

温度の正しい測り方 (2) 温度計の校正

岡田 益己

岩手大学農学部

How to measure temperature accurately
(2) Calibration of temperature sensors

Masumi OKADA

Faculty of Agriculture, Iwate University.

1. 温度センサーの誤差

市販の温度センサーにはどのくらいの誤差があるだろうか。電氣的に温度を計測するセンサーとして、白金測温体 (Pt100)、サーミスタ測温体、熱電対などが広く使用され、いずれも日本工業規格 (JIS) に標準規格が定められている。JIS の規格を満たせば、JIS 適合品として市販できる。温度計測の精度に関しては、センサーの種類と等級 (階級) ごとに許容差が定められている (表 1)。市販品の大部分は、表記の許容差に収まっていると考えられる。言い換えると、信頼性が高い Pt100 の A 級品といえども、そのまま使用すれば最大で 0.2~0.3℃ の誤差を覚悟しなければならない。このような誤差はセンサー一つごとに固有のもので、誤差がほとんどない個体もあれば、許容幅一杯の誤差を持つ個体もある。誤差が ±0.3℃ 以下の温度計測を望むならば、センサーを一つずつ校正する必要がある。

以上は新品の話であって、センサーの出力は経時的に変化する。白金測温体は経時変化が非常に小さいので、一度校正すれば数年間、その校正値を使用できるだろう (求める精度にもよるが)。サーミスタは経時変化が比較的大きいので、1 年に 1 回くらいは校正したい。熱電対は感温部 (2 種金属の接合部) の変質などにより経時変化が起こるので、感温部を作り直して再度校正するのがよい。

表 1. JIS による温度センサーの許容差
常温域の数値のみを記す

種類	等級等	許容差
白金測温体 (Pt100)	A	±0.15℃ at 0℃ ±0.35℃ at 100℃
	B	±0.3℃ at 0℃ ±0.8℃ at 100℃
サーミスタ 測温体	0.3	±0.3℃
	0.5	±0.5℃
	1.0	±1.0℃
	1.5	±1.5℃
熱電対 (T)	クラス 1	±0.5℃
	クラス 2	±1.0℃
	クラス 3	±1.0℃

2. 校正に必要な機材

一定温度に維持した水槽の中に、基準となる温度計（以下、標準温度計）と校正すべき温度センサー（被校正センサー）を一緒に入れ、相互の読み値を比較して校正を行う。ここで水を使うのは、空気に比べて温度制御が容易、センサーへの熱伝達が速いため応答が早いなどの理由による。校正のために以下の機材を揃える。

- 1) 被校正センサー
- 2) センサーの信号を計測・記録する装置（データロガーなど）
- 3) 標準温度計（二重管式ガラス温度計：気象庁検定ないしはそれに準じて検査したもの。アスマン通風乾湿計の温度計も利用できる）
- 4) 水槽＋水温制御装置

計測誤差には、センサー由来のほか、データロガーに由来するものもある。例えばデータロガーには、白金測温体の抵抗値を測るための基準抵抗や、熱電対回路の基準接点補償用サーミスタが組み込まれている。これらのわずかな狂いが誤差を生むこともある。あるデータロガーで校正したセンサーを、他のデータロガーに接続したときに誤差が同じになる保証はない。できる限り実際の使用場面と同じデータロガーの同じ端子に接続して、校正するのが望ましい。

水温を一定に制御する装置として、最も手軽なのは鑑賞魚用のサーモとヒーターである。但し、周囲の室温以下の温度域を作ることができない。低温域での校正が必要なときは、冷却機能付きの恒温水循環装置を利用する。これらの装置を準備できない場合は、数十リットルの断熱箱（発泡スチロール箱やクーラーボックス）とお湯や氷を用意する。0℃以下の温度域では、恒温水循環装置に自動車用の不凍液を入れて使用する。

