

小学校理科4学年「水の沸騰の実験」と 「水が氷になる実験」を成功させるには

About “the Experiment on Boiling Water” & “the Experiment on Freezing Water” in Science of the 4th Grade

山本 逸郎*・遠藤 聖奈**

Itsuro YAMAMOTO*・Seina ENDO**

論文要旨

教員免許状更新講習「理科を苦手とする教員のための小学校物理実験」を受講した延べ286名の小学校教員に理科の実験でうまくいかなかったことを具体的に記入してもらったところ、4学年の「水の沸騰の実験」と「水が氷になる実験」に関する記述数が全学年の実験の中で圧倒的に多いことがわかった。それらの記述の内訳は、前者の実験では「水の沸点が100℃にならない」が、後者の実験では「水が過冷却する」が最も多く挙げられていた。本研究では、これら2つの実験について詳しい測定を行い、実験条件を変えたときに測定結果がどう変わるのか議論する。

キーワード：小学校理科第4学年，単元「水の3つのすがた」，水の沸騰の実験，水が氷になる実験

1. はじめに

著者の一人である山本は、2008年より毎年、小学校教員を対象に教員免許状更新講習「理科を苦手とする教員のための小学校物理実験」を実施している。その受講者は2014年までで、延べ286名に上る。毎回、講習の最後に『小学校理科の「A物質・エネルギー」に

関する内容で、教えるのに苦労したこと、実験でうまくいかなかったことを具体的に教えてください。』という内容でA4用紙1枚に自由に記述してもらっている。それらの書かれた内容を小学校の実験別に分類したところ、その記述数は全部で417になる。

表1に第4学年の実験とその実験に該当する記述数

表1 第4学年の実験名と該当する記述数

| 学年 | 内容区分 | 内容 | 番号 | 実験名 | 記述数 |
|----|----------------|------------|----|------------------------------|-----|
| 4年 | エネルギー | 電気の働き | 16 | 乾電池の＋とモーターの回る向き（電流の向き） | 2 |
| | | | 17 | 2個の乾電池で自動車を速く走らせる（乾電池の並列・直列） | 9 |
| | | | 18 | 乾電池の直列・並列と電流の強さ（モーター・豆電球） | 12 |
| | | | 19 | 光電池でモーターを回す | 5 |
| | | | 20 | 光電池自動車を作る | 4 |
| | | | | 合計 | 32 |
| | 粒子 | 空気と水の性質 | 21 | 筒に閉じ込めた空気を押す（体積，手ごたえ） | 1 |
| | | | 22 | 注射器に閉じ込めた空気や水を押す（体積，手ごたえ） | 1 |
| | | | | 合計 | 2 |
| | | 金属，水，空気と温度 | 23 | 水が沸騰する様子（水の沸点） | 89 |
| | | | 24 | 水が氷になる様子（水の融点） | 52 |
| | | | 25 | 温度による空気の体積の変化 | 6 |
| | | | 26 | 温度による水の体積の変化 | 2 |
| | | | 27 | 温度による金属の体積の変化 | 5 |
| | | | | 実験25-27にまたがる内容 | 1 |
| | | | 28 | 金属の暖まり方（熱伝導） | 4 |
| | | | 29 | 水の暖まり方 | 4 |
| 30 | 熱した水の動き方（水の対流） | | 3 | | |
| 31 | 空気の暖まり方（空気の対流） | 10 | | | |
| | 粒子モデルに関する内容 | 2 | | | |
| | 合計 | 178 | | | |

* 弘前大学教育学部理科教育講座

Department of Science Education, Faculty of Education, Hirosaki University

** 弘前大学教育学部学校教育教員養成課程理科専修，平成27年3月卒業

を示す¹⁾。2列目3列目の内容区分と内容は学習指導要領²⁾に従っている。5列目の実験名は、青森県で採用されている学校図書の教科書³⁾に記載されている実験名で、その前の番号は、第3学年から順に振ったものである。なお、実験名は教科書の実験名そのままではなく、小学校の理科を知らない人でも実験の内容を想像しやいように表現を変えている。最後の列の数字がそれぞれの実験に該当する記述数である。

表の記述数を見て注目すべき点は、実験番号23番の「水が沸騰する様子(水の沸点)」(以後、「水の沸騰の実験」)が89件、実験番号24番の「水が氷になる様子(水の融点)」(以後、「水が氷になる実験」)が52件と、この2つの実験に関する記述が他の学年も含めた実験の中で圧倒的に多いことである。

ここで、教科書に記載されている実験の内容を確認しておく。図1に学校図書の教科書の「水の沸騰の実験」を示す⁴⁾。ここでは丸底フラスコを使用しているが、例えば、東京書籍の教科書ではビーカーを使用している⁵⁾。加熱器具は理科実験用ガスコンロになっているが、前の教科書まではアルコールランプで加熱していた。

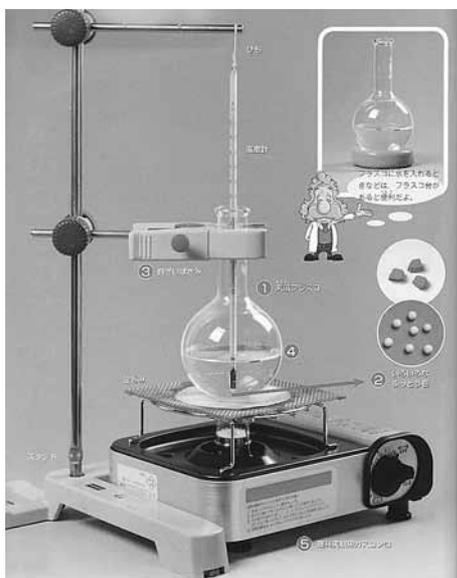


図1 水の沸騰の実験。文献4)より転載

この実験に関連して重要になることが、「水蒸気と湯気の違い」と「沸騰しているときのあわの正体」である。前者は、水蒸気は気体なので目には見えず、目に見える湯気は水蒸気でなく液体であることを学ぶ。後者は、沸騰している最中に丸底フラスコの底から出てくるあわは空気ではなく水蒸気であることを学ぶ。これらについて、学校図書では写真と文章で説明しているだけであるが⁶⁾、東京書籍では、「水の沸騰の実験」

