

宇宙地球物理学実験（気象学分野） 予習課題 3

大気の熱力学

これは、宇宙地球物理学実験で必要となる基礎知識を復習するための課題です。内容をよく理解したうえで、問1～4に解答してください。

1. 大気の状態方程式

気体分子自身の体積や分子間力などが存在しない仮想的な気体を**理想気体**という。理想気体においては、ボイルの法則（温度一定の条件下では体積は圧力に反比例する）やシャルルの法則（圧力一定の条件下では体積は温度に比例する）が成り立つ。このような性質は、圧力を p 、体積を V 、物質量を n 、温度を T 、気体定数を R として、

$$pV = nRT$$

と表すことができる。これを理想気体の**状態方程式**という。気体定数 R は、 $R = 8.31 \text{ J/mol K}$ である。

現実の大気は、多くの場合、理想気体として近似できる。また、乾燥空気の平均分子量はほぼ一定であるので、気象学では、状態方程式において物質量の代わりに質量をそのまま用いて、

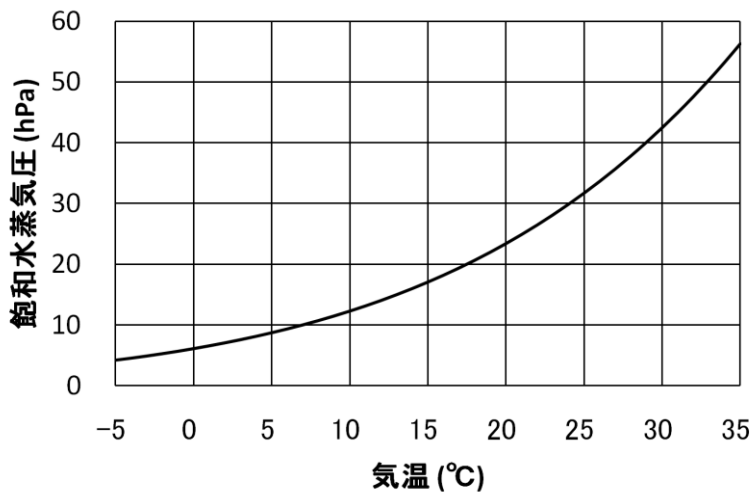
$$p = \rho RT$$

と表現することが多い。ただし、 ρ は気体の密度である。状態方程式をこのように表した場合、乾燥空気に対する気体定数は、 $R = 287 \text{ J/kg K}$ である。この状態方程式においては、（平均）分子量によって気体定数の値が異なることに注意が必要である。

問1 気圧 1013hPa、気温 290K（約 17℃）の乾燥空気の密度 [kg/m^3] を有効数字 2 桁まで求めよ。ただし、乾燥空気の気体定数を $R = 287 \text{ J/kg K}$ とし、理想気体の状態方程式を用いてよい。

2. 大気中の水蒸気

一般に空気には水蒸気が含まれている。乾燥した空気に含まれる水蒸気の量は少ないが、湿った空気には多くの水蒸気が含まれている。空気中に含まれる水蒸気の量は、水蒸気圧（水蒸気分圧）で表すことができる。空気が水蒸気に関して飽和しているときの水蒸気圧を**飽和水蒸気圧**という。飽和水蒸気圧は、気温が上がると大きくなる。



- ☞ 高等学校の地学や化学で、飽和水蒸気圧を取り扱う。飽和水蒸気圧は温度のみの関数である。
- ☞ 中学校理科第2分野では、水蒸気圧の代わりに水蒸気量 (g/m^3) が用いられる。飽和水蒸気量の値は、厳密には温度だけでなく気圧によっても変化する。

相対湿度は、飽和水蒸気圧と実際の水蒸気圧の比として計算される。つまり、相対湿度 h は、飽和水蒸気圧 e_s と実際の水蒸気圧 e を用いて

$$h = \frac{e}{e_s}$$

と定義できる。

- ☞ 中学校理科第2分野や高等学校の地学で相対湿度を取り扱う。ただし、中学校理科第2分野では、飽和水蒸気圧の代わりに飽和水蒸気量を用いて定義する。

空気中に含まれている水蒸気の割合を表す量として、**比湿**や**混合比**という量が使われることもある。混合比 r は、空気に含まれる水蒸気の密度 ρ_v と乾燥空気の密度 ρ_d との比であり、

$$r = \frac{\rho_v}{\rho_d}$$

と定義される。空気の圧力 p と水蒸気圧 e を用いて、

$$r = \frac{0.622e}{p - e}$$

と計算することもできる。0.622 は水の分子量と乾燥空気の平均分子量との比である。一方、比湿は、空気に含まれる水蒸気の密度と空気全体の密度との比であり、水蒸気の濃度のようなものである。比湿 q は、

