

単分子膜を用いたアボガドロ定数の測定と
発展的考察

佐賀県立佐賀西高等学校 松 高 和 秀*

目 的

アボガドロ定数を求める実験として、教科書¹⁾等では単分子膜を用いた方法が紹介されてきた。しかし、私がこの実験を授業で行ったところ、測定値がアボガドロ定数から大きく外れたり、実験を終える（測定値を得る）前に授業が終わったりするため、生徒は「実験失敗」という印象を持つことが多かった。そこで、より多くの生徒がよりアボガドロ定数に近い値を得ることができるよう、実験方法に改善を加えた。さらに、授業時間内に実験を終えることができるよう、ICT 機器を用いて授業展開に工夫を加えた。

生徒たちの測定結果を詳細に分析すると、アボガドロ定数より小さい値を得た生徒が多かった。そこで、本校サイエンス部の生徒たちとともに追加実験を行った。その結果、これが単分子膜への圧迫によるものであることがわかったので報告する。

概 要

1 mol あたりの粒子の数 ($6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$) であるアボガドロ定数 (N_A) は、高校生が原子や分子を定量的に理解するための第一歩である。この考え方を生徒に理解させるため、教科書¹⁾等には単分子膜を用いたアボガドロ定数の測定実験が掲載されている。

一般的な実験例では、ステアリン酸分子が水面上に形成した単分子膜の面積をタルク（滑石粉末）と方眼紙を用いて目視で測定することにより、アボガドロ定数の値を求める。しかし、タルクが単分子膜の形成に影響を及ぼしている可能性がある（後述）ため、正確なアボガドロ定数を得ることが難しい。また、単分子膜はきれいな多角形や円形にはならないため、方眼紙を用いて目視で正確に測定することは困難である。さらに、この実験は操作の手順が多く、生徒にとってそれらを理解した上で実験を行うことは簡単ではない。そのため、実際に授業で生徒実験を行うと、50 分の授業時間内に測定の終わらない生徒が多数出ていた。

そこで、タルクと方眼紙の代わりにマープリング用インクを用いて、質量から面積を測定する方法を開発した。また、複雑な実験操作をよりわかりやすく生徒たちに伝えるため、タブレット PC に配信した自作動画やプレゼンテーション等を用いて実験操作を示した。その結果、ほぼ全員の生徒が授業時間内に測定を終えることができた。また、生徒たちが測定によって得た値も、アボガドロ定数に近かった。

今回開発した方法は非常に簡単で、50 分の授業で十分に行うことができる。また、授業後の生徒の感想からは、自分たちの実験結果に満足し、達成感を感じている様子が読み取れた。このような体験は化学に対する興味・関心を引き出し、その後の主体的に学ぶ意欲につながっていくと考えられる。

今後、教科書等に紹介されている実験例が今回の実験方法に代わることで、「生徒たちに粒子概念を定量的に理解させたい」とお悩みの全国各地の理科の先生方の一助になれば幸いである。

教材・教具の製作方法と学習指導方法

I. マープリング用インクを用いた測定

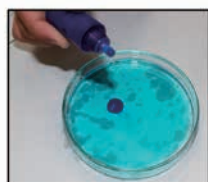
- (1) あらかじめステアリン酸 0.030 g をシクロヘキサン 100 mL に溶かし、10 mL ずつスクリュー管に入れて配布しておく。（濃度は約 $1.1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ ）
- (2) ステアリン酸溶液を駒込ピペットでメスリンダーに 1 滴ずつ、1 mL に達するまで滴下する。その滴下数から 1 滴の体積を計算する。
- (3) シャーレを多量の水でしっかりと濯いだ後、再びシャーレに半分ほど蒸留水を入れる。（事前に実験器具の準備をする際、シャーレはよく洗い、多量の水で濯いでおくことが望ましい。）
- (4) 水を張ったシャーレに、点眼ビンに入れたマープリング用インクを 1 滴落とす。このとき、インクがシャーレいっぱいに広がったら、次の操作に移る。しかし、インクが広がらなかった場合は、その部分に油膜が残っているため、シャーレを洗うところからやり直す。（図 1）

