

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

地球シミュレータ上の大気大循環モデル AFES (AGCM (Atmospheric General Circulation Model) for the Earth Simulator) に基づく惑星大気用 GCM を改良開発し、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 (T639L120、T319L240) で実験を実施した。特に、あかつき IR2 夜面観測で得られた惑星規模の筋状構造に対応する特徴を数値的に得ることに成功し、その成因の解明を試みた。また、あかつきの電波掩蔽観測で得られた赤道域の温度構造と GCM の結果を比較する解析も進めた。さらに、あかつきの観測に適用できる金星大気初の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システムの構築に成功した。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ために流れ場や温度分布を詳細に調べた結果、低緯度の小規模渦が、鉛直シアを持つ東西風の運動量を熱対流が鉛直輸送することによって生成されている可能性が示唆された。

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様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 (AFES-Planets) 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。これらのモデル (AFES-Venus, AFES-Mars) は、新 ES において、現状では、120 ノードで実行可能 (バ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 (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]。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 79 km、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、精密な放射過程と雲物理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。また温度の鉛直構造の解析、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、より高解像度 (T639L120 および T319L240) にした実験を行った。以下に主要な成果を示す。

①下部雲層にみられる惑星規模の筋状構造

あかつき IR2 夜面観測で発見された、下部雲層付近の惑星規模筋状構造に対応すると考えられる風速場構造を得ることができた。太陽加熱や安定度を変化させた一連の高解像度数値実験によって筋状構造の成因を明らかにすることに成功し、雲層の低安定度と傾圧不安定波の存在がその構造の発生に寄与することを示唆した。成果をまとめた論文 [7] を投稿中である。

②熱潮汐波の三次元構造

数値実験で得られた熱潮汐波の構造を解析した論文 [8] が出版された。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 10 倍程度大きな流速を持つことが示された。また、雲層上端高度のハドレー循環は緯度 30° より低緯度に留まり、中高緯度にはフェレル循環的な平均子午面循環の存在が示唆された。

③温度の時間変動と鉛直構造

欧州の探査機 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を再現することに成功し、論文として出版した [9]。この温度の鉛直構造は極渦付近に存在する順圧的なロスビー波によることが示された。また、あかつきの電波掩蔽観測と整合的な赤道域の温度の鉛直構造の時間変化を再現し (図 1)、大気安定度の地方時・高度分布に対する熱潮汐波の影響を提案した論文 [10] を投稿中である。

④データ同化システムの開発と初期テスト

あかつきの観測を用いた金星大気初のデータ同化を目標に、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を開発した論文 [11] が出版された。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試験により、熱潮汐波の構造の再現に成功した (図 2)。

⑤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を GCM に導入し、金星の硫酸雲 (主にモード 2 と呼ばれる雲粒子) に対する大気大循環の影響を調査した。その結果、従来の研究結果と大きく異なり、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。現在、初期成果をまとめた論文を準備中である。

