

① 2020年度 奨励賞受賞論文

生徒実験としてのアボガドロ定数算出の評価

3期 自然系コース(理科) 大島 浩 (栃木県)

Evaluation of student experiments' for calculating Avogadro constant

The point of comparison between some methods and our new method.

Key word アボガドロ定数を算出する生徒実験 対話型授業 概数の把握**1. 研究の方法**

物質量の単元においてアボガドロ定数算出の生徒実験は、反応に関わる量的な関係や構成粒子の数を実感するために有効である。既にステアリン酸の単分子膜を利用するものや NaCl 型イオン結晶からその数を求める方法、気体の体積から逆算して求める方法がよく知られている。いずれの方法も既知の値 1 つを与え、循環的に 1 mol 当たりの数値を求める簡便な方法がとられている。生徒実験を通してその結果や経験を相互に発表することや、議論を深める対話型授業が有効な授業方法として強く求められている。

授業を展開するに当たっては、実験の設定の適正化が欠かせないものであり、本研究では PC を利用した、単分子膜法によるアボガドロ定数算出の指導例を報告する。

2. 研究の目的

アボガドロ定数の算出実験には、ステアリン酸の単分子膜を利用するもの、イオン半径の占める体積を利用して算出するもの (NaCl 型結晶)、気体の体積から代数的に逆算する方法がとられる。いずれの方法も既知の値 1 つを与え、1 mol 当たりのアボガドロ定数 N_A を求めるものであるから、生徒の実験操作に対する習熟程度と授業効果の向上を図らねばならない。従って生徒実験では既習事項の確認とともに、指数計算、アボガドロ定数のもつ構成する粒子の数の概念の把握を実感することが目的となる。これは天文単位を理解することに似ており、経験とすることは難しい課題の一つである。

新学習指導要領では対話型授業の展開や深い学びを導くことが打ち出され、実験結果をもとに生徒相互の

学びを確かめ深め合う場を設定することが求められている。

本報告では従来の生徒実験を比較対照し、生徒の反応と指導効果を測定し、併せて PC 利用を加えた指導例を報告したい。

[1] 実験方法を比較対照するための条件

- (1) アボガドロ定数算出実験を配当時間内で行えること
- (2) 算出結果を生徒が自己および相互に評価できること
- (3) 質問紙によって結果を確かめ概数を実感できたか問えること、を要件とした。

[2] 実験方法の比較対照

授業改善の目的として 3 つの方法を対照群に選び、生徒の反応を測定した。

- (1) ステアリン酸の単分子膜からアボガドロ定数を算出する方法 (PC 利用の改善を施したもの)
- (2) NaCl 型イオン結晶からイオン数を求め、アボガドロ定数を算出する方法
- (3) O_2 の体積からアボガドロ定数を逆算する方法

3. 結果

(1) ステアリン酸の単分子膜からアボガドロ定数を算出する方法

〈方法の特徴〉 単分子膜は、構成する脂肪酸分子が極性によって直立し、1 分子の体積が既知であることを利用し、水面上に広がった単分子膜の面積を目測して N_A を求めるものである。従来の方法ではグラフ用紙をかぶせ、タルクが排除されている部分を鉛筆でなぞり、マス目を数えて面積を求めるため大きな誤差を生じやすいという欠点をもつ。

(2) NaCl 型イオン結晶からアボガドロ定数を算出する生徒実験

〈方法の特徴〉 NaCl 型イオン結晶の単位格子の体積、および構成格子のイオンが既知であることを利用したもので、加えた食塩による体積増加分から Na を算出する簡便な方法である。簡便であるがゆえに操作性に乏しく、NaCl 型単位格子の体積の値が与えられなければならない。

(3) 気体の体積を利用してアボガドロ定数を逆算する生徒実験

〈方法の特徴〉 中学校段階で習得した気体の捕集操作や、分子量を利用して Na を代数的に求める方法である。逆算を繰り返す練習と生徒に受け取られやすい。

4. 現行「化学基礎」教科書におけるアボガドロ定数算出実験の取り扱い (表1)

