

# 灰色大気の放射平衡温度分布に関する考察

地球および惑星大気科学研究室 1293426S 坂東 あいこ

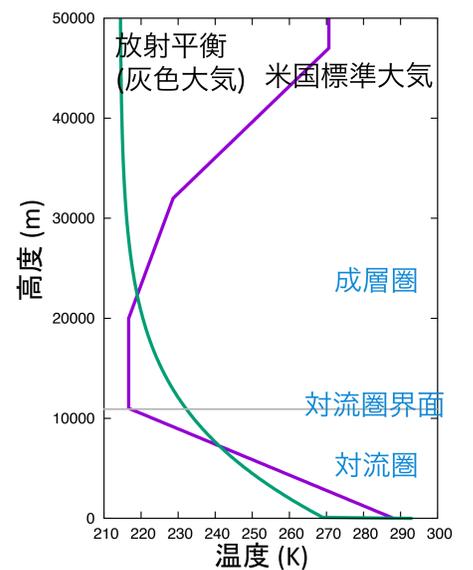
## はじめに

放射平衡とは、太陽放射と地球放射によって温度分布が定常に保たれている状態のことである。対流圏および成層圏の温度の高度分布は、放射平衡によってのみ決まっているわけではない。しかし、放射平衡を理解することは、温度の高度分布を理解する第一歩である。

## 概要

本研究では、灰色大気が放射平衡状態にあるときの温度分布がどのようになっているか、そしてその構造はどのように決まるかを検証する。

まず、灰色大気の放射平衡温度分布を解析的に求める。次に、同様の温度分布を数値計算によって求める。解析解と数値解を比較し、数値解が正しく計算されていることを確認したのち、数値計算において平衡状態に至るまでの過程を調べる。



## 近似および方程式

### ●用いる近似

- 局所熱平衡近似
- 平行平面大気近似
- 非散乱大気
- 灰色大気

### ●光学的厚さ

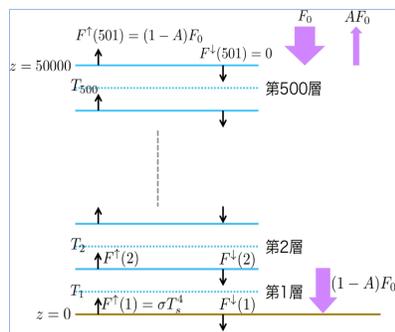
$$\tau(z) = \int_z^\infty k\rho(z')dz'$$

吸収係数と地表での光学的厚さの対応

- $k_1 = 3.64 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  のとき  $\tau_s = 3.0$
- $k_2 = 1.21 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  のとき  $\tau_s = 1.0$
- $k_3 = 1.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  のとき  $\tau_s = 0.1$

### ●放射伝達方程式

$$\frac{dF^\uparrow}{d\tau^*} = F^\uparrow - \pi B(T)$$
$$-\frac{dF^\downarrow}{d\tau^*} = F^\downarrow - \pi B(T)$$



離散化されたモデル大気の構造

- $\tau_s$ : 地表での光学的厚さ
- $k$ : 吸収係数
- $\rho(z)$ : 高度zにおける吸収気体の密度
- $\tau^* = \frac{3}{2}\tau$
- $F^\uparrow$ : 上向き放射フラックス
- $F^\downarrow$ : 下向き放射フラックス
- $B$ : プランク関数
- $T$ : 気温
- $c_p$ : 定圧比熱
- $\rho_a$ : 大気密度
- $F^{\text{net}}$ : 正味放射フラックス
- $\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数
- $T_s$ : 地表温度
- $F^\downarrow(\tau_s)$ : 地表に入射する放射フラックス
- $A$ : 地球のアルベド
- $F_0$ : 太陽放射の放射フラックス

大気のスケールハイト	8.0 km
太陽定数	1370 W m <sup>-2</sup>
地表での大気密度	1.3 kg m <sup>-3</sup>
地表での吸収気体の密度	1.0 × 10 <sup>-2</sup> kg m <sup>-3</sup>

### ●放射加熱率

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{c_p \rho_a} \frac{\partial F^{\text{net}}}{\partial z}$$

