

<実践報告>

塩化ナトリウム単結晶の粒子数を求める実習の評価

池本博司 広島市立舟入高等学校
 榊原保志 信州大学教育学部理数科学教育講座
 前野十行 元千葉県松戸市立金ヶ作小学校

Evaluation of an Activity on Estimating the Particle Number of NaCl Crystals

IKEMOTO Hiroshi: Hiroshima Municipal Funairi Senior High School

SAKAKIBARA Yasushi: Science and Mathematics Education, Faculty of Education,
 Shinshu University

MAENO Zyuko: Former Kanegasaku Elementary School, Matsudo City, Chiba

研究の目的	学力低下を指摘される現行の高校生でも単結晶を用いた粒子の数を調べる実習をうまく行うことができるのかを調べる。
キーワード	化学教育 原子・分子 単結晶 高等学校
実践の目的	理科教育における実験指導
実践者名	第1筆者と同じ
対象者	広島市立基町高等学校1年生
実践期間	2007年6月29日
実践研究の方法と経緯	身近にある安価で安全な塩化ナトリウムの立方体単結晶を作成し、結晶の重さや体積を測定することを通して、その結晶に含まれる粒子の数を定量的に推定させる実習を行った。本学に入学してくる学生の実態を見ると定量的な扱いが苦手とするようになり、質的に変化したと思われる現行の高校生において、この実習が同じようにうまく実施できるのだろうか。
実践から得られた知見・提言	「結晶がすごく小さく感動した」「結晶がとてもきれいだった」とする生徒の感想、アボガドロ数の整数部まで再現できる生徒がいたことから、本実習は生徒の微視的概念の形成を支援する可能性の感触を得た。しかしながら、数字の桁数が大きくなる計算に対してつまづく生徒が多くなり、結果として重さと体積から粒子数を求める計算がうまくできなかった生徒が多かった。数学の授業での取り扱いや生徒の履修状況を検討した後、理科教育における定量的な指導の方法を工夫する必要がある。

1. はじめに

微視的概念は自然を理解する上できわめて重要である。巨視的な見方だけでは説明できない現象があるからである。そのような場合、原子・分子といった物質を構成する粒子概念を導入することで説明できることは少なくない。しかし、化学教育を行う上で大切だからといってはじめから原子分子を教え、化学式や化学反応式を教えればよいことではないと武田(1993)は述べている。原子・分子はきわめて小さく肉眼では観察できないので、説明を受けても実感が湧かないからである。物質は溶けたり蒸発したりすると目に見えなくなるが、物質は無くなってしまったのではなく、とても小さな粒子になったことを実感させて原子分子の存在に気づかせたい。

山口(2006)は中学校において水に物質が溶ける現象を扱うときに興味ある実験を紹介している。塩化ナトリウムと片栗粉を混ぜて濾紙で包み、こぼれないように輪ゴムで留め、水に入れたビーカーの中に入れ、ろ紙の部分から何かが溶け出している様子を観察する。そしてビーカーの水を2～3滴黒い紙の上にとり落としてドライヤーで乾かすと塩化ナトリウムが出てくる。ビーカーの水溶液にヨウ素液を入れても反応しない実験である。このことから、塩化ナトリウムは溶けてなくなったのではなく、濾紙の隙間を通過するほど小さくなったこと、片栗粉は溶けて小さくなくても濾紙の隙間を通過できない大きさであることなどを推測させる。

水溶液が蒸発するときの実習については榊原・前野(2006)が提案している。パラジクロロベンゼンをポリエチレン袋の中に入れ、加熱するとパラジクロロベンゼンの臭いがするようになる。そしてポリエチレンの袋に水を入れ穴が開いていないことを確かめる。このことによりポリエチレンの袋には水を通さないほどの小さな隙間があり、パラジクロロベンゼンの気体分子はその隙間より小さいと推測できる。

以上述べた実験で分子は小さいものであること、その大きさは物質によって異なることを知ることができるが、その大きさがどの程度であるのかを実感できる上手な実習は少ない。高等学校で化学現象を量的に扱うのに、「粒子をアボガドロ数個束ねて1モルとする」という物理量を定義する。単分子膜を形成するステアリン酸を用いて物理量がわかっているとしてアボガドロ数を逆算する実習がある。この実習では1モル(6.02×10^{23} 個)の単分子膜がどの程度の面積を占めるかにより生徒は広がりを実感できる。

