

1. 気象学がつくる理科実験

大阪教育大学（名誉教授） 山下 晃

1. はじめに

新しい時代の楽しく理解しやすい理科をつくるためには、日常生活と深いかかわりがある気象の実験を重視した教材作りをすることが、大いに役立つはずです。

このような考え方に立って、空気と水の性質の基礎、気圧と水圧、雲の3テーマについて、これまで使われてきた理科教科書の、温度とその測定・空気の膨張・水の状態変化・圧力・雲の発生などの内容、あるいは、これらに関する入試問題などの問題点を紹介しながら、新しい実験を提案したり改善すべきところをあげたりします。

2. 空気と水の性質の基礎

2-1 フラスコの中の気象 —消えた噴水実験—

小学校4年理科の空気の膨張を教える単元「空気の温度とかさ」では、1990年頃まで、「噴水実験」が採用されていました。ある教科書（啓林館，1987）には、「フラスコに水を入れ、先を細くしたガラス管をつける（図1）。このフラスコを湯につけると、ふん水ができる。どのようにしたら、高く上がるふん水ができるだろう」との記述がありました。フラスコ内の気象の問題だと考えることができるこの実験は、「間違い教科書—噴水は空気の膨張ではない—」と朝日新聞（1987）と毎日新聞（1987）が報道しNHKも学校放送の内容を変更するなどの騒ぎがあって、消し去られてしまいました。ある大学教授個人の強い主張が通ってしまったのです。

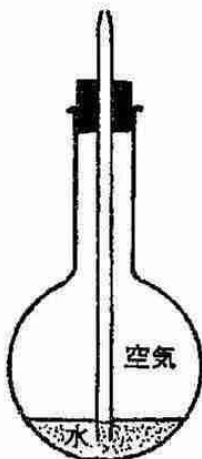


図1 噴水実験用フラスコ

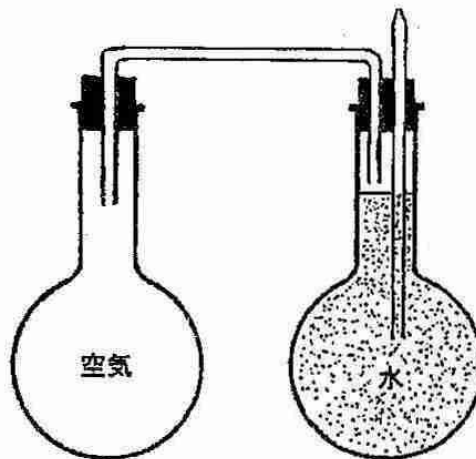


図2 改良型噴水実験用フラスコ（左側だけを湯につければよく右側の噴水用は小さなものでよい）

実は、気象学を学んだ者がこの実験を丁寧に行えば、図1のような水を入れたフラスコを湯につけたとき、先ず空気が対流しながら温度上昇し噴水が上がること、(水の量を多くして長時間湯につけたときは)次第に水の蒸発の効果が優勢になりガラス管先端から水が少しずつ流出すること(山下, 1999)が分かるはずですが。この実験は、小学校の先生方が、噴水が高く上がるよう工夫しながら実験指導をしていたのであり、水を使う安全で子どもにとって楽しいものだったのです。水の蒸発の関わりが心配ならば、図2のような2連の改良型装置を作り左側のフラスコだけを湯につける実験にするとといった工夫も可能です。また、この右側を左側のフラスコの上に乗る程度のペットボトルなどで作った小さなものにする、フラスコを両手で温めるだけで噴水が生じる分かなりやすく楽しい実験が可能になるのです。

この例のような間違いを放置してしまったことは、入試問題にまで波及する(神原武志・権平健一郎, 1989) ことがあり大問題なのですが、これ以上、ここではふれません。

2-2 空気と水の問題の難しさ

冬季に道路表面の雪や水が凍ることは凍結、眼鏡が曇るのは結露(あるいは凝結)ですが、これらを、それぞれ、凝固と凝縮としないと正解が得られない共通一次試験の問題が出されたことがあります。また、小学校4年生に、水蒸気・水・氷の単元で水蒸気は目に見えないものであることを教えているのに、新聞記事などで霧の写真の水蒸気と説明することがあるのです。