表1 現行「化学基礎」教科書におけるアボガドロ定数算出実験の取り扱い

	アボガドロ定数を算出する生徒実験の取り扱いについての回答
(A社)	実験材料や器具(水・塩化ナトリウム・メスシリンダー・ビーカー)を、ほとんどの実験室にあるものにする事で取り組みやすいようにした。方法もシンプルのため、比較的短時間で取り組むことができる。生徒がつまづきやすい箇所であり、生徒にとって身近な物質を使った実験で定数を求めることができ、以上の理由から食塩による方法を採用した。
(B社)	化基 312 では、P195 探究活動において単分子膜の実験方法を扱っている。結晶格子の扱いは「化学(4単位)」にあるため、化基同書 P221 発展的取扱いにおいて測定の実状を知ってもらうため、Si を用いた定数の測定法を掲載した。定数が簡単な実験で求められることを実感してもらうことや入試イン出であることを踏まえ、以上のような取り扱いとなっている。
(C社)	ステアリン酸を用いたアボガドロ定数を測定する実験を取り上げる事にした。この内容は、高校生に考えさせながら実験を行うのに最適な題材で、センター試験などでも出題される。この実験ではなかなか正確な値が出ないので、定数の確定に使われた、Si 球を用いた測定についても取り上げた。
(D社)	「化基 310」では、身近な物質の物質量を調べることで、物質量について実感させる実験として、「砂糖の質量を測定して、物質量や分子の数を求める実験」(p.75)を掲載。 「化基 310」は、基礎の定着を重視した。標準的な教科書ですので、このような実験を取り入れた。「化基 308」では、参考として、「単分子膜法によるアボガドロ定数の測定」を掲載した。

5. アボガドロ定数算出の対照実験とその傾向

(1) PC 利用による単分子膜法での指導事例と生徒の反応

単分子膜の面積を「ものさし」を入れた画像として PC に取り込み、多形面積計測ソフトで広がった単分子膜の面積を計算処理する。

〈PC を利用して単分子膜から算出したアボガドロ定数の傾向〉

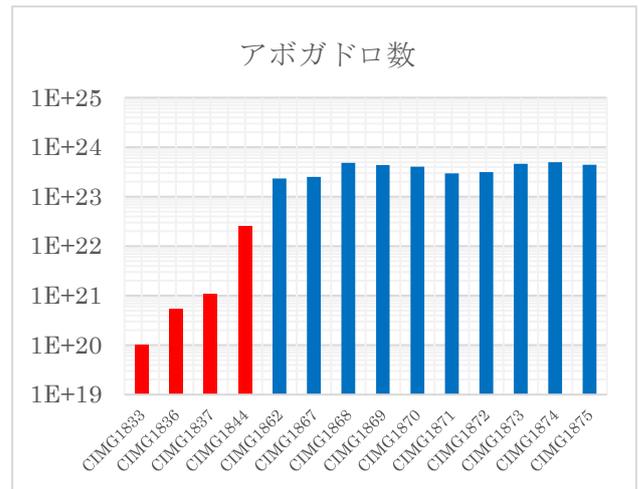


図1 ステアリン酸単分子膜から求めたアボガドロ数

表2 ステアリン酸単分子膜から求めたアボガドロ数

データNo.	溶媒の種類	溶質の質量(g/100ml)	滴下量(ml)	面積(cm ²)	アボガドロ数
CIMG1833	シクロヘキサン	0.0305	1	0.242	1.02426E+20
CIMG1836	シクロヘキサン	0.0305	1	1.28	5.41759E+20
CIMG1837	シクロヘキサン	0.0305	1	2.55	1.07928E+21
CIMG1844	シクロヘキサン	0.0305	1	58.74	2.48616E+22
CIMG1862	エタノール	0.2	0.1	360.732	2.32836E+23
CIMG1867	エタノール	0.2	0.1	388.719	2.509E+23
CIMG1868	エタノール	0.2	0.1	745.11	4.80935E+23
CIMG1869	エタノール	0.2	0.1	671.448	4.33389E+23
CIMG1870	エタノール	0.2	0.1	624.008	4.02769E+23
CIMG1871	エタノール	0.2	0.1	459.082	2.96317E+23
CIMG1872	エタノール	0.2	0.1	485.176	3.13159E+23
CIMG1873	エタノール	0.2	0.1	717.588	4.6317E+23
CIMG1874	エタノール	0.2	0.1	773.558	4.99297E+23
CIMG1875	エタノール	0.2	0.1	683.02	4.40858E+23

