

# 気体の分子量測定

—— カセットボンベを用いた気体の分子量測定法の検討 ——

化学科 宮城政昭

ガスライター用のボンベから水上置換で気体を集め分子量を測定する方法は、数社の教科書（化学 I B）の中でも取り上げられている。しかし、この方法は操作が単純なため高校生にとって少々面白みに欠ける。そこで、液化ブタンを液体のままフラスコに入れ、室温で気化させて分子量を測定する方法を試みた。

（キーワード）分子量測定 LPG 液化ブタン カセットボンベ  
気体の状態方程式 気化しやすい液体の分子量

## 1. はじめに

現在家庭用に普及しているカセットコンロの燃料は、LPG（液化ブタン）の入ったガスボンベが使われている。このガスボンベを用いて気体の分子量測定ができないか検討したので報告する。

気体の状態方程式を活用した分子量測定の例として、高校の化学の教科書（化学 I B）の中で取り上げられている実験には、①気化しやすい液体（四塩化炭素やベンゼンなど）を加熱して気化させフラスコ内を蒸気で満たした後、これを冷却して凝縮し、質量を測定して分子量を求めるもの<sup>1)</sup> ②ガスボンベにゴム管を接続し、水上置換でメスシリンダーに直接気体を捕集し、ガスボンベの質量の差から分子量を求めるもの<sup>2)</sup>、③ドライアイス昇華させ、その体積と質量から分子量を求めるもの<sup>3)</sup> などがある。①については、分子量測定の精度を上げるために検討した報告がいくつかある<sup>4)～8)</sup>。しかし、有毒な四塩化炭素などの蒸気が多量に出ること、加熱操作など測定誤差を生じる要素が多いこと、また、それを改善するための複雑な操作は、実験内容を生徒にわかりづらくし、良いデータを得る操作のみに終始することになるなどの問題点がある。②については、操作が単純なわりには、気体の溶解や水蒸気圧の影響などでデータがずれ、生徒があまり興味を示さない問題がある。③については、ドライアイスのまわりに水蒸気が昇華して付着しやすいこと、ドライアイスの昇華に時間がかかること、常時ドライアイスを保存できないことなどの問題点がある。そこで本報では、カセットコンロ用のガスボンベを用いて、液化ブタンをフラスコに取り、それを室温で気化させて、その体積と質量から分子量を求める方法を検討した。

## 2. 実験方法

(1) 乾いた100 mlのフラスコとアルミ箔および輪ゴムの質量  $w_1$ [g]を測定する。

- (2) カセットボンベを逆さにして弁を開き、試料（LPG）約 2 ml をフラスコの中に入れ、口をアルミ箔で覆い、輪ゴムでとめる。
- (3) アルミ箔の中央に針で小さな穴をあける。
- (4) 室温で液体の沸騰のようすを観察し、試料が完全に気化したら、フラスコについている水滴を乾いた布で完全に拭き取り、アルミ箔、輪ゴムのついたまま試料の入っている フラスコの質量  $w_2$ [g] を測定する。
- (5) フラスコの口元まで水を満たし、その水をメスシリンダーに移して、フラスコの体積  $v$  [ml] を測定する。
- (6) 大気圧  $p$  [mmHg] と気温  $t$  [°C] を測定する。
- (7) 気体の状態方程式に、各測定値を代入して気体の分子量を求める。(注)

(注) 1)  $w_2$  測定時の空気による浮力（LPG の気化により追い出された空気の質量 = フラスコ内に入っていた空気の質量） $w_3$  [g] を次式から求める。

ただし、空気の平均分子量は 28.8 とする。

$$\frac{p}{760} \times \frac{v}{1000} = \frac{w_3}{28.8} \times R \times (273+t) \quad (1)$$

2) 測定値を代入する式は、次のようになる。

$$\frac{p}{760} \times \frac{v}{1000} = \frac{w_2 - (w_1 - w_3)}{M} \times R \times (273+t) \quad (2)$$

3) フラスコについた水滴を布で拭いて、再び水滴がつかなくなるまで待つと、フラスコ内の温度はほぼ室温に等しくなっている。

#### 〈実験の記録〉

$w_1$  (フラスコの質量) = [            ] [g]

$w_2$  (気化後の質量) = [            ] [g]

$w_3$  (空気の浮力) = [            ] [g]

$t$  (気            温) = [            ] [°C]

$v$  (フラスコの体積) = [            ] [ml]