小学校の教員から届いた次の質問に、教育学部に入學した理科専攻の大学生のほとんど(95%)が正確には答えられないことも、十数年前に知りました。その質問は、『気温が38℃になると暑くて大変だが、家庭で入る風呂が38℃ではぬるい。どうしてなのか教えてほしい』というものです。これは気温38℃の環境で長時間過ごすことと、風呂に短時間入る場合とを比較する問題ですが、大学生の答えを見ていると、(2-1)のある大学教授が噴水実験を正しく行えなかったことと同じように、熱がどのように伝わるかという日常生活上の時間経過を含む常識的な問題を、何らかの先入観があるためか、自ら難問にしてしまっているような気がします。

3. 気圧と水圧

3-1 小鳥の水飲み -問題と実験-

工夫を凝らした圧力を教える実験の中に、水の中が水圧ばかりでなく大気圧のもとにあることの理解を助ける優れたものは見当たりません。この点に着目して、数年前から市販の"小鳥の水飲み"をモデルにしたペットボトル圧力実験装置(図3)と問題を作り、中・高校生に考えてもらったり大学の授業に使ったりしてきました。

問題1 図3は、2つのペットボトルを組み合わせて水漏れがないように作った(水を入れた状態の)小鳥の水飲みの断面である(A~Dは直径4.5mmの穴に取り付けたゴム栓)。

栓A, 栓B, 栓Cおよび栓Dを開けたときの変化と水面がどこまで下がるか(あるいは下がらないか)を、次の①②…のうちから選べ。ただし、栓は1つずつ独立に、すなわち、1つの栓を開けて変化があった場合には(その栓も中の水も)元の状態にもどしてから、次を開けるものとする。

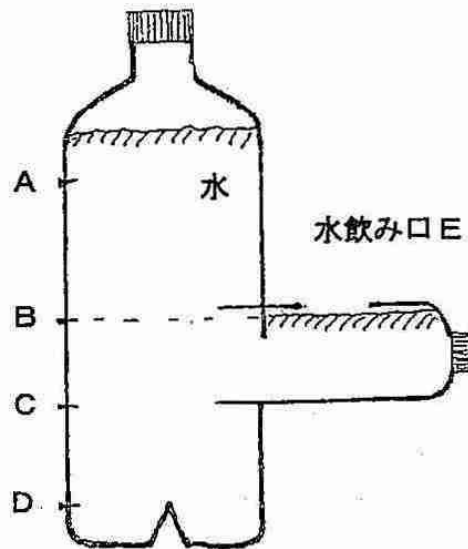


図3 小鳥の水飲み(圧力の実験装置)その1 (A, B, C及びDは直径4.5mmの穴に取り付けたゴム栓)

変化 ① 開けた穴から水が出る ② 開けた穴から空気が入り水飲み口Eから水が出る ③ 開けた穴と水飲み口Eの両方から水が出る ④ 水は出ない

水面 ① Aの高さまで ② Bの高さまで ③ Cの高さまで ④ Dの高さまで ⑤ 水飲み口Eの高さまで ⑥ 下がない

問題1の正解、結果及び解説：正解(②⑤ ④⑥ ①③ ①④)は、実験によっても示すことができます。全問正解者は、大阪府の中・高校の先生方に依頼して行った調査では(中・高校生)3,393人のうち2.3%、教育学部理科専攻学生33人のうち0%にすぎず、特に栓Aと栓Bを開けた場合の両方合わせての正解者が極端に少なかったのです。(一方、栓Cと栓Dについては正解者がほぼ100%)

次の問題2は、問題1の実験を見せ、正解はペットボトル内外の圧力差に着目すれば容易に説明できることを解説した後に、同じ教育学部理科専攻学生33人に考えてもらったものです。

