

## 10 気圧計

### 目的

フォルタン (Fortin) の気圧計によって水銀柱の高さ  $h$  を測定し、水銀の密度などに対する温度補正や、重力補正を加えて測定地点における気圧を求める。

### 実験用具

フォルタンの気圧計、虫めがね

### 原理

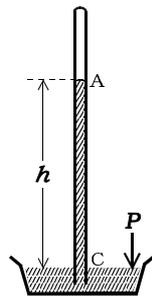


図 29

面に垂直に単位面積当りに加わる力を圧力という。単位は、例えば  $[\text{N}/\text{m}^2]$  ( $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ) である。国際単位系では、 $1 [\text{N}/\text{m}^2]$  を  $1 [\text{Pa}]$ (パスカル) という。気圧とは、大気によって生じる圧力であり、気象関係では気圧の単位として  $[\text{hPa}]$ (ヘクトパスカル: $1\text{hPa} = 102\text{Pa}$ ) が用いられている。

気圧を測る最も基本的な方法として水銀柱が用いられる。水銀を満たした長さ約  $1\text{m}$  のガラス管を逆さにして、図 29 のように水銀槽の中に立てると、管内の水銀が下がって上部に真空ができる(これをトリチェリ (Torricelli) の真空という)。

ガラス管内の C 点に水平な平面を考え、水銀の密度を  $\rho$   $[\text{kg}/\text{m}^3]$  水銀の高さを  $h$   $[\text{m}]$ 、重力加速度を  $g$   $[\text{m}/\text{s}^2]$ 、管の断面積を  $S$   $[\text{m}^2]$  とする。大気に接している水銀面には気圧  $P$   $[\text{N}/\text{m}^2]$  がはたらいてガラス管内の水銀をおし上げているので、この面は大気によって上向きに  $PS$   $[\text{N}]$  の力を受ける。また、この面是水銀柱 AC によって下向きに  $\rho h S g$   $[\text{N}]$  の重力を受けている。

この2つの力は釣り合っている ( $PS = \rho h S g$ )。したがって、気圧  $P$  は、

$$\begin{aligned} P &= \rho g h \text{ [N/m}^2\text{]} \\ &= \frac{\rho g h}{100} \text{ [hPa]} \end{aligned} \quad (19)$$

となる。すなわち気圧  $P$  は、水銀の密度  $\rho$  と重力加速度  $g$  と水銀柱の高さ  $h$  の積として求められる。しかし、 $\rho$  は温度によって変化し、 $g$  は測定する場所によって異なる。また  $h$  はものさしが温度の変化によって伸び縮みしていることによる誤差を含み、さらに水銀とガラス管との間の表面張力による毛細管現象によって幾分低めになっている。したがって正しい気圧を求めるためには、気圧を測定したときの温度と場所に対する補正を加えた  $\rho$ 、 $g$  および  $h$  を (19) 式に代入しなければならない。以下にその方法を述べる。

1.  $t$  [ ] における水銀の密度  $\rho$  : 1 [ ] の上昇に伴う水銀の体積増加の割合、すなわち体膨張率は、 $\alpha = 0.000182$  [1/ ] である。 $t$  [ ] における水銀の密度を  $\rho$  とすれば  $1/\rho$  は水銀 1 の  $t$  [ ] における体積であるから、0 における水銀の密度を  $\rho_0 = 13596$  [ /m<sup>3</sup>] とすれば

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0}(1 + \alpha t)$$

である。すなわち  $t$  [ ] における水銀の密度  $\rho$  は、

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho_0}{1 + \alpha t} \\ &= \frac{13596}{1 + \alpha t} \end{aligned} \quad (20)$$

で与えられる。

2. 気圧を測定した場所の重力加速度：気圧を測定した場所の緯度を  $\phi$  [°]、海拔を  $H$  [m] とすれば、重力加速度はヘルメルト (Helmert) の公式\*2

$$g = 9.80616(1 - 0.00264 \cos 2\phi - 0.000000315H) \quad (21)$$

によって与えられる。

$$\Delta x = 0.00264 \cos 2\phi + 0.000000315H \quad (22)$$

とおけば、

$$g = 9.80616(1 - \Delta x) \quad (23)$$

となる。

---

\*2 万有引力は物体間の距離の2乗に反比例するので、高さに対する補正をしなければならない。また地球の自転にともない、地球上の物体は地軸に垂直な平面内で円運動をしているから、遠心力も受けている。地球上の物体が受ける遠心力は赤道上で最大、極点で最小になっている。ヘルメルトの公式の右辺括弧内の第2項は、地球の自転によって生じる遠心力に対する補正項であり、第3項は万有引力が物体間の距離の2乗に反比例することに対する補正項である。係数は重力加速度の実測値に合うように定められている。