$p$  (大            気            圧) = [            ] [mmHg]

$R$  (気            体            定            数) = 0.082 [atm·l·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

※ 1 atm = 760mmHg



### 3. 実験結果

LPGについて、本方法と従来型の水置換で分子量測定の生徒実験を行ったので、その結果を下記に示す。

#### 3. 1 LPGの気化による分子量測定

気温23℃、大気圧 761.5 mmHgの下での測定結果を表 1 に示す。なお、秤量はデジタル天秤（島津 EB-620S）で小数第 2 位まで測定した。

表 1 LPGの気化による分子量測定

班	w <sub>1</sub> [g]	w <sub>2</sub> [g]	w <sub>3</sub> [g]	w <sub>2</sub> - (w <sub>1</sub> - w <sub>3</sub> ) [g]	気体の体積 [ml]	分子量
A	45.51	45.66	0.144	0.294	121.0	58.9
B	78.64	78.79	0.152	0.302	128.0	57.2
C	63.33	63.50	0.158	0.328	133.0	59.7
D	47.51	47.69	0.144	0.324	121.0	64.9
E	65.76	65.91	0.150	0.300	126.0	57.7
F	67.30	67.44	0.149	0.289	125.0	56.0

#### 3. 2 水上置換によるLPGの分子量測定

水温23℃、大気圧761.5mmHgの下で、カセットボンベより直接水上置換で気体を集め、分子量を測定した結果を表2に示す。なお、23℃における水蒸気圧は21.1mmHgである。

表 2 水上置換によるLPGの分子量測定

班	w <sub>1</sub> [g]	w <sub>2</sub> [g]	(w <sub>1</sub> - w <sub>2</sub> ) [g]	気体の体積 [ml]	分子量
G	287.47	286.98	0.49	193.5	63.1
H	187.83	187.60	0.23	102.0	56.2
I	193.00	192.75	0.25	100.0	62.3
J	304.22	303.67	0.55	200.0	68.5

分子量の計算には次式を用いた。

$$\frac{p - pw}{760} \times \frac{v}{1000} = \frac{w_1 - w_2}{M} \times R \times (273 + t) \quad (3)$$

p : 大気圧 [mmHg]    pw : 水蒸気圧 [mmHg]    v : 気体の体積 [ml]    M : 分子量

w<sub>1</sub> : はじめの質量 [g]    w<sub>2</sub> : 使用後の質量 [g]    t : 水温 [°C]    R : 気体定数

#### 4. 実験の評価

表2からわかるように従来型的水上置換による分子量測定は、操作が簡単なわりには測定結果のばらつきが大きい。一方、液化ブタンの気化による分子量測定は、表1のように生徒実験においても文献値(58.12)にかなり近い値が得られた。これは、水上置換による分子量測定では、ポンペに水滴がついたり気体が水へ溶解するなど  $w_2$  に影響を与える要素が多いのに対し、液化ブタンの気化による分子量測定では、室温でLPGを気化させるため、LPGの量がフラスコ内の空気を追い出すのに十分であれば、 $w_2$ の値の再現性は非常によく、分子量測定時の誤差の最大の原因である質量測定におけるミスを防止できるためと考えられる。

また、この実験はフラスコを満たしたブタンを凝縮することなく質量を測定しているので、空気による浮力を考えなければならないが、その他の誤差を生じさせる要因は少ない。これに対し気化させた試料を凝縮させた場合、液体部分の体積や蒸気圧のほか、加熱時に水面に出た部分の気体の凝縮も誤差の原因となる。このようなことを考えると、室温で液化ブタンを気化させる操作は、簡単で理解しやすい上、良好な測定値を得やすい操作である。尚、100mlと200mlのフラスコで測定結果を比較してみたが、大きな違いは認められなかった。フラスコから出た可燃性気体のブタンが実験室内に広がることを考えると、この実験では、100ml用のフラスコで実験するのが適当である。

次に、カセットコンロ用のガスポンペは、ライター用のガスポンペにくらべ家庭に普及している割合が高く、価格が安い利点がある。また、その成分はn-ブタンとiso-ブタンで97%以上(イワタニ産業)を占めるので、火力調整用にプロパンがかなり含まれるライター用のポンペより測定に適している。尚、ガスクロマトグラフィーで成分分析を行ったところ、ポンペの製造メーカーにより多少違いが見られた。使用にあたっては各メーカーに問い合わせてみると良いだろう。

