

R009-19

B会場：11/25 AM1 (9:00-10:15)

9:00~9:15

金星大気の全球非静力学計算：鉛直対流の影響

#櫻村 博基¹⁾, 八代 尚²⁾, 西澤 誠也³⁾, 富田 浩文³⁾, 高木 征弘⁴⁾, 杉本 憲彦⁵⁾, 小郷原 一智⁴⁾, 黒田 剛史⁶⁾, 中島 健介⁷⁾, 石渡 正樹⁸⁾, 高橋 芳幸¹⁾, 林 祥介¹⁾

(¹⁾ 神戸大学, (²⁾ 国立環境研究所, (³⁾ 理化学研究所, (⁴⁾ 京都産業大学, (⁵⁾ 慶應義塾大学, (⁶⁾ 東北大学, (⁷⁾ 九州大学, (⁸⁾ 北海道大学

Non-hydrostatic global simulations of the Venus atmosphere: effects of vertical convection

#Hiroki Kashimura¹⁾, Hisashi Yashiro²⁾, Seiya Nishizawa³⁾, Hirofumi Tomita³⁾, Masahiro Takagi⁴⁾, Norihiko Sugimoto⁵⁾, Kazunori Ogohara⁴⁾, Takeshi Kuroda⁶⁾, Kensuke Nakajima⁷⁾, Masaki Ishiwatari⁸⁾, Yoshiyuki O. Takahashi¹⁾, Yoshi-Yuki Hayashi¹⁾

(¹⁾Kobe University, (²NIES, (³RIKEN, (⁴Kyoto Sangyo University, (⁵Keio University, (⁶Tohoku University, (⁷Kyushu University, (⁸Hokkaido University

Venus is fully covered by thick clouds of sulfuric acid, and its atmospheric circulation and inherent phenomena are poorly understood.

Recent observations by the Venus Climate Orbiter/Akatsuki have revealed a variety of atmospheric phenomena, from the planetary-scale bow-shaped structure (Fukuhara et al., 2017) and streak-structure (Kashimura et al., 2019) to a front-like structure to small-scale vortices and waves of several hundred kilometers (Limaye et al., 2018). There have also been active attempts to reproduce these phenomena using Venusian atmospheric global models and to understand the mechanisms involved. In particular, AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014) has realized high-resolution simulations of the Venus atmosphere, and many structures have been analyzed (e.g., Kashimura et al., 2019; Takagi et al., 2018; Sugimoto et al., 2022; Takagi et al., 2022). However, AFES-Venus is a hydrostatic model, which cannot explicitly express vertical convection. The vertical convection in the cloud layer is not only interesting in itself but is also very important in the Venusian atmosphere because the neutral or low-stability layer resulting from convection is closely related to the formation of the planetary-scale bow-shaped structure and the streak-structure. Though non-hydrostatic regional models have been used to study convective activities and the resulting gravity waves (e.g., Baker et al., 1998; Imamura et al., 2014; Yamamoto 2014; Lefèvre et al., 2017), due to the limitation of the domain size, effects of the convective activities on large-scale phenomena have not been investigated.

We are developing a non-hydrostatic Venusian atmospheric global model to realize a global simulation that explicitly represents convective activities in the cloud layer. We utilized SCALE-GM (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/>) for the dynamical core. We imported the solar heating and Newtonian cooling functions used in AFES-Venus (Tomasko et al., 1980; Crisp et al., 1986; Sugimoto et al., 2014) to SCALE-GM. Then, we performed numerical experiments with zonally uniform heating and cooling and obtained features such as the superrotation and streak-structure similar to those obtained by AFES-Venus. Here, note that the used thermal forcing leads the atmosphere to a hydrostatically stable state (though it is close to neutral) and does not directly drive convective motions in the cloud layer.

In this study, we attempted to perform global simulations with vertical convection by providing a thermal forcing that brings a hydrostatically unstable state. Specifically, the forcing stability (i.e., the stability of the reference temperature field for Newtonian cooling) at 55-60 km altitude was changed from 0.1 K/km to negative values (e.g., -1.0 K/km), and a diurnal component of solar heating was added. Simulations were performed at several resolutions from $\Delta x \sim 52$ km to 3.3 km.

Numerical results show that vertical convection occurs in the region of the night side at every resolution. However, the horizontal scales of the expressed vertical convection depend on the resolution. We will show the basic features of the circulation and temperature structures and discuss the location, morphology, and role of convection in the Venus atmosphere.

