

連載講座 「栽培環境における気温の観測技法と利用」

(1) 気温観測の理論と注意点

桑形恒男*・福岡峰彦**,*

(*農研機構 農業環境変動研究センター)
 (**農研機構 食農ビジネス推進センター)

Theory and note for measuring air temperature in the field

Tsuneo KUWAGATA* and Minehiko FUKUOKA**,*

(*Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO)
 (**Agri-Food Business Innovation Center, NARO)

1. はじめに

本稿では、栽培が行われている環境において正確な気温観測を実施するために必要な理論と注意点について解説する。はじめに第2節において、正確な気温を観測するために知っておくべき基礎的な知識について気温の測定誤差の理論に基づいて説明する。圃場や温室内で正確な気温データを取得するためには、温度センサーを二重管式の通風筒に収納し、日射を遮蔽した上で強制的に通風する必要がある。ここではその理由について、なるべく平易な数式を用いて解説する。また、野外などで電源が使用できない場合の気温測定法についても手短かに述べる。なお、一般の気象観測で使用される温度センサーの種類と計測原理、センサー選択にあたっての注意点などは、次回の本講座で説明する。

正確な気温観測のためには、測器のメンテナンスも重要である。第3節では温度センサー（一体型の温度・湿度センサーを含む）の較正ならびに確認の方法について、実用的な観点から説明する。最後に、気象庁以外の者が屋外で気象観測を実施する時に留意すべき法律上の知識について触れる。

2. 気温の測定誤差の理論

高精度な温度センサーを使用しても、測定方法が不適切であれば正確な気温は測定できない。野外や温室内において正確な気温を測定するためには、温度センサーを二重管（通風筒）に入れて日射を遮り、電動ファンなどで外気を強制的に管内に導入して通過させ、外気とセンサーの温度を平衡させる必要がある（岡田・中村，2010）。本節では高精度な気温測定に必要な条件について、理論的な関係式に基づいて説明する。ここでは定量的な議論は避け、気温測定における二重管の強制通風筒の役割を定性的に説明する。気温測定の精度は目的にも依存するが、ここでは $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内の精度で野外や温室内の気温を測定する状況を想定する。

2.1 気温測定の基本

温度センサーが測定するのはセンサー感部の温度 T_s であり、気温 T を直接に感知している訳ではない。正確な気温測定のためには、温度センサー感部が気温と等しくなるような工夫が必要である。すなわちセンサー感部の温度と気温との差 ($T_s - T$) は、気温の測定誤差に対応する。

2.2 温度センサー感部の熱バランス

温度センサー感部の温度は、温度センサー感部と外気との間の熱のやり取り（熱バランス）によって決まる（図1）。

$$(T_s - T) \times A = S_{\text{NET}} + L_{\text{IN}} - L_{\text{OUT}} \quad (1)$$

(センサー感部の熱放出量) = (センサー感部が吸収する正味の放射量)

ここで

 T_s : センサー感部の温度 T : 気温 (外気の温度) A : 温度センサー感部と外気との熱交換の効率 ($A > 0$) S_{NET} : センサー感部が吸収する日射量 (短波放射量) L_{IN} : 周囲の大気や地物からセンサー感部に入射する長波放射量 (赤外線) L_{OUT} : センサー感部が周囲に放出する長波放射量 (赤外線)

温度センサー感部からの熱放出量は、センサー感部の温度と気温との差 ($T_s - T$) に比例し (式(1)の左辺)、温度センサー感部が吸収する正味の放射量 (右辺、センサー感部に入射する放射量からセンサー感部が放出する放射量を差し引いたもの) とバランスする。ここでは、温度センサー感部の自己発熱 (温度測定時にセンサー感部に電流が流れることで発生する熱) の影響は、日射の影響などと比較して小さいので省略した。また、センサー感部は長波放射に対して黒体 (長波放射を完全に吸収し、かつ自らも完全に熱放射する物体) であると仮定した。

式(1)は気温の測定誤差 ($T_s - T$) に関する理論式となる。2.3 センサー感部の温度 (T_s) の支配要因

野外では通常、周囲の大気や地物からセンサー感部に入射する長波放射量 L_{IN} より、センサー感部が周囲に放出す

る長波放射量 L_{OUT} の方が大きくなり ($L_{IN} \leq L_{OUT}$)、センサーが吸収する日射量 S_{NET} が、日中にセンサー感部の温度が気温より高くなる原因となる。すなわち式(1)において

