

3. 大気の鉛直構造

3-1 大気圧と大気質量

圧力

圧力とは単位面積あたりに働く力のことである。単位は Pa (パスカル) を用いる。これは N/m^2 と等しい。気象学ではしばしば hPa (ヘクトパスカル) が用いられる。ヘクトは 100 を意味し、 $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ である。

底面積が S 、質量が m の物体が地面に置かれ静止しているとする。このとき重力加速度を g とすれば、物体が地面を押す力は mg である。したがって底面の圧力 P は、

$$P = \frac{mg}{S} \quad (1)$$

と求めることができる。

大気圧

地表面大気圧は大気の質量が惑星重力に引かれ、地面を押しつけていることで生じる。したがって地表面大気圧 P_s と重力加速度 g 、惑星の表面積 S を知れば、大気の質量 m_a を求めることができる¹。(1)式に基づくと

$$m_a = \frac{P_s S}{g} \quad (2)$$

となる。この式を少し書き換えて

$$\frac{m_a}{S} = \frac{P_s}{g} \quad (3)$$

と書くこともできる。左辺の m_a/S は、地表単位面積あたりにその上に載っている大気の質量を表す。これを気柱質量という。(1)式を参考にすれば、気柱質量に重力加速度をかけることで圧力を得ることができる。

地球大気の場合、平均的な地表面気圧は 1013 hPa である。地球の重力加速度 9.8 m/s^2 と地球の表面積 $5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ を当てはめれば大気の質量は $5.3 \times 10^{18} \text{ kg}^2$ 、地表単位面積当たりの気柱質量は $1.0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ と求まる。実は地表 1 m^2 あたり 10 トンもの空気が載っている。

¹大気は惑星半径にくらべて薄く、重力加速度の高度変化は無視できると仮定する

²より厳密には $5.15 \times 10^{18} \text{ kg}$

3.2 気圧の高度変化

気圧は高度が大きいくほど減少する。これはそれぞれの高度よりも上に載っている気柱質量が高度が大きくなるほど減少することを意味している。

高度を z として、これを式で表すと

$$P(z) = (\text{高度 } z \text{ より上空の気柱質量}) \times g \quad (4)$$

少しだけ高い高度 $z + \delta z$ でも

$$P(z + \delta z) = (\text{高度 } z + \delta z \text{ より上空の気柱質量}) \times g \quad (5)$$

(5) 式と (4) 式の差をとると

$$P(z + \delta z) - P(z) = -(\text{高度差 } \delta z \text{ に挟まれた気柱質量}) \times g \quad (6)$$

となる。 δz が十分小さければ、高度差 δz に挟まれた気柱質量は気体の密度 ρ と δz の積に等しい。微分の定義を使えば $(P(z + \delta z) - P(z))/\delta z = dP/dz$ であるから

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (7)$$

これを静水圧平衡の式と言う。

大気が理想気体からなるとすると、1mol の気体の状態方程式を変形して

$$PV = RT \Leftrightarrow P \frac{\mu}{\rho} = RT \Leftrightarrow \rho = \frac{\mu P}{R_g T} \quad (8)$$

と書ける。ここで V は体積、 R は気体定数³ ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、 μ は 1mol の気体質量 (平均分子量を kg 単位で表したもの)、 T は絶対温度である。これを静水圧平衡の式に代入すれば

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{\mu g}{RT} P \quad (9)$$

を得る。もしも組成と温度が一定であれば、この式は簡単に解ける。

$$P = P_s \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad \text{ただし } H = \frac{RT}{\mu g} \quad (10)$$

