

連載講座「栽培環境における気温の観測技法と利用」

(2) 気温・湿度観測に用いられるセンサー

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)

Introduction to sensors for measuring air temperature and humidity 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

前稿「(1) 気温観測の理論と注意点」では、栽培試験などで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した (桑形・福岡, 2018)。本稿では、一般の気温観測に使用される温度センサーの種類と、それらセンサーの計測原理について簡単に紹介する。また、気温と同時に計測することが多い湿度に関して、代表的な湿度センサーである静電容量式湿度センサーの原理と、測定上の注意点について簡単に説明する。

2. 温度 (気温) センサーの種類と原理

ここでは、気温観測で使用される4種類の温度 (気温) センサーと、その計測原理について簡単に紹介する。正確な気温測定を実施する上で、知っておきたいセンサーの特性や、センサーを選択する上で参考となる情報を記載した。それぞれの温度センサーの特徴や用途に関しては、各センサーの説明の後半部分 (「c. 特徴」) に記載してあるので、参考にされたい。

2.1 白金測温抵抗体

a. 原理

温度に比例して白金線の抵抗 R が直線的に増加する性質を利用する。白金は化学的に極めて安定しているため、電気的特性の変化や機械的特性の劣化が生じにくいことから、長期間の気温観測に適している。日本工業規格 (JIS) C 1604:2013 では Pt100, Pt500 および Pt1000 の3種類が規格化されているが、この中で Pt100 が最も一般的であり、気象観測用としても広く普及している。Pt100 の場合、温度 $T=0^{\circ}\text{C}$ で $R=100.00\ \Omega$, $T=100^{\circ}\text{C}$ で $138.51\ \Omega$ となるように製作される (図1)。

b. 精度 (温度センサーの感部)

JIS C 1604:2013 において、以下の許容差 (許容される誤差の限界値) が定められている。

$$\text{AA 級: } \pm (0.1 + 0.0017|T|) (^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

$$\text{A 級: } \pm (0.15 + 0.002|T|) (^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

$$\text{B 級: } \pm (0.3 + 0.005|T|) (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

$$\text{C 級: } \pm (0.6 + 0.01|T|) (^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

ここで、 $|T|$ は温度の絶対値 ($^{\circ}\text{C}$) である。

例えば、JIS C 1604:2013 が定める A 級に適合または準拠する白金測温抵抗体は、個々のセンサーの誤差が 0°C で $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$, $\pm 100^{\circ}\text{C}$ のときに $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ 以内でなければならない。言い換えれば、A 級に適合または準拠する製品の中には、最大でこの程度の誤差を持つセンサー個体が含まれる可能性があることを意味する。したがって、許容差よりも高精度の測定が必要な場合は、信頼できる標準温度計と比較することにより個々のセンサーの誤差特性を把握した上で使用する必要がある。

c. 特徴

気象庁が行う観測においては、長期間の気温観測に適した安定性と精度を備えたセンサーとして、JIS C 1604:2013 が定める A 級の Pt100 白金測温抵抗体が気温観測用の統一的な測器として使用されている (図2)。白金測温抵抗体は温度変化に対する抵抗変化が小さいので、センサーと計測器をつなぐ導線の抵抗やその変化の影響を取り除くための特別な工夫が必要となる (3 導線式, 4 導線式, 図3)。3 導線式ではそれぞれの導線の抵抗値が一致することを前提としているため、導線が長くなってしまう場合 (条件にもよるが概ね 10 m 以上が目安)、できるだけ 4 導線式を使用するのが望ましい。設備等の都合により止むを得ず 2 導線式しか使用できない条件では、測温抵抗体と導線の合成抵抗に占める測温抵抗体の抵抗の割合を大きくするために、Pt1000 ($T=0^{\circ}\text{C}$ で $R=1000\ \Omega$, $T=100^{\circ}\text{C}$ で $1385.1\ \Omega$) を使用する必要がある。

抵抗を計測するためには電流を流す必要があるが、電流が流れると白金測温抵抗体がジュール効果により自己発熱するため、誤って温度を実際よりも高く計測する原因となる。多くの場合は計測器 (センサーと表示部あるいはデータロガーが一体型になった製品を含む) の側で適切な印加電圧や通電時間、測定間隔が設定されているが、自らが印

