

環境計測とトレーサビリティ

渋谷俊夫

1. はじめに

物理環境を正しく計測するにはどのようなことに気を付ければよいだろうか。長さや重さなどは、基準の長さ（例えば、定規）や重さ（例えば、分銅）と比較することによって、直接的に計測ができる。しかし、気温や湿度、ガス濃度、水質などの環境計測のほとんどは間接的な計測である。例えば、温度計測について考えてみよう。温度計測にはガラス製温度計がよく用いられる。温度計の示す値は、ガラス棒内での液体の体積の変化を示しており、長さや重さのように、ある基準と直接比較しているのではない。それでは、目盛が指し示している値は何にもとづいて決められているのだろうか。

2. トレーサビリティとは

トレーサビリティは JIS（日本工業規格）において、「不確かさがすべて表記された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結びつけられ得る測定結果又は標準の値の性質。基準は通常、国家標準又は国際標準である。」と定義される。簡単に言えば、計測器はある基準と比較することでその信頼性が保証され、その基準をたどっていくと国家標準規格に行き着くというものである。

ものを計るには何か標準となるものが必要である。例えば、私たちはものの長さを測るときに定規やメジャーを使うが、この定規やメジャーの目盛幅はどのメーカーのものでもほとんど同じである。これは文具メーカーが長さの標準を持っており、それを用いて製品を造っているからである。その標準はさらに高精度の標準をもとに作られており、またその高精度の標準は国家標準をもとに作られている。日本における長さの国家標準は「光周波数コム装置」で産業技術総合研究所が保有しているものである。すなわち、私たちが何気なく使っている定規も元をたどれば、この「光周波数コム装置」にたどり着くのである。このように標準をさかのぼっていくと国家標準に到達することで、私たちは安心して定規やメジャーを使うことができるのである。

トレーサビリティ制度の概念図を図1に示す。産業技術総合研究所などが国家標準を保有している。正確な標準を国が管理することは産業上重要であるが、もし信頼できる標準器が国家標準のみであったなら、メーカーやユーザーは簡単に標準を得ることができなくなってしまう。そこで、国は認定した事業者对国家標準器で校正（正しさを確かめること）された二次標準器を提供する。認定事業者は、その二次標準器を使ってメーカーやユーザーに実用標準を提供する。その実用標準を使うことで、メーカーは規格化されたさまざまな製品を提供することができるのである。

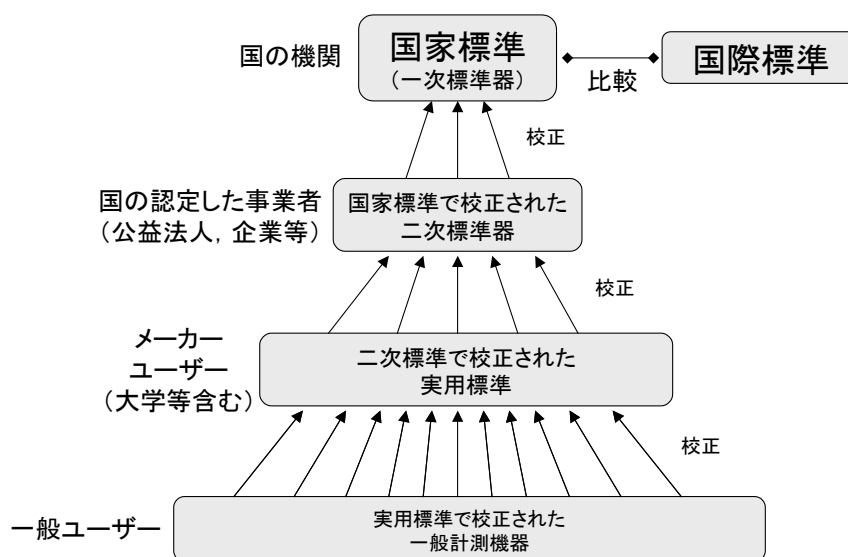


図 I - 1 トレーサビリティ制度の概念図

矢印の数はイメージであり実際の事業者数を表すものではない。

例として、温度のトレーサビリティ体系を図2に示す。国家標準は国際標準目盛（ITS-90）にもとづいて作られたもので、物質の融点や沸点などによって決められた温度の基準値である。国家標準は、産業技術総合研究所が保有する特定標準器，または日本電気計器検定所が保有する特定副標準器によって作ることができる。国に認定された特定の事業者はこれらの国家標準器を使って，二次標準器を得ることができる。二次標準器は必要な温度範囲によっていくつかの種類があるが，例えば常温では基準温度計がよく用いられる。基準温度計は信頼性・耐久性に優れたガラス製温度計で，産業技術総合研究所の成績書がついている。メーカーや一般ユーザーは，この二次標準器を使って校正された実用標準を得ることができる。この実用標準には，認定事業者からの比較検査成績書（図3）がついており，計測の信頼性が保証されている。さらにこの実用標準を使って市販のセンサを校正することができる。標準器の精度は上位のものほど高く，例えば二次標準器で校正した温度計は，二次標準器以上の高い精度を持つことはできない。また，実用標準も二次標準器も，経年的に劣化することで精度が低くなるので，定期的により高いレベルの標準器で校正する必要がある。