- ① センサー感部が吸収する日射量 S_{NET} が大きいと、温度差 $(T_s - T)$ が大きくなる。
- ② 熱交換の効率 A が大きいと、温度差の絶対値 $|T_s - T|$ は小さくなる。

なお、②で温度差の絶対値を使用したのは、センサー感部の温度が気温より低くなることもあるためである。

正確な気温測定のためには、 $|T_s - T|$ (気温の測定誤差の絶対値) をできるだけ小さくする必要があり、その対策としては、

- ① S_{NET} を小さくする → 日除けをする。センサー感部を白系の色にする。
- ② A を大きくする → センサー感部に当たる気流を強くする。センサーを小さくする。

が有効である。①においてセンサー感部が白系の色であれば、センサー感部に入射した日射量の最大4割程度が反射するので、 S_{NET} は小さくなる。一方②において、センサーに当たる気流を強くすると、センサーと外気との間の熱交換が活発になり、 A が増大する。またセンサー感部のサイズが小さいほど、外気との熱交換の効率が大きく、 A は大きな値を取る。

2.4 日除けがある場合の温度センサー感部の熱バランス

センサーを一重管式の通風筒に入れ、日射を完全に遮った状況を想定する(図2)。この時の温度センサー感部の熱バランスは式(1)で $S_{NET} = 0$ として、次式で表される。

$$(T_s - T) \times A = L_{IN} - L_{OUT} \quad (2)$$

(センサー感部の熱放出量) = (センサー感部が吸収する正味の放射量)

通風筒には外気が流入し、筒内の気温は外気温 T と一致しているものと仮定する。

正味の入力放射量 $L_{IN} - L_{OUT}$ は、管の内壁からセンサー感部に入射する長波放射量 L_{IN} と、センサー感部が放射する長波放射量 L_{OUT} の差に対応し、管の内壁温度 T_c とセンサー感部の温度 T_s の差に近似的に比例する。

$$L_{IN} - L_{OUT} \doteq (T_c - T_s) \times B \quad (3)$$

ここで $B (> 0)$ は近似的に一定値となる。

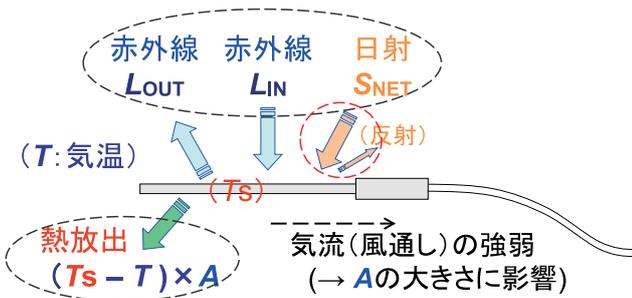


図1. 温度センサー感部と外気との間の熱のやり取り。式(1)で示される熱バランスが成立する。 T_s はセンサー感部の温度、 A は温度センサー感部と外気との熱交換の効率。

式(2)と(3)より、次式が得られる。

$$(T_s - T) \doteq (T_c - T) / (A/B + 1) \quad (4)$$

式(4)は、温度センサーを通風筒に入れて日射を完全に遮った場合における、気温の測定誤差の理論式である。日中に日射を完全に遮っても、日射で温まった日除け(管の内壁)から長波放射(赤外線)によってセンサー感部が熱を受けるため、センサー感部の温度は気温より高くなる。

2.5 気温の測定誤差の支配要因

式(4)より、気温の測定誤差 $|T_s - T|$ を小さくするためには、以下の2つの条件が必要であることがわかる。

- ① $(A/B + 1)$ を大きくする。(⇔ A を大きくすることと等価)
 - (a) センサー感部に当たる気流を強くする。
 - (b) センサーを小さくする。
- ② $|T_c - T|$ を小さくする。

①(a)の条件を満たすために、管内をファンなどで強制通風をする必要性が出てくるのが理解できる。また強制通風は外気を管内に効率的に循環させる役割を持っている。すなわち強制通風がない場合は管内の空気はよどみ、センサー感部は外気に比べて日中は高温となる。①(b)のセンサーを小さくすることは測定誤差低減に貢献するが、極端にセンサーを小さくすると、数秒以内の周期で生じる気温の短時間変動をセンサーが拾ってしまう。このような短周期変動に興味がない場合、センサーは最小でも直径1mm程度(円筒形の場合)に止めた方がよい。