* まつたか かずひで 佐賀県立佐賀西高等学校 教諭 〒 840-0041 佐賀県佐賀市城内 1-4-25

☎ (0952) 24-4331 E-mail matsutaka-kazuhide-a@mail.saga-ed.jp

② 単分子膜をつくる準備をする。

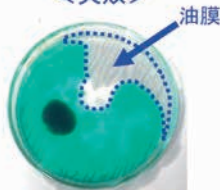
<成功>



インクが 全面 に広がる

↓
次の操作へ

<失敗>



インクが 広がらない

↓
シャーレ洗い からやり直し

図1 シャーレ中の水面に滴下したインクの広がり
(実験操作説明用プレゼンテーションより)

- (5) シャーレの中心にステアリン酸溶液を1滴落として、しばらく待つ。シクロヘキサンが完全に蒸発する瞬間に、水面にステアリン酸が一気に広がり、単分子膜が形成される(図2)。

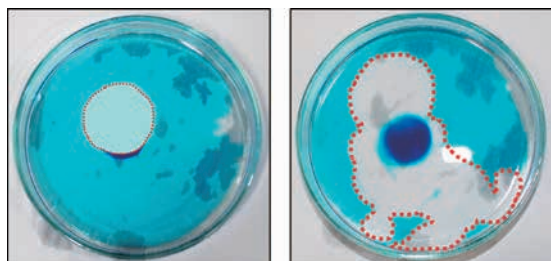


図2 ステアリン酸溶液を滴下した直後(左)と、溶媒が蒸発した後(右)のシャーレの様子(赤点で囲まれた部分が単分子膜)

- (6) シャーレにろ紙を落とす。単分子膜の部分にはインクがつかないため、単分子膜を写し取ることができる(図3)。



図3 単分子膜をろ紙に写し取る様子

- (7) ろ紙を取り出し、ドライヤーやホットプレート等でよく乾かした後、ろ紙全体の質量を測定する。
(8) ろ紙の単分子膜の部分をはさみで切り取り、再び質量を測定する。
(9) ろ紙全体の質量と単分子膜の部分の質量の比から単分子膜の面積を計算する。
(10) 単分子膜の面積をステアリン酸分子1個の平均断面積($2.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$)²⁾で割り、膜を構成する分子の個数を計算する。

- (11) 溶液のモル濃度と1滴の体積から物質量を計算し、(10)の結果と併せてアボガドロ定数を求める。

II. ICT 機器を用いた授業展開の工夫

佐賀県の高校生は全員が個人用のタブレットPC(以下、学習用PC)を持っている³⁾。今回は、この学習用PCを実験操作の説明に活用し、複雑な実験操作をよりわかりやすく伝えるよう工夫した。

自作動画やプレゼンテーションの活用

自作の動画は一連の実験操作全体を事前に撮影・編集したもので、より正確な測定値を得るためのポイント等を文字で強調した。この動画は学習用PCにも配信し、生徒がより詳細な部分まで見ることができるよう工夫した。

この動画による説明を強調するため、続けてプレゼンテーションによる説明を行った。プレゼンテーションには分子モデルの図や実験器具の写真を多く掲載し、よりわかりやすく伝わるよう心がけた。特に実験操作の写真は、料理番組のように手元を拡大して撮影し、器具の正しい使い方が伝わるよう工夫した(図4)。

① ピペット1滴が何mLかを調べる。2/17

- ・ステアリン酸の溶液をピペットで取り、1 mLに達するまで、1滴ずつメスシリンダーに滴下する。



- ♪ 何滴落としたか、根気強く数えます(最後まで集中!)
- ♪ 滴下した数を記録しておきましょう(3ページを参照)

図4 操作説明用プレゼンテーションの例

これらの工夫により、生徒たちは実験操作の説明を短時間に2回受けることになり、実験の目的や操作等の理解をより深めたうえで実験を行うことができていた(写真1)。

実際の授業では、実験の目的と操作の説明にかかった時間は約15分であった。そのため、生徒たちが実験を行う時間を十分に確保することができた。その結果、すべての生徒が授業中に実験を終えることができた。さらに、生徒たちの実験操作に対する理解を深め、効率よく実験を進めさせるため、学習用PCに実験操作の説明を載せたスライドショーを配信した。これは紙芝居のようにスライドを1枚1枚めくることができるようになっており、「↑」「↓」のみで操作できる(図5)。これを利用することにより、生徒たちは1つ1つの実験操作を自分たちの実験の進度(ペース)に合わせて写真で確認しながら行うことができていた。また、冒頭の説明で理解しづらかったところも自分の手で確認できたため、生徒たちは教員の補助をあまり必要

