

SOP 21

空気浮力の補正

1. 範囲と適用分野

空気浮力の効果は、もし補正しなければ、往々にして質量測定における最大の誤差原因となる。この手順書では、空気浮力の効果の補正に使う式を提供する。高い精度で質量を決定するときは、必ず空気の浮力を補正すべきである。

2. 原理

空気の浮力が物を上に押し上げる力は、秤量されるサンプルとこれに釣り合う分銅の両方に働いている。サンプルの密度と分銅の密度に違いがあり、したがってそれらの体積に違いがあるなら、質量を精確に決定するには、それらの違いによって生じる空気浮力の違いを考慮する必要がある。

3. 必要な情報

3.1 秤量時の空気密度の情報

最も精確に測定するには、空気密度を気圧、温度、相対湿度から計算する。表 1 にさまざまな測定の許容誤差をまとめた。

表 1 さまざまな物理パラメーターの許容誤差

変数	空気密度の計算値の不確かさ	
	±0.1%	±1.0%
相対湿度 (%)	±11.3%	—
気温 (°C)	±0.29 K	±2.9 K
気圧 (kPa)	±0.10 kPa	±1.0 kPa

- ±0.05 kPa の精確さの気圧計,
- ±0.1 °C の精確さの温度計,
- 10% の精確さの湿度計。

空気密度の 1% の誤差は、浮力補正した質量におよそ 10 万分の 1 の誤差を生じさせる。気象条件の変動は、空気密度に最高 3% の変化を引き起こすが、高度による気圧の変化（すなわち空気密度の変化）は、はるかに著しい影響を及ぼす。海面高度において一般的な実験室温度で行う並の精確さの測定では、空気密度の値は 0.0012 g cm^{-3} がほぼ妥当である。

3.2 天秤の検定に使う質量スケールの情報

一般には、二種類の質量スケールが使われている。古いスケールは、密度 8.4 g cm^{-3} に調整した黄銅の分銅によるもので、もっと最近のスケールは、密度 8.0 g cm^{-3} に調整した¹ステンレスの分銅によるものである。

3.3 サンプルの密度の情報

この計算には、秤量するサンプルの密度が必要である。

4. 手順

4.1 空気密度の計算

空気の g cm^{-3} 単位の密度は、気圧、温度、相対湿度から計算できる (Jones, 1978):

$$\rho(\text{空気}) = \frac{3.4848(p - 0.0037960U \cdot e_s)}{273.15 + t} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで

p = 気圧 (kPa),

U = 相対湿度 (%),

t = 温度 (°C),

e_s = 飽和水蒸気圧 (kPa),

$$e_s = 1.7526 \times 10^8 \exp[-5315.56/(t + 273.15)]. \quad (2)$$

4.2 重量から質量の計算

重さが w で密度が $\rho(\text{サンプル})$ のサンプルの質量 m は、次の式で計算する。

³ 厳密に言えば、これら密度は 20°C においてのみ適用できる。これらの値を使って得られる「見かけの質量」を「真の」質量に換算するファクターは、

$$Q = \frac{\rho(\text{分銅})(D_{20} - 0.0012)}{D_{20}[\rho(\text{分銅}) - 0.0012]}$$

の式で定義される。ここで D_{20} は分銅が調整されている見かけの質量スケールである。このファクターは、ほとんどの目的には 1 と見なせるかもしれない。

$$m = w \left(\frac{1 - \rho(\text{空気})/\rho(\text{分銅})}{1 - \rho(\text{空気})/\rho(\text{サンプル})} \right) \quad (3)$$

(式の誘導については、附録を参照)。

5. 計算例

この計算には、以下のデータを使用した²：

$$\begin{aligned} \text{サンプルの重さ, } w &= 100.00000 \text{ g,} \\ \text{サンプルの密度, } \rho(\text{サンプル}) &= 1.0000 \text{ g cm}^{-3}. \end{aligned}$$

秤量条件：

$$\begin{aligned} p &= 101.325 \text{ kPa (1 気圧),} \\ U &= 30.0\%, \\ t &= 20.00 \text{ }^\circ\text{C,} \\ \rho(\text{分銅}) &= 8.0000 \text{ g cm}^{-3}. \end{aligned}$$

5.1 空気密度の計算

$$\begin{aligned} e_s &= 2.338 \text{ kPa,} \\ \rho(\text{空気}) &= 0.0012013 \text{ g cm}^{-3}. \end{aligned}$$

