

# 鉛直 1 次元放射拡散火星大気モデル

小高正嗣

2000 年 3 月 1 日

## 目次

1	はじめに	2
2	モデル	5
2.1	拡散係数	5
2.2	放射過程	5
2.3	顕熱輸送	6
2.4	地表面	7
3	離散化	8
3.1	鉛直方向の離散化	8
3.2	時間方向の離散化	9
4	計算手法	9
4.1	計算手順	9
4.2	設定	9
5	計算結果	10
5.1	放射スキームの性能評価	10
5.2	鉛直温度構造と拡散係数の計算	14
6	議論	17
7	参考文献	18

## 1 はじめに

これまで我々は 2 次元モデルを用いて火星大気を想定した対流の数値計算を行なったきた (例えば Odaka *et al.*, 1998). 大気ダストのない条件下で地表面温度に日変化を与えて行なった計算では, 日中の対流層の厚さは 15 km 程度になり鉛直風速は 30 m/sec に達することが示された (図 1; 小高他, 1999, 惑星科学会秋季講演会; 小高他, 1999, 気象学会秋季大会). これらの結果を検討するために, まず過去に行なわれた鉛直 1 次元モデルによる計算結果と比較することを考えた.

鉛直 1 次元モデルを用いた火星大気に関する研究はこれまで数多くなされている. これらの研究はその目的と用いたモデルから 2 つのグループに分けることができるであろう. ひとつ目のグループは大気の鉛直構造を調べることを主な目的としている. いわゆる「放射対流モデル」と呼ばれるモデルを用いた研究が多い. 平衡状態だけではなく日変化を計算した研究もある. 主な研究としては Gierasch and Goody (1967, 1968), Moriyama (1974, 1975, 1976), Pollack *et al.* (1979) がある. もうひとつのグループは地表付近の境界層の構造を調べることを目的としている. 放射過程はもちろんのこと乱流拡散係数の表現にも注意が払われていて, 多くのモデルには乱流クロージャーが組み込まれている (なお先の放射対流平衡モデルでは乱流拡散係数を半経験的に与えたものが多い). 主な研究としては Savijärvi (1991), Haberle *et al.* (1983) がある.

我々の 2 次元計算ともっともよく似た設定を与えて計算を行なったのは Gierasch and Goody (1968) である (以下 GG1968 と略す). 彼らはダストのない条件下での気温の日変化の様子を調べている. その他の研究ではダストによる放射加熱の影響が考慮されている. GG1968 の標準実験の結果を図 2 に示す. 赤道が太陽直下点にあるときの条件を与えた場合, 日中の圏界面高度は最大で 16 km となり, 対流をパラメタライズした鉛直拡散係数は  $\sim 5 \times 10^4$  m<sup>2</sup>/sec になる (図 3).

しかし我々の 2 次元モデルと GG1968 モデルでは物理過程の表現方法が異っている. したがってお互いの結果を単純に比較することは難しい. 2 次元モデルと比較すべき 1 次元モデルは, 物理過程の表現ができるだけ共通であることが望まれる. そこで我々の 2 次元モデルから鉛直 1 次元モデルを作成し, 日変化を与えた場合の鉛直温度構造と鉛直拡散係数を計算することにする. これにより物理過程の違いによる影響と, 2 次元と 1 次元との相違点と類似点を明らかにすることが期待できる.

以下では数理モデルの解説を第 2 節で行ない, それらの離散化と計算設定については第 3 節述べる. 第 4 節では計算手順と計算設定について説明する. 計算結果は第 5 節に示し, 第 6 節では得られた結果についての議論と今後の課題についてまとめる.

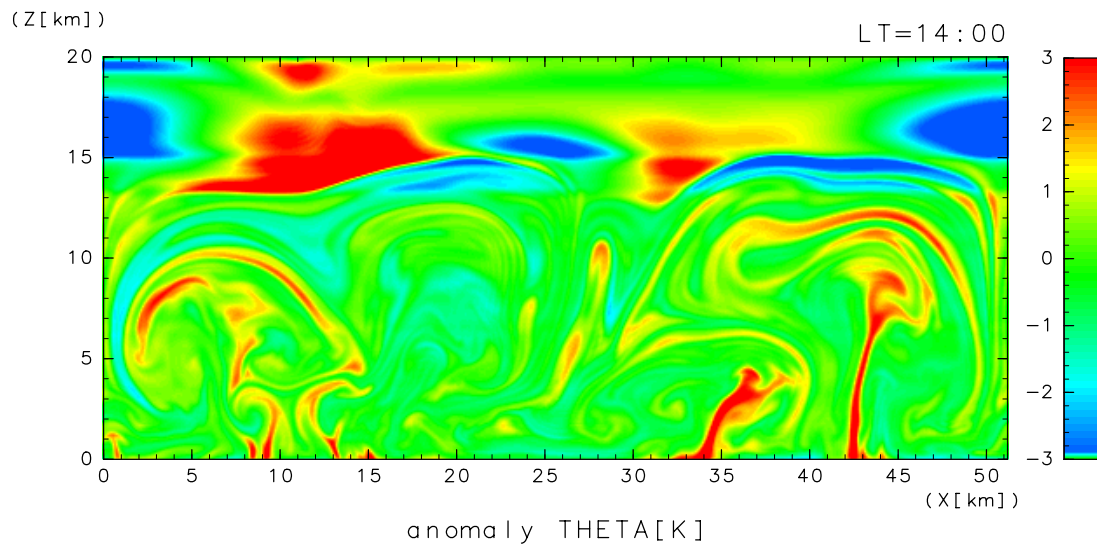
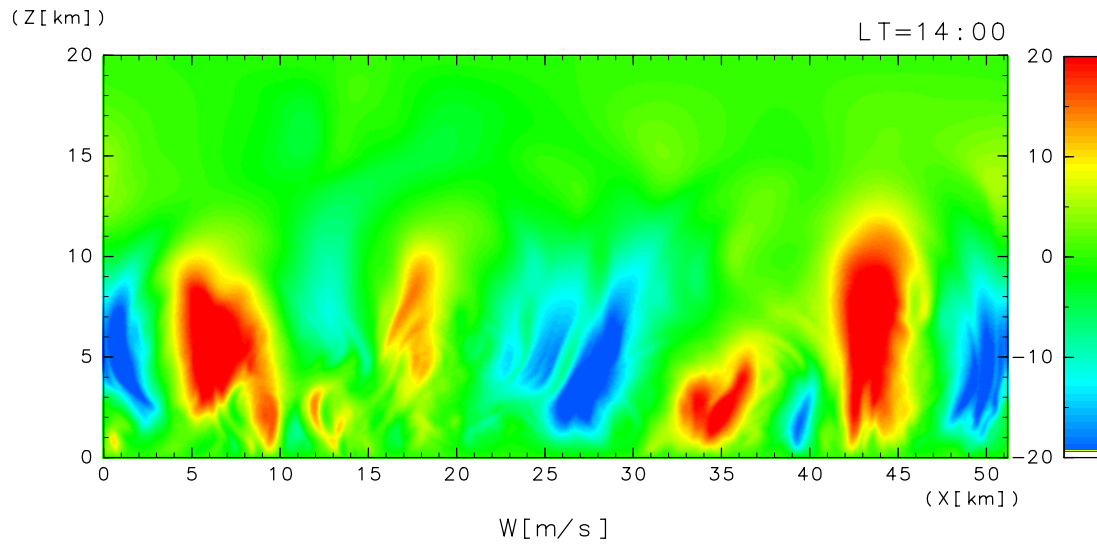