問題2 図4の小鳥の水飲み(直径4.5mm)の栓B₁、B₂、及びB₃について、栓を開けたときの変化を答えなさい。

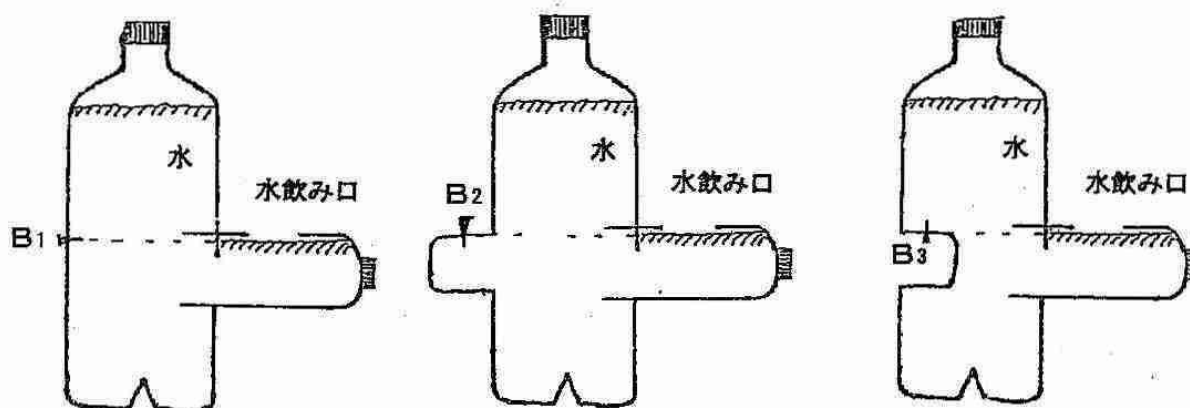


図4 小鳥の水飲み(圧力の実験装置) その2 (3枚の断面図によって示したが、実際には一つの装置として製作したものを用いた。B₁、B₂、及びB₃は直径4.5mmの穴に取り付けたゴム栓)

問題2の正解及び結果：正解は、いずれも、水は出ないし空気も入らないということですが、栓B₃だけは正解者が33人中17人と少なかったのです。

このように、大多数の中・高校生と大学生の多くが既に学習したはずの気圧と水圧との関わりを正しく理解していないのです。問題1を理解できたはずの学生の約半分しか問題2を正しく答えられなかった理由も調べる必要があるようです。

クイズ的要素があって好評を得たこの実験の価値は、面白かったという安易な理解で終わらせない努力があれば、高まるはずです。あるテレビ局が問題1で用いた小鳥の水飲みに似たものを使ったクイズ問題(フジテレビ、2002)を出したことがあり、その正解の解説には驚かされました。このことが動機となって、問題1・2については測定値に基づいた実験の説明ができるようにすべきだと考えたのです。

3-2 気圧計による水中の圧力測定

気圧と水圧とのかかわりを量的にも正しく理解するためには、実験の他に可能な測定を試みる事が大切です。市販のアネロイド気圧計あるいは高度計をペットボトルなどに封入し隙間をシリコンシーラントで塞いで作った簡易圧力計(図5)は、さまざまな容器内部の圧力や水中圧力の測定を可能にします。ガラス管付きゴム栓とゴム管などで実験装置とつないで、その新しい利用法を考えてみるのも楽しいことです。(このような使い方をするための容器付きの気圧計をメーカーが作ってくれれば、さらに使いやすいものになるはず)

