

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}, 高木 征弘^{*3}, 檜村 博基^{*1},
石渡 正樹^{*4}, 小高 正嗣^{*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 大学院理学研究科, *5 九州大学 大学院理学研究科, *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、これまで以上の解像度 (T319L120, T159L240) で実験を実施した。特に、あかつき IR2 観測で得られた惑星規模の筋状構造に対応するとみられる特徴を数値的に得ることに成功した。また、熱潮汐や極渦に関する解析も進めた。安定度の鉛直分布、熱潮汐の力学的効果、そしてモデルの分解能が金星大気の現実的な構造の再現に重要であることが示された。さらに、あかつきの観測を用いたデータ同化システムの構築を目標に、局所アンサンブルカルマンフィルタを用いた金星大気同化プログラムの開発を推進した。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パラメタリゼーションに対する依存性を調べるための実験を実施し、その特性を考察した。実験結果から、本質的には渦度分布はパラメタリゼーションの詳細には依存しないことが確認された。

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

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、O (10km)

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] と統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]。また、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た [6]。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、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、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。また極域での極渦の解析、データ

同化システムの構築を行うとともに、これまでに用いてきた 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惑星規模の筋状構造

あかつき IR2 観測で得られた雲層付近の惑星規模筋状構造に対応すると見られる構造を得ることができた (図 1)。太陽加熱や安定度を変化させた一連の数値実験によって、雲層の低安定度と傾圧不安定波の存在が筋状構造の存在に寄与することが示唆された [7]。成因についての解析を現在進めている。

②熱潮汐波の構造

数値実験で得られた熱潮汐波の構造を解析した。その結果、従来の知見と異なり、雲層高度の一日潮は夜昼間対流的な構造をもち、その南北流や鉛直流は平均子午面循環よりもずっと大きい (約 10 倍程度) が示された [8] (図 2)。

③極渦の鉛直構造

Venus Express の電波掩蔽観測の結果と整合的な温度の鉛直構造を再現し、その構造が極渦付近に存在する順圧的なロスビー波によって説明できることを明らかにした [9]。また、観測と整合的な極域の東西風速の振動についても再現に成功し、メカニズムの解析を行っている [10]。

