

気象観測入門

1. はじめに

この講習では、気象観測機器を用いた気象観測を体験する。これは、おもに中学校の理科第2分野で行なわれる気象観測に関連したものであり、実際に大学キャンパス内で天気、気温、湿度、気圧、風向・風速の観測を行なう。さらに、測定結果を解析し、水蒸気の量や空気の密度などを計算したり、地上と屋上の気圧の差を検討したりする。原理を理解しやすいアナログ測器を用いた観測や、観測データの解析を通して、気象学や自然科学一般に対する見識を深めることも目的とする。この講習で行なう測定、解析は、中学校の理科の教科書の内容そのものというよりは、教員養成課程の学生を対象にするような、やや高いレベルの内容を含んでいる。

2. 基礎編

(1) 気体の状態方程式

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**^高という。理想気体においては、

ボイルの法則^高：温度一定の条件下では体積は圧力に反比例する。

シャルルの法則^高：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（普遍気体定数）を R^* として、

$$pV = nR^*T$$

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

☞ 高等学校の物理や化学で、理想気体の状態方程式を取り扱う。

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

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。

†物理学では、平均分子量の異なる気体に対して一般に適用できる状態方程式として

$$pV = nR^*T$$

を用いる。 n は物質質量 (モル) である。気体の (平均) 分子量を M 、質量を m とすると、

$$n = \frac{1000m}{M}$$

だから、

$$pV = \frac{1000m}{M} R^*T$$

となる。ここで、密度 ρ は

$$\rho = \frac{m}{V}$$

だから、状態方程式の両辺を V で割って、

$$p = \rho \frac{1000 R^*}{M} T$$

が得られる。気象学では、

$$R = \frac{1000 R^*}{M}$$

を気体定数とよぶことが多い。地球における乾燥大気の平均分子量は $M = 28.97$ で一定とみなせるので、多くの場合、気体定数をこのように定義したほうが便利である。気体定数 R の値は、 $R = 287 \text{ J/kg K}$ である。

(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量は、水蒸気圧 (水蒸気の分圧) 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**^高という。飽和水蒸気圧は、気温が上がると大きくなる。以下のような近似式を用いて、飽和水蒸気圧を計算することができる。

$$e_s = 611 \exp\left(17.27 \frac{T - 273.16}{T - 35.86}\right)$$

ただし、 e_s は飽和水蒸気圧 (Pa)、 T は絶対温度 (K) である。0°C は 273.15K に相

当する。

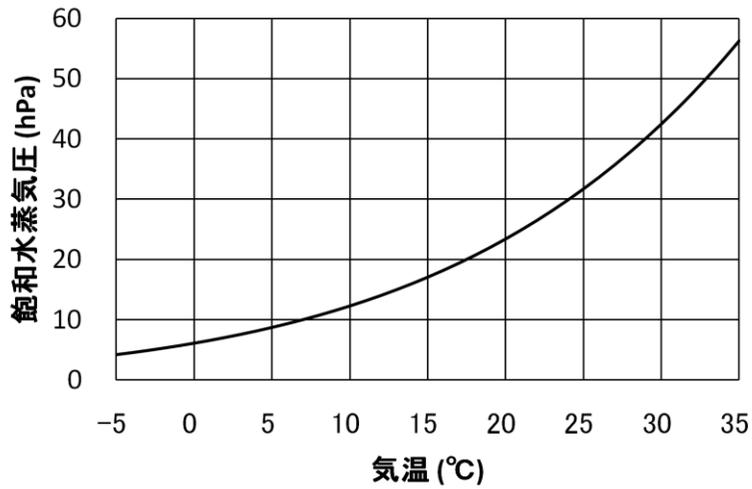


図 2-1: 気温と飽和水蒸気圧との関係

- ☞ 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。また、飽和水蒸気圧の代わりに、**飽和水蒸気量^中**を用いる。

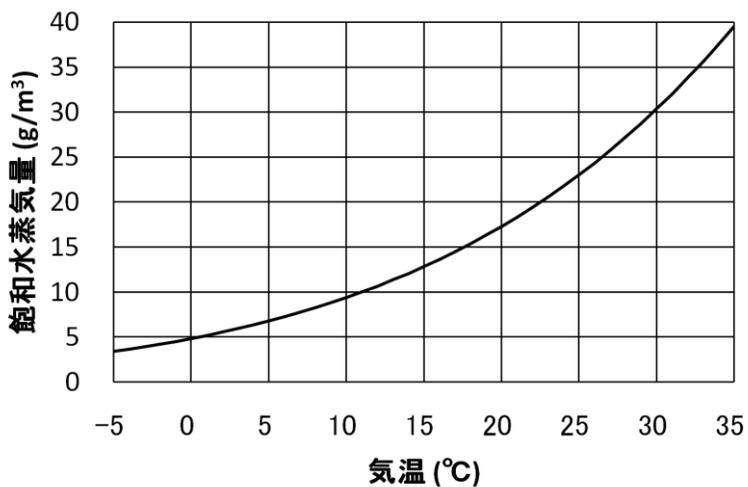


図 2-2: 気温と飽和水蒸気量との関係

相対湿度^高 (**湿度**^中) 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(18.02)と乾燥空気の平均分子量(28.97)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(水蒸気圧)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、水蒸気圧と飽和水蒸気圧が等しくなると水蒸気の凝結が始まったときの温度を**露点温度**(**露点**^中)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温度は高い。

露点温度は常に気温と等しいか低い。気温と等しい場合は相対湿度が 100%である。気温と露点温度との差が 3℃のとき、相対湿度はおよそ 80%である。なお、水蒸気圧が飽和水蒸気圧を超えても凝結しない状態を**過飽和**^高という。

