

思考力の育成を目指した化学実験授業の開発 －気体の質量測定における浮力の効果を粒子モデルで捉える簡易実験－

眞 島 佑 弥*・下 村 博 志**

(令和3年8月31日受付；令和3年11月22日受理)

要 旨

思考力の育成につながる化学実験とそれを用いた授業を開発した。気体の質量測定に関する実験について検討した。ガス缶からボタンを密閉したビニール袋のなかで放出させ、その前後の質量変化などを測定した。それらの実験について全体の質量がどうなるか予想をたて、結果を議論し解釈した。これらの結果は粒子モデルを用いた説明が可能であり、受講者は気体の質量や空気中の質量測定における浮力の作用について粒子モデルで理解し説明する過程で思考力が要求された。

KEY WORDS

気体の質量 gas mass 浮力 buoyancy 粒子モデル particle model

1 はじめに

知識や技能を習得したり、確認するだけではなく、思考力の育成につながるような実験教材の開発が必要とされている⁽¹⁻³⁾。今回は気体の質量測定に着目し思考力の育成を目指した実験授業について検討した。気体は非常に身近な存在であるにもかかわらず、普段その質量について意識されることはない。また気体のように密度の小さい物質の質量を空气中で測定する際には、浮力の影響を顕著に受けることがあるが、これも普段意識されることはない。これらの身近であり気付かれない事柄をとりあげることで、自然科学的な見方の効果や大切さを感じられるのではないかと考えた。また化学に関係する現象は、原子や分子などの粒子という実体があり、つきつめればそれらの振る舞いとして理解される。そのため教育現場では状態変化、化学変化や溶解現象など、様々な現象が粒子モデルで説明されている。また化学現象を粒子モデルで理解し説明を組み立てる能力は教員養成課程の授業で大切な要素であるように思われる。気体の質量や浮力の効果については、粒子集団中での平衡などの要素を考慮する必要がなく、概ね基本的な粒子モデルで説明することが可能であると考えられる。空气中での浮力に関する教材開発などは行われているものの⁽⁴⁾、空气中での浮力の作用が粒子モデルを用いて説明されることはあまりないようである。空气中における浮力の作用を方程式等の形式で抽象化してとらえる前段階として、粒子モデルでより実体に近いイメージで捉えようとする事自体が、その過程で化学の理解の方法に触れるとともに、思考力の育成につながるのではないかと考えた。ここでは気体の質量や浮力の効果について身近な材料で簡易に実施可能な実験と粒子モデルによる解釈について検討し、それを上越教育大学大学院の授業で実施した結果を報告する。

2 実験と授業での実践

2. 1 気体の質量を確認する導入実験

炭酸飲料から炭酸ガスが噴出する現象は日常経験している。ここで炭酸飲料から気体が放出されると、質量が変化するかどうかを予想し観察することで、気体に質量があることを確認する。

実験方法^{注1)}

- (i) 予め室温にしておいたペットボトル入りの炭酸飲料の質量を測定する(状態1)。
- (ii) 蓋を僅かに開け、中の液体が出ないように注意しながら気体を噴出させる。必要に応じて蓋を閉め攪拌してから蓋の隙間を開けるなどして気体を放出させる操作を繰り返す。その後質量を測定する(状態2)。

