

温度の正しい測り方 (3) 熱電対の作り方・使い方

岡田益己

岩手大学農学部

How to measure temperature accurately
(3) A use of thermocouples

Masumi OKADA

Faculty of Agriculture, Iwate University.

1. 熱電対とは

二種の異なる金属を図1のように接続すると、両端の接点間の温度差に概ね比例した起電力が発生する。この起電力を電圧計で測ることにより、温度差を知ることができる。基準接点を氷点(0°C)に維持すれば、測温接点の温度を計測できる。この原理を利用する温度センサーが熱電対である。図1は銅とコンスタンタン(銅とニッケルの合金)を使用するT型熱電対で、測温接点が基準接点よりも高温だとプラスの電圧Vが計測される。電圧は温度差1°C当たり約40 μVである。T型熱電対は、低価格、接点をハンダ付け可能などの理由から、気象分野で多用される。

熱電対による計測では基準接点をどのように作るかがポイントである。最も信頼できる基準接点は氷と水で作る氷点式基準接点であり、JIS Z8704にその作り方が詳述されているが、長時間にわたって精確に0°Cを維持するのは難しい。電子冷却式基準接点は連続使用に適するが高価であり、また周囲温度が0°C以下の環境では制御が不能になるという欠点がある。サーミスタを用いて電氣的に基準接点を作る補償式基準接点は、安価で簡便だが精度が低い(後述)。

以上のことから、熱電対は温度の絶対値を計測するよりも、ある点を基準とした温度差の計測に適している。例えば、高さ別の気温差や深さ別の地温差、気温と植物体温の差、乾湿球温度の差などが、その好例である。