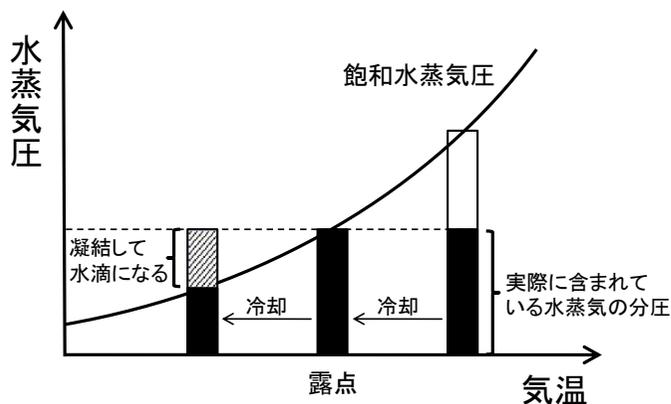


図 2-3: 気温と水蒸気圧との関係

- ☞ 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。
- ☞ 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露点を定義する。圧力一定という条件で冷却した場合には、厳密には水蒸気量 (g/m^3) は変化してしまうので、水蒸気量が一定であるとして定義した露点は、真の露点とは一致しない (条件によって 1℃程度の誤差が生じることがある)。

(3) 大気の圧力

気圧、つまり大気の圧力とは、単位面積に加わる空気の重さであると考えてよい。気圧の単位としてはパスカル (Pa) を用いる。1Pa は、 1m^2 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 1cm^2 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。
- ☞ 圧力の厳密な定義は、単位面積に加わる力である。気象学では、多くの場合、力の大きさは空気の重さにほぼ等しいと考えてよい。中学校理科第 2 分野においても、単位面積に加わる空気の重さとして気圧を定義している。

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、 ρ は密度、 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。

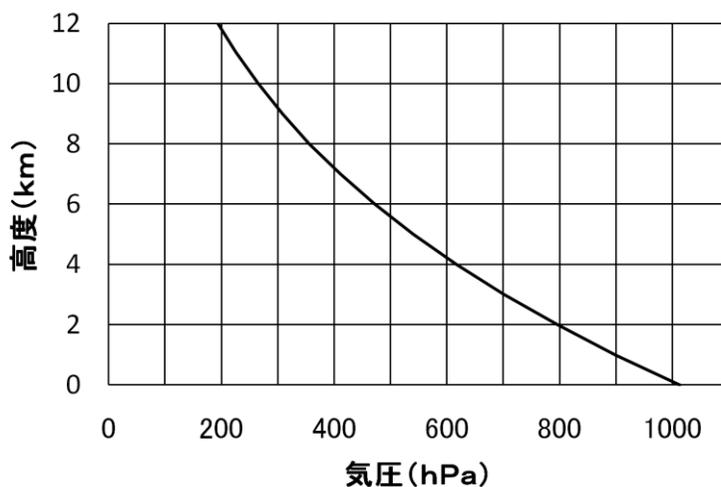


図 2-4: 高度と気圧との標準的な関係

☞ 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しない。

3. 観測編

(1) 用意するもの

アネロイド気圧計（本体、ケース）、乾湿計、
アスマン通風乾湿計（本体、三脚、ゼンマイ用ネジ、スポイト、ケース）、
携帯用風向風速計、コンパス、メジャー、画用紙（遮光用）

（以上は班に1個ずつ）

時計（秒針のある腕時計など）、筆記用具（ペン、鉛筆、消しゴム、下敷き）、
関数電卓（またはノートパソコン）（指数関数を計算できるもの）、記録用紙

※筆記用具は各自持参してください。時計、関数電卓は可能であれば持参してください。

(2) 準備

記録用紙に、班、氏名、共同実験者名（全員、姓のみで可）を記入しなさい。測器を受け取ったら、アネロイド気圧計、アスマン通風乾湿計、携帯用風向風速計の製造番号を確認し、記録用紙に記入する。観測の際には必ず番号を確認し、途中で入れ替わらないように注意する。

☞ 機材に責任を持つという意味だけでなく、測定精度の把握という観点で、製造番号の確認は必要である。学校現場でもそのように指導したい。番号がわかりにくい場合は、1、2、3、…とラベルを貼っておいて、その番号を記録させるとよい。

(3) 観測

本講習では、地上と屋上で、気圧、乾球温度、湿球温度、風向、風速を測定する。観測機器は各班に1台であるが、測定値は必ず自分自身で読むこと。測定値は鉛筆ではなくペンで記録することが望ましい（間違いがあっても二重線で消し、履歴が残るようにする）。

☞ 学校現場においては、測器が1人1台ではなく、班で測定をする場合でも、測定値は必ず自分で読むように指導する。

☞ 中学校や高等学校の段階では、ペンでの記入は必ずしも指導しなくてよい。

観測場所に着いたら、場所、標高（単位はm、有効数字は小数点第1位まで）、測定日（年は西暦）、時刻（日本標準時、24時制）を必ず記録する。地上で通常的气象観

測を行なう場合、地面が芝などの草で覆われていて、また、周囲が開けていて日射や風を遮るものがない場所を選ぶとよい。

- ☞ 野外で観察を行なうときには、場所と日時を記録する習慣をつける。
- ☞ 中学校理科第2分野では、学校内のさまざまな場所で気象観測を行なって結果を比較する。この場合、観測場所によっては、上記の条件を満たさないこともある。しかし、標準的な気象観測の条件は上記の通りであるということを教えておくことが望まれる。

➤ **天気と雲量^中**：測器を用いた測定をする前に、天気と雲量、雲形、雲の方向、雲の分布、日射の有無を記録する。雲量は雲が全くない場合は0、完全に雲に覆われている場合は10とする（整数値）。降水などの現象がない場合、雲量0～1は快晴、2～8は晴れ、9～10はくもりである。日射の有無とは関係なく判断する。

雲形（雲の種類）は、下の表と別紙1に示した十種雲形に従って、観測された雲を多いものから順にすべて記号で記録する。雲の方向は、雲が移動していく方向を8方位で記入する。方位はコンパスによって確認する。関東地方においては、磁石の指す北は、実際の北よりも西に7度程度ずれている（これを偏角という）。天頂から離れている場合など雲の向きがわからない場合は「×」、ほとんど静止している場合は「-」と記入する。雲形ごとに異なる場合は、雲形ごとに記録する。雲の分布は所定の欄に模式図として記入する。どの種類の雲がどの方角に分布しているかわかるように記入すればよい。