実験結果

500 mLの炭酸飲料でおおよそ2 g程度の質量減少が観察される。

授業における実験の取り扱い

どうなるか予想し、根拠とともに議論する。

気体に質量があることを確認する。同時に気体は圧力を高めるほど液体に溶けること、また温度が高いほど溶解度が小さくなることも確認する。

導入実験を授業で実施した結果と考察

今回の実験全体を構想する際、できるだけ身近な材料で手軽にできる実験となるよう考えた。また実験は全て指導者が演示実験として行った。

浮力について検討するための導入実験として、炭酸飲料から炭酸ガスが噴出する際に、質量が変化するかどうかを観察することとした。この実験のねらいは、気体に質量があることを確認し実感することである。日常的に炭酸飲料の蓋を開けるとガスが噴出することを経験している。このとき、噴出したガスの分だけ質量が減るのかどうか、必ずしも全員が正しく考察し予想できるとは限らなかった。気体の質量は本来的に天秤で検知できないなどの意見があった。質量が減少すると正しく推測できた者には、密閉容器内で炭酸塩と酸とにより気体を発生させ、質量が変化するかどうかを見るなどの実験の経験が一つの有力な根拠とされることがあった。また軽くなるはずだと正しく予想できても、その根拠として放出されるガスが二酸化炭素であり、それは空気より重いから、と考えていることがあった。この場合、放出される気体が空気より軽いガスの場合にはどうなるか、などの議論につなげることも可能である。空気より軽い気体であっても質量は減少する⁽⁵⁾。結果を確認し議論すると、一定の空間（容器）内から気体が放出されると軽くなる、ということ粒子モデルを用いて理解することは比較的容易であった。

ここでは一定体積の容器からガスが放出される際に質量が減少することを確認する、という点に焦点をあてて実験を行ったが、先行研究として炭酸飲料を気体発生源として活用し、空気中での浮力を利用して二酸化炭素の分子量を求めるという実験と授業が開発されている^(6,7)。そこでは正確に二酸化炭素の分子量が求められている。

2. 2 浮力の影響を観察する実験

導入実験より、一定体積の容器から気体が放出されると質量が減少することが確認される。その際、放出される気体を一度ビニール袋などの空間に閉じ込めるとどのような現象が観察されるか予想し、実際に観察された現象を粒子モデルで理解し説明することを試みる。

実験方法^{注1, 2)}

(i) カセットガスとピンをビニール袋に入れ包む（ビニール袋の口を縛る）。この際、できるだけ空気が中に入らないように、かつ内部に気体が貯まる容積があるように包む。全体の質量を測定する（状態1）。

(ii) ピンを操作してビニール袋の内部でガスを噴出させる。ビニール袋が適当な大きさまで膨らんだ時点で全体の質量を測定する（状態2）。

(iii) ビニール袋をあけるなどしてガスを放出させた後、全体の質量を測定する（状態3）。

実験結果

典型的な実験結果の一例として、（状態1）319 g、（状態2）310 g、（状態3）300 gとなった。

授業における実験の取り扱い

状態1から状態2へ変化させる際、また状態2から状態3へ変化させる際や、状態1から状態3への変化について、質量がどうなるか予想を立て議論する。定量的な数値ではなく、現在観察されている質量から増減の有無と方向について予想しその根拠を説明する。実験結果を粒子モデルで説明する。

浮力の影響を観察する実験を授業で実施した結果と考察

実験方法の検討では、気体をビニール袋などに閉じ込め、浮力を利用して分子量を測定する実験の教材開発や⁽⁶⁻⁸⁾、ガス缶ごとビニール袋に閉じ込め浮力などを測定する例が報告されており⁽⁵⁾、それらを参考にした。今回の実験方法は矢野(2012)が実施した簡易な方法と同じである⁽⁵⁾。二酸化炭素やヘリウムのガス缶を用いる実験ではガスが

高価であると指摘されており⁽⁵⁾、より身近な材料で実施できるよう今回はボタンガスのカセットを用いた。ボタンガスのカセットは容易に入手できるが質量が大きくなり、通常の化学実験室にある電子天秤は使用できず、家庭用のはかりを組み合わせる実験を行った。比較的多量のガスを用いて実験を行える効果があり、半定量的な実験としても成り立っていた^(注3, 4)。カセットガスやライターのボタンガスを理科実験の気体として活用することは行われている^(9, 10)。ボタンガス以外にもしばしば可燃性の気体の実験材料として使用されるが、安全に十分に配慮する必要がある^(注2)。