次に②の条件について考えてみる。一重管式の通風筒の場合、日中は管の外側が日射にさらされるため管の内壁温度 T_c は気温 T より高くなる。逆に夜間は管の外側が放射

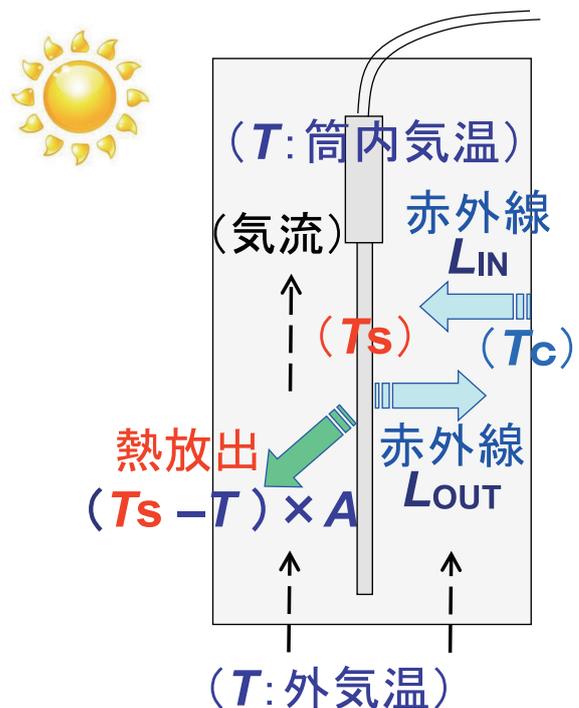


図2. センサーを日除け(一重管式の通風筒)に入れ、日射を完全に遮った場合の温度センサー感部の熱バランス。式(2)~式(4)が成立する。 T_c は管の内壁温度。

冷却（物体が大気に長波放射を放出することで冷却する現象）の影響を受け、管の内壁温度 T_c は気温 T より低くなることが多い（図3）。気温の測定誤差 $(T_s - T)$ は管の内壁温度 T_c と気温 T との差 $(T_c - T)$ に比例し（式(4)）、日中は温度センサー感部が気温より高温 $(T_s > T)$ 、夜間は温度センサー感部の方が低温 $(T_s < T)$ となる。そのため日中については、管の外面を白色または金属面にすることで管の日射吸収を少なくし、 T_c の上昇を防ぐことが有効である。

図3では温度センサーを一重管式の通風筒に入れた場合を想定したが、次に、二重管式の通風筒を使用した場合の効果について検討する（図4）。二重管の内側の管は、日

中については日射が外側の管によって遮蔽され、夜間については放射冷却の影響を直接受けなくなる。そのため二重管の内側の管の内壁温度 T_{c2} は、一重管の内壁温度 T_{c1} よりも気温 T との温度差の絶対値が常に小さく（すなわち $|T_{c2} - T| < |T_{c1} - T|$ ）、二重管式の通風筒を使用した場合の方が気温の測定誤差は小さくなる（式(4)より $|T_{s2} - T| < |T_{s1} - T|$ ）。ここで T_{s1} と T_{s2} は、それぞれ一重管式と二重管式の通風筒を使用した場合のセンサー感部の温度である。二重管式の場合も、外側の管の外面を白色または金属面にして外側の管の日射吸収を少なくすることで、外側の管の内壁温度の日中の温度上昇を小さくして、内側の管が外側の管から受ける長波放射量を抑制し、日中における