の後に「湯気の正体をさぐろう」「あわの正体をさぐろう」と実験を設定している⁷⁾。

図2に学校図書の「水が氷になる実験」を示す⁸⁾。学校図書独自の工夫として、寒剤を入れるビーカーを二重にして保冷ビーカーを使っている。それに対し、東京書籍ではビーカーは1個である⁹⁾。氷と食塩で寒剤を作ること、観察用と温度測定用の2本の試験管を並べること、観察用の試験管で水が氷になる際の体積の増加も観察することは、両者に共通する。水が過冷却する可能性があることを、学校図書は教科書の中で触れているが⁸⁾、東京書籍では書かれていない。

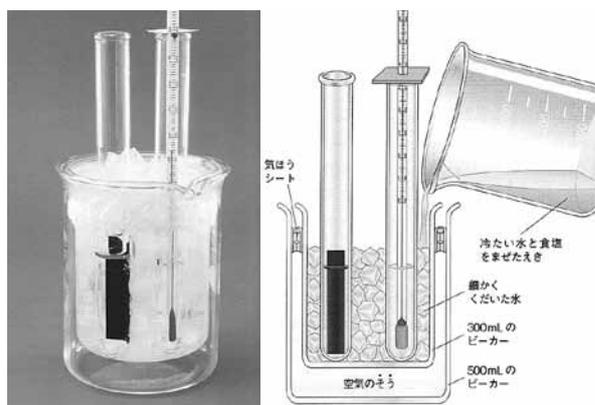


図2 水が氷になる実験。文献8)より転載

本研究では「水の沸騰の実験」と「水が氷になる実験」の2つの実験を取り上げ、詳しい実験結果を示しながら、実験を成功させるために必要な条件を議論していくことにする。

2. 記述の内訳

表2に、表1で示した「水の沸騰の実験」に関する記述の内訳を示す。まず、「沸点が100°Cにならない」が61件と飛び抜けて多い。この中には、「実験で100°Cにならない理由の説明の仕方がわからない。」「本当は、沸点は100°Cと教えても、テストで100°Cと書いてくれない。」等が多く書かれていた。次に多いのが「沸騰

表2 「水の沸騰の実験」の記述の内訳

| 記述の内容 | 記述数 |
|------------------------|-----|
| 沸点が100°Cにならない | 61 |
| 沸騰するまでに時間がかかる | 10 |
| 湯気と水蒸気の違い | 8 |
| 沸騰しているときのあわの正体 | 5 |
| 最初に出るあわ | 2 |
| 沸騰石の量 | 1 |
| アルコールランプとマッチの指導に時間がかかる | 1 |
| 実験器具の片付け方 | 1 |

するまでに時間がかかる」の10件で、その多くは「アルコールランプで加熱したために時間がかかった」とその理由も書かれていた。その次が、「湯気と水蒸気の違い」に関するものが8件、「沸騰しているときのあわの正体」に関するものが5件と続く。

表3に「水が氷になる実験」の記述の内訳を示す。ここでは、「水の沸騰の実験」のように記述数が飛び抜けたものはない。1番多いのが、「水が過冷却する(過冷却が破れない)」の14件である。これらの記述からは、「水が0℃でこおり始める」ことを教えたいが、過冷却すると0℃以下でも水は液体なので、「過冷却してしまうと失敗」と多くの小学校教員がとらえていた。次に「試験管が割れる」の10件が続く。「観察がうまくできない」の7件は、「ビーカーに霜がついて水の様子が見えない」と「試験管が曇って、温度計が読めない」の両方が含まれる。「時間がかかる」の6件は「準備して、温度を測って、水がこおる様子を観察していると、45分で終わらない」等が書かれていた。以下、「寒剤の作り方」に関する内容が5件と続く。次の「こおり始めの温度が0℃にならない」4件を二重カッコで囲んでいるのは、その内の一人は「使用しているアルコール温度計の精度の問題で、こおり始めた温度が1℃や-1℃とばらばらになった」と書かれていたが、残りの3人もそうなのか、それとも「過冷却したので0℃にならない」と言っているのか記述からは判断できないので、二重カッコで囲んだ。

表3 「水が氷になる実験」の記述の内訳

| 記述の内容 | 記述数 |
|----------------------|-----|
| 過冷却する(過冷却が破れない) | 14 |
| 試験管が割れる | 10 |
| 観察がうまくできない | 7 |
| 時間がかかる | 6 |
| 寒剤の作り方 | 5 |
| ((こおり始めの温度が0℃にならない)) | 4 |
| 体積の増加がわからない | 3 |
| 0℃で一定にならない | 1 |
| 2本の試験管のこおり方に差が出る | 1 |
| 温度計が割れる | 1 |
| 水の状態の表現の仕方が難しい | 1 |
| 保冷ビーカーを作るのが大変 | 1 |
| 準備に時間がかかる | 1 |

3. 実験を受けた側の記憶

表2と表3は実験を行った側の記述である。これに対して実験を受けた側は、これらの実験をどのようにとらえているのかを知ることは興味深い。

山本は、2014年10月6日に弘前大学教育学部で開講している小学校免許用の教科の必修科目「小学校理科基礎」においてこれら2つの実験に関するアンケートを実施した。なお、結果の集計は、当日授業に出席した小学校教員を目指す1年生70名に対して行っている。