3. 校正の実際とノウハウ

水温制御に何を使うかによって、校正の方法やノウハウが異なる。その主な原因は、基準となる標準温度計と被校正センサーとの熱容量（感温部の大きさ）の違いにある。図1によく使われる温度センサーを比較した。例えば、0.32 mmφの熱電対を校正するとしよう。水中での標準温度計（感温部：7 mmφ前後）の温度応答は熱電対の応答の10倍くらい遅い。このため、水温が変化している水槽に両者を入れても、常に標準温度計が熱電対よりも遅れて反応する。この遅れが校正の精度を著しく低下させることがある。以下、手軽な装置から順に具体的な方法を説明しよう。

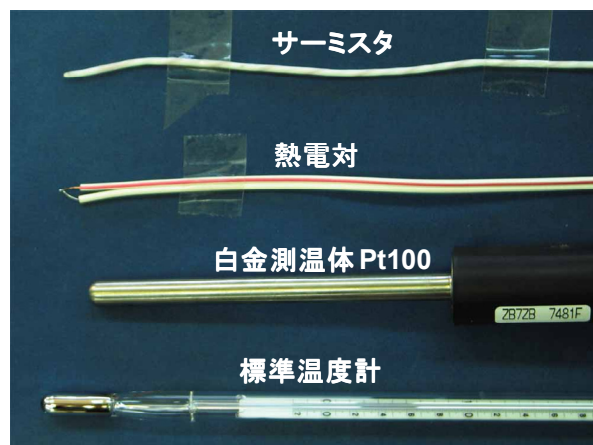


図1. よく使われる温度センサーの種類と形状

3.1 大型クーラーボックスの利用

上に述べたように標準温度計と被校正センサーの熱容量が大きく異なるときには、水温が大きく変化しない条件で両者を比較しなければならないが、市販のクーラーボックスや発泡スチロール容器に温水や冷水を溜めて校正する場合、水温が室温に向かって変化して行くことが避けられない。仮に貯留した水温が1分間に1℃の割合で上昇あるいは下降するとしよう。熱電対はこの変化に数秒遅れで追従するが、標準温度計は1分近く遅れた温度を示す。従って両者の指示値には1℃近い差が生じてしまう。±0.2～0.3℃程度の精度で校正するには、1分当たりの温度変化を

0.3℃以内に抑えなければならない。あらかじめ、クーラーボックスに温水や冷水を溜めて校正する場合、熱容量の小さい熱電対やサーミスタを用いて1分当たり何℃水温が変化するかを知ることが重要なポイントである。±0.1℃程度の精度を求めるなら、周囲室温±5℃くらいまでが校正できる温度範囲であろう。30～50リットル程度のクーラーボックスや発泡スチロール容器を用いて、水温が所定の精度に安定したことを確認したら、標準温度計と被校正センサーの指示値を10秒間隔で読み、3分程度の平均値を比較すればよい。

3.2 鑑賞魚用ヒーターの利用

周囲室温より高い温度域での校正なら、鑑賞魚用のサーモとヒーターを利用できる。10リットルくらいのお水に100Wのヒーターとサーモを入れ、鑑賞魚用の循環ポンプで攪拌する(図2)。その水槽内にプラスチック瓶を置くと、瓶内の水温変化は、水槽の水温変化よりも著しく小さくなる。この水温変化の小さい瓶内で被校正センサーと標準温度計を比較することにより、高精度の校正が可能となる。

図2のプラ瓶の外(以下、外槽)と内(以下、内槽)のそれぞれに標準温度計と見立てた6mmφの白金測温体(Pt100)と0.32mmφのT型熱電対を設置し、水温の変化を記録した(図3)。記録間隔は10秒である。外槽の水温はサーモのOn-Offに伴って±0.5℃の範囲で昇降している。このとき熱電対とPt100の変化が、両者の熱容量の違いによって微妙にずれることが分かる。一方、内槽の水温変化は熱電対の指示でも±0.1℃程度と非常に安定している。このように内槽の安定した条件を利用することで、熱容量が異なるセンサーを高精度で比較校正することができる。

