

沸点の公称値からのずれとばらつき -小中学校理科指導の視点から-

Shift from the nominal value and fluctuation of the boiling temperature

住浜水季, 柴田泰地, 水田亮, 西川静紅, 高橋知里, 新浪華次,
板津克昌, 楳田紗里, 中村和希

〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学教育学部 理科教育講座 物理科
e-mail:sumihama@gifu-u.ac.jp

論文要旨

理科の実験で、気温や水などの温度を測るために棒温度計を使用する。水やエタノールの沸点を棒温度計で測定したとき、その測定値が公称値からずれたり、ばらついたりすることがある。本研究では、その「公称値からのずれ」と「ばらつき」の要因を探るために、棒温度計の仕組みと使用方法、さらに気圧による沸点の変化について調べた。また、棒温度計の精度測定を行った。その結果、「公称値からのずれ」は沸点の測定方法に起因すること、「ばらつき」は棒温度計の精度と測定方法によるものであることがわかった。気圧の変化は要因として考えにくいこともわかった。

1 はじめに

棒温度計は、安価で使用方法も簡単であるため広く学校で使用されている。日向や日陰の気温、水を熱したときや冷やしたときの温度変化、水やエタノールの沸点の測定などに棒温度計を使用している。棒温度計を正しく使用し、児童・生徒からの「どうして?」という疑問に答えるために、その仕組みと特性を知る必要がある。

水の沸点は $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ （正確には $99.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]）であるが、小学校の授業で棒温度計を使って測定すると、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達することはほとんどない。さらに、その値にはばらつきがある。中学校ではエタノールの沸点を棒温度計で測定する。ある中学校の授業で得られたエタノールの沸点の値は、 $73\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ までばらつきがあった。エタノールの沸点は $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ （正確には $78.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]）である。測定した水やエタノールの沸点の「公称値からのずれ」と「ばらつき」の要因はなんだろうか。

「公称値からのずれ」とは、水の沸点の公称値は $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ で、それと測定値との差のことである。測定値の「ばらつき」とは、いくつかある温度計で測られた測定値間の差のことである。一般に、測定値の「公称値からのずれ」と「ばらつき」の要因は分けて考察する必要がある。つまり、水の沸点が $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達しない理由と、児童・生徒が測定した値にばらつきがある要因は異なる。本研究では、これらの要因を探るため、棒温度計の仕組みと使用方法を調べ、棒温度計の精度測定を行った。また、標高・気圧・沸点の関係を調べ、これらが要因になり得るかを考察した。

2 棒温度計の仕組みと使用方法

棒温度計は、液体の体積が温度によって変化することを利用している。ガラス管に封じ込められた液体（感温液）があたためられると、膨張して管の上部へと上がっていく。感温液の上端の位置の目盛りが温度に対応している。感温液には水銀または着色された白灯油（通常、アルコール温度計と呼ばれるが、使用されているのはアルコールではなく、着色された白灯油である）が使われる[2-4]。水銀は温度変化による体積変化がゆるやかであること、熱伝導がよいこと、蒸発しにくいことから温度計に適しているが、人体への毒性が強いことから、学校では使用されていない。学校では白灯油を用いた棒温度計が用いられる。

棒温度計は「感温液」、「感温液を蓄える液溜」、「ガラスで作られた毛細管」で構成される。毛細管を液溜と溶接し、そこに感温液を流し込み、密閉するという3段階で製造される。毛細管の太さには個体差があるため、各個体に個別に目盛りが付けられている。個別に複数点の温度検査を行い、目盛りの位置を決定し、ガラス管に目盛を印刷する[2-4]。従って、温度計によって目盛りの位置と間隔が異なっている。また、いくつかの棒温度計の製品の説明書には、温度精度は ± 1 °C程度であると書かれている[5]。

棒温度計には全浸没温度計と浸没線付温度計がある。学校では主に全浸没温度計が使用されている。全浸没温度計とは、感温液全体を測定したいものに浸し、温度を測定する温度計である。従って、全浸没温度計の感温液を露出して測定する場合には補正が必要となる。