まず、表4の問①「水の沸騰の実験をしたか」は、90% (63人) が「実験をした」、残りの10% (7人) が「覚えていない」と回答した。すなわち、「水の沸騰の実験」をしたことを、多くの学生は覚えていることがわかる。次の問②「水の沸点は100℃になったか」は、20% (14人) が「100℃になった」と答えたものの、約34% (24人) の学生は「100℃にならなかった」と回答している。ここで、問②は、問①において「実験をした」と回答した90%の学生だけに聞いているが、パーセントはあくまで全サンプル数である70名を分母にしている。

表4 「水の沸騰の実験」の結果

①水の沸騰の実験をしたか

| | |
|----------|-------|
| 実験をした | 90.0% |
| 実験をしなかった | 0.0% |
| 覚えていない | 10.0% |

②水の沸点は100℃になったか。

| | |
|-------------|-------|
| 100℃になった | 20.0% |
| 100℃にならなかった | 34.3% |
| 覚えていない | 35.7% |

表4には示していないが、問②において「100℃にならなかった」と回答した学生に対し、さらに「沸点は何度になったか」と「100℃にならなかった理由を先生はどのように説明したか」について質問している。前者の質問に対しては、24人中21人が90℃から98℃までの100℃より低い値を挙げ、2人が100℃より高い値を挙げた(1名は無記入)。後者の質問には、「水道水を使っているので、水に不純物が入っているから」が11人、「実験には誤差がある」が2人、「気圧のせい」が1人、「温度計が古い」が1人であった(残りは、「覚えていない」または無記入)。

以上のように、「水の沸騰の実験」は、100℃にならなかった実験結果とそれに対する説明を、大学生になっても覚えているぐらい児童の心にしっかりと焼き付けられる実験であることがわかる。

次に表5の「水が氷になる実験」について見ていくことにする。問③「水が氷になる実験をしたか」は、

「実験をした」が約46% (32名) と半数以下になり、「実験をしなかった」が27% (19名)、「覚えていない」が27% (19名) という結果が得られた。これは意外な数字で、それは小学校理科の中で最も基本的な「水が氷になる実験」を省略するとは思えないからである。しかしながら、27%の学生が「実験をしなかった」と言い切っている。何かの機会に実際に省略することがあるのかどうか調査してみたいと考えている。

問③において「実験をした」と回答した学生に対して、問④「教科書と同じ結果になったか」と聞いたところ、「同じ結果になった」が約16% (11名)、「違う結果になった」が約4% (3名)であった。「水が氷になる実験」に関しては「水の沸騰の実験」とは違い、「実験がうまくいかなかった」という記憶はあまりないようである。ただし、問④に関しては、質問の内容をより具体的に「水は0°Cでおこり始めたか」とか「水は過冷却したか」と別の聞き方をした方が良かったと反省している。

表5 「水が氷になる実験」の結果

③水が氷になる実験をしたか

| | |
|----------|-------|
| 実験をした | 45.7% |
| 実験をしなかった | 27.1% |
| 覚えていない | 27.1% |

④教科書と同じ結果になったか

| | |
|----------|-------|
| 同じ結果になった | 15.7% |
| 違う結果になった | 4.3% |
| 覚えていない | 25.7% |

4. 水の沸騰の実験

「水の沸騰の実験」「水が氷になる実験」とも温度を測定する。ここで、実験の詳細に入る前に、アルコール温度計の温度の精度について述べておく。大きなビーカーに水を入れ、その中にアルコール温度計を10本くらい浸けると、その内2-3本は1°C高い温度や1°C低い温度を示すものが混じっている。そのアルコール温度計は欠陥品ではない。1°C目盛りのアルコール温度計の精度は $\pm 1^\circ\text{C}^{10)}$ であり、普通、1°C程度の誤差(ずれ)はあるものと考えた方がよい。従ってアルコール温度計を使用する場合は、事前に温度のよく揃ったものを選別しておく必要がある。なお、1°C目盛りの水銀温度計の精度も $\pm 1^\circ\text{C}^{10)}$ であるが、同じように水に浸けると、0.2-0.3°Cのずれは見られるがアルコール温度計ほどのずれはない。以下の

実験は、このようにして選別されたアルコール温度計と水銀温度計を使っている。

「水の沸騰の実験」は、200mLと500mLの丸底フラスコと200mLと500mLのビーカーを使って行った。水道水をそれぞれの容器に約半分入れて、沸騰石をひとつつまみ加え、理科実験用ガスコンロを使って加熱した。温度計は、アルコール温度計($-5\sim 105^\circ\text{C}$, 1°C 目盛)と水銀温度計($-20\sim 105^\circ\text{C}$, 1°C 目盛)を2本並べてつり下げ、水の温度変化は常温から30秒毎にアルコール温度計で測定し、水銀温度計は沸点の値だけに使った。図3(a)に500mLの丸底フラスコの実験の様子を、図3(b)に500mLのビーカーの実験の様子を示す。