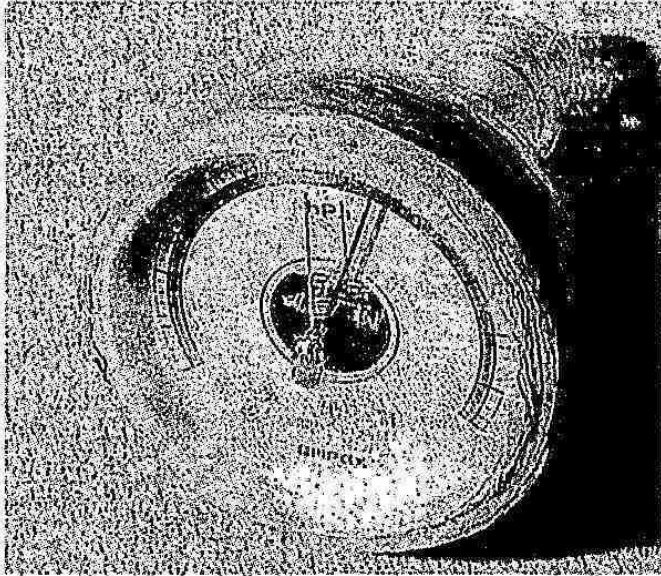


図5 簡易圧力計（アネロイド気圧計あるいは高度計をペットボトルに封入したもの）

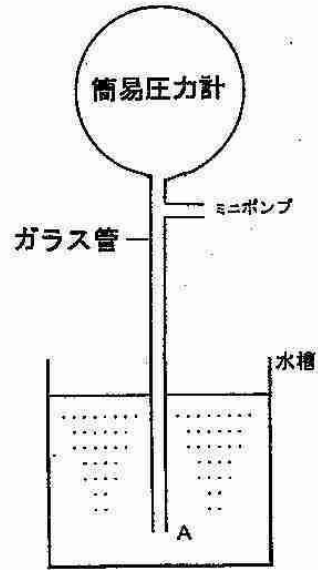


図6 簡易圧力計による水中の圧力測定

水中の圧力測定は図6に示した方法で可能になります。水の入った水槽にガラス管を立て、これをゴム管などで簡易圧力計とつなぎます。図のミニポンプ接続用の管から空気を送ると、ガラス管最下部のAから気泡が出ますが、気泡（空気の流出）がほぼ止まったとき、水中A点の圧力はガラス管内（すなわち簡易圧力計のある空間）の気圧と等しくなっています。従って、簡易圧力計は水中A点の圧力を指示していることになります。

小鳥の水飲みの実験（図1・2）と、水中A～Dの圧力測定（図7）を並行して行えば、測定結果と室内の気圧を比較して問題1・2が持つ意味の理解を深めることができます。

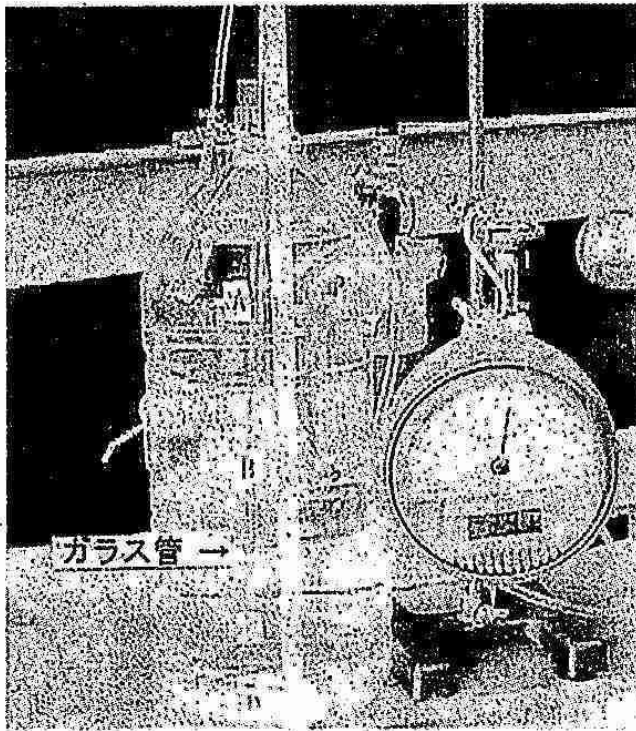


図7 小鳥の水飲み（図3）の水中圧力の測定（水飲み口は、この写真の裏側。上部の蓋としてガラス管を通したゴム栓を用い、ガラス管には少量の油を塗り、小鳥の水飲みにゴム栓をしたままガラス管を上下できるようにしてある。このガラス管を簡易圧力計と接続しておけば、図6の方法でボトル最下部の圧力を測った後、管を引き上げてA～Dの水中の圧力を連続的に測定できる）

3-3 簡易圧力計の活用

部屋に置いて日々の気圧の変化から天気の変化を推定する程度の目的に用いられる家庭用アネロイド気圧計ですが、これを簡易圧力計に変えることによって、さまざまな利用法が生まれてきます。ストローで水を飲むときの口内の圧力や膨らませた風船内の圧力の測定のほか、次節の雲の実験に使うのも有効です。図8のような新しい圧力の問題を示しての利用を考えたり、さらに、逆さコップの実験に新しい解釈を与えたりすることもできます。



図8 6連ペットボトル (問題: 気圧が1000hPaの室内で図中の圧力計のおよその指示値を答えよ)