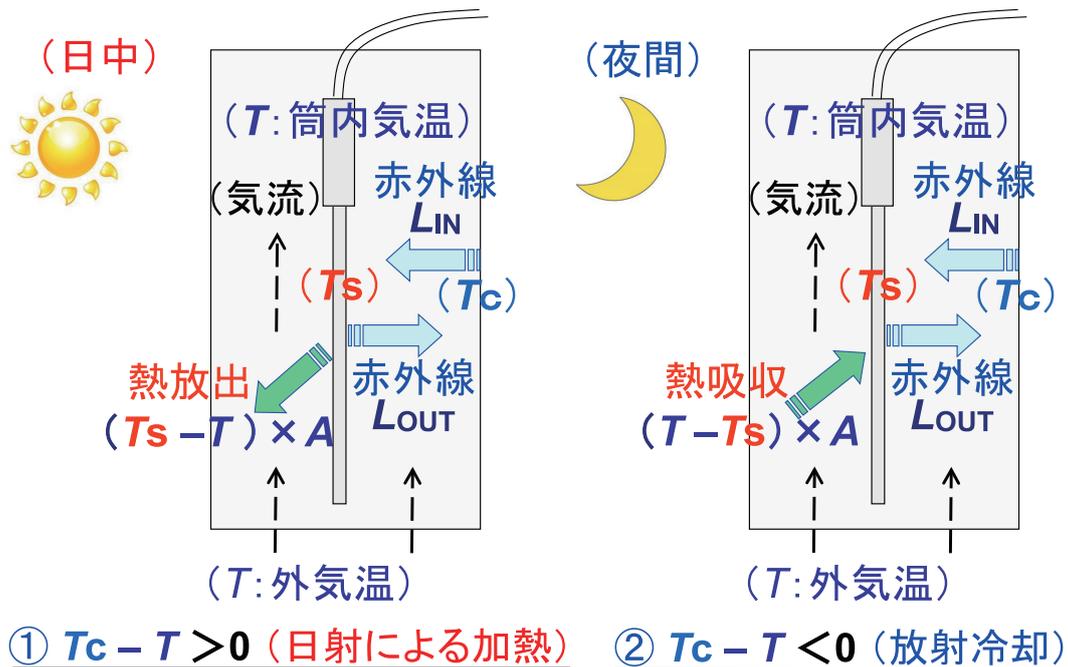


図3. 一重管式の通風筒における、気温の測定誤差の支配要因（日中と夜間の違い）。

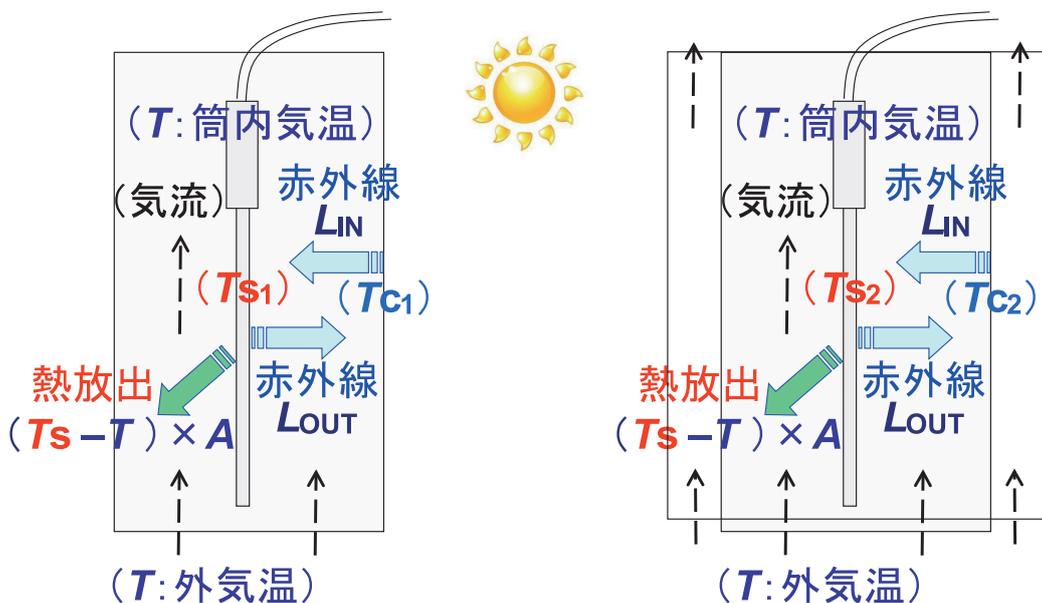


図4. 気温の測定誤差の支配要因（二重管式の通風筒の効果）。 $|T_{c2} - T| < |T_{c1} - T|$ より $|T_{s2} - T| < |T_{s1} - T|$ となり、通風筒を二重管にした方が、気温の測定誤差が小さくなる。

($T_{c_2} - T$) の値をより効果的に減少させることができる。

2.6 二重管式強制通風筒の有効性 (まとめ)

二重管式の強制通風筒の有効性をまとめると、以下のようになる。

- ① 日射がセンサー感部に当たることの防止
 - ② 外気とセンサー感部の熱交換の促進 (→ 3 ~ 5 m/s 程度の通風による効果)
 - ③ センサーを収納する管の加熱・冷却の防止 (→ 管の二重化による効果)
 - ④ センサーの濡れや汚れの防止
- ④はセンサーの劣化の抑制に役立ち、気温の安定計測において重要な点となる。またセンサーが降雨などで濡れると、蒸発の気化熱の影響でセンサー感部の温度が低下し、気温の観測値が見かけ上低下して誤差が生じる。