加電圧や通電時間, 測定間隔を設定する場合には, 自己発熱が計測値に及ぼす影響が最小限となるようにこれらの設定値を慎重に検討する必要がある。

2.2 サーミスタ (Thermistor)

a. 原理

温度に依存して抵抗が変化 (温度測定に主に用いられる

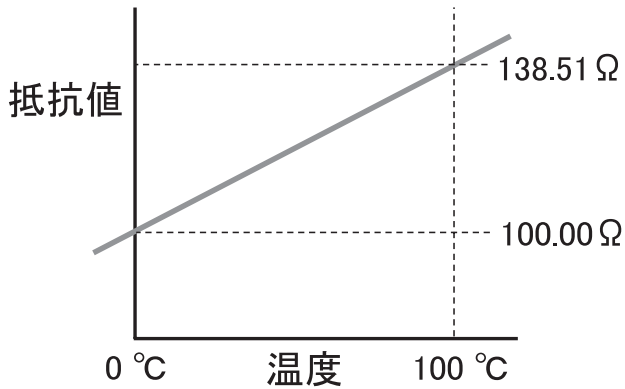


図 1. 白金測温抵抗体 (Pt100) の温度と抵抗値との関係。

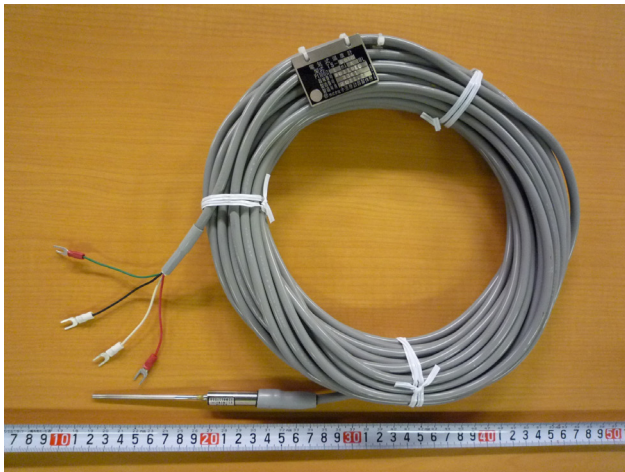


図 2. 気象庁の気温計測で使用されている白金温度センサー (JIS A 級, 4 導線式)。

NTC 型では温度上昇に対して抵抗が減少) する素子を利用した温度センサーである (図 4)。素子は金属酸化物を焼結して製造される。

b. 精度 (温度センサーの感部)

JIS C 1611:1995 では階級として 0.3, 0.5, 1.0 および 1.5 級が定められており, それぞれ 0.3, 0.5, 1.0 および 1.5°C (温度範囲は -50 ~ +100°C) の許容差となる。

c. 特徴

温度と抵抗値の関係は直線的ではないが, 白金測温抵抗体と比べて抵抗変化が大きい。例えば図 4 に示した YSI 44031 型サーミスタ (25°C における公称抵抗値 10 kΩ) の場合, -40 ~ +100°C の温度範囲で, 240 kΩ ~ 0.8 kΩ の抵抗変化となる (Measurement Specialties Inc., 2008)。ガラスで封止された素子の経時安定性は比較的良好だが, エポキシ樹脂で封止された素子は白金測温抵抗体と比べて経時変化が大きく, 1 年に 1 回程度の頻度でセンサーを校正するのが望ましい。白金測温抵抗体と比較して価格が手ごろなこともあり, 多くの温度計測ロガー (温度センサーにデー