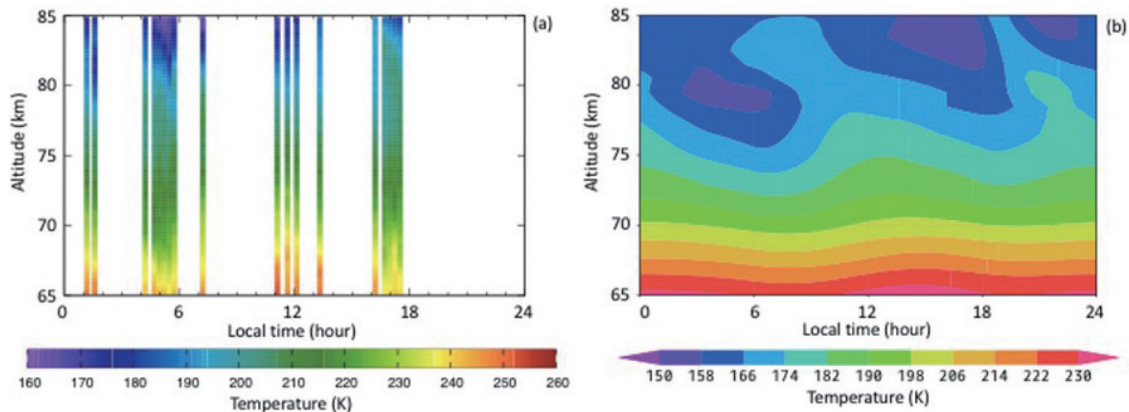


図 1 あかつき電波掩蔽観測 (a) と T63L120 の解像度の金星大気実験 (b) で得られた赤道域での温度の鉛直構造のローカルタイム依存性。

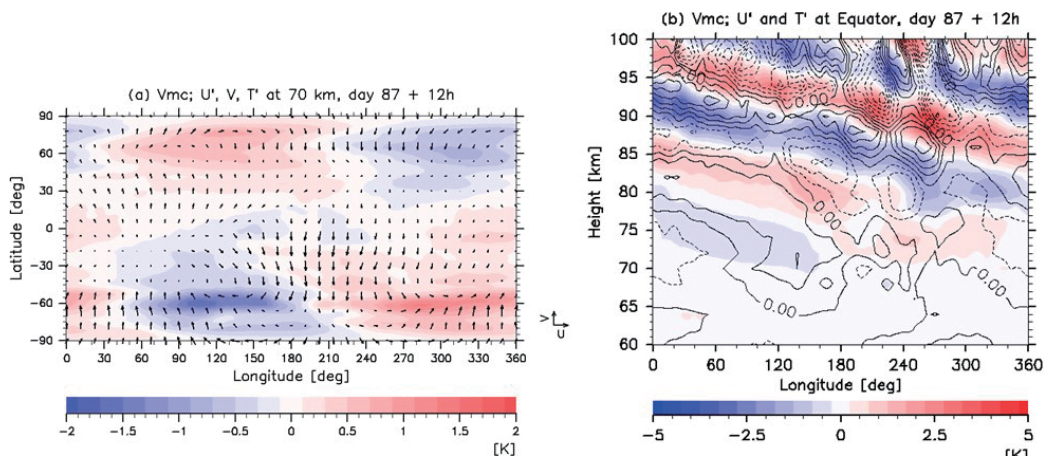


図 2 Venus Express の Venus Monitoring Camera による雲層上端の風速の観測データを、T42L60 の解像度の 31 メンバーにデータ同化した実験で得られた、熱潮汐波に伴う風速 (矢印) と温度 (カラー) の擾乱の高度 70 km 付近の水平断面 (a) と東西風 (カラー) と温度 (コンター) の擾乱の赤道での経度高度断面 (b)。

以上の成果は、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

これまで、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。これまで、水平格子点間隔約 11 km 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）、地面過程を導入したものである。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。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た結果、低緯度の小規模渦は、鉛直シアを持つ東西風の運動量を熱対流が鉛直輸送することによって生成されている可能性が示唆された。

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”, *Nature Communications*, under review.
- [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., 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.
- [10] 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”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, accepted.
- [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, 2018.
- [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 the 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 which resembles to planetary-scale streak structures found in 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 features of the Venus atmosphere. In addition, we have succeeded in developing a data assimilation system based on the local ensemble transform Kalman filter (LETKF) toward making full use of the AKATSUKI observations. In simulations of the Mars atmosphere, detailed analyses of distributions of velocity and temperature around small scale vortices observed in the model results are performed. It is implied that the small scale vortices are generated by thermal convection due to vertical transport of momentum associated with zonal wind with vertical shear.

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. The superrotation of the Venus atmosphere and the global dust storm of the Mars atmosphere, for instance, are still mysterious phenomena to be clarified. 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 developing GCMs (AFES-Venus and AFES-Mars) 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 the observations [4] and the planetary scale waves consistent with the 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 of the model is extended from T159L120 to T639L120 and T319L240, which are equivalent to a horizontal grid size of about 20 km with 120 vertical layers ($dz \sim 1$ km) and about 40 km with 240 vertical layers ($dz \sim 500$ m), respectively. The main results are as follows.