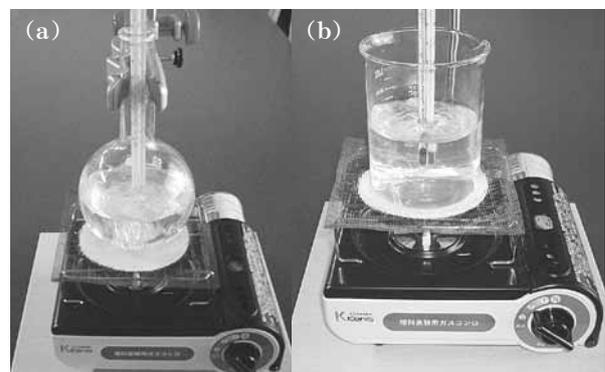


図3 実験の様子。(a) 500mLの丸底フラスコ。(b) 500mLのビーカー

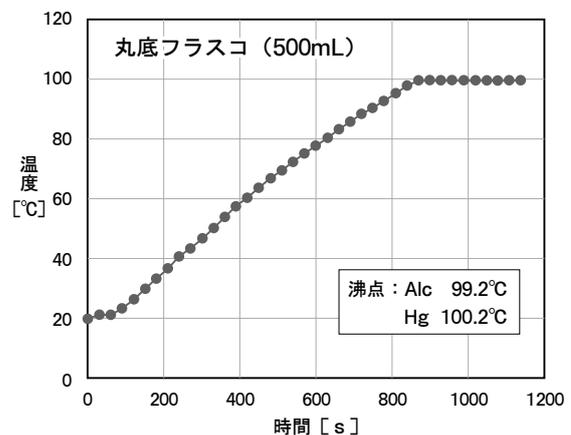


図4 水の温度変化 (500mLの丸底フラスコ)

図4に500mLの丸底フラスコを使った場合の温度変化のグラフを示す。水温が時間と共に段々と上昇していき、やがて約100°Cで一定になり沸騰する様子がわかる。このときの沸点は、アルコール温度計で99.2°C、水銀温度計で100.2°Cであった。

図5に500mLのビーカーを使用した場合の温度変化のグラフを示す。図4と同じような温度変化を示す

が、沸点は、アルコール温度計で95.0℃、水銀温度計で98.5℃にしかならなかった。

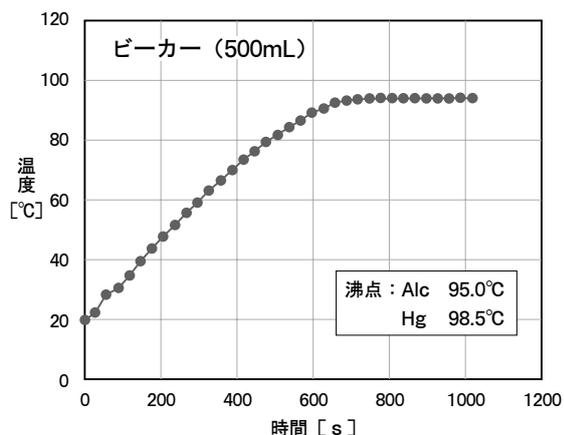


図5 水の温度変化(500mLのビーカー)

これらの測定で得られたアルコール温度計と水銀温度計の沸点を表6にまとめる。このときの実験条件は、理科実験用ガスコンロの火力をやや弱めにして、沸騰時のあわが激しく出ないようにした。また、温度計の液だめが水の上下方向に対して真ん中に来るようにした。この日の実験開始時と終了時の気圧は、999.0–996.1hPaであった。

表6 水の沸点のまとめ(その1)

| | アルコール(°C) | 水銀(°C) |
|--------|-----------|--------|
| 丸底フラスコ | 200mL | 98.8 |
| | | 100.1 |
| | | 98.0 |
| | | 100.0 |
| 500mL | 99.2 | 100.2 |
| | | |
| ビーカー | 200mL | 94.5 |
| | | 98.8 |
| | | 95.0 |
| | | 98.8 |
| 500mL | 95.0 | 98.5 |
| | | |
| | 94.8 | 98.3 |

表6において、容器と容量に対し沸点の値が2行になっている箇所は、2回の測定の結果を示している。沸点の値を見ていくと、丸底フラスコを使った場合、水の沸点は、アルコール温度計では98–99℃なのに対し、水銀温度計ではほぼ100℃を示す。一方、ビーカーを使った場合、アルコール温度計は約95℃までしか上がらない。そのときの水銀温度計は約99℃になる。また、200mLを使った場合と500mLを使った場合の沸点の違いは、丸底フラスコ、ビーカーのどちらにも現れなかった。

ここで、沸点に関する基本的なことを確認しておく。まず、気圧が沸点に及ぼす影響は、標準大気圧

1013.25hPaを基準にして、それより気圧が低い場合、沸点は100℃よりも低く、気圧が高い場合は、100℃よりも高くなる。ただし、その変化の程度はあまり大きくない。測定時の気圧、999.0hPaのときの沸点は、99.6℃、996.1hPaのときの沸点は99.5℃となる¹¹⁾。

次に水道水を使ったときの沸点の影響であるが、基本的にないと考えて良い。水(溶媒)に不揮発性物質を溶かすと沸点が上昇することは知られている。その上昇の程度は、水の場合、1mol/kg当たり0.515℃である¹²⁾。それに対し、水道水の水質基準は、鉄及びその化合物が0.3mg/L以下、カルシウム・マグネシウム等が300mg/L以下¹³⁾……であり、また、カルキ(残留塩素)も0.1–0.4mg/L¹⁴⁾に押さえられている。水に、例えば、砂糖を故意に溶かしたりしない限りは、沸点の影響はほとんどない。

表6にもどり、丸底フラスコとビーカーで沸点を比べると、丸底フラスコの方が高めている。これは、普通の温度計は全浸没温度計、すなわち、液だめだけでなく温度計全体がその温度にならないと正しい温度を表示しない¹⁵⁾ことが原因である。今の測定では、水は100℃になっていても、水面から出ている温度計の部分は100℃にはなっていない。このとき、丸底フラスコは首の部分もあるので、より多くの温度計の部分が容器の中に入り、目盛り部分の温度もビーカーよりも高くなっていると考えられる。同じ理由で、200mLと500mLでは、500mLの方が高くなることを期待したが顕著な差は見られなかった。

