

ガラス製アルコール温度計の応答特性と気温の測定

—小学校理科実験における場合—

高橋 一 栄*・森 征 洋**

1. はじめに

小学校の理科教育では、気象に関して、1日の天気の様子を観測し、天気の変わり方を調べ、天気の変化の仕方について学ぶという単元がある。この単元に関する実験として、教科書では、ガラス製アルコール温度計による気温の測定が取り上げられている。

温度測定の基本は、測定対象の物体と温度計とが熱的平衡状態にあるときの温度計の目盛りを正しく読み取ることである。そのため、学校教育においても、温度計の使用法として、応答特性を考慮することや、気温の測定など野外において使用する場合には、放射の影響を避けることを教える必要がある(島貫ほか1981)。

気温を測定する場合の注意事項として、野外では日よけが必要であることは、どの教科書にも記載されている。しかしながら応答特性については、「温度計の液の高さが変わらなくなったら目盛りを読む」という注意を与えている教科書もあるが、どのくらいの時間が必要かという指針はどの教科書にも示されていない。

ガラス製液体温度計の応答特性について、気象観測官署で用いられていたものについては調べられている(山本・山本 1949; 磯野 1956; 矢島 1957)。一方、理科教材として用いられているガラス製温度計について、水温に対する応答(相馬・後藤 1978; 山下 1978)や静止空気に対する応答を調べた例(山下 1978)はあるが、通風時も含む応答特性は調べられていない。ここでは理科教材として用いられているガラス製アルコール温度計について、通風時も含む応答特

性を調べた。

2. ガラス製液体温度計の応答特性

2.1 時定数とその求め方

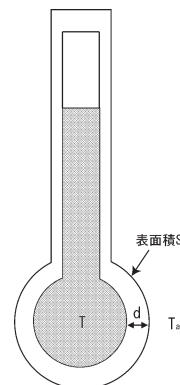
ガラス製液体温度計のモデルを第1図に示す。温度計を温度 T_1 (一定) の環境から温度 T_2 (一定) の環境に突然移動させた場合、温度計の示度 T は、熱伝導の法則により、次式で表される(磯野 1956, p. 15-17; Brock and Richardson 2001)。

$$T(t) = T_2 - (T_2 - T_1)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 τ は定数である。液だめの液体の質量 m 、液体の比熱 c 、液だめの表面積 S 、ガラスの厚さ d 、ガラスの熱伝導率 k を用いると、 τ は次式で表される。

$$\tau = \frac{mcd}{Sk} \quad (2)$$

この τ は時定数とよばれ、一階型応答特性を持つ測



第1図 ガラス製液体温度計のモデル。温度計の示度 T 、温度計の周りの温度 T_a 、表面積 S 、液だめのガラス厚 d 。

* Kazue TAKAHASHI, 丸亀市立城西小学校。

** Yukihiko MORI, 香川大学名誉教授。

© 2011 日本気象学会

器の応答特性を表す指標として用いられる。式(1)で表される階段型温度変化に対する液体温度計の応答の例を第2図に示す。時定数は温度計の示度が温度変化の63.2%の値に達するまでの時間を表す。 $t = 2\tau$, 3τ , 4τ のとき、応答の到達率はそれぞれ86.5%, 95.0%, 98.2%となる。

時定数を求めるには、第2図のような温度計の示度と時間との関係を図に描き、温度変化の63.2%に達するまでの時間を読み取る方法もあるが、ここでは、次のような方法によった(磯野 1956)。まず、式(1)を次のように変形する。

$$\ln\left[\frac{T_2 - T(t)}{T_2 - T_1}\right] = -\frac{1}{\tau} t \quad (3)$$

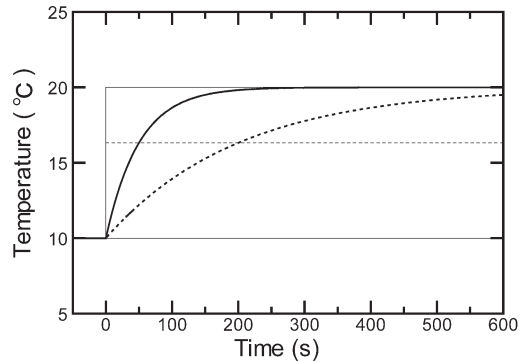
温度に関する左辺を y とおくと、 y と t とは直線の関係となる。実験値を直線で近似し、直線の傾き ($-1/\tau$) から τ を求めることができる。