感温液の赤液に使う染料は紫外線を浴びると褪色し、目盛りが読みにくくなることがある。赤色の感温液を使用した温度計は、できるだけ屋内で使用すること、屋外で使用する場合は必要以上に日光にさらさないこと、室内での保管場所も日陰にするとよい。屋外用の青色に着色された棒温度計も市販されている[2-4]。

3 棒温度計の精度測定実験

棒温度計の特性を知るために、以下のような実験を行った。

3-1 目的

12本のアルコール温度計と1本の水銀温度計を使って水の沸点を測定し、使用方法による測定結果の違いと個体差を調べた。

3-2 方法

12本のアルコール温度計のうち10本は本年に同じ業者から購入した。他2本は購入時期が不明だが、5年以上前と思われる。水銀温度計も購入時期は不明で5年以上前と思われる。これらを使用して、水の沸点を以下の3種類の 방법으로測定した。

- 測定Ⅰ コンロを使用し、大きい鍋に沸騰した水を用意した。そこに温度計を横に寝かして、全部を浸けて温度を測定した（全浸没測定）。
- 測定Ⅱ コンロを使用し、大きい鍋に沸騰した水を用意した。そこに図1のように、温度計を立てて、液溜から一部のみを水に浸して水の沸点を測定した（部分浸没測定）。

- 測定Ⅲ ガスバーナーと、1000 mLビーカーを使用し、学校で行われるような方法で測定した（部分浸没測定）。

測定Ⅱ、Ⅲでは、アルコール温度計の下端から約4 cm までを水に浸けて測定した。下端から100℃ の目盛りまで約 23.5 cm であり、全体の約 20% を浸したことになる（前述したように目盛りの位置と間隔には個体差がある）。水銀温度計は、温度計の下端から 100℃ の目盛りまで約10.0 cm であり、約 40% 浸して測定したことになる。

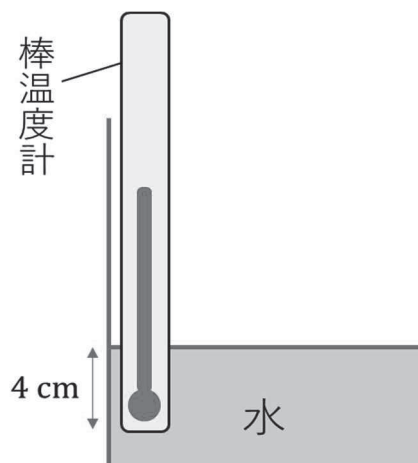


図 1 部分浸没測定概念図

測定はそれぞれの温度計で、3 種類の測定方法で各 3 回ずつ行った。室温は17.8℃、気圧は1012 hPaであった。

3-3 結果と考察

測定結果を表 2 に示す。各測定で、各温度計で 3 回測定した温度の平均値と標準誤差を求めた。さらに各測定で、それぞれの温度計で得られた測定値の平均値と標準誤差を求め、表 2 の最下段に記した。使用した 13 本の温度計を A~M とし、A~J は本年に購入したもの（新）、K~M はそれ以前に購入したもの（旧）である。A~J はアルコール温度計（ア）で、M が水銀温度計（水）である。また、この測定結果をグラフにした（図 2）。

3-3-1 測定Ⅰでは新アルコール温度計 A~J で得られた測定値の公称値からのずれは $-1.3 \sim +0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。これは本測定で得られた標準誤差と前項 2 にある温度計の精度 ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) を考慮すると誤差の範囲と言える。つまり、測定値の公称値からのずれも、温度計による測定値のばらつきも誤差の範囲といえる。よって、感温液を全部浸没することで水の沸点を誤差 ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) の範囲で正しく測定できることがわかった。水銀温度計 M についても、標準偏差の範囲で沸点を正しく測定できた。一方で、旧温度計 K による測定値は公称値よりも $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 高く、旧温度計 L は $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 低い。誤差を考慮しても公称値から外れた値であった。要因の 1 つに経年劣化があると考えられる。