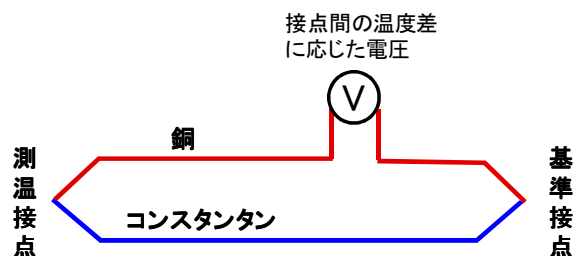


図1. T型熱電対の配線

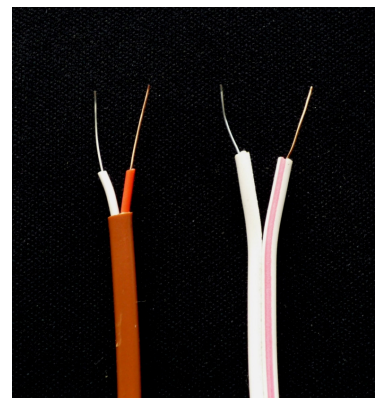


図2. ビニル被覆熱電対の種類. 二重被覆(左)と単被覆(右). どちらも右が銅線, 左がコンスタンタン線

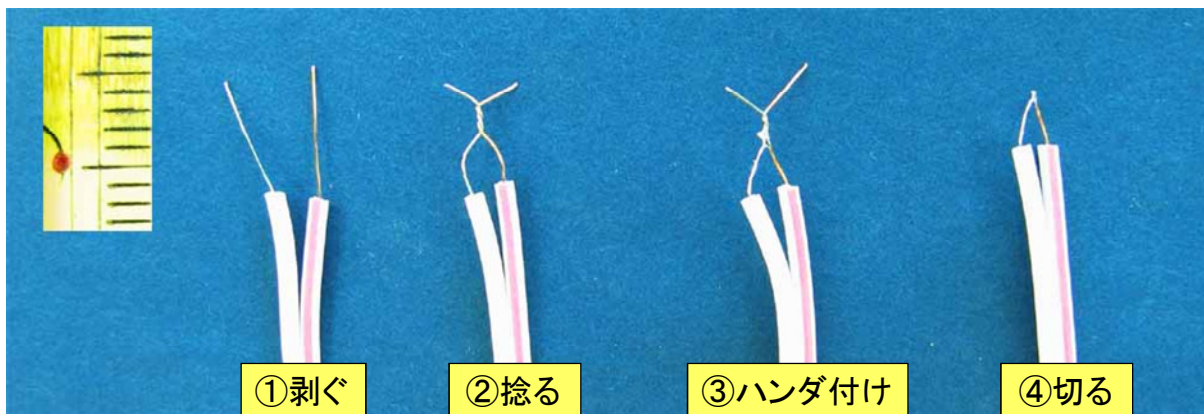


図3. 熱電対接点の加工手順

2. 熱電対の作り方

銅とコンスタンタンのペア線をビニル被覆した熱電対が扱いやすい(図2)。図3に接点部分の加工方法を示した。①1 cm程度の長さでビニル被覆を剥ぎ、銅線とコンスタンタン線をむき出す。②銅線とコンスタンタン線が交互にからむようにきつく捻る。③ハンダ付けをする。④先端部をニッパーなどで切り取る。銅線とコンスタンタン線が最初に触れるところが测温接点になるので、先端を長く残しても意味がない。熱電対線の反対側にも同様に接点を作る。次に銅線の途中を切断して導線を接続する(図4)。接続部が短絡・漏電しないように、熱収縮チューブや接着剤で絶縁する。導線には銅を利用するので、この接続部分は銅と銅の接点となり起電力が発生しない。導線の测温接点側をプラス、基準接点側をマイナスにして、データロガーや電圧計に接続して起電力を計測する。测温接点温度が基準接点温度より高いとプラスの電圧が、逆の場合にはマイナスの電圧が示される。

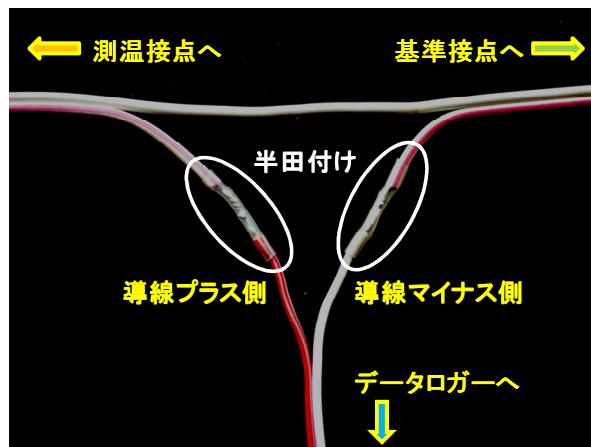


図4. 熱電対と導線の接続部の加工方法

3. 熱電対による多点温度計測

熱電対は安価だから、多点の温度計測に適している。その際、熱電対を1本1本作るのではなく、一つの基準接点を共有するように配線すると、基準接点温度のばらつきによる熱電対個体間の誤差を小さくすることができる。図5はその例である。基準接点を日変化の少ない土中深くに設置し、その温度と多点の温度差をデータロガーで計測する。例えば、温度1と2は同じ基準接点との温度