Acknowledgments: This research was supported by MEXT as "Exploratory Challenge on Post-K computer" (Elucidation of the Birth of Exoplanets [Second Earth] and the Environmental Variations of Planets in the Solar System) and "Program for Promoting Researches on the Supercomputer Fugaku" (Structure and Evolution of the Universe Unraveled by Fusion of Simulation and AI). The supercomputer Fugaku provided by RIKEN was used for the numerical calculations. This research was also supported by JSPS Grants-in-Aid for Scientific Research JP19H05605, JP20K04062, and JP24H00021 and JST FOREST Program, Grant Number JPMJFR212R.

金星は全球が濃硫酸の分厚い雲で覆われており、その大気の循環構造や内在する諸現象の全貌は明らかになっていない。しかし近年、金星探査機「あかつき」の観測によって、惑星規模の弓状構造 (Fukuhara et al., 2017) や筋状構造 (Kashimura et al., 2019)、前線状の構造、数百 km 程度の小規模な渦や波 (Limaye et al., 2018) など様々な大気現象が発見

されている。また、これらの現象を大気大循環モデルで再現し、メカニズムに迫る試みも活発に行われている。なかでも、地球シミュレータに最適化された全球大気モデル「AFES」(Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008)をもとに開発された AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014) によって、高解像度計算が実現され、様々な構造が解析されてきた (e.g., Kashimura et al., 2019; Takagi et al., 2018; Sugimoto et al., 2022; Takagi et al., 2022)。しかし、AFES は静力学平衡を仮定した大気モデルであり、水平数十 km 規模以下の現象には適しておらず、雲層の対流活動を陽に扱うこともできない。雲層の対流活動は、それ自身が興味深いだけでなく、対流の結果として生じる中立あるいは低安定度の層が、惑星規模の弓状構造や筋状構造の成因に深く関わっており、金星大気大循環の特徴を理解する上で非常に重要だと考えられる。これまでに、非静力学の領域モデルによって雲層の対流活動やそこから生じる重力波などが研究されている (e.g., Baker et al., 1998; Imamura et al., 2014; Yamamoto 2014, Lefèvre et al., 2017) が、計算領域が限定されるがゆえに、大規模現象に対する影響を調べることは出来ていない。

そこで我々は、雲層の対流活動を陽に表現した金星大気の global 計算を実現すべく、非静力学の global 金星大気モデルの開発を進めている。大気運動や座標系を担う力学コアには「SCALE-GM」(<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/>) を利用している。SCALE-GM は、完全圧縮方程式系を正二十面体準一様格子 (Tomita et al., 2001, 2002) 上で有限体積法で解く力学コアである。これまでに、AFES-Venus で用いられている太陽加熱・ニュートン冷却 (Tomasko et al., 1980; Crisp et al., 1986; Sugimoto et al., 2014) を導入し、東西一様な加熱冷却強制の下で計算を試行し、AFES-Venus と同様な平均東西風分布や惑星規模筋状構造が表現されることを確認してきた (櫻村他, 2021)。ただし、この加熱冷却強制は、(中立には近いものの、対流運動による静的不安定解消後の) 静的安定な場へと近づけるものであり、雲層付近の鉛直対流を直接駆動しない設定であった。

そこで本研究では、静的不安定な場へと近づける加熱冷却強制を与えることで、鉛直対流が直接駆動される global 計算を試みた。具体的には、高度 55 – 60 km における安定度強制 (ニュートン冷却の基準温度場の安定度) を、従来の 0.1 K/km から、負の値 (- 1.0 K/km など) に変更し、太陽加熱の日変化成分も加えた。計算は、水平格子間隔 $dx \sim 52$ km から 3.3 km まで段階的に複数の解像度で行った。

計算の結果、全ての解像度で夜面の高度 50-60 km 付近で鉛直対流が生じることが確認された。ただし、表現された鉛直対流の水平規模は $dx \sim 52$ km で 500 km 程度、 $dx \sim 3.3$ km で 50 km 程度と解像度に依存する。講演では、平均東西風をはじめとした基本的な循環構造や温度構造を紹介した後、鉛直対流の出現場所、形態、および熱・運動量の鉛直輸送への寄与を議論する予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統合的描像の構築」及び「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」の一環として実施しました。数値計算には、理化学研究所の大型計算機「富岳」を使用しました。本研究は JSPS 科研費 JP19H05605、JP20K04062、JP24H00021 及び JST 創発的研究支援事業 JPMJFR212R の支援を受けました。