- (1) Streak structures: The high resolution simulations reproduced planetary-scale streak structures consistent with AKATSUKI IR2 night-side observations at the lower cloud levels. It is suggested that the baroclinic instability and a layer with low static stability in the cloud layer contribute in reproducing those structures. The generation mechanism is summarized in paper [7] which is now submitted.
- (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]. It is also suggested that the Hadley cell is confined in low-latitudes equatorward of 30° , and a Ferrel-like cell dominates in mid- and high-latitudes.

- (3) Vertical structures of temperature fields: Vertical and temporal structures of the temperature field at the polar region 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, at the equatorial region, local time dependence of the thermal structure observed by Akatsuki radio occultation measurements is also well reproduced [10].
- (4) Development of a data assimilation system for the Venus atmosphere: We have developed a data assimilation system based on the local ensemble transform Kalman filter (LETKF) of the Venus atmosphere for the first time, and tested it with observations of Venus Monitoring Camera onboard Venus Express [11]. (Fig. 1)
- (5) Development of a cloud model for the GCM: We are introducing a new cloud model into the GCM. Preliminary results, which are quite different from previous works on the Venus cloud process, show that the H_2SO_4 cloud is produced in the upper polar atmosphere, and the distributions of H_2SO_4 vapor near the cloud deck are well reproduced in the GCM. These results will be submitted to a research journal before long.

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 superrotation. The model must be quite 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 ($dz \sim 1$ km). In this fiscal year, we have investigated distributions of velocity and temperature around small scale vortices in the low latitudes, in detail. As a result, it is implied that the small scale vortices are generated by thermal convection due to vertical transport of momentum associated with zonal wind with vertical shear.

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.

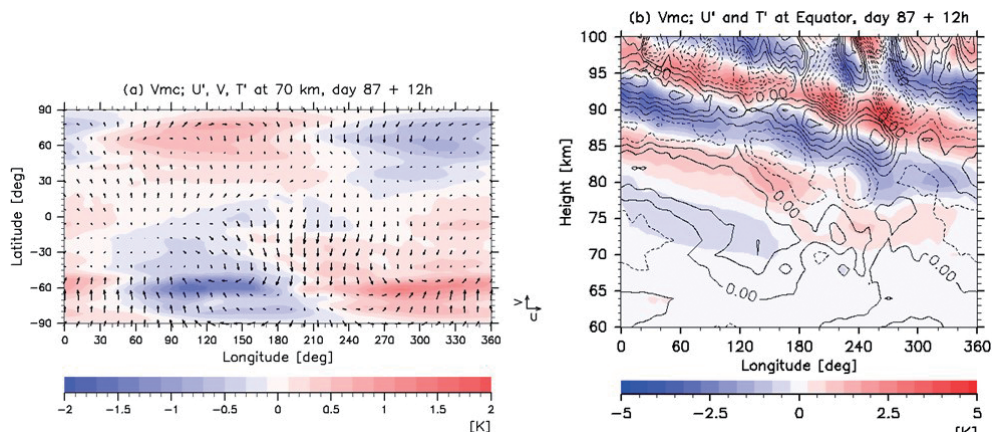


Fig. 1 (a) Horizontal and (b) vertical distributions of temperature deviation obtained from zonally averaged temperature (colour shades; K) associated with the thermal tide for real observations based on the Venus Monitoring Camera (VMC) onboard Venus Express. In panel (a), a horizontal distribution of horizontal winds at 70 km is also depicted (black vectors). In panel (b), a vertical distribution of zonal wind deviation at the equator is depicted (black contours).

- [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”, *Nature Communications*, under review.
- [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., 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.
- [10] 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”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, submitted.
- [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, 2018.