

地学実験：気圧・気温・湿度分布の観測

2024 年 12 月 26 日

1 概要

気象、気候の診断・予測のために、気圧、気温、密度、湿度（水蒸気量）、風速、微量成分量（例えば二酸化炭素やオゾンの混合比）などの物理量が様々な方法で観測され、解析されている。気象予報などでもそれらの物理量の値が報道されており、目にする機会があるだろう。

今回の実験では、それらの物理量のうち、比較的簡単に観測できる気圧、気温、湿度を、比較的安価に入手できる電子部品で構成した測器を組み立てて観測する。そしてそれら観測した値を用いて、まずは関連する物理量（密度、水蒸気量）を計算して、自分を取り巻く空気の性質を定量的に把握する。さらに測器を持って大学キャンパス内の各所で気圧、気温、湿度分布を観測し、日常的に目にする気象に関わる物理量が、大学キャンパス内という局所的空間内でどの程度時間・空間的に変化しているのか確認し、その変化について考察する。それら一連の内容の詳細については 3 節以降で説明しているので参考のこと。

2 レポート作成・提出要領

実習で行った一連の内容についてレポートにまとめて 2025 年 1 月 8 日（水）までに BEEF+ に提出すること。

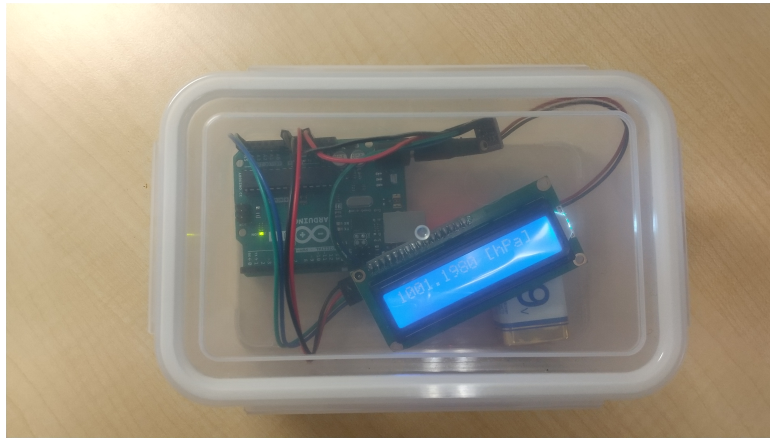


図1 組み立て後の気圧・気温・湿度計

(a) Arduino Uno



(b) 液晶ディスプレイ



(c) 気圧・温度・湿度センサー (BME280)



