

気体の分子運動に関するモデル実験と授業展開

柿原 聖治

愛知東邦大学

気体の分子運動に関するモデル実験と授業展開

柿原聖治

目次

1. はじめに
2. これまでの授業展開
3. 新たな授業展開
4. おわりに

1. はじめに

平成24年4月から全面実施されている中学校の学習指導要領では、理科の改善の基本方針として「エネルギー」、「粒子」、「生命」、「地球」などの科学の基本的な見方や概念を柱として、…¹⁾が挙げられており、「粒子」が大きな柱になっている。さらに、「状態変化と熱」の項目では「粒子のモデルと関連付けて扱うこと。その際、粒子の運動にも触れること」²⁾という文言が新たに入った。このように、粒子の運動は非常に重要な学習内容になっている。

粒子の運動というのは分子運動のことであり、筆者は、特に気体に注目し、数年前、その実験教材を開発した³⁾。気体分子のモデルとしては、実験教材とコンピュータシミュレーションをうまく組み合わせた研究もある⁴⁾。筆者はコンピュータは用いず、粒子としてBB弾を用い、分子運動の醍醐味である、粒子と壁との衝突の激しさを実感できるようにした。その自作の気体モデルを使って講義をしてきた⁵⁾。毎回の講義で小テストを行い、気体の分子運動に関して学生の理解度を調査し、試行錯誤をしてきた。それを分析することで、どこに問題があったかが分かってきた。調査・研究対象は主に教育学部の小学校教員養成課程の学生である。文系の学生が大半を占め、高校で物理Ⅱや化学Ⅱを受講していない。千人以上を調査し、十年ほどかけた素データがある。それをもとに、再現性のある誤答パターンを見いだしている。

問題点は、真空概念の欠如と教える順序（シーケンス）にあった。また、運動状態を紙上に記述する方法（ベクトル）を知らなかったことも問題であった。

本研究の目的は、気体の分子運動に関する学生の誤解を明らかにし、それを克服した授業展開を示すことである。

2. これまでの授業展開

2.1 全体構成

気体の分子運動で押さえるべき点は、次の3点である。

- ① 同じ大きさの粒子が動いている
- ② 温度が上昇すると、粒子の運動が激しくなる
- ③ 閉じ込めた気体を圧したとき、押し返す力が大きくなるのは、粒子の衝突回数が増えるからである。

従来の方では、空気鉄砲から入り、モデル実験を行い、①と③を同時に教えていた。その後、②の状態変化や熱膨張を粒子概念で教えていた。

2.2 空気鉄砲

小学校4年の学習内容に「閉じ込めた空気を圧すと、体積は小さくなるが、押し返す力は大きくなる」がある。プラスチック注射筒を各自に渡し、これを体験させた。この性質を利用して、物を動かすものが作れることから、空気鉄砲づくりを行わせた。ここで、呼吸している空気も、窒素と酸素という粒からできていることを確認した。それから、空気になぜバネのような性質があるのかを、粒子概念を使って、考えさせた。

2.3 粒子概念

「閉じ込めた空気を圧すと、体積は小さくなるが、押し返す力は大きくなる」を図示させると、ほとんどの学生が図1のように、粒子を小さくすることで表す。

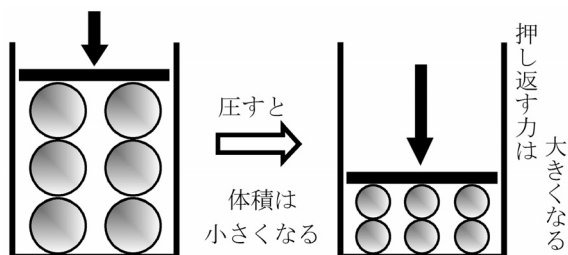


図1 気体の圧縮についての学生の考え

また、静止したモデルばかりで、動的なモデルはない。そこで、粒子の大きさは変化しないという基本的なことを確認し、粒子の動きをイメージしやすくするためにモデル実験を行った。