3-3-2 測定Ⅱでは、温度計 A~J で得られた測定値は、公称値から $1.5 \sim 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 低い。そのばらつきは $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、誤差の範囲といえるが、公称値からのずれは、誤差では説明できない。公称値からのずれの要因として、全浸没用温度計を部分浸没で測定したことが考えられる。この測定では、感温液の約 80% が沸騰水から露出している。露出された感温液は沸騰水による蒸気または室温にさらされている。この部分の温度は沸点よりも低く、そのため公称値よりも低い値が得られたと考察する。

温度計 K と L で得られた測定値は測定Ⅰの結果と違いが見られず、温度計 A~J で得られた結果と異なる。これらの温度計は経年劣化により精度がよくないと考える。水銀温度計 M で得られた測定値は公称値よりも $2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 高い。水銀温度計の精度も $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ だとすると、公称値よりも高い値になっている。その理由は不明だが、アルコール温度計のように部分浸没測定の影響を受

けていないようである。この温度計は約60%の感温液が露出されていて、温度計A~Jの露出度よりも少ないことが要因かもしれない。さらに、水銀は、温度変化による体積変化がゆるやかで、熱伝導がよいために、露出部の影響を受けにくいとも考えられる。

3-3-3 測定Ⅲでは温度計A~Jによる測定値は公称値よりも4.5~7.7℃低く、測定Ⅱの結果よりも低い温度が得られた。温度計による測定値のばらつきは3.2℃で、誤差よりも大きい。測定値が公称値よりも低い要因は、先に述べたように、全浸没用温度計を部分浸没で測定したためと考える。感温液の露出度合いは測定Ⅱと大きな違いはないが、測定Ⅱよりもさらに低い値が得られたのは、ビーカーを使用した測定では、感温液の露出部分の温度が測定Ⅱよりも低いと考えられる。コンロを使って大きい鍋で水を沸騰させたときは、より広範囲に水蒸気が広がり、周りの空気が温められる。それに対し、ガスバーナーでビーカーの水を温めた時は、周りの空気がそれほど温められず、露出部分の温度が上がらなかったのではないかと考える。また、蒸気の当たり方やガスバーナーからの温度計の位置が測定値のばらつきの要因になったと考える。測定方法が温度計の露出部分の状態に影響を与え、測定温度も変化し得ることがわかった。ビーカーを用いる学校での実験では、低い温度が得られること、また、ばらつきが大きくなることがあると思われる。

表1 全浸没と部分浸没の測定結果

温度計	測定Ⅰ 全浸没 [°C]	測定Ⅱ 部分浸没 (鍋) [°C]	測定Ⅲ 部分浸没 (ビーカー) [°C]
A(新・ア)	99.7 ± 0.6	98.5 ± 0.5	94.8 ± 0.5
B(新・ア)	98.8 ± 0.3	97.4 ± 0.4	94.0 ± 0.0
C(新・ア)	99.7 ± 0.6	98.3 ± 0.2	95.5 ± 0.0
D(新・ア)	99.2 ± 0.3	97.7 ± 0.5	93.9 ± 0.1
E(新・ア)	98.7 ± 0.3	97.7 ± 0.4	94.2 ± 0.2
F(新・ア)	100 ± 0.0	98.0 ± 0.4	95.2 ± 0.2
G(新・ア)	98.7 ± 0.6	97.8 ± 0.5	92.3 ± 0.2
H(新・ア)	99.0 ± 0.0	97.8 ± 0.2	94.1 ± 0.1
I(新・ア)	99.3 ± 0.6	97.7 ± 0.5	95.1 ± 0.0
J(新・ア)	98.8 ± 0.8	97.8 ± 0.2	93.7 ± 0.8
K(旧・ア)	102.0 ± 0.0	102.0 ± 0.4	97.4 ± 0.4
L(旧・ア)	97.0 ± 0.0	96.7 ± 0.5	93.0 ± 0.1
M(旧・水)	100.4 ± 0.8	102.6 ± 0.1	101.3 ± 0.3
平均	99.3 ± 1.2	98.4 ± 1.7	94.8 ± 2.2

