

## 3 次元火星大気非静力学モデルの開発と鉛直対流の数値計算

## Development of a three dimensional non-hydrostatic model for Martian atmosphere and a numerical simulation of thermal convection

小高正嗣, 北大理, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, odakker@gfd-dennou.org

山下達也, 北大理, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, yamasita@ep.sci.hokudai.ac.jp

杉山耕一郎, 国立天文台, 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1, sugiyama@gfd-dennou.org

中島健介, 九大理, 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1, kensuke@geo.kyushu-u.ac.jp

石渡正樹, 北大理, 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目, momoko@gfd-dennou.org

林 祥介, 神大理, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, shosuke@gfd-dennou.org

Masatsugu ODAKA, Hokkaido Univ., Kita-10 Nishi-8 Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Tatsuya YAMASHITA, Hokkaido Univ., Kita-10 Nishi-8 Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Ko-ichiro SUGIYAMA, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, 181-8588, Japan

Kensuke NAKAJIMA, Kyushu Univ., 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

Masaki ISHIWATARI, Hokkaido Univ., Kita-10 Nishi-8 Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Yoshi-Yuki HAYASHI, Kobe Univ., 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, 657-8501, Japan

We develop a three dimensional non-hydrostatic model and perform a numerical simulation of thermal convection in the Martian atmosphere without background wind and dust radiative heating. The numerical model based on the two dimensional quasi-compressible model developed by Sugiyama et al. (2008). The atmospheric radiative transfer is not calculated explicitly, and a horizontally uniform body cooling is introduced below 5 km height. After 12 hours of integration, the thermal convection whose horizontal scale of updraft region is several km is developed. The upward wind velocity reaches from 10 to 15 m/sec while the downward wind velocity is about several m/sec. At the lowest level of the three dimensional model ( $z = 50$  m), isolated vertical vortexes which horizontal scale is about several hundred m are developed frequently. This result suggests that the vertical vortex like dust devils may be naturally developed accompanied with the convective motion without background wind.

## 1. はじめに

火星大気において、鉛直対流は下層大気における主要な熱輸送過程であるとともに、その結果生じる水平方向の温度差を介して大規模循環に影響を与えていると考えられている。実際、火星で頻りに観測されるダストデビル（塵旋風）と呼ばれる  $\mu\text{m}$  サイズの砂によって可視化された鉛直渦は、日中の活発な鉛直対流の存在を示唆している。火星大気対流の 3 次元数値シミュレーションは、計算機能力の向上と地球大気向けの 3 次元大気対流モデルの開発が進化した今世紀になって行われるようになってきた。Rafkin らのグループは地球大気向けの 3 次元大気対流モデル RAMS<sup>(1)</sup> を火星向けに改変し<sup>(2)</sup>、大気中に平均的な量のダストが存在する場合の放射加熱と背景風を与えて鉛直対流の計算を行った。彼らは日中の対流セルの空間スケールは鉛直に約 5 km で、水平に約 3 km、鉛直風速は 10 m/sec に達することを示した<sup>(3)</sup>。また、Toigo らは別の 3 次元大気対流モデルである MM5<sup>(4)</sup> を火星向けに改変したモデルを用いて、Rafkin らと同様のダストによる放射加熱を与えた場合の鉛直対流のシミュレーションを行った。彼らは背景風の風速を変化させた場合に、火星で頻りに観測されるダストデビルのような鉛直渦の生成がどう影響されるかを調べている<sup>(5)</sup>。これらの研究では、特定の観測との比較を念頭において背景風やダストの放射加熱を導入している。しかし火星大気で生じる鉛直対流の自然な様相を調べるには、まず背景風とダストの放射加熱の無い条件でのシミュレーションを行う必要がある。そのような研究として、我々は過去に 2 次元大気対流モデルを用いたシミュレーションを行ってきた<sup>(6)(7)</sup>。本研究では Sugiyama *et al.* (2008)<sup>(8)</sup> によって開発されてきた 2 次元大気対流モデルを基に 3 次元モデルを開発し、開発したモデル

の性能試験を兼ねて背景風とダストの放射加熱のない場合の鉛直対流のシミュレーションを行う。特に対流にとまらぬ鉛直風速の大きさと、地表付近の鉛直渦の様子に着目する。

## 2. 数値モデルと計算設定

本研究で開発したモデルは Sugiyama *et al.* (2008)<sup>(8)</sup> によって開発された 2 次元大気対流モデルから雲微物理パラメタリゼーション過程を取り除き、3 次元化したものである。開発したモデルのソースコードは解説文書とともにネットワーク上に公開されている<sup>(9)</sup>。大気は理想気体とし、その組成は火星大気の主成分である  $\text{CO}_2$  のみとした。モデル方程式は準圧縮系方程式<sup>(10)</sup>である。ただし惑星の自転効果は考慮しない。

$$\frac{du}{dt} = -c_p \bar{\theta} \frac{\partial \pi'}{\partial x} + D_m(u), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -c_p \bar{\theta} \frac{\partial \pi'}{\partial y} + D_m(v), \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -c_p \bar{\theta} \frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'}{\bar{\theta}} + D_m(w), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} + w \frac{d\pi}{dz} + \frac{R\pi}{c_v} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta'}{dt} + w \frac{d\bar{\theta}}{dz} = \frac{\bar{\theta}}{T} (Q_{rad} + Q_{dis}) + D_h(\theta'). \quad (5)$$