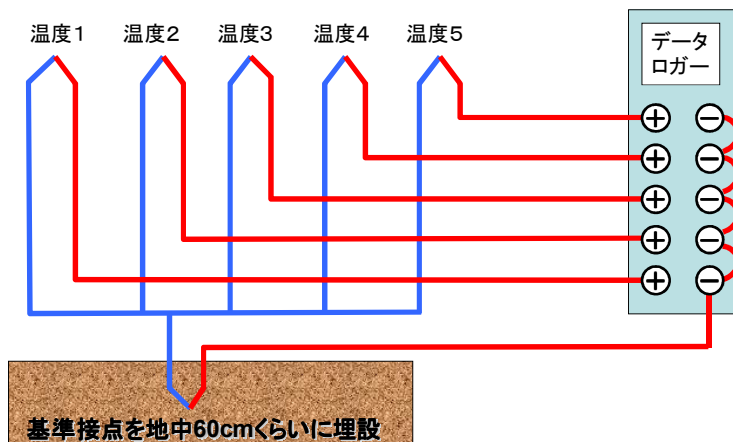


図5. 熱電対による多点温度計測の配線. 地中温度を基準接点とした例. 赤: 銅, 青: コンスタンタン

差を示すので、両者の差を高精度で求めることができる。また温度1と2の導線をデータロガーのプラスとマイナス端子に接続すれば、両者の差を直接測ることもできる。多数の葉温・作物体温などを計測する場合には、気温計測用の通風放射よけ内に基準接点を置いて、葉気温差を求めるといった方法がよく使われる。基準となる地温や気温を Pt100 やサーミスタなどで計測し、その温度差から測定点の温度を求める。

このように温度の絶対値の計測精度が多少劣っても、多点間相互の温度差を高精度で計測できる点が、熱電対の大きな特長である。多数の温度計を用いる多点計測では、センサー個体間の器差によって、A点がB点よりもわずかに高いのに、それを逆に捉えてしまうことが時々起こる。図5のように配線した熱電対を用いれば、器差による順位の逆転は起こりにくい。

4. 熱電対利用上の注意

4.1 補償式基準接点

基準接点を作らないで、測温接点の反対側の銅線をプラス端子にコンスタンタン線をマイナス端子に直接つなぐと、0°Cを基準とした起電力を出力する装置を補償式基準接点という(図6に例示)。熱電対を接続した端子の温度をサーミスタで計り、その温度と0°Cの温度差に相当する電圧を上乗せして出力する。多くのデータロガーにはこの仕組みが内蔵されており、電圧ではなく温度に換算して表示する。大変便利な機能だが、補償式基準接点を用いた場合の計測誤差は0.3~0.8°C程度、場合によっては数°Cに達することに注意が必要である。



図6. 市販の補償式基準接点の例

たとえ基準温度の計測に使うサーミスタに誤差がなくても、熱電対を接続する端子とサーミスタが埋め込まれた部分との距離ならびに両者の熱容量の違いによって、上記の計測誤差が生じる。周囲温度の変化が激しい場所では、サーミスタ取り付け部の応答が端子の応答よりも遅れるので、両者の温度差がそのまま計測誤差となって現れる。筆者は温度変化の激しいハウス内で、発泡スチロール箱に補償式基準接点を入れて使用したが、最大で3°Cほどの誤差を観測したことがある。補償式基準接点は、地中などに埋めて温度変化が小さい環境で使用することが重要である。データロガーの場合、サーミスタは端子台の裏や本体に埋め込まれる。とくに多チャンネル型のデータロガーでは、多数の端子が連なる端子台の下にサーミスタが一つ埋め込まれ、その温度ですべての端子の温度を代表するため、端子周囲を周到に断熱したとしても、端子間で系統的な誤差が生じてしまう。複数の測定点間のわずかな温度差を計測するには、図5の配線を用いるのが適切で、補償式基準接点の便利な機能を使うべきではない。

4.2 素線の熱伝導の影響

T型熱電対の素線に使われる銅は、熱伝導が極めてよい。このため測温接点とその近傍の素線の温度が異なると、素線の熱が測温接点に容易に伝わる。例えば、熱電対の測温接点を室内の静穏な空气中にさらし、接点から数十cm離れた素線を握ると、接点温度の上昇を観察できる。実際に試して、この影響を確認するとよい。

この熱伝導の影響があるので、接点の先だけを葉に接触させても、葉温を正しく計れない。多くの場合、空気に曝された素線の温度に近い値を示してしまう。素線を含めて接点の前後2cmくらいは、葉に密着させる必要がある。T型熱電対で湿球を作るときにも熱