2.4 モデル実験

テレホン・カードから円形を切り取り、その中心に細い竹ひごを刺すことで、モデル用のピストンを作る。

プラスチック注射筒（50mL、横口）に、BB弾を入れる。BB弾は、空気銃に用いられるプラスチック製の球形の弾丸（直径6mm）で、玩具店で入手できる。BB弾を空気のモデルとする。空気の組成（窒素80%、酸素20%）と同じにするため、オレンジ色の弾24個と赤色の弾6個を用いる。弾を多く入れると、動きが悪くなるので、この程度にする。

BB弾を動かす方法として、電気かみそりを使う（図2）。注射筒の先を、電気かみそりの突起部に差し込むだけである。スイッチを入れると、BB弾がランダムに飛び跳ね、ピストンにぶつかることで、空気の弾力性が表せる。

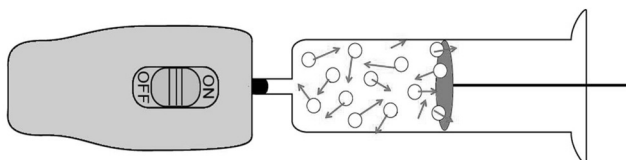


図2 電気かみそりを使った、気体のモデル

押し縮めても原子・分子の大きさや重さは変わらないことについて話をした。さらに、弾力性が増すのは粒子が激しく衝突しているためであることを教えた。

この教材そのものは、学生に非常に受け、よくできている教材であるという評価を得る。しかし、分子の運動（①）と分子の壁との衝突（③）という二つの概念を同時に理解しなければならず、一通り説明しても、同時に二つの概念をうまく理解させることが難しかった。確認の小テスト（図3）において、学生は原因をほとんど書けない。

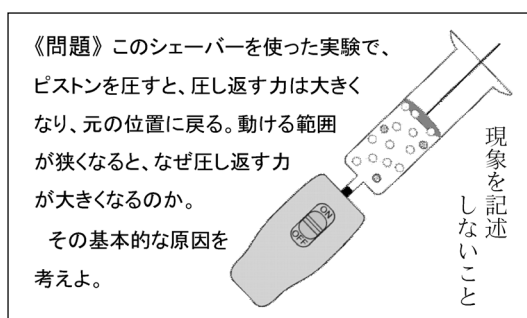


図3 小テスト：空気の弾力性を粒子概念で考える

現象ばかり書こうとする。問題文に現象を記述して、現象だけを書かないように注意する。現象の背後にある本質を捉えるように言うが、非常に難しい。

2.5 状態変化や熱膨張

気化の実験を見せた。アセトンの入ったビニル袋に熱湯をかけた。アセトンの沸点は56℃なの

で容易に気化し、ビニル袋が膨らんだ。アセトンは除光液の主成分で、身近なものであることを言った。

これを粒子概念で考えさせ、図4の小テストで図を描かせ、文章で説明するように言った。

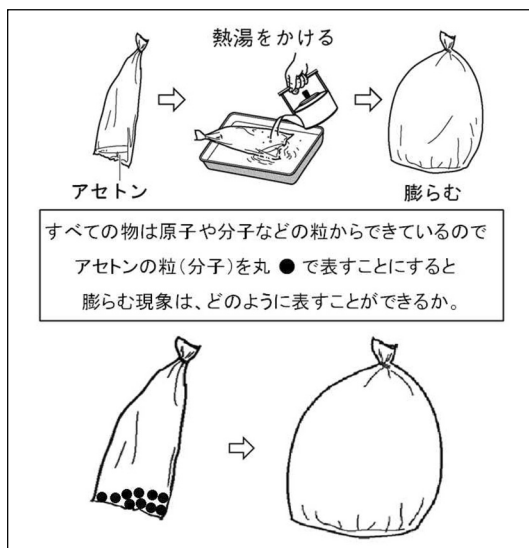


図4 小テスト：状態変化を，粒子概念で考える

最も多い誤答は粒子を拡大するもの（約7割）、次に多い誤答が粒子を袋の周囲にへばりつくように描くものや、袋の周囲により多くの粒子を偏在させる図を描くもの（約2割）、次が個数を増やすものである（約1割）。これらの考えは間違いであることを教え、再び粒子の大きさが変化することはないことと、粒子が偏在することもないことを説明した。