〈指導の観点〉

- ・操作を通して、単分子膜が一気に広がるのを見ることができる。(知識・態度)
- ・面積を PC で計測し、(楕円の公式) を使って近似値を求めることができる。(技能)
- ・近似値が求められ、達成感を味わうことができる。(知識・態度)

(2) NaCl 型結晶から Na を求めるをを求める方法
 〈NaCl 型結晶から算出したアボガドロ定数の傾向〉

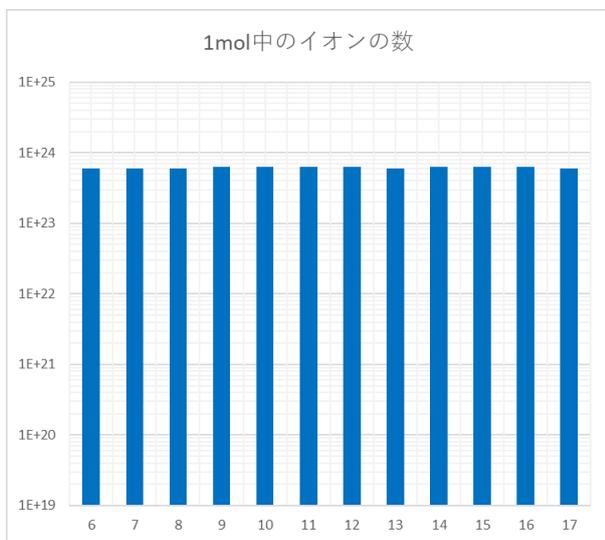


図2 NaCl 型結晶から求めたアボガドロ数

表3 体積増加とイオン数

データNo.	体積の増加量(ml)	1mol中のイオンの数
6	10.5	5.97895E+23
7	10.5	5.97895E+23
8	10.5	5.97895E+23
9	11.0	6.26367E+23
10	11.0	6.26367E+23
11	11.0	6.26367E+23
12	11.0	6.26367E+23
13	10.5	5.97895E+23
14	11.0	6.26367E+23
15	11.0	6.26367E+23
16	11.0	6.26367E+23
17	10.5	5.97895E+23

〈気体の体積から逆算したアボガドロ定数の傾向〉

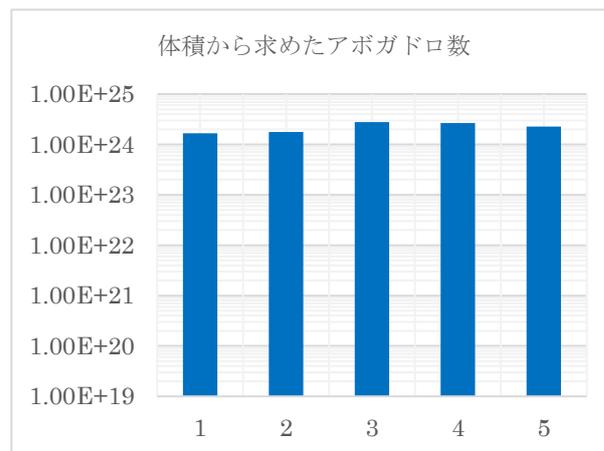


図3 体積から求めたアボガドロ数

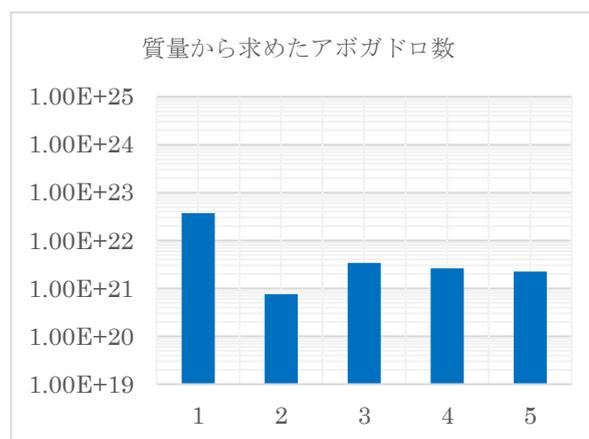


図4 質量から求めたアボガドロ数

表4 質量から求めた、含まれる160の原子数

含まれる160原子の数				
データNo.	重さ	重さから求める	体積	体積から求める
1	0.99	3.73E+22	31	1.67E+24
2	0.02	7.53E+20	33	1.77E+24
3	0.09	3.39E+21	51.5	2.77E+24
4	0.07	2.64E+21	49.5	2.66E+24
5	0.06	2.26E+21	42	2.26E+24

