

鉛直対流によって励起される火星大気の内重力波

A numerical simulation of internal gravity wave generated by thermal convection in the Martian atmosphere

○小高正嗣 (北大理), 中島健介 (九大理), 倉本圭 (北大理), 林祥介 (北大理)

Masatsugu ODAKA*, Kensuke NAKAJIMA**, Kiyoshi KURAMOTO*, Yoshi-Yuki HAYASHI*

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

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

A numerical simulation is performed by using a two-dimensional anelastic model for clear sky condition to investigate the possible characteristics of internal gravity waves generated by thermal convection in the Martian atmosphere. The results show that the vertical and horizontal wave length of simulated internal gravity wave are 10 km and 10~15 km, respectively. The resultant time series show that the vertical phase velocity are about 10 m/sec. According to the dispersion relationship of internal gravity wave, the vertical group velocity become about several m/sec. The horizontal mean value of "effective vertical diffusion coefficient", which is the vertical diffusion coefficient when the vertical diffusion is only responsible for the heat flux, has the same order of magnitude of that used by the 1D photochemical model. The result suggests that the internal gravity wave generated by thermal convection in the Martian lower atmosphere contributes to the vertical mixing in the Martian middle atmosphere.

1. はじめに

火星大気の主成分である CO_2 は紫外線によって CO と O に光解離する。しかし単純な光化学平衡から CO と O の濃度を見積ると、その値は観測値に比べ 2 桁程度大きくなってしまふことが知られている¹⁾。鉛直 1 次元光化学反応モデルを用いて観測される CO と O の濃度を説明するには、 CO と O から CO_2 を生成する化学反応を促進する H_2O 起源のラジカルと、 H_2O を大気下層から輸送する鉛直渦拡散を考慮しなければならぬ²⁾。鉛直 1 次元モデルにおいて必要とされる渦拡散係数の大きさは、 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^2/\text{sec}$ 程度であると考えられている³⁾。

渦拡散の実体として大気下層から鉛直伝播した波の碎波を考えることができる。本研究ではそのような波の一つとして、大気下層の鉛直対流により励起される内部重力波に注目する。例えば小高 他 (2001)⁴⁾ の 2 次元モデルを用いた数値計算結果には、地表付近で発生した対流プリュームが成層圏へ貫入し、それによって励起される内部重力波の存在を確認することができる。しかし彼らの用いたモデルの鉛直計算領域は内部重力波の伝播の様子を見るには不十分である。さらに彼らの研究対象は地表付近に生じる鉛直対流そのものであったため、鉛直対流により励起される内部重力波の様子はよく調べられていない。

本研究では小高 他 (2001) にて用いられた 2 次元数値モデルの鉛直計算領域を拡張して鉛直対流により励起された内部重力波の伝播を陽に計算し、それにともなう鉛直混合強度を見積もることを目指す。今回の計算では鉛直対流起源の内部重力波の基本的な性質を明らかにするため、火星大気中の放射活性トレーサであるダストの存在は考慮しないことにする。

2. 数値モデル

用いた数値モデルは小高 他 (2001)⁴⁾ によって開発されたものである。モデル大気の力学は 2 次元の非弾性方程式系⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾。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⁸⁾。大気は CO_2 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 CO_2 15 μm バンドの赤外放射吸収、4.3, 2.7,

2.0 μm バンドの太陽放射の近赤外吸収を考慮する。放射伝達には Goody のバンドモデルで計算し、バンドパラメータは Houghton (1986)⁹⁾ 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)¹⁰⁾ 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 50 km とする。水平格子間隔は 200 m、鉛直格子点は高度 200 m 以上では 200 m 毎に置き、高度 200 m 以下には不等間隔に 5 点置く。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。以上に示した数値モデルのソースコードは <http://www.gfd-dennou.org/arch/deepconv/>¹¹⁾ 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 12 時間行なった。