気温観測用の強制通風筒の例として、農業環境技術研究所が開発した NIAES-09 型強制通風筒を示す (図 5)。NIAES-09 型は低コストで製作可能な簡易な構造でありながら、気象庁の JMA-95 型地上気象観測装置の強制通風筒と遜色ない気温観測精度を有している (福岡ら, 2010)。

本節では、気温の観測精度を向上させるために必要な条件について、簡略化した理論式を用いて定性的に説明した。実際の現場で気温観測の精度を確保するためには、気温測定誤差に関する定量的な評価が必要となるが、ここでは理解を容易にするために定性的な説明にとどめた。気温の測定誤差に関する定量的でより詳細な知識を得たい場合は、近藤 (1982) が参考となる。

気温測定用の温度センサーには、湿度センサーと一体になった気温・湿度測定がまとめて実施できる機器もある。そのような一体型のセンサーを使用する場合も、両者のセンサー感部の温度を気温と一致させることは基本であり、両者のセンサーを二重管式強制通風筒に入れて測定を実施する必要性は変わらない。

2.7 電源が確保できない場合の対応

本節の最後に、電源の確保が難しく、強制通風筒が使用

できない場合の対応について簡単に説明する。野外で電源が確保できない場合、風速および日射強度に対する気温の観測誤差が仕様として明示され、実績のある市販の自然通風シールドを使用するのが、次善の策としては無難である。自然通風シールド (たとえば R. M. Young Company, 2014, 図 6) にセンサーを格納する場合、センサー感部が日射による加温を受けて真の気温より高い温度が観測されるが、周囲の風速が高まるほどその上昇は小さくなる。たとえば 41003 型自然通風シールドの仕様 (R. M. Young Company, 2014) によれば、自然通風シールドの設置高度における風速が 2 m/s 以上であれば晴天条件においても概ね 1°C 未満の上昇にとどまる。一方、晴天条件において、風速が 1 m/s 未満の場合には計測誤差が急速に増大し、風速 0.5 m/s 未満の微風の場合には真の気温に対して 2°C 以上高く観測される。

農業用パイプハウスや温室では、換気扇やサーキュレーターが動作していなければ換気窓を開放したとしても屋外より風速は低く、換気窓を閉鎖すればほとんど風がない状態となる。このように微風条件が生じやすいパイプハウス内や温室においては、晴天日の日中に気温を 3°C 以上高く観測する誤差が生じることがあるので (たとえば、岡田・中村, 2010)、気温測定における自然通風シールドの使用は不向きである。

3. 温度センサーの較正と確認の方法 (一体型の温度・湿度センサーを含む)

市販の新品の温度センサーは、日本工業規格 (JIS) などによって一定の精度が確保されている。例えば JIS A 級の白金測温抵抗体 (Pt100) の場合、0 ~ 50°C の範囲内での許容誤差は $\pm 0.15 \sim 0.25^\circ\text{C}$ となる。また気象庁検定 (電気式温度計では Pt100 のみが対象) における温度計 (計測器を含む) の検定公差 (検定において許容される真値からのずれ) は個別の器差 (センサーが示す測定値と真値との差) および極差 (全測定範囲にわたって器差を求めた場合の器差の最大値と最小値との差) が $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内 (-50 ~ 50°C) と定められている (温度計の感部のみの検定公差は

