

# 地球惑星大気擾乱の2次元シミュレーション

品川裕之（名古屋大学太陽地球環境研究所）

## 1. 本シミュレーションの物理的意味

地球や惑星の大気は基本的には静水圧平衡の状態にあるが、局所的に急激な加熱や加速などが起きると力学バランスが崩れて擾乱が発生し、音波や重力波となって遠方にまで伝搬して行くと考えられている。実際、局所擾乱に関連した多くの現象が報告されている。

例えば、火山の噴火、核実験、雷、積雲に伴う強い対流、超高層のオーロラに伴う加熱や加速などによって、インフラソニック波（超低周波音波）や重力波が発生・伝搬することが知られている。また、地震や海洋表面の運動によって大気の下部境界が動かされて大気波動が発生するという研究もある。反対に、日食のように、局所的に突然加熱率が減少することによっても同様の大気擾乱や波動が発生するという報告もある。これらの物理過程は何れも、いまだに完全には解明されておらず、現在、気象や超高層研究分野で観測的研究と同時に数値シミュレーションによる研究が精力的に進められている。

本課題では、このような大気擾乱過程の基礎を学ぶため、地球、金星、火星の大気中で局所加熱が発生した場合の大気変動の基本過程を再現するシミュレーションを紹介する。

## 2. モデル

本課題のシミュレーションモデルは、2次元（水平・高度）の中性流体シミュレーションで、基本場として各惑星大気の静水圧平衡モデルを与え、そこからの変動量を変数として、加熱による擾乱が与えられた時の変動量を数値的に求めるものである。数値解法はCIP法を用いている。CIP法については、本シミュレーションスクールで別途解説があるのでここでは省略する。

### （1）座標系

座標系は、鉛直・水平の2次元とし、計算領域は、水平方向が-250 km ~ 250 km、鉛直方向が0 km（地表）~ 100 kmである。格子点間隔は、水平が5 km、鉛直は2 kmとしてある。

## (2) 基礎方程式

基礎方程式は、以下のような重力場中の 2 次元流体方程式である。

$$\text{連続の式} : \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u}{\partial x} - \frac{\partial \rho v}{\partial y}$$

$$\text{鉛直運動量方程式} : \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g$$

$$\text{水平運動量方程式} : \frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\text{エネルギー方程式} : \frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial y} - u \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{R}{c_v} T \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{Q}{c_v}$$

$$\text{状態方程式} : p = \rho R T$$

ここに、 $x$  : 鉛直座標、 $y$  : 水平座標、 $\rho$  : 質量密度、 $u$  : 鉛直速度、 $v$  : 水平速度、 $T$  :

温度、 $p$  : 圧力、 $R$  : 気体定数、 $g$  : 重力加速度、 $c_v$  : 定積比熱、 $Q$  : 加熱率。

本シミュレーションでは、平衡状態にある基本場( $\rho_0, u_0, v_0, T_0, p_0$ )からの変動量( $\rho' = \rho - \rho_0$ など)を変数として解いている。基本場は静水圧平衡 $\partial p_0 / \partial z = -\rho_0 g$ とし、他の式も基本場についてはバランスしていると仮定している。実際のプログラムでは基本場の平衡の式を用いて、上式を変形している。また、簡単のため、プログラムでは部分的に 2 次の項を無視している。さらに、現実の大気では、コリオリ力、熱伝導、粘性なども、場合によっては重要となるが、本シミュレーションでは含めていない。計算に用いる単位は cgs 系を用いている。

## (3) 基本場のモデル

地球、金星、火星の 3 種類の場合があり、それぞれ下図のようになっている。高度方向の温度分布は図 1、密度分布は図 2 のようになっている。その値はプログラムでは、subroutine init1 で与えている。これらの値は、近似的な代表値であり、実際の大気構造は季節や時間・場所によって大きく変動し、この例とは大きく異なる場合があることに注意していただきたい。

## (4) 初期条件

計算では基本場からの変動量を変数としているので、その変動量に対する初期条件を与える。プログラム中では、地球と火星では、 $\rho' = u' = v' = T = 0$  を与えている。金星の場合には、 $\rho' = u' = T = 0$  であるが、水平風  $u'$  に対しては、高度分布を与えていく(図 3)。これは、実際に金星の中層大気で高速の水平風(スーパーローーテーション)

ン)が観測されているので、その効果を入れるためにある。この水平風については、`subroutine initl` で与えているので、受講者が変更することも可能である。