被校正センサーの出力はデータロガーを利用して10秒間隔で記録する。一方、標準温度計の指示をデータロガーの記録間隔に合わせて、10秒おきに読み取る。2人1組で温度計の読み取りと計時・記録を行うと能率が良い。二重槽の内槽の場合、一つの温度点について3～5分記録すればよいだろう。

何らかの理由で二重槽を利用できないときは、外槽における温度変化の3～4周期分を平均して校正する。温度変化の山から山あるいは谷から谷をとらえて正確に周期を区切り、周期の整数倍の時間で標準温度計と被校正センサーの指示値を比較することが肝要である。



図2. 鑑賞魚用の機器を使う校正の仕組み

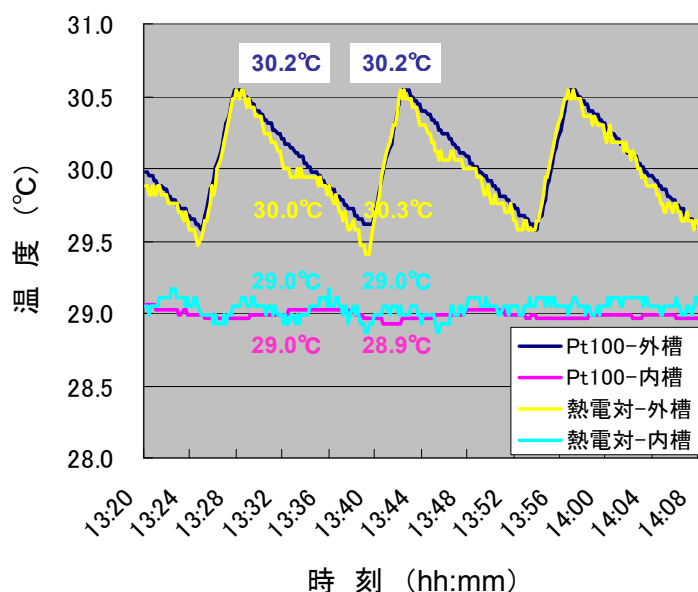


図3. 鑑賞魚用装置による水温変化の計測例. 図中の温度は、それぞれ13:32台と13:43台の1分平均値

3.3 高精度恒温水循環装置の利用

水温を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内の変動で制御する装置が市販されている。図4はその一例で加温専用の制御装置である。冷却機能を持つ低温恒温水循環装置では、インバータ制御の冷却機がほぼ連続運転し、ヒーターが小刻みに稼働して $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内の温度制御を実現する。室温以下さらに零下の校正には、このような装置を利用するのがよい。

図4の装置で前項と同様の Pt100 と熱電対を比較した (図5)。記録間隔は 10 秒である。熱電対の記録値が $0.05\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ の範囲で小刻みに上下するのは、装置による温度制御のためである。図の下部に毎分の平均値を記した。外槽においても 1 分平均値にほとんど変動がなく、また Pt100 と熱電対の指示値もよく一致している。参考までにプラスチック瓶を用いて内槽を設けたが、内槽を利用してさらに水温変化を小さくする必要がないことが分かる。

このような高精度の装置を利用する場合でも、一つの温度点あたり 3 分程度の平均値を求める。なお校正温度が周囲室温よりも $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 高いときには、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以上の温度幅で水温が変動することがある。そのような場合は、温度が安定するのを待つか、二重槽を利用する。