山本(2003)は食塩結晶からアボガドロ数を求める実習を提案した。食塩結晶の縦、横、高さをノギスで測定し、その体積を単位格子体積で割ることでNaCl粒子数を求めた。そして食塩の重さから物質質量(mol)を求め、アボガドロ数を推定する実習である。この実習は、半数以上の生徒が「よく分かった」「やや分かった」とする回答が得られ、班毎実習して得られた7つのアボガドロ数は最大でも6%以下の精度で求められたとされた。このことから実践可能な優れた実習であると考えられる。

ところが大学生の実態を大学の教員に聞いてみると、定量的な扱いが苦手であり、新課程の学生が大学に入学してきて以来、特に感じるようになったという。質的に変化したと

思われる現行の高校生においてもこの実習が同じようにうまく実施できるのだろうか。

そこで、本研究では、類似した実習を公立高等学校で実施し、どの程度精度良く測定できるのか、さらにどのような授業に対する感想を持つのか等を調べたので、ここに報告する。

2. 立方体結晶の製作

再結晶で、きわめて低い確率であるが塩化ナトリウムの立方体の単結晶ができる。立方体の単結晶を 0.1 モル (5.84g, 一辺 13.9mm) に成長させるのに約 5 年間に要した。以下その作り方を述べる。

2.1 種結晶を作る

塩化ナトリウムの飽和水溶液の中に、ナトリウムイオン、塩化物イオンを通す穴があいたピスキングシート (株式会社テックジャム製, SAN4011) を入れて、単結晶を作るステージにする。

水の蒸発を少しずつにするために、飽和水溶液を入れたビーカーには小さな穴を開けたサランラップで覆う。水が蒸発すると、再結晶により結晶が出てくる。その中から、ノギスで測定して立方体のものを選び出して種結晶を得る。経験的に種結晶が立方体でないと、立方体の単結晶にならない。

2.2 立方体の種結晶を成長させる

選び出した立方体の種結晶を、別に用意した塩化ナトリウムの飽和水溶液の中に移す。その後、種結晶を成長させて行く途中で出てくる結晶は濾過して取り除き、種結晶から大きな単結晶へ成長させる。目的の大きさになったら、飽和水溶液から取り出す。

3. 塩化ナトリウムの単結晶の大きさとモル数

3.1 実習の前提となる原理

(1) 塩化ナトリウムの結晶が立方体である。

立方体の 1 辺の長さを 2.1544 倍した単結晶を作ると、 $(2.1544^3 = 10)$ なので、体積が元の立方体の 10 倍になり分子数も 10 倍になる。さらに体積 = (1 辺の長さ)³ から、体積の 3 乗根を求めると、その解は立方体の 1 辺の大きさになる。物理量として分子数を考えると、立方体を構成している分子数の 3 乗根

表 1 塩化ナトリウムの立方体単結晶

モル数	結晶G $10^0=1$	結晶F 10^{-1}	結晶E 10^{-2}	結晶D 10^{-3}	結晶C 10^{-4}	結晶B 10^{-5}	結晶A 10^{-6}
立方体結晶一辺に並んでいる分子数(万個)	8444	3819	1819	844.4	891.9	181.9	84.4
立方体結晶の一辺の大きさ(mm)	30.0	13.9	6.4	3.0	1.4	0.6	0.3
実物	無	有	有	有	有	有	有

は1辺を構成している分子数になる。

(2) 1モルは、 6.02×10^{23} 個である。

3.2 本実習で利用した塩化ナトリウムの分子モデル

(1) Na^+ の体積と Cl^- の体積の和を、1個の球の体積に換算する。 Na^+ の半径0.98 Å、 Cl^- の半径1.81 Å（理化学辞典より）のそれぞれの値を球の体積の公式 $\frac{4}{3} \pi r^3$ に代入して求めて加え、1個当りのNaClの体積を求める。その値を1個の球に換算すると、半径1.9 Å、直径3.8 Åとなるの球に相当する。なお、塩化ナトリウムは分子のかたちをとらないが、塩化ナトリウムの最小の構成単位1組の Na^+ に対して分子という言葉を使用した。