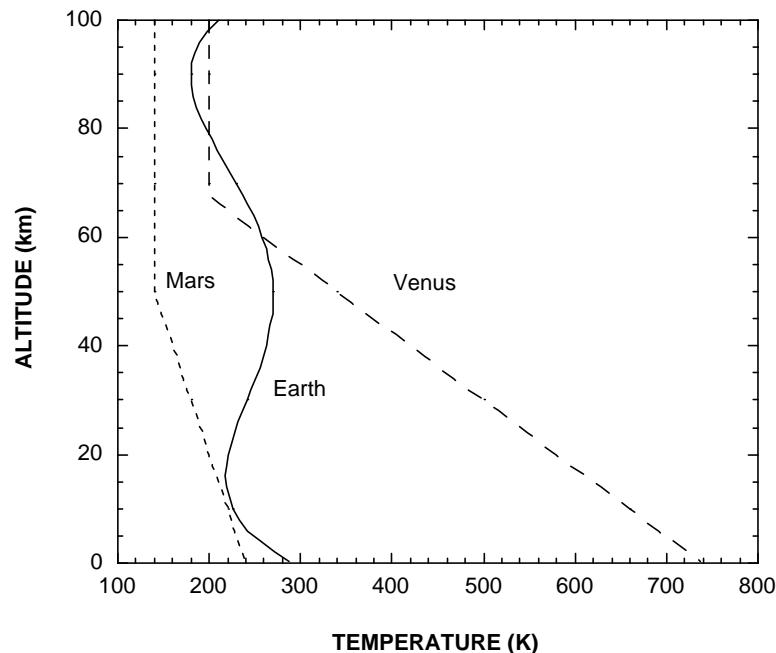


図 1 . 基本場の温度分布

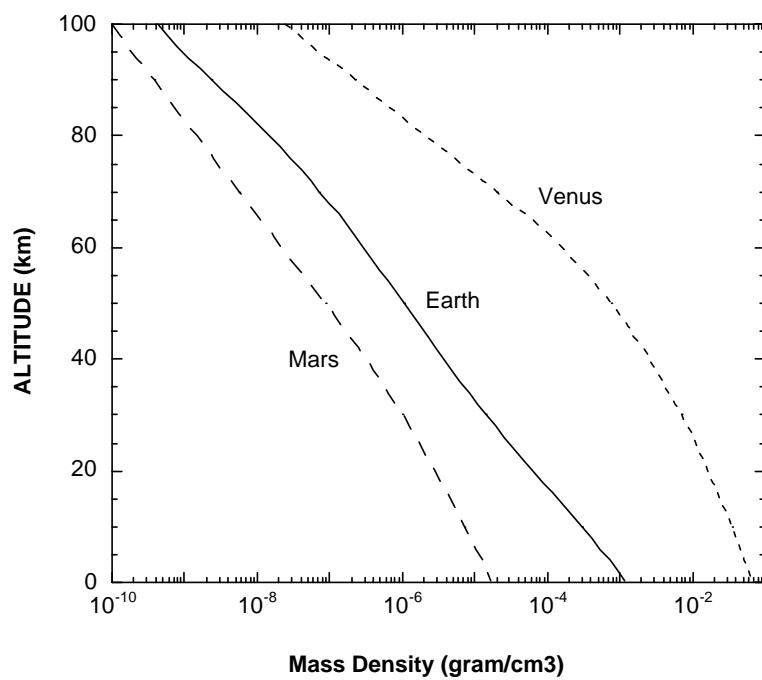


図 2 . 基本場の質量密度

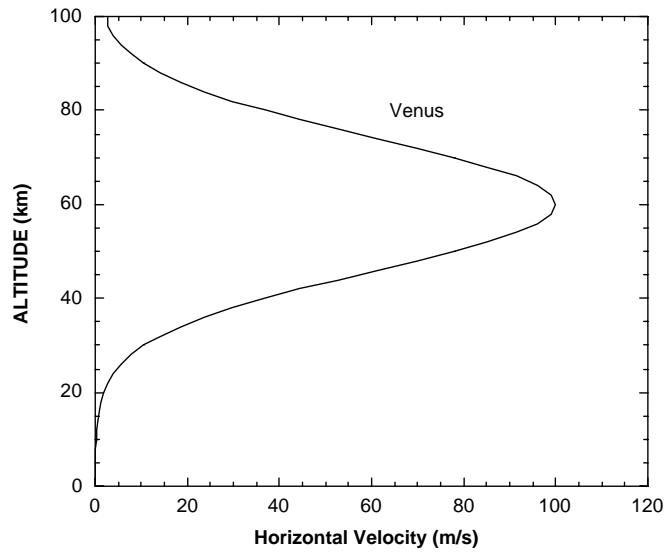


図 3 . 金星大気の水平速度の初期条件

### (5) 境界条件

鉛直風以外の変数は、上下左右の境界で、勾配が 0 であるとしているが、鉛直風に関しては、地表で速度が 0 としている。

### 3 . プログラムの入力パラメータ

本シミュレーションでは大気擾乱を発生させるのは加熱である。加熱源の位置は、図 4 のように、また、加熱率の時間変化は図 5 のようになっている。この部分は適宜変更可能である。 $ts1$ ,  $ts2$ ,  $ts3$  については後述参照。