3. 計算結果

図 1 は温位偏差の水平鉛直分布と水平平均温位の鉛直分布、 $x = 20 \text{ km}$ 地点での温位偏差の鉛直分布の時間変化を示したものである。対流層の厚さは午前中は 3~5 km、LT=13:00 以降は約 10 km 前後である。対流層の上にある成層圏領域には、鉛直対流により励起された内部重力波にともなう温位偏差パターンが見られる。内部重力波にともなう温位偏差の振幅は対流が活発になるにつれて大きくなる。しかし温位偏差の空間パターンはあまり変化しない。図 1 から推定される内部重力波の鉛直波長はおおよそ 10 km、水平波長は 10~15 km である。

図 2 は $x = 20 \text{ km}$ 地点における温位偏差の時間高度断面図である。内部重力波は地表付近で発生した対流プリュームの成層圏への貫入によって励起されるため、その位相は鉛直下向きに伝播する。図から推定される鉛直方向の位相速度はおおよそ 10 m/sec である。対流が活発化する午後になると、等位相線の傾きは若干小さくなり、高度 10~40 km 領域には 10 km 以下の鉛直波長を持つ構造が見られるようになる。

図 1, 2 にみられる内部重力波の波長と鉛直位相速度の関係は、内部重力波の分散関係式から導かれる以下の式をおおまか

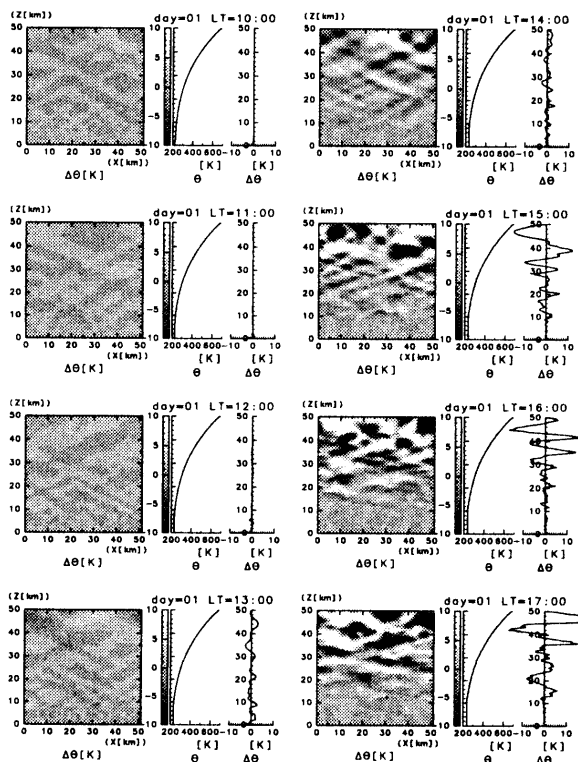


Figure 1: Time development of spatial distribution of potential temperature deviation (left panel), vertical profile of horizontal mean potential temperature (middle panel) and potential temperature deviation from horizontal mean value (right panel) from LT=10:00 to LT=17:00 every 1 hours.

に満たしている。

$$c_z = \frac{\omega}{m} = -\frac{Nk/m}{\sqrt{k^2 + m^2 + 1/4H^2}}$$

ここで ω は振動数, k, m はそれぞれ水平および鉛直波数, N はプラント-パイサラ振動数, H はスケールハイトである. $k \sim m \sim 2\pi/10\text{km}$, $N \sim 10^{-2} \text{ 1/sec}$, $H \sim 7 \text{ km}$ を代入すると, $c_z \sim 12 \text{ m/sec}$ を得る. 同様に分散関係式から鉛直群速度 c_{gz} を見積もると, $c_{gz} \sim 6 \text{ m/sec}$ を得る. この群速度を持つ波がモデル計算領域下端から上端に達するまでの時間は約 2 時間である. 図 2 においても対流が発生して約 2 時間後の LT=8:00~9:00 には, 内部重力波は計算領域上端に達していることがわかる.