旧温度計 K による測定値は温度計 A~J の測定値よりも約3 °C高く、旧温度計 L は約1.5 °C低い。誤差を考慮しても新温度計よりもばらつきが大きい。水銀温度計 M で得られた測定値は公称値よりも1.3 °C高い。水銀温度計の精度も±1 °Cだとすると、公称値に近い値であり、測定 II と同様に、部分浸没測定の影響を受けていないようである。

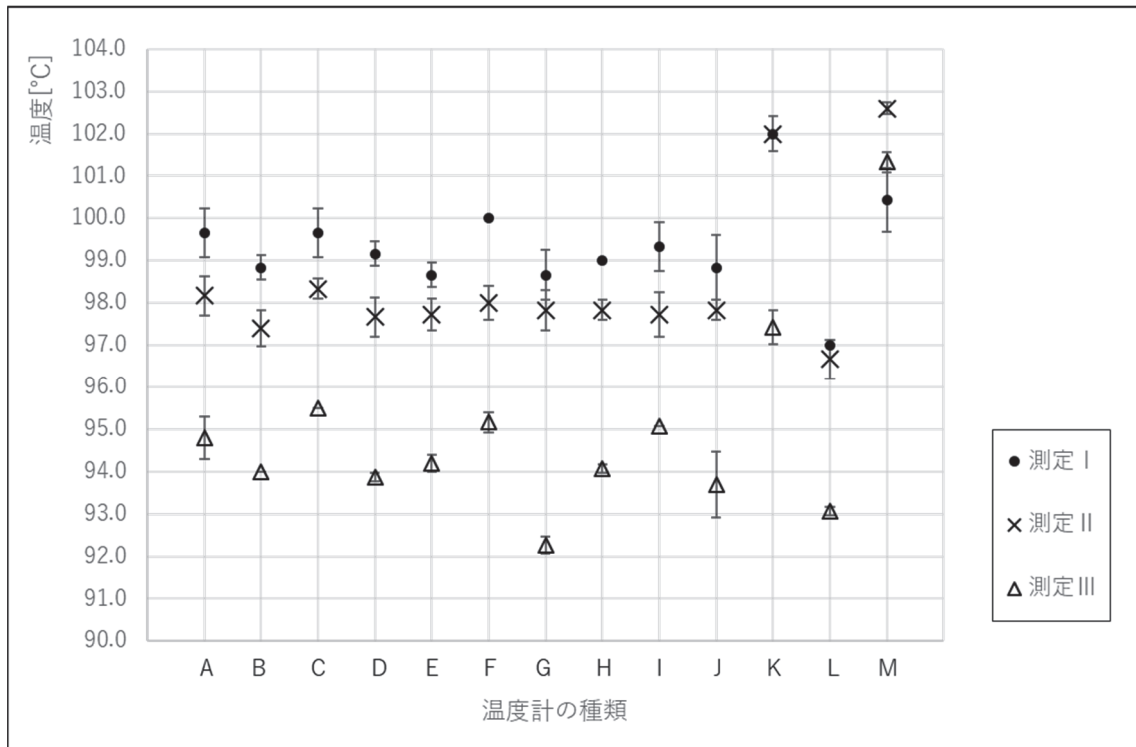


図 2 測定 I, II, IIIの結果

3-3-4 測定 I では棒温度計を横に寝かして使用し、測定 II, IIIでは立てて使用した。そこで、棒温度計を地面とほぼ垂直にして測定する場合と地面とほぼ平行にして測定する場合で温度を比較し、重力による影響を調べた。それぞれの状態で、常温で3回測定を行いその平均と標準誤差を求めた。測定結果を表 2 に示す。