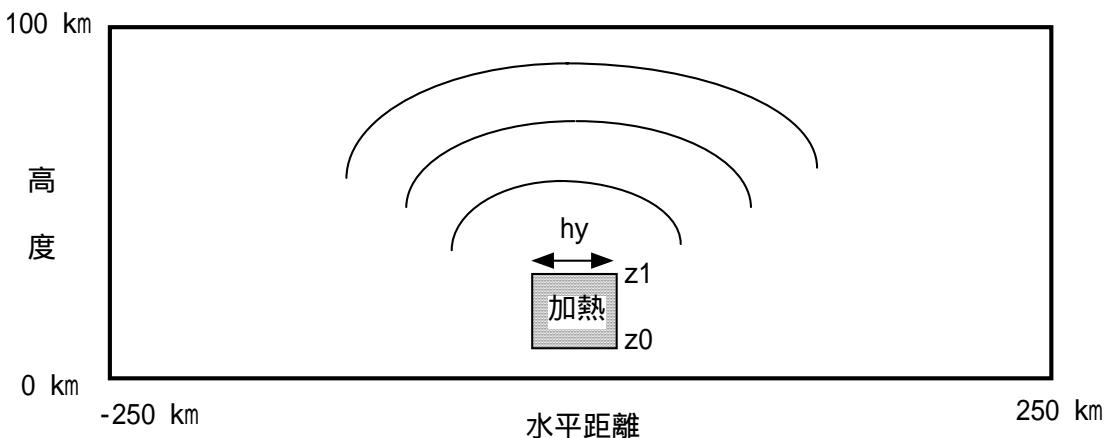


図4. 加熱源の位置



図5. 加熱率の時間変化

プログラムの主な変数は以下のものである。

変数	デフォルト値	内 容
nsteps	3000	計算の反復回数。これに $dt$ を掛けたものが実際の物理時間になる。
iatm	1	惑星を選ぶパラメータ。地球=1；金星=2；火星=3
z0	0.0d+00	加熱源の下端の高度 (cm)
z1	1.0d+06	加熱源の上端の高度(cm)
hy	2.0d+06	加熱源の幅(cm)。加熱の中心は $y=0$ にある。なお、実際には加熱領域の端ではなだらかに (5 km 程度の幅で) 減衰するようにしている。
qpeak	1.0d+04	最大の加熱率 (erg/gram/cm <sup>3</sup> /s)
ts1	6.0d+01	時間的には加熱率は 0 から始まり、 $ts1$ (秒) で最大加熱率(qpeak)に到達する。これに負の値を与えると、周期 $ts1$ で $\sin$ 的に変動する加熱率が与えられる。
ts2	1.0d+03	$ts1$ の後、加熱率は時間 $ts2$ (秒) 一定の加熱率を保つ。
ts3	6.0d+01	$ts1+ ts2$ の後、加熱率は $ts3$ (秒) の時間で 0 に戻る。
dt	0.2	時間方向の刻み幅 (秒)

#### 4. 各サブプログラムの内容

main	入出力と、計算のためのサブルーチンを呼ぶ。入力パラメータと結果の書き出しがなどは変更可能。
initl	基本場、初期値などを設定する。適宜変更可能。
prt3	結果を書き出してチェックするための。普段は使わない。
veloc	staggered mesh を使っているので、1/2 mesh ずれたところで速度を計算するのに使う。

rhs	移流項以外の項の時間変化を計算する。
newgrd	cip 法では、変数の空間微分の時間発展を計算する必要があるので、ここで rhs で計算した値の空間微分の時間発展を計算する。
sift	次のタイムステップに進むために、変数の値を更新する。
bnd1, bnd2, bnd3	境界条件を与える。
dcip0	cip 法で移流項を計算する。

## 5 . 結果の例

本課題の Fortran プログラムをデフォルトパラメータで実行し、その結果を使って IDL プログラムを走らせると、以下の図のような結果が得られる。初期のプログラムでは、加熱源は中央の下におかれ、まず、ここから擾乱が発生し、上方に伝搬し、さらに水平に伝搬していく様子が現れる。一般に大気の変動量は、密度が下がるにつれて増大するので、大気上層では非常に大きくなる。そのため、プロットでは対数を使って表示している。