3.  $t$  [ ]における水銀柱の真の高さ  $h$ : 水銀柱の高さを測るものさしは真ちゅう製で、 $0$  [ ]において正しい値を示すように目盛が刻まれている。 $t$  [ ]において測定された水銀柱の高さ  $h'$  は、膨張して目盛の間隔が伸びたものさしで測られたものである。したがって、 $h'$  を補正し  $0$  [ ]での高さ  $h$  を求めなければならない。温度  $1$  [ ]の上昇に伴って真ちゅうの長さが増す割合、すなわち真ちゅうの線膨張率は、 $\beta = 0.000019$  [1/ ]であるから、水銀柱の  $0$  [ ]での高さ  $h$  は、

$$h = h'(1 + \beta t) \quad (24)$$

で与えられる。

4. 毛細管現象に対する補正：液面が平面の場合は表面張力はその平面内にあるから液体内部に圧力を及ぼさないが、液面がわん曲しているときには、液面の曲率中心に向かう向きに圧力を生じる。水銀内部には、水銀柱上端部のわん曲した面の表面張力によって生じた圧力が下方に加わっている。それゆえ水銀柱は幾分低めになっているので、その分を上で求めた気圧の値に加えなければならない。毛細管現象に対する補正值  $\Delta P$  は、水銀面隆起の高さを副尺で測って、表 4 から求める。なお、当実験室の気圧計の管の内径は 10mm である。

水銀隆起面の高さ [mm]	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
補正值 $\Delta P$ [hPa]	0.07	0.13	0.2	0.27	0.33	0.39	0.44	0.49

表 4 毛細管現象に対する補正值 (管径 10mm の場合)

以上の補正により正しい気圧  $P$  は、(20)、(22)、(23) 式より

$$\begin{aligned} P &= \frac{\rho g h}{100} + \Delta P \\ &= \frac{1333.2 h'(1 - \Delta x)(1 + \beta t)}{(1 + \alpha t)} + \Delta P \quad [\text{hPa}] \end{aligned} \quad (25)$$

として得られる。

フォルタンの気圧計は、水銀柱を使って気圧を精密に測定するための装置である。フォルタンの気圧計の構造を原理的に示すと、図 30 のようになる。底部のネジ A を使って水銀だめの水銀表面と象牙の針の先端が接するように調整することにより水銀面の高さを常に一定にすることができる。その水銀面からの水銀柱の高さと、毛細管現象による液面のわん曲部分の高さを副尺の付いた真ちゅうのものさしを使って精度よく測定できるようになっている。

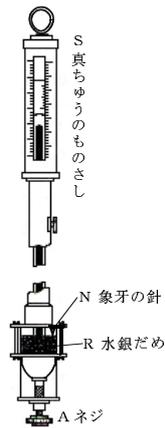


図 30

## 実験方法

1. 気圧計の固定：気圧計はその方向が正しく鉛直であることを要する。実際の気圧計は水銀だめの底部が3つのネジで三方から固定できるようになっている。これらのネジをゆるめて気圧計を自由にし、鉛直方向に静止させてから、そのまま位置が変わらないように再びネジを三方から平均に締める。
2. 温度の記録：付属の温度計でこのときの気温  $t_1$  [ ] を読んで記録する。
3. 水銀だめの水銀表面の調整：水銀だめ R の下が革袋になっていて、底部のネジ A を回すと革袋が変形して水銀面が上下する。このようにして水銀面に映っている針 N の影の先端と実物とを一致させる (図 31 参照)。
4. 水銀柱の高さの測定：温度計の上方側面にあるネジを回すと副尺が動く。図 32 のように副尺の前部と後部の下面 C、C' が水銀柱の頂点 B と同じ水平線上に並ぶように合わせて、水銀柱の高さ  $h'$  を副尺を使って  $1/10$  [ ] の精度で読む。このときの眼の位置が高すぎたり低すぎたりすると不正確となる。正しい位置では C' がちょうど C にかくれ、C の下面の中央が水銀の隆起面に接して見える。3. と 4. の操作を 10 回ずつ速く正確に繰り返し、気温や気圧自身が変わらないうちに読みとって記録する。その平均値を  $h'$  とする。
5. 隆起面の高さの測定：水銀隆起面の頂点と水銀とガラス管が接している線の高さを 4. と同じ方法で測り、その差  $h''$  を求める (図 33)。(表 4 でみられるように補正の大きさが小さいので測定は 1 回でよい。)
6. 温度の記録：最後に再び気温  $t_2$  [ ] を記録し、最初の温度  $t_1$  [ ] との平均値  $t = (t_1$

+  $t_2$ ) をもって、この測定を行った時の温度とする。

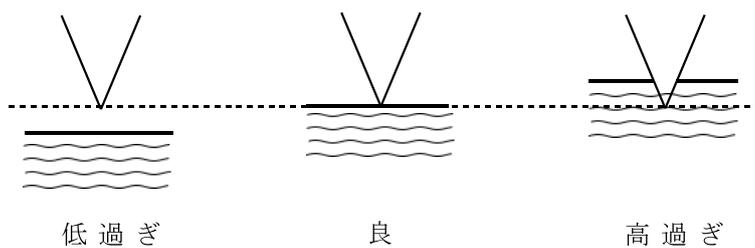


図 31

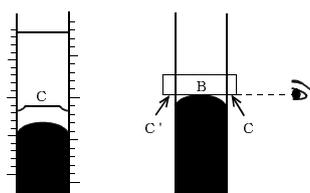


図 32

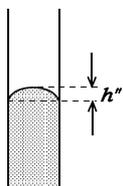


図 33

《注意》

1. 日吉実験室は  $\phi = 35^\circ 33'$ 、 $H = 57$  [m] である。(21) 式中の  $\cos 2\phi$  は表 5 より求める。