表 2 温度計の各測定方法での測定値

測定方法	温度 [°C]
地面と垂直	17.6 ± 0.4
地面と平行	17.9 ± 0.3

結果として0.3 °Cの差が生じたが、この差は小さく誤差の範囲であるため、重力の影響はほとんどないことがわかった。

4 沸点の気圧依存性

気圧が低くなると、沸点の温度は低くなる。中学理科・高校化学では、気圧によって沸点が変化することを学習する。教科書にある蒸気圧曲線を図3に示す[6]。ここでは、気圧による影響が、沸点の測定値の公称値からのずれや、ばらつきの要因となり得るか定量的に調べた。

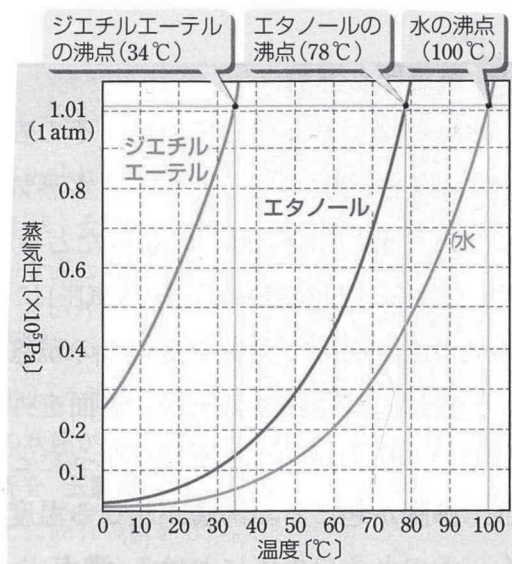


図3 蒸気圧曲線 (数研出版 化学より)

岐阜県は海拔0 mの平野から海拔3000 mの山間部まで標高差が激しい。県内の小・中学校は、海拔0 mから海拔約1000 mの範囲にあり、標高差によって気圧が異なる。そこで、標高の低い海津市大江小学校(海拔0 m)と、標高の高い飛騨市立山之村小中学校(海拔913 m) [7]における気圧と気圧による沸点を算出し、その違いを比較した。気温 t [°C]、海拔 h [m]の地点での気圧 P [hPa]は、国際標準大気モデルによる以下の式を使用して求めた。

$$P = P_0 \left(1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15} \right)^{5.257} \quad [\text{hPa}] \quad (1)$$

ここで、 $P_0 = 1013.15$ hPa (1気圧)であり、0.0065は気温減率である。また、気圧 P [Pa]と水の沸点 T [°C]の関係は、以下のTetens (テテンス)の式より求めた。

$$P = 6.1078 \times 10^7 \times 10^{\frac{7.5T}{237.3 + T}} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

気温20°Cの時の、上記の2つの小学校の気圧と、その気圧での水の沸点を式(1)と(2)から求め、表3にまとめた。気圧差は約100 hPaあり、水の沸点の差は約3°Cであることがわかった。従って、標高の高い学校では、測定値が公称値から最大で約3°C低くなる可能性がある。ただし、この計算結果は、気温20°Cの時であり、上記2式を使用したものである。実際は、気温だけでなく、大気密度などにも依存する。また、教室内では条件が異なるので、必ずしもこれらの値になるとは限らない。よって、目安と考えてほしい。

表3：気圧と沸点の違い

	海津市立大江小学校	飛騨市立山之村小中学校
海拔	0 m	913 m
気圧	1010 hPa	911 hPa
沸点	99.8 °C	96.9 °C

一方で、測定値のばらつきの要因として、気圧は考えにくい。1 °C程度のばらつきは、36.23 hPa の気圧差に相当し、305 m の標高差に相当する。同じ小学校の教室内で、同じ道具を使い、同じ方法で同時刻に実験をしていれば、これほどの気圧差、さらに、沸点の差が生じるとは考えにくい。よって、測定値のばらつきは、温度計の精度と測定方法が主たる要因である。

