宇宙地球物理学実験（気象学分野）　露点の測定

１．はじめに

本実験では、実験室内で気温、湿度、露点を測定する。乾湿計を用いて気温と湿度を測定して気象観測に慣れるとともに、露点の簡単な測定を実践する。また、気温、湿度の測定結果を解析して露点を理論的に計算し、露点の実測値と比較する。

２．用意するもの

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）
（以上は班に１個ずつ）
水銀温度計、ステンレス製コップ（水が入っている）、プラスチック製コップ（氷が入っている）、ガラス棒、スポイト
（以上は２人に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）、
ノートパソコンまたは関数電卓（指数関数と対数関数を計算できるもの）、記録用紙
※時計、筆記用具、ノートパソコンまたは関数電卓は各自持参してください。

３．測定の準備

記録用紙には、班、学籍番号、氏名、共同実験者名（全員、姓のみで可）を正しく記入しなさい。

測器を受け取ったら、アスマン通風乾湿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。

４．測定

本実験では、実験室内で乾球温度、湿球温度、露点を測定する。乾湿計は各班に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。場所、測定日（年は西暦）、時刻（日本標準時、２４時制）を必ず記録する。また、天気も記録する。他に気がついた点があれば書き留めておく。

［乾球温度と湿球温度の測定（１）］

はじめに、アスマン通風乾湿計を用いて、乾球温度と湿球温度を測定する。アスマン通風乾湿計は、三脚につるして使用する。

２本の温度計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、息がかかっ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取り扱う。原理は同じである。小学校の理科では（乾球）温度のみを測定する。

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）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。

相対湿度が８０％のとき、湿数（乾球温度と露点の差）はおよそ３℃になる。同様に、相対湿度が６４％であれば、湿数はおよそ６℃である。露点のおよその値を予想しておき、次の露点の測定のときに参考にするとよい。

［露点の測定］

大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（露点温度）という。この実験では、ステンレス製コップの中の水をゆっくりと冷却していき、コップの側面に水滴ができたときの水温を露点とする。水温は水銀温度計で測定する。この実験では、水温とコップの表面の温度の差をできだけ小さくするために、熱伝導率が高い金属製のコップを用いている。

☞ 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。

一般に露点は湿球温度よりも低い。そこで、はじめに、ガラス棒（かくはん棒）でかくはんしながら、ステンレス製コップにプラスチック製コップの冷水を注ぎ、水温がおおむね湿球温度と等しくなるようにする。冷水はガラス棒をつたわらせながら注ぐこと。このとき、ステンレス製コップの水の量がコップ全体の３分の２程度に収まるようにする。水の量が多すぎると冷水を加えたときにあふれてしまう。

次に、かくはんしながら、プラスチック製コップの冷水をステンレス製コップにゆっくりと注ぎ、ステンレス製コップの中の水を徐々に冷却していく。精度よく測定するために、できるだけゆっくりと冷やすように注意する。冷水を注ぐときにはスポイトを用いるとよい。ステンレス製コップの側面に水滴がつき、くもり始めたら水銀温度計の示度を読みとり、その値を露点の測定値とする。

実験中は、人間が放出する熱や水蒸気が結果に影響しないように注意する。学校での理科の実験では一般にかくはんするときにはビーカーを手で固定するように指導するが、今回の実験に限っては影響が最小限になるように工夫してよい。ただし、かくはんは、必ずガラス棒によって行なうものとし、温度計でかくはんしてはいけない。

☞　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。中学校理科第２分野では、コップに入れた水に少しずつ氷水を注いで露点を測定する方法も紹介されている。

［乾球温度と湿球温度の測定（２）］

露点の測定が終了したら、できるだけ時間を空けずに、再び、アスマン通風乾湿計を用いて、乾球温度と湿球温度を測定する。以下の解析では、ここで得た乾球温度と湿球温度の値を用いる。