図 1: 2 次元モデルを用いた対流計算の結果. LT=14:00 の場合. (上) 鉛直風, 単位は m/sec  
(下) 水平平均からの温位偏差, 単位 K.

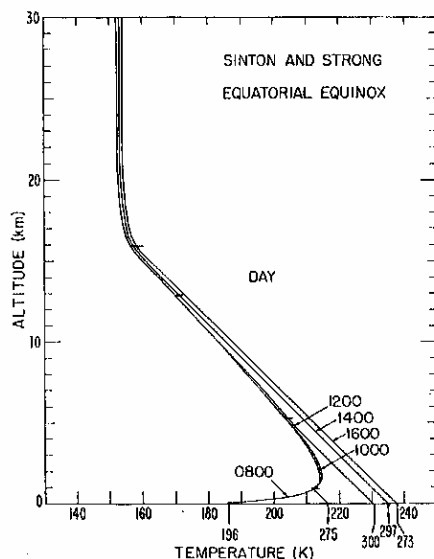


FIG. 7. DAYTIME TEMPERATURE PROFILES FOR THE EQUATORIAL EQUINOX. Soil properties correspond to Sinton and Strong's data in this and all subsequent figures. Horizontal dashes on the curves mark the tropopause height,  $z_t$ . Ground temperatures are indicated on the tag below each curve; notice the large temperature changes across the boundary layer.

図 2: GG1968 による鉛直温度構造の日変化. 赤道太陽直下の条件. 図中の数字は時刻を表す. 横軸下方に記された数字は地表面温度である. [Gierasch and Goody 1968, 図 7 より.]

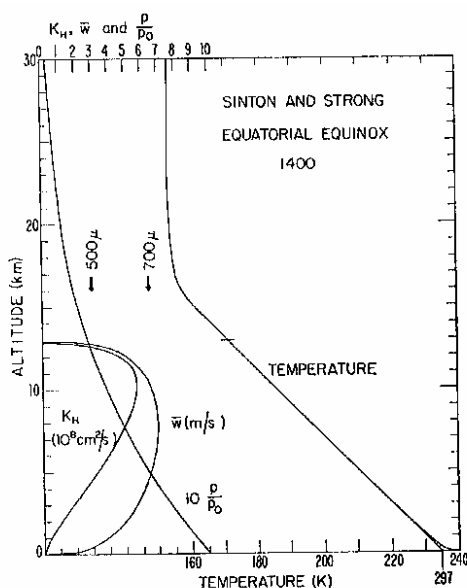


FIG. 9. THE INTENSITY OF THERMAL CONVECTION. Fluctuation winds  $\bar{W}$ , eddy diffusivity  $K_H$ , pressure  $p$ , and the first correction to temperatures  $T_1$ , during the early afternoon of the day shown in Figs. 7 and 8. The size of particles which can be supported by a given  $\bar{W}$  is indicated by arrows.  $T_1$  is shown as a broken line near the ground.

図 3: GG1968 による LT=14:00 の温度構造と鉛直拡散係数の分布. [Gierasch and Goody 1968, 図 9 より.]

## 2 モデル

基礎方程式は以下の式である.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right). \quad (1)$$

ここで  $\theta$  は温位,  $T$  は温度,  $K_h$  は鉛直拡散係数,  $Q$  は放射による単位体積あたりの加熱率,  $c_p$  は定圧比熱である. なお大気は理想気体であることを仮定している.

さらに大気は静水圧平衡にあるとする.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g. \quad (2)$$

### 2.1 拡散係数

拡散係数は Klemp and Wilhelmson (1978) のパラメタリゼーションを 1 次元化したものを用いる<sup>1</sup>.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{g}{\theta} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - \frac{0.2}{l} \varepsilon^{3/2} \quad (3)$$

$$K_h = 0.2 \sqrt{\varepsilon} l \quad (4)$$

ここで  $l$  は混合距離で, ここではモデルの格子間隔を与える.

比較のため Gierash and Goody (1968) で用いられた形式でも計算を行なう.

$$K_h = k z^2 \sqrt{\left| \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|}. \quad (5)$$

ここで  $k = 1.32$  である (Priestley, 1959).