2.6 学生の誤解とその対策

分子運動に関する学生の誤解として、「粒の大きさが変化すると考えてしまうこと」がある。もともと抱いていた素朴概念が根強いため、授業の導入段階で、「それぞれの原子・分子の大きさは決まっていて、途中で大きさが変わることはない」という基本的なことをしっかり理解させておく必要がある。

また別の誤解として、「何もない空間（真空）を正しく理解していないこと」が以下の確認問題によって明らかになった。

図2の実験教材を学生一人ひとりに使わせた後に、次の小テストを行った。

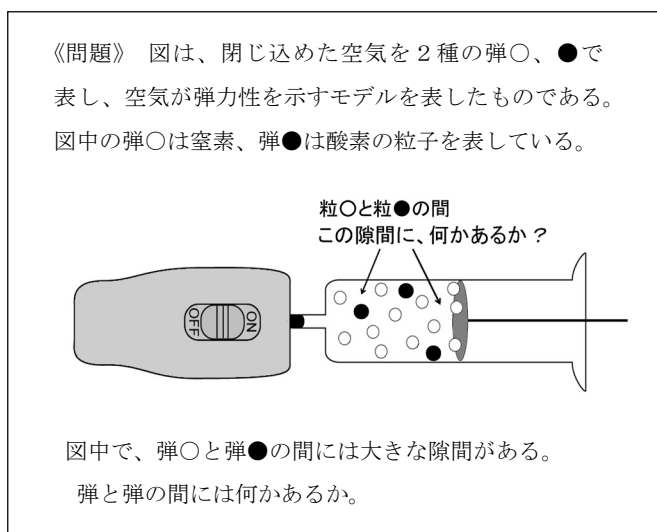


図5 小テスト：気体モデルにおける隙間の問題

空気があると、ほとんど全員が答える。「何もない」状態というのは、空気中という空間であると学生は考えている。空気ではないと言うと、二酸化炭素など微量成分を挙げる。空気全体を○と●で表しているの、微量成分は考えなくてもよいと強調するが、なかなか伝わらない。もしあったとしたら、隙間ではなく、他の粒◎が描かれていなければならない。

瞬間写真を撮ると、隙間があるように見える。しかし、気体分子は絶えず動いており、次の瞬間にはその隙間に他の気体分子が入り込むので、実質的に隙間はない。静止画で表すと、隙間があるように見えるが、動画で表すと、隙間はない。しかし「何もない」といっても学生はなかなか納得しない。そもそも「何もない空間」というのが、あるはずがないと言う。真空という言葉を出すと、さらに混乱する。いくら口頭で真空を説明しても理解させることは難しかった。

この隙間の問題は、この自作教材の問題点というよりは、気体モデル一般についての問題である。中学校の教科書にも、気体のモデル図は載っているが、これを見せても隙間に関する質問は出ない。図2のモデル実験を学生一人ひとりにさせることで、真空に対する問題意識を喚起することができる。そもそも何もない空間があるからこそ、空気に弾力性が生じる。このことを理解させずに、いくら粒子の動きだけを説明しても理解させることは難しい。「何もない空間」つまり真空を理解させることが、気体モデル全体の理解につながると考えた。

3. 新たな授業展開

3.1 全体構成

上記のことを踏まえ、改善した授業の展開を考えた。

再度気体の分子運動で押さえるべき点を挙げておく。

- ① 同じ大きさの粒子が動いている

- ② 温度が上昇すると、粒子の運動が激しくなる
- ③ 閉じ込めた気体を圧すと押し返す力が大きくなるのは、衝突回数が増えている。

新たな授業展開では、状態変化や熱膨張の実験から入り、①と②を教えた。次に、真空の実験に入り、空気銃砲から、モデル実験を行い、③を①と別にして教えることにした。

つまり、粒の大きさを変えるという学生の誤概念を最初の段階で修正させた。真空概念を定着させてから、空気銃砲の仕組みを考えさせる、という流れにした。

この授業を教育学部の小学校教員養成課程の学生、約110人を対象に行った。ただし、従来の授業では90分の講義が2回必要だったが、今回の授業では3回必要になった。

3.2 状態変化や熱膨張

ガラス容器（具体的にはオロナミンCのびんなど）を手で温めると、上に載せた硬貨が動くという実験を行わせた（図6）。硬貨の代わりに、容器の口に石けん膜を張って、容器を手で温めると、石けん膜が膨らむ。これで、空気の膨張で硬貨が動くことを確認させた。