$x$	$71^\circ 00'$	$71^\circ 10'$	$71^\circ 20'$	$71^\circ 30'$	$71^\circ 40'$	$71^\circ 50'$	$72^\circ 00'$
$\cos x$	0.3256	0.3228	0.3201	0.3173	0.3145	0.3118	0.309

表 5  $\cos x$  の値

2. アネロイドの気圧計は補正した気圧を示すようになっている。

## 実験例

測定年月日 : 1990 年 月 日、午前 時 分

場所 : 東京緯度北緯  $\phi = 35^{\circ}43'$  海拔  $H = 18$  [m]

気温 : 測定開始時  $t_1 = 26.5$  [ ] 終了時  $t_2 = 26.7$  [ ] 平均  $t = 26.6$  [ ]

回	気圧計の読み [mm]
1	757.6
2	757.1
3	757.5
4	757.6
5	757.3
6	757.5
7	757.3
8	757.6
9	757.5
10	757.7
平均 $h' = 757.5$ [mm]	

1.  $t = 26.6$  [ ] における水銀の密度  $\rho$  :

水銀の  $0$  [ ] における密度  $\rho_0 = 13596$  [kg/m<sup>3</sup>] 水銀の体膨張率  $\alpha = 0.000182$  [1/ ]

$$\begin{aligned}\rho &= 13596 \div (1 + \alpha t) \\ &= 13596 \div (1 + 0.000182 \times 26.6) \\ &= 13530 \text{ [ /m}^3\text{]}\end{aligned}$$

2. 測定地点 (東京) における重力加速度 :

$$\begin{aligned}\Delta x &= 0.00264 \cos 71^{\circ}26' + 0.000000315 \times 18 \\ &= 0.00264 \times 0.318 + 0.0000056 \\ &= 0.000845 \\ g &= 9.8062(1 - \Delta x) \\ &= 9.8062 \times (1 - 0.000845) \\ &= 9.7979 \text{ [m/s}^2\text{]}\end{aligned}$$

3.  $\bar{t} = 26.6$  における水銀柱の真の高さ  $h$  :

$$\text{真ちゅうの線膨張率 } \beta = 0.000019 [1/^\circ\text{C}]$$

$$h = h'(1 + \beta t) = 0.7575 \times (1 + 0.000019 \times 26.6) = 0.7579 [\text{m}]$$

4. 毛細管現象 (表面張力) に対する補正 :

$$\text{水銀隆起面の高さ } h'' = 0.8 [\text{mm}]$$

$$\Delta P = + 0.20 [\text{hPa}] (\text{ガラス管径 } 10\text{mm})$$

よって

$$\begin{aligned} P &= \rho gh \div 100 + \Delta P \\ &= 13530 \times 9.7979 \times 0.7579 \div 100 + 0.20 \\ &= 1004.7 + 0.2 \\ &= 1004.9 \\ &\approx 1005 [\text{hPa}] \end{aligned}$$

#### 毛細管現象

上部の開いている細いガラス管を鉛直に立てたまま液中に入れると、管内の液面の高さは管のそとの液面の高さとは違ったものとなる。その高さは液体の種類によって、または管の内径によって変わる。これを毛細管現象とよぶ。毛細管現象は表面張力の一種で、分子間力に起因する (5 ページ参照)。

フォルトンの気圧計のように直立した細いガラス管の中に水銀が入っていると、水銀 - 水銀の分子間力がガラス - 水銀の分子間力よりずっと大きいため、管内の水銀の面は本来の位置より下がる。くわしく言うと、ガラスは水銀に濡れまいとして水銀の面を押し下げるので、水銀と空気の境界面 (自由表面) の形はガラスに接する周辺部が下がり、中央部が盛り上がる。そして、全体として水銀は押し下げられるので、水銀面の高さから気圧を読み取るとき、補正が必要となる。

逆に直立した細いガラス管を水に入れると、ガラス管は管内の水を引き上げるので、水面の周辺部は上がり、中央部は凹む。どちらの場合も管の内径が小さいほどこの効果は大きい。

毛細管現象は管の中だけではなく、棒と棒の間、面と面の間、棒と面の間のできる隙間でも起こる。そして、隙間が狭いほど効果が大きい。たとえば、乾いた木綿の布や毛筆が水をよく吸い込み保持できるのは、水に濡れやすい素材でできているというだけでなく、多数の狭い隙間が密集しているためである。