### 2.2 放射過程

放射による加熱/冷却項  $Q$  は以下のように表される.

$$Q = -\frac{\partial}{\partial z} (F_{net,IR} + F_{net,S}). \quad (6)$$

<sup>1</sup>現時点ではまだ実装できていない

ここで  $F_{net,IR}$  は正味の長波放射フラックス,  $F_{net,S}$  は正味の短波放射フラックスである. 以下では大気中における短波放射の吸収はないと仮定する.

長波放射は  $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$  バンドの赤外放射のみを考慮する. 上向き及び下向き放射  $F_{IR}^\uparrow, F_{IR}^\downarrow$  は以下のように計算する (Pollack *et al.*, 1981; Ye *et al.*, 1990).

$$F_{net,IR} = F_{IR}^\uparrow - F_{IR}^\downarrow, \quad (7)$$

$$F_{IR}^\uparrow(p) = 2\pi \left\{ \frac{\sigma T_g^4}{2\pi} - 0.488 \int_{B(p_s)}^{B(p)} E(p, p') dB(p') \right\}, \quad (8)$$

$$F_{IR}^\downarrow(p) = 0.488 \cdot 2\pi \cdot \left\{ B(p_t) E(p_t, p) - \int_{B(p)}^{B(p_t)} E(p', p) dB(p') \right\}, \quad (9)$$

ここで  $T_g$  は地表面温度,  $p_s, p_t$  はそれぞれ地表とモデル大気上端の気圧,  $\sigma$  はボルツマン定数,  $B$  は波長 15 $\mu\text{m}$  におけるプランク関数の値である.  $E(p, p')$  は気圧  $p, p'$  間における  $\text{CO}_2$  15 $\mu\text{m}$  バンドの等価幅で, 光路長  $u(p, p')$  を用いて以下のように表現される.

$$E(p, p') = 54.4 \left( \bar{T}/T_0 \right)^{0.879} \cdot \ln \left[ 1 + 0.153 \left( \bar{T}/T_0 \right)^{-0.256} u(p, p')^{0.566} \bar{p}^{0.323} \right], \quad (10)$$

$$u(p, p') \equiv \int_p^{p'} \frac{dp}{g}. \quad (11)$$

ただし  $T_0$  は参照温度 (200K),  $\bar{p}, \bar{T}$  は圧力  $p, p'$  間において高度平均した圧力と温度である.

### 2.3 顕熱輸送

地表面からの顕熱フラックス  $H$  の評価は Louis (1979) のパラメタリゼーションを用いる.

$$H = \rho c_p C_d |U| (T_g - T_{z=0}). \quad (12)$$

$$C_d = \begin{cases} C_{d0} \left( 1 - \frac{b \text{Ri}_B}{1+c|\text{Ri}_B|^{1/2}} \right), & \text{Ri}_B < 0 \\ C_{d0} \frac{1}{(1+b'\text{Ri}_B)^2}, & \text{Ri}_B \geq 0 \end{cases}$$

$$C_{d0} = \left( \frac{k}{\ln(z/z_0)} \right)^2, \quad b = 9.4, \quad b' = 4.7, \quad c = 69.5 C_d \left( \frac{z}{z_0} \right)^{1/2},$$

$$\text{Ri}_B \equiv \frac{gz(\theta_s - \theta_{z=0})}{\theta u(z)^2}.$$

地表風速は 10 m/sec に固定する.

## 2.4 地表面

地表面の温度  $T_g$  は境界条件とし, 観測される日変化を適当に表現するように与える.

$$T_g = 180 + 100 \cdot \max[\sin \Omega t, 0]. \quad (13)$$

ここで  $\Omega = 2\pi/1$  日である.

### 3 離散化

#### 3.1 鉛直方向の離散化

鉛直方向の離散化にローレンツ格子を用いる。すなわち鉛直座標, 熱フラックスを整数格子点におき, 密度, 温位, 温度, 拡散係数 (乱流エネルギー) は半整数格子点に置く。整数格子点間隔を  $\Delta z_{i+\frac{1}{2}} \equiv z_i - z_{i-1}$ , 半整数格子点間隔を  $\Delta z_i \equiv z_{i+\frac{1}{2}} - z_{i-\frac{1}{2}}$  と定義する。

$$\frac{\partial \theta_{i+\frac{1}{2}}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}} c_p T_{i+\frac{1}{2}}} Q_{i+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}}} \frac{F_{turb,i+1} - F_{turb,i}}{\Delta z_{i+\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

$$F_{turb,i} = \rho_i K_{h,i} \frac{\theta_{i+\frac{1}{2}} - \theta_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta z_i}, \quad (15)$$

$$K_{h,i} = \frac{K_{h,i+\frac{1}{2}} + K_{h,i-\frac{1}{2}}}{2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{i+\frac{1}{2}}}{\partial t} = -\frac{g}{\theta_{i+\frac{1}{2}}} K_{h,i+\frac{1}{2}} \frac{\theta_{i+\frac{3}{2}} - \theta_{i-\frac{1}{2}}}{2\Delta z_{i+\frac{1}{2}}} + \frac{F_{\varepsilon,i+1} - F_{\varepsilon,i}}{\Delta z_{i+\frac{1}{2}}} - \frac{0.2}{l} \varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^{3/2}, \quad (17)$$

$$F_{\varepsilon,i} = K_{h,i} \frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta z_i}, \quad (18)$$

$$K_{h,i+\frac{1}{2}} = 0.2 \sqrt{\varepsilon_{1+\frac{1}{2}}} \text{MAX}(\Delta z, z), \quad (19)$$

$$Q_{i+\frac{1}{2}} = -\frac{1}{\Delta z} [F_{net,IR,i+1} - F_{net,IR,i}] - \frac{1}{\Delta z} [F_{net,S,i+1} - F_{net,S,i}], \quad (20)$$