(2) 光学顕微鏡で見ているのは、原子や分子ではなく物質として見ていることを説明する。原子分子が光学顕微鏡でも見えないのは、あまりにも小さいためであるが、例えば、分子モデルとしての1mmの粒を一杯に入れた立方体を、遠くから見ると1つの物質として見えるが、近づいてみると物質を構成している1個1個の粒がみえる、という関係で説明する。

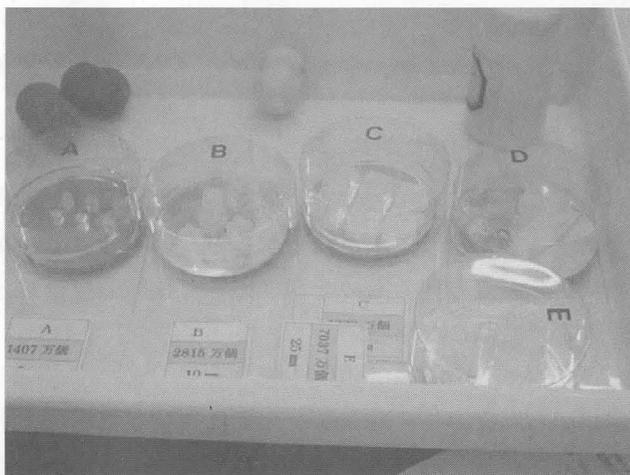


図1 塩化ナトリウムの立方体の単結晶

3.3 立方体の一片にある分子の個数

立方体を構成している塩化ナトリウムの分子数を、モル単位で順に1/10倍ずつ変えた単結晶を提示し、「立方体の1辺の大きさとその分子数」との関係を定量的に示す。表1のAは、約84万個の分子が1列に並ぶと1辺が0.3mmの立方体の塩化ナトリウムになることを意味している。また、この表から分かるように「1辺の分子数」と「対応する1辺の長さ」とは比例している。この図1は、結晶の「1辺の大きさ」ととの関係を理解させるために成長させた塩化ナトリウムの立方体の結晶である。

これにより、立方体の単結晶から、塩化ナトリウムの「1辺の大きさ」と「その分子数」とが比例することを説明する。直方体でも同じ塩化ナトリウムなので比例し1辺が5mmの結晶には1407万個の分子が並んでおり、1辺が10mmの結晶には2815万個の分子が並んでいることが分かる。15mm、20mm、25mmについても同様に比例で求めることができる。

4. 試行授業

授業は、広島市立基町高等学校において2007年6月29日に1年生を対象に理科総合Aの授業の中で行った(図2)。授業の目的は、塩化ナトリウムの立方体単結晶の実物の観察を通し、化学の基本的概念であるモルの考え方を身につけさせることである。なお、同校は広島県のなかでも上位進学校である。

4.1 準備

準備したものは以下のものである。

マイクロメータ5個と関数電卓10台、塩化ナトリウムの立方体単結晶A~F、電子天秤10台

4.2 授業の概要

(1) 導入(10分)

これまで学習したように塩化ナトリウムの結晶は、多数のナトリウムイオンと塩化物イオンが交互に配列し、クーロン力によって結合している(図3)。その最小単位を粒子と考え、 Na^+ の体積と Cl^- の体積の和を、1個の球の体積に換算する。 Na^+ の半径0.98 Å、 Cl^- の半径1.81 Å(理化学辞典より)のそれぞれの値を球の体積の公式 $\frac{4}{3}\pi r^3$ に代入して求めて加え、1個当りのNaClの体積を求める。その値を1個の球に換算すると、半径1.9 Å、直径3.8 Åとなるの球に相当することを発泡スチロール球2個を提示しながら説明する(図4)。オングストロームからmmに単位変換できるように事前に指数の計算を学習する。なお、指数の計算1年生の冬に数学で履修する。さらに、塩化ナトリウムの立方体単結晶の作り方を簡単に説明した。

(2) 展開(35分)