日射の有無は通常の観測項目ではないが、あとで、気温などのデータを解析するとき参考になるので、記録しておく。他に気がついた点があれば書き留めておく。

表 3-1: 十種雲形

	雲形	俗称	英語名	記号
上層雲 (5~13km)	巻雲	すじ雲	cirrus	Ci
	巻積雲	うろこ雲	cirrocumulus	Cc
	巻層雲	うす雲	cirrostratus	Cs
中層雲 (2~7km)	高積雲	ひつじ雲	altocumulus	Ac
	高層雲	おぼろ雲	altostratus	As
	乱層雲	あま雲	nimbostratus	Ns
下層雲 (~2km)	層雲	きり雲	stratus	St
	層積雲	うね雲	stratocumulus	Sc
下層から 上層の雲	積雲	わた雲	cumulus	Cu
	積乱雲	かみなり雲	cumulonimbus	Cb

- ☞ 中学校理科第2分野では、以上の項目のうち、日射の有無以外の項目をすべて観察することになっている。
 - ☞ 小学校の理科では、雲の量（雲量）が0～8のときは晴れ、9～10のときはくもりとしている。
 - ☞ 中学校理科第2分野で、十種雲形を取り扱う。単純な丸暗記には意味がないが、出現する高度によって整理しながら理解したい。
 - ☞ 雲の観察にあたっては、教科書などに載っている写真と見比べながら、雲の種類を同定し記録するとよい。記号ではなく、「乱層雲」、「積乱雲」のような言葉でよい。
 - ☞ 雲の方向は、雲が移動していく方向を記録するが、わかりにくければ、「南西→北東」のように記録させるとよい。
 - ☞ 地磁気の偏角は中学校の理科第2分野では扱わないが、高等学校に地学で扱う。
- **アネロイド気圧計^中**：本来屋内用なので、特に慎重に取り扱うこと。観測の際は水平に置かなければいけない（水平に置かないと正しい値を示さない）。衝撃を加えたり、直射日光に当てたり、濡らしたりしないように注意する。乾湿計や風向風速計と厳密に同じ場所で計測する必要はないので、付近の建物の中で差し支えない場所など、水平に安定して設置できる場所を選ぶ。地面（基準面）からの高さ（単位はm、有効数字は小数点第1位まで）を記録しておく。気圧変化に対す

る反応が遅れることがあるので、測定前にガラスを軽くたたくとよい。気圧の値（単位はhPa、有効数字は小数点第1位まで）を記録する。

☞ 中学校理科第2分野でアネロイド気圧計を取り扱う。

- **乾湿計**^中: 画用紙などで日よけを作り、直射日光を当てないように注意する。また、風通しを確保し、人間の体温や呼気の影響を避けるように留意する。気象庁では、気温は地上1.5mで計測することになっているので、今回もこれに近い高さで計測するように努める。球部の地面（基準面）からの高さ（単位はm、有効数字は小数点第1位まで）をメジャーで測定し記録しておく。

2本の温度計は、どちらもアルコール温度計である。このうち左側は乾球温度計（普通の温度計）で、右側は湿球温度計である。湿球温度計の球部はガーゼで覆われている。容器に水を入れ、ガーゼを十分に湿らせる。ガーゼには手を触れないこと。乾球温度と湿球温度（単位は℃、有効数字は小数点第1位まで）を記録する。

☞ 小学校の理科では（乾球）温度のみを測定する。

☞ 中学校理科第2分野では乾湿計を用いて、相対湿度の測定を行なう。

☞ 乾湿計による相対湿度の測定においては、（算出された相対湿度だけでなく）湿球温度の値を必ず記録するように指導する。

☞ 温度は小学校の理科では1の位まで、中学校の理科第2分野では小数点第1位まで読む。中学校では、気温がちょうど20℃のときには「20℃」ではなく「20.0℃」と記録できるように指導するとよい。

☞ アルコール温度計は最大で1℃程度の誤差を持っている。中学校では小数点第1位まで読むことになっているが、指導する立場としては、誤差の大きさにも留意しておきたい。

☞ 小学校の理科では児童の身長を考慮して、高さ1.2mで計測することがある。

☞ 日よけは、風通しを確保しながら直射日光を避けることができるのであれば、細かい形状などに過剰に注意を払う必要はない。

- **アスマン通風乾湿計**: 三脚につるして使用する。気象庁では、気温は地上1.5mで計測することになっているが、今回は携帯式の三脚を用いるので、これよりも低くなる。本実験で使用する乾湿計には日よけがついているので、短時間の観測であれば直射日光に当てても問題ない。通風口の地面（基準面）からの高さ（単位

はm、有効数字は小数点第1位まで)をメジャーで測定し記録しておく。

2本の温度計は、どちらも水銀温度計である。このうち右側は乾球温度計(普通の温度計)で、左側は湿球温度計である。湿球温度計の球部はガーゼで覆われている。金属筒をはずし、スポイトを使ってガーゼを十分に湿らせる。ガーゼには手を触れないこと。気温が同じであっても、空気が乾燥している場合のほうが湿球温度は低くなる。ゼンマイを巻いて5分間以上通風し、示度が安定していることを確かめてから測定値を読む。手で触ったり、息がかかたりしないように注意する。乾球温度と湿球温度(単位は℃、有効数字は小数点第1位まで)を記録する。正確に読むためには、目線が温度計に対し直角になるようにする。示度の変化の影響を防ぐため、小数点第1位を先に読み、次に、1の位、10の位を読むとよい。

- ☞ 中学校理科第2分野で通風式ではない乾湿計を用いている。原理は通風式、非通風式とも同じである。
- ☞ 水銀温度計は、アルコール温度計よりも精度が高いが、高価である。小中学校や高等学校の理科の実験では一般にアルコール温度計が用いられている。
- ☞ 万が一、水銀温度計を破損した場合、水銀を紙、スポイトなどで確実に回収する。回収した水銀を金属製の容器に入れてはいけない(容器が溶けることがあるため)。金属水銀を過剰に恐れる必要はないが、水銀の蒸気は有害である。回収した水銀は各自治体の規則にしたがって廃棄する。