5 測定値の公称値からのずれとばらつき

棒温度計を使った沸点の測定において、その測定値の「公称値からのずれ」と「ばらつき」の要因についてまとめる。前述した通り、「公称値からのずれ」とは、水の沸点の公称値である100 °Cと測定値の差のことである。全浸没測定の結果から、感温液を全部水に浸けて測定したときは、公称値からのずれは小さく、誤差の範囲で正しく測定することができた。ビーカーを用いた部分浸没では、約-6 °Cの公称値からのずれがあり、その要因は感温液を一部露出していたためと考えられる。また、この差は大きく気圧によるとは考えにくい。

測定値の「ばらつき」とは、いくつかある温度計で測られた測定値間の差のことである。今回用いた10本の新アルコール温度計で得られた測定値間の差でみると、全浸没測定では、1.3 °Cのばらつきがあった。これは、温度計の精度による要因と考えられる。ビーカーを用いた部分浸没測定では、最大3.2 °Cの差があり、精度だけでは説明できない。気圧差でも説明できない。主な要因はガスバーナー、ビーカー、温度計の位置関係や、蒸気の当たり具合といった細かな測定方法の違いにあると考える。

6 棒温度計を用いた授業の指導方法の提案

全浸没温度計を部分浸没測定で使用しているために、公称値から下方にずれが生じること、棒温度計には個体差があり、精度が±1 °C程度（古い温度計はもっと大きい可能性がある）あること、測定方法によって測定値にばらつきが生じることがわかった。これらのことを理解したうえで指導にあたるとよいと考える。

棒温度計を使用する際、事前に常温で測定しておくことで、誤差があることと個体差を把握することができる。温度計に番号を付け、班ごとに毎回同じ温度計を使うことで、温度計による差（混乱）を改善できる。児童・生徒自身が、使用している温度計の特性（精度）を知るこ

とができる。また、測定方法はできるだけ統一することで、測定値のばらつきを小さくすることができる。同じ教室で同時刻に測定を行った場合、「すれ」や「ばらつき」の要因を説明するとき、気圧は考えにくいことも念頭に入れておいてほしい。気圧を考えるなら、標高差のある学校間で、測定値を比較してみるのも面白いかもしれない。

中学校では、測定器具の最小目盛りの1/10まで読むように指導するが、このように棒温度計の精度はあまり良くないため、意味がないように思われる。しかし、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の精度があるからと言って、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の精度で目盛りを読み取ると、さらにその測定値の精度は悪くなる。理科の実験では、温度計の他にメスシリンダー、電流計、電圧計などの測定器具を使う。器具によっては、1/10まで読む測定方法に意味があるかもしれない。最小目盛りの1/10まで読むことを習慣づけることで、どの器具にも対応できるようになることに効果があるとも考えられる。これらの点も踏まえて指導にあたることで、生徒・児童に正しい知識を習得させることができると考える。

7 まとめ

棒温度計の特性を知るために、その仕組み・使用方法について調べた。また、13本の棒温度計を使って水の沸点の測定を行った。その結果、精度・固体差があること、公称値よりも低い値が出ること、ばらつきがあることは、測定方法に要因がることがわかった。また、ずれやばらつきの要因として気圧は考えにくいこともわかった。これらの棒温度計の特性を理解したうえで、指導方法を提案した。棒温度計を使用した授業で生かされることを期待する。

参考文献

- [1] 1気圧 (1013.25 hPa) における沸点。理科年表 2021 国立天文台編
- [2] 温度の計測 計量管理協会 コロナ社
- [3] 日本計器株式会社 (nihonkeiki.co.jp) <http://www.nihonkeiki.co.jp/how.html>.
- [4] 温度計・湿度計 種類・特徴まとめてみました | はかりブログ (hakari-shouten.com) <https://hakari-shouten.com/html/wp/column/2145/#i-2>
- [5] シンワ測定の棒状温度計など
- [6] 高等学校教科書 数研出版 「化学」
- [7] マピオン <https://www.mapion.co.jp/>