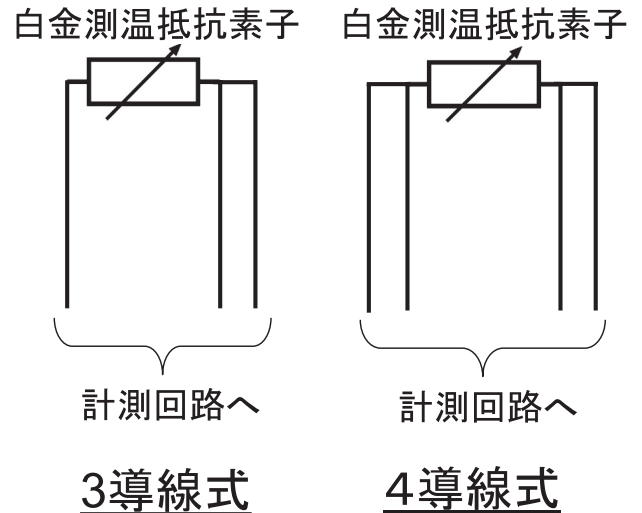


図 3. 白金測温抵抗 (Pt100) の計測方式

3 導線式はブリッジ回路方式, 4 導線式は定電流印加方式でそれぞれ抵抗値が測定できる (秦, 2004)。

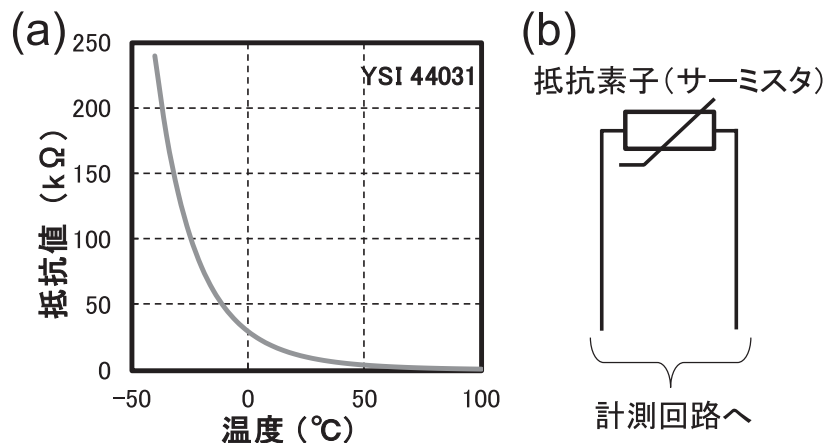


図 4. (a) サーミスタ (YSI 44031) の温度と抵抗値との関係 (Measurement Specialties Inc., 2008) (b) サーミスタの計測方式。

タ記録装置が付いたもの)等で採用されていて、栽培試験などにおける気温観測用としても使用しやすい(図5)。

一般にサーミスタは白金測温抵抗体と比べて抵抗が大きいので、センサーと計測器をつなぐ導線の抵抗の影響は相対的に小さく、配線には2導線式が採用できる。計測電流による自己発熱については、白金測温抵抗体と同様に注意が必要である。

2.3 熱電対 (Thermocouple)

a. 原理

2種類の金属A・Bの両端を接合し、これらの両端に温度差を与えると、温度差にほぼ比例した熱起電力が発生する(ゼーベック効果)。この熱起電力から測温接点の温度を検知する。よく用いられる金属の組み合わせについてはJIS C 1602:2015で規格化されている。気象・環境計測の分野では、常温付近での熱起電力特性がよい銅-コンスタンタン熱電対(T型, 図6)が多く用いられる。他に、クロメル-アルメル熱電対(K型)は工業分野で多用されることから、センサー・対応ロガーとも数多くの製品があり、入手性がよい。

b. 精度 (温度センサーの感部)

銅-コンスタンタン熱電対(T型, 図6)においては、クラス1, 2および3で、それぞれ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (温度範囲は $-40 \sim +125^{\circ}\text{C}$)、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($-40 \sim +133^{\circ}\text{C}$) および $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($-67 \sim +40^{\circ}\text{C}$)の許容差となる。許容差が白金測温抵抗体やサーミスタと比べて大きく定められているのは、熱電対を構成する金属および合金への不純物の混入や、合金成分が製造上の目標値から外れることに起因して、製造ロットごとに熱起電力のばらつきが生じるためである。熱電対材料の特性については河野(1975)の解説が詳しい。

c. 特徴

T型熱電対では 0°C において、両端の 1°C の温度差に対して 0.039 mV の熱起電力が発生する。熱電対自体の値段



図5. サーミスタ温度センサーの例 (T & D, RTR-52A)。

は安く、加工が容易であるが、センサー部分(測温接点)の温度を計測するためには、測温接点と基準接点の間の電圧に加え、基準接点の温度を計測する必要がある(図7, 8)。そのため、熱電対の測温接点と基準接点間の温度差の測定誤差に、基準接点温度の測定誤差が積み重なることに注意が必要である。

熱電対は極めて微小な接点を作成できることが他にない特長であり、測温接点を小さく加工することで、大気乱流などによる気温の短周期変動(数秒から数十秒以内の周期の変動)を測定することが可能となる。またその計測原理の特徴を生かして、圃場内の地点間や、同一地点の高度間の温度差(気温差)を高精度に計測したい場合に便利である。熱電対の実際の加工方法や使用上の注意点については、岡田(2010)で詳しく解説されている。

