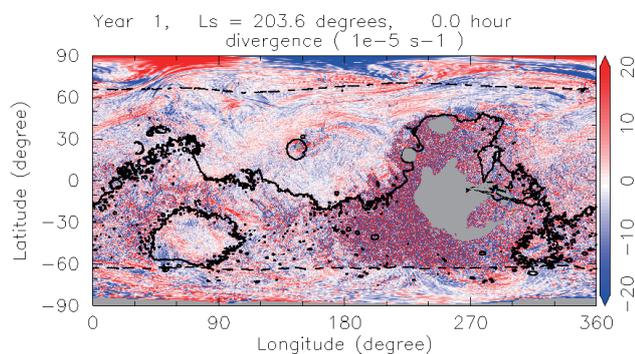


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for global distribution of divergence.

## 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] Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., and Y. Matsuda, "Neutral waves at the cloud top in the atmosphere of Venus simulated by general circulation model", in preparation.
- [7] Kashimura, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Ohfuchi, W., Enomoto, T., Takahashi, Y. O., and Hayashi, Y.-Y., "Energy spectrum of atmospheric motions of Venus simulated by a high-resolution general circulation model", in preparation.
- [8] Ando, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Kashimura, H., Imamura, T., and Matsuda, Y., "The puzzling Venesian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model", *Nature Communications*, 7, 10398, 2016.
- [9] Ando, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Imamura, T., Kashimura, H., Matsuda, Y., Tellmann, S., Pätzold, M., and Häusler, B., "Vertical structure of the axi-asymmetric feature of Venus polar vortex, Part 2: Comparison of radio occultation measurement and GCM", in preparation.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Mellor, G. L., and T. Yamada, "Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems", *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875, 1982.