$$F_{net,IR,i} = F_{IR,i}^{\uparrow} - F_{IR,i}^{\downarrow}, \quad (21)$$

$$F_{IR,i}^{\uparrow} = 2\pi \left\{ \frac{\sigma T_g^4}{2\pi} - 0.488 \sum_{n=1}^i E(p_i, p_{n-1}) [B(p_n) - B(p_{n-1})] \right\}, \quad (22)$$

$$F_{IR,i}^{\downarrow} = 0.488 \cdot 2\pi \cdot \left\{ B(p_N) E(p_N, p_i) - \sum_{n=i+1}^N E(p_n, p_i) [B(p_n) - B(p_{n-1})] \right\}, \quad (23)$$

$$B(p_n) = \sigma T_n^4, \quad (24)$$

$$E(p_i, p_j) = 54.4 \left( \bar{T}_{ij} / T_0 \right)^{0.879} \cdot \ln \left[ 1 + 0.153 \left( \bar{T} / T_0 \right)^{-0.256} u(p_i, p_j)^{0.566} \bar{p}_{ij}^{0.323} \right], \quad (25)$$

$$u(p_i, p_j) = [p_j - p_i] / g, \quad (26)$$

$$\bar{T}_{ij} = \sum_{n=i+\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}} T_n \Delta z_n / |z_j - z_i|, \quad (27)$$

$$\bar{p}_{ij} = \sum_{n=i+\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}} p_n \Delta z_n / |z_j - z_i|, \quad (28)$$

$$H = \rho_{\frac{1}{2}} c_p C_d |U| (T_g - \theta_{\frac{1}{2}}) \quad (29)$$



### 3.2 時間方向の離散化

時間方向の離散化は前進差分で行なう。ここで時刻  $n\Delta t$  における物理量  $A$  の値を  $A^n$  と表す。放射項については陽解法で、拡散項については陰解法 (Crank-Nicolson 法) で解く<sup>2</sup>。

$$\theta_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \theta_{i+\frac{1}{2}}^n + \Delta t \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}}^n c_p T_{i+\frac{1}{2}}^n Q_{i+\frac{1}{2}}^n} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}} \frac{F_{turb,i+1}^{n+1} - F_{turb,i}^{n+1}}{\Delta z_{i+\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\rho_{i+\frac{1}{2}}^n} \frac{F_{turb,i+1}^n - F_{turb,i}^n}{\Delta z_{i+\frac{1}{2}}} \right] \right\}. \quad (30)$$

## 4 計算手法

### 4.1 計算手順

地表気圧, 各種物理定数 (比熱, 重力加速度, 気体定数) はパラメータとして与える。計算は以下の手順で行なう。

1. 適当な温度 (温位) 分布を初期条件として与える。
2. 状態方程式と静水圧平衡の式 (2) を組合せ, 密度と圧力の鉛直分布を計算する。
3. (1) 式を放射加熱/冷却の寄与だけを用いて, 温度 (温位) 分布の仮値を求める。
4. 温度 (温位) 分布の仮値から鉛直拡散係数を計算する。
5. (1) 式の拡散項の計算を行なう。
6. 2. に戻る (1) 式の拡散項の計算を行なう。

### 4.2 設定

- 大気は CO<sub>2</sub> のみで構成されるとする。物性定数はその値にする。
- 計算領域は高度 50 km までとる。鉛直格子間隔は 500m, 時間格子間隔は 1 分にとる。
- 計算は前日との温度差が 0.2 K 程度になったところまで行なう。計算モデル時間はおよそ 150 日前後である。

<sup>2</sup>Crank-Nicolson 法については別紙解説を参照のこと

## 5 計算結果

### 5.1 放射スキームの性能評価

本計算の前に放射スキームの基本的な性質を理解するために、適当な温度分布を与えて放射フラックスの計算を行なった。

最初に等温大気を与えて放射フラックスの計算を行なった。地表面、大気温度ともに 220 K 一定とする。このときの放射フラックスの分布を図 4 に示す。これを見ると計算領域は高度 50 km と有限であるにもかかわらず、モデル上端での下向き放射フラックスが 0 になっている。これは (9) の定式化を用いると、モデル大気上端では

$$F_{IR}^{\downarrow}(p_t) = 0.488 \cdot 2\pi \cdot B(p_t)E(p_t, p_t) = 0,$$

となってしまうからである。モデル大気上端は有限高度で終わっているのに、本来ならばそれよりも上空の寄与を考慮しなければならないはずである。よって (9) 式は

$$F_{IR}^{\downarrow}(p) = 0.488 \cdot 2\pi \cdot \left\{ B(0)E(0, p) - \int_{B(p)}^{B(p_t)} E(p', p) dB(p') \right\}, \quad (31)$$

としなくてはならない。改良したスキームで同様の計算を行なったのが図 5 である。ただしモデル大気上端より上空では等温を仮定した。値にして数  $\text{W}/\text{m}^2$  の違いではあるが、加熱率の計算を行なう場合この差は無視できない。モデル大気上端に近づくにつれ冷却率が指数的に増大してしまうからである。

次に地表気温は 220 K、温度減率は  $-2.5 \text{ K}/\text{km}$ 、 $-150 \text{ K}$  となった高度より上空では等温という温度分布を与える<sup>3</sup>。この場合に得られる放射フラックスの分布は図 6 である。この図をよく見ると上向き放射フラックスの値がある高度 ( $\sim 30 \text{ km}$ ) よりも上空で増加に転じていることがわかる。これはたとえば地面付近から高度 30 km までに吸収される放射量よりも、高度 50 km までに吸収される放射量の方が少ない、ということを示している。明らかにこれは物理的におかしな振舞いである。

じつはこの原因は等価幅のモデル化 (10) 式にある。様々な高度における等価幅  $E(z, z')$  の分布を計算してみると (図 7)、どの高度の等価幅もそれぞれ値は異なるがある高度から上空で値が減少している。これらの値は本来ならある高度以上ではほぼ一定とならなければならない。物理的には  $E(z, z') = E(z'/z)$  であるから  $z' < z$  のときの値もその影響を受けてしまい、 $E(10\text{km}, 0\text{km}) > E(40\text{km}, 0\text{km})$  などということが起こってしまう。

