

理科教育のための話題： ちよつと変わった水圧の実験

伊藤 克美, 八木 洋文
新潟大学教育学部物理

2015.10.26 受理

概要

水圧観察器を水面下に沈めて、深くなるほど「凹み」が深くなることの観察は良く行われている。今回は、水面上に水の柱を作り、そこに水圧観察器を入れることで、水面上の水圧を観察する。実際に、講義で取り上げたときの学生の意見、また、その分布を報告する。また、これらの実験をもとに、流体の作る圧力を考えることによって、学生の理解が難しいとされる、密度、圧力などについて理論的考察を試みた。浮力、トリチェリの真空などが周辺の話題としてあり、興味深いものとする。

目次

1	ある講義の状況	1
2	水圧に関連するいくつかの実験	2
3	理論的考察	4
3.1	実施した実験を再度考え直してみる	7
3.2	関連する話題	8
4	まとめ	9

1 ある講義の状況

ある中学校教員から、興味深い実験のアイデアを頂いた。この実験を元に、関連する話題も含めて対話型の講義を行った顛末を報告したい。講義を聴講したのは、80人ほどの教員志望の学生である。

毎年出会うほとんどの学生が、高校までの「勉強」を踏襲して「覚える」ことに頭を使いがちである。伊藤は、この「習慣」が彼らの学習の大きな障害になっていると考えているので、学生同士で議論し対話によって結論に至る学習の経験を、講義の目標の一つにしている。今回も、専門が偏らないように配慮しながら、全体を4人ずつの班に分けた。

今回の話題では、理科の学生には簡単で、他の科の学生には難しいか、というと、経験的に言うと、そんなこともない。理科の学生は「知ってはいる」のだが、自分の言葉になっていない。彼らも、他科の学生に説明を求められて自分の言葉を発見する苦労を経験すべきであると伊藤は考えている。

2 水圧に関連するいくつかの実験

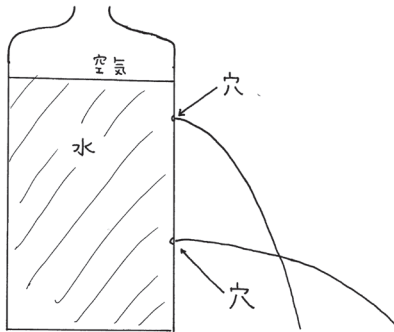


図1: 穴の開いたペットボトル

圧力、密度を理解するのに、困難を感じる学生がかなりいるということなので、まずはそこから話を始めよう。大学教員Iと大学院生のYくんの二人が講義の準備をしている。

I: 水を入れたペットボトルを用意して、違う高さのところに、いくつかの小さな穴を開けると、どうなると思う？

Y: 低い穴ほど、勢い良く水が飛び出しますよ。それはみんな知っているでしょう？

I: でも、理由を説明して、って聞くと、いつも、すぐに自信がない、って言い出す人が多いよね。これはどうなの？

Y: そうですね。やってみましょうよ。

穴の開いたペットボトルに水を入れて見せてから理由を尋ねた。班で議論してもらって出てきた回答は、「下に行くほど、上の水で押されて圧力が高い。だから、水が強く押し出される。」

図2の器具は水圧観測器というもので、円柱の両側に薄いゴム膜が張ってある。また、細い管に対して、円柱の角度が変更できるようになっているので、水に沈めるときに円柱の角度を自由に換えられるようになっている。