2.2 使用した温度計と温度変化の与え方

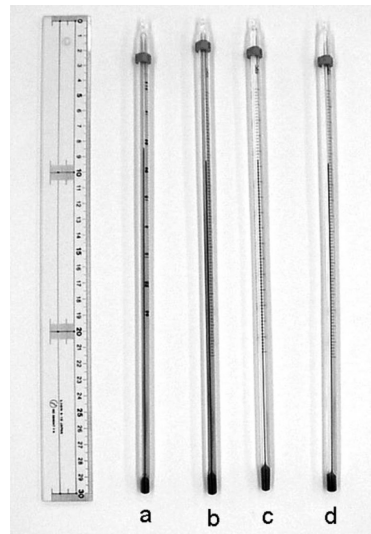
ここでは一般用に市販されている棒状ガラス製アルコール温度計で、学生実験に用いているものの中から、第3図に示すように液だめの形が少し異なる4本を選び実験を行った。この温度計の仕様は、目盛間隔 $-30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 、目盛刻み 1°C 、精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、長さ30 cmとなっている。実験に用いた温度計(a~d)の液だめは円筒形をしており、その大きさをガラス部分の直径および長さで表すと、第1表のようになる。これらの液だめの直径はほぼ同じ約6 mmであるが、長さは10~16 mmの範囲で異なっている。これらの温度計は、検定書付きの水銀標準温度計を用いて、ジュワービンに入れた水で較正を行った。

ここでは時定数を次の手順で求めた。

- 1) 温度計をビニール袋に入れて、直接水に触れないようにして水槽に沈め、気温より約 10°C 低い温度を示すように調整する。
- 2) 温度計を急に水槽より取り出し、階段関数型の温度変化を与える。このとき温度計の横にストップウォッチを置き、両者を同時にビデオに録画する。
- 3) ビデオを再生し、10秒ごとに一時停止させ、温度計の示度とストップウォッチの時刻を読



第2図 階段型温度変化に対する温度計の示度の変化。時定数50秒(実線)と200秒(点線)の温度計の場合で、周囲の温度変化は 10°C から 20°C とする。細い点線は温度変化の63.2%に相当する温度(16.3°C)で、この線と温度計示度の線が交わるまでの時間が時定数を表す。



第3図 使用したガラス製アルコール温度計。

第1表 使用した温度計の液だめのサイズと時定数。

温度計	球部(円筒形)		計算上の 時定数(s)	時定数(s)		
	直径(mm)	長さ(mm)		風速 0 m/s	風速 2 m/s	風速 5 m/s
a	6.3	10.5	6.6	204	52	38
b	6.3	13.7	6.8	217	53	33
c	5.8	15.8	5.8	196	48	30
d	6.3	11.6	6.7	213	53	35

み取る。ただし、変化の大きい最初の10秒間については3秒間隔程度で2点読み取る。

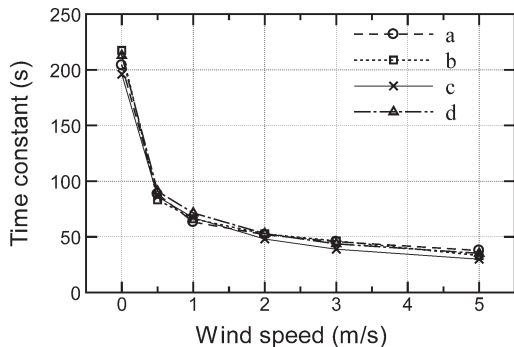
4) 式(3)を用いて、最小二乗法で時定数を求める。

2.3 測定結果

時定数の測定は、無風時および有風時について行った。無風時の場合は、周囲3方向を段ボールで囲って実験を行った。有風時については、送風機(扇風機)で風を当てた。風速の測定はサーミスター直熱式の熱線式電子風速計(AIR-MAX, SK-22 A, 佐藤計量器製作所)を使用した。風速は0.5 m/sから5 m/sの範囲で変化させた。

実験を行った4本の温度計の時定数と風速との関係を第4図に示す。また、風速0, 2, 5 m/sの場合の時定数の値を第1表に示す。風速0 m/s(無風時)の時定数は、温度計a~dについて、それぞれ204秒, 217秒, 196秒, 213秒であった。時定数は式(2)から分かるように、液だめの形状や液量などに関係するが、これらの温度計に関して、時定数の差は1割程度であり、平均すると208秒(3.5分)となる。