(d) ジャンプワイヤー



(e) 電池スナップ



(f) 電池



図2 部品

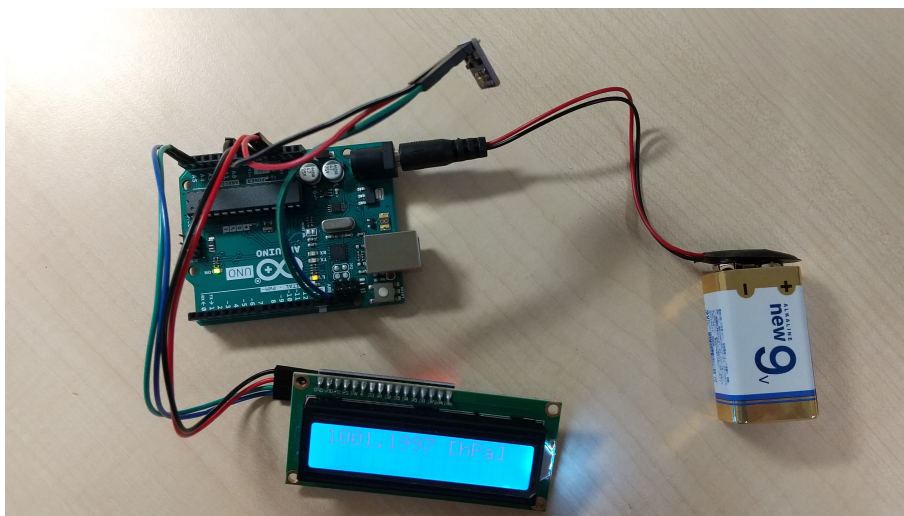


図3 配線が完了した気圧・気温・湿度計

3 気圧・気温・湿度計の組み立て

今回は、マイコンの制御で動作する測器を用いて気圧、気温、湿度を観測する (図 1)。

3.1 部品

以下の部品を用いる。

- マイコンボード：Arduino Uno (図 2a)
- 液晶ディスプレイ：1602 LCD 液晶モジュール (I2C コネクタ付き) (図 2b)
- 気圧・気温・湿度センサー：BME280 (図 2c)
- ジャンパーワイヤ (オス-メス)：黒, 赤, 青, 緑 それぞれ 2 本 (図 2d)
- 電池スナップ (DC ジャック, センタープラス) (図 2e)
- 電池 (図 2f)
- ケース

3.1.1 解説：Arduino

マイコン (マイクロコントローラー; micro controller) は、接続された各種電子機器を、記憶されたプログラムに基づいて制御する。マイコンは電化製品を始め様々な機器に組み込まれている。

今回使用するマイコンは Arduino (<https://www.arduino.cc/>) の一機種である Arduino Uno (図 2a) である。Arduino は、イタリアで教育用に開発されたオープンソースハードウェアのマイコンであり、「アルドゥイーノ」「アルデュイーノ」「アルディーノ」などと発音する。「オープンソースハードウェア」とは、仕様が公開されているハードウェアであり、仕様が公開されていることによって開発者以外でも同様に動作する機器を作成することができる。これにより廉価版や機能拡張/削減版、または Arduino に接続できる周辺機器などが発売されており、世界で広く使われている。

マイコンが動作するには、その動作を記したプログラムが必要である。Arduino は、「スケッチ」と呼ばれる C 言語に似た文法のプログラミング言語によって作られたプログラムによって動作する (例えば付録 A)。スケッチは、PC で動作する Arduino IDE (統合開発環境) で作成し、USB ケーブルで接続した Arduino に転送することで Arduino に保存される。

3.1.2 解説：Arduino と電子機器との接続

マイコンで電子機器を制御するためには信号や電力をやり取りするためのワイヤーやケーブルを適切に接続しなければならない。機器の分解・組み立ての必要がなければ、ワイヤーやケーブルをはんだ付けして固定するのが望ましいが、今回は実験の一部として組み立ても行うため、容易に抜き差しできるジャンパーワイヤー (図 2d) を用いる。(今回用いる機器の接続は複雑ではないが、より複雑な接続が必要な場合には、例えばブレッドボードや基盤を利用する必要がある。)

なお、電子部品が動作する為には、接続した機器それぞれがやりとりしたい信号の数に相当する数のワイヤーやケーブルが必要であり、それぞれの信号をやりとりするタイミングなどの決まりが必要とな

る。例えば、液晶ディスプレイ本体は元々は「パラレル方式」によって情報をやり取りするための 16 本のピンが付いており、本来はそれらのピンをワイヤーやケーブルを通してマイコンと接続する必要がある。さらに本来はそれとは別にセンサーの接続も必要となる。しかし利便性の向上のために、それら複数の機器の信号のやりとりをまとめ、さらに通信タイミング等を規定した通信方式が考案されており、今回はそのうちの一つである I2C (アイスクエアドシー) の形式を採用した機器を用意した。液晶ディスプレイやセンサーには、I2C のモジュールが既に取り付けられているため、それぞれ 4 本の接続のみで済むようになっている。