状態1から状態3への変化については、導入実験からの類推も可能で、予想も解釈も特に問題は生じず、質量が減少すると正しく考えることができた。状態1から状態2への変化について、質量は不変との意見が目立った。多くの場合、その根拠は質量保存の法則であった。減少と予想してもその根拠は明確ではなかった。状態2から状態3の変化については予想を立てられないことも多かった。浮力の影響を観察する実験については、結果を予想することは多くの者にとって困難だった。なおこの実験において授業者は「浮力」などのキーワードを用いずに授業を展開し、受講者の議論が深まり受講者が浮力ということに気が付くまでキーワードの使用は控えた。また関係する気体は全て理想気体であるとして取り扱うこととした。

実験結果を得た後でも、状態1から状態2への変化及び状態2から状態3への変化は意外に、あるいは不思議に感じられるようだった。実験結果を得た後の解釈についても直ちに了解されることはなかった。授業者の意図としては、この現象を理解するのみではなく、この現象を中学生などに説明する説明力を受講者に求めた。その際、可能な限り具体的でわかりやすい説明を求めた。単に「浮力が働くから」や「アルキメデスの原理により」などの説明は抽象的で不十分であり、なぜ浮力（と呼ばれる）力が働くのか、というところから説明を求め、受講者がアルキメデスの原理を再発見し説明できるようになるよう心掛けた。受講者どうして議論しながら考察を進めていった。

議論において目立ったのは、気体粒子が空間中で膨張している状態（状態2）において粒子が上向きや横向き（ビニール袋を膨らます方向）に運動する成分が大きく、相対的に下向きの運動成分が少なくなるため、質量が軽く測定される、という解釈だった。気体が自由運動するという知識が質量測定における下向きの力と混乱して結びついていると思われる例が見られた。

議論の過程において、浮力というキーワードが現れ、粒子モデルで理解しようとする試みも現れた。最終的には多くの受講者は粒子モデルで現象を理解することができていた。秤の無限上方までの空間の物質を考察対象とするなど様々なモデルで表現されるが、状態2において、空間の一部において空気の粒子がボタンの粒子により置換され、その置換された空気の量が状態1から状態2への変化に伴う質量減少として観測される、ということに考察が到達した。図1は学生が描いた図の典型例を整理したものである。秤の上にガス缶、ビニール袋を描いたものである。状態1と状態3の点線で描かれる空間は、状態2において膨らんだビニール袋の空間を表している。状態1においてはガス缶のまわりの空間を空気の粒子が占め、状態2ではその空間をボタン粒子が空気粒子を追い出し、状態3では再び空気粒子が占めている。この図で状態1'は、「もし状態2から、ビニール袋が変形することなく、ボタン粒子を再び缶の中に入れることができたとすればどうなるか」という仮想実験の結果を表現している。缶の周囲には空気もボタンも占めていない空間（真空）が生じており、状態1と比較すれば、ビニール袋が占める空気の質量分だけ状態2では軽く測定されることが表現されている。このモデルでは空気の粒子は4粒あたり9 g、ボタンは4粒あたり19 gであると前述の実験結果が解釈される。

状態1から状態2への変化を理解できた後では、状態2から状態3へはその空間のボタン粒子が空気粒子に置き換わると解釈することは容易だった。同体積には同数の粒子が存在することなどを無視した議論が展開される場面もあったが考察としては整合性があり、議論の最終段階で気体の性質に基づいて修正した。

教育現場では浮力は物理分野で、主に水中における現象が取り扱われることが多いが、その理解は困難な面があり浮力の認識や指導方略の提言などが行われている⁽¹¹⁾。今回の取り組みから、空気中に限らず浮力に関する様々な現象を粒子モデルで考察することは、浮力をより正しく理解するために役立つ場合があることが示唆される。