参考までに、式(2)によって、それぞれの温度計の時定数を計算した。「アルコール温度計」と称して市販されている温度計の封入液は、実際は灯油であるので、液だめの質量、比熱は灯油の値を用いた。ガラスの厚さは0.4 mmと仮定した。それぞれの温度計について求めた時定数の値も第1表に示した。式(2)で表される時定数はガラスの表面の温度が階段状に変化した後、一定に保たれているとしたときの熱伝導の式から導かれたもので、空気と温度計の間の熱の移動を考慮していない。そのため、計算上の時定数は実験値より小さい値となっているが、大小関係は無風時の実験値と似ている。



第4図 温度計の時定数と通風速度との関係。

理科実験で用いられる温度計の水温に関する時定数を調べた例では、アルコール温度計が10秒、水銀温度計が4秒であった(山下(1978)のデータより算出)。また、水を攪拌しながら求めた水銀温度計の時定数は3秒であった(相馬・後藤 1978)。このように熱容量が大きく異なる水と空気とは時定数が大きく異なる。

通風時の時定数は風速に依存するが、その関係については2つの異なる実験式が提出されている。その1つは山本・山本(1949)による実験式で、次の形をしている。

$$\frac{1}{\tau} = A + B\sqrt{v} \quad (4)$$

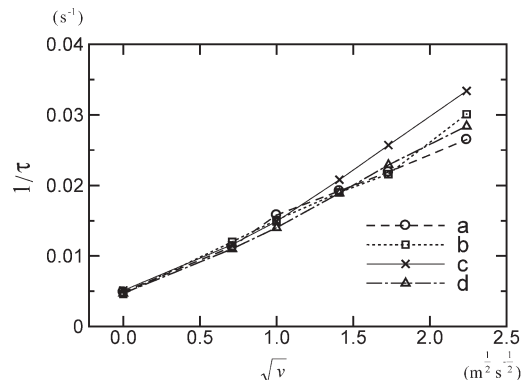
ここでA, Bは温度計による定数、vは通風速度である。もう1つは、磯野(1956)が紹介している実験式で、次の形をしている。

$$\tau = Kv^{-n} \quad (5)$$

ここで、K, nは温度計による定数である。この式は無風時(v=0 m/s)のときには定義できない。この式は変形すると次のように書くことができる。

$$\ln \tau = \ln K - n \ln v \quad (6)$$

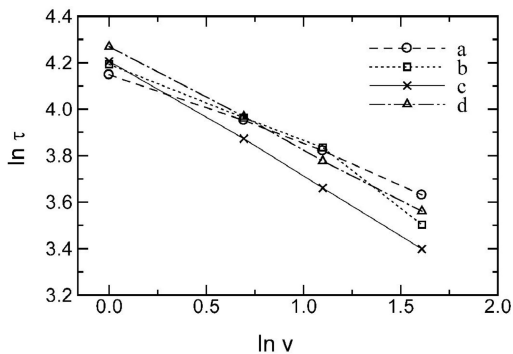
これらの実験式がどの程度成り立っているかを見てみる。式(4)に対応する関係で表した場合を第5図に示す。1/τと√vとの間には、少し湾曲した1例を除いてほぼ直線的な対応関係が見られる。また、式(6)に対応する関係で表した場合を第6図に示す。ln τとln vとの関係は直線的になっており、式(5)の実験式が成り立っていることを示している。



第5図 温度計の時定数と通風速度との関係(式(4))。

今回調べた温度計について、実験式(4)と(5)は、どちらも実測結果をほぼ表しているため、それぞれの式の係数を求め、その結果を第2表に示す。この表には比較のため、山本・山本(1949)による気象観測用温度計(球部直径9mm)に関する式(4)の係数の値も示した。今回調べた温度計について、この係数の値は2割程度のばらつきがあったので、これを考慮すれば、山本・山本(1949)と同じ程度である。また、磯野(1956)に引用されている水銀温度計についての式(5)の係数の値もこの表に示した。Kの値は今回の温度計のどれよりも大きい。これは球部直径が約11mmと大きいためと思われる。

温度計の時定数は、このように通風速度にも依存するが、第4図に示したように通風の有無による違いが大きく、微風でも急激に減少する。例えば、風速2m/sでは、どの温度計も50秒程度になり、無風時の1/4程度になる。これより風速が大きくなると、時定数の風速依存性は小さくなる。ここで用いた温度計