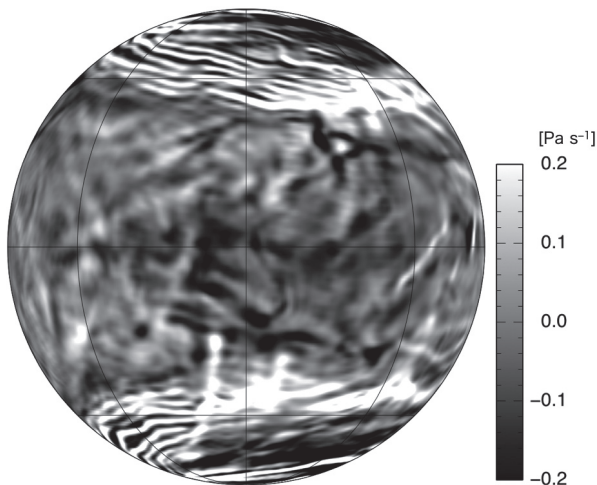


図 1 T159L120 の解像度の金星大気実験で得られた高度約 60km における鉛直風 (圧力速度) 分布。

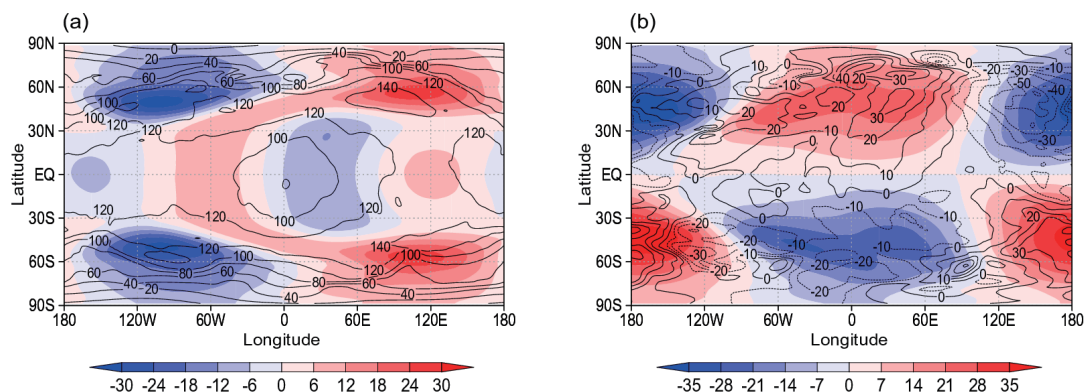


図 2 T63L120 の解像度の金星大気実験で得られた高度 70km 付近の熱潮汐波に伴う東西風 (a) と南北風 (b)。

④データ同化システム

あかつきの観測を用いたデータ同化システムの構築を目標に、局所アンサンブルカルマンフィルタを用いた金星大気データ同化プログラムの開発を推進中であり、Venus Express の Venus Monitoring Camera による観測で同化試験を実施した [11]。

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、さらに、このモデルにデータ同化技術を活用し、あかつき観測から大気循環データを生成する可能性を示している。

3.2 火星大気実験

これまでに、火星大気中に浮遊するダストの重要な供給過程を担っていると考えられる中小規模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。昨年度までに、水平格子点間隔約 11km の数値実験を実施してきたが、その中で低緯度に現れる多数の小規模渦に注目し、その特性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 [12, 13] から放射、乱流混合 (対流調節を含む)、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てきた。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。

T639 程度の水平解像度では、モデル内で個々の対流を陽に表現することはできず、対流調節と呼ばれるパラメタリゼーションによってその効果を表現する。しかし、対流調節過程の試行回数によっては不安定な大気構造が残り、擾乱の生成に影響を及ぼす可能性がある。実験結果の低緯度に見られる小規模渦の生成に対する、対流調節過程への依存性を調べるために、対流調節過程の試行回数の上限を変えた実験を実施して、現れる渦の特徴を調べた。この実験においては、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実験を実施した。しかし、今回の実験で得られた渦度分布 (図 3) では、渦強度に変化が見られるが、低緯度小規模渦が現れること自体には変化は見ら

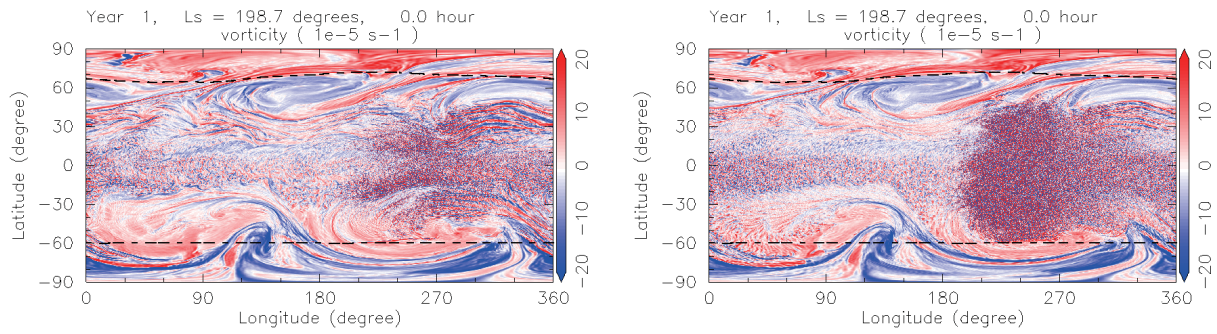


図3 T639L96の解像度で一樣な地面特性を与えた実験から得られた4 hPa 気圧面での渦度分布。対流調節を多数回実施した場合の結果(左)と従来の結果(右)。

れなかった。したがって、この構造はモデルでの対流の表現に依存するわけではないことが確認された。今後は、他の物理量との関係を調べることで小規模渦の生成機構の調査を行いたい。