次にアルコール温度計と水銀温度計の沸点を比較する。アルコール温度計と水銀温度計を比べると、アルコール温度計の方が低めになることは、よく知られている。アルコール温度計の中に入っている液体はアルコールでなく灯油(ケロシン)等の有機溶剤であるが、その有機溶剤と水銀の熱膨張係数の差が原因である¹⁵⁾。すなわち、水銀の熱膨張係数の方が、約10倍値が小さい¹⁶⁾。これは温度計の目盛り部分のような細管では、同じ温度に対しアルコール(有機溶剤)の液柱の方がより上まで上昇することを意味する。しかしながら、温度計の長さはどちらも約30cmと同じである。そこで、水銀が上昇しやすいように水銀の細管の径がより細く作られている。水銀温度計の液柱が細くて見にくいのはそのためである。結果として、水面から出ている目盛り部分の液中の体積は、アルコール温度計に比べて約1/10と少ない。簡単に言うと、体積が少ない分、水面から出ている部分の温度の影響を受けにくい。

別の日に行った沸点の結果を表7に示す。このときの実験条件は、温度計の液だめを容器の底近くに持っていき、金網を取って理科実験用ガスコンロの火力を全開にした。その結果、沸騰している最中、容器の底から水蒸気のアワが激しく発生し、丸底フラスコでは、温度計の液だめが、そのアワをもろにかぶっている様子が観察された。一方、ビーカーでは、容器の底面が平らになっているため、アワは底面のいろんな場所から発生し、絶えず液だめがアワをかぶることはない。それ以外の実験条件は、前と同じである。また、この時の気圧は、996.0–997.0hPaと前とあまりかわらない。

表7 水の沸点のまとめ(その2)

| | アルコール(°C) | 水銀(°C) | |
|--------|-----------|--------|-------|
| 丸底フラスコ | 200mL | 100.0 | 100.4 |
| | | 100.8 | 101.0 |
| | 500mL | 100.8 | 101.1 |
| | | 100.8 | 101.0 |
| ビーカー | 200mL | 97.0 | 100.3 |
| | | 98.0 | 100.0 |
| | 500mL | 97.0 | 100.0 |
| | | 96.8 | 101.1 |

表7をみると、丸底フラスコでは、アルコール温度計、水銀温度計とも、100–101°Cと多くが100°Cを超えているのがわかる。一方、ビーカーでは、水銀温度計がほぼ100°Cを示しているのに対し、アルコール温度計では、97–98°Cとここだけ100°Cに達しなかった。

丸底フラスコでアルコール温度計・水銀温度計とも、100°Cを超えてしまうのは、前述したように水蒸気のアワが温度計の液だめに絶えず当たるためと思われる。それに対し、ビーカーのアルコール温度計で、100°Cにならないのは、前述したような温度計の目盛り部分の温度と熱膨張率の違いがここでも影響していると考えられる。

以上をまとめると、水銀温度計を使った場合はビーカーで実験することも可能だが、残念ながら、現在、安全性の理由で小・中学校の理科室において水銀温度計を見ることはない。従って、ビーカーでなく丸底フラスコを使って実験するのが良い。その場合でも、表7のように火力が強すぎると容易に100°Cを超えてしまうので、あまり激しく沸騰させないように注意する必要がある。ただし、ぴったり100°Cを出すのはなかなか難しいというのが率直な感想である。

また、グループ実験を行う場合に、沸騰するまでの時間を揃えるためには、基本的なことであるが、次の点に注意すると良い。①水の量を揃える。②丸底フラスコの底を金網にしっかり押しつける。③丸底フラスコの底を理科用カセットコンロの火の中心にセットする。④カセットコンロの火が風で揺れないようにする。特に②に関しては、丸底フラスコを使う場合、首の部分をスタンドのクランプではさむので、どうしても底が金網から浮いてしまいがちである。

最後に、水は特別な存在なので、「沸点が100°C」が強調されがちであるが、物質の学習の見地から見ると、「水と水蒸気(液体と気体)が共存する状態が沸騰であり、そのときに温度が一定になる」ことを理解することの方が大切であると指摘しておきたい。

5. 水が氷になる実験

「水が氷になる実験」では、外径が15mmのJIS15と25mmのJIS25の2種類の試験管を使用した。また、試験管に入れる水の量は、試験管の底から5cmに統一した。アルコール温度計(–5~105°C, 1°C目盛)の液だめに保護用のゴム管をかぶせ、その液だめが水の上下方向、前後左右方向の真ん中に来るように試験管の口の部分でペーパータオルを使って固定した。図6(a)にそのようにセットしたJIS25の試験管を示す。

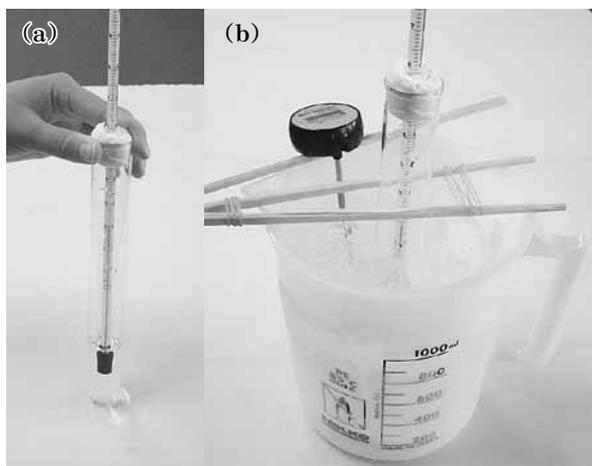


図6 (a) 温度計をセットしたJIS25の試験管。
(b) 実験の様子

図6(b)に実験の様子を示す。寒剤は、大きな熱容量を確保するために、1Lのポリビーカーに氷と食塩を入れて用意した。その際、寒剤に温度むらがないように氷と食塩をよくかき混ぜるように注意した。寒剤の温度は電子温度計でモニターし、試験管は水の部分が寒剤の中心になるように沈めた。このように、今回の実験では、小学校の実験⁸⁾のようにビーカー