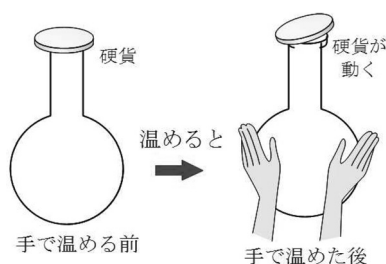


図6 気体の熱膨張

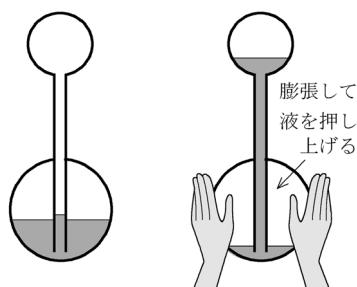


図7 フランクリン沸騰器

次に、各学生に、フランクリン沸騰器を渡し、気体の膨張を体験させた（図7）。

それから、アセトンの状態変化の実験（図4）を見せた。この実験ではアセトンの粒に注目させ、この袋がどうなって膨らむかを考えさせた。ここで、分子の大きさは不変であり、また熱湯をかけるくらいでアセトンが分解して個数が増えることはないことを教えた。

それから、匂いが遠くまで届くこと（気体の拡散）や、固体・液体における粒子の運動状態の対比などから、気体の粒子は飛び回っているという考えに到達させた。

アセトンの状態変化や熱膨張を粒子概念で説明する場合、5 lの平底フラスコにBB弾を入れ、それを振り回してみせた（図8）。学生の頭に、このイメージを植え付けさせるのに、これは非常に効果的であった。

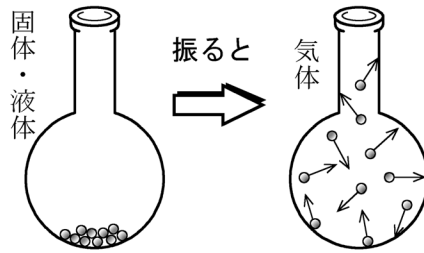


図8 固体・液体と、気体のモデル

BB弾が跳ね回ってフラスコの壁面に当たる。そのとき、衝突音があるので、遠くに座っている学生にも弾が動いていることが一瞬で分かり、分子運動をイメージさせやすかった。事あるごとに、このフラスコを取り出し、振り回して、気体のイメージをつかませるように努めた。

その際、図で動きを表すのに矢印、つまりベクトルを使うことを教えた。対義語としてスカラーにも言及した。ベクトルを教えないと、学生は動いているものを描くとき、瞬間写真を撮ったときのような図を描く。大きな動きと小さな動きを対比的に表すには、矢印の長さを変えることで表すことを教えた。今後、分子運動を表すのに、このベクトルを使って図示するように言った。

3.3 真空の実験

魔法びんやガラス製のジュワーびん、さらに真空管を見せ、中は真空であることを教えた。プラスチック注射筒を使い、学生一人ひとりに真空を自分の手で作らせた。これが非常に重要であった。真空が自分の目の前にあること、真空が特殊なものではなく、簡単に注射筒で作れることを実感させた。

真空を作ると、空気の重さが測定できる(図9)。0.01gまで測れる電子天秤を使うと、 $M-m$ が0.06gになった。

50 mL : 0.06 g = 1000 mL : x [g] より、
 空気1Lの重さは、1.2gであることを実験で示した。

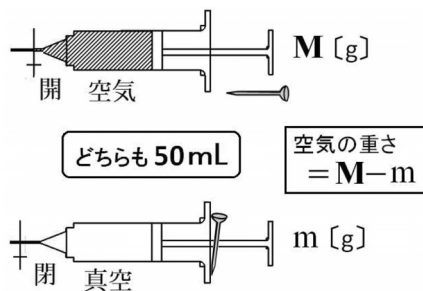


図9 空気の重さの測定

図9の下図の状態を保つには、ピストンにあらかじめ開けた穴に、かんざしを挿すように、釘を刺して固定させる。プラスチック注射筒だからできることであり、ガラスの注射器ではできない。注射筒の先にゴム管を付け、ピンチコックを付ける。

