

非静力学全球火星大気循環モデルの開発と高解像度計算

榎村 博基 [1]; 八代 尚 [2]; 西澤 誠也 [3]; 富田 浩文 [4]; 中島 健介 [5]; 石渡 正樹 [6]; 高橋 芳幸 [7]; 林 祥介 [8]
 [1] 神戸大・理・惑星/CPS; [2] 環境研・地球 C; [3] 理研 R-CCS; [4] 理研 AICS; [5] 九大・理・地惑; [6] 北大・理・宇宙;
 [7] 神戸大・理・惑星; [8] 神戸大・理・惑星

Development of a global non-hydrostatic Martian atmospheric model and its high-resolution simulation

Hiroki Kashimura[1]; Hisashi Yashiro[2]; Seiya Nishizawa[3]; Hirofumi Tomita[4]; Kensuke Nakajima[5]; Masaki Ishiwatari[6]; Yoshiyuki O. Takahashi[7]; Yoshi-Yuki Hayashi[8]
 [1] Planetology/CPS, Kobe Univ.; [2] NIES/CGER; [3] RIKEN R-CCS; [4] RIKEN AICS; [5] Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; [6] CosmoSciences, Hokkaido University; [7] Department of Planetology, Kobe Univ.; [8] Planetology/CPS, Kobe Univ.

In the Martian atmosphere, dust storms in various scales—from dust devils, local dust storm, to global dust storm—have been observed. However, interactions between these scales are unknown. In addition, since Mars has a thin atmosphere and no ocean, the temperature difference between day and night is large and vertical convection should play an essential role in the Martian meteorology and climate, but it is also unknown. To investigate these mysteries, global atmospheric simulations with horizontal resolution as high as few kilometers and by solving the governing equations without assuming the hydrostatic balance are required.

We are developing a non-hydrostatic global Martian atmospheric model (Martian SCALE-GM) which is suitable for large-scale parallel computation. SCALE-GM (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/>) is being developed by using the dynamical core of NICAM (Tomita & Satoh, 2005; Satoh et al., 2008, 2014), a non-hydrostatic model for the Earth atmosphere using a finite volume method in the icosahedral grid systems (Tomita et al., 2001, 2002), and by aiming at sharing of physical process modules with the regional model (SCALE-RM) and application to other planetary atmospheres. We are developing Martian SCALE-GM by incorporating constants and physical process modules of the Martian atmosphere. The Martian physical modules are taken from DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>), an existing pan-planetary atmospheric general circulation model (GCM). DCPAM is a traditional, hydrostatic GCM using a spectral method for horizontal discretization.

We ported a Martian atmospheric radiation model (Forget et al., 1999) and a soil model from DCPAM to SCALE-GM and performed a test of temperature evolution in a vertical 1D-atmosphere and soil. The atmosphere model has 100 layers ($dz = 1$ km), and distribution of dust is fixed with 0.2 optical depth. The soil model has 18 layers. Soil's heat capacity and thermal conductivity are set to 9.7×10^5 [J K⁻¹ kg⁻¹] and 0.076 [W m⁻¹ K⁻¹], respectively. Surface albedo is fixed at 0.2. For the calculation of surface fluxes and vertical diffusion, BH91B95 (Beljaars & Holstang, 1991; Beljaars, 1995) and MY2.5 (Mellor & Yamada, 1982) are used, respectively. The initial condition is the 200 K constant temperature atmosphere and soil. We have confirmed that both models show almost the same temperature evolution.

Next, we performed 3D calculations under a Mars-like condition in 8 different horizontal resolutions to check the resolution dependence. Horizontal grid intervals are $240 \times (1/2)^n$ [km] ($n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$); i.e., 1.9 km at minimum. The horizontal diffusion representing turbulent mixing in sub-grid scales is given in the 3rd order Laplacian with the relaxation time for the shortest scale given by $100 \times (1/2)^n$ [s]. The atmosphere is divided into 36 layers, which are concentrated near the surface. To avoid wave reflections at the model top, a sponge layer represented by 1st order Laplacian is set above 40 km altitude; the relaxation time for the shortest scale is given by $3600 \times (1/4)^n$ [s] except for the case of $dx = 3.75$ km, in which 3 s is used. The 4th order Runge-Kutta method is used for time-integration with a time step of $360 \times (1/2)^n$ [s]. The surface albedo is set to 0.5. Neither topography nor condensation processes are included.

Numerical solutions showed that the diurnal vertical convection did not appear clearly in the cases with dx larger than 15 km, whereas they appeared in higher resolution cases. Furthermore, it was confirmed that the horizontal scale and occurrence local-time of the vertical convection are highly dependent on the horizontal resolution.