の側面から試験管の水の様子を観察できない。また、観察用と温度測定用の試験管を分けていない。その代わりに水の様子は試験管を寒剤から素早く取り出して観察した。また、アルコール温度計の温度は、図6(b)の状態を読み取っている。温度はJIS15の試験管では20秒毎に、JIS25の試験管では30秒毎に測定した。

図7にJIS25の試験管を使った場合の温度変化のグラフを示す。このときの寒剤の温度は、 -18.2°C を示した。グラフを見ると、水温は時間と共に減少していき、150秒後からマイナスの温度に入り過冷却が始まる。水が過冷却になったのを確認した後、180-210秒の間に試験管を寒剤から出して過冷却を故意に破っている。この際、寒剤から試験管を出しただけでは過冷却は破れず、かなりしっかり試験管を振っている。過冷却を破ると水は一瞬にして液体(図8(a))からシャーベット状に変わる(図8(b))。シャーベット状になった試験管の写真を図9にしめす。シャーベット状になると水温は 0°C に戻り、それから800秒過ぎまで 0°C で一定の状態が続く。その間、試験管では、底と周囲から段々と水が成長し始める様子が観察される(図8(c))。最後に水が完全に氷になると(図8(d))、氷点下に温度が下がっていく。

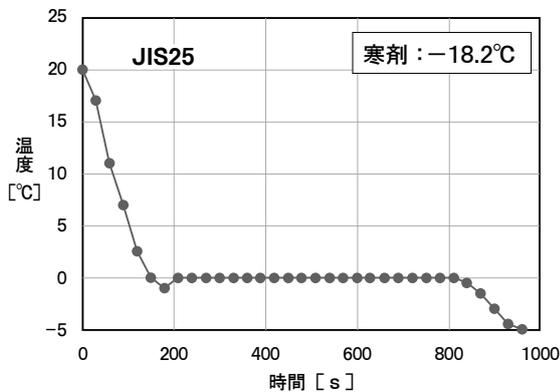


図7 水の温度変化 (JIS25の試験管)

図10にJIS15の試験管を使った場合の温度変化のグラフを示す。このときの寒剤の温度は -18.8°C を示した。JIS25と同様の温度変化を示すが、水の量が少ない分だけ横軸の時間スケールが小さくなっているのがわかる。

グラフからは読み取れないが、JIS15とJIS25を比較すると、過冷却の破れ方に違いが見られた。すなわち、JIS15の多くは試験管を寒剤から取り出しただけで過冷却が簡単に破れたのに対し、JIS25では、前述したようになんか強く振らないと破れなかった。

次に温度計の液だめの位置を水の真ん中からずらし

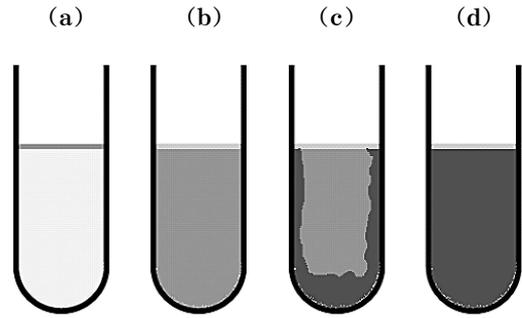


図8 水の変化の様子。(a)液体の水。(b)過冷却が破れてシャーベット状に変わる。(c)底と周囲から氷になる。(d)全体が固体の氷になる



図9 過冷却が破れてシャーベット状になった水

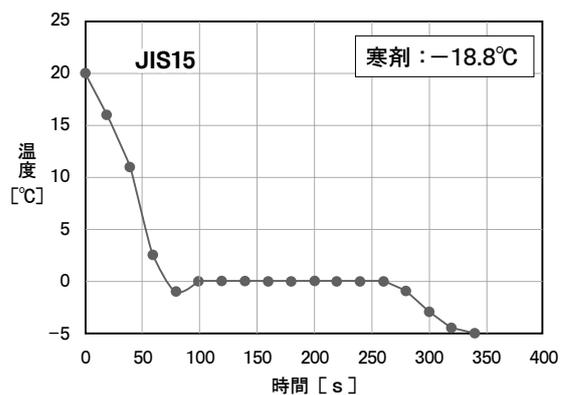


図10 水の温度変化 (JIS15の試験管)

たときの影響を見ていくことにする。図11(a)は温度計の液だめの位置を試験管の側面に付けたとき、図11(b)は試験管の底に付けたときのJIS15の試験管の結果である。液だめには保護用のゴム管を被せているので、液だめのガラスが直接試験管に接触するわけではない。また、(a)では上下方向には水の真ん中に、(b)では前後左右方には真ん中にセットしている。