2.4 半導体温度センサー (バンドギャップ式温度センサー)

a. 原理

ダイオードに一定の順方向電流を与えたとき、順方向電圧がPN接合の温度に依存する性質を利用する(図9)。

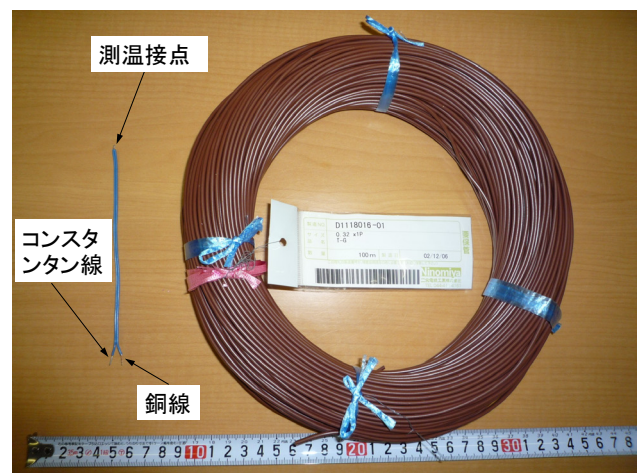


図6. T型(銅-コンスタンタン)熱電対の素線(右)と測温用に加工した接点(左)。

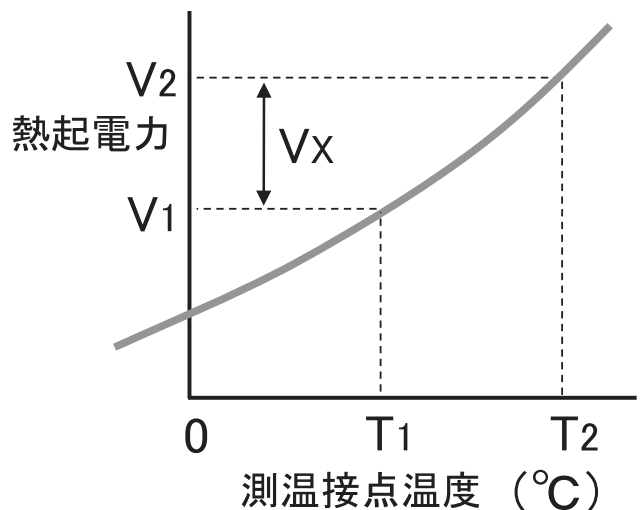


図7. 熱電対の熱起電力と測温接点温度との関係。

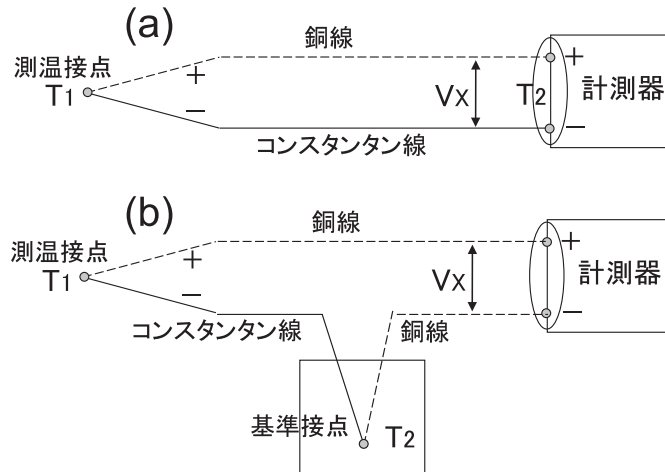


図 8. 熱電対による温度の計測方法

- (a) 計測器を基準接点とする方式（計測器内に T_2 を測定する温度センサーが内蔵されている）
 (b) 基準接点を外部に設置する方式（基準接点の温度 T_2 を別途に測定する）。