- **携帯用風向風速計**：測定の前に、ビューフォート風力階級表(資料1)を用いて、風力を判断し記入しておく。

携帯用風向風速計は、手に持ち水平を保ったまま高く持ち上げて使用する。風向、風速の観測は本来10分間行なうことになっている(たとえば12時の観測値は11時50分から12時00分までの観測結果である)が、本実験では30秒間とする。風向風速計の高さは、一般には10mが標準であるが、実際には観測所ごとに異なる。本実験の観測においては、風速計の地面(基準面)からの高さ(単位はm、有効数字は小数点第1位まで)を記録しておくこと。

測定の前に、背面のつまみを回して、風速の目盛りをゼロに戻しておく。測定開始までは側面のストッパーを押さえておく。時計を見ながら、30秒間だけストッパーから手を離す。この間、風杯の回転に応じて、針が進んでいく。30秒経ったらストッパーで固定し、目盛りを読む。風向は、30秒間のうち、最も頻度の多かった風向を観測結果とする。正確に30秒間測定すること。測定中は、

できるだけ測定値に人為的な影響を与えないように注意する。風向（16方位）と風速（単位はm/s、有効数字は小数点第1位まで）を記録する。無風で風向計が反応しないときは「不定」と記入する。

- ☞ 中学校理科第2分野では、風向は携帯式の風向計（自作を含む）で測定し、風速はビューフォート風力階級表で判断する。
- ☞ 風向を測るときは、風向とは風の吹いてくる方向であることを徹底する。天気予報や日常生活での一般的な用法においても同様の定義である。

4. 解析編

ここでは、観測した結果に基づいて、空気中に含まれている水蒸気の量や、空気の密度を計算し、観測場所による湿度の違いや、地上と屋上との気圧差について解析する。

まず、それぞれの観測点について、以下の解析を行ないなさい。これらの課題では、相対湿度や、水蒸気量、比湿、空気の密度などを計算する。

(1) 相対湿度の算出

①乾球温度、湿球温度から、乾球温度と湿球温度の差（単位：℃、有効数字：小数点第1位まで）と相対湿度（単位：%、有効数字：1の位まで）を算出しなさい。相対湿度を算出するときには湿度換算表（資料2、3）を用いなさい。換算表は1℃単位であるから必要に応じ補間して用いること。非通風式と通風式とでは換算表が異なるので注意する。また、湿球が氷結している場合にも、別の換算表（本講習では省略）を用いる（1～2%程度の差がある）。なお、気温が0℃未満であっても、過冷却のため湿球が氷らないことがある。

- ☞ 中学校の理科第2分野では、湿度換算表を用いて相対湿度を算出する。
- ☞ 同じ気温でも空気が乾燥しているときのほうが蒸発熱を奪われて冷たく感じることを指摘すると、乾湿計を用いた湿度の測定の原理を、実感を伴って理解できる。
- ☞ 乾球温度、湿球温度を小数点第1位まで測定しているので、換算表は補間して用いたほうがよいが、アルコール温度計の実際の精度を考えると、測定値にもっとも近い値に対応する湿度を読み取るだけでもよいだろう。

以下の解析においては、算出した数値を、それ以後の計算で用いる場合には、有効数字を1桁多くとってから用いること。

- ☞ 高等学校の理科では、計算の途中では、有効数字を1桁多くとることを教える。

(2) 水蒸気量の算出

①気温（乾球温度）（通風式乾湿計によるもの）から飽和水蒸気量を求めなさい。（単位： g/m^3 、有効数字：小数点第1位まで）。飽和水蒸気量の表（資料4）を用いてよい。表は1℃単位であるから必要に応じ補間して用いること。

②飽和水蒸気量と相対湿度（通風式乾湿計によるもの）から水蒸気量を算出なさい（単位：g/m³、有効数字：小数点第1位まで）。

☞ 中学校理科第2分野では、水蒸気量や飽和水蒸気量、露点に言及している。この部分について、観測より前に学習しているのであれば、自分で測定したデータについて飽和水蒸気量や水蒸気量、露点を実際に計算するとよい。

③水蒸気量から露点を求めなさい（単位：℃、有効数字：1の位まで）。飽和水蒸気量の表（資料4）を用いてよい。

☞ 中学校理科第2分野では、水蒸気量を用いて露点を定義している。基礎編で学んだとおり、水蒸気量によって定義した露点には誤差が含まれるので、有効数字は1の位までで考える。

（3）密度の算出

【分圧の算出】

①気温（乾球温度）から飽和水蒸気圧を算出なさい（単位：hPa、有効数字：小数点第1位まで）。計算にあたっては以下の近似式を用いること。

$$e_s = 611 \exp\left(17.27 \frac{T - 273.15}{T - 35.86}\right)$$

ただし、 e_s は飽和水蒸気圧（Pa）、 T は気温（K）である。0℃は273.15Kに相当する。

☞ 飽和水蒸気圧は温度のみの関数である。高等学校の地学や化学で、飽和水蒸気圧を取り扱う。

②飽和水蒸気圧と相対湿度から水蒸気圧を算出なさい（単位：hPa、有効数字：小数点第1位まで）。

③気圧と水蒸気圧から、乾燥空気分圧を算出なさい（単位：hPa、有効数字：小数点第1位まで）。

【密度の算出】

④乾燥空気分圧と気温（乾球温度）から乾燥空気の密度を算出なさい（単位：kg/m³）。

g/m^3 、有効数字：小数点第4位まで)。計算にあたっては以下に示した、以下の状態方程式を用いること。

$$p = \rho RT$$

ここで、 ρ は気体の密度 ($\text{k g}/\text{m}^3$)、 p は圧力 (Pa) である。気体定数 R は、乾燥空気の場合、 $R=287.0 \text{ J}/\text{k g} \cdot \text{K}$ である。ここで圧力 p の単位が Pa である点に注意すること。