以下の手順で作業を行った。



図2 授業の様子

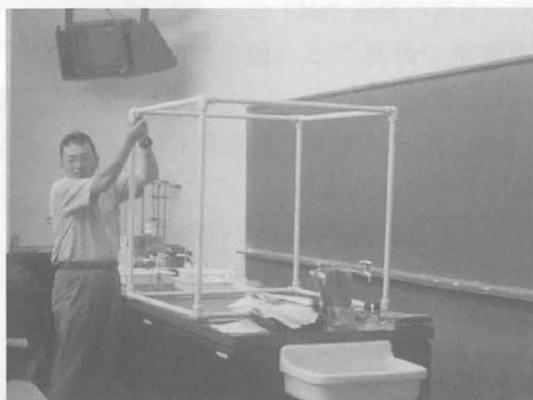


図3 塩化ナトリウム分子の説明



図4 分子モデルを見ながら考える

① 塩化ナトリウムの立方体単結晶（一辺が 0.3mm, 0.64mm, 1.39mm, 3.0mm, 6.4mm, 13.9mm のもの）を各班に配り，マイクロメータで正確に一辺の長さを測る（図 5）。

② その一辺の長さから一辺を構成している最小単位 NaCl の数を電卓で計算する。

③ 立方体（結晶）を構成している最小単位 NaCl の数を電卓で計算する（図 6）。

④ 計算したその数から物質質量（モル数）を求める（図 7）。

⑤ 電子天秤を使って，その結晶の質量を計り，電卓を利用してその値から物質質量（モル数）を求める（図 8）。

⑥ ④と⑤で求めた物質質量（モル数）を比較する。

⑦ 他の 5 つの資料についても時間がある限り測定する。

⑧ 大きさの異なる単結晶 A ~ F の測定から「1 辺の分子数」と「対応する 1 辺の大きさ」との関係を検討する。

⑨ ⑧までできたら，塩化ナトリウムの直方体の単結晶を一つサンプルとして教卓に取りに来る。マイクロメータで正確に縦・横・高さの長さを測る。縦横を構成している最小単位 NaCl の数を求める。

(3) まとめ（5分）

① 塩化ナトリウムの「1 辺の大きさ」と「その最小単位 NaCl の数」とが比例することを説明する。塩化ナトリウムの結晶 1 辺の長さを知り，結晶には最小単位 NaCl の数が何個

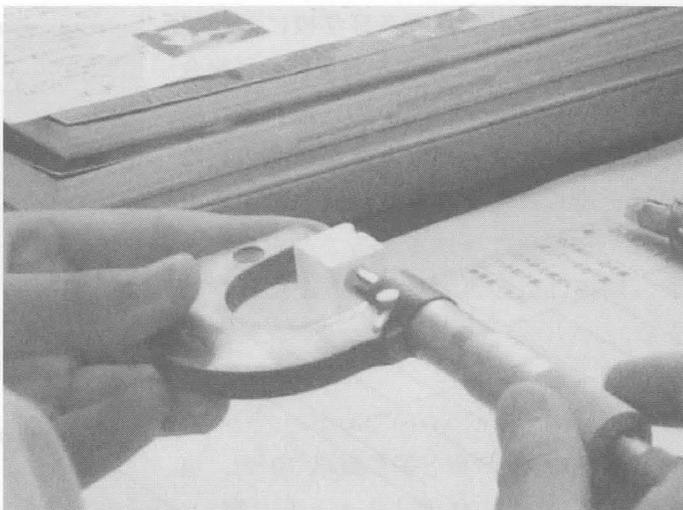


図5 マイクロメータで一辺の長さを測定する

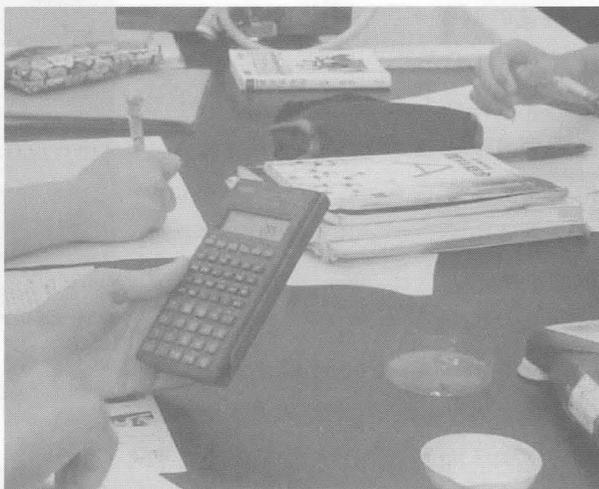


図6 計算に電卓を利用

並んでいるかを比例関係を利用して推測する。

② 塩化ナトリウムの単結晶の1辺の大きさを、そこに並んでいる最小単位 NaCl の数として具体的に数値で出てくるので物質を作っている最小単位がいかにか小さいものであるかを実感できる。

