

## 応募実験問題解答例およびレポート採点の講評

### 1. 標準的な方法

空気の密度を測定することが課題であるが、密度の定義にしたがって一定量の空気の質量と体積を測定することによって密度を求めるのが標準的な方法です。気体の体積は温度や圧力によって変わるので、測定条件を明らかにしておくことが重要です。課題では条件を指定していませんが、常温・常圧での値を求めるのが妥当でしょう。

理想気体の状態方程式と、空気の分子量が約 29 g/mol であることから、標準状態で 22.4 l の空気の質量は 29 g 程度です。これにより手ごろな量として数リットルの空気を対象とすると数グラムの質量を求められる（希望する）精度で測定する必要があることが分かります。

数 g の質量を測定すること自体はさほど難しくはありませんが、対象が空気のように密度が小さい物質の場合は注意が必要です。普通、質量の測定は地上での重力の大きさを測定し、その地点での（あるいは、標準の）重力加速度を用いて質量に換算します。大気中での測定では大気による浮力の影響があり、その補正は密度の小さい物質では特に重要です。極端な場合、大気圧の空気を容器に密閉して重力を測っても、空気に働く重力と浮力は相殺し、容器に働く重力だけが得られます。したがって、空気の密度を重力の測定から求めるためには、大気の影響に影響されない方法を考案するか、その影響を正しく補正することが必須です。

容積の変わらない（硬い）容器に圧力を加えて空気を詰めた状態での質量  $M_1$  を測定し、容器から取り出した空気の常圧での体積  $V$  を測定し、容器と残った空気の質量  $M_2$  を測定すれば、密度は

$$\rho = (M_1 - M_2)/V$$

によって求められます。このとき、 $M_1, M_2$  は真の質量ではなく、大気による浮力を差し引いたものですが、容器の体積が変わらなければそれらは相殺するので、容器から取り出した空気の質量は正しく求められます。

事前の予想通り、この方法によるレポートが大半でした。容器はペットボトル、自転車の空気入れによる加圧、水上置換による体積測定、高等学校にある電子天秤を利用した質量測定が代表的な組み合わせでした。大気による浮力の影響を認識していることを明記したレポートが少なかったのは残念です。

この方法に近いものとして、次のような方法で測定したレポートもありました。

- ・容器を加熱して、膨張によってあふれ出た空気の体積と質量変化を測定した。
- ・加圧する代わりに、真空ポンプを用いて、真空と大気圧での質量差を測定した。
- ・上記の変形として、水を沸騰させて容器を真空にし、空気を入れる前後の質量差を測った。

容器を真空にする方法では、実際に入出力した空気の体積を測定せず、容器の体積で代用しているものが多かったが、真空の積りのときに残っていた空気の量を吟味す

る必要があります。

## 2．大気による浮力を利用する方法

逆に、大気による浮力（容器の容積変化）を積極的に利用したレポートがありました。ポリエチレン袋にドライアイスを入れ、気化前後の質量差  $M$  を測定すると、 $\text{CO}_2$  の気化により増加した体積  $V$  に対する大気による浮力、すなわち、体積  $V$  の空気の質量が得られます。密度は

$$\rho = M/V$$

によって求められます。 $\text{CO}_2$  は水に溶けるので、水上置換で体積  $V$  を求めるのは難しいので、あらかじめドライアイスの質量を測っておき、 $\text{CO}_2$  の分子量と状態方程式から  $V$  を求めていましたが、理論を援用した点が惜しまれます。空気の分子量を用いれば測定なしで結果が得られるからです。体積  $V$  を実測する工夫が欲しいものです。

He を詰めた容器の質量を測定したレポートもありましたが、状態方程式を用いた点は同様です。

体積を測定した水を入れた容器と空の容器の質量測定から、水に働く空気の浮力を算出したレポートもありましたが、この方法では、水の真の質量を求めるために高精度の水の密度の値が必要となり、文献値に頼ることになりました。

## 3．その他の方法

### A：高度差による圧力差の測定

ある場所での大気の圧力はそこより上にある空気に働く重力によって生じます。底面積  $S$ 、高さ  $h$  の気柱を考えると、その上下での圧力差  $\Delta p$  と気柱に働く重力の釣り合いの式

$$\rho h S g = \Delta p S$$

から空気の密度が得られます。ここで  $g$  は、重力加速度の大きさを示します。

高層ビルを利用して、高度差 12m、60m での測定のレポートがありました。

### B：慣性質量を求める方法

多くのレポートは空気に働く重力から質量を求めていましたが、空気の慣性から質量を求めようとしたレポートもありました。発泡スチロールなどの容器に空気を閉じ込めたものに力を加えて加速度運動させると、運動方程式から慣性質量を知ることができます。この場合は大気による浮力は影響しないが、大気との摩擦、いわゆる、空気抵抗の影響があるので高精度の測定には工夫が必要です。その難点を避ける巧妙な方法が次のものです。

### B'：音速から密度を求める

気柱の一部分の運動方程式を建てると、気体中の音波を表す波動方程式が得られ、音波の速度すなわち音速は

$$v = \sqrt{\gamma p / \rho}$$

によって与えられます。ここで、 $\rho$ ,  $p$  は気体の密度、圧力であり、 $\gamma = c_p / c_v$  は気体の比熱比（定圧比熱と定積比熱の比）です。

これを利用すると、気圧と音速を測定することにより、空気の密度を求めることができます。音速を気柱の共鳴実験によって測定したレポートが複数ありました。

#### 4 . レポートの評価

レポートの評価結果は次の 5 段階に分類しました。

S : 独自の発想、装置、方法、考察などが見られる独創的なレポート

A : 必要なことがきちんと書かれた優れたレポート

B : 平均的なレポート

C : 努力、工夫が望まれるレポート

D : 未提出、白紙あるいは白紙同然のレポート

#### 5 . 特記事項

最後に、レポート評価の中で、特に評価した事項例を列挙します。

- ・物差しを用いて天秤を自作し、1 円硬貨を 1 g の分銅として用いた。
- ・水上置換に用いる水をあらかじめ良くかくはんして空気を十分に溶かしておいた。
- ・注射器を加圧・減圧に用いた。
- ・自動車のタイヤの空気圧を測るエアゲージを用いて、容器内の気体の圧力と質量の関係性を求めた。
- ・始めと終わりだけでなく途中までの体積変化と質量変化の関係を求め、測定精度を見積もった。
- ・水上置換して気体の体積を測定するとき、容器内外の水面を一致させ、大気圧での体積が測れるように気を付けた。
- ・重力から質量への換算のため、重力加速度も実測した。
- ・高度差による圧力差を測定する際、ビル内の空調で気圧を人工的に変えていないことを確かめた。
- ・高度差による圧力差を測定する際、気温の違いも測定して補正した。
- ・音速から密度を求めるとき必要になる比熱比も実測した。
- ・複数の異なった方法で測定し、比較した。