- 上記の状態方程式は、温度が一定のとき密度は圧力に比例すること（ボイルの法則）や、圧力が一定のとき密度は絶対温度に反比例すること（シャルルの法則）を示している。
- 上記の状態方程式においては、あらかじめ、乾燥空気の平均分子量が仮定されているので、物質量 (mol) を使わずに密度の値を直接取り扱う。

⑤同様に、水蒸気圧と気温から水蒸気の密度を算出なさい（単位： $\text{k g}/\text{m}^3$ 、有効数字：小数点第4位まで）。水蒸気の場合、気体定数 R は $R=461.4 \text{ J}/\text{k g} \cdot \text{K}$ である。

- 乾燥空気と水蒸気とでは（平均）分子量が異なるので、気体定数として別々の値を用いる。

⑥乾燥空気と水蒸気の密度を足し合わせて、空気（乾燥空気と水蒸気）の密度を求めなさい（単位： $\text{k g}/\text{m}^3$ 、有効数字：小数点第4位まで）。

（４）比湿と露点の算出

【比湿の算出】

⑦水蒸気の密度と乾燥空気の密度から比湿を算出なさい（単位： $\text{g}/\text{k g}$ 、有効数字：小数点第1位まで）。比湿とは、水蒸気の密度と、空気（乾燥空気と水蒸気）の密度との比（水蒸気の密度／空気の密度）のことである。

- 比湿は、大気に含まれる水蒸気の濃度のようなものであり、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（変化しない）量である。

【露点の算出】

⑧水蒸気圧から露点を算出なさい（単位： $^{\circ}\text{C}$ 、有効数字：小数点第1位まで）。露点

とは、水蒸気圧と飽和水蒸気圧が等しくなる温度のことである。

(5) 気圧差の解析

次に、地上と屋上の気圧差に関して、以下の計算を行ないなさい。

【気圧差の算出】

①空気（乾燥空気と水蒸気）の密度（地上と屋上の平均値）から、地上と屋上の気圧差（地上の気圧－屋上の気圧）を推定しなさい（単位：hPa、有効数字：小数点第1位まで）。以下の式で表されるような静水圧平衡を仮定してよい。

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

ここで、 z は高度、 p は気圧、 ρ は空気の密度、 g は重力加速度である。重力加速度 g の値は $g=9.81\text{m/s}^2$ とする。

➤ 気圧は一般に上空に行くほど低くなる。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と考えられる。このように、鉛直方向の圧力傾度が空気にはたらく重力とつり合っている状態のことを静水圧平衡という。実際の気圧は、静水圧平衡に近い状態にあることが多い。

②観測データにおける、地上と屋上の気圧差（地上の気圧－屋上の気圧）を計算しなさい（単位：hPa、有効数字：小数点第1位まで）。

5. 各種気象情報との比較

(1) 雲画像

気象衛星による雲画像（雲写真）には**可視画像**と**赤外画像**がある。可視画像は可視光で見た雲のようすを表している。厚い雲ほど白く見える。夜間は撮影できない。一方、赤外画像は赤外線で見えた雲のようすを表しており、温度の低い場所が白く表現されている。雲頂高度の高い雲ほど白く見える。上層まで発達した積乱雲を識別するときによく使われる。夜間も撮影可能である。理科の教科書や天気予報では赤外画像が使われることが多い。

表 5-1: 雲の種類と雲画像での見えかた

雲の種類	赤外画像	可視画像	形状
積乱雲	白	白	団塊状
上層雲（巻雲、巻層雲）	白	灰色	なめらか
下層雲（層雲、層積雲）	暗	白	なめらか

下の図は、2003年8月16日9時の赤外画像と可視画像である。この年は記録的な冷夏であり、日本付近に前線が停滞している。北海道や東北地方の太平洋沿岸では、冷たい北東風に伴って、層雲が発生している。可視画像では太平洋沿岸の層雲がはっきりと見えているが、雲頂高度が低いため赤外画像ではほとんど見えない。

赤外画像

可視画像（左と同じ領域）

(2003年 8月16日 9時)

天気図

雲画像は高知大学気象頁から、天気図は気象庁天気図から入手
図 5-1: 赤外面像と可視画像

- ☞ 小学校の理科や中学校の理科第2分野で雲画像の活用を学ぶ。
- ☞ 中学校の理科第2分野では、赤外面像と可視画像の違いに言及している教科書もある。
- ☞ 層積雲や層雲のような雲頂の低い雲を赤外面像で見ると、地上から観察すると曇りであっても、雲画像では白く写っていないことがある。雲画像と天気を比較するときには、このような点に注意が必要である。

(2) アメダス

アメダスとは、地域気象観測システムのことである。全国約1300地点で、降水量を測定している。このうち、約850地点では、風向・風速、気温、日照時間も観測している。また、積雪の多い地域では、積雪の深さも測定している。降水量に関しては、おおむね17km間隔にデータが得られる。雨や雪の分布を調べるときに有効である。天気予報やウェブページでよく用いられる分布図は、直前1時間の積算降水量である。たとえば、6時の降水量データは5時0分から6時0分までの1時間の降水量を示している。

- ☞ 小学校の理科や中学校の理科第2分野では、アメダスなどの気象情報の活用にも言及している。最寄りの観測地点における最新の風向・風速、気温のデータをインターネットで入手して、自分で測ったデータと比較するとよい。

(3) 天気図

一般に低気圧のまわりでは天気が悪く、高気圧のまわりでは天気がよい、という傾向がある。また、前線は、寒気と暖気がぶつかる場所であるので、天気が悪くなりやすい。

[低気圧と高気圧]

低気圧^中とは周囲より気圧の低いところ、**高気圧**^中とは周囲より気圧の高いところのことである。**等圧線**^中とは天気図上で気圧の等しい場所を結んだ線であるが、低気圧や高気圧のまわりでは等圧線は閉じている。北半球の場合、低気圧のまわりでは風が反時計回りに吹き込み、高気圧のまわりでは時計回りに吹き出す。低気圧の付近では上昇気流が生じて雨雲が発達しやすい。逆に、高気圧に覆われると下降気流が生じて雲が発生しにくい。