### ●地表での熱収支

$$\sigma T_s^4 = F^\downarrow(\tau_s) + (1-A)F_0$$

### ●解析解を求める (平衡状態を仮定)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

### ●時間発展させて数値解を求める

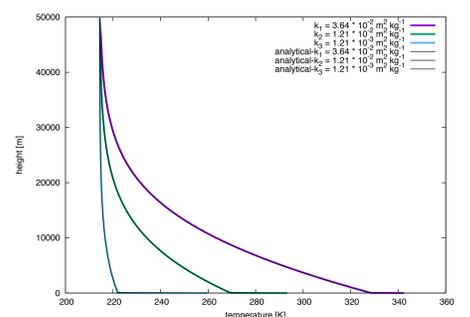
$$T^{(n+1)} = T^{(n)} + \frac{\partial T}{\partial t} \Delta t$$

## 結果 1

### ●放射平衡温度分布を調べる

#### ❖放射平衡温度分布

- 赤色、青色、黄色の点線はそれぞれ吸収係数  $k_1, k_2, k_3$  の解析解、紫色、緑色、水色の線はそれぞれ吸収係数  $k_1, k_2, k_3$  の数値解のグラフ
- 上層は吸収係数によらず、ほぼ等温
- 下層ほど温度勾配が大きく、最下層気温と地表温度に大きな温度差
- 吸収係数が大きいほど、高温



#### ❖解析解と数値解の比較

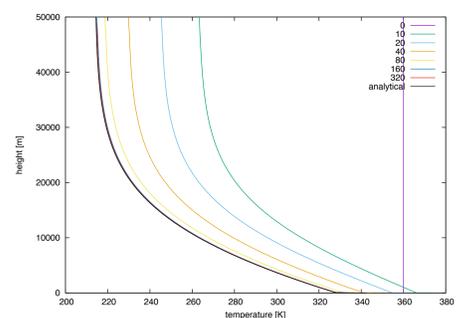
- 解析解と数値解はほぼ一致
- 差は1 K 以下である

## 結果 2

### ●放射平衡に達するまでの過程を調べる

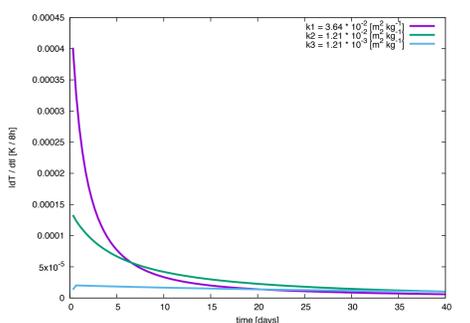
#### ❖温度分布の時間発展

- 初期温度 360 K, 吸収係数  $k_1$
- 解析解と数値計算開始後 0, 10, 20, 40, 80, 160, 320 日後の数値解
- 320 日後には解析解とほぼ一致



#### ❖放射加熱率の時間変化

- 最上層の放射加熱率を調べる
- 初期温度 360 K
- 紫色、緑色、水色の線はそれぞれ吸収係数  $k_1, k_2, k_3$  の放射加熱率のグラフ
- 吸収係数が大きいほど速く平衡状態に達している



## まとめ

放射平衡温度分布は、下層ほど温度勾配が大きく、上層ではほぼ等温層である。最下層の気温と地表温度には差があり、対流を考えた場合には対流が起こり、このような下層の温度分布は維持されない。上層の等温層は、成層圏の存在を示唆している。また、吸収係数が大きいほど温度が高い。これは、温室効果である。

数値計算によって平衡状態に至るまでの過程を調べた結果、吸収係数が大きいほど、平衡に達するまでに時間がかからないことが分かった。これは吸収係数が大きいほど、初期の放射加熱率が大きいためである。

## 参考文献

- 会田勝, 1982: 気象学のプロムナード 8 大気と放射過程-大気の熱源と放射収支を探る-, 東京堂出版, 280pp.
- 浅野正二, 2010: 大気放射学の基礎, 朝倉書店, 267pp.
- 小倉義光, 1999: 一般気象学[第2版], 東京大学出版会, 308pp.
- NASA, 1976: U. S. Standard Atmosphere, 1976. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 277pp.