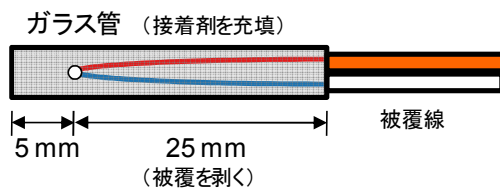


図7. 湿球の作り方

伝導の影響があるので、接点の先だけを綿糸などで濡らしても、湿球温度を示さない。乾球温度と真の湿球温度の中間の値を示す。湿球温度を正確に測るには、接点と接点からある程度離れた素線まで湿球状態に保つ必要がある。筆者は、接点から 25 mm までの素線をガラス管（長さ 3 cm 程度、内径 4~5 mm）に封入し（図 7）、ガラス管全体をガーゼや和紙で包むことで、アスマン乾湿計並みの湿球温度を示すことを確認した。もちろん、この場合、湿球温度を測るのに十分な通風速度（概ね 4 m s^{-1} 以上）が前提である。通風筒については、本シリーズ（1）（岡田・中村, 2010）を参照されたい。

接点付近だけを葉に接触させて温度を計る必要があるときは、T 型熱電対ではなく、銅よりも一桁以上熱伝導率が小さい、クロメル-アルメル熱電対（K 型）などを利用する。

4.3 校正曲線の使い方

冒頭で T 型熱電対の起電力は 1°C 当たり約 $40 \mu\text{V}$ と記したが、実際には高温ほど 1°C 当たりの起電力が大きくなる（例えば、理科年表）。このため計測した電圧を温度に換算するには、校正曲線が必要である。センサーの校正については、本シリーズ（2）（岡田, 2010）を参照されたい。 0°C を基準として熱電対を校正すると、図 9 左のようなデータを得ることができる。農業気象が対象とする温度域であれば、これらのデータに原点を通る 3 次曲線を当てはめることで、十分な精度の校正曲線が求められる。

ところで前出図 5 のように、 0°C ではない点を基準とする場合は、この曲線をそのまま利用できない。図 8 に示すように、計測された電圧は、測温点と基準点の差（ $C-B$ ）である。基準点の温度は別センサーで計測されていて、それが A だとしよう。A に相当する基準点の電圧は B だから、測温点の電圧は B に計測電圧差を加えた値 C となる。この C の電圧を 0°C 基準の校正曲線（図 9 左）に代入して、温度 D を求める。A から B を求めるには、通常電圧→温度の関係ではなく、温度→電圧の関係（図 9 右）が必要である。校正時に x と y を入れ替えた関係式も求めておく。