これを水に沈めるとどうなると思うか。

学生には以下を問いかけて班ごとに議論してもらい、意見を述べてもらう。

1. 円柱の筒を横向きにして水に沈めると何が起こるか。
2. 斜めにして沈めると何が起こるか。
3. 縦にして沈めると何が起こるか。

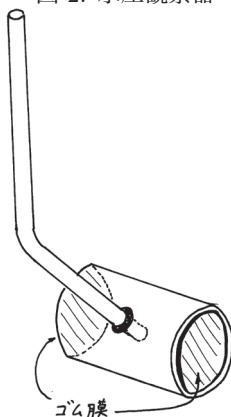


図2: 水圧観測器

明らかにしておきたいのは次の3点である。

- 円柱を横向きにして水に入れると、両側が同じくらい凹む。ゴム膜が垂直な力によって内側に押されていることを理解する。また、深く沈めるほど、凹みが大きい。
- 円柱の向きを、斜め、縦にしても、ゴム膜は垂直に押し込まれている。
- 円柱を縦にすると、上下で凹み具合が異なる。上より下の方が深く凹む。

学生への質問 [A]

円柱を横向き、斜めにして水に入れて観察した後に、円柱を縦にして水に入れる前に、学生に質問を出しクリッカーを使って答えてもらったところ、

1. 上のゴム膜がより大きく凹む：6 %
2. 下のゴム膜がより大きく凹む：82 %
3. 上下同じくらい凹む：12 %

という結果であった。容器に入った水に水圧観察器を入れ、水深 25cm 程度のところまで沈めたとき、実際に上下の膜の凹み具合に優位な差を観察し、学生も納得した様子。

円柱状のアクリルの容器に粘性の高い液体が入っている玩具がある。下方から空気の泡がゆっくり上昇するのを観察するためのものである。手元にあったこの玩具を見てもらった。泡の大きさは直径 3cm ほどで、ほぼ球形をしている。なぜ、球形をしているのか、と問いかけ、班で話をしてもらった。水圧によってどの方向からも同じ力で押されているから、という答えがあり、概ね理解はできていると考えた。¹

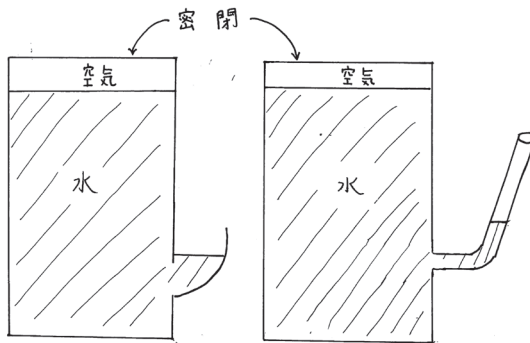


図 3: 高さの違う水面を作る容器

さて、話題を次の観察に移す。

左の図 3 のような構造をもった器具を用意した。いずれもペットボトルなどで簡単に作ることができる。いずれの容器も、水の出入りできる場所は一箇所で、容器の上は密閉されている。左の容器は、鳥を飼うときの水入れと同じ構造を持っている。右の容器は「晴雨予報グラス」などの名前で市販されている気圧の変化を観察する玩具と同じである。

学生への質問 [B]

これらの容器に、上部の空気のない状態まで水を充したら、水がどうなるかを学生に尋ねた。結果は

1. 水がこぼれる：41 %
2. 水はこぼれない：59 %

実際にやってみた。手作りの装置で、完全に水を入れることはできず、少し空気が残った状態で、水はこぼれなかった。この段階で次のような意見が出た：

- 外から空気が入れないからこぼれない。²
- 容器内部に残った空気が水面にもたらす圧力と、外の空気が水面にもたらす圧力が等しい。

気体の持つ圧力に気づいたものの理解が正確ではない。謎解きは後回しにして、次の観察をする。

¹縦にして観察したときの結果から以下のような考えが出て不思議ではない：泡は球形ではない、下から受ける力が大きいはず。実際、理科物理の 3 年生に水圧観察器のことを説明したときには、円柱を横にしたときでさえ、ゴム膜の上下で凹み具合が違うのではないか、などの意見が出た。

²この意見だって間違っていない。でも、どうして空気は入れないんだろう？ この問題も、実験に続く講義で明らかにしなくてはならない。

学生への質問 [C]