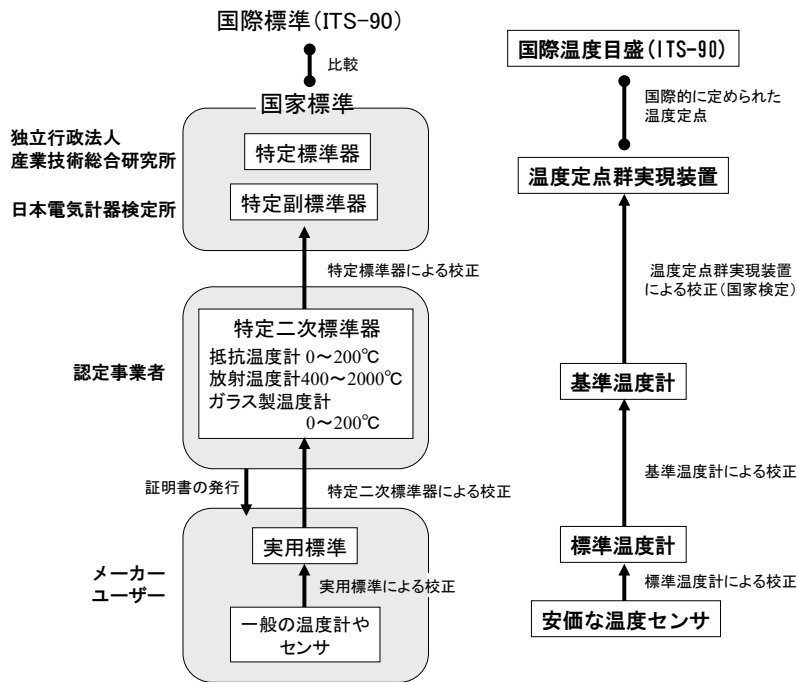



図2 温度のトレーサビリティ体系



比較検査成績書

器物の種類 標準二重管温度計 1号
 目盛範囲 0 ~ 50℃
 一目盛の値 0.1℃
 製造者記号 N
 器物の番号 No. 3186

当社基準温度計で検査をし次の値を得ました。

(1) 器差

表す温度 (℃)	器差
0	0.00
10	+0.10
20	+0.06
30	-0.03
40	-0.03
50	+0.03

(2) 器差の補正方法 真実の温度は表す温度から器差を減じて求める。


(3) 検査に使用した基準温度計の器物番号は No. 2901

(4) 温度計は検査する温度の目盛まで検査槽の液中に浸して検査したものである。

(5) 有効期間 平成15年7月8日から3年間
(期間終了後は再検査の必要あり)

(6) その他

平成15年7月8日



日本計器株式会社

図3 比較検査成績書の例

3. 温度計の種類・原理

目的とする対象の温度を正確に計測するためには、測器の特性や計測対象の状態、計測目的を十分に把握することが必要である。ここでは、温度計の種類および、使用上の注意点について解説する。

1) ガラス製温度計（液体封入温度計）

ガラス製温度計は細いガラス管に封入された水銀もしくは有機液体の温度による体膨張変化から温度を求める。ガラス製温度計で基準温度計と呼ぶものは、計量法に定められた検査に合格したもので、産業技術総合研究所の基準器検査成績書が付いている。なお、一般ユーザーは基準温度計を所有することはできない。標準温度計と呼ぶものは国が認定した事業者の検査成績書が付いている。

2) 熱電対温度計

異なる材質の2本の金属線を接続した閉回路において、両端の接続点に温度差が与えられると、その間に熱起電力が生じ、回路に電流が流れる（図1）。この現象をゼーベック効果といい、この2本の金属線を熱電対という。温度差と熱起電力との関係は多くの材質において十分に把握されていることから、熱起電力を測ることによって、両接続点間の温度差を求めることができる。

熱電対で測温接点の温度を知るには、基準接点の温度を一定にする、もしくは基準接点の温度に基づいて起電力を補正するための基準接点装置を設ける必要がある。データロガーには基準接点装置を備えたものもあり、多点の温度分布を計測するのに便利である。