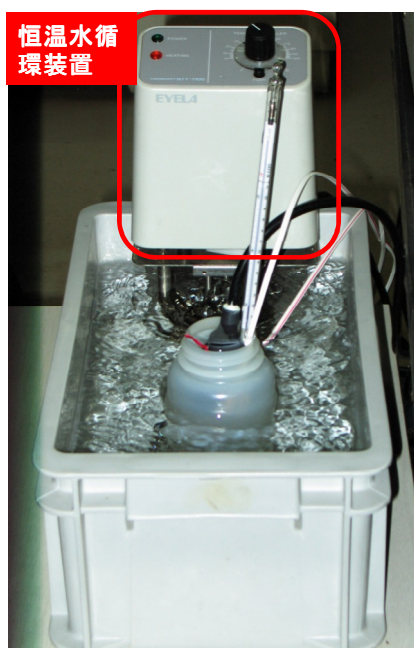
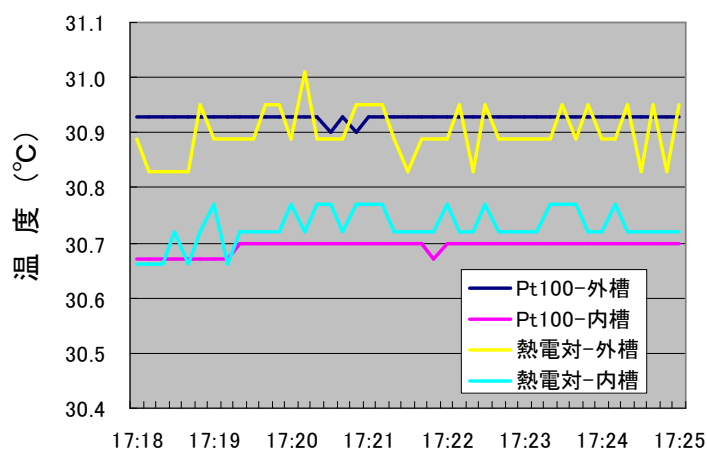


図4. 高精度恒温水循環装置を利用する校正. プラ瓶の内槽は比較参考用



1分ごとの平均 時刻 (hh:mm)

Pt100-外槽	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
熱電対-外槽	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Pt100-内槽	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7
熱電対-内槽	30.7	30.7	30.8	30.7	30.7	30.7	30.7

図5. 恒温水循環装置による水温変化の計測例. 下部の数値は、上の図の時刻に対応した毎分の平均値($^{\circ}\text{C}$)

3.4 オンオフ式冷却装置の利用は難しい

上述の低温恒温水循環装置とは別に、冷却機が On-Off するだけの装置がある。この装置の場合、On-Off に伴う水温の昇降が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ にも及ぶ。このため二重槽の内槽でも水温に $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 強の変動が、さらに三重槽の最内槽でも $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 程度の変動が起こる。低温域の校正に、オンオフ式冷却装置を単独で利用することは難しい。冷却装置を連続運転し、加温専用の恒温水循環装置あるいは観賞魚用ヒーターを組み合わせる方法がある。この場合、ヒーターの加温能力が冷却装置の冷却能力よりも大きくないと所定の水温に制御できない。

4. 校正曲線

温度センサーを使用する温度域の全体にわたって、標準温度計と被校正センサーの出力を比較

することで、適正な校正曲線を得ることができる。校正温度域に対して5～8点の温度を用意したい。図6は、Pt100とT型熱電対（銅ーコンスタンタン熱電対）の校正曲線の例である。

ほとんどのデータロガーにはPt100やサーミスタを接続して、その抵抗値を温度に換算する機能がある。この機能を利用して、被校正センサーの出力を温度で記録し、標準温度計の読み値と比較する。 $Y = aX + b$ などの式でセンサー出力を補正する機能を持つデータロガーを使用するときには、 $a = 1$ 、 $b = 0$ として校正を行う。Pt100やサーミスタの誤差は直線的なずれであり、校正曲線は1次式 $Y = aX + b$ となる。