図4のように、容器を使って水のタワーを水面より上に作る。この中に水圧観察器を入れたらどうなるだろうか。

1. ゴム膜はへこむ：61 %
2. ゴム膜は変わらない：28 %
3. ゴム膜はふくらむ：11 %

実験をすると、ゴム膜がふくらむことが観察され、驚きの声ももれた。

班ごとの議論を行い、意見を聞いた。

- 膨らむのはゴム膜を外から押す力より、内側から押す力が大きいからだ。
- 水のタワーに入れたときと同じ高さで、空気中に置いたら「変わらない」のにどうして？
- 水のタワーの上の方ほど外からの水圧が小さいのはどうして？

面白い意見も出てきた：

- お菓子の袋を持って山に行くと膨らむ。
- 山に登ると鼓膜が痛い。
- 皿を重ねたら、上にたくさん皿が乗っている方が力を受けているはずだ。

この皿のたとえを借りて、水のタワーの高さによる水圧の変化について、全体で議論をした後、最後の質問をした。

学生への質問 [D]

水面上に作った水のタワーの容器に小さな穴が開いていたらどうなるか？

1. 水が吹き出す：41%
2. 何も起きない：39%
3. 空気が入っていく：20%

実験をすると、空気が中に入っていくのが観察された。正答率が高くなかったが、班ごとの議論をする時間が十分には確保できなかった。

3 理論的考察

以上の実験を踏まえて、ここからは理論的考察をする。現象をいくつか手にしたので、より一般性のある簡潔な概念を探る。一旦抽象化されたそれらの概念は汎用性を持ち、新しい現象を理解するための武器となると期待したい。³

ここで明らかにしたいことは

³もちろん、ここから展開する内容は、特段新しいものではなく、良く知られている事柄である。ここで目的としたのは、学生の前で行った実験と彼らの経験に依拠して、議論を展開することである。

図 4: 水のタワーの水圧

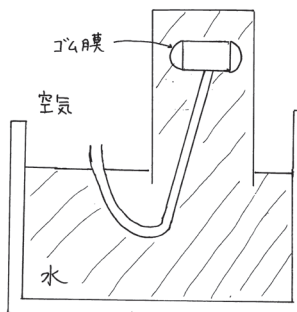
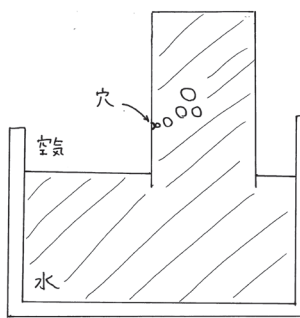


図 5: 水のタワーに穴を開けると



- 水圧, 大気圧の起源
- 圧力, 密度の概念

である。その他に、以上の考察の周辺にある事項として、浮力を考えてみたい。

水圧とは

水圧について「お皿をたくさん重ねるとたくさん重ねた方が重い」という直感的な説明が、ある学生の説明だった。この説明は、多くの学生に説得力を持って受け止められたようだ。

実験では、水と空気という流体を扱った。流体はお皿のようには振舞わない：流体は形を変えるので、「重ねる」には容器に入れる必要がある。まず、容器に入った水を考えよう。容器に入った水は動かない。この水の中に立方体で区切られた領域を考えてみる。この立方体は動き出さず、形も変えない。この立方体に上述の「お皿」の役割と果たしてもらおうことにする。

立方体にはいくつかの力が働いている。左右から力が働いていることは水圧観察器で見たとおりだが、水圧観察器のゴム膜のように、立方体が形を変えるわけではないから、この左右の力にあらがうように立方体が外の水を押し返しているはずである。空気に比べ、水は力を加えても体積が変わらない。このような流体を非圧縮性の流体と言う。水の立方体をかたまりとして考えると、立方体が外の水から、左右の壁を通じて受けている力が同じでつりあっているの、この立方体は動き出さない、と理解して良いだろう。