熱電対は構造が単純で、比較的安価なことから温度計測に広く用いられている。熱電対には材質によっていくつかの種類が存在するが、微気象計測では比較的安価で、熱起電力が大きく、常温での直線性がよい銅・コンスタンタン熱電対（T型熱電対と呼ぶ）の直径0.1~0.5 mm程度のもが多く用いられる。速い応答が必要なときや、葉温計測など計測対象への影響を小さくしたい場合には、感部を小さくできる直径0.1 mm以下のものを、それ以外では0.3 mm程度のものを用いることが多い。T熱電対の出力は1°Cあたり約0.04 mV/°Cであり、出力を読み取るには微弱な電圧を計測できる測器が必要である。

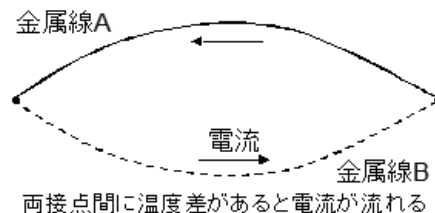


図4 熱電対の計測原理

3) 抵抗温度計

抵抗温度計は、温度によって電気抵抗が変化する材質を利用して温度を求める測器である。白金測温抵抗体、サーミスタ（温度によって抵抗値が大きく変化する半導体）を用いた温度計が代表的であ

る。これらは、熱電対と比較して高い出力が得られる、基準接点を必要としないといった特徴を持つ。

白金測温抵抗体を用いた温度計は高い精度(条件によっては 0.1°C 以上)が得られることから熱電対温度計、サーミスタ温度計とともに普及している。一般的に用いられる 0°C で 100 W の白金測温抵抗体(JPt100 Ω)では 1°C あたり約 0.4 W の抵抗が変化する。これは 2 mA の電流を流した場合、約 $0.8\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ に相当する出力であり、T熱電対の出力 1°C あたり約 $0.04\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ に対して約20倍である。白金測温抵抗体感部が比較的大きいため、応答は比較的遅い。このことは同時に放射などの外乱の影響を受けやすくなる要因となるので留意する必要がある。

サーミスタを用いた温度計は、抵抗変化が大きく感度がよい、センサ素子が小さいため熱容量が小さく応答が速い、安価であるといった特長を持つ。家庭電化製品に組み込まれている温度センサのほとんどはサーミスタと考えてよいだろう。欠点として、センサ素子ごとに抵抗値や温度特性にばらつきがあり、出力が非直線であることから、そのまま市販の記録計に接続して用いることは難しい。電子回路に組み込みやすいことから、最近はデータロガーと一体となり、バッテリーで駆動するサーミスタ温度計が比較的安価で販売されている。一般にこのタイプの安価な温度計は、応答が比較的遅く、精度も熱電対や白金抵抗体より劣ることが多いので精密計測には向かないが、記録計を含めると熱電対よりも安価に自記計測ができるので便利である。

4) バイメタル温度計

バイメタル温度計は、熱膨張率の異なる2種類の金属板を貼り合わせたバイメタルの温度変化による湾曲の度合いから温度を計測する。バイメタルの湾曲の度合いが、自記記録計のペンを動かすことによって温度を記録するものがある。精度は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度であるが、その場で気温の経時変化を確認できることから、室内温度や百葉箱内温度のモニタリングなどに用いられることが多い。

5) 放射温度計

放射温度計は物体からの特定範囲の放射強度を計測して温度を求める測器である。低温の物質は主に赤外線を放射し、その強度は物体の表面温度の4乗に比例する(ステファンボルツマンの法則)。したがって、特定範囲の赤外線の放射強度から物体の温度を求めることができる。

放射温度計は非接触で物体の温度を計測できることから、接触型温度計では植物の葉温の計測など接触計測が困難な計測対象に有効である。計測精度は比較的高く、また、応答時間が短い。センサの検出素子によっては時定数にして 0.1 秒の応答が可能であることから、短い時間での温度変化を捉えるのに適している。放射温度計はその機種ごとに特有の視角があるため、計測距離と計測範囲との関係を把握する必要がある。また、計測には計測対象の放射率(例えば植物葉では $0.96\sim 0.98$)をあらかじめ知る必要がある。

放射温度計は比較的小面積(1 mm^2 から数 10 cm^2 程度)の温度を測るスポット計測であるが、より広い、面的な温度分布を測るための走査型の計測装置もある。これらはサーマルカメラ、サーモグラフィなどによれば、物体の表面温度の分布を熱画像として得ることができる。