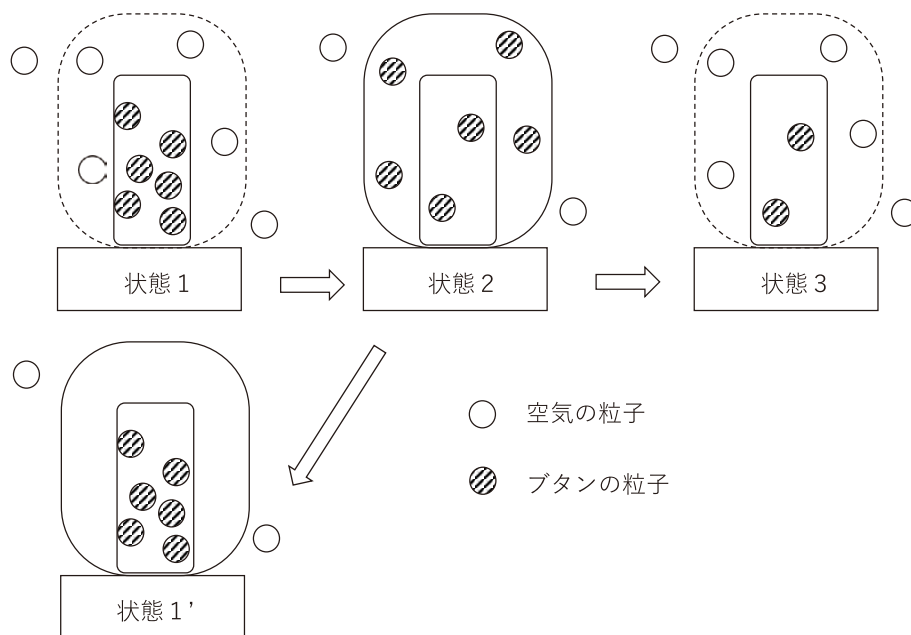


図1 気体の質量測定における浮力の効果について説明するための粒子モデル

3 まとめ

気体の質量や、空気中で浮力が作用している現象を観察し、その現象を自ら粒子モデルを構築しながら解釈することで科学的な思考力が要求される授業を構成できた。この実験を経験した学生は意外な現象を目にし、深く考察する必要があることを実感し、現職の教員からは中学校でこの授業を試みたいなどの感想もあった。気体の質量や浮力の作用については粒子モデルは具体的で解りやすいモデルであり、今回の実験授業を応用することで、様々な学習段階において思考力を働かせるとともに、浮力や気体の性質についてより深く理解できる授業を実施できる可能性があると考えられる。

謝辞

結果の検討の議論の一部に浅野翔太氏に参加していただきましたことを感謝します。

注

- 1) 全体の質量測定は最大計量2 kg、最小表示1 gの家庭用デジタルはかり（TANITA No.1141）を用いた。必要に応じて膨らんだビニール袋を載せるための薄いベニヤ板や、その際秤の表示が隠れないようにするためのスペーサーとして発砲スチロールブロックなどを用いた。浮力を観測する実験のカセットガス缶としてカセットコンロに用いるブタンガスの缶を用いた。実験2における「ピン」とは、ビニール袋の中でカセットガスのガス出口を押さえてガスを噴出させるための自作の器具で、木ねじの端（ドライバーをつける部分）にコルク栓を接着したものである。ビニール袋の外からピンを用いて、ビニール袋の中でガスを噴出させる。ビニール袋は20 Lの大きさのものである。今回の実験ではこれらの器具で得た結果で授業を実施できた。
- 2) 今回の実験は可燃性ガスを扱うことになり、火気を消しておく、静電気による火花が発生しないようにする、ガスと空気の混合気が生じないようにする、ガスは屋外の風下に速やかに完全に除去するなど、状況に応じて安全に十分に配慮する必要がある。実験者は爆発限界などを調べ可燃性気体の性質と扱いに十分な準備をする必要もある（ビニール袋にわずかにガスが残っていても危険である）。これらのことはブタンに限らず水素などの実験用ガスを扱うときと同様である。実験結果を予想する、実験結果を解釈することが授業の骨格となるので、実験自体は指導者による演示実験でも充分である。
- 3) 状態1から状態2への変化が9 gの減少であった。空気の平均分子量を29として、9 gの空気が占める体積を求めると約7 Lとなる。一方この実験における放出されたブタンの質量は19 gであり（状態1から状態3への変化分）、ブタンの分子量58より、状態2におけるビニール袋のブタンガスの体積をブタンの質量から求めると約7 Lとなり、概ね実験結果と一致した。なお計算は、関係する気体が全て理想気体であるとして行った。
- 4) 状態2から状態3への変化は、約7 Lのビニール袋の空間に占められていたブタンガス（19 g）が系外に除去され、空気（9