次に上下の方向に働く力を考えてみよう。立方体は水の「かたまり」なので、取り出して重さを測ることができる。つまり、重力が働いている。また、立方体の上下の面を通じて力を受けている。上の壁を通じて働く力と重力が下向きの力、下の壁を通じて働く力が上向きでつりあっているの、立方体は動き出さない。

立方体は、上面を通じて受けている力に、自らにかかる重力を加えて、下面を通じてさらに下にある水を押していることになる。

容器の中の水全体を、このような立方体の集まりだと考えることもできる。そう考えると、水圧が、水に働く重力によって生じていることが理解される。

立方体の壁を通じて働く左右の力と上下の力の大きさを比較するには、水の中の小さな気泡が球形であることを思い起こすのが役に立つ。つまり、考えている立方体を十分小さくとり、それに働く重力の影響を無視できれば、立方体の面を通じて働く力はどの方向からも同じと考えて良い。

水圧について理解したことは以下の通りである。

- 水に働く重力によって作り出される。
- 重なった水の量で大きさが決まるので、深さに比例して水圧が大きくなる。
- 水の中に球形のある小さな領域を考えると、四方から同じ大きさの力を受ける。

では、「水圧」はどう測るか。ここまで議論では、「水圧」は体験に訴えた言葉であり、言わば、日常語である。一方、科学の言葉としては水圧は、単位を持ち、測定できる量として定義される。経験に基づいて、かつ、曖昧さのないように再度定義された言葉となる。では、どう定義すべきだろうか。



図 6: 水の中の仮想的に考えた立方体。上下から働く力には差があり、その差は立方体に働く重力とつり合っている。

水圧の起源は、水に働く重力であることは上に見たとおりである。水に働く重力の大きさは、もちろん、水の量が大きくなれば大きくなる。しかし、私たちの定義したい水圧の概念は、私たちが仮想的に考えた立方体の大きさに依存したものではない。どうするか。

水の量に単位を考える。単位大きさの水の量を定義するために、一辺が 1m の立方体分の水を考えることにしよう。⁴ 水 1cc は 1g であることを思い起こすと、今考えた立方体の質量は 10^3kg であることが分かる。従って、水深 1m では、面積 1m^2 で 10^3kg を支える「水圧」がかかることになる。

実は水に働く重力は、 10^3kg に重力加速度 9.8 m/s^2 をかけたものとなり、 $9.8 \times 10^3\text{ N}$ である。⁵ 地表の物体に働く重力は地球との間で働く万有引力によるもので、そのために重力加速度をかけておかなくてはいけない。同じ量の水でも、地球がもっと小さければ、例えば、月の上では働く力も小さくなる。水圧も小さくなることになる。

一般に単位面積当たり働く力の大きさを圧力と言う。ここまでの議論によって、水深 1m での水圧は $9.8 \times 10^3\text{ N/m}^2$ である、と理解したことになる。また、水深が $h\text{ m}$ になれば、この h 倍が水圧となることも分かると思う。これで、日常語としての水圧から、測定量、科学の用語としての水圧を定義する作業が終わった。

上の議論で一つ注目して欲しいことがある。体積から質量を出すときに、1 cc が 1 g ということを使った。これは体積と質量を換算する関係で、もちろん、物質によって違う。単位体積当たりの質量を密度と言う。上記の関係は、水の密度が 1 g/cc というのを言っており、国際単位系では $1 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ ということになる。

密度の概念は非常に重要である。一方で、講義をしているとなかなかわかってもらえないと言う教員も多いので、後でさらに議論したい。

大気圧とは

大気、つまり、空気も流体である。その組成はほぼ 8 割の窒素と 2 割の酸素からなる。

水圧のときと同じように考えると、大気圧は空気にかかる重力によってもたらされるので、空気の密度が分かれば計算できる。空気の密度を測る実験は、学校現場でも良く行われており [3]、理科の学生は基礎物理学実験 [2] で経験する。また、NHK 教育テレビの人気番組「大科学実験 38」[4] で取り上げられた。