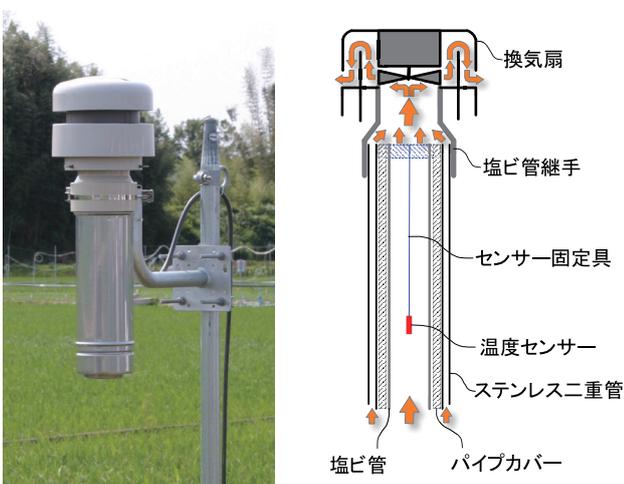


図 5. NIAES-09 型強制通風筒の外観 (左) と断面 (右) (福岡ら, 2011)。



図 6. 自然通風シールド (R. M. Young, MODEL 41003)。中央部に下からセンサーを挿入する。

個別の器差および極差が± 0.3℃以内)。これ以上の精度での気温観測が必要な場合は、測定開始前に事前の較正が必要である。また温度センサーが高精度だとしても、使用するデータ記録装置の正確度や精度、分解能が低ければ、計測の精度が低下する。そのため新品の温度センサーを使用した場合でも、温度測定システム（温度センサー+データ記録装置）としての較正を実施する必要がある。湿度センサーの精度に関しても、温度センサーの場合と同様である。

温度・湿度センサーは経年劣化するので、測定期間が終了した後にセンサーの較正を再度実施する必要がある。さらに測定期間中においても、定期的に計測データのチェックをすることが望ましい。

本節では温度・湿度センサーの較正ならびに確認の方法の概要について、実用的な観点から手短かに説明する。白金測温抵抗体やサーミスタ、T型熱電対などの温度センサー（水に浸せるタイプ）の較正方法の詳細に関しては、岡田（2010a; b）で詳しく解説されている。

3.1 測定開始前の較正または確認

a. 温度センサー（水に浸せるタイプ）

恒温水槽などに基準となる温度計（気象庁検定あるいはJCSS校正証明書付きの棒状標準温度計が望ましい）と共に入れ、両者の比較測定を行なう（図7）。氷点下の温度では不凍液を用いる。自動車用として販売されている寒冷地用ウォッシャー液が使いやすい。比較測定においては、以下の点に注意する必要がある。

標準温度計 T_{real} (°C)	温度センサー T_s (°C)	補正值 (°C) $T_{real}-T_s$
-5.00	-5.10	0.10
0.00	-0.06	0.06
5.00	4.98	0.02
10.00	10.02	-0.02
15.00	15.06	-0.06
20.00	20.10	-0.10
25.00	25.12	-0.12
30.00	30.11	-0.11
35.00	35.09	-0.09
40.00	40.08	-0.08
45.00	45.09	-0.09

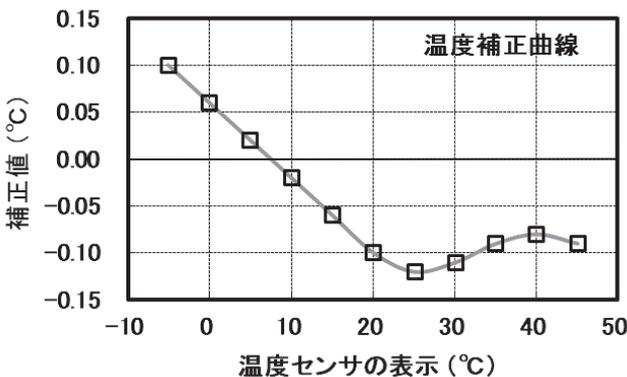


図7. 温度測定システムの検定結果の取りまとめ例。-5～45℃の範囲を5℃の間隔で標準温度計の示度 T_{real} と温度センサーの指示値 T_s を比較し（上図）、補正值 $T_{real}-T_s$ と T_s との関係プロットする（下図）。

- ① 温度センサーを入れた水槽をよく攪拌する。
- ② 温度センサーの感部の大きさや材質が違っていると、水温と平衡になるまでの時間（追従性）が異なる。検定の対象となる温度センサーと基準となる温度計の追従性の違いに注意する。

b. 一体型の温度・湿度センサー（水に浸せないもの）

- ① 気流が安定した室内などで、基準となる温度・湿度計との比較測定を行なう。
（→ 正確な比較は難しく、上級者向けである。）
- ② メーカーから提供された試験成績書をそのまま使用する。
（→ データ記録装置と共に検定された新品の温度測定システムに限る。国家標準に対してトレーサブルな標準器を用いた、試験成績書が添付されている機種もある。）

c. その他

製造者や販売者が較正サービスを提供している場合があるので、これを利用する。

温度センサー（Pt100）と湿度センサー（高分子膜静電容量式）のうち、気象庁が定める構造上の基準を充たした測器については気象業務法に定められた登録検定機関による検定（有料）が受けられるので、それを活用することもできる。ただし、あくまでも測器が合格基準の範囲内であることを証する制度であり、器差の数値を得るための制度ではないことに注意が必要である。