ここで、

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad (6)$$

である。 $u, v, w$  は速度の各成分、 $\pi$  はエクスター関数、 $\theta$  は温位、 $T$  は温度である。これらのうち  $(\bar{\cdot})$  を付けた変数は高度のみに

依存する基本場の量で、 $(\cdot)'$  を付けた変数はそれからの偏差であることを表す。 $D_m(\cdot), D_h(\cdot)$  はそれぞれ運動量と温位の乱粒拡散を表し、散逸加熱  $Q_{dis}$  とともに 1.5 次のクロージャモデル<sup>(10)</sup> を用いて計算する。 $c_p, c_v$  はそれぞれ定圧比熱と定積比熱、 $R$  は気体定数、 $g$  は重力加速度である。 $c_p, c_v$  は  $CO_2$  の値を与え、 $g = 3.72 \text{ m/sec}^2$  とする。地表からの熱と運動量のフラックスはバルク法で計算し、バルク係数は一定値 (0.01) とする<sup>(6)</sup>。 $Q_{rad}$  をもたず放射過程は陽には計算せず、その代わりに放射強制を模した水平一様な熱強制を  $Q_{rad}$  として与える。

空間方向の離散化は圧力方程式中の鉛直微分に対しては 2 次精度中心差分、その他の項に対しては 4 次精度中心差分を用いて行う。時間積分は、音波に関連する速いモードとそれ以外の遅いモードとに分けて計算するモード別時間分割法<sup>(10)</sup> を用いて行う。音波に関する速いモードは水平方向には陽的に、鉛直方向には陰的に解く HE-VI 法を用い、その他の遅いモードについてはリープフロッグ法に Asselin の時間フィルター<sup>(12)</sup> を組み合わせたスキームを用いて行う。時間フィルターの係数は 0.1 とする。開発した数値モデルは

計算領域は水平方向 20 km、鉛直方向 10 km とし、格子間隔は水平鉛直ともに 100 m とする。水平境界は周期的とし、上下境界で鉛直流なしとする。放射強制を模した水平一様な熱強制は高度 5 km 以下に与え、その大きさは  $-50 \text{ K/day}$  とした<sup>(6)</sup>。この熱強制の大きさは、鉛直一次元モデル計算によって予想された対流強度<sup>(11)</sup> に基づいている。初期の地表気圧は火星の平均値である 6 hPa とし、地表面温度と初期の鉛直温度分布は日中の火星において観測される値に基づき与える。地表面温度は 270 K で一定とし、初期の鉛直温度分布は高度 5 km までは等温位 (245 K)、それより上空では等温度 (220 K) とする。この初期温度場に最大振幅 1 K の温位擾乱を地表付近に与え対流を発生させる。積分時間は 12 時間である。

### 3. 計算結果

Fig.1 に対流領域中層にあたる高度 2450 m における鉛直風の水平断面図を示す。上昇域の幅は数 km スケールで、上昇域と下降域の面積の比はおよそ 1:2 である。これに対応して鉛直風速は上昇域では 10~15 m/sec となるのに対し下降域ではおおむね 5 m/sec 以下であった。同じ設定の 2 次元モデル計算と比較すると、鉛直風速は 2 次元モデル計算の場合よりも小さくなった。上昇流は 7 割程度、下降流は半分以下である (Fig.2)。

Fig.3 に Fig.1 と同時刻のモデルの最下層である高度 50 m における鉛直渦度の水平断面図を示す。この図から水平スケール 200~400 m サイズの孤立した鉛直渦が多数発生していることがわかる。これらの渦は非定常で、その変動の時間スケールのオーダは 10 分程度である。渦は対流領域中層で鉛直風の比較的大きい場所に存在している (Fig.??参照、Fig.4 に  $x = 8450 \text{ m}$  での鉛直渦度、水平風、温位の水平平均からの偏差の鉛直断面を示す。この図には、鉛直スケールが 2 km 程度の孤立した鉛直渦が見られる。渦の周囲での水平風の大きさは数 m/sec であり、渦の中心を境にその符号を変える。渦の中心には正の温位偏差が存在し、その大きさは 2~3 K である。