空気の密度は 1.3 kg/m^3 程度であり、水とは 10^3 倍の開きがある。これはつまり、水と同じ圧力を作ろうと思ったら、空気の柱は 10^3 倍高くなくてはならない、ということの意味する。

大気圧は、歴史的な理由で、いくつかの単位で表されるので混乱しがちである。私たちが経験している典型的な大気圧は 1 気圧であり、国際単位系のパスカル (Pa) とは次の関係がある：

$$1\text{ 気圧} = 1013\text{ hPa} = 101300\text{ Pa} = 101300\text{ N/m}^2 \quad (1)$$

1 Pa は、国際単位系で単位面積当たり 1 N の力が働くときの圧力として定義されるので $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$ は約束事。ヘクト、h は 100 倍という意味。だから式 (1) に書かれていることで、意味を持っているのは、1 気圧をパスカルで表した関係のみだから恐るに足らない。

ここまでの話から分かること

概数で考えると以下のようなことがわかる：

- 1 気圧は約 10^5 Pa である。
- 水深 1m では、水圧 $9.8 \times 10^3\text{ Pa}$ 、つまり、ほぼ 10^4 Pa なので、1 気圧を作る水の深さは 10 m である。

⁴国際単位系での長さの単位は 1m である。以下、国際単位系を使うことにする。

⁵この単位 N はニュートンと読む。

- 空気は、水に比べて 10^{-3} 程度、密度が低いために、1 気圧を作るには 10 km 程度の柱を作る必要がある。

地球の周りにはどの高さまで空気があるんだろう？ JAXA の HP[1] によると、チョモランマ山頂（高さ約 9 km）で我々の住む普通の場所の 3 分の 1 程度、高さ 100 km で 100 万分の 1 程度、ということである。大気は 10 km 程度の高さがあると 1 気圧になるという概算は大きさとしては悪くないことが分かる。⁶

3.1 実施した実験を再度考え直してみる

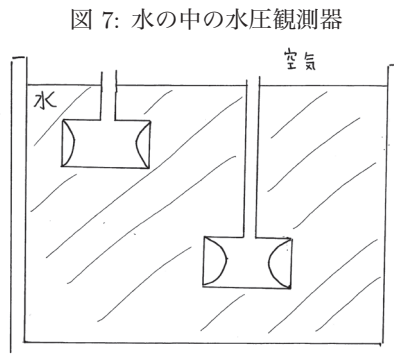
最初に行った、図 1 の上下に穴が開いたペットボトルから漏れ出す水について考えてみる。ペットボトルの水には、水面の上から 1 気圧分の大気圧がかかっている。それに加えて水面からの深さに応じた圧力が生じている。外の空気も高さによって圧力の変化があるのだが、空気の密度が低いので⁷ 高さに変化してもほとんど圧力は変化せず、1 気圧だと思って良い。ペットボトルの穴の両側で、水の圧力と外の大気圧の差が大きいほど出てくる水の勢いは強い。

水圧観察器を水に入れる実験では、円柱から出ている管を通じて空気が出入りできるようになっていることが重要である。実際、管の先を塞いだままで、円柱部分を水に入れても、ゴム膜の変化は顕著ではない。水から押された分だけ中の空気が圧縮され、中の空気の圧力をあげることで水圧とバランスする。これは図 4 にある実験を行っても同じである。このときも管につないだゴム管を通じて、円柱の内部の空気圧を 1 気圧に保つことが重要である。

図 7 を見て欲しい。水面は 1 気圧である。図 1 の実験の検討のときに書いたように、円柱の中の空気も 1 気圧である。一方、水圧は水面から下がった距離に応じて上がる。従って、図 7 のようにゴム膜は凹み、水に深く入れた方がその様子が顕著になる。

さて、図 4 の水のタワーを考えて見よう。このときにも、やはり、水面は 1 気圧であり、水面と同じ高さにあるタワーの底にある水の受けている圧力も 1 気圧である。⁸ 従って、水のタワーの上に行くほど、水圧は 1 気圧から下がって行く。ゴム管を通じて円柱の中は外の大気圧と同じに保たれるので、ゴム膜は膨らむことになる。