とせず、自分たちだけで実験をスムーズに進めることができていた。

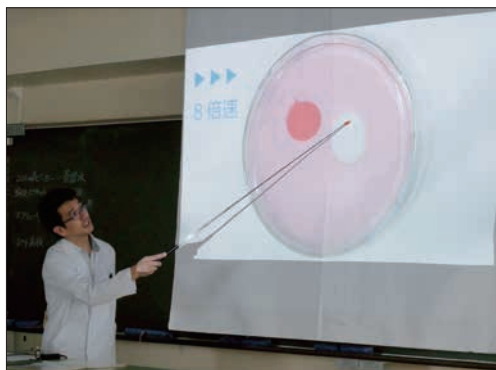


写真1 動画による説明（上）と学習用PCに配信した様子（下）

1/17

【物質と化学反応式】生徒実験

アボガドロ定数 を求める

次のスライドに進む ... 「↓」を押す
 前のスライドに戻る ... 「↑」を押す
 終了する ... 「Esc」を押す

6/17

② 単分子膜をつくる準備をする。

(1) シャーレの中の脂分を水で洗い流す。

♪ 脂分を水流で追い出す感じです。

✕ シャーレの中を指で触るのは厳禁！
かえって脂分を増やすことになります。

図5 生徒に配信した操作説明用スライドショー

Ⅲ. 生徒たちの実験結果

新しく開発した方法を用いて、本校の2年生3クラス（参加者113名）で実験を行った。2人1組で班を編成し、各班にろ紙を2枚ずつ配布して実験を行った結果、102回分の実験データが得られた。つまり、すべての班が授業時間内に1～2回の測定を行うことができた。

生徒たちが求めたアボガドロ定数の値は、最小が $0.50 \times 10^{23} / \text{mol}$ 、最大が $10 \times 10^{23} / \text{mol}$ 、平均値は $5.3 \times 10^{23} / \text{mol}$ であった。また、生徒たちが実験によって得たアボガドロ定数の値は、 $5 \times 10^{23} \sim 7 \times 10^{23} / \text{mol}$ が最も多かった（図6）。実験に不慣れな生徒たちの実験に関わらず、アボガドロ定数（ $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ ）に近い値が得られた生徒が多かった。

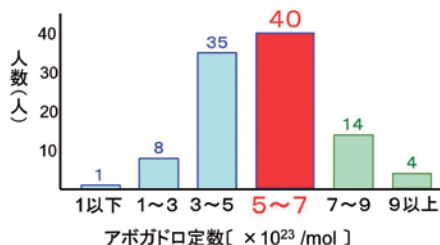


図6 生徒たちの実験結果

Ⅳ. 本校サイエンス部による追加実験

先ほどの生徒たちの実験結果（図6）をさらに分析すると、約8割の生徒が正確なアボガドロ定数の値（ $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ ）より小さい値を得ていたことがわかった。この原因を探るため、本校サイエンス部化学班の生徒たちとともに、追加実験を行った。

追加実験は、日頃から数多くの実験を行っている生徒たちにより、ステアリン酸溶液をマイクロピペットを用いて滴下する方法で20回以上行った。その結果、アボガドロ定数を $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ として計算した分子1個当たりの平均断面積は $1.9 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ であり、文献値（ $2.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ ）²⁾より小さくなっていたことがわかった（図7）。

次に、マッピング用インクの量を変えて実験を行った。授業ではマッピング用インクを点眼ピンから1滴落としていた。この滴下したインクの量が多すぎるのではないかと考え、不織布にインクをしみ込ませ、その先をわずかに水面に付けることで、水面上のインクの量を最小限に抑えた。このインクの量ではインクを肉眼で確認することはできず、ろ紙に写し取ったときに初めて確認できる程度である。この方法により測定した分子1個当たりの平均断面積は $2.2 \times 10^{-15} / \text{mol}$ であり、文献値²⁾とほぼ一致した（図7）。