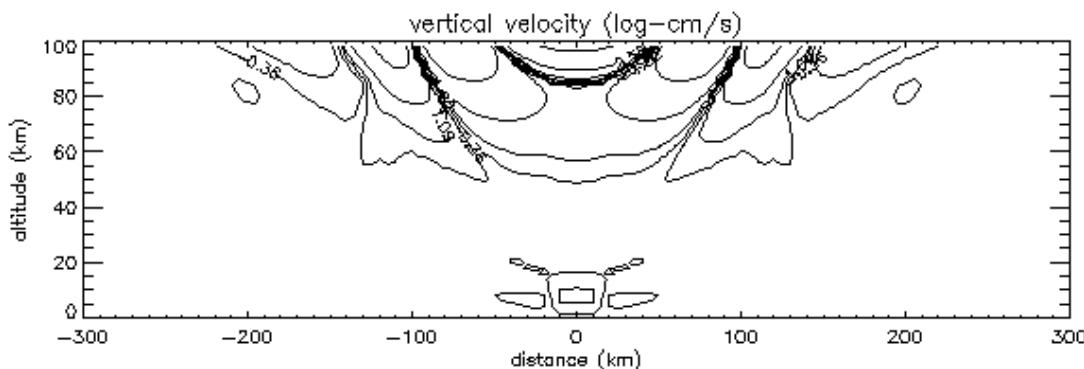


図 7 . 鉛直速度( $u$ )。(速度(cm/s)の絶対値の対数をとり、その正の値に速度の符号をつけたもの。)

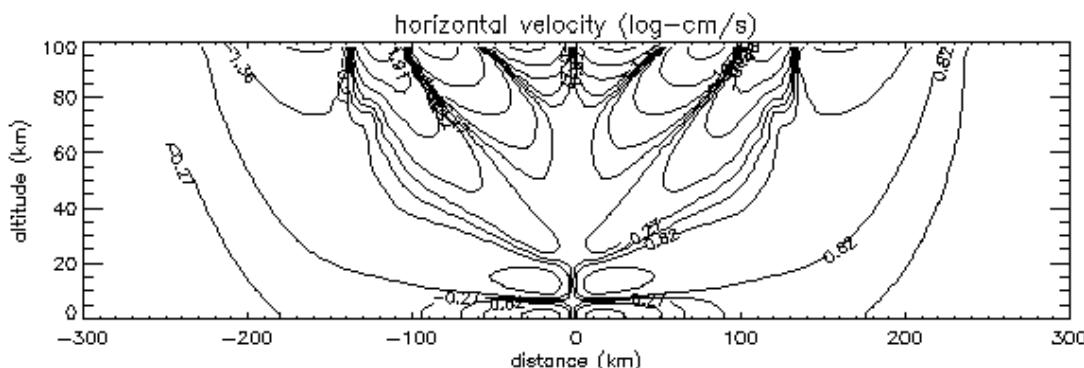


図 8 . 水平速度( $v$ )。値の表示方法は図 7 と同じ。

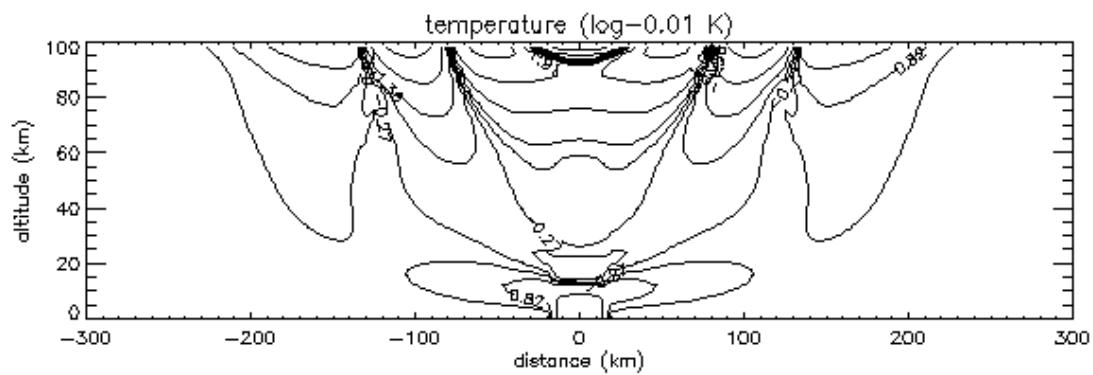


図 9 . 温度変化( $T'$ )。( 温度変化(K)を 100 倍して、その絶対値の対数をとり、正の値に温度変化の符号をつけたもの。)