図 3 においても、外の空気と接している水面が 1 気圧の力を受けている。容器の中の水の、水面と同じ高さのところやはり 1 気圧、そこから上にある水は 1 気圧より低い圧力を持つことになる。容器内部の水面の圧力は、外の水面との高さの違いによって計算することができ、中に残った空気の持つ圧力は内部の水面の位置での水圧と等しい。



⁶液体である水に比べて、気体である空気は容易に密度が変わる。従って、密度が一定として考えたここでの議論は大雑把な見積もりと理解すべきである。

⁷水に比べて 10^3 倍低いことを説明した。

⁸ちょっと考えればわかるが、同じ高さの水が 1 気圧から外れたら、水は安定してそのままではいられない。

図3の右の容器を見て欲しい。容器頂上の密閉部分を破って空気が入るようにすれば、容器内水面の気圧は1気圧となり、最初から外と接していた水面と内部の水面が同じ高さになるところまで水が移動する、そのために必要なら水はこぼれ出すことになる。

図5の実験はどうだろうか。外は1気圧で、水のタワーの部分はそれ以下になっているので、穴の部分の水は外から押されて中に空気が入り込むことになる。⁹

3.2 関連する話題

ここまで理解すると、関連する概念を議論することができる。いくらか記しておきたい。ここでは、浮力について考える。トリチェリの真空についても簡単に言及する。

水圧について考察したときに、水の中に仮想的に立方体を考え、その立方体に働く力を考察した。立方体の上面と下面から働く力には差があり、その差と立方体を構成する水に働く重力がちょうどつり合っているので、立方体は動き出さない、という説明をした。

では、もし、この立方体が、水ではなく、他のものでできていたらどうだろうか。外から働く力についての考え方は水を考えてときと同じなのは明らかだろう。違いは立方体（以下、物体と呼ぶ）に働く重力だけになる。もし、重力が弱ければ、つまり、物体が同じ体積の水よりも重いものであれば、物体に働く力の総和は下向きになり、物体は下に向かって動きだすだろう。もし、逆に物体が同体積の水よりも軽いものであれば逆に、上に向かって動きだす。これが、浮力の原因である。

考えている物体にどんな浮力が働くかは、同体積の水に比べて、重いのか軽いのかにかかっている。つまり、密度、すなわち、単位体積当たりの質量が水より大きいのか小さいのか重要なのである。

浮力について面白い例を考えてみよう。

- 水は固体の方が密度が低い。だから、氷は水面に張る。

水分子は、酸素原子と水素原子の結合したもので、電氣的に分極している。固体になった水は、この分極のために形成される水素結合によって、きれいな結晶構造を作る。このために、液体の水よりも密度が下がる。この結果、固体である氷は液体の水に浮くことになる。湖沼に氷がはるのはこのためである。

- ガリレイの温度計

今ではアクセサリーとして販売され、目にすることも多くなった。ネットで検索すればカラフルな色の液体を封印したいくつかのガラスの球体が、液体の中に浮いたり沈んだりしている画像を見ることができる。この温度計も浮力を利用したものである。ガラスの球体に働く重力と、それと同体積の周りの液体に働く重力を比較することで浮力が決まる。ガラスの球体自身は温度による変化がないので、それに働く重力も変化しない。この温度計にとって重要なのは、ガラスの球体を浮かべている液体の性質である。すなわち、この液体は温度が変わると密度が顕著に変化する。温度によって、ガラスの球体が上下するのは、周りの液体の密度変化によっている。

水のタワーに水圧観察器を入れる実験（図4参照）の後に、班ごとに議論する時間をとった。学生の中で、どんどん高いところに持っていくとどうなるの？ ゴム膜はどんどん膨らむ、トリチェ