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] 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”, in preparation.
- [8] Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., and Y. Matsuda, “A numerical study of the thermal tides in the Venus atmosphere”, *J. Geophys. Res., Planets*, submitted.
- [9] 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*, under revision.
- [10] Ando, H., Sugimoto, N., and Takagi, M., “Generation mechanism of precessing circulation of the Venus polar vortex”, in preparation.
- [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.*, submitted.
- [12] 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.
- [13] 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}, Masahiro Takagi^{*3}, Hiroki Kashimura^{*1}, Masaki Ishiwatari^{*4}, Masatsugu Odaka^{*4}, Kensuke Nakajima^{*5}, George L. Hashimoto^{*6} and 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 (T319L120, T159L240) than prior experiments in order to make comparison with observations of Venus Climate Orbiter/AKATSUKI, and succeeded in producing a feature resemble to planetary-scale streak structures found by AKATSUKI IR2 images. Investigations have also been made on the thermal tides and the polar vortex. The results indicate that the vertical distribution of static stability, dynamical effects of the thermal tide, and the model resolution are crucial for reproducing the realistic structure of the Venus atmosphere. Moreover, we have started developing a data assimilation system based on the local ensemble transform Kalman filter (LETKF) to make full use of the AKATSUKI observations. In simulations of the Mars atmosphere, the dependence of small scale vortices, which appear in the low latitudes, on the choice of convective parameterization is investigated. It is confirmed that the details of convective parameterization does not affect the existence of small scale vortices in the simulations.

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

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

Starting from an idealized superrotation, 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]. 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) Streak structures: Planetary-scale streak structures consistent with AKATSUKI observations are obtained at the cloud levels. It is suggested that the baroclinic instability waves and the cloud layer with low static stability contributes to their structures. (Fig. 1). Detailed analyses of the generation mechanism are in progress [7].
- (2) Thermal tides: The structure of the thermal tides at the cloud level suggests that the remarkable subsolar to antisolar (SS-AS) circulation coexists with the atmospheric superrotation. The meridional and vertical winds of the SS-AS circulation are about 10 times stronger than those of the zonal-mean meridional circulation at cloud top levels [8].
- (3) Polar vortex: Vertical and temporal structures of the temperature field reproduced in the model agree very well with the Venus Express radio occultation measurements. It is suggested that these structures are formed by Rossby

waves caused by barotropic instability [9]. Furthermore, observed short-period oscillations of the polar vortex are also well reproduced [10].

- (4) Data assimilation system: We have started developing a data assimilation system based on the local ensemble transform Kalman filter (LETKF), and tested it with observations of Venus Monitoring Camera onboard Venus Express [11].

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

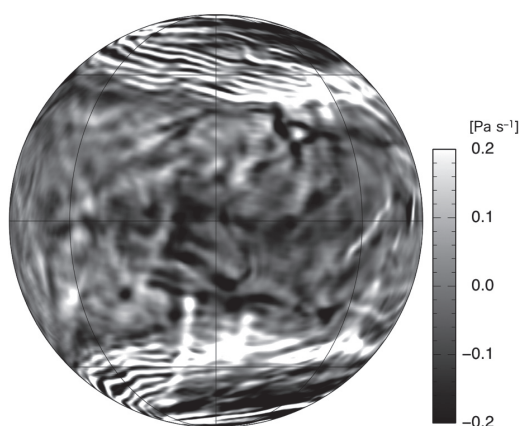


Fig. 1 Horizontal distribution of vertical flow (p-velocity) at 60km simulated in AFES Venus simulation with T159L120 resolution.

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 ($\Delta z \sim 1$ km). In this fiscal year, we have investigated dependence of small scale vortices in the low latitudes on the details of convective adjustment. With the resolutions of T639L96, local convection cannot be resolved explicitly, and its effects are represented by convective adjustment. Now, if the degree of adjustment is not enough, an unstable layer remains in the model, and such an unstable layer may have influence on the structure of small scale disturbances. In order to examine the possible effects, we have performed an experiment in which convective adjustment is performed many times during the progress of one time step to eliminate unstable layers in the models. Our results indicate that the intensity of vortices become weak, but the small scale vortices appear in the low latitudes regardless of details of the convective parameterization. We will proceed to analyze other physical quantities to reveal the generation mechanism of those small scale vortices.

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., and Matsuda, Y., “Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM”, *J. Geophys. Res., Planets*, 119, 1950-1968, 2014.
- [3] 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.
- [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] 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”, in preparation.
- [8] Takagi, M., Sugimoto, N., Ando, H., and Y. Matsuda, “A numerical study of the thermal tides in the Venus atmosphere”, *J. Geophys. Res., Planets*, submitted.
- [9] 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*, under revision.
- [10] Ando, H., Sugimoto, N., and Takagi, M., “Generation mechanism of precessing circulation of the Venus polar vortex”, in preparation.
- [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.*, under revision.