この問題を解決するため等価幅の値がある高度より上空で減少しないように計算方法を工夫した。具体的には  $z' > z$  のときの等価幅を高度の低い方から計算し、あるところで最大

<sup>3</sup>この温度分布は「火星標準大気構造」と呼ばれているらしい (Savijärvi 1991a 参照)

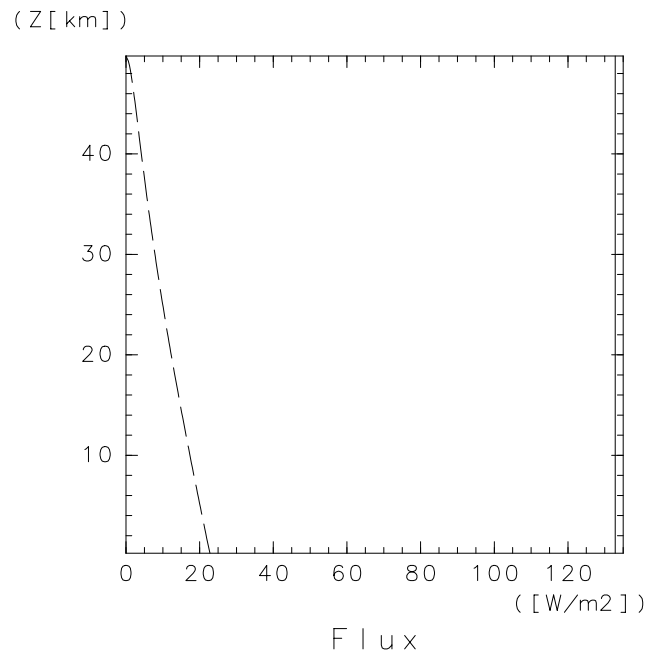


図 4: 等温大気を与えた場合の放射フラックスの分布 (単位  $\text{W}/\text{m}^2$ ). 実線は上向き放射フラックス, 破線は下向き放射フラックス.

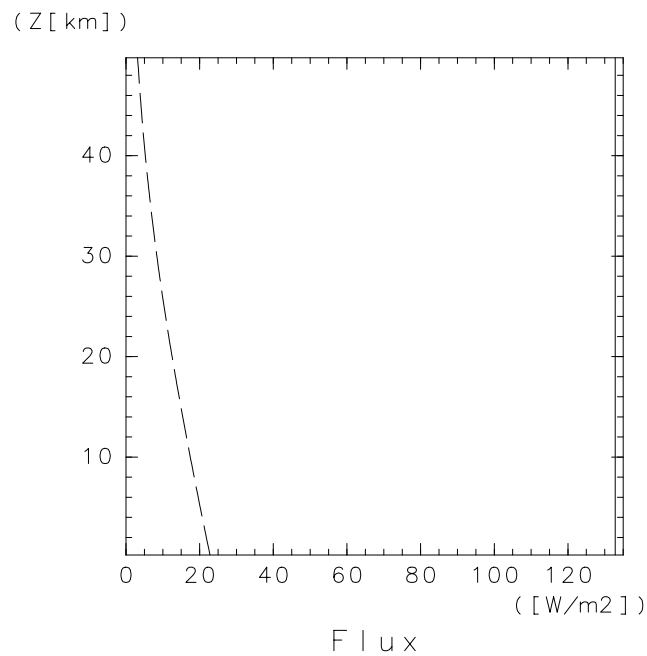


図 5: 等温大気を与えた場合の放射フラックスの分布 (単位  $\text{W}/\text{m}^2$ ). 下向き放射を補正した場合.

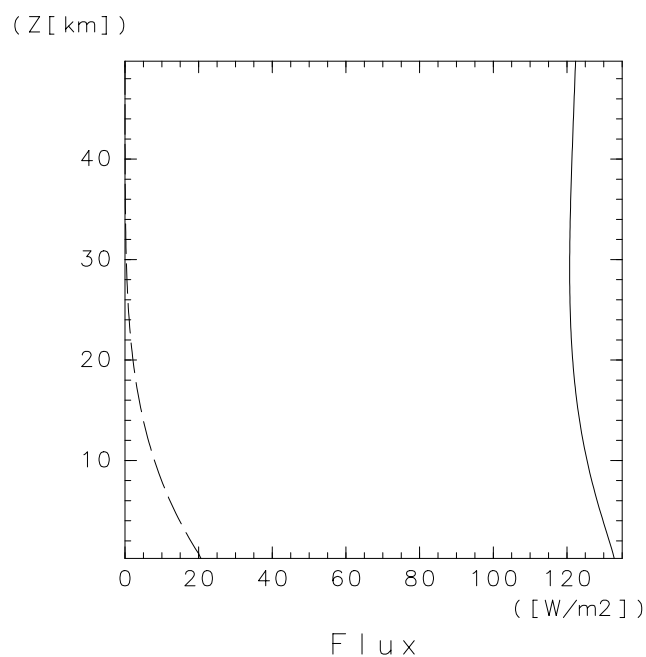


図 6: 「火星標準大気構造」を与えた場合の放射フラックスの分布 (単位  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

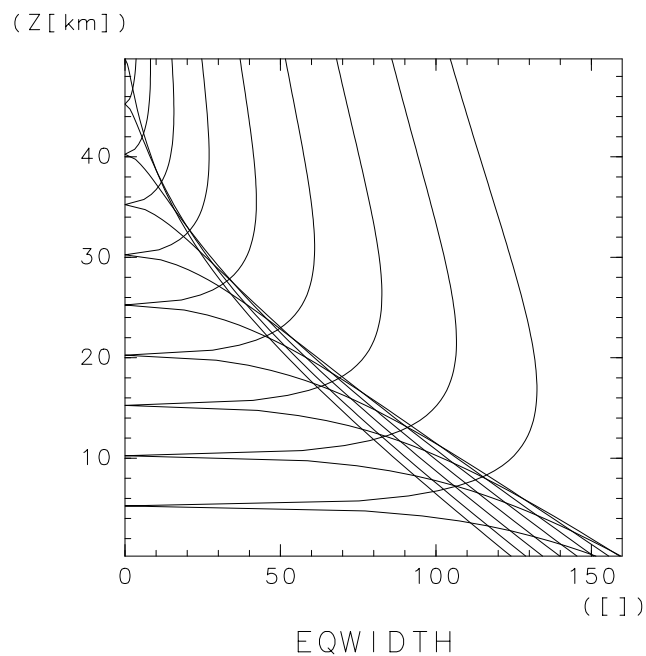


図 7: 等価幅  $E(z, z')$  の分布.  $z$  の値は高度 5 km から 5 km おきにとった.