3-4 水圧と気圧の教え方

ある教科書では、スポンジ上に置くレンガの底面積の大小によるスポンジの凹み方の相違で圧力とその大小を教え、圧力差が目に見える実験によって水圧が水深だけに依存することを教えることになっています。また、大気圧については、空き缶つぶしの実験などを示し"大気圧は大きな力を持っている"とか"大気圧の不思議"といった見出しをつけて教えることが多いようです。気圧と水圧はどの向きにも同じように働くとのコメントを載せているのに、地球大気による圧力を説明する図では下向きの矢印だけを書いたものを多く見かけます。これらは、大気圧と水圧を、それぞれ、独立に教えた方が分かりやすいはずとする、物理学の先生方の考え方が関係しているように思われるのです。

圧力を習ったはずの大多数の者が小鳥の水飲みの問題(問題1・2)に正しい解答ができなかったことは、このような教え方だけが採用されていることと無関係ではないように思えるのですが、ここでは、それを証明するかのような一つのハプニングを紹介することにします。そのハプニングとは、平成11年センターテスト物理IBの圧力の問題の中に、大気圧を p_0 とすると、(水中の)深さ h のところの水圧 p は、 $p = p_0 + Kh$ と表される。ここで K は正の定数であるとの記述があり、これでは水面(深さ $h = 0$)では水圧=大気圧になってしまうので p を水圧としたのは間違いなのですが、問題を解く上ではこの部分を深く考えずに飛ばして読むためか、この年の物理IBを受験した数万人も多くの物理の先生方も気付かずに終わってしまったというものです。

このようなことがあって、地球上の大気と水の中にあるものが受けている圧力がどのようなものかを教える新しい教材が必要だと思うようになりました。気圧計(簡易圧力計)をエレベーター中に持ち込むことも容易になった現在では、高さの違いによる気圧の変化と問題1・2の実験とを併用することも可能です。

4. 雲

4-1 見やすい雲と観察が困難な雲

ドライアイス湯や水に入れたとき、あるいは、冷やした瓶ビールの蓋を開けたときになどに生じる雲は、通常の室内照明で見ることが出来ます。しかし、仮に天然の霧や雲 1 m³をそのまま室内に運んでくる事ができたとしても、その霧や雲を通常の照明で見るとは困難です。

このことには雲粒（霧粒）の数密度が関係していて、単位体積（1 cm³）中の雲粒数が数千個を境に、それ以上のものは見やすく、それ以下のものは見え難いということになります。表1に様々な雲の雲粒のサイズと数を示しますが、詳細については山下（1998）を参考にしてください。

表1 様々な雲の雲粒の直径と数（○△×は、室内に作った場合の見易さの目安）

	雲の種類（天然の雲の値は代表的な教科書の図から求め、その他の値は実際に測定して求めた）	直径(μm) 範囲と平均値	雲粒数 (No./cm ³)
×	代表的な陸上の雲（オーストラリア）	4~20, 12	490
×	代表的な海上の雲（ハワイ）	8~44, 25	70
×	代表的な地形性の雲（ハワイ）	5~150, 40	6
○	ドライアイスが作る雲	1.0以下, 0.5	10,000,000
○	栓を開けたビール瓶中の雲	0.5~1.0, 0.7	50,000
○	冬の白く見える息	0.5~1.5, 1.0	50,000
△	冷凍ショーケース中に生じる雲	4~15, 6	4,500
×	フラスコの中の雲（60hPa減圧）	5~10, 7	2,000

4-2 空気を冷やして雲を作る実験

数年前までの小学校4年理科では、ぬるま湯でぬらしたガラス容器内を上部から冷やして雲を作る実験を教えることになっていました。しかし、フラスコなどを加熱する器具類はあっても冷やすためには氷を使う程度の事しかできない小学校では、これを効果的に行うのは難しかったようです。

詳しくは述べませんが、アイスクリームストッカーや冷気潮型クラウドチェンバー（山下 他、1996）があれば、冷えた空気が下方に溜まるので、雲を作るばかりではなく生じた過冷却雲を氷晶雲（ダイヤモンドダスト）に変える実験も手軽に行うことができます（山下、1998）。