### 4. 議論

本研究で新たに開発した 3 次元モデルによって計算された対流にともなう上昇流の大きさは、同じ設定の 2 次元モデル計算の結果の 7 割程度であった。大気放射と日変化を考慮した Michaels *et al.* (2004) によるモデル計算<sup>(3)</sup> においても、2 次元モデルの方が 3 次元モデルに比べ鉛直風が大きくなるという指摘

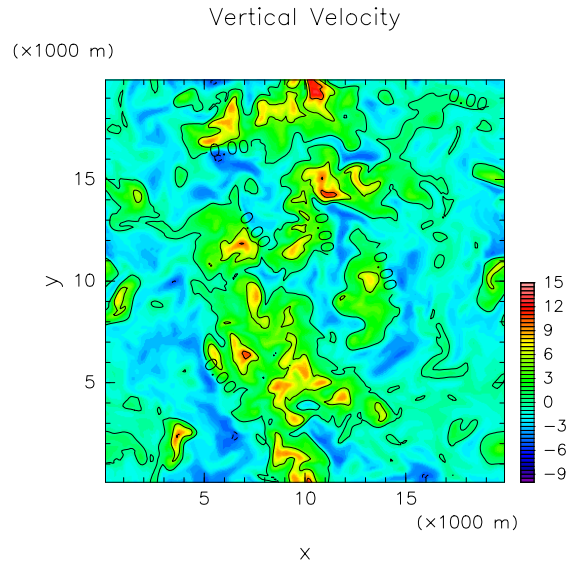


Fig. 1 The horizontal distribution of vertical wind (m/sec) at  $z = 2450 \text{ m}$  height after 12 hours of integration. The contour interval is 5 m/sec.

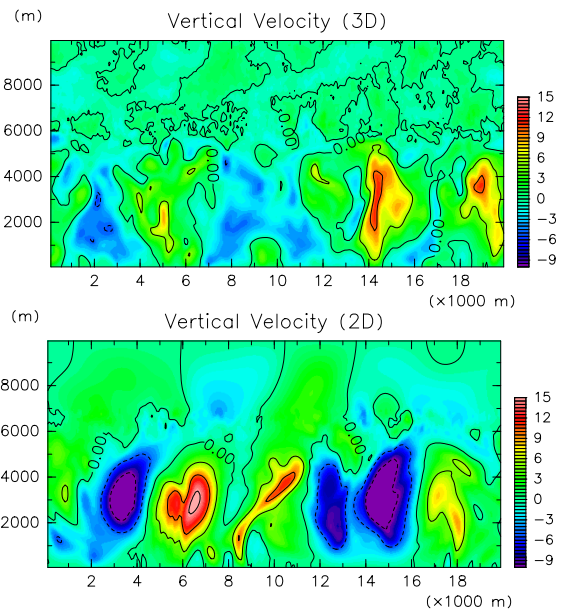


Fig. 2 The vertical cross section of vertical wind field (m/sec) at  $x = 10950 \text{ m}$  after 12 hours of integration (upper panel) and that calculated by two dimensional version of our model with same experimental setup (lower panel). The contour interval in each panel is 5 m/sec.

がなされている。しかし、彼らのモデルと我々のモデルでは熱強制の与え方が異なるため、このような 2 次元モデルと 3 次元モデルの風速の違いを生み出すメカニズムは異なるかもしれない。このメカニズムを明らかにするには、モデルに含まれる様々な物理プロセスおよびパラメータに関する感度実験を丹念に行っていくことが必要であろう。

Fig.3 の結果は、孤立した鉛直渦は背景風が存在しなくても対流運動にともない自然に生成されることを示している。これは現実の火星におけるダストデビル生成メカニズムの考察に対する重要な示唆を与える。孤立した鉛直渦は対流領域中層で鉛直風の強い場所で生じ、渦の中心には正の温位偏差が存在していた。これらのことから、孤立した鉛直渦は何らかの原因でモデル大気下層に形成された弱い渦が、鉛直対流にともなう上昇流の引き延ば

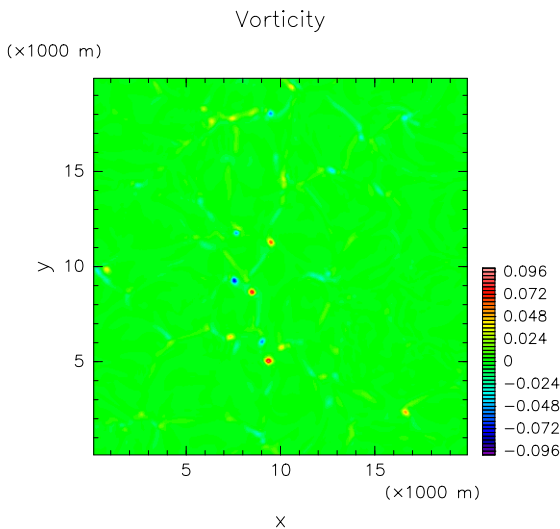


Fig. 3 The horizontal distribution of vertical component of vorticity ( $\text{sec}^{-1}$ ) at  $z = 50$  m height after 12 hours of integration.

