3次元非静力学モデルによる火星大気対流の数値計算

小高 正嗣 (北大 · 理), 杉山 耕一朗, 中島 健介 (九大 · 理), 林 祥介 (神戸大 · 理)

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 繁に観測されるダストデビル(塵旋風)と呼ばれ る μm 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次元非静力 学モデルの開発が進展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次元非静力学モデル RAMS (Pielke et al., 1992) を火星向けに改変し (Rafkin et al., 2001),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 (Michaels, et al., 2004). また, Toigo らは別の 3 次元非静力学 モデルである MM5 (Dudhia, 1993) 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、火星で頻繁に観測されるダス 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 (Toigo, et al., 2003). 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である. そのよう な研究として、我々は過去に非弾性系に基づく2

次元モデルを用いた数値シミュレーションを行っ てきた (Odaka, et al., 1998: Odaka, 2001). 本研 究では杉山ら (2006) によって開発されてきた 2 次元非静力学モデルを基に 3 次元非静力学モデ 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. 特に対流にともなう 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

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 CO₂ のみとする. モデル方程式として 準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmoson, 1978) を用いる. ただし惑星の自転効果は考慮しない.

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

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

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

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

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

ここで,

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

である. u, v, w は速度の各成分, π はエクスナー 関数, θ は温位, T は温度である. これらのうち $\overline{(\cdot)}$ 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 Klemp and Wilhelmoson (1978) によって提案された 1.5 次のクロージャモデルを簡略化した 1 次のクロー ジャモデルを用いて計算する. 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 CO₂ の値を与え, g = 3.72m/sec² 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 Odaka, *et al.* (1998) と同様に一定値 (0.01) とする. Q_{rad} をもたらす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(Klemp and Wilhelmson, 1978)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 (1972)の時間フィルターを組み合わたスキームを 用いて行う.時間フィルターの係数は0.1 とする.

計算領域は水平方向 20 km, 鉛直方向 10 km と し,格子間隔は水平方向に 200 m, 鉛直方向に 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 K/day である.この熱強制の与え方は Odaka et al. (1998)と同様である.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.



図 1: 計算開始後 12 時間後の z = 2450 m にお ける鉛直風の水平断面図.単位は m/sec.

3 計算結果

図1に対流領域中層にあたる高度2450m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10~15m/secとなるのに対し下降域ではおおむね5m/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,上昇流の大きさは同程度であるが,下降流の大きさは2次元モデル計算の場合のおよそ6割程度の値であった(図2).

図3に図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数 100 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 鉛直風の強い場所に存在している(図1参照),図 4 に x = 16500 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 および 4 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,



図 2: 計算開始後 12 時間後の鉛直風の分布. (上 段) x = 16500 m における鉛直断面図. (下段) 同 じ設定の 2 次元モデル計算の結果. 単位はともに m/sec.

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と同程度であっ た.これに対し、Michaels et al. (2004)による大 気放射と日変化を考慮したモデル計算では、2次 元モデルの方が3次元モデルに比べ鉛直風が大き くなると指摘している.我々のモデルと Michaels et al. (2004)のモデルとでは熱的強制の与え方と 空間分解能に違いがあるため、これらを揃えた上 で再度検討する必要がある.

図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



図 3: 計算開始後 12 時間後の z = 50 m におけ る渦度の鉛直成分の水平断面図. 単位は 1/sec.

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

作図は電脳 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.



図 4: 計算開始後 12 時間後の x = 16500 m に おける高度 5 km 以下の鉛直断面図. (上段) 渦度 の鉛直成分. 単位は 1/sec. (中断) 断面に垂直方 向の風速. 単位は m/sec. 紙面の表から裏へ向う 方向を正とする. (下段) 温位の水平平均からの偏 差. 単位は K.

文献

- Asselin, R. A., 1972: Frequency filter for time integrations. Mon. Wea. Rev., 100, 487–490.
- Dudhia, J., 1993: 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**, 1493–1513.
- Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics, J. Atmos. Sci., 35, 1070–1096.
- Michaels, T. I., and Rafkin, S. C. R., 2004: Largeeddy simulation of atmospheric convection on Mars. Q. J. R. Meteorol. Soc., 130, 1251–1274.
- Odaka, M., 2001: A numerical simulation of Martian atmospheric convection with a twodimensional anelastic model: A case of dust-free Mars. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 895–898.
- Odaka, M., Nakajima, K., Takehiro, S., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., 1998: A numerical

study of the Martian atmospheric convection with a two dimensional anelastic model. *Earth Planet and Space*, **50**, 431–437.

- 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., 1992: A comprehensive meteorological modeling system RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69–91.
- Rafkin, S. C. R., Haberle, R. M., Michaels, T. I., 2001: The Mars regional atmospheric modeling system: Model description and selected simulations. *Icarus*, **151**, 228–256.
- 杉山耕一朗,小高正嗣,中島健介,林祥介,deepconv 開発グループ,2006:2次元非静力学モデル deepconv,http://www.gfd-dennou.org/library/ deepconv/,地球流体電脳倶楽部.
- Toigo, A. D., Richardson, M. I., Ewald, S. P., and Gierasch, P. J., 2003: Numerical Simulation of Martian Dust Devils. J. Geophys. Res., 108, 5047, doi:10.1029/2002JE002002.