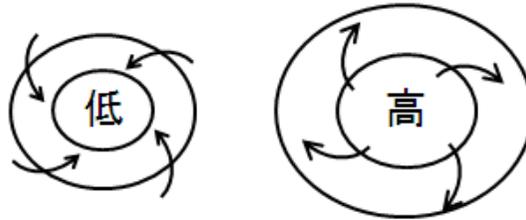


図 5-2: 低気圧と高気圧

☞ 低気圧、高気圧の定義、そのまわりの風の様子は、中学校の理科第2分野で学習する。

[温帯低気圧と前線]

温帯低気圧^中は、暖気と寒気がぶつかり合う中緯度で発生する低気圧で、しばしば前線を伴う。一般に、温帯低気圧は**偏西風**^高に乗って西から東へ移動する。温帯低気圧の典型的なライフサイクルは図のようになっている。温帯低気圧は**停滞前線**^中上で発生することが多い。停滞前線は、寒気と暖気が同じ程度の勢力でぶつかっている場所である。前線上で低気圧が発生すると、低気圧の東側では南よりの風が卓越し、暖気の勢力のほうが強くなる。このような前線のことを**温暖前線**^中という。一方、低気圧の西側では北よりの風が卓越し、寒気の勢力のほうが強くなる。このような前線を**寒冷前線**^中とよぶ。温帯低気圧は温暖前線と寒冷前線を伴いながら発達する。温暖前線は暖気の勢力のほうが強いので北に、寒冷前線は寒気の勢力のほうが強いので南に移動する。温暖前線よりも寒冷前線の移動のほうが多いので、やがて寒冷前線は温暖

前線に追いつく。こうしてできた前線が**閉塞前線**^中である。

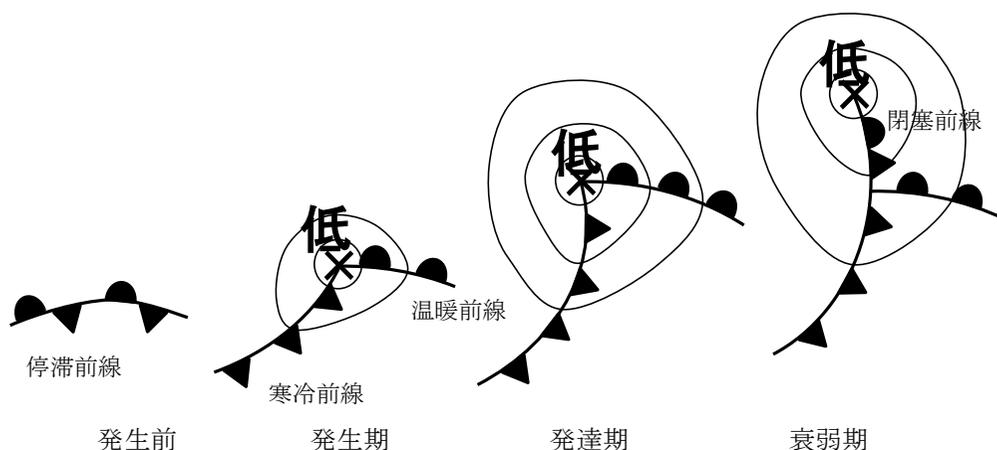


図 5-3: 温帯低気圧のライフサイクル

温暖前線付近では南から暖気が流入し、前線面に沿って広い範囲で比較的緩やかな上昇気流が生じている。このため、前線の東側では巻雲や巻層雲などの上層雲が生じることが多い。前線付近では、高層雲や**乱層雲**^中などの雲が発生しやすく、広い範囲で持続的な降水がもたらされる。温暖前線が通過すると気温は上昇するが、昇温が明瞭でないこともある。

一方、寒冷前線付近では北から寒気が進入し暖気の下に潜りこんでいるので、前線付近の狭い範囲で強い上昇気流が生じる。このため寒冷前線付近では**積乱雲**^中が発達し、狭い範囲で短時間に強い降水が生じる。通過後には北寄りの風が吹き、気温が急激に低下することが多い。

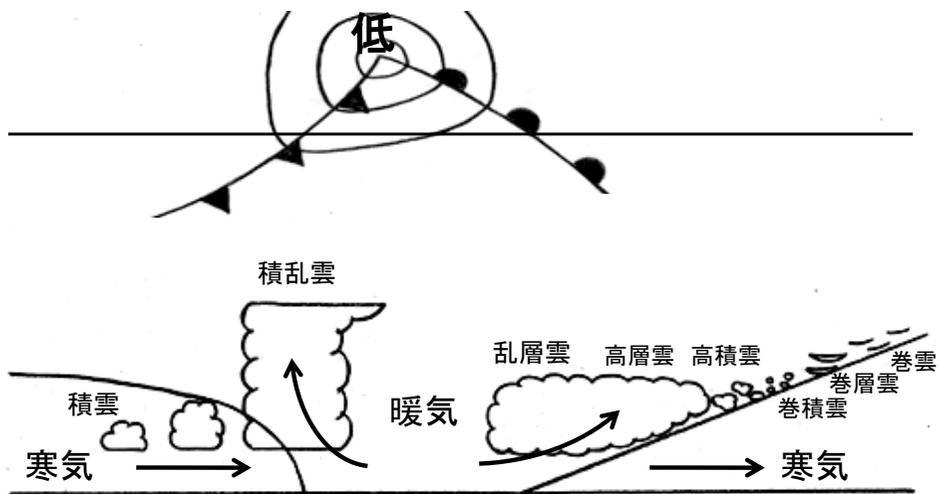


図 5-4: 温帯低気圧の構造

温帯低気圧や前線に伴う雨雲の分布や動きは、雲画像によって確認できる。

(2011年 4月22日12時)