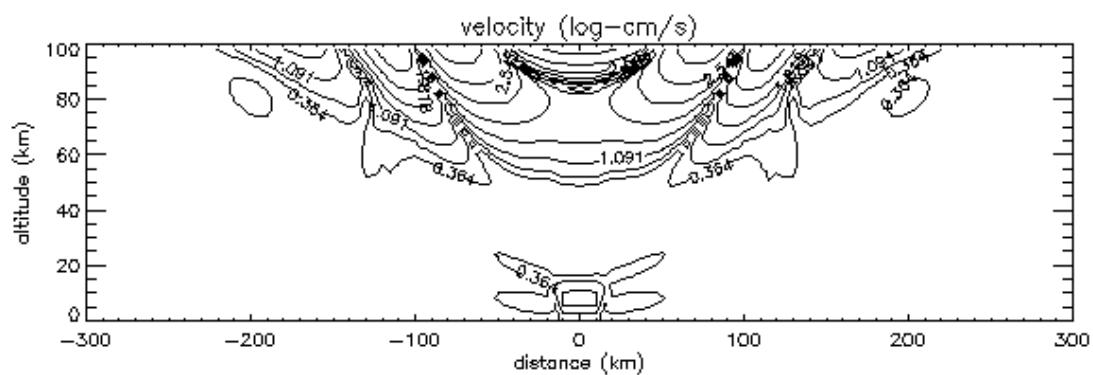


図 10 . 速度の絶対値。( 速度(cm/s)の絶対値の対数をとり、正の値に速度の符号をつけたもの。)

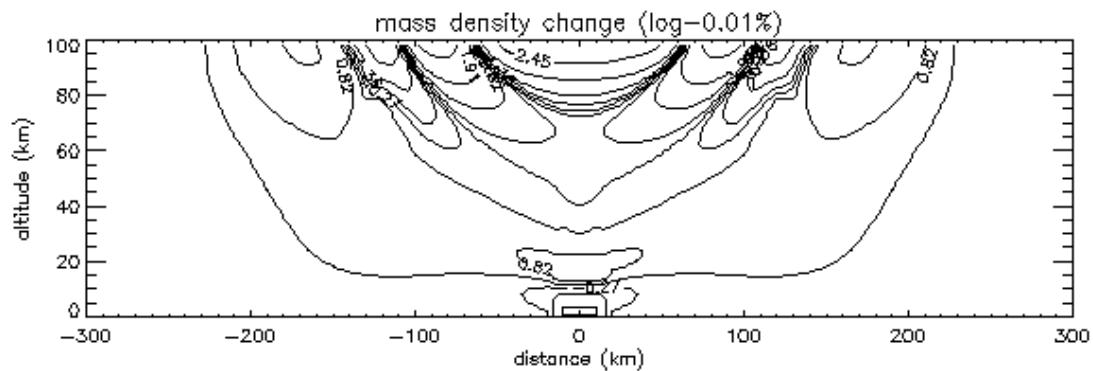


図 11 . 質量密度変化の割合。( 質量密度変化の割合( $r/r_0$ )に 10000 を掛け、その絶対値の対数をとり、正の値に符号をつけたもの。)

[ 注: 図 7 ~ 図 11 は、実際の IDL プロットでは白黒が反転する。]

## 6 . 研究テーマ例

本プログラムを用いて、各惑星について以下のような研究を行うことができる。ただし、条件によっては数値不安定が起きる場合があり、必ずしも解を得られるとは限らない。

- (1) 加熱率の空間分布・時間変化などを変えて、擾乱の生成・伝搬のようすがどのように変わるかを調べる。
- (2) 基本場の温度分布、初期の水平風速などを変えて、擾乱の生成・伝搬のようすがどのように変わるかを調べる。
- (3) 加熱の代わりに「冷却」を入れて、日食によって起きる大気擾乱を調べる。

上記以外にも工夫次第でいろいろな現象を調べることができる。

## 7 . 参考文献

安田延壽、「基礎大気科学」、朝倉書店 (1994)

小倉義光、「気象力学通論」、東京大学出版会 (1978)

小倉義光、「一般気象学」(第2版)、東京大学出版会 (1984)

小倉義光、「メソ気象の基礎理論」、東京大学出版会 (1997)

松野太郎、島崎達夫、「成層圏と中間圏の大気」、東京大学出版会 (1981)

松田佳久、「惑星気象学」、東京大学出版会 (2000)

矢部 孝、他、「パソコンによるシミュレーション物理」、朝倉書店 (1992)