3.2 組み立て

気圧・気温・湿度計の組み立ては下のように行う。

1. Arduino への液晶ディスプレイ (LCD) の接続
 2. Arduino への気圧・気温・湿度センサー (BME280) の接続
 3. Arduino への電池スナップと電池の接続
-
1. Arduino への液晶ディスプレイ (LCD) の接続
ジャンプワイヤーを用いて下のように接続する。
 - (a) LCD の GND 端子と Arduino の GND 端子を接続
 - (b) LCD の VCC 端子と Arduino の 5 V 端子を接続
 - (c) LCD の SDA 端子と Arduino の A4 端子を接続
 - (d) LCD の SCL 端子と Arduino の A5 端子を接続
 2. Arduino への気圧・気温・湿度センサー (BME280) の接続
ジャンプワイヤーを用いて下のように接続する。
 - (a) BME280 の GND 端子と Arduino の GND 端子を接続
 - (b) BME280 の VIN 端子と Arduino の 3.3 V 端子を接続
 - (c) BME280 の SCL 端子と Arduino の SCL 端子を接続
 - (d) BME280 の SDA 端子と Arduino の SDA 端子を接続
 3. Arduino への電池スナップと電池の接続
 - (a) 電池スナップを Arduino の DC ジャックに接続
 - (b) 電池を電池スナップに接続

電源 ON/OFF のスイッチは付いていないため、電池を接続すると動作開始する (図 3)。

配線は以上で終了であり、ケースに収めれば完成である。

3.3 スケッチの (作成と) 転送

上で説明したように、Arduino はスケッチと呼ばれるプログラムを転送することで動作する。スケッチは Arduino のウェブページ (<https://www.arduino.cc/>) からダウンロードできる IDE のソフトウェアを用いて作成し、PC と Arduino とを USB ケーブルで接続して転送する。

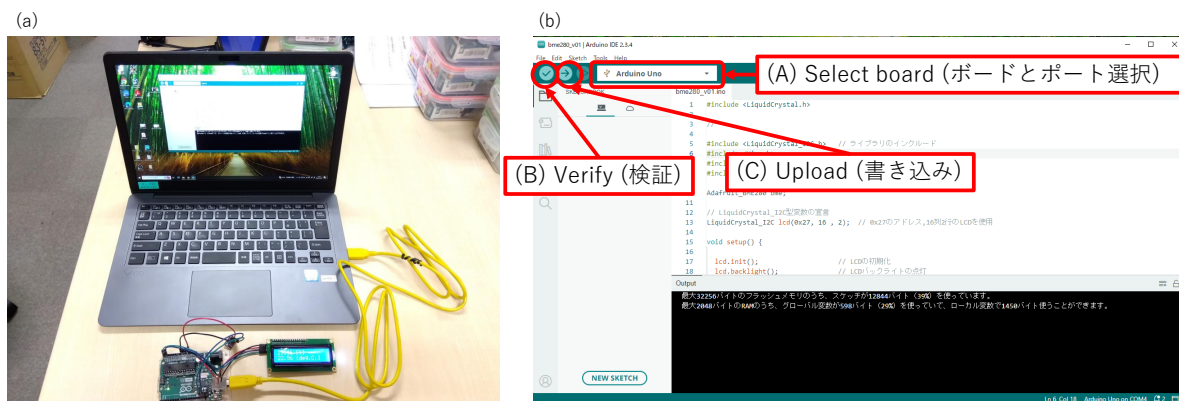


図 4 PC と接続した Arduino (a) と Arduino IDE (b).

本来は実習で各自の PC に Arduino IDE ソフトウェアをインストールし、各自でスケッチを作成して Arduino に転送したいところだが、今回の実習では、Arduino IDE をインストール済みでスケッチも作成済みの PC を用意してあるため、その PC から下の手順に従ってスケッチを Arduino に転送して利用する。

1. LCD, BME280 を接続した Arduino を USB ケーブルを用いて PC と接続 (図 4a). このとき電力は PC から供給されるため電池は一時的に外しておいてもよい。
2. Arduino IDE の “Select Board” (ボードとポート選択) (図 4b (A)) をクリックし, “Arduino Uno” を選択
3. Arduino IDE の “Verify” (検証) (図 4b (B)) をクリックし, スケッチに間違いがないか確認
4. Arduino IDE の “Upload” (書き込み) (図 4b (C)) をクリックし, スケッチを Arduino に転送. スケッチの転送が正常に済めば, 気圧 (1 行表示) と湿度・気温 (2 行表示) が交互に表示される。
5. USB ケーブルを抜いて, (Arduino を電池と接続し,) 変わらず気圧, 湿度, 気温が表示されることを確認。