4-3 中学校の雲の実験 - 彩雲と光環を作ろう -

中学校では断熱膨張によってフラスコ内に雲をつくる実験を行いますが、照明法の適切な指摘がなく、実際に生徒に雲が生じることを確かめさせることは容易ではないようです。フラスコに線香の煙を入れたり、エチルアルコールを加えたり、膨張比を極端に大きくしたりといった様々な工夫があって、続けられてきたのが実情です。また、フラスコ内を注射筒により減圧するとき、瞬間的な温度変化を測定できる温度計が普及していないことが事実であるのに"この実験では温度変化がごくわずかなのでサーミスター温度計を使用する"といった間違っただけの注釈が残ったままになっています。

実は、この実験は、雲粒が可視光線をミー散乱することを考慮し、余分な光が観察者の目に入らないように遮光にも配慮して、ファイバーライトなどを使って丁寧に行えばよいのです。勿論、集光性能のよい顕微鏡光源や電池入りライトを使うこともできます。また、簡易圧力計を使えば、10~30hPa程度の減圧で十分なことも分かり、大気の熱力学による計算どおりの0.5~1.5℃ほどの温度低下があることも、感度のよい熱電対などで測定可能なのです。

一人で手に持って使える装置と展示して自動運転できる10~20ℓ フラスコを使った装置の二種類を作り、会場に展示する予定ですから、実際に使ってみていただきたいと思っています。白く輝いて見える雲（雲粒）が、観察する目の位置を変えると彩雲にもなります。照明法次第では光環を観察することもできます。特に、凝結核を増やした実験による彩雲と光環が見事です。自動運転には、減圧と減圧解除（あるいは加圧）が繰り返し起きるように装置を作ればよいわけですが、そのために ①水流とサイフォンを利用したもの（図9・10） ②水流とタイマー付電磁弁を利用したもの ③ゴム風船とタイマー付エアープンプを利用したもの、などを作ってみました。何れを使っても見事な雲の観察ができます。

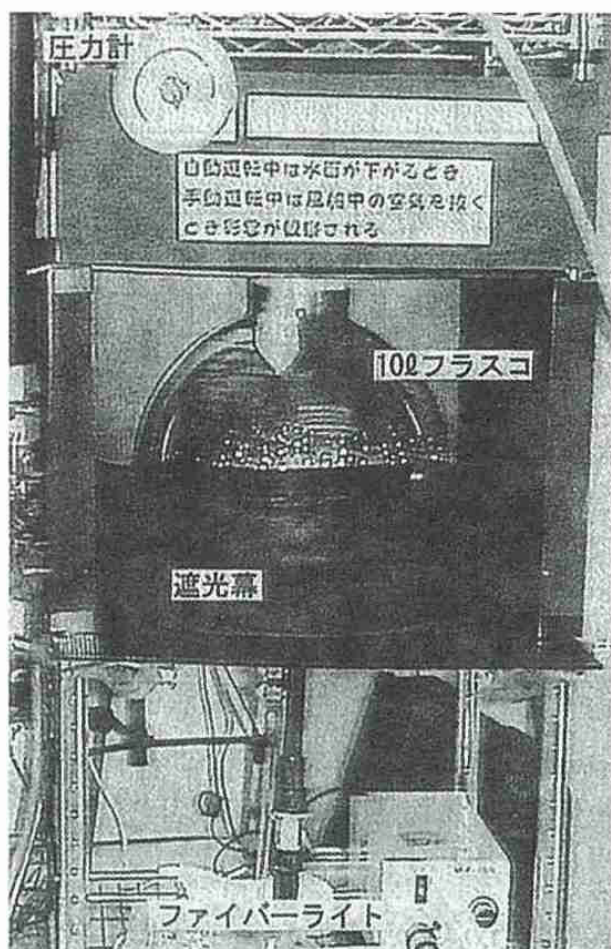


図9 自動白雲彩雲発生装置
(水流を利用して減圧する)

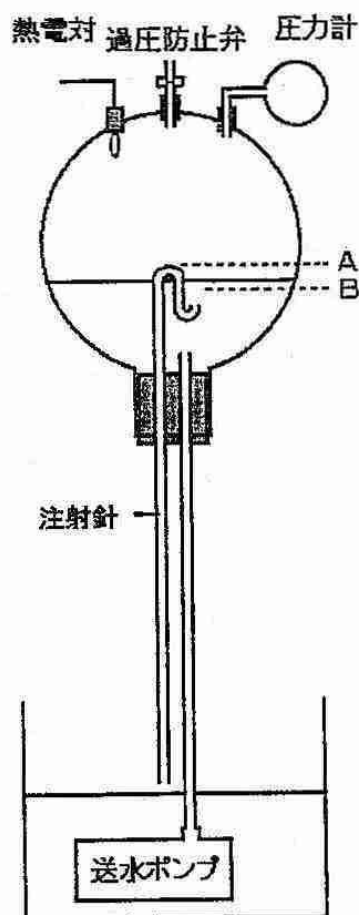


図10 自動白雲彩雲発生装置の断面
(減圧と減圧解除の繰り返しにはサイフォンを利用)