③ 化学の実験では、目で見える塩化ナトリウムの立方体の結晶を質量や大きさを測ることより、物質を作る最小単位が多数集まって結合している物体として捉えることが大事であることを伝える。

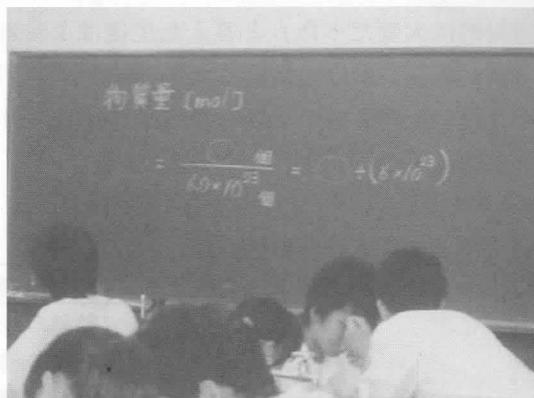


図7 物質量（モル数）を計算する

4.3 授業・教材の評価

表2は教材の有用性について調べたものである。直接確率計算（両側検定）の結果「相対的に役立った」と答えた生徒は有意でなかった ($p=0.187, 0.1 < p$) が、片側検定では有意傾向が見られた ($p=0.0938, .05 < p < .10$)。

表3は、生徒が教材について役立った理由をカテゴリ分けしたものである。役立つとした理由の中で最も多かったのは、「知らなかったことが分かった」であった。



図8 電子天秤で重さを測定

今回使用したマイクロメータの使い方について調べたものである	表2 相対的に役立つか否か			
	役立った	役に立たない		
	4	19	12	2
	$N=37$			

(表4). 直

表3 教材が役立った理由	
相対的に役立った理由（複数回答）	計
知らなかったことが分かった	9
おもしろかった	7
よく分かった	4
感動したから	1
その他	2

接確率計算（両側検定）の結果「相対的に苦にならなかった」と答えた生徒は有意傾向が見られた ($p=0.0988, 05 < p < .10$). 表5は、生徒がマイクロメータの使い方苦にならないとした理由をカテゴリ分けしたものである。

苦にならないとした理由の中で最も多かったのは、「簡単であった」であった。

次に、単位の換算の困難さについて調べた（表 6）. 直接確率計算（両側検定）の結果「相対的に大変だった」と答えた生徒は 1%水準で有意であった ($p=0.00000$, $p<.01$). 表 7 は、生徒が単位の換算に大変だったとする理由をカテゴリ分けしたものである. 大変だったとした理由の中で最も多かったのは、「小さすぎてイメージが湧かない」であった。

表4 マイクロメータの使い方

苦にならなかった 難しかった

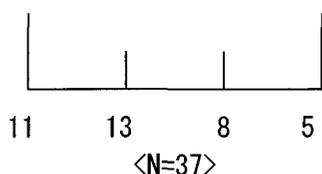


表5 苦にならない理由

相対的に苦にならない（複数回答）	計
簡単だったから	12
先生の説明でよく分かった	7
測定に興味を持ったから	5
その他	3

表6 単位の換算

大変だった 簡単だった

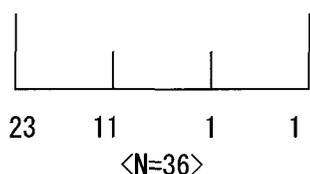


表7 大変だった理由

相対的に苦にならない（複数回答）	計
小さすぎてイメージが湧かない	19
指数の計算に慣れていない	9
元々計算が苦手だから	7
その他	3

表8 もっと調べたくなった

調べたくなった なくなった

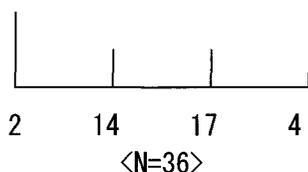


表9 重さと体積から粒子数を推定する計算

	計
オーダー的に一致する	8
計算したが一致しない	4
計算できない	26
その他	0

表 8 は実習する前と比べ、物質を作る最小単位についてもっと知りたくなったかという問いに対する回答である. 直接確率計算（両側検定）の結果「相対的に知りたくなった」と答えた生徒は有意でなかった ($p=0.5113$, $0.10<p$). 生徒が粒子数を計算した結果を実習後回収したワークシートから調べた（表 9）. 表から分かるように、質量と体積から推定した粒子数がオーダー的に一致する生徒はわずか 21%にとどまり、全く計算できていない生徒は約 7割であった。