3.4 動作確認

どのような装置でも誤差 (系統誤差と統計誤差) がある。今回の実験では手の込んだ校正は行わずまずは組み立てた測器の動作を下のような方法で簡単に確認する。

1. 実験室内で他の班 (人) が組み立てた測器の値と比較する。
2. 一か所で値を測り続けたときの, 気圧, 気温, 湿度の変動幅を確認する。

4 密度と水蒸気量の導出

測定した値を用いて密度と水蒸気量を計算により求める。

4.1 密度の計算

観測した気圧と気温を用いて密度を求めよう。

気圧、気温と密度は状態方程式を通して関係している。地球の大気は理想気体として扱っても問題ないので、理想気体の状態方程式を変形すると、密度は

$$\rho = \frac{p}{R'T} \quad (\text{kg m}^{-3}) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 p 、 T はそれぞれ気圧 (Pa) と気温 (K) である。 $R' = 286.6 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ は単位質量当たりの空気の気体定数である。

(1) の形の理想気体の状態方程式には馴染みがないかもしれない。高校で学ぶ理想気体の状態方程式との関係の詳細は付録 B を参照すること。

4.2 水蒸気量の計算

観測した気圧、気温、湿度を用いて絶対湿度 (1 kg の空気を含んでいる水蒸気質量) を求めよう。

空気中に含まれる水蒸気の量を表すため物理量として耳にする機会が最も多いのは「湿度」だろう。では、世間で使われる「湿度」とは何を表しているだろうか？

この「湿度」は、空気中に含まれる水蒸気分圧の飽和水蒸気圧に対する比を表す。つまり、空気を含む水蒸気圧を p_v 、飽和水蒸気圧を p_v^* とすると、

$$r = \frac{p_v}{p_v^*} \quad (2)$$

である。 r は、飽和水蒸気圧に対する相対的な割合を表すため、気象・大気科学の分野では「相対湿度」という。

一方、空気質量に対する水蒸気質量の比を用いることもある。つまり、水蒸気の密度を ρ_v 、空気の密度を ρ とすると、

$$q = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{r p_v^* \bar{m}_v}{p \bar{m}} \quad (3)$$

である。^{*1} ここで、 $\bar{m} = 28.9644 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ 、 $\bar{m}_v = 18.0153 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ はそれぞれ空気と水蒸気の分子量である。 q は、気象・大気科学の分野では「絶対湿度」という。

飽和水蒸気圧は実験式により計算できる。様々な実験式が提案されているが、ここでは Tetens (1930) による水に対する飽和水蒸気圧の式、

$$p_v^* = 6.11 \times 10^{\frac{aT'}{T'+b}+2} \quad (\text{Pa}) \quad (4)$$

^{*1} 導出の詳細については付録 C を参照すること。

を紹介する。ここで、 $a = 7.5$, $b = 237.3$ ($^{\circ}\text{C}$) は定数であり、 T' は温度 (ただし単位は $^{\circ}\text{C}$) である。

5 時間・空間分布の観測

組み立てた測器を持って鶴甲キャンパス、六甲台キャンパス内 (図 5) で気圧、気温、湿度を測定して回り、それらの時間・空間変化を確認する。建物内は、高度変化を調べるのには便利だが、屋内と屋外は条件が大きく異なる可能性があるため、どのような条件における観測値なのかに注意すること。

なお、一つの測器を持ち歩いて観測する場合、原理的に物理量の時間変化と空間変化を分離することができない。キャンパス内の物理量を観測して回る際には、最初に観測した地点に最後に戻ってきて観測することで、時間変化の最低限の情報を得ると良いだろう。また、他の班 (人) と協力することで、同じ地点を異なる時刻に観測すればより観測結果の価値が増すだろう。