〈指導の観点〉

- ・理論値に近い値を得ることで、仮説の検証やNaを算出できることが分かる。(知識・態度)
- ・実験中、生徒から「岩塩」に替えてはどうか?という反応があったが、シリンダーの器壁に付着するNaClに注意が向けられるなどの操作に対する態度を養うことができる。(技能)

(3) 気体の体積から求める方法

〈指導の観点〉

- ・気体捕集や既習事項を活用して、積極的に学習に取り組める。
- ・理論値に近い値を得ることで仮説の検証や、Naを算出できることができる。(知識・技能・態度)

6. 開発教材を用いた「物質量」の授業展開

ロシュミット、およびジャン・ペランは、気体の分子運動論と測定値（物質密度、粘性係数や、気体の温度による体積膨張率）からアボガドロ定数が見出せることを明らかにした。

教科書での取り扱い、標準状態での気体の分子量、体積、アボガドロ定数の関連を習得、させ

るため、算出を上記3方法によって模擬的に実験させることに相当する。授業時間や生徒の習熟に応じて選択できるように取り扱われている。

知識や技能、態度を身に着ける上で、実験を組み合わせた授業展開のアクティブラーニング化は、知識を「活用する力」（関連する知識を応用発展させる意欲や学力の形成）に変える授業の試みでなければならないことから、生徒個々に身近になった情報機器の導入活用による学習効果の向上を考えた。

7. PC 画像(位置)処理機能を活用した用いたアボガドロ定数算出実験の開発

(1) 目的 ステアリン酸単分子膜を用いたアボガドロ定数算出の生徒実験では、広がった単分子膜の面積を水面の紙に写し取る操作や、その値を楕円の公式で近似するため、概数算出が難い欠点がある。この欠点を補うため、値の算出を高価な機械に代えて、スマホやタブレット端末の画像処理・計算処理機能を活用することで解決を試みた。また探求心の喚起には、実験によって机上の数値操作でない、自分で見出した値になる実感がある。この体験が学習を続ける、「学びに向かう力」に直結する。

(2) 方法

[1] 単分子膜と並べてスケールを入れ撮影する。

[2] PC 上に画像を映し、image j(1)の多角形ツールで膜面積測定の精度を上げ、計算処理をする。



図5 image j を用いて面積を求めるイメージ図

8. 対話型授業・深い学びにつなげる生徒実験

(1) 生徒実験では仮説を立てることによって、実験操作を行っているという感覚が生まれ、また、その結果を報告や発表（表現）することで結果の確かめだけでなく、探求的態度や伝えることの必要性を学ぶことができる。



本授業研究では“結果の処理”を、対話型授業や深い学びにつなげることで効果を高めることを考えた。

- ・仮説検証型実験によって「科学の方法」を繰り返し学ぶ。
- ・計算力や器具の取り扱い、安全に対する配慮を培う。
- ・実験結果、授業内容の要点を生徒自身がまとめ、プレゼンテーションすることによって、生徒集団の共通課題（教師と生徒の対話でない授業形態）で協働を学ぶ、ことができる。

(2) 結果

試行の授業改善のため、物質量の導入を2時間、実験を1時間、学習の振り返りを含むプレゼンテーションづくりと発表を3時間配当とした（配当6時間）。生徒個別PCは持ち帰りによって、自宅課題にもできる利点がある。

- ・PCの操作には習熟している生徒がほとんどで、またネット上に多角形ツールはじめ、生徒が利用可能なソフトも用意されており操作に不安はなかった。
- ・学習内容を発表するため教科書の読み込み、教え合いの機会があり要点を確認できる。
- ・「仮説検証型実験」をプレゼンテーションによって「探求の過程」そのものを体験することができ、かつ生徒の学習の定着を把握することができる。