第6図 温度計の時定数と通風速度との関係(式(6))。

第2表 温度計の時定数と通風速度との関係を表す実験式(4)、(5)の係数。

温度計	式(4)		式(5)	
	A($\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	B($\times 10^{-3} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1/2}$)	K	n
温度計 a	5.1	10	64	0.32
温度計 b	4.1	11	69	0.42
温度計 c	3.5	13	67	0.50
温度計 d	3.9	11	72	0.44
温度計(球部直径9mm)*1	4.6	11		
水銀温度計(球部直径10.7mm)*2			98	0.43

*1 山本・山本(1949)
*2 磯野(1956)による

の液だめの形は互いに異なるが時定数の差は小さい。このことから、ガラス製アルコール温度計で気温を測定する場合、通風することがきわめて重要であることが分かる。第2図に示した時定数200秒(無風時に相当)と50秒の場合の温度計示度の理論的な時間変化に見られるように、通風の効果はきわめて大きい。気温の測定に必要な通風時間の目安を、温度計の応答の98%到達率で考えると、時定数の4倍以上の時間が必要になる。したがって温度計の感部に5分間くらい風が当たる状態で目盛りを読み取る必要がある。

次に小学校でガラス製アルコール温度計を用いて温度を測定する場合の問題について検討する。気温の測り方は第4学年と第5学年で扱われる。ガラス製温度計で気温を測定する場合に注意しなければならないことは、次の点である。

- 1) 日射の影響を避ける。
- 2) 温度計の示度が安定したときの値を読み取る。
- 3) 測定者の息や体温の影響を避ける。

ガラス製温度計の使い方は、第3学年で地面温度の測定の際に学んでいる。その際に2)の点についても学んでいる。一方、第4学年、第5学年段階で空気の温度を測定する際に、温度計の応答特性が重要になるにもかかわらず、2)、3)について触れていない教科書がある。

また、室外で気温を測定する場合には、太陽の直達光と散乱光、地面・地物からの反射光、大気放射、観測者から出る長波放射、および地面の出す長波放射を防ぐための「放射よけ」が必要である(近藤1982)。「放射よけ」の温度は気温より高く(夜間は低く)なり、それ自体による長波放射の影響があるので、「放射よけ」は2重構造とし、通風することが勧められている(近藤1982, p.67-77)。ただし、厳密さを要求

されない学校教育での気温観測の場合は、太陽の直達光である日射をよけることを第一に考えればよいであろう。

日射の影響を避けるため、理科教科書にはいくつかの方法が示されている。また、榊原(2002)は簡便な方法を提案している。これらの方法を第7図に示す。教科書に掲載されてい



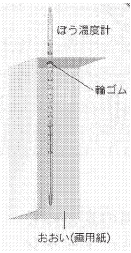
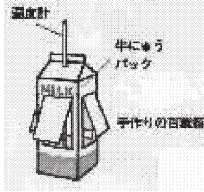
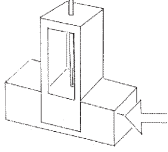
る方法はA～Dである。このうち、AとBは第3学年、CとDは第4学年の教科書に載っている。Aは観測者の体で日射を遮断するので、簡便であるが、太陽高度が高い場合には不適切である。ただし、この方法だけを掲載している教科書はなく、他の方法も示している。Bは下敷きなどで日射を遮断する。CやDは4年生の教科書に載せられているものである。Cは画用紙をL字形に折り曲げて作った覆いに温度計を固定する。この方法は覆いを作成しなければならないが、片手で覆いと温度計を持つことができるという利点がある。A～Cの方法は直達日射を遮るが、散乱光・表面による反射光・長波放射などを遮ることはできない。D、Eは周囲からの放射を遮ることはできる。

これらの方法による気温測定への影響を調べるために、アスマン通風乾湿計（検査表付）、百葉箱の温度計（気象庁検定付二重管水銀温度計）との比較観測を行った。温度計を日よけに固定する場合もあるので、調査を行った温度計のうち、2本の温度計を使用した。観測は香川大学教育学部構内に設置された百葉箱の周辺で2004年7月14日17～18時に行った。天気は晴れて弱風があった。観測は2人で行い、1人が日なたで日よけを施した温度計を手で持って、1.5mくらいの高さに5分間つるして示度を読み取り、もう1人がアスマン通風乾湿計と百葉箱の温度計の示度を読み取った。Aを除くBからEまでの方法による測定をそれぞれ1回ずつ個別に行った。Eについては通風する場合も行った。