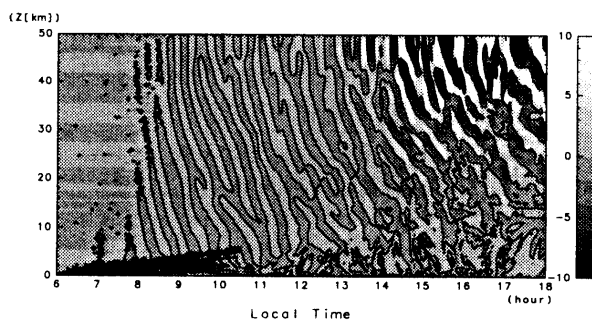


Figure 2: Time-height cross section of potential temperature at $x = 20 \text{ km}$. Horizontal mean value is subtracted. Each contour line show 0 K.

図 3 は乱流拡散係数の水平鉛直分布の時間変化を示したものである. LT=13:00 頃までは, 乱流拡散係数は鉛直混合の活

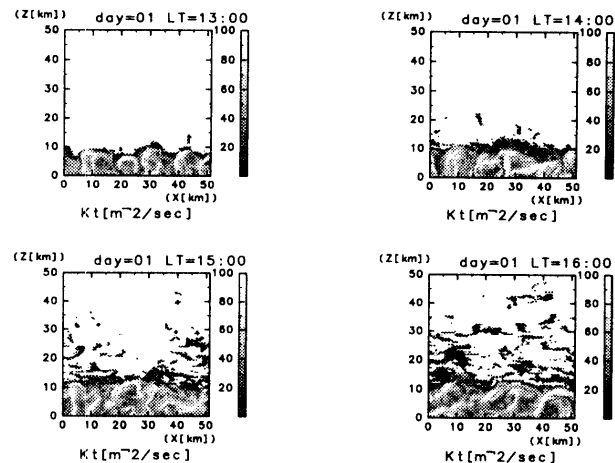


Figure 3: Time development of spatial distribution of turbulent diffusion coefficient from LT=13:00 to LT=16:00.

発な対流層内でのみ値を持つ. 対流が活発になるにつれ, 成層圏の高度 10~40 km 領域においても乱流拡散係数が 0 でない場所が現れる (LT=14:00~16:00). これはモデルの格子間隔のスケールで不安定成層が生じていること, すなわち鉛直伝播した内部重力波が砕波しつつあること示す. 図 2 の同時刻に高度 10~40 km 領域において見られる 10 km 以下の鉛直波長を持つ構造は, この不安定層で生じている乱流的構造を表現していると想像される.

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の鉛直対流によって励起される内部重力波の直接数値計算を行った. 内部重力波の水平波長は 10~15 km, 鉛直波長は約 10 km である. 対流セルの空間スケールが日射の日変化とともに変化するのに対し, 対流によって励起された内部重力波の空間スケールはあまり変化しない.

計算された鉛直風と温位から, 鉛直熱輸送が全て拡散によってなされた場合の実効鉛直拡散係数 (Ke) を見積もることができる. 高度 25 km 以上における Ke の大きさは鉛直 1 次元光化学モデル³⁾において用いられている渦拡散係数と同程度の値であった (図略). 鉛直対流により励起される内部重力波は, 火星中層大気の鉛直混合に大きく寄与していると考えられる.

引用文献

- 1) Yung Y.L. & DeMoire W.B.: Photochemistry of Planetary atmosphere, Oxford(1999)456pp.
- 2) McElroy M.B. & Donahue T.M.: Science **177**(1972) 986.
- 3) Nair *et al.*: Icarus **111**(1994)124.
- 4) 小高正嗣 他 2001; ながれマルチメディア, <http://www.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/>
- 5) Y.Ogura & N.A.Phillips: J.Atmos.Sci. **19**(1962)173.
- 6) J.B.Klemp & R.B.Wilhelmson: J.Atmos.Sci. **35** (1978)1070.
- 7) J.Louis: Bound.-Layer Meteor. **17**(1979)187.
- 8) J.L.Sutton *et al.*: J.Atmos.Sci. **35**(1978)2346.
- 9) J.T.Houghton: The Physics of Atmosphere, 2'nd ed., Cambridge Univ. Press(1986)271pp.
- 10) H.H.Kiffer *et al.*: J.Geophys.Res. **82**(1977)4249.
- 11) 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).