自分達で観測した分布を見ながら、それぞれの物理量が時間的・空間的に変化しているかどうか確認しよう。変化の傾向が見られる物理量があれば、例えば下に説明するような理屈も参考にしながら考察すると良いだろう。

気圧の高度変化

気圧は、時間方向にも水平方向にも変化するが、最も大きいのは高度方向の変化である。気温が高度に依らない ($T = T_0$, T_0 は定数) と仮定すると、高度 z における気圧 $p(z)$ は、

$$p(z) = p(0) \exp\left(-\frac{z}{H_0}\right) \quad (5)$$

となる。^{*2} ただし、 $H_0 = R'T_0/g$ であり、 g は重力加速度である。つまり、気圧 $p(z)$ は高度 z に対して指数関数的に減少し、減少の特徴的な高さが H_0 である。このとき、 H_0 をスケールハイトという。

気温の高度変化

対流圏 (地面から高度 10–16 km) においては、気温は平均としては高度とともに低下することが知られている。「標準大気」と呼ばれる気象分野で良く知られた「典型的な大気構造」では、対流圏の気温は 6.5 K/km で低下するとされている (例えば、木村, 2017)。

^{*2} 詳細は付録 D を参照すること。

付録 A 実習で用いたスケッチ

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>           // ライブラリのインクルード
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>

Adafruit_BME280 bme;                    // Adafruit_BME280 型変数の宣言

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16 , 2);    // LiquidCrystal_I2C 型変数の宣言
// 0x27 のアドレス,16 列 2 行の LCD を使用

void setup() {
  lcd.init();                          // LCD の初期化
  lcd.backlight();                     // LCD バックライトの点灯
  lcd.setCursor(0, 0);                 // カーソルの位置を指定
  lcd.print(" Arduino Uno ");         // 文字の表示
  lcd.setCursor(0, 1);                 // カーソルの位置を指定
  lcd.print(" with BME280 ");         // 文字の表示
  delay(2000);                          // 2 秒間休止

  Wire.begin();                        // I2C 通信初期化
  bool status;
  status = bme.begin(0x76);             // BME280 の初期化
  if (!status) {
    lcd.clear();                       // LCD 表示消去
    lcd.setCursor(0, 0);               // カーソルの位置を指定
    lcd.print("BME280 initializ");     // 文字の表示
    lcd.setCursor(0, 1);               // カーソルの位置を指定
    lcd.print("ation failed");         // 文字の表示
    delay(2000);                       // 2 秒間休止
  }
}

void loop() {
  float press = 0, temp = 0, humid = 0;
  temp = bme.readTemperature();        // 温度読み取り
  press = bme.readPressure() / 100.0;  // 気圧読み取り
  humid = bme.readHumidity();           // 湿度読み取り

  lcd.clear();                         // LCD 表示消去
  lcd.setCursor(0,0);                  // カーソル位置設定
  lcd.print(press, 4);                 // 気圧数値の表示
  lcd.print(" [hPa]");                 // 気圧単位の表示
  delay(3000);                         // 3 秒間休止

