

R009-40

Zoom meeting D : 11/2 PM2 (15:45-18:15)

15:45~16:00

全球非静力学金星大気モデルの開発：簡易金星計算

#樫村 博基¹, 八代 尚², 西澤 誠也³, 富田 浩文⁴, 高木 征弘⁵, 杉本 憲彦⁶, 小郷原 一智⁷, 黒田 剛史⁸, 中島 健介⁹, 石渡 正樹¹⁰, 高橋 芳幸¹¹, 林 祥介¹

(¹ 神戸大・理・惑星/CPS, (² 環境研・地球C, (³ 理研 R-CCS, (⁴ 理研 R-CCS, (⁵ 京産大・理, (⁶ 慶大・日吉物理, (⁷ 京産大・理, (⁸ 東北大・理, (⁹ 九大・理・地惑, (¹⁰ 北大・理・宇宙, (¹¹ 神戸大・理・惑星

Development of a non-hydrostatic global model of the Venus atmosphere: A simplified Venus simulation

#Hiroyuki Kashimura¹, Hisashi Yashiro², Seiya Nishizawa³, Hirofumi Tomita⁴, Masahiro Takagi⁵, Norihiko Sugimoto⁶, Kazunori Ogohara⁷, Takeshi Kuroda⁸, Kensuke Nakajima⁹, Masaki Ishiwatari¹⁰, Yoshiyuki O. Takahashi¹¹, Yoshiyuki Hayashi¹

(¹Planetology/CPS, Kobe Univ., (²NIES/CGER, (³RIKEN R-CCS, (⁴RIKEN R-CCS, (⁵Faculty of Science, Kyoto Sangyo University,

(⁶Physics, Keio Univ., (⁷Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, (⁸Tohoku Univ., (⁹Earth and Planetary Sciences, Kyushu University,

(¹⁰Cos

Venus is fully covered by thick clouds of sulfuric acid, and its atmospheric circulation and inherent phenomena are not well understood. However, 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 general circulation models and to understand the mechanisms involved. In particular, AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014), which was developed based on AFES (Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008), the atmospheric general circulation model highly optimized for the Earth Simulator, has realized high-resolution simulations of the Venus atmosphere, and the planetary-scale streak-structure, thermal tides, gravity waves, meridional circulations, and other structures have been analyzed (e.g., Kashimura et al., 2019; Takagi et al., 2018; Sugimoto et al., 2021; Takagi et al., in prep.). However, AFES is a hydrostatic model, which is not suitable for phenomena whose horizontal scales are of less than several tens of kilometers and cannot explicitly express convections in the cloud layer. The convections in the cloud layer are not only interesting in themselves but are also very important in the Venusian atmosphere because the neutral or low-stability layer resulting from convections 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 in the cloud layer and the resulting gravity waves (e.g., Baker et al., 1998; Imamura et al., 2014; Yamamoto 2014, Lefevre et al., 2017), due to the limitation of the domain size, effects of the convective activities on large-scale phenomena have not been investigated.

Then, we have started developing a non-hydrostatic Venusian atmospheric general circulation model to realize a global simulation of the Venusian atmosphere that explicitly represents convective activities in the cloud layer. We utilize SCALE-GM (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/>) for the dynamical core, which determines the coordinate system and calculates atmospheric motions. As a first step in the development, the various planetary and atmospheric constants are changed to Venusian values, and the solar heating and Newtonian cooling functions used in AFES-Venus (Tomasko et al., 1980; Crisp et al., 1986; Sugimoto et al., 2014) are imported to SCALE-GM. We then tried a simplified Venus simulation similar to AFES-Venus in various resolutions to explore the necessary numerical properties such as time-step intervals and strength of the numerical diffusion and the sponge layer. The planetary-scale streak-structure are represented in the same way as in AFES-Venus, in case of the resolution of a horizontal grid spacing of $dx \sim 52$ km and 120 layers ($dz = 1$ km) in vertical with a second-order Laplacian for the horizontal diffusion whose e-folding time for the minimum scale is 100 s. However, in SCALE-GM, a strong sponge layer that dumps not only the eddies but also the mean flow is necessary for computational stability. Therefore, the superrotation strength and the angular momentum budget of the atmosphere are influenced by the artificial sponge layer, and we need to seek better ways to keep computational stability. We are attempting to calculate in higher horizontal resolution, and we will also present these results.

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)、前線のような構造、数百 km 程度の小規模な渦や波 (Limaye et al., 2018) などといった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、その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大気大循環モデル「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、高解像度のシミュレーションが実現され、惑星規模の筋状構造や熱潮汐波、重力波、子午面循環などの構造が解析されてきた (e.g., Kashimura et al., 2019;

Takagi et al., 2018; Sugimoto et al., 2021; Takagi et al., in prep.)。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、金星大気において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きた (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グローバルシミュレーションを実現すべく、非静力学の金星大気大循環モデルの開発を始めている。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/>)を利用する。SCALE-GM は、完全圧縮方程式系を正 20 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。開発の最初の一步として、惑星・大気の諸定数を金星の値に変更し、AFES-Venus で使われていた加熱強制・ニュートン冷却 (Tomasko et al., 1980; Crisp et al., 1986; Sugimoto et al., 2014) を与えられるようにした。そして、AFES-Venus と同様の簡易金星計算を様々な解像度で試行し、必要な時間刻み幅や数値拡散やスポンジ層の強さなどを探った。水平格子間隔 $dx \sim 52$ km、鉛直 120 層 ($dz = 1$ km) の解像度において、水平拡散として 2 次のラプラシアン、最小スケールに対する緩和時間を 100 s とした場合に、惑星規模の筋状構造が、AFES-Venus と同様に表現されることが確認できた。一方 SCALE-GM では、計算安定のためには平均東西風も減速させる強いスポンジ層をモデル上部に導入する必要があった。このため、スーパーローテーションの強度や大気の角運動量収支に、人工的なスポンジ層が影響を与えてしまっており、さらなる工夫が必要である。また、より高解像度の計算も試行しており、本発表ではこれらの結果も紹介したい。