(Figure: Horizontal resolution dependence of vertical wind [m s⁻¹]. Snapshots at 2 km altitude after 30 days from the spring equinox of the Northern hemisphere. Panels g, h, i are zoom-up views of Panels d, e, f, respectively)

地球大気の運動は数メートル規模から惑星規模に至るまで幅広く、様々な規模の現象が相互作用している。このことが、より高解像度の大気シミュレーションが求められる理由の1つである。こうした状況は、火星をはじめとした他の惑星でも同様ならずである。火星では数十から数百メートル規模のダストデビル(塵旋風)から、数十キロメートル規模のローカルダストストーム、全球を覆うグローバルダストストームまで、大小様々な規模の砂嵐が観測されているが、これらのスケール間の相互作用は未解明である。また火星は大気が薄く海がないため、昼夜間の寒暖差が大きく、鉛直対流が卓越すると考えられるが、全球規模の大気大循環に対するその役割は解明されていない。これらの謎に挑むためには、水平数キロメートル解像度の高解像度で、非静力学の方程式系による全球大気計算が求められる。

そこで我々は、大型計算機「京」の後継機、「富岳」で火星高解像度計算の実現を目指し、全球非静力学火星大気モデル(火星版 SCALE-GM)を開発している。SCALE-GM (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/>)は、正二十面体準一様格子法

(Tomita et al., 2001, 2002) による地球大気の全球非静力学モデル NICAM (Tomita & Satoh, 2005; Satoh et al., 2008; Satoh et al., 2014) の力学コアを基に、領域モデル (SCALE-RM) との物理過程モジュールの共通化や他の惑星大気計算など、より幅広い応用を目指して開発が進められている大気大循環モデルである。我々は SCALE-GM に、火星大気用の定数や放射・地表面過程などの物理モジュールを組み込んだ火星版 SCALE-GM を開発している。開発は、既存の汎惑星大気大循環モデル DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) の火星物理モジュールを移植する形で進めている。なお DCPAM は静力学平衡を仮定した方程式系をスペクトル法で解く、伝統的な全球大気モデルである。

本研究ではまず、DCPAM 物理モジュールのうち、火星大気放射モデル (Forget et al., 1999) と土壌モデルを移植し、テスト計算として鉛直 1 次元大気と土壌の温度変化を確認した。大気は鉛直 100 層 ($dz = 1 \text{ km}$)、ダストは光学的厚さ 0.2 の固定分布とし、土壌は 18 層、熱容量 $9.7 \times 10^5 \text{ [J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}]$ 、熱伝導率 $0.076 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$ とした。地表アルベドは 0.2 とし、地表面フラックスは BH91B95 (Beljaars & Holstang, 1991; Beljaars, 1995)、鉛直拡散は MY2.5 (Mellor & Yamada, 1982) で計算した。初期値は 200 K の等温静止大気・土壌とし、SCALE-GM と DCPAM で同様の時間発展が計算されることを確認した。

次に、火星の設定下における高解像度 3 次元計算のテストと解像度依存性の確認を兼ねて、水平解像度の異なる以下の 8 ケースの計算を実施した。水平格子間隔は、 $240 \times (1/2)^n \text{ [km]}$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$; 以下同じ) であり、最小時はおよそ 1.9 km である。サブグリッドスケールの乱流拡散を表す水平渦拡散は 3 次のラプラシアンで与え、その最小スケールに対する緩和時間は、 $100 \times (1/2)^n \text{ [s]}$ とした。大気の鉛直層数は 36 とし、地表付近ほど層間隔が狭くなるように配置した。モデル上端での波の反射を防ぐため、高度 40 km より上空に 1 次のラプラシアンで擾乱を潰すスポンジ層を設置した。その最小スケールに対する緩和時間は $3600 \times (1/4)^n \text{ [s]}$ とした。ただし計算の都合上 $dx = 3.8$ と 1.9 km のときは、 3 s とした。時間積分には 4 段 4 次のルンゲクッタ法を用い、時間刻み幅 $360 \times (1/2)^n \text{ [s]}$ で計算した。地表アルベドは 0.5 とした。地形および凝結過程は導入していない。

計算の結果、水平格子間隔が 30 km 以上の場合、日周期加熱に伴う鉛直対流は明瞭には現れなかったが、15 km 以下の場合には、鉛直対流が表現された。また、鉛直対流の規模・発生時刻は、今回計算した範囲では解像度に制約されていることが確認された。

(図：高度 2 km の鉛直流 $[\text{m s}^{-1}]$ の解像度依存性。北半球春分から 30 日後の瞬間場。g, h, i はそれぞれ d, e, f の拡大図である。)