以上のように、カセットポンペを用いた分子量測定の実験は、再現性が高く、精度が良く、操作が易しく、試料が安価で入手できるので、生徒実験に適している。また、ここでの操作をフラスコ内の空気を追い出し、その質量差から分子量を求める点に着目すれば、LPGの気化だけでなく、酸素や二酸化炭素のポンペから下方置換で気体を捕集して分子量を求めることも可能である。参考として、その測定結果を表3に示した。

表3 下方置換による分子量測定

気体	$w_1$ [g]	$w_2$ [g]	$w_3$ [g]	$w_2 - (w_1 - w_3)$ [g]	気体の体積 [ml]	分子量
O <sub>2</sub>	81.28	81.32	0.337	0.377	280.0	32.2
CO <sub>2</sub>	81.28	81.46	0.337	0.517	280.0	44.1

(測定は、気温21℃、大気圧766.8mmHgのもとで行った。)

## 5. 生徒の感想

分子量測定の実験レポートからの生徒の感想を示す。

- ・計算が面倒だった。
- ・ごく微量な空気の質量が、分子量の数値に非常に大きな影響をもたらすのに驚いた。
- ・空気の浮力を考慮すると文献値と非常に近くなったので、実験結果に満足している。
- ・LPGを入れるとフラスコが冷たくなった。LPGはぶくぶくしていた。
- ・当初は分子量を求める式  $M = wRT / (PV)$  の理解が浅く戸惑ったが、 $w$ 、 $T$ 、 $P$ 、 $V$  の値の求め方は、そんなに難しくなく、案外容易に分子量を求めることができた。
- ・思わぬところで普段当たり前と思って見過ごしてしまっている空気の重さに気付かされた。
- ・今までで一番やりがいのある実験だった。
- ・もとのフラスコに入っていた空気の重さが無視できないくらいだというのは意外だった。
- ・ $PV = nRT$  は非常に重要な式であることを実感した。
- ・実験室が妙に臭くて少し気持ちが悪かった。
- ・だんだんやるのが難しくなってきた。
- ・液体は火にかけないと沸騰しないと思っていたので、フラスコに入れた途端ぶくぶくした時は、一瞬危険物と間違えたと思い焦ってしまった。
- ・計算や考え方が難しかった。
- ・気体の分子量測定をするのは比較的容易だとわかった。
- ・なぜどんな気体でも  $PV = nRT$  となるのか不思議に思った。
- ・室温で気化するので楽だったが、何となくフラスコの中に気体が充満している気がなくて不安だった。

## 6. おわりに

加熱操作を含む分子量測定の実験の場合、良いデータを得るためにはお湯から出たフラスコ上部をアルミ箔で覆うなどの対応が不可欠である。しかし、上部を覆うと沸騰の様子が見にくくなる。また、液体が完全に気化したことを確認するためフラスコを取り出すことは空気の混入を招いてしまう。そのため良い結果を得ようとしたとき、場合によっては何のための操作かわからず、指定された時間だけ加熱するような事態に陥ってしまう。まして、その後の凝縮した液体の質量を測定することの意味を理解していた生徒は皆無に等しい現実があった。「もっとわかりやすい実験はないか？」そんな中、コールドスプレーの状態変化についてのデモンストレーションを見て、常温で気化する液体の分子量測定の開発に取り組んだ。その結果、操作を簡略化でき予想以上の良好の結果が得られることがわかった。さっそく本校2年生に実践し、その結果をまとめてみた。今後は、分子量測定というテーマの中で、生徒自らが与えられた物質によって測定方法を考えていくような探究型の実験が可能かどうかさらに検討して行きたい。色々な角度からご助言頂ければ幸いである。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり、有益なご助言を頂いた東京都立大泉北高等学校の山本進一先生、カセットボンベのガスクロマトグラフィーの測定および実験の授業での実践をして頂いた東京学芸大学教育実地研究生の宮川豊治君に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 長倉三郎ほか、化学 I B、東京書籍、1995
- 2) 佐野博敏ほか、化学 I B、第一学習社、1995
- 3) 藤原鎮男ほか、化学 I B、三省堂、1994
- 4) 村田 豊、化学教育、25、492 (1977)
- 5) 井上友昭、化学教育、34、67 (1986)
- 6) 岸田功ら、化学教育、34、77 (1986)
- 7) 山本勝博、化学と教育、35、66 (1987)
- 8) 井上友昭、化学と教育、36、66 (1988)