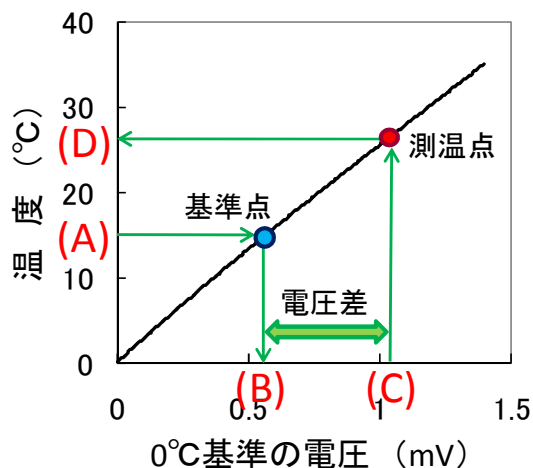


図 8. 0°C ではない基準点から測温点の温度を求める方法

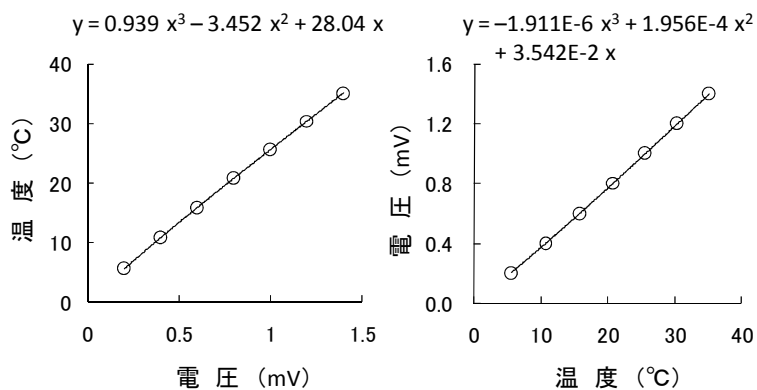


図 9. 0°C を基準とした熱電対の電圧と温度の関係

4.4 平均温度の計測

図 10 の配線で A-B 間の平均温度を計測できるだろうか。答えはノーである。A-B 間が完全にハンダ付けされていたとすると、電気は線の表面を流れるから、A 点では銅-ハンダの接点ができる。B 点ではコンスタンタン-ハンダの接点ができる。熱起電力は A と B で発生し、A-B 間の平均温度には対応しない。さらに銅-ハンダの起電力に比べて、コンスタンタン-ハンダの起電力は約 10 倍大きいので、熱起電力の大半は B 点の温度によって決まる。つまり図 9 の熱電対は、およそ B の温度を計測する。実際にこのような熱電対を製作して、A 点と B 点を指先で温めれば、

その作用が分かるだろう。

ちなみにハンダを使わずに、銅とコンスタンタンを捻って、あるいは溶接して長い接点を作っても、B 点の温度が優先する。この場合は、コンスタンタンの電気抵抗が非常に大きいために、A-B 間では主に銅を通して電気が流れるからである。

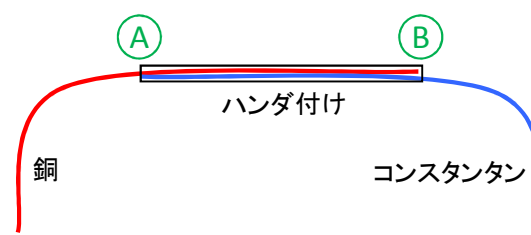


図 10. 接点を長くしても平均温度は計れな

多点の平均温度を一つのデータロガーチャ

ンネルで計測したいときは、図 5 のような多点熱電対を作り、測温接点側の導線をすべて束ねて、データロガーの一つのプラス端子に接続する。基準接点側の導線は、対応するマイナス端子に接続する。この場合、測温接点側の熱電対の長さすなわち抵抗をすべて同一とする必要がある。長さ（抵抗）が異なると平均値を示さない。

5. 終わりに

熱電対を上手に使えば、 0.1°C くらいの微小な温度差を容易に検出できる。一方、その原理やデータロガーの機能などを熟知せずに利用すると、大きな過ちを犯す危険性もある。先に触れたように、データロガー端子間の温度差に気付かずに、その差を対象物の温度差と見誤ることも起こりうる。大分以前になるが、筆者は、データロガー内蔵の校正曲線を信じて温度変換していたら、 25°C 付近で常に誤差が生じることに気付いた。メーカーに問い合わせたところ、校正は曲線ではなく多数の折れ線をつないだもので、たまたま 25°C 付近が 2 本の直線の接続点だったことが判明した。メーカーは高温域の工業分野での利用を想定していたために、常温付近の 0.3°C 程度の誤差は許容範囲と考えていた。

熱電対の出力は、 1°C 当たりで数十 μV というオーダーである。 0.1°C の精度で計測したければ、データロガーにも $1\sim 2\ \mu\text{V}$ の分解能が必要である。熱電対の使用に適した計測装置を用意することが高精度計測の前提となる。一方、銅→コンスタンタン→銅→コンスタンタン→銅・・・というように熱電対を直列に接続し、銅→コンスタンタン側の接点をすべて一方の測温点に、コンスタンタン→銅側の接点をすべて他方の測温点に設置すると、この 2 点間の温度差に相当する起電力を増幅して得ることができる。このように熱電対には様々な応用分野があるので、それぞれ工夫して利用していただきたい。

参考文献

JISZ8704「温度測定方法—電気的方法」, 20pp.

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://wwwsoc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2010/A-2.pdf>).

岡田益己, 2010: 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://wwwsoc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2010/A-3.pdf>).

理科年表, 国立天文台編, 丸善.