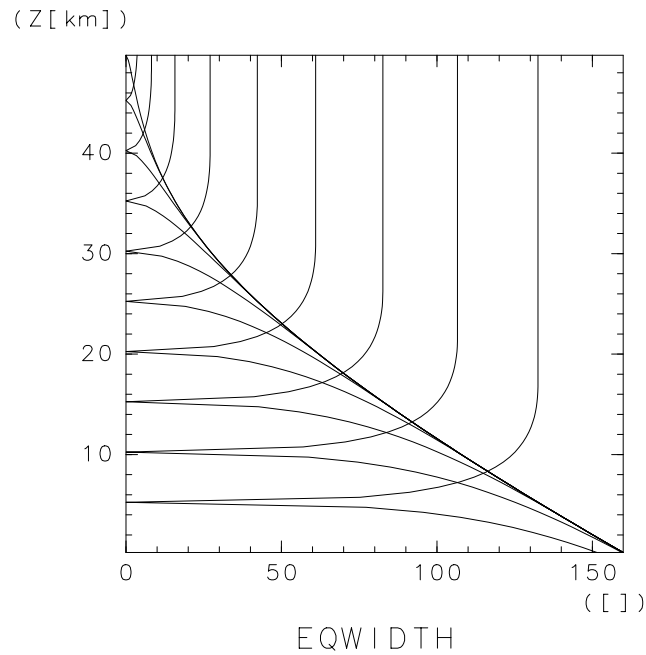


図 8: 修正後の等価幅  $E(z, z')$  の分布.  $z$  の値は高度 5 km から 5 km おきにとった.

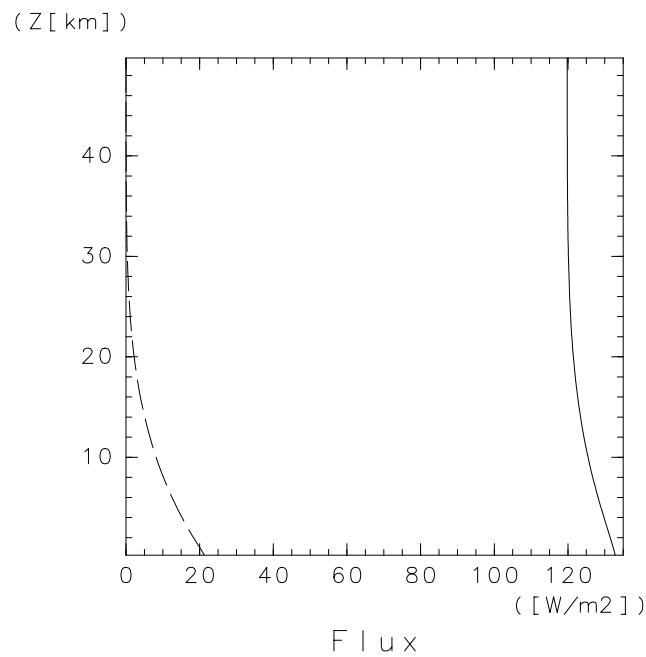


図 9: 等価幅を修正し, 「火星標準大気構造」を与えた場合の放射フラックスの分布 (単位  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

値となったらそれより上空では一定値とする. このときの等価幅  $E(z, z')$  の分布が図 8 である. これを用いて再度「火星標準大気構造」を与えて計算した放射フラックスの分布が図 9 である. 上向き放射フラックスの値は高度 30 km 以上でほぼ一定となり, 高度とともに増加し出すようなことは起こらない.

以下の計算は放射スキームにこの節で述べた改良を施して行なうことにする.

## 5.2 鉛直温度構造と拡散係数の計算

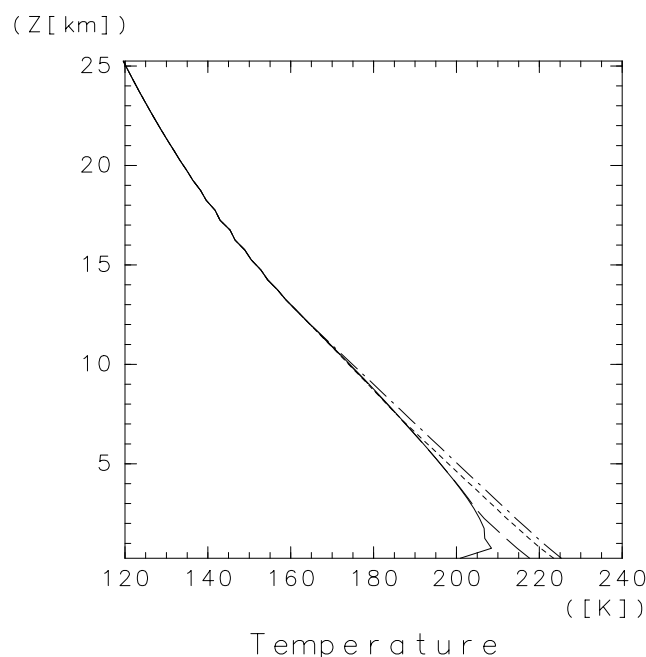


図 10: 高度 25 km 以下における鉛直温度構造の日変化. LT=10:00 から 2 時間毎の結果. 実線, 破線, 点線, 一点鎖線の順に時間が経過している.

