

火星大気放射対流の数値計算: 対流の風によるダストの巻き上げ

A two-dimensional numerical simulation of Martian atmospheric convection: dust injection due to convective wind

○小高正嗣 (東大数理), 中島健介 (九大理), 石渡正樹 (北大地球環境), 林祥介 (北大理)

Masatsugu ODAKA*, Kensuke NAKAJIMA**, Masaki ISHIWATARI†, Yoshi-Yuki HAYASHI‡

*Graduate School of Mathematical Sciences, University of Tokyo, Tokyo, 153-8914, Japan

**Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka, 812-8581, Japan

†Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan

‡Division of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan

A numerical simulation of possible Martian atmospheric convection driven by diurnally-varying radiative heating is performed with a two-dimensional anelastic model employing radiative process appropriate for clear sky conditions. The simulated convection has kilometer-size circulation cell which extends about 5 km horizontally and 10 km vertically. The values of calculated surface stress produced by the kilometer-size convection frequently exceed the minimum threshold value for raising dust from the surface. This result implies that kilometer-size convection forced by diurnally-varying radiative heating may strongly contribute to the dust injection into the Martian atmosphere.

1. はじめに

火星の地表風の強さは火星大気中へのダストの巻き上げにとって重要である。大循環モデルによる過去の研究では、巻き上げに十分な風速を得るには大量のダストが既に舞上がっていることが必要とされている¹⁾。したがってダストの振舞は自己完結的には解明されてはいない。しかし大気下層には大循環モデルでは表現出来ない熱対流が存在する。その強度が十分強ければダスト巻き上げは容易になるかも知れない。

これまで我々は対流の流れ場を陽に表現する 2 次元モデルを用いて、火星大気における鉛直対流の様子を数値的に調べてきた。境界層モデルに使用されている簡単な赤外放射モデルを用い、地表面温度の日変化を簡単な関数で表現した場合、ダストのない場合の日中時の対流は高度 15 km 付近にまで達し、対流にともなう風の大きさは 20~30 m/sec となることが示された。

上で述べた鉛直対流にともなう風の大きさは対流層の厚さに依存していた。対流の到達高度は日中の地表気温と成層圏温度によってだいたい決まる。したがって対流の強度を評価するためには、地表面温度と成層圏温度を精度よく計算することが重要である。これまで我々が用いてきた地表面温度の与え方と赤外放射モデルは簡単なものであったため、成層圏温度をきちんと計算できているかという点で不安がある。対流の強度を問題とするならば、より洗練された地面熱収支モデルと大気放射モデルを 2 次元モデルに導入してそれを検討する必要がある。

そこで本研究では熱伝導を陽に計算する地面熱収支モデルと吸収線形と吸収の波長依存性を考慮した大気放射モデルを組み込んだ 2 次元対流数値モデルを用いて、ダストのない場合の鉛直対流の様子とその強度を調べることにする。

2. 数値モデル

モデル大気の力学は 2 次元の非弾性方程式系²⁾で表す。惑星の自転効果は考慮しない。モデルの空間格子間隔以下のスケールで生じる乱流拡散は 2 次のクロージャー法³⁾で計算する。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、バルク係数にはモデル大気最下層の大気安定度依存性を考慮する⁴⁾。ただし熱に対する乱流拡散とバルク係数はそれぞれの運動量に対する値に等しいとした。地表面粗度長さは 1 cm である⁵⁾。大気は CO₂ のみで構成されるとし、気体定数、定圧比熱はその値を用いた。

大気放射は CO₂ 15 μ m バンドの赤外放射吸収、4.3, 2.7,

2.0 μ m バンドの太陽放射の近赤外吸収を考慮する。放射伝達は Goody のバンドモデルで計算し、バンドパラメータは Houghton (1986)⁶⁾ の巻末付録の値を使用した。地中温度は熱伝導方程式を用いて計算する。地中物質の密度と熱伝導係数、比熱は Kiffer *et al.* (1977)⁷⁾ の標準モデルの値になった。

モデル大気の計算領域は水平に 51.2 km、鉛直に 20 km とする。水平格子間隔は 100 m、鉛直格子点は高度 100 m 以上では 100 m 毎に置き、高度 100 m 以下には不等間隔に 5 点置く。最下層の水平風は高度約 1.5 m で計算される。境界条件は水平に周期境界条件、下部境界では鉛直風を 0、上部境界は応力無し条件を置く。地中温度の計算領域は日変化表皮深さの 6 倍までとり、地中の鉛直格子点は不等間隔に 10 点置く。大気上端の入射太陽放射量は北半球が夏の北緯 20° の条件に固定する。以上を示した数値モデルのソースコードは <http://www.gfd-dennou.org/arch/deepconv/>⁸⁾ において参照可能である。