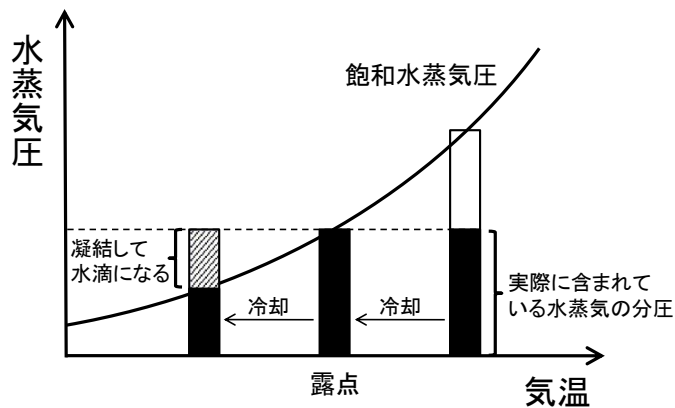
$$q = \frac{\rho_v}{\rho_d + \rho_v}$$

と定義され、

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e}$$

と計算することができる。比湿や混合比は、温度や圧力が変化しても、空気塊の混合や水蒸気の凝結、蒸発が起こらない限り保存する量である。このため、気象学では、しばしば比湿や混合比が用いられる。

飽和水蒸気圧は気温が下がると小さくなるので、空気が冷却され、空気中に含まれる水蒸気分圧が飽和水蒸気圧よりも大きくなると、水蒸気が凝結して水滴になる。空気を圧力一定の条件のもとで冷却し水蒸気の凝結が始まったときの温度を**露点**という。気温が同じであっても、湿度の高い空気のほうが水蒸気を多く含んでいるので露点は高い。



☞ 中学校理科第2分野や高等学校の地学で露点について学ぶ。ただし中学校理科第2分野では水蒸気圧の代わりに水蒸気量を用いて定義する。

問2 気圧 1013hPa、気温 24℃、湿度 84%の空気について、以下の問いに答えよ。必要に応じて下の表を用いてよい。

- (1) この空気の飽和水蒸気圧[hPa]を小数点第1位まで計算せよ。
- (2) この空気の水蒸気圧[hPa]を小数点第1位まで計算せよ。
- (3) この空気の比湿[g/kg]と混合比[g/kg]を小数点第1位まで計算せよ。
- (4) この空気の露点はおよそ何℃か、1の位まで求めよ。

気温[°C]	飽和水蒸気圧[hPa]	気温[°C]	飽和水蒸気圧[hPa]
16	18.2	21	24.9
17	19.4	22	26.4
18	20.6	23	28.1
19	22.0	24	29.8
20	23.4	25	31.7

3. 大気の圧力

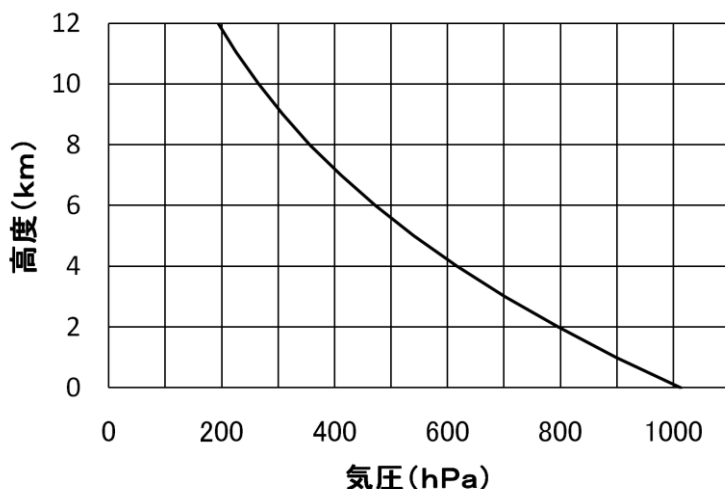
単位面積に加わる空気の重さを気圧という。気圧の単位としてはパスカル (Pa) を用いる。1Pa は、1m²あたり 1N の力に相当する。海面での平均的な気圧は 1013.25hPa であり、これを 1 気圧という。1 気圧は 1cm²あたり約 1kg 重の重さに相当する。

☞ 中学校理科第2分野や高等学校の地学で、気圧を取り扱う。海面での平均的な値も学ぶ。

一般に上空に行くほど気圧は低くなる。これは、大気中を上に行くと、その区間の空気の重さの分だけ圧力が低下するためである。このように、空気の重さの分だけ気圧が低下する状態のことを**静水圧平衡**といい、

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

と書ける。ただし、 g は重力加速度である。実際の大気は、静水圧平衡に近い状態にあることが多い。静水圧平衡のもとでの鉛直方向の気圧傾度は、地上付近では 10m につき約 1hPa である。気温が高くなると空気の密度が小さくなるので、鉛直方向の気圧傾度も小さくなる。



☞ 中学校理科第2分野や高等学校の地学で、上空に行くほど気圧が下がることを学ぶ。ただし、定量的な取り扱いはない。

問3 気温が 290K (約 17°C) のとき、鉛直上方に 10m 移動すると、気圧は何 hPa 低下するか。有

効数字 2 桁まで求めよ。ただし、空気は理想気体であるものとし、静水圧平衡を仮定してよい。重力加速度は 9.81m/s^2 、気体定数は 287J/kg K とする。

問 4 理想気体の状態方程式と、静水圧平衡の関係から、高度 z と気圧 p との関係を導け。気温 T は一定としてよい。地上での気圧を p_0 とする。また、導いた関係式において、スケールハイト（気圧が $1/e$ 倍になる高度）を求めよ。

提出する際には、学籍番号、氏名の記入を確認してください。