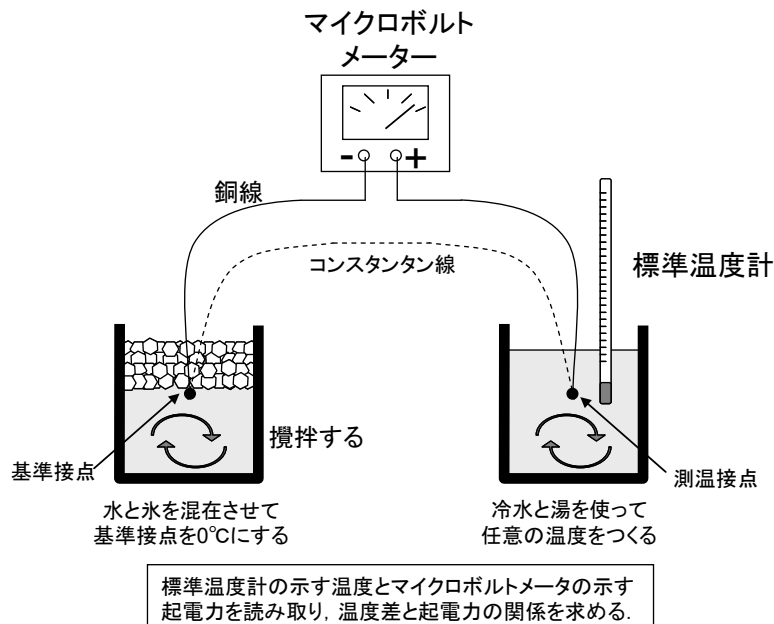
4. 熱電対の検定

あらゆる環境計測において、測器が正しく計測できることを確かめる作業（検定、または校正という）は重要である。検定をせずに計測をおこなうことは、計測していないことと同じようなものである。ここでは熱電対を例にして、検定作業の概要を説明したい。

熱電対は温度差によって生じる熱起電力から温度差を求める測器である。熱起電力から温度差を知るには、温度差と熱起電力との関係を求めておく必要がある。図2のように熱電対の閉回路の一部をマイクロボルトメーターに接続して、閉回路内で発生した起電力を計測できるようにする。熱電対の一端を氷の入った水に入れ、もう一端を任意の温度にさせた水の中に入れる。氷の混在した水はほぼ 0°C に保たれるので、これを 0°C の基準接点とし、もう一端を測温接点とする。測温接点の水の温度を数段階に変え、標準温度計を用いてその温度を計測する。また、マイクロボルトメーターを用いて起電力を計測する。これによって熱電対は標準温度計によって検定され、起電力から温度を正確に計測することができる。検定の精度を高めるためには、基準接点の温度を 0°C に保つこと、測温接点付近の温度を正確に計測することが必要である。

測温接点の温度を正確に計測するには、より精度の高い温度計が必要である。一般に、熱電対自体は高い精度で温度計測ができるとされているが、精度の低い温度計を用いて検定をすれば、検定された熱電対の精度はそれ以下のものとなるので注意しなければならない。

最近では、基準接点を備えたデータロガーが比較的安価で市販されているので、このような熱電対の検定を行う必要はほとんどない。しかし、温度計のトレーサビリティを理解するために、このプロセスを経験することは重要である。



5. 実験方法

熱電対の作製

実習では線径 0.32 mm の T 型 (銅-コンスタンタン) 熱電対を用いる。銅線とコンスタンタン線をねじり合わせ、はんだで接合する。両端についておこなう。接合方法には溶接によって行う方法などいろいろとあるが、実用上ははんだ付けで十分である。熱電対の応答を早くするためにはできるだけ感部は小さくするとよい。被覆を剥がした金属線は腐食などによって劣化しやすいので、保護のためにマニキュアや接着剤などを用いて表面を被覆する (図 6)。