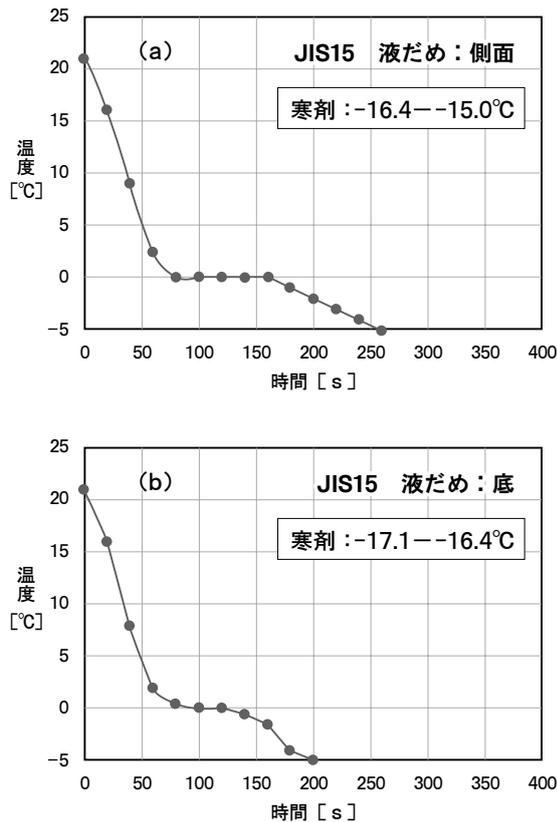


図11 温度計の液だめの位置の影響。(a) 液だめを試験管の側面に付けたとき。(b) 液だめを試験管の底に付けたとき

図11(a)と(b)のグラフを図10のグラフと比較すると、図10よりも0°Cでの一定の時間が短く、早い時間でマイナスの温度に下がってしまうのがわかる。これは、0°C一定の状態では、シャーベット状の水が底と周囲から段々と氷に成長すると説明したが、液だめがそれぞれ、側面と底にあるために早い時間から氷の部分に入ったためと考えられる。なお、(a)も(b)も過冷却が見えていないが、これは過冷却に入ってから観察のために試験管を取り出した際に破れてしまったために、測定点に現れていないだけであり、過冷却が起きていないわけではない。

図11の結果は、短いながらも0°Cで一定が、一応見えているので、必ずしも失敗と言えないかも知れない。しかしながら、明らかに失敗と言える結果の一例を示しておく。

図12はこの実験を開始して比較的初期の段階で得られた温度変化である。図10や図11と比較すると、0°Cで一定にならず、段々と温度がマイナスに下がっていくのがわかる。このときは、寒剤の温度が-12°Cと比較的高く、なおかつ温度計の液だめが試験管の側面に

付いていた。また、初期の段階で寒剤をよくかき混ぜないで使っていたため、寒剤の温度勾配もあったものと推測される。しかしながら、同じ日に繰り返して測定した結果では、0°Cで一定になっており、必ずしも同じ条件で再現するわけではない。

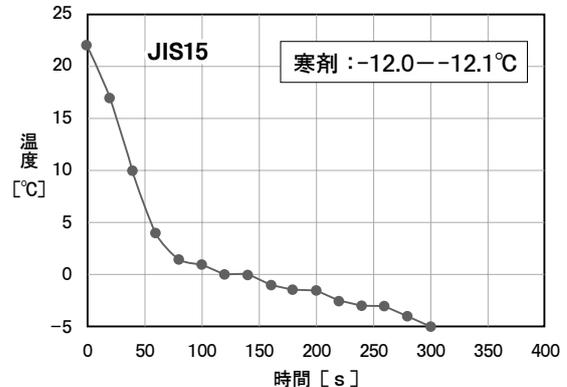


図12 0°Cで一定のない温度変化の例

寒剤の温度が比較的高いときの影響は、結果を示さないが、0°C一定の所までは同じで、その後のマイナスの温度に下がっていく段階で、図7や図10よりもだらだらと2倍以上の時間がかかって下っていく。

「水が氷になる実験」は、初期段階の寒剤の温度や温度むら、温度計の液だめの位置等の条件制御を意識せずに行った測定を含めて50回以上くり返しているが、その結果わかったことは、「水は必ず過冷却する」ということである。

第2節において、小学校の教員は「水が0°Cでこおり始める」ことを強く意識していて、それ故に過冷却すると、失敗したと思っていると述べた。しかしながら過冷却が破れた後のシャーベット状こそ水と氷が共存している状態であり、そのときに0°Cで一定になることが物質の学習では重要と考える。過冷却が破れて一瞬でシャーベット状に変わる瞬間は、筆者らが見ても感動するような現象である。過冷却をしたので失敗と思わず、是非、過冷却が破れる瞬間を児童に見せてあげられるような教員であってほしい。

ここで、過冷却の次に記述数の多かった「試験管が割れる」ことについてコメントしておく。筆者らの測定でも初期の段階で2本ほど割れたが、それ以降は割れていない。これは、寒剤に温度むらがあることが原因と考えられる。すなわち、水は氷になる際に体積が膨張するので、試験管の中の水が上部から先に氷になってしまうと、後からこおる部分は行き場がなくなって試験管が割れてしまう。寒剤に温度むらができ

ないように、あらかじめ氷と塩をよくかき混ぜることで解消されると考える。すくなくとも今の試験管は昔と違い、熱ショックに強い耐熱ガラス製なので、よほどのことがない限り割れることはない。

今回の実験では、JIS15とJIS25の2種類の試験管を使用した。JIS15の試験管に温度計を入れると、温度計と試験管の側面の内側の面とのスペースがあまりないことがわかる。温度計の液だめの位置によって結果が敏感に変わってくることを考えると、JIS15の試験管よりもJIS25のような口径の広い試験管の方が、小学校での実験には適切と思われる。

学校図書の教科書では、図2のようにビーカーを2個使って保冷ビーカーをつくり、試験管を寒剤に差し込んだ状態で観察するように設定している⁸⁾。そのために、試験管をビーカーの真ん中でなく、わざわざ、ビーカーの側面近くに差し込むように教科書会社の指導書には書かれている¹⁷⁾。しかしながら、実験がうまくいかない、あるいはグループで結果がばらついていては、元も子もない。本研究のように大きめのビーカーに寒剤をつくり、(温度むらが無いようによくかき混ぜて)、その真ん中深くに試験管を差し込む方がよい。試験管を素早く取り出して水の様子を観察する方法でも、十分に水の様子を観察できると考える。

また、教科書では、観察用と温度測定用の2本の試験管を使っているが^{8,9)}、温度計の入っている試験管と入っていない試験管が時間的に同時にこおっていくことはかなり難しい。温度計を差し込んだ1本の試験管を使って、温度を測りながらその水の様子を観察した方が適切である。