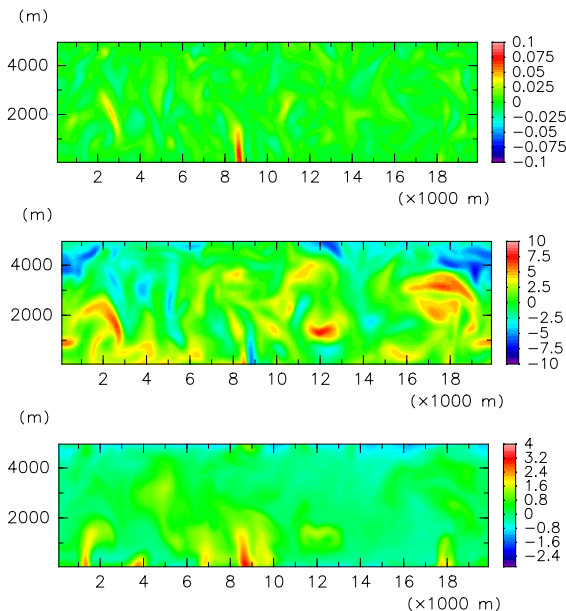


Fig. 4 The vertical cross section of vertical component of vorticity (upper panel,  $\text{sec}^{-1}$ ), horizontal wind normal to the cross section (middle panel, m/sec), and potential temperature deviation from its horizontal mean value (lower panel, K) at  $x = 8450$  m after 12 hours of integration.

しにより強化されたものと考えられる。モデル大気下層の弱い渦の成因については、より詳細な解析を行った上で考察する必要がある。今後はモデルに与える熱的強制をより現実に即したものとし、火星大気の鉛直対流およびそれにともなう渦の様相を調べていく予定である。

謝辞

作図は電腦 Ruby プロジェクト (<http://ruby.gfd-dennou.org/>) において開発されたソフトウェアを用いて行った。数値計算は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙科学企画情報解析センターの NEC SX6 を用いて行った。

参考文献

- (1) Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J., and Copeland, J. H., "A comprehensive meteorological modeling system - RAMS", *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49 (1992), pp. 69–91.
- (2) Rafkin, S. C. R., Haberle, R. M., Michaels, T. I., "The Mars regional atmospheric modeling system: Model description and selected simulations", *Icarus*, 151 (2001), pp. 228–256.
- (3) Michaels, T. I., and Rafkin, S. C. R., "Large-eddy simulation of atmospheric convection on Mars", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130 (2004), pp. 1251–1274.
- (4) Dudhia, J., "A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an atlantic cyclone and cold front", *Mon. Wea. Rev.*, 121 (1993), pp. 1493–1513.
- (5) Toigo, A. D., Richardson, M. I., Ewald, S. P., and Gierasch, P. J., "Numerical Simulation of Martian Dust Devils", *J. Geophys. Res.*, 108 (2003), 5047, doi:10.1029/2002JE002002.
- (6) Odaka, M., Nakajima, K., Takehiro, S., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., "A numerical study of the Martian atmospheric convection with a two dimensional anelastic model", *Earth Planet and Space*, 50 (1998), pp. 431–437.
- (7) Odaka, M., "A numerical simulation of Martian atmospheric convection with a two-dimensional anelastic model: A case of dust-free Mars", *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2001), pp. 895–898.
- (8) Sugiyama, K., Odaka, M., Nakajima, K., and Hayashi, Y.-Y., "Development of a numerical model to investigate the moist convection in Jupiter's atmosphere", *Nagare, Nagare Multimedia 2008*, submitted.
- (9) 杉山耕一朗, 小高正嗣, 山下達也, 中島健介, 林祥介, deepconv 開発グループ, "非静力学モデル deepconv", 地球流体電脳倶楽部 (2008), <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>
- (10) Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, "The simulation of three-dimensional convective storm dynamics", *J. Atmos. Sci.*, 35 (1978), pp. 1070–1096.
- (11) Haberle, R. M., Houben, H. C., Hertenstein, R., and Herdtle, T., "Comparison with Viking Lander and entry data", *J. Atmos. Sci.*, 50 (1993), pp. 1544–1559.
- (12) Asselin, R. A., "Frequency filter for time integrations", *Mon. Wea. Rev.*, 100 (1972), pp. 487–490.