⁹穴が小さいと、水の表面張力が効いて、何も起こらないこともある。水面から少しずつ上げながら様子を見ると良い。

りの真空？ などの会話が一部で行われていた。確かに、今回の実験はトリチェリの真空の実験を水を使って行ったものであり、実際に10m程度の高さまで丈夫なホースに入れた水を持ち上げ、「トリチェリの真空」を観察することもできる。この実験は、基礎物理学実験の一つとして以前は実施していたこともある。

トリチェリの真空の科学史的な意味についての文献 [5] の記述は非常に興味深い。現在、私たちはこの実験を、水銀柱が76cmも持ち上がるという趣旨で理解するが、17世紀半ば、トリチェリは、アリストテレスの影響のもとにあった人たちに、水銀柱が76cmの高さにしか留まれない、ということを示すために実験を行った、という記述である。私たちが素朴に考えていることが何を根拠にしているのか、常に検証することの必要性を教えているのではないだろうか。

4 まとめ

今回行った一連の実験はそんなに難しいものではない。むしろ、簡単なものだ。しかし、自分の言葉で説明して欲しい、と言うと途端に難しい問題になるようだ。なぜだろう。

実験で取り上げた現象は、これまでにどこかで経験したものと繋がっていて、そのような言葉がいくつも聞かれた。ただ、会話を聞いていると異なった経験をつながりを持って認識してはいないと感じる。経験を構造化して認識することが必要である。個々人の持つ描像の中に、帰納法と演繹法で構成された理解が作れないものかと考える。「認識ののぼりおり」と言われる手法が重要かも知れないと考える。

個々の現象から離れて存在する抽象化された概念を獲得することで、演繹的な推察・予言が可能になる。より抽象化された言葉に慣れることだ。

抽象化された言葉の究極の姿はやはり適切な数式であろうが、教育学部の教師を希望する全ての学生に、数学に習熟することを要求するのは現実的ではないと思う。しかしながら、小学校理科の講義においても、実験と経験を互いに関連付けて俯瞰させて見ること、汎用性のある概念を扱う経験を持ってもらうことが目標になるだろうと考えている。

今回の講義に続けて微視的な立場から見た圧力の理解を学生に提示したいと考えている。幸い、少し古い非常に秀れた科学映画が復刻されている [6]。原子論を仮説として、気体、液体の振る舞いを説明しようと試みた映像である。

謝辞

図4の実験のアイデアは教育学部附属新潟中学校教諭の庭田茂範さんから教えて頂いた。クリッカーを使う準備から使い方まで土佐幸子教授に手助けして頂いた。講義の進行にはティーチング・アシスタントとして教育学研究科院生の金谷亮子さんに手伝って頂いた。実験器具の一部は理科教育研究室のものを借用し、当日の実験の投影のために技術職員の平賀保博さんから器材を借りるとともにアドバイスを頂いた。関連した話題として浮力を取り上げたのは、物理研究室の学部生である近藤悠太さんから、教員志望の学生の中に理解できなくて困っている人たちがいる、と言われたのが理由である。五十嵐尤二さんには原稿を読んで頂いた。皆さんに深く感謝します。

参考文献

- [1] JAXA の作っている子ども向け HP, 宇宙科学研究所キッズサイトの記載から抜粋.
<http://www.kids.isas.jaxa.jp/index.html>
- [2] 基礎物理学実験, 新潟大学教育学部での実験科目.
- [3] 例えば, 石川雄治, とじこめた空気と水, 理科教室, No.730 [Vol.58 No.10], 04-07 (2015.10).
- [4] NHK E テレ 大科学実験 38 「教室の空気」では, 空気の「重さ」について実験を行っている.
- [5] 江沢洋, だれが原子をみたか, 岩波書店 (1976); この名著は, 現在, 岩波現代文庫の一冊として読むことができる.
- [6] 科学映画「動きまわる粒」, 岩波・たのしい科学教育映画 DVD 第1集の Vol.3 (物性編) に所収.