高度 25 km 以下の鉛直温度構造の日変化の様子を図 10, 図 11 に示す. 対流層は LT=11:00 頃から現れ, 時間とともにその厚さを増やしていく. 鉛直拡散係数が値を持つ領域を対流層とすると, その厚さは LT=17:00 頃に最大となりその値は 13 km 程度となる. 鉛直拡散係数そのものの大きさは LT=16:00 に最大となり,  $10^5 \text{ m}^2/\text{sec}$  のオーダーに達する (図 12).

日中時の正味放射フラックス分布の変化を示したのが図 13 である. これより日中大気中に吸収される正味の放射フラックスは  $10 \sim 20 \text{ W/m}^2$  である. 地表からの熱フラックスの日変化は図 14 に示した. 熱フラックスがもっとも大きくなるのは LT=10:00 頃に  $15 \text{ W/m}^2$  に達する.

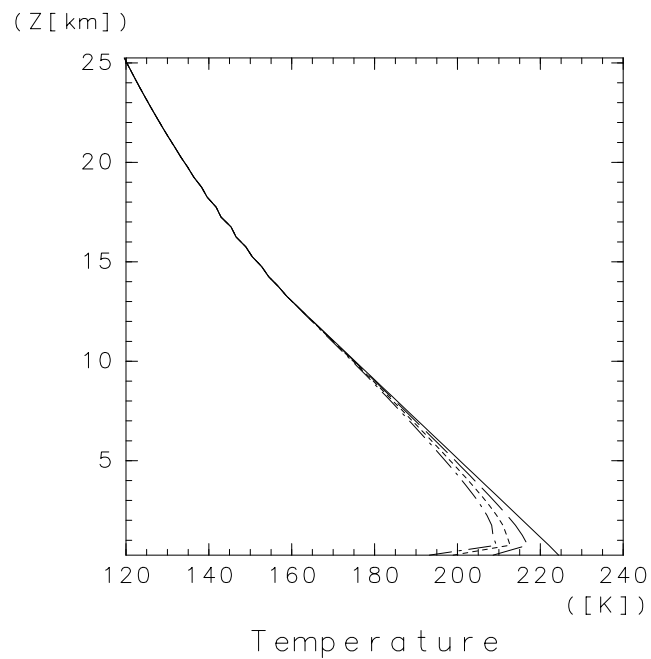


図 11: 高度 25 km 以下における鉛直温度構造の日変化. LT=18:00 から 4 時間毎の結果. 実線, 破線, 点線, 一点鎖線の順に時間が経過している.

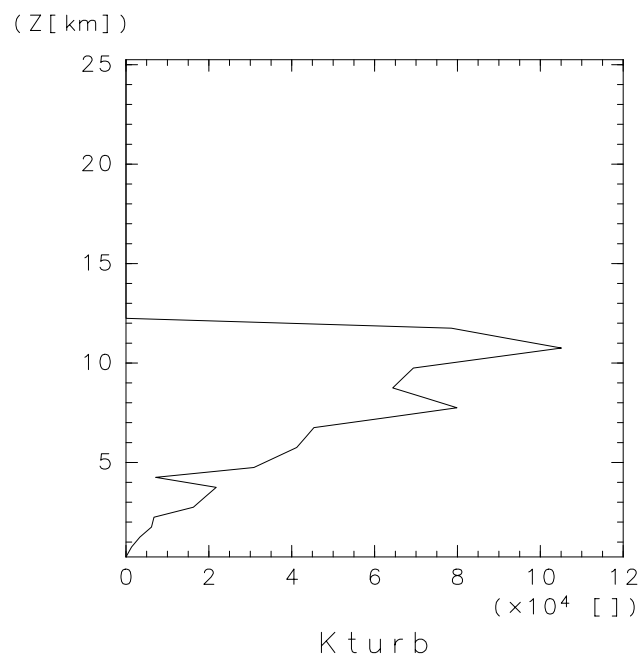


図 12: LT=16:00 における鉛直拡散係数の高度分布.

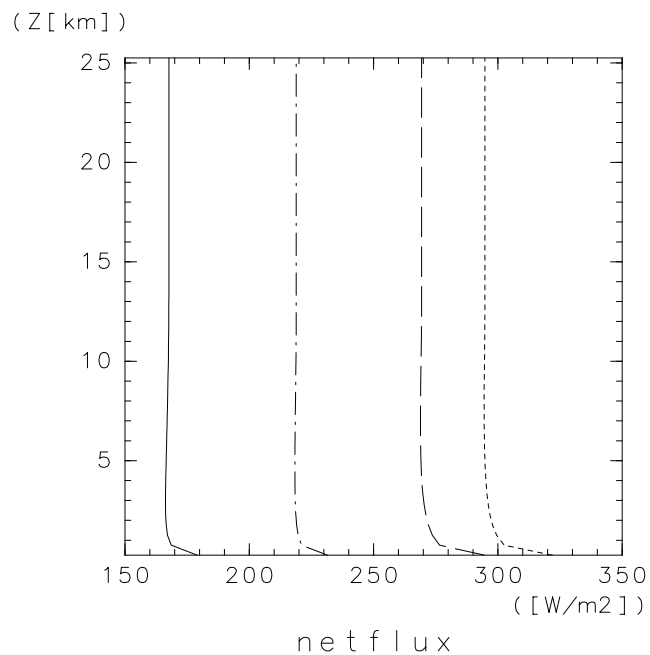


図 13: 高度 25 km 以下における正味放射フラックス鉛直分布の日変化. LT=10:00 から 2 時間毎の結果. 実線, 破線, 点線, 一点鎖線の順に時間が経過している.