この H をスケールハイトと呼ぶ。これは大気の高さ方向の厚みを表す指標である。

3.3 気温の鉛直分布

実際の大気は等温ではない。地球の平均的な鉛直気温分布を図 3.2 に示す。

地球大気は温度構造によって次のように区分されている。

³ここでは文字 R を気体定数の意味で用いる。惑星半径などを表す場合もあるので注意。

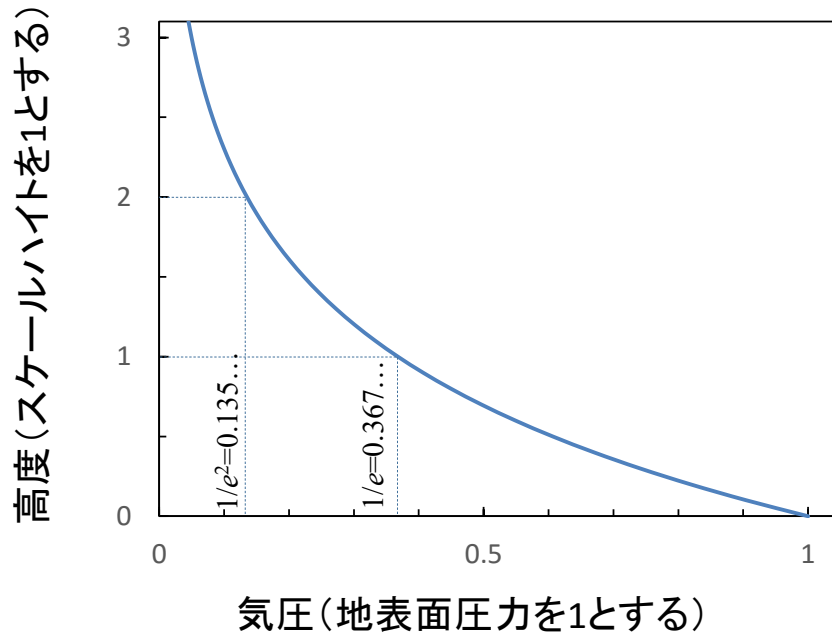


図 3.1 等温大気の圧力分布. 1 スケールハイト上昇するたびに圧力が $1/e$ になる.

対流圏 地表から高度 10~15km まで. 基本的に上空ほど気温が低い. 厚みは薄い
が地球大気の総質量の約 80~90 % を占める. 対流圏は下部から温められ熱
対流が起きている. 上昇による断熱膨張と下降による断熱圧縮で温度変化が
起こることで温度勾配が決まっている. 平均的な温度減率は 6.5 K/km であ
る. 上端を対流圏界面と呼ぶ.

成層圏 対流圏界面から高度約 50km の温度の極大まで. 上空ほど気温が高い. オ
ゾンの太陽紫外線の吸収による加熱と二酸化炭素による熱放射の釣合で温度
が決まっている.

中間圏 高度約 50km から高度約 80km の温度極小まで. 上空ほど気温が低い. 上
空ほどオゾンの密度が低く, 太陽紫外線の吸収による加熱が小さくなること
による.

熱圏 約 80km よりの上空の高温の層. 酸素による紫外線の吸収と下層大気への熱
伝導の釣合で温度分布が決まっている. 極めて希薄なため気体分子が一部電
離し, 電離層を作っている. 太陽活動の影響を強く受ける.

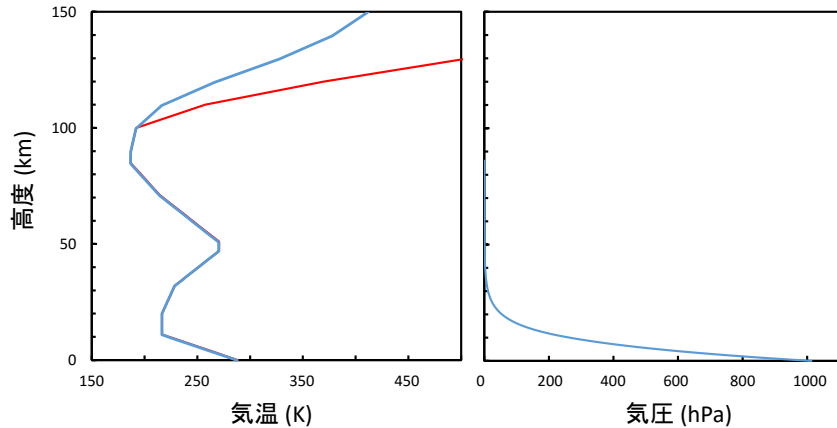


図 3.2 地球大気の平均的な鉛直気温分布. 赤線は太陽活動が高い場合をあらわす.

3.4 大気と宇宙空間

大気は上空にどこまで広がっているのか、どこから先が宇宙空間と呼べるのか疑問が湧くかもしれない。高度が上昇して大気がどんどん希薄になると、気体分子同士の衝突がほとんど起きなくなり、やがて流体としてみなすことができなくなる。この限界の高度を大気の上端とみなすことができる。この高度を外気圏界面と呼び、地球大気の場合は高度 500km~1000km に位置する（太陽活動の強さにより変動する）。

実は国際宇宙ステーションは高度 400km を周回しており、上記の定義では大気の中を飛行していることになる。ただし気体の密度は地表における値の 1 千億分の 1 以下なので真空度は高い。大気成分による摩擦で地球に落下してしまうことを食い止めるため、時々加速をして高度を維持している。

もうひとつの定義として気体分子が地球重力に捉えられている領域を大気圏を見なすこともある。この場合は大気圏は地表から高度約一万 km まで広がっていることになる。

問題

問題 3.1 表 1.2 をもとに、以下の手順で太陽および各惑星（地球・金星・火星・木星）の大気の典型的なスケールハイトを求めよ。有効数字は設問で与えられている数値のなかでもっとも小さなケタとする。

- (1) 地球表面の重力加速度は 9.8 m/s^2 である。重力加速度は天体質量に比例し、半径の二乗に反比例することを用いて、地球以外の各天体の表面の重力加速度を求めよ。

- (2) 主要第二位までの大気組成をもとに平均分子量を求めよ。(以下★) 太陽については電離の効果がある。水素とヘリウムが完全に電離し、気体成分に電子(分子量ほぼゼロ)が加わっているのとして平均分子量を求めよ。
- (3) (1), (2)の結果と表面温度から各天体の大気の典型的なスケールハイトを求めよ。