この値をもとに、教室内の空気の重さや体育館内の空気の重さ、さらに大気圧に言及した。1気圧は、 1 cm^2 の上に 1 kg の物体をのせたときの圧力にほぼ等しい。つまり、 1 cm^2 当たりに、 1 kg の空気が上空から積み重なっている。 1 m^2 の面積では、10トンもの空気が乗っていることを教えた。

真空ポンプで、空き缶の空気を抜き取ると、大気圧でつぶれることを示した。マグデブルクの半球を作って、大気圧のすごさを実感させた。

アクリルの真空容器を使う。円筒形（直径21cm、高さ30cm）で、底が脱着できる（図10）。

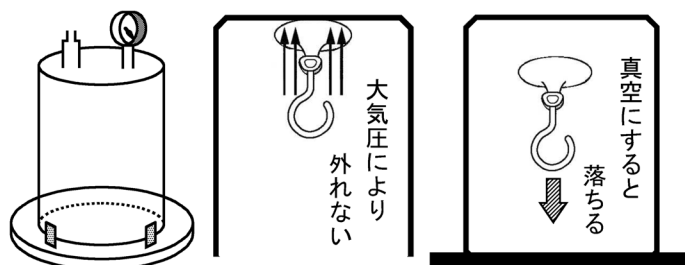


図10 真空中での吸盤の動き

真空容器の天井に吸盤をくっつける。真空ポンプを使って中を真空にすると、吸盤がポロリと落ちてしまう実験を見せた。吸盤がくっつくのも大気圧によることが分かる。

丸底フラスコの中の空気を、真空ポンプで抜いた。それを逆さにして水中に立てると、鮮やかな噴水になる実験を見せた。これは、ストローを使ってジュースを飲むときと同じ現象である。ストローを吸うと、口の中の空気の圧力は小さくなる。大気圧と、口の中の圧力との差を利用して、ジュースを吸い上げていることを教えた。

注射筒を真空容器に入れ、先を閉じる（図11）。容器の中を真空にしていくと、ピストンが上がっていく。

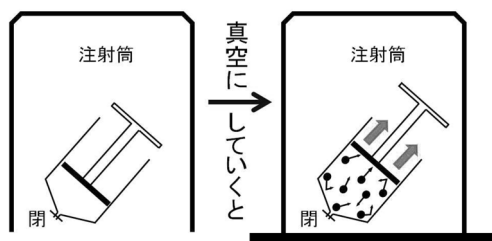


図11 真空中での注射筒の動き

注射筒の中の粒子がピストンの壁に衝突して押していることがよく分かる。図8の丸底フラスコを取り出し、振り回して、注射筒の中の様子をイメージさせた。

図11で、注射筒の先を閉じないで、周りを真空にする実験も一緒に見せなければならない。空気を閉じ込めない場合は、注射筒の内外が同時に真空になるので、ピストンは上昇しない。学生は、対比してやっと理解できたと言った。軟式テニスボールでも同様に、周りを真空にすると膨らむ。穴を開けたテニスボールでは、周りを真空にしても、変化はない。対比して見せる必要がある。

一個ずつ包んである^{あめ}飴を5、6個、真空容器に入れ、中を真空にすると、ポップコーンのように破裂する。この実験は、学生に非常に好評であった。

3.4 空気の弾力性

3.4.1 複数の粒子の場合

空気の弾力性を粒子概念で説明するために、電気かみそりを使ったモデル実験を学生一人ひとりに行わせた。次に、空気が弾力性を示す理由を粒子概念で考えさせた。図3の小テストを行って、回答させた。この段階での正解者はほとんどいなかった（正解者は35人のクラスに2人ほど）。しかし、少なくとも粒子を大きくするような誤答はなくなった。

そこで、「ピストンを圧すと、粒子の動きが激しくなって速くなったように見えるが、速さは変わっていない。では、何が変わったのか」と絞っていった。それでも答えが出ない場合は、図12を示して、粒子がピストンにぶつかる場所に注目させ、ぶつかっている回数を数えさせた。これから、押し縮めると衝突回数が変わることを、学生から引き出した。衝突回数が増えると、ピストンに多くの衝撃が加わり、押し返す力が大きくなる。