5.2 質量の計算

$$m = 100.10524 \text{ g.}$$

6. 文献

- Dean, J.A. 1985. *Lange's Handbook of Chemistry*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1792 pp.
- Jones, F.E. 1978. The air density equation and the transfer of the mass unit. *J. Res. Natl. Bureau Stand.* **83**: 419–428.
- Schoonover, R.M. and Jones, F.E. 1981. Air buoyancy correction in high-accuracy weighing on analytical balances. *Anal. Chem.* **53**: 900–902.
- Taylor, J.K. and Oppermann, H.V. 1986. Handbook for the quality assurance of metrological measurements. National Bureau of Standards Handbook 145.
- Woodward, C. and Redman, H.N. 1973. High-precision Titrimetry. The Society for Analytical Chemistry, London, 63 pp.

² この手順書のユーザーが計算スキームをチェックできるように、ここでは小数点以下の有効数字を多く記した。

附録

浮力補正式の誘導

1. 範囲と適用分野

浮力補正の表現式は、図 1 に示す力を考慮することで誘導できる。今日使われている天秤の大半は皿が一つだが、原理は変わらない。違いはと言えば、てこを使って力を同時に比べるのではなく、力覚センサーを使って順に比べることである。天秤では、相対する力は等しい：

$$m_1 g - V_1 \rho(\text{空気}) g = m_2 g - V_2 \rho(\text{空気}) g \quad (4)$$

g は重力加速度、 $\rho(\text{空気})$ は秤量操作時の温度、気圧、湿度における空気密度である。 m_2 は、本当の質量が m_1 のサンプルの重さであることに注意。

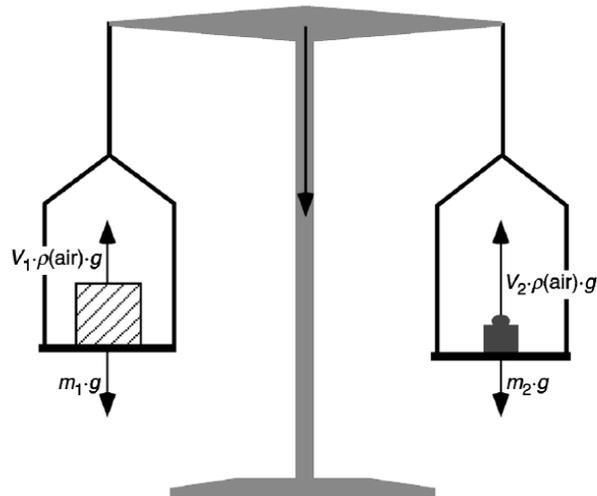


図 1 空気中で秤量するときサンプル(1)と分銅(2)にかかる力。

$$V = m/\rho \quad (5)$$

なので、式(4)を式(6)に書き直すことができる。

$$m_1 - m_1 \rho(\text{空気})/\rho_1 = m_2 - m_2 \rho(\text{空気})/\rho_2 \quad (6)$$

この式を変形すると式(7)が得られる。

$$m_1 = m_2 \frac{1 - \rho(\text{空気})/\rho_2}{1 - \rho(\text{空気})/\rho_1}. \quad (7)$$

式(7)が、空気浮力補正に使われる式の基礎である(Schoonover and Jones, 1981; Taylor and Oppermann, 1986):

$$m_1 = w \frac{1 - \rho(\text{空気})/\rho(\text{分銅})}{1 - \rho(\text{空気})/\rho(\text{サンプル})} \quad (8)$$

w は空気中のサンプル重量で、 m が真の質量である。

式(6)はまた式(9)にも書き換えることができる。

$$m_1 = m_2 + m_2 \rho(\text{空気}) \left(\frac{m_1}{m_2} \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (9)$$

$m_1 \approx m_2$ なので、式(9)は浮力補正によく引用される式とほぼ等しい。

$$m = w + w \rho(\text{空気}) \left[\frac{1}{\rho(\text{サンプル})} - \frac{1}{\rho(\text{分銅})} \right] \quad (10)$$

(Woodward and Redman, 1973; Dean, 1985). $\rho(\text{空気})$ の近似値として、 0.0012 g cm^{-3} がこの式と合わせてよく使われる。この値は、海面気圧かつ一般的な実験室温度の条件で行われる並の精確さの測定には適切である。