以上、「水が氷になる実験」は過冷却するという前提で、実験を成功させる工夫を述べて来たが、どうしても過冷却を避けたい場合は、温度を下げる方向でなく温度を上げる方向で測定すれば良い。

図13の(a)と(b)は、寒剤の中で完全にこおらせた試験管をビーカーにくんだ水の中に入れて測定した結果である。どちらのグラフもマイナスの温度から上昇し、0℃で一定になった後、プラスの温度に上昇していく様子を見ることができる。0℃で一定の間、氷は一樣に溶けていくのではなく、周りから段々に溶けていく。従って、この場合も温度計の液だめが氷の真ん中にないと先に液だめが氷から出てしまうので、図のようにきれいに0℃一定にはならないことを注意しておく。

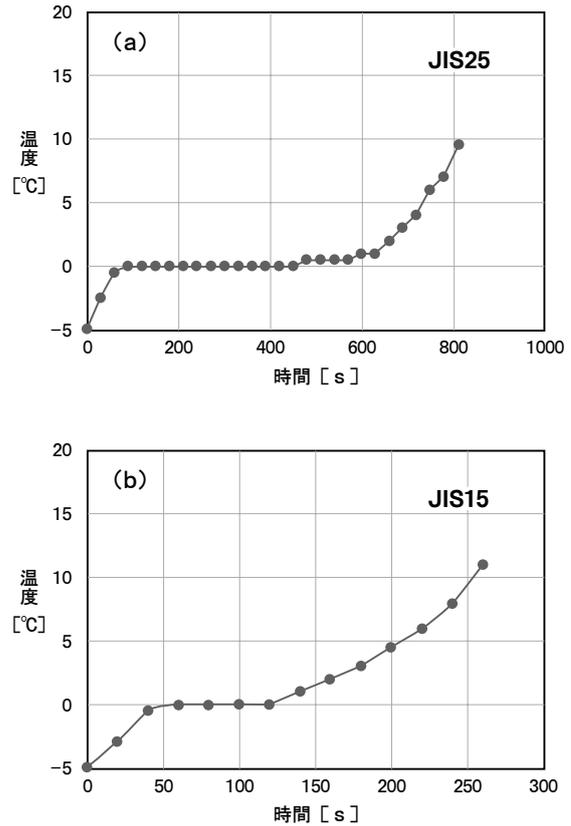


図13 温度上昇の方向で測定した水の温度変化。
(a) JIS25の試験管。(b) JIS15の試験管

6. まとめ

小学校教員が理科を教える中で、うまくいかない実験として挙げた4学年の「水の沸騰の実験」と「水が氷になる実験」について、詳しい測定を行い、実験を成功させるための条件を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- ① アルコール温度計はあらかじめ、温度の揃っているものを選んでおく必要がある。
- ② 「水の沸騰の実験」では、ビーカーでなく丸底フラスコを使う。その際、理科実験用ガスコンロの火力を強くすると、沸騰時のあわが激しく出て温度計の液だめにあわがかぶってしまい、アルコール温度計でも容易に100℃を超えてしまう。そこで、ガスコンロの火力を少し弱めにして、激しくあわが出ないように気をつける。
- ③ 沸点が100℃にならないのは、気圧や水の純度の原因ではなく、アルコール温度計の特性による。アルコール温度計が98℃や99℃を示していても、実際の水の温度は100℃になっていることを、自信をもって教えてほしい。
- ④ 「水が氷になる実験」では、水は必ず過冷却する

と考えた方がよい。過冷却が一瞬で破れてシャーベット状になった状態が水と氷が共存している状態であり、その後続く0°C一定の状態を押さえることが大事である。

- ⑤ 「水が氷になる実験」を成功させるためには、次の点に気を付けるとよい。まず、大きめのビーカーに塩と氷で寒剤を用意し、温度むらがないようによくかき混ぜる。JIS25のような大きめの試験管を使い、アルコール温度計の液だめの部分が水の真ん中になるように、試験管の口でペーパータオル等を使って固定する。温度測定用の試験管と観察用の試験管を別にせず、1本の試験管で温度と水の様子を観察する。

本稿が「水の沸騰の実験」と「水が氷になる実験」を実施する際の参考になれば、幸いである。

文献および註

- 1) 他学年の実験に該当する記述数とその内訳は、別の機会に発表する予定である。
- 2) 文部科学省：小学校学習指導要領解説理科編（大日本図書，平成20年8月）
- 3) 日高敏隆ほか：みんなと学ぶ小学校理科4年（学校図書，平成22年3月検定済）
- 4) 文献3)の98-99.
- 5) 毛利衛ほか：新しい理科4（東京書籍，平成22年3月検定済）110-111.
- 6) 文献3)の101.
- 7) 文献5)の112-114.
- 8) 文献3)の102-106.
- 9) 文献5)の116-118.
- 10) 例えば，シンワ測定ショップのHP (<http://shinwa.kaneman-shop.com/>) から，Top>16.砂時計・温度計・湿度計>棒状温度計>個々の温度計のページ。
- 11) 水の沸点，国立天文台編：理科年表平成17年（丸善物46(392)）.
- 12) 斎藤烈監修：図解フォーカス総合化学（啓林館）40.
- 13) 例えば，東京都水道局のHP (<http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>) から，Top>水質・水源>水道水質基準>水質基準項目。
- 14) 例えば，東京都水道局のHP (<http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/>) から，Top>水質・水源>残留塩素の低減化。
- 15) 日本ガラス計量器工業協同組合のHP (<http://www.jckumiai.or.jp/>) から，Top>温度計の使い方(pdf)。
- 16) 液体の体膨張率，文献11)の物53(399)。
- 17) みんなと学ぶ小学校理科4年教師用指導書朱書編（学校図書，2011年3月発行）123.

(2015. 1. 5 受理)