  lcd.clear();                         // LCD 表示消去
  lcd.setCursor(0,0);                  // カーソル位置設定
  lcd.print(humid);                    // 湿度数値の表示
  lcd.print(" [%]");                   // 湿度単位の表示
  lcd.setCursor(0,1);                  // カーソル位置設定
  lcd.print(temp);                     // 温度の表示
  lcd.print(" [deg.C.]");              // 温度単位の表示
  delay(3000);                         // 3 秒間休止
}
```


付録 B 理想気体の状態方程式の変形

高校では下の形式の理想気体の状態方程式を学んだらう。

$$pV = nRT. \quad (6)$$

ここで, p, V, n, R, T はそれぞれ圧力 (Pa), 体積 (L), 物質量 (mol), 気体定数 ($8.31 \times 10^3 \text{ Pa L K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), 気温 (K) である.

これを変形すると,

$$p = \frac{n\bar{m}}{V} \frac{R}{\bar{m}} T. \quad (7)$$

ここで, \bar{m} は平均分子量 (kg mol^{-1}) である. 密度を $\rho = (n\bar{m})/V$ とおき, 気体定数を $R' = R/\bar{m}$ と置くと,

$$\rho = \frac{p}{R'T} \quad (8)$$

となる. なお, この説明では, 密度 ρ の単位は kg L^{-1} であるが, L (リットル) は扱いにくいいため, MKS 単位系で揃えて密度の単位を kg m^{-3} とするためには,

$$\text{kg m}^{-3} = 10^{-3} \text{ kg L}^{-1} \quad (9)$$

の関係をを用いれば良い.

R' は空気の組成の変化を考えると値が変わるために定数ではないが, 組成を固定して考えて良い場合には定数として問題なく, 便利である. また, R の単位が $\text{Pa L K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ である一方で, R' の単位は $\text{Pa L K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ であるから, 前者は 1 mol あたりの定数であるのに対して, 後者は 1 kg あたりの定数となっている.

付録 C 絶対湿度

水蒸気に対しても理想気体の状態方程式を考えると, 水蒸気の気体定数 $R'_v = R'_v/\bar{m}_v$ (\bar{m}_v は水蒸気の分子量) を用いて,

$$\rho_v = \frac{p_v}{R'_v T} \quad (10)$$

が成り立つので, 絶対湿度, $q = \frac{\rho_v}{\rho}$, は,

$$q = \frac{\frac{p_v}{R'_v T}}{\frac{p}{R'T}} = \frac{p_v \bar{m}_v}{p \bar{m}} = \frac{r p_v^* \bar{m}_v}{p \bar{m}} \quad (11)$$

となる.

付録 D 気圧の高度変化

平均として、気圧は単位面積の大気柱が含む空気に働く重力による力である。したがって、高度 z における気圧 $p(z)$ (Pa) は、高度 z 以上の高度の空気質量 $M(z)$ (kg) を用いて、

$$p(z) = M(z)g = \left(\int_z^\infty \rho(z') dz' \right) g \quad (12)$$

と書ける。ここで $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$ は重力加速度であり、ここでは定数としている。

同様にして、高度 $z + \Delta z$ における気圧 $p(z + \Delta z)$ は、

$$p(z + \Delta z) = M(z + \Delta z)g = \left(\int_{z+\Delta z}^\infty \rho(z') dz' \right) g \quad (13)$$

と書けるので、(13)–(12) より、

$$\begin{aligned} p(z + \Delta z) - p(z) &= \left(\int_{z+\Delta z}^\infty \rho(z') dz' - \int_z^\infty \rho(z') dz' \right) g = - \left(\int_z^{z+\Delta z} \rho(z') dz' \right) g \\ &\sim -\rho(z)g\Delta z = -\frac{p(z)}{R'T(z)}g\Delta z \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{p(z + \Delta z) - p(z)}{\Delta z} \sim -\frac{p(z)}{R'T(z)}g \quad (15)$$

ここで、(1) を用いた。 $\Delta z \rightarrow 0$ の極限をとると、

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{p(z)}{R'T(z)}g = -\frac{p(z)}{\frac{R'T(z)}{g}} \quad (16)$$

気温が高度に依らないと仮定 ($T(z) = T_0$) すると、容易に積分出来て、

$$p(z) = p(0) \exp\left(-\frac{z}{\frac{R'T_0}{g}}\right) = p(0) \exp\left(-\frac{z}{H_0}\right) \quad (17)$$

となる。

参考文献

Tetens, O., Über einige meteorologische Begriffe, Z. Geophys., 6, 297-309, 1930.

木村龍治, 対流圏の気温減率はなぜ 6.5 K/km なのか—エネルギー収支からの考察, 天気, 64, 3, 2017,
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2017/2017_03_0015.pdf.



図5 神戸大学マップ：鶴甲キャンパス, 六甲台キャンパス