図 5-5: 温帯低気圧の例

気象庁のウェブサイトより

図 5-6: 雲画像 (赤外) の例

温帯低気圧は春や秋によく見られる。次の図のように、春や秋には、温帯低気圧や移動性高気圧が交互に通過することによって、天気が西から東へ周期的に変化することが多い。



気象庁のウェブサイトより

図 5-7: 温帯低気圧の通過に伴う気圧配置の変化

- ☞ 小学校の理科では天気図や低気圧、高気圧を明示的には取り上げない。しかし、雲画像などを用いて天気が西から東へ変わることを教えており、それに伴う雲の量や種類の変化も取り扱っている。
 - ☞ 中学校の理科第2分野では、小学校の理科の内容と関連づけて学習することが望まれる。
- ☞ 中学校の理科第2分野においては、天気図を学習する前であっても、自分が観測した天気や雲のようすと、天気図を簡単に比較することは可能であろう。

6. 考察

(1) 天気と雲

①観測された天気、雲と雲画像（可視光、赤外線）にはどのような関係があるか、考察しなさい。

②観測された天気、雲と天気図にはどのような関係があるか、考察しなさい。

- 雲量が同じであっても、雲の種類や雲画像の種類（可視光、赤外線）によって、雲画像での写り方は異なる。自分で観測した結果と雲画像を対応させて理解できるとよい。
- 一般には、低気圧や前線が近くになれば、雲量が多く、くもりや雨になることが多い。逆に高気圧の近くでは、雲量が少なく、晴れることが多い。

(2) 気温と湿度

①日なたと日かげでは、気温にどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

②日なたと日かげでは、相対湿度および水蒸気量にどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

③非通風式と通風式の乾湿計の間には、測定値にどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

- 日なたと日かげでは、通常は、日なたのほうが、気温が高くなる。体感温度としては日射による直接的な影響も大きいので、気温だけでみると、体感温度ほどには差が生じないこともある。
- あまり離れた場所でなければ、水蒸気量は変化しないと考えられる。日なたでは気温が高いので、飽和水蒸気量が大きくなり、そのぶんだけ、相対湿度は小さくなると期待される。
- 風が弱く、日射が強い環境では、非通風式と通風式の乾湿計の間で差が出やすい。そのような状況では、非通風式のほうが温度系の示す値は高くなりやすい。

(3) 風向・風速

①地上と屋上では、風速にどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

②風力階級から判断した風力に対応する風速と、風速計で測定した風速にはどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

③地上で観測した風向と、雲の方向との間にはどのような違いがあるか、あるいはないか。また、その原因を考察しなさい。

- 通常は、障害物の少ない屋上のほうが風速は大きい。風速は短い時間で刻々と変化していくので、今回のような測定方法の場合、必ずしも屋上での観測値のほうが大きくなるとは限らない。
- 風力階級は高い木の揺れ方などから判断している。今回測定した風速は地上2 m程度の高さでの値なので、風力階級から評価した風速のほうが大きくなることが多い。
- 夏季を除けば、上空に行くほど偏西風が強くなる。このため、上空の雲ほど東に動く傾向がある。

(参考1)

クラウジウス・クラペイロンの関係式

温度が高くなると飽和水蒸気圧は大きくなる。熱力学の法則を用いると、温度と飽和水蒸気圧との関係を定量的に記述できる。

いま、体積が一定の容器の中に、液相と気相の水が存在して、平衡状態になっているとする。一般に、物質の内部エネルギーを U 、圧力を p 、比容を α 、温度を T 、エントロピーを S とおくと、**ギブスの自由エネルギー** G は、

$$G = U + p\alpha - TS$$

と書ける。定圧、等温という条件のもとでの相変化においては、 G の変化 ΔG は

$$\Delta G = \Delta U + p\Delta\alpha - T\Delta S$$

と書ける。熱力学の第1法則（エネルギー保存則）より、物質に加えられた熱 Q は

$$Q = \Delta U + p\Delta\alpha$$

である。また、熱力学の第2法則より、一般に

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

が成り立つ。したがって、

$$\Delta G = \Delta U + p\Delta\alpha - T\Delta S \leq 0$$

である。平衡であれば、

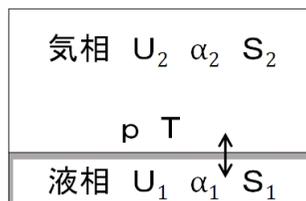
$$\Delta G = \Delta U + p\Delta\alpha - T\Delta S = 0$$

である。このように、ギブスの自由エネルギーは、定圧、等温条件下での平衡を論じるときに用いられる。

ここでは、液相と気相との間の相変化を考えているので、液相における U 、 α 、 S の値を U_1 、 α_1 、 S_1 、気相における値を U_2 、 α_2 、 S_2 とおくと、

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad \Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \quad \Delta S = S_2 - S_1$$

である。



平衡状態であれば、 $\Delta G = 0$ だから、

$$U_1 + p\alpha_1 - TS_1 = U_2 + p\alpha_2 - TS_2$$

が成り立つ。ここで、圧力 p と温度 T が微小に変化したときの各変数の変化を考えると、

$$dU_1 + \alpha_1 dp + p d\alpha_1 - S_1 dT - T dS_1 = dU_2 + \alpha_2 dp + p d\alpha_2 - S_2 dT - T dS_2$$

である。一方、熱力学の第1法則より、

$$d'Q_1 = dU_1 + pd\alpha_1$$

が成り立つが、平衡を保ちながら準静的に加熱する場合には、 $d'Q_1 = TdS_1$ なので、

$$dU_1 + pd\alpha_1 - TdS_1 = 0$$

となる。同様に、

$$dU_2 + pd\alpha_2 - TdS_2 = 0$$

も成り立つ。したがって、

$$\begin{aligned}\alpha_1 dp - S_1 dT &= \alpha_2 dp - S_2 dT \\ (S_2 - S_1) dT &= (\alpha_2 - \alpha_1) dp\end{aligned}$$

となって、

$$\frac{dp}{dT} = \frac{S_2 - S_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