５．測定データの解析

ここでは、気象観測機器によって測定した結果から露点を理論的に計算する。露点の測定の後で測定した乾球温度と湿球温度について、以下の解析（１）～（４）を行ないなさい。これらの課題では、露点を理論的に計算する。

［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）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。

［水蒸気圧の算出］

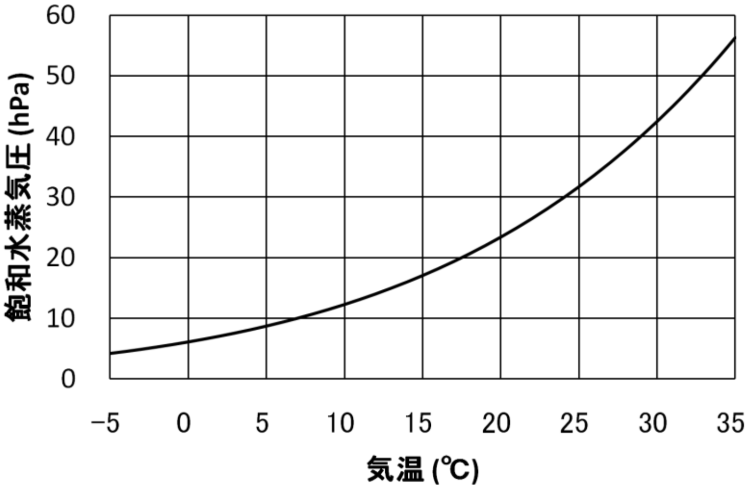
（２）気温（乾球温度）から飽和水蒸気圧を算出しなさい（単位：ｈＰａ、有効数字：小数点第１位まで)。計算にあたっては以下の近似式を用いること。

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

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。**以下、計算問題においては、結果だけでなく計算過程も記すこと。**

☞　飽和水蒸気圧は、温度が高いほど大きい。これは、温度が高いほど、多くの水蒸気を含むことができることを意味している。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。

☞　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（ｇ／ｍ^3）が用いられる。



（３）飽和水蒸気圧と相対湿度から水蒸気圧を算出しなさい（単位：ｈＰａ、有効数字：小数点第１位まで)。相対湿度は水蒸気圧と飽和水蒸気圧との比（水蒸気圧／飽和水蒸気圧）を％で表したものである点に注意すること。

［露点の算出］
（４）一般に温度が低下すると飽和水蒸気圧は低下する。飽和水蒸気圧が水蒸気圧と等しくなるような温度を露点という。水蒸気圧の値から露点を求めなさい（単位：℃、有効数字：小数点第１位まで)。

６．考察

露点の実測値と理論値を比較しなさい。また、比較した結果について、そのようになった原因を考察しなさい。

記録用紙は、学籍番号と氏名の記入を確認のうえ、次回の実験の開始時までに提出してください。

（参考）

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、

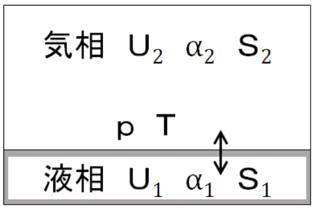
$$\Delta G = \Delta U + p\Delta\alpha - T\Delta S = 0$$

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、

$$dU_1 + \alpha_1 dp + pd\alpha_1 - S_1 dT - TdS_1 = dU_2 + \alpha_2 dp + pd\alpha_2 - S_2 dT - TdS_2$$

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、

$$\alpha_1 dp - S_1 dT = \alpha_2 dp - S_2 dT$$

$$(S_2 - S_1)dT = (\alpha_2 - \alpha_1)dp$$

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、$S_2 - S_1 = \dfrac{L}{T}$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$\alpha_2 >> \alpha_1$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、$\alpha_2 - \alpha_1 \approx \dfrac{RT}{p}$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、

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

となって、結局、

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

と書けることがわかる。

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

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

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℃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。