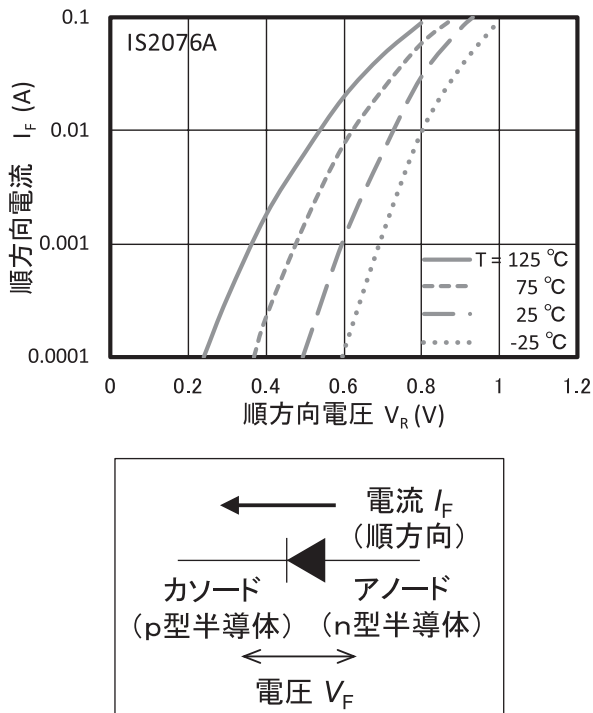


図 9. ダイオードの順方向特性の温度依存性の例 (IS2076A) (Renesas Electronics Corporation, 2005)。

b. 精度（温度センサーの感部）

製品により精度が大きく異なるので、仕様書を参照して目的に対して十分な精度を備えた製品を選択する必要がある。初期のアナログ電圧出力の温度センサー IC（たとえば Texas Instruments, 2017）では許容差が $\pm 2.0^\circ\text{C}$ と大きかったが、近年では製造時に全数について較正を行ってから出荷される高精度の製品（たとえば Measurement Specialties Inc., 2017）も市販されており、 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲の許容差が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ まで向上している。ただし、経時安定性については製品によってまちまちなので、予定する観測期間に対して十分な経時安定性を備えているかどうか、仕様書を参照して確認する必要がある。

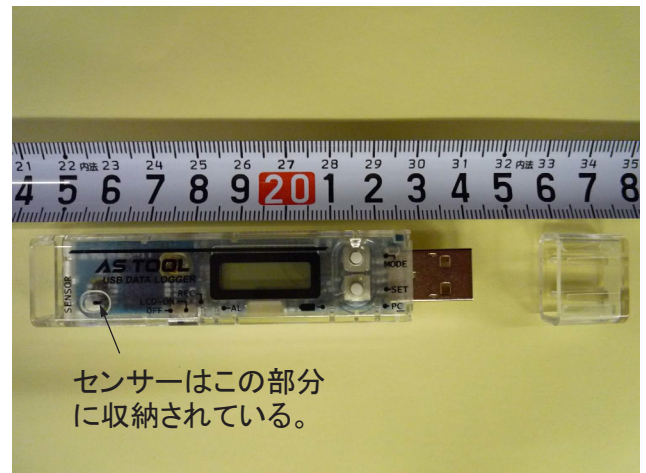


図 10. バンドギャップ式温度センサーを使用した温湿度データロガー（アズワン RX-30TH）
 Sensirion 社の複合センサー（SHT11）が内蔵されている。

c. 特徴

感温部とアナログ - デジタル変換部を一体として半導体チップ上に形成したデジタル IC 温度センサーの場合、計測値はデジタルで出力されるので、アナログ出力のセンサーと比較して信号を送信する際に外乱ノイズの影響を受けにくい利点がある。1 つの製品で温度と湿度を測定できる複合センサー製品もあり（たとえば Sensirion, 2011）、このような複合センサーを使った温湿度データロガーが市販されている（図 10）。これまでは主に室内や機器内の測定用として利用されてきたが、近年は屋外での気象測定を想定した民生用の機器にも組み込まれて利用されている。

3. 湿度センサー（静電容量式）の原理

野外における湿度観測は、主として乾湿計や露点計を用いて実施されていたが、1990 年代前半から高分子膜静電容量式の湿度センサーが急速に普及し、気象庁の地上気象観測でも使用されるようになった。高分子膜静電容量式の

湿度センサーでは、相対湿度に応じて高分子膜が吸収する水分量に変化し、高分子膜の誘電率（静電容量）に変化をもたらす特性を利用して相対湿度を計測する（図 11）。

本センサーを用いた測定上の注意点を以下にまとめた。

(1) 粉塵や排気ガス、農薬などの有機化合物質の気体が誘電率に影響を与え、誤差の原因となるので注意が必要である。高濃度の場合には、センサーに永久的なダメージを与える。