比較観測の結果を第3表に示す。比較を行った時刻は必ずしも同じではないが、観測期間中の気温の変化は0.2°C程度であった。アスマン通風乾湿計の温度を基準にした偏差も示した。BおよびCは直達光を簡単な方法で遮るという方法であるが、偏差は比較的小さい。Dおよび強制通風しない状態で測定したEの方法は偏差が大きく、Dの場合、2.2°Cも高くなる。Eの方法は、もともと強制通風することを前提としているので、通風したとき偏差は小さくなっている。百葉箱の温度計の示度が少し高くなっていたのは、日射が強風が弱かったためと思われるが、理由は不明である。

4. まとめ

小学校理科教科書で扱われるガラス製アルコール温度計で気温の測定を行う場合の問題点について検討した。ガラス製温度計で気温を測定する場合、温度計の

<p>A</p>	<p>自分の体で日射をさえぎる。</p>  <p>(大日本図書, 教育出版, 啓林館)</p>
<p>B</p>	<p>遮蔽板で日射をさえぎる。</p>  <p>(学校図書, 教育出版, 啓林館, 東京書籍)</p>
<p>C</p>	<p>L字形の覆い</p>  <p>(東京書籍, 大日本図書)</p>
<p>D</p>	<p>牛乳パックの覆い</p>  <p>(学校図書)</p>
<p>E</p>	<p>T字形の覆い</p>  <p>(榎原, 2002)</p>

第7図 日射を遮断する方法。

第3表 日よけの効果の比較観測。アスマン通風乾湿計の温度を基準としたときの偏差を()内に示す。

測定方法	温度計 (°C)	アスマン温度計 (°C)	百葉箱 (°C)
B (下敷き遮蔽板)	31.9 (+0.3)	31.6	31.9 (+0.3)
C (画用紙 L 字型覆い)	31.8 (+0.2)	31.6	32.1 (+0.5)
D (牛乳パックの覆い)	34.0 (+2.2)	31.8	32.0 (+0.2)
E (T 字型覆い) (通風なし)	33.1 (+1.3)	31.8	32.0 (+0.2)
E (T 字型覆い) (通風)	31.9 (+0.3)	31.6	31.9 (+0.3)

応答特性が問題になる。調査した市販のガラス製アルコール温度計の空気中における時定数は、無風時には約208秒(3.5分)であった。温度計に風を当てると、時定数は風速とともに急速に小さくなり、風速が2 m/sより大きくなると、時定数は約50秒以下となった。したがって、ガラス製アルコール温度計を用いて、気温を野外で測定する場合、おおよその目安として、温度計の感部に5分間くらい風が当たる状態にするか、無風のときにはうちわなどで風を送った後に目盛りを読み取る必要がある。

気温を測定する際に、教科書で取り上げられているいくつかの種類の日よけについて、その効果を調べた。どの日よけを用いる場合でも、通風が決定的に重要であり、通風に気をつければ、単純な日よけでもよい結果が得られる。

参 考 文 献

- Brock, F. V. and S. J. Richardson, 2001: Meteorological Measurement Systems. Oxford University Press, 118-121.
- 磯野謙治, 1956: 気象器械 (その2). 地人書館, 135 pp.
- 近藤純正, 1982: 大気境界層の科学. 東京堂出版, 219

pp.

榊原保志, 2002: 校舎の鉛直気温を調べる実習の開発. 地学教育, 55, 67-74.

島貫 陸, 南部昌敏, 浦野弘, 1981: 小学校における気象観測の指導の問題点とその改善. 理科の教育, 30, 661-667.

相馬信山, 後藤昌彦,

1978: 温度計の時定数. 文部省特定研究科学教育「実験観察教材教具」, 芦葉浪久編集, 東京書籍, 254-256.

矢島幸雄, 1957: 気象測器 (温度計) の応答. 研究時報, 9, 746-747.

山本義一, 山本 孜, 1949: 寒暖計の遅れと風速との関係. 研究時報, 1, 2-6.

山下太利, 1978: 温度計の誤差と応答速度. 文部省特定研究科学教育「実験観察教材教具」, 芦葉浪久編集, 東京書籍, 257-260.

参考にした小学校理科教科書

東京書籍, 新しい理科3~6, 平13, 三浦 登, 奥井 智ほか29名.

大日本図書, たのしい理科3~6, 平13, 戸田盛和, 有馬朗人ほか49名.

学校図書, みんなと学ぶ小学校理科 3~6, 平13, 日高敏隆ほか71名.

教育出版, 小学理科3~6, 平13, 永野重史, 養老孟司ほか22名.

信濃教育出版会, たのしい理科3~6, 平13, 掛川一夫, 啓林館, 理科3~6, 平13, 竹内敬人, 武村重和, 森 一夫, 大隅良典ほか32名.