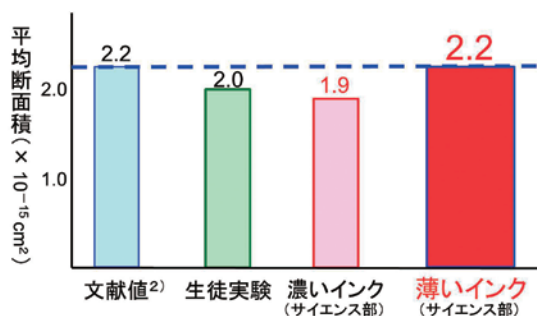


図7 単分子膜中のステアリン酸分子1個あたりの平均断面積

水面に存在するインクの量が少ない場合は、インクが単分子膜を圧迫することがないため、単分子膜を構成する分子が水面上にきれいに整列することができる。しかし、水面上のインクの量が多い場合は、インクが単分子膜を圧迫し、水面上に盛り上がった形で形成されていると考えられる(図8)。生徒実験により $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ より小さな値を得た生徒が多かったのは、インクによる圧迫の可能性が高い。

教科書¹⁾等に紹介されている一般的な実験方法は、インクより質量の大きいタルクを用いているため、単分子膜をより強く圧迫すると考えられる。それにより、単分子膜中の分子1個あたりの平均断面積が小さくなり、得られるアボガドロ定数も小さくなると予想される。今回開発したインクを用いる方法により正確な値に近いアボガドロ定数を求めることができたのは、タルクをインクに変えた効果が大きいと考えられる。

実践効果

生徒たちに配布した実験プリントに、今回の実験の感想を書く欄を設けた。生徒たちの記述からは、自分たちの結果に満足し、達成感を感じている様子が読み取れた。また、生徒たちの中には単分子膜が形成される様子に関心を抱いた生徒も多かった。このような体験は化学に対する興味・関心を引き出し、その後は主体的に学ぶ意欲につながっていくと考えられる。

＜生徒たちの感想(原文まま)＞

(女子：測定値： $6.5 \times 10^{23} / \text{mol}$)

アボガドロ定数 6.0×10^{23} に近い値を出すことができたが、 0.5×10^{23} の誤差があったので、完全に一致する数値を出すことに挑戦してみたくなった。アボガドロ定数は 6.0×10^{23} と覚えて計算に使っていたが、このような過程で求まることが分かって、新たな考え方を得たように思う。

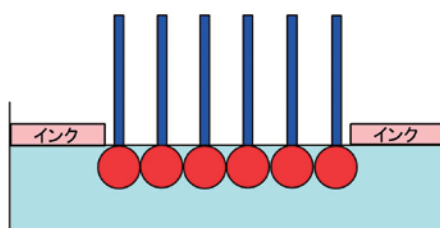
(男子：測定値： $6.5 \times 10^{23} / \text{mol}$)

アボガドロ定数なんて、すごい研究機関のようなところでしか求められないと思っていたので、実際に 10^{23} の数字が出たときはうれしかった。

(女子：測定値： $3.9 \times 10^{23} / \text{mol}$)

ステアリン酸をシャーレに入れてしばらくすると、一気に膜が広がったことにとても驚きました。アボガドロ定数よりも、どうしてそうなるのかを知りたいです。

＜インクが**薄い**＞



＜インクが**濃い**＞

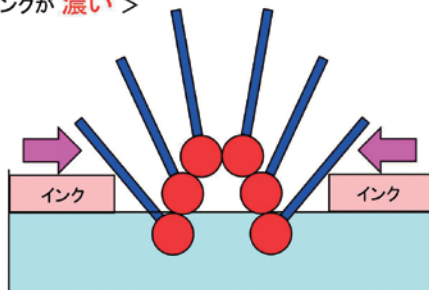


図8 インクが薄いとき(上)と濃いとき(下)の単分子膜中の分子モデル

参考文献

- 1) 竹内敬人ほか17名：化学基礎，東京書籍，p. 121 (平成23年3月30日検定済)。
- 2) 数研出版編集部：改訂版 フォトサイエンス化学図録，数研出版，p. 40 (2013)。
- 3) 佐賀県教育委員会：ICT 利活用教育
http://www.pref.saga.lg.jp/kyouiku/list_01913.html