(2) 相対湿度が 100% に近い高湿度条件下では、センサー自身の測定精度が低い。さらに高湿度条件では、以下のような状況でセンサーに結露が発生することがある。

- 放射シールドの構造上の不備などが原因で、夜間にセンサーが放射冷却を受けて大気より低温になった場合。
- 気温と湿度が急上昇する状況で、センサー温度の変化が気温の急上昇に追いつけず、低温のセンサーが相対的に高温・高湿の大気と接触した場合。

一度センサーが濡れてしまうと、実際より高湿度に表示されやすくなる。また空気中に霧が発生している場合には、センサーが霧粒によって直接濡れることで同様な状況となる。高湿条件や結露状態での動作を保証していない湿度センサーもあるので注意を要する。

(3) 相対湿度が 10% を下回るような極端な低湿度条件や、常温から逸脱した温度で測定を行う場合にも、誤差が大きくなる場合が多い。

以上のことから、センサーの仕様書を参照し、想定する使用条件が仕様の範囲内に収まっているか、想定する使用条件において必要な精度が確保されるか確認する必要がある。また、仕様上の動作範囲（たとえば相対湿度 10～90%）からの逸脱が発生した場合（たとえば、相対湿度 10% を下回るか 90% を超える場合や、結露が生じる場合）に、その状態から復帰後に継続して正常な測定が可能かどうかについても、センサーの仕様書や、基準となる測器との比較によって確認する必要がある。たとえば、Measurement Specialties Inc. (2015) には逸脱が復帰後の測定に影響しない旨の記載がある。

なお、(2) の誤差を避けるために、センサーを加熱することで見かけ上の相対湿度を低下させることで、結露の発生を防ぐとともに、比較的誤差の小さい相対湿度域で測定

を行う工夫を施した測器が市販されている。価格はやや高くなるが、高湿条件が続く梅雨時期の計測や、ハウス内の高湿条件での計測などで有効である。この場合、別に測定した真の気温 T を用いて補正を行い、真の気温における相対湿度 Rh (%) を次式に基づき計算により求めている。

$$VP = (Rh_{OBS}/100) \times VP_{SAT}(T_{OBS}) \quad (5)$$

$$Rh = 100 \times VP/VP_{SAT}(T) \quad (6)$$

ここで、 Rh_{OBS} (%) と T_{OBS} は加熱したセンサーで測定された相対湿度と温度であり、 VP は空気中の水蒸気圧、 $VP_{SAT}(T_{OBS})$ と $VP_{SAT}(T)$ はそれぞれ加熱したセンサーの温度 T_{OBS} と真の気温 T に対する飽和水蒸気圧を表している。

4. その他の参考資料

温度センサーの種類や計測原理に関して、これまでに多くの優良な解説が出版されている。例えば岐阜工業高等専門学校紀要に 10 回にわたって掲載された講座「温度センサの原理 <I>～<X>」(池田ら, 1998; 1999; 2000; 池田, 2002a, 2002b, 2003a; 2003b; 2004; 2005) では、さまざまな温度センサーを対象に、計測の基礎となる物理法則の説明から始まり、それら物理法則に基づく各温度センサーの計測原理、計測回路の説明までが系統的に説明されている。本稿で取り上げた 4 種類の温度センサーに関しては、それぞれ「温度センサの原理 <I>～<III>」(池田ら, 1998; 1999; 2000) で取り上げられている。内容の理解には工業高等専門学校レベルの物理と数学の知識を必要とするが、きわめて有用な参考資料である。また「【講座】温度測定の基礎と実際 第 1 回」(棚沢, 1989) では、温度の物理的な意味、温度測定の原理、各種温度計の種類、温度測定の誤差などがコンパクトに整理されている。続編にあたる「【講座】温度測定の基礎と実際 第 2 回」(黒木, 1989) では、代表的な計測センサーとして熱電対を取り上げ、その作り方や結線方法、校正の仕方や誤差などについて説明されている。一方「高温計測の基礎—熱電対—」(牛尾, 1992) は、高温計測を対象とした解説ではあるが、熱電対計測の誤差の要因が理論的な考察に基づき整理され、熱電対による温度計測の基礎を学ぶのに有益な内容である。