初期条件は水平一様温度分布を持つ静止大気とする。初期条件の鉛直温度分布は 2 次元モデルと同じ放射・地面熱収支モデルを持つ鉛直 1 次元放射対流モデルによって計算した LT=06:00 の分布を用いる。数値計算は 3 日間行った。

3. 計算結果

図 1 は計算開始後 3 日目の水平平均した温度と温位の時間変化の様子を示したものである。温位が鉛直に一樣となる対流層の厚さは夜間に形成される温度逆転層を解消すると急激に成長し、最大約 10 km となる。地面付近には不安定な温位構造を持つ熱境界層が形成される。LT=16:00 の対流層の厚さは、同じ日射量条件の下で計算された過去の鉛直 1 次元放射対流モデルの結果⁹⁾ に比べ約 1 km 厚い。これは成層圏への対流ブリュームの貫入が表現されるようになったためである。

図 2 は対流がもっとも活発となる時間帯である LT=14:50 における対流場の様子を表す。計算された対流はその最大空間スケールが鉛直方向に約 10 km、水平方向に数 km となるようなキロメートルサイズの対流である。対流セルの縦横比は 2:1 で、上昇域と下降域の幅はほぼ同じである。鉛直風速は 20 msec⁻¹ を超え、水平風は 10~20 msec⁻¹ 前後の値となる。モデルの最下層である高度 1.5 m においても 10 msec⁻¹ 以上の風が吹く。上昇する対流ブリュームが持つ温位偏差は 2~3K であり、正の温位偏差領域は上昇域中心付近の狭い領域に限られている。下降域で温位偏差が正となる場所では、成層圏まで上昇した正

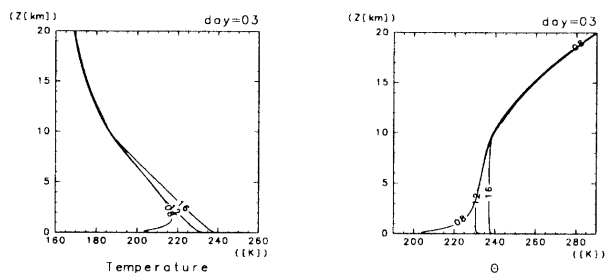


Figure 1: Time development of vertical profile of horizontally averaged temperature (left panel) and potential temperature (right panel) from LT=8:00 to LT=16:00 every 4 hours.

の温位偏差を持つプルームが下方から引続き上昇してくるプルームに押しやられ強制的に下降している。強制的に下降したプルームの断片は対流層内でさらに渦的な運動を示す。この結果、対流層内の混合は非常に効率よく行われる。

対流に伴う風の大きさは、上昇する対流プルームの持つ浮力の自由加速によって説明することができる。重力加速度を g ($= 3.72 \text{ msec}^{-2}$), 対流プルームの持つ温位偏差を $\Delta\theta$ ($\sim 3 \text{ K}$), 平均温位を θ ($\sim 240 \text{ K}$), 対流層の厚さを h ($\sim 10 \text{ km}$) とすると、速度 v は $v \sim (g\Delta\theta h/\theta)^{1/2} \sim 20 \text{ msec}^{-1}$ と見積もられる。