が得られる。 $S_2 - S_1$ は、蒸発熱 L を用いて、 $S_2 - S_1 = \frac{L}{T}$ と書けるので、

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

と表すこともできる。この関係式を、**クラウジウス・クラペイロンの関係式**という。

上の関係式において、通常は $\alpha_2 \gg \alpha_1$ だから、 $\alpha_2 - \alpha_1 \approx \alpha_2$ と近似できる。さらに、理想気体の状態方程式 $p\alpha = RT$ を (R は気体定数) を用いると、 $\alpha_2 - \alpha_1 \approx \frac{RT}{p}$ と表せる。この近似を用いると、

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Lp}{RT^2}$$

となって、

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{L}{RT^2}$$

が得られる。蒸発熱 L を定数として、両辺を積分すると、

$$\ln p = -\frac{L}{RT} + C' \quad (C' \text{ は定数})$$

となって、結局、

$$p = C \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) \quad (C \text{ は定数})$$

と書けることがわかる。

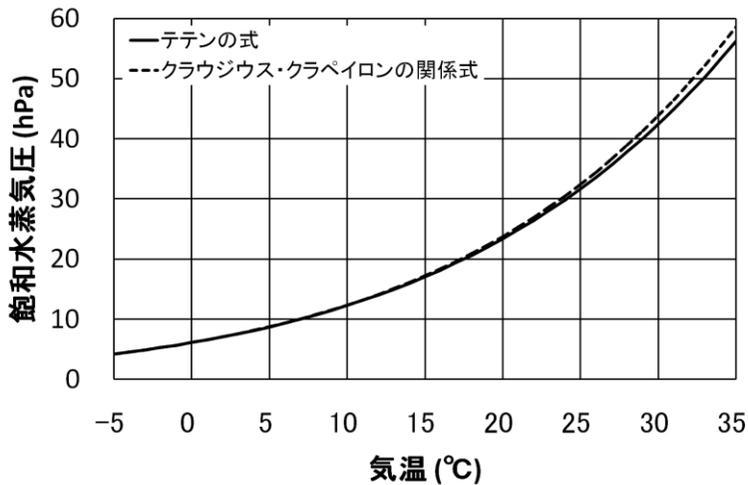
水蒸気の場合、 $R = 461.4 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$ 、 $L = 2.500 \times 10^6 \text{ J} / \text{kg}$ である。したがって、飽和水蒸気圧 e_s は、 0°C における値を e_{s0} として、

$$\begin{aligned} e_s &= C \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) = e_{s0} \exp\left[\frac{L}{273.15R}\left(\frac{T-273.15}{T}\right)\right] \\ &= e_{s0} \exp\left(19.84 \frac{T-273.15}{T}\right) \end{aligned}$$

と表すことができる。実際には、飽和水蒸気圧の実用的な近似式として、

$$e_s = 611 \exp\left(17.27 \frac{T-273.15}{T-35.86}\right)$$

がしばしば用いられている（テテンの式）。クラウジウス・クラペイロンの関係式から導いた式において、 0°C における値がテテンの式と一致するように定数 p_0 を定めて比較すると、両者はよく似た形になっていることがわかる。



(参考2)

高度と気圧との関係

一般に上空に行くほど気圧は低くなる。理想気体の状態方程式と静水圧平衡の関係を用いると、高度と気圧との関係を定量的に記述できる。

以下、大気は等温であると考え、静水圧平衡の関係は、

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

と書ける。ただし、 z は高度、 p は圧力、 ρ は密度である。また、 g は重力加速度であり、 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ である。一方、理想気体の状態方程式は、

$$p = \rho RT$$

である。ただし、 T は温度である。気体定数 R は、乾燥空気の場合、 $R = 287.0 \text{ J/kg K}$ である。この状態方程式を変形すると、

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

となる。これを静水圧平衡の関係に代入して、

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{g}{RT} p$$

が得られる。この常微分方程式を解くと、

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dz} = -\frac{g}{RT}$$

両辺を z について積分して、

$$\ln p = -\frac{g}{RT} z + C$$

ただし、 C は積分定数である。両辺の指数をとると、

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{g}{RT} z\right)$$

が得られる。ここで、 $z=0$ で $p=p_0$ という条件を用いた。この関係式において、気圧が e^{-1} 倍に減少する高さ H_0 は、

$$H_0 = \frac{RT}{g}$$

である。この H_0 を**スケールハイト**という。現実の大気では、スケールハイトは8 km程度である。

天気図や観測データの入手について

過去の天気図、アメダスの観測データは、気象庁のウェブサイトですぐ入手できる。

- 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/obsmenu.html>
 - 過去の天気図 <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>
 - アメダスの観測データ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
 - 天気図 <http://www.jma.go.jp/jp/g3/>
 - 雲画像 <http://www.jma.go.jp/jp/gms/>
 - アメダス分布図 <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>
 - レーダー（解析雨量） <http://www.jma.go.jp/jp/radame/>
- } 過去半日～2日程度

また、過去の雲画像は、

- 高知大学気象頁 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>
 - 赤外画像 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/gms.fareast/>
 - 可視画像 <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/JPN/>

で入手可能である。さらに、最新の専門的な天気図を入手することができるウェブサイトとしては以下のものが挙げられる。

- 北海道放送 <http://www.hbc.co.jp/pro-weather/>
 - アーカイブ <http://www.hbc.co.jp/tecweather/archive/index.html> 過去2週間程度
- いであ（株） <http://www.bioweather.net/detailed/rfax.htm>
- 国際気象海洋（株） <http://www.imocwx.com/wxfax.htm>

また、過去の天気図、気象観測データについては、（財）気象業務支援センターでCD-ROMの形で入手できる（有料）。

- （財）気象業務支援センター <http://www.jmbasc.or.jp/>

※授業に使えるような事例を見つけたら、天気図、雲画像、アメダス分布図、レーダー（解析雨量）を気象庁のウェブページから早めにダウンロードしておくのが無難です。過去にさかのぼる場合は、気象庁のウェブページから過去の天気図（1か月でひとまとまりになったPDF形式のファイル）を入手して必要箇所を切り出して利用し、雲画像は高知大学気象頁から入手することができます。アメダスや解析雨量については、調べた範囲では無償で入手できるサイトはないようです。