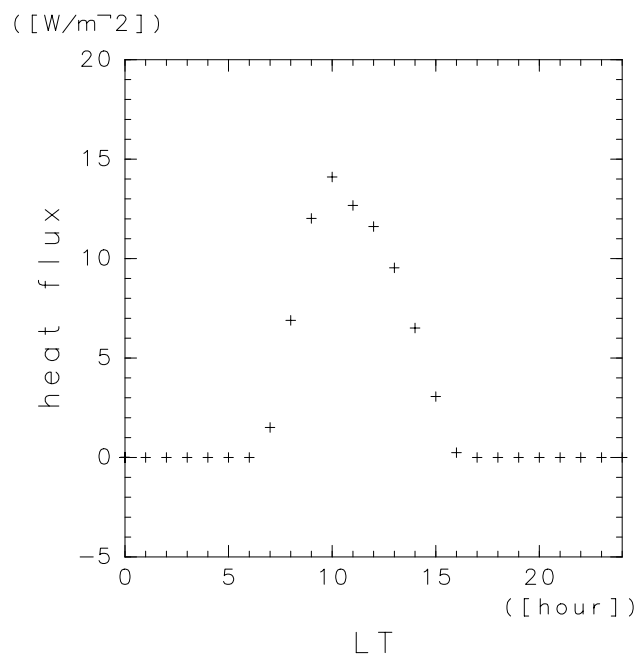


図 14: 地表からの熱フラックスの日変化. 1 時間毎に示してある.



## 6 議論

全節で示した鉛直温度構造と拡散係数の計算結果を GG1968 のそれと比較してみよう. まず全体に GG1968 に比べて気温が低く, とくに成層圏での差が大きい. GG 1968 では高度 18 km 以上では 150 K 程度の一定値となるが, 図 10 では高度 25 km で 120 K まで下がっている. さらに上空の高度 50 km 付近では 100 K まで下がる. この違いはおそらく用いた放射スキームの違いが原因であると考えられる. しかしスキームのどの部分にその主要な原因があるかはまだよく調べていない.

次に日中時の地表気温は GG1968 よりも 10 K ほど低い. これを反映して日中の圏界面高度も 2 km ほど低くなっている ( $10\text{K}/\Gamma \approx 2\text{ km}$ ). この様子は GG1968 において地表からの熱フラックスを半分にした場合の結果とよく似ている (図 15).

図 13, 図 14 から正味の放射加熱と熱フラックスのオーダーは同程度である. したがって熱フラックスの変化は実現される大気構造にそこそこ影響を与えそうである. 図 15 に示した GG1968 の結果からも間接的に支持される.

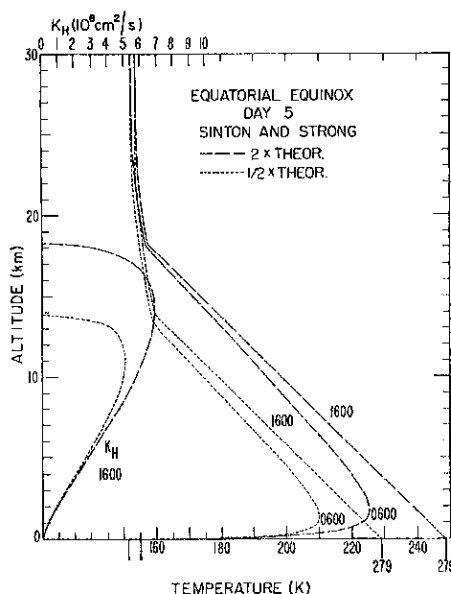


FIG. 12. TEMPERATURE PROFILES CORRESPONDING TO FIG. 11.

図 15: GG1968 による鉛直温度構造の日変化. 点線が熱フラックスを半分にした場合で, 実線は熱フラックスを倍にした場合. 図中の数字は時刻を表す. 横軸下方に記された数字は地表面温度である. [Gierasch and Goody 1968, 図 12 より.]

## 7 参考文献

- Gierasch, P., and Goody, R.M. 1967: An approximate calculation of radiative heating and radiative equilibrium in the Martian atmosphere. *Planet. Space Sci.*, **15**, 1465–1477.
- Gierasch, P., and Goody, R.M. 1968: A study of the thermal and dynamical structure of the Martian lower atmosphere. *Planet. Space Sci.*, **16**, 615–636.
- Haberle, R.M., Houben, H.C., Hertenstein, R., and Herdtle, T. 1993: A boundary-layer model for Mars: comparison with Viking lander and entry data. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1544–1559.
- Moriyama, S. 1974: Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere. I. On infrared cooling. *J. Meteor. Soc. Japan*, *52*, 457–462.
- Moriyama, S. 1975: Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere. II. Heating due to absorption of the visible solar radiation and importance of radiative effects of dust on the Martian meteorological phenomena. *J. Meteor. Soc. Japan*, *53*, 214–220.
- Moriyama, S. 1976: Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere. III. Numerical experiments of radiative convective equilibrium of the Martian atmosphere including the radiative effects due to dust. *J. Meteor. Soc. Japan*, *54*, 52–57.
- Pollack, J.B., Colburn, D.S., Flaser, F.M., Kahn, R., Carlston, C.E., and Pidek D.C. 1979: Properties and effects of dust particles suspended in the Martian Atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2929–2945.
- Pollack, J.B., Leovy, C.B., Greiman, P.W., and Mintz, Y. 1981: A Martian general circulation experiment with large topography. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 3–29.
- Priestley, C. H. B. 1959: *Turbulent Trnsfer in the lower Atmosphere*. Chicago Univ. Press.
- Savijärvi H. 1991a: Radiative fluxes on dustfree Mars *Contr. Atmosph. Phys.*, **64**, 103–112.
- Savijärvi H. 1991b: A model study of the PBL structure on Mars and Earth. *Contr. Atmosph. Phys.*, **64**, 219–229.
- Ye, Z.J., Sega, M., and Pielke, R.A. 1990: A comparative study of daytime thermally induced upslope flow on Mars and Earth. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 612–648.