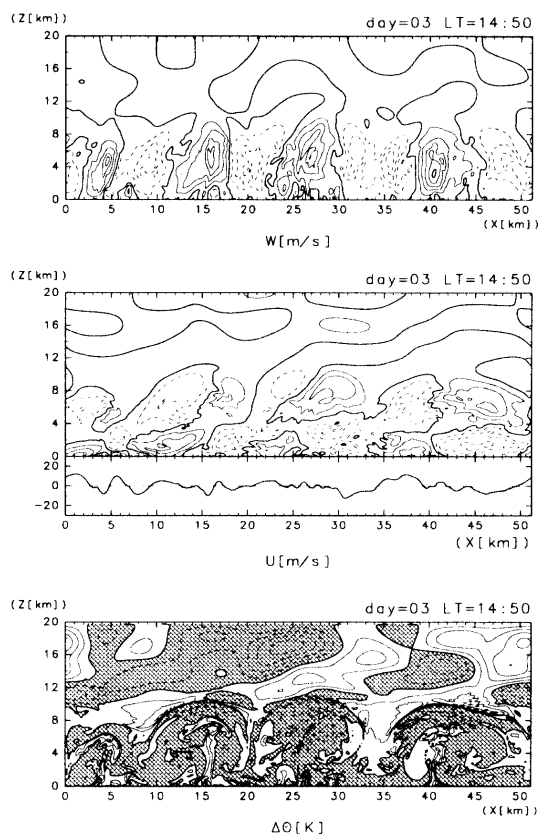


Figure 2: Appearance of convection at LT=14:50. Upper and middle panels show vertical and horizontal wind, respectively (contour interval is 5 m/s). Bottom of the middle panel shows distribution of horizontal wind at the lowest level of the model (1.5 m high). Lower panel shows potential temperature (contour interval is 2 K). Horizontal mean value is subtracted. The areas of negative value are hatched.

高度 1.5 m における水平風により生じる地表摩擦の最大値と平均値、標準偏差の日変化を図 3 に示す。地表摩擦の水平平均値は最大で 0.005 Nm^{-2} 程度である。しかし各点での地表摩

擦の最大値は 0.03 Nm^{-2} に達している。この値は地表からダストを巻き上げるのに必要な地表摩擦の下限值である¹⁰⁾。大気循環モデル (GCM) によって計算されたダストのない場合の地表摩擦の値はダストを地表から巻き上げるのに必要な値の半分以下であることを考えると¹¹⁾、ダスト巻き上げに対するキロメートルサイズの対流の寄与は非常に大きいといえる。

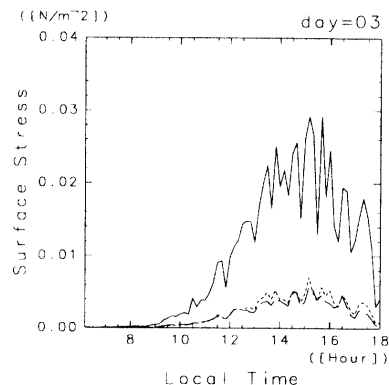


Figure 3: Time development of absolute value of surface stress calculated by horizontal wind velocities at the lowest level of the model from LT=6:00 to LT=18:00. Solid line shows maximum values, broken line shows horizontal mean values, and dotted line shows standard deviations, respectively.

4. まとめ

対流を陽に表現する 2 次元数値モデルを用いて、ダストのない火星大気における放射対流の数値計算を行った。計算の結果から、火星大気の鉛直対流は最大空間スケールが鉛直方向に約 10 km, 水平方向に数 km となるようなキロメートルサイズの対流であることが明らかとなった。対流に伴う風速は 20 m/sec 程度となり、風によって生じる地表摩擦はダスト巻き上げに必要な値の下限值に達する。

キロメートルサイズの対流の風と大規模場の背景風とが共存する場合、地表からのダスト巻き上げは起こりやすくなると考えられる。GCM によって計算されたダストのない場合の大規模場の風速 (高度 1.5 m で約 10 msec^{-1}) と本研究で計算された対流の風との重ね合わせを考慮すると、地表摩擦はダストを巻き上げるのに必要な臨界値を越える (図は略)。これは大気大循環モデルにおけるダスト巻き上げの困難は、キロメートルサイズの対流の寄与を適切に表現できる乱流パラメタリゼーションを用いることにより解決される可能性があることを示唆している。

引用文献

- 1) R.Greeley *et al.*: J.Geophys.Res. **98**(1993)3183.
- 2) Y.Ogura & N.A.Phillips: J.Atmos.Sci. **19**(1962)173.
- 3) J.B.Klemp & R.B.Wilhelmson: J.Atmos.Sci. **35** (1978)1070.
- 4) J.Louis: Bound.-Layer Meteor. **17**(1979)187.
- 5) J.L.Sutton *et al.*: J.Atmos.Sci. **35**(1978)2346.
- 6) J.T.Houghton: *The Physics of Atmosphere*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press(1986)271pp.
- 7) H.H.Kiffer *et al.*: J.Geophys.Res. **82**(1977)4249.
- 8) 中島健介, 小高正嗣: 2 次元非弾性系対流モデル deepconv, <http://www.gfd-dennou.org/arch/deepconv/>, 地球流体電脳倶楽部 (2000).
- 9) J.B.Pollack *et al.*: J.Geophys.Res. **84**(1979)2929.
- 10) R.Greeley & J.D.Iversen: *Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus, and Titan*, Cambridge Univ. Press.(1980)333pp.
- 11) M.M.Joshi *et al.*: J.Geophys.Res. **102**(1997)6511.