g) がその空間に入ってきて置き換わったことになる。従って全体では10 gの質量減少となる。ビニール袋の7 Lの空間がブタンから空気に置き換わったとして減少する質量を計算すると約9 gとなり実験結果と概ね一致した。

またこの実験において、缶のなかの分子が未知であるとして、空気の平均分子量から未知の分子量を求めると約61となりブタンガスの真値(58)と大幅には異ならない結果が得られた。したがってこの実験の議論をすすめてブタンの分子量を求める原理についても考察することも可能であると考えられる。この実験を繰り返すと常に、状態2の質量は、状態3と状態1の平均値に近い値となることに気が付き、このことが考察に強く影響することがある。これはブタンの分子量が空気の分子量の約2倍であることによる偶然である。

引用及び参考文献

- (1) 上越教育大学出版会 「思考力」を育てる - 上越教育大学からの提言1 - 2017年
- (2) 上越教育大学出版会 「思考力」が育つ教員養成 - 上越教育大学からの提言3 - 2018年
- (3) 下村博志 「金属イオンの定性分析」における「21世紀に求められる資質・能力」の「思考力」の捉え方 上越教育大学研究紀要, 第36巻 第2号 565-570, 2017年
- (4) 若林教裕 浮力を学ぶ意味や価値を実感させる教材と指導展開 東レ理科教育賞 作品概要 2013年
https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h25_01.pdf (2021-08-31)
- (5) 矢野幸夫 浮力の実験「気体押し縮めると重くなる？」 物理教育 60巻 3号 194-197, 2012年
- (6) 山本進一, 荒木敏行 炭酸飲料を用いた二酸化炭素の分子量測定 - 空気の平均分子量と空気中での浮力を積極的に利用して - 化学と教育 46巻 8号 490-492, 1998年
- (7) 山本進一 空気中での浮力を利用した気体の分子量測定 東レ理科教育賞 作品概要 1999年
https://www.toray-sf.or.jp/awards/education/pdf/h11_04.pdf (2021-08-31)
- (8) 山本進一 状態方程式を用いない気体の分子量測定 化学と教育 48巻 11号 760-763, 2000年
- (9) 宮城政昭 簡単にできる気体の分子量測定 - カセットガスボンベを用いた気体の分子量測定法の検討 - 理科の教育 45巻 164-165, 1996年
- (10) 河淵計明 二, 三の基礎化学実験 - アボガドロ定数, 中和滴定の応用, 分子量の測定 - 理科の教育 45巻 168-169, 1996年
- (11) 新里和也, 古屋光一 中学生から大学生までの水中の「浮力」に関する認識調査 - 「浮力」の概念に関する指導方略への提言 - 理科教育学研究, 第54巻 第3号 403-417, 2014年 及びその引用文献

The development of chemical experiments to foster cognitive abilities

– A simple experiment to capture the effects of buoyancy on gas mass measurement through a particle model –

Yuuya MASHIMA^{*} · Hiroshi SHIMOMURA^{**}

ABSTRACT

This study developed chemical experiments for the measurement of the gas mass in a classroom. The experiments were intended to train the cognitive strength of students. Butane was released from a gas cassette in a sealed plastic bag, and the mass change was measured before and after its release. Predictions were made about the experiments, and results were discussed. These outcomes could be explained using a particle model. Thinking skills were required from participants to understand and explain the action of buoyancy in measuring the mass of gas and mass in the air through a particle model.

^{*} Iwamuro Elementary School, Niigata City, Niigata Prefecture ^{**} Natural and Living Science