表5に学習指導案を示す。

表5 学習指導案

時	学習内容	学習活動	関	思	技	知	評価規準	評価方法
2	物質質量 原子や分子の質量の相対質量による表し方や、物質の量を構成粒子の数で表す物質質量を導入する。	<ul style="list-style-type: none"> ・原子の相対質量 ・原子量 ・分子量 ・式量 ・アボガドロ数と物質質量 ・物質質量とモル質量 ・アボガドロの法則 ・物質質量とモル体積 	◎			◎	<ul style="list-style-type: none"> ・多数の粒子を一定数の集団として考える mol という単位記号を導入し、化学反応の量的関係をとらえることができる。 ・質量、体積、粒子数を物質質量に変換することができる。 	発問と応答によって、原子量や分子量などが理解できたか。
1	ステアリン酸単分子膜を用いてアボガドロ定数を算出する	<ul style="list-style-type: none"> ・実験の手順を復習する。 ・タルク（墨汁）を浮かせた水面にステアリン酸単分子膜を展開する。 ・単分子膜を撮影する。 ・多角形ツールで面積を測定し、計算ソフトでアボガドロ定数を算出する。 ・ワークシートに記録し他班との値の差異を確認する。 ・後片付けを行う。 	◎			◎	<ul style="list-style-type: none"> ・既知の値から、単分子膜の面積を測ることによってアボガドロ定数が算出できることが分かる ・実験操作を協働して行うことができる。 ・多角形ツールや計算ソフトを使ってアボガドロ定数を算出できる。 ・他班の算出値を参照し、差異を考察することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験の手順を述べることができたか。 ・協働して操作を進めることができたか。 ・操作や測定において、どのような点に注意すればよいか工夫することができたか。
2 3	単元の内容をまとめ、プレゼンテーションすることによって内容の理解を深める。	<ul style="list-style-type: none"> ・単元「物質質量」についてまとめ、実験「アボガドロ定数の算出」についてプレゼンテーションをする。 ・各班の報告に対し質疑や意見発表をする。 	◎	◎	◎	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・実験、学習のまとめをすることができる。 ・実験の課題について考察することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験、学習のまとめを簡潔にすることができたか。 ・課題について考察することができたか。

(3) 課題

・教科学習においては、生徒の教科書読解力を補いながら指導しないと、PCを使ったコピー&ペーストによる学習になってしまう。意図的に全教科全科目(高校教育全体)での取り組みによって、学習形態を変え、生徒の学習に対するとらえ方、習得の仕方を変える必要が

ある。

・授業においてはスマホ、PCを適用する場面事例を蓄積し、到達目標に効果ある授業にする必要がある。

紹介した事例は新奇性に乏しいかも知れない。しかしながら、効果を確認めながら授業改善に取り組む意欲と姿勢が私たちに求められた職責と痛感する。

9. 単元の指導計画及び評価計画(6時間配当)

評価規準については学習指導要領から到達目標を定めた校内ルーブリック(表6、表7)によって把握する。

表6 課題探究活動の指導と学習評価 【指導者用】

評価の観点	A (2)	B (1)	C (0)	Student Evaluation
課題の設定と計画 (関心・態度・意欲・協働性)	可能なテーマが設定され、仮説や調査項目が示せる。	テーマが設定されるが、仮説や調査項目が分かりにくい。	テーマがはっきりしない。仮説や調査項目が明確でない。	
これまでに明らかにされている知見の活用(知識・技能)	これまでに明らかになった考えや研究を調査し整理できる。	明らかになった考えや研究を一部紹介できる。	これまでに明らかになった考えや研究を説明できない。	
研究方法と分析 (思考・判断)	研究テーマに沿い、分析の視点と調査を示せる。	必要なポイントはとらえているが分析や調査が十分でない。	調査や分析がまとめられない。	
結論 (表現力・主体性)	(研究の方法に沿い) 論理的にまとめ(記述・発表)ができる。	視点が不明確で論理的にまとめ(記述・発表)ができない。	視点が不明確で論理的に記述・発表できない。	

表7 【生徒自己評価表】(点検項目は該当するものを○)

活動の項目	活動の内容	点検項目	コメント
課題の設定と計画が適切か	可能なテーマが設定され、仮説や調査項目が示せる。	○	
これまでに明らかにされている知見を活用して探究を進めているか	これまでに明らかになった考えや研究を調査し整理できる。	×	観察例が少なく、さらに増やす必要あり。
研究方法と分析方法は適切か	研究テーマに沿い、分析の視点と調査を示せる。	○	
結果と考察をまとめることができたか	(研究の方法に沿い) 論理的にまとめ(記述・発表)できる。		

参考文献

- (1) <https://imagej.nih.gov/ij/>
- (2) 渡部 淳「アクティブ・ラーニングとは何か」
(岩波新書 2020年)