5. おわりに

理科を、子どもが興味を持ち楽しく学べる教科にするためには、楽しい実験を増やす努力が不可欠です。その理科実験について、今回強調したかったことは、一つの実験を終え、その楽しさを知り意味を理解した子どもが、その実験と自然現象、あるいは、別の実験との関係にも興味を持てるよう、指導したり、新しい実験を準備したりする必要があるということです。自然が研究対象である気象学などが、そこで、大いに役に立ちます。

噴水実験は、小学校の中学年には空気の膨張を教え、高学年には熱を十分与えれば水は蒸発することを教え、さらに、定量化が可能な優れたフラスコ内の気象実験だったのです。空気の膨張によりフラスコ内の圧力が上がる時、 x cmのガラス管内水面上昇には約 x hPaフラスコ内の気圧が大気圧より高くなっているはずであり、また、フラスコを湯から取り出したとき中の空気が冷えて雲が観察できるはずですから、新しい価値も加わりそうです。中学生などのために、大きなフラスコを使った噴水実験を再登場させることはできないものでしょうか。

雲を作る実験には、大気圧・気圧変化（とその測定）・温度変化（とその測定）・断熱膨張・水の状態変化と凝結核・飽和水蒸気圧（とその温度依存）・可視光線（とその回折）・ミエ散乱・雲粒とその成長、など中学校理科の基礎的なところから高校理科の範囲外と言えそうなところまでの多くの内容が関係しています。白い雲を見せるだけの実験に終わらせず、時間をかけた測定も行える実験に作り変えれば、子どもに多くのことを学ばせたり、既に学んできたことの整理をさせたりすることができる、一段と優れた教材になるのではないのでしょうか。

もう一つ、今の理科は、大人にも難しく教員にも難しいという問題があります。高校までの理科の時間に十分習っているはずの空気と水の性質や圧力について、今回紹介したように、大学の教官を含む多くの大人たちが、子どもを混乱させてしまいそうな教え方や伝え方をすることがあるのです。消えた噴水実験に関しては、ある学会における数度の研究発表があり、この実験の考案者も誤りを認めた（毎日新聞、1987）とのことであり、問題の深刻さを感じるのですが、3. のセンターテスト物理IBのような、その他の例は、関係者にとっては、深く考えなかったので"今後注意します"で済ませたいことのようにです。このような問題を解決するための近道は無いようですが、最近の地球科学関連学会などの学校教育にも目を向けようとする活動には、大いに、期待したいと思っています。

参考文献

- 啓林館（1987）：小学校4年理科教科書（昭和62年度）
- 朝日新聞（1987）：小4理科教科書 実験記述に誤りー噴水は空気の膨張じゃないー，1月15日
- 毎日新聞（1987）：間違い教科書で番組収録ーNHK 内容を変更ー，1月18日
- 神原武志・権平健一郎（1989）：解ければ天才！理科クイズ，講談社ブルーバックスB-786，165ページ
- 山下晃・香川千世・丸山陽子（1996）：理科室で行う水の相変化の実験ーその2 新冷気湖型クラウドチェンバーとその利用法ー，大阪教育大学理科教育研究年報No.20，29-35
- 山下晃（1998）：手作り実験あれこれー教育の現場から Part 3 (1)雲を作る，可視化情報学会誌，Vol.18，No.70，192-197
- 山下晃（1998）：手作り実験あれこれー教育の現場からPart 3 (2)水晶を作る，可視化情報学会誌，Vol.18，No.71，273-278
- 山下晃（1999）：空気と水の性質を教える理科実験と気象学ーその1 噴水実験についてー，大阪教育大学理科教育研究年報No.23，49-56
- フジテレビ（2002）：平成教育委員会，1月3日