3.2 測定中の確認

基準となる測器（準器）を横に並べて、比較測定を行なう。基準とする測器としては、以下の2つがある。

a. アスマン通風乾湿計（気象庁検定付きが望ましい）

2本の二重管式ガラス温度計（一方をガーゼで湿らせる）の感部を強制通風した二重の金属管内に入れたもので、乾球温度（気温）と湿球温度（湿度）を高精度に計測することができる（岡田・中村，2010）。チェックの対象となる温度・湿度センサーとの追従性の違いに注意する必要がある。同測器を用いた比較測定は上級者向けである。

b. その他の温度・湿度センサー（新品の同一測器など）

別個に検定された温度・湿度センサーを利用する。チェックの対象となる温度・湿度センサーと同一の規格品（新品）を利用すると、センサーの追従性が同じで手軽である。

3.3 測定終了後の較正

a. 温度センサー（水に浸せるタイプ）

恒温水槽などに基準となる温度計（気象庁検定あるいはJCSS校正証明書付きの棒状標準温度計が望ましい）と共に入れ、両者の比較測定を行なう。

b. 一体型の温度・湿度センサー（水に浸せないもの）

- ① 気流が安定した室内などで基準となる温度・湿度計との比較測定（→ 上級者向け）
- ② 測定終了直前に基準となる測器を横に並べて行う比較測定で代用（→ 簡便に実施できるので推奨）
- ③ 製造者や販売者が提供する較正サービスを利用（→ 利用できる測器の種類に限られる）

4. 気象庁以外の者が行なう気象観測について（参考）

気象庁以外の者が、屋外で気象観測を実施する場合、気象業務法に基づく届出等が必要となる場合がある。以下にその概略をまとめた。

(1) 気象庁以外の政府機関と地方公共団体

研究あるいは教育を目的としない気象観測については、原則として届出等*が必要である（気象業務法第6条）。

(2) 政府機関と地方公共団体以外の者

以下の目的で実施する気象観測については、原則として届出等*が必要となる（気象業務法第6条）。

a. その成果を発表するための気象観測

b. その成果を災害防止に利用するための気象観測

(備考) *気象庁の検定に合格した気象測機を使用し（気象業務法第9条）、施設の設置から30日以内に、気象観測施設設置の届け出を気象庁長官に行うことが義務付けられている。

ただし以下のような場合は、届出等の義務はない。

- ① 畝の間又は苗木の間、建物又は坑道の内部等特殊な環境によって変化した気象のみを対象とする観測
- ② 臨時に行う気象観測（1ヵ月以内、あるいは1ヵ月に1回未満の頻度）

詳細については、「気象業務法施行規則」を参照のこと。

引用文献

- 岡田益己, 2010a: 温度の正しい測り方(2)温度計の校正. 生物と気象 **10**, A-3 (<http://www.agmet.jp/sk/2010/A-3.pdf>).
- 岡田益己, 2010b: 温度の正しい測り方(3)熱電対の作り方・使い方. 生物と気象 **10**, A-4 (<http://www.agrmet.jp/sk/2010/A-4.pdf>).
- 岡田益己・中村浩史, 2010: 温度の正しい測り方(1)通風式放射よけの作り方. 生物と気象 **10**, A-2 (<http://www.agrmet.jp/sk/2010/A-2.pdf>).
- 近藤純正, 1982: 大気境界層の科学. 東京堂出版, 東京, 219pp.
- 福岡峰彦・桑形恒男・吉本真由美, 2010: 低コストで高精度の気温測定を可能にする強制通風筒. 研究成果情報（農業環境技術研究所） **26**, 6-7.
- 福岡峰彦・桑形恒男・吉本真由美, 2011: 建築資材を活用した低コスト強制通風筒「NIAES-09」の製作法. 生物と気象 **11**, A10-16 (<http://www.agmet.jp/sk/2011/A-3.pdf>).
- R. M. Young Company, 2014: MODEL 41003 Multi-plate radiation shield, Instruction Sheet 41003-90 rev C012114. [http://www.youngusa.com/Manuals/41003-90\(C\).pdf](http://www.youngusa.com/Manuals/41003-90(C).pdf) (2018/04/29).