温度は変わっていないので、図を描くとき、ベクトルの長さを変えてはいけないことを確認した。

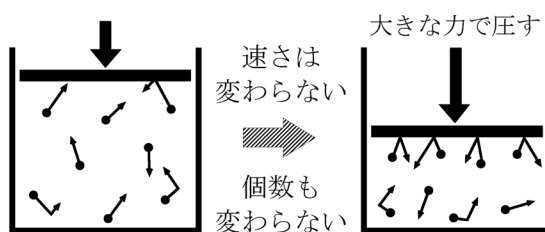
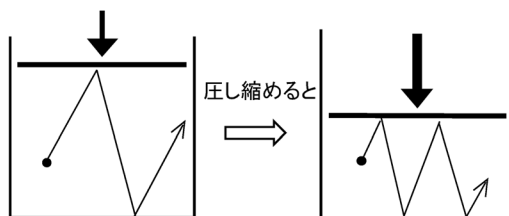


図12 分子の衝突回数を考える

3.4.2 1個の粒子に注目した場合

狭くなると、衝突回数が増えることを実験的に理解させるため、次の実験を見せた。跳ねているスーパーボールの上に、まな板を押しかぶせると、ガタガタと激しく上下運動する。衝突回数が増えていることが音でよく分かる。学生は、この実験は非常に分かりやすいと言った。

さらに、金属製の巻尺のテープをベクトルに例えた。同じ長さのテープで、壁の高さによって、N型に折れ曲がったり、W型に折れ曲がったりする（図13）。それによって、壁との衝突回数が変わり、ピストンに加わる衝撃が変わることを、図13で説明した⁶⁾。



折れ曲がっても、線分の長さの合計は同じ

図13 分子1個の動きについて考える

3.5 粒子概念で諸現象を考える

最後に、以前に行った気体の膨張の実験（図6）を、粒子概念を使って考えさせた。これまでの授業の流れから、硬貨が押し上げられるのは、中の粒子が、硬貨をたたく回数が増えるからであると、誤解している者がいた。この場合は、温めることで、粒子の速さが増加し、衝突の衝撃が大きくなったから、硬貨が動くのである。図で描く場合、ベクトルを長くする必要があることを確認した（図14）。

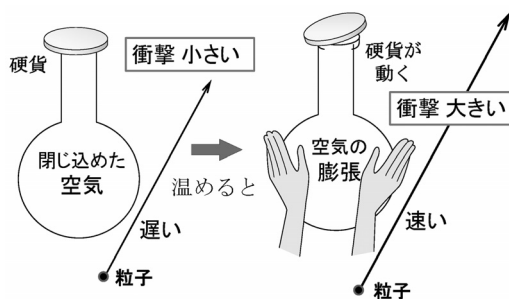


図14 熱膨張を粒子概念で考える

さらに、中の粒子は硬貨だけを押ししているのではなく、図8の右図のように、どこも均等に押ししている。硬貨のところ以外は、硬くて動かないので、変化が現れないだけである。温めると、全体として粒子の動きが激しくなることを確認した。

ちなみに、中学校学習指導要領解説に「粒子のモデルと関連付けて扱う際には、加熱や冷却によって粒子の運動の様子が変化していることにも触れる⁷⁾とあるからである。つまり、加熱や冷却によって温度が変わると、粒子の運動の様子が変化する。温度が一定の場合は、粒子の運動の様子は変化しない。これを教えるため、図14（温度上昇の場合）と図15（温度一定の場合）とを対比して示し、理解させた。

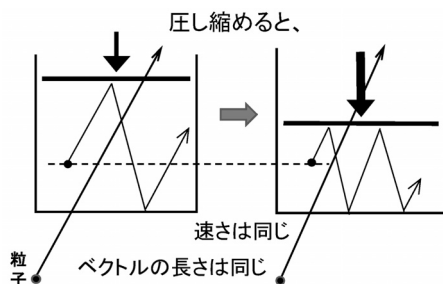


図15 弾力性を粒子概念で考える

3.6 気体の法則

気体分子が壁にぶつかる「速さ」と「頻度」と「個数」が増えれば増えるほど、圧力は増加する。閉じ込めた気体、つまり一定量の気体の場合、「速さ」に関する法則がシャルルの法則で、「頻度」に関する法則がボイルの法則である。