実習に対する生徒の感想を表 10 に示す。最も多かったのは、「電卓・計算機が上手く使えない」、「数が小さすぎてイメージしにくい」であった。項目 I から N までは計算に困難を感じている回答であり、回答数の約 7 割に達する。しかし、「小さな結晶の中にすごい数の結晶が入っているのがすごいと思った」という項目も多くの回答があり、十分な計算ができなかったにもかかわらず、微視的概念の形成を示唆する回答も見られた。

授業を担当した教員と参観した教員の 2 名に事後アンケートをとった。「この教材は、モルの考えた方を理解させるのに役立ちそうですか」については、2 名とも「役だつ」と回答している。その理由や感想を次に示す。

教員 A：物質の概念を体感することができた。計算ばかりでなく実物を目にし物質の量を粒子数、質量、モル数から多面的に理解できると思う。計算してアボガドロ数のオーダーしか合わないと思っていたが、整数部までほぼ再現できた生徒がいて感動した。

教員 B：イオン結晶が美しいので興味が湧く。また、頭の中で想像するのではなく、実物を測定して考える内容なので粒子の数をイメージしやすい。アボガドロ数が長串的にも質量的な方法でも同じオーダーになったことは、達成感が生まれる。電卓の使い方に課題が残った。

表 10 生徒の実習に対する感想

感想	人数
A 実習して楽しかった	1
B 初めて使う道具があり、新鮮だった	2
C 結晶がすごく小さく感動した。	1
D 結晶がとてもきれいだった	1
E モルのイメージがはっきりした	2
F 小さな結晶の中にすごい数の結晶が入っているのがすごいと思った。	7
G 長さや質量を測る事からマイクロの世界のことが導き出せるのは意外だった。	1
H 数字が小数ばかりになって世界が違うとおもいました。	1
I 計算が難しすぎて自分は何もできなかった	9
J 計算が面倒だった	1
K 細かい計算ばかりで大変	2
L 電卓・計算機が上手く使えない。	10
M 粒子数が多く混乱し計算できない。	4
N 数が小さすぎてイメージしにくい	10

5. おわりに

本研究では、身近にある安価で安全な塩化ナトリウムの立方体単結晶を作成し、結晶の重さや体積を測定することを通して、その結晶に含まれる粒子の数を定量的に推定させる実習を行った。その結果、「結晶がすごく小さく感動した」「結晶がとてもきれいだった」とする生徒の感想があり、アボガドロ数の整数部まで再現できる生徒がいたことから、本実習で微視的概念の形成を支援するという可能性がある実習であるという感触を得た。さらに、この教材や実習が相対的に役に立ったとする回答がやや多く見られたが、単位の換

算に多くの困難を感じる生徒が現れ、重さと体積から粒子数を求める計算結果がオーダー的に一致した生徒はわずか 21 %であった。また、この実習に対し数が小さすぎてイメージしにくいとか電卓・計算機をうまく使えないと回答する生徒が多かった。今後、数学の授業での取り扱いや生徒の履修状況を検討した後、理科教育における定量的な指導の方法を工夫する必要がある。

文献

榊原保志・前野十行，2006，分子の大きさ目視確認用理科実験器の開発，日本理科教育学会全国大会発表論文集，第 4 号，p396.

武田一美，1993，化学教育の課題と展望－教育内容の再検討と授業の改革－，理科の教育，通巻 493 号，pp.512-515.

山口晃弘，2006，第 1 学年身の回りの物質「状態変化」「水溶液」－微視的な見方や考え方の導入－，理科の教育，通巻 653 号，pp.843-845.

山本勝博，2003，食塩結晶および金属結晶を用いたアボガドロ定数の測定－身近な材料を用いた定量実験の開発と実践－，科学教育研究，第 27 巻，pp.186-193.

(2008 年 6 月 30 日 受付)