熱電対では、氷や電子冷却で作った0℃を基準接点としてデータロガーで起電力（mV）を計る方法や、データロガーの補償式基準接点機能を利用して温度で記録する方法などがある。後者の場合、Pt100と同様に被校正センサーの温度換算値と標準温度計の指示値を比較すればよい。但し、両者のずれが直線関係になるとは限らない。データロガーが内部でどのような換算式を使用しているかによるので、図示してから適当な関数を選ぶ必要がある。一方、熱電対の起電力と温度の関係（図6右）は直線ではない。対象となる温度域が20℃程度なら2次曲線で、また40℃程度までなら3次曲線で、十分な精度の校正ができる。0℃を基準接点とする場合は、校正曲線が原点(0, 0)を通るように回帰する。なお熱電対の使い方については、次号で詳しく述べる。

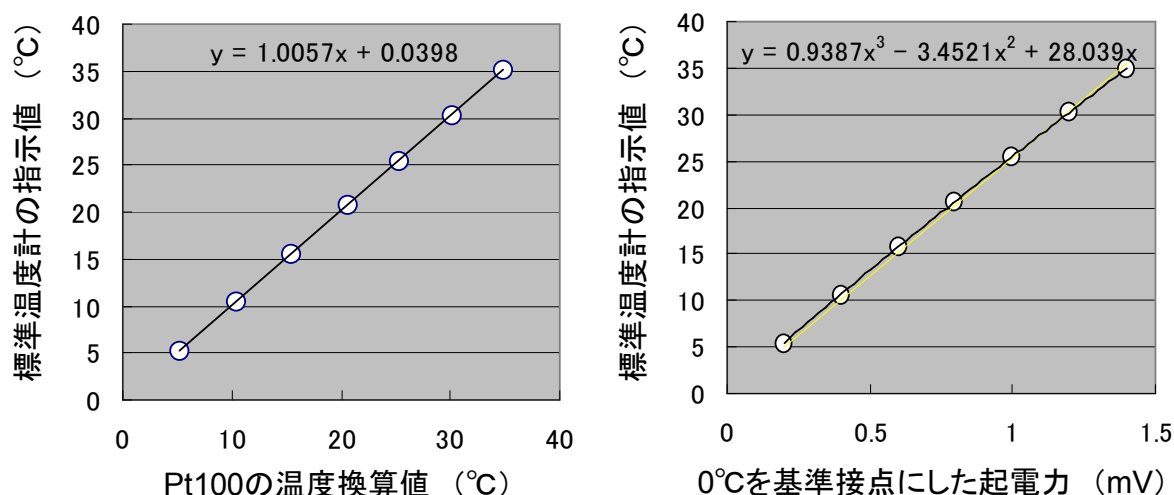


図6. 校正曲線の例. 左: Pt100, 右: T型熱電対. 右図の黄色線は1次回帰線

なお校正に用いる標準温度計の指示は、検査成績表に従って補正しなければならない。成績表には5℃あるいは10℃間隔で検定した温度計の器差が示されている。器差が示されていない温度での誤差は不明だが、前後の器差から内挿で値を求めて補正するのが慣例である。

5. 終わりに

以上のように、校正に当たっては標準温度計と被校正センサーの熱容量（感温部の大きさ）の違いによる、温度変化の遅れを十分に考慮することが重要である。ガラス管温度計同士の比較校正なら、バケツの水に入れるだけでもある程度の精度が得られるが、標準温度計に比べて感温部が著しく小さいサーミスタや熱電対を校正する際は、水温の変化に細心の注意が必要である。校正用の水温がどのように変化しているかを事前に確認してから、二重槽方式を採用するのか、温度変化周期の整数倍の時間をかけて校正するのかなどの方針を決め、さらに温度記録の間隔と平均化時間を決定する。

一体式の温度・湿度計や防水処理のないサーミスタのように水に浸けられないセンサーの場合

は、前回紹介したアスマン通風乾湿計を利用して大気中で比較校正する。当然、通風式の放射よけが必須である。人工気象室を使わないかぎり、広い温度範囲での校正が困難であり、また気温が安定しないため、精確な校正は極めて難しい。