これら以外にも、温度センサーの種類や測定原理、測定方法を扱った解説は多いので、必要に応じて参考にされたい。

引用文献

- 秦 明宏, 2004: PIC マイコンで物理量計測を実現するために センサの活用 (熱電対, 白金測温抵抗体, ひずみゲージ). PIC マイコンの基礎とセンサ活用入門. CQ 出版, 東京, pp97-104.
- 池田徹之, 2002a: 温度センサの原理 <V>. 岐阜工業高等専門学校紀要 37, 83-94.
- 池田徹之, 2002b: 温度センサの原理 <VI>. 岐阜工業高等専門学校紀要 37, 95-104.
- 池田徹之, 2003a: 温度センサの原理 <VII>. 岐阜工業高等専門学校紀要 38, 57-68.
- 池田徹之, 2003b: 温度センサの原理 <VIII>. 岐阜工業高等専門学校紀要 38, 69-82.

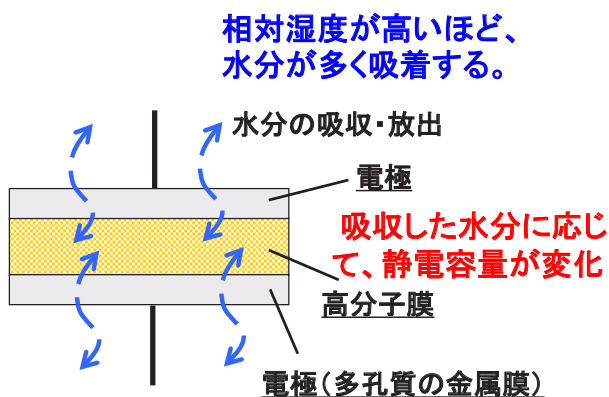


図 11. 高分子膜静電容量式の湿度センサーの測定原理。

- 池田徹之, 2004: 温度センサの原理 <IX>. 岐阜工業高等専門学校紀要 **39**, 81-92.
- 池田徹之, 2005: 温度センサの原理 <X>. 岐阜工業高等専門学校紀要 **40**, 111-118.
- 池田徹之・南部英夫・松原芳夫, 1998: 温度センサの原理 <I>. 岐阜工業高等専門学校紀要 **33**, 65-76.
- 池田徹之・南部英夫・松原芳夫, 1999: 温度センサの原理 <II>. 岐阜工業高等専門学校紀要 **34**, 119-142.
- 池田徹之・南部英夫・松原芳夫, 2000: 温度センサの原理 <III>. 岐阜工業高等専門学校紀要 **35**, 97-120.
- 河野 充, 1975: 熱電対材料とその金属学的諸問題. 日本金属学会会報 **14**, 881-890.
- 黒木勝一, 1989: 【講座】温度測定的基础と実際 第2回, 代表的な温度測定. 熱物性 **3**, 94-101.
- 桑形恒男・福岡峰彦, 2018: 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. 生物と気象 **18**, 97-102.
- Measurement Specialties Inc., 2008: 44031RC Precision Epoxy NTC Thermistor. <https://datasheet.octopart.com/701031-TE-Connectivity-datasheet-8486791.pdf> (アクセス日: 2018/08/05).
- Measurement Specialties Inc., 2015: HTM2500LF Temperature and Relative Humidity Module. http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FHPC169_C%7FA%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_HPC169_C_A.pdf%7FCAT-HSA0001 (アクセス日: 2018/08/05).
- Measurement Specialties Inc., 2017: TSYS01-FAMILY Digital Temperature Sensors. http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FTSYS01%7FA%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_TSYS01_A.pdf%7FG-NICO-018 (アクセス日: 2018/08/05).
- 岡田益己, 2010: 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>).
- Renesas Electronics Corporation, 2005: 1S2076A シリコンエピタキシャルプレーナ形ダイオード 高速度スイッチング用, RJJ03G0457-0700 Rev.7.00. <http://www.op316.com/tubes/buhin/image/1s2076a.pdf> (アクセス日: 2018/08/05).
- Sensirion, 2011: Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor IC (Version 5). https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Humidity/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT1x_Datasheet.pdf (アクセス日: 2018/08/05).
- 棚沢一郎, 1989: 【講座】温度測定的基础と実際 第1回, 温度測定的基础. 熱物性 **3**, 40-46.
- Texas Instruments, 2017: LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors datasheet (Rev. H). <http://www.ti.com/lit/ds/snis159h/snis159h.pdf> (アクセス日: 2018/08/05).
- 牛尾誠夫, 1992: 高温計測の基礎 - 熱電対 -. 溶接学会誌 **61**, 163-167.