風船を膨らますときのように、気体の量を増やす場合、分子の数が増え、衝突回数（頻度）が増える。「個数」に関する法則がアボガドロの法則である。

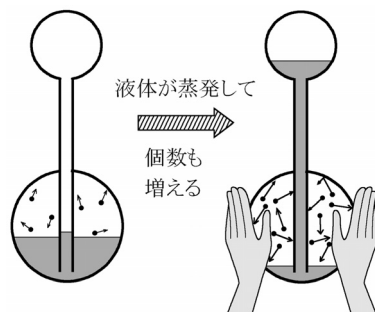


図16 フランクリン沸騰器を粒子概念で考える

フランクリン沸騰器の場合（図16）、全体は閉じているが、手で温めることで、中の液体が気体になり、気体分子の個数が増える。粒子の速さも増加するが、それよりも状態変化による気体分子の増加によって、圧力が増している。

これまで種々の現象を定性的に扱ってきたが、それぞれに法則があり、高校の物理と化学では、数式できちんと表し、定量的に学習することを教えた。

4. おわりに

気体の分子運動を学生に理解させるのは、これまで非常に難しかった。その原因が、1. 真空概念の欠如にあると考えた。そこで、真空に関する実験を多く取り入れ、真空を身近に感じさせるようにした。また、2. 教える順序に原因があると考えた。そこで、分子の運動と、衝突によ

って生じる圧力、温度上昇による分子運動の激しさ、の三者を順序立てて教えた。その際、学生が既に持っている素朴概念を出させ、それを修正してから、正しい概念に置き換えるというやり方を行った。3. 紙上に分子運動という動的なものを記述する方法（ベクトル）を、最初に教えてから、授業展開を行った。

この講義をしてから約1か月後に、図17の小テストを行い、理解度を調べた。

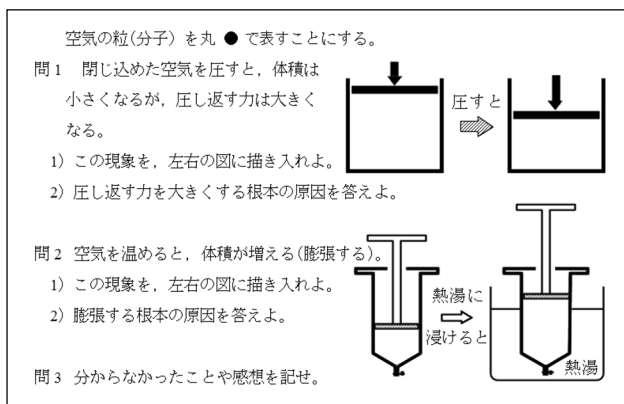


図17 小テスト：事後の調査

その結果、110人中86人が問1、2とも正解した。誤答としては、矢印（ベクトル）を使わないで、静止した図を描いている、ピストンの近くにだけ粒を多く描いている、理由も現象の記述だけというものである。問3では、何もない空間（つまり真空）に関する疑問が出なくなった。感想としては、白紙もあったが、「非常に面白かった」や「身近な現象が、分子運動の考えで説明できることに感心した」、「自然の見方が変わった」などがあつた。

改善後の授業では、真空に関する実験が入ったので、要した時間も多し。したがって、学生の理解が進んだのも、ある程度当然の結果である。

真空の実験を数多く取り入れ、教える順序を変えることで、小テストの正答率が増加し、学生の考えにも変化が見られ、これまでの問題点を克服した授業展開ができたと考えた。

引用文献

- 1) 文部科学省：中学校学習指導要領解説 理科編，大日本図書（2008），3.
- 2) 文部科学省：中学校学習指導要領，東山書房（2008），63.
- 3) 柿原聖治：理科の教育，53-7（2004），5.
- 4) 鎌田正裕，中家啓吾：東京学芸大学紀要自然科学系，58（2006），7-13.
- 5) 柿原聖治：環太平洋大学 研究紀要 第4号（2011），21-26.
- 6) 板倉聖宣：原子論の歴史－復活・確立－，仮説社（2004），86-87.
- 7) 文部科学省：中学校学習指導要領解説 理科編，大日本図書（2008），32.

受理日 平成26年9月30日