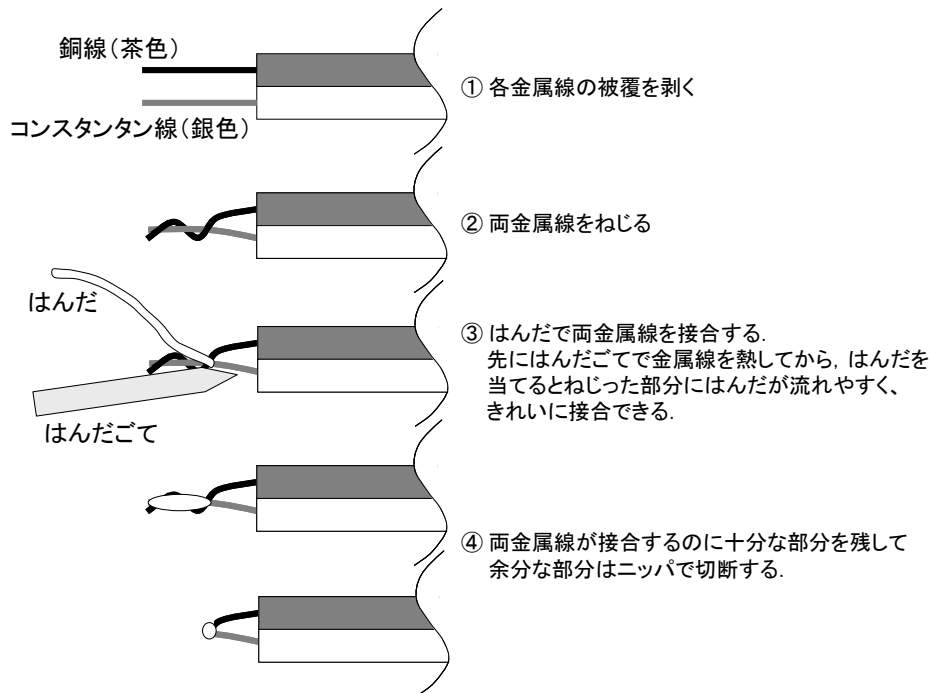


図 6 熱電対接点の接合方法

熱電対の検定

- ・ 熱電対の閉回路の銅線を途中で切り、マイクロボルトメーターに接続する (図 2 参照)。
- ・ 熱電対の接点の一端を基準接点、もう一端を測温接点とする。
- ・ 魔法瓶に水と細かく砕いた氷を入れ、攪拌することによって水の温度を 0°C に保つ。その中に基準接点を入れる。水の量はなるべく多い方がよい。
- ・ 魔法瓶に冷水に入れ、測温接点を入れる。
- ・ 測温接点の入った水を攪拌しながらガラス製温度計で水温を計測し (温度計で攪拌しないこと)、マルチメーターで熱電対の起電力を計測する。そのときの温度と起電力を記録する。温度は 0.1°C 単位で、起電力は μV 単位で記録すること。
- ・ 湯を用いて測温接点の温度を段階的に高くしていき、同様の計測を繰り返す。10°C 間隔で 0~40°C の範囲で行うことを目安とする (正確に 10°C 間隔にする必要はない)。

6. レポート

実験の目的、計測原理・計測方法を分かりやすく正確に記述すること。このテキストに書いてある内容を写すだけでは不十分である。結果は図や表にまとめ、そこから読み取れることを文章で簡潔に説明すること。測定したデータすべてをレポートに書く必要はない。図や表は何を伝えたいのかをよく考えて作成すること。単位は正確に記述すること。下記の内容について算定・考察すること。他の項目について考察しても構わない。

温度と起電力の関係

温度と起電力の関係をグラフ化して、その関係を数式で示し、検定結果の「不確かさ」について述べよ。「不確かさ」の要因について、考えられる理由を具体的に挙げ、どのようにしたらその「不確かさ」を減らすことができるかを客観的に考察すること。さらにこの温度計測（熱電対とマイクロボルトメーターを用いた温度計測）における「分解能」は何℃であるか述べよ。

他の環境計測について

温度以外の環境計測についてのトレーサビリティ体系を調べて、分かりやすく説明せよ。引用は出版物が望ましい。ネット情報をそのままコピーしないこと。引用については出典を明記すること。

- ・ 〆切：12月28日（月）。授業支援システムを使って電子ファイルを提出すること。
- ・ A4用紙2枚以内。表紙は付けない。PDFファイルに変換すること。

7. 参考図書

- ・ 「温度計の正しい使い方」、(社)日本電気計測器工業会編、日本工業出版、¥2,500
- ・ 「ISO規格等に基づく計測の基礎 SI単位と不確かさ」、関和雄著、東京電機大学出版局、¥2,100
- ・ 「はじめての計測技術」、上野滋著、工業調査会、¥2,000
- ・ 「実用温度計測」、松山裕著、省エネルギーセンター、¥2,600
- ・ 「農業気象の測器と測定法」、日本農業気象学会編、農業気象協会、¥4,300
- ・ 「農業環境実験法」、渡辺一郎編、サイエンスハウス、¥3,600
- ・ 「新版生物環境調節ハンドブック」、生物環境調節学会編、養賢堂、¥13,000
- ・ 「気象・生物・環境計測器ガイドブック」、気象・生物・環境計測器ガイドブック編集委員会編、農業気象学会
- ・ 「農学・生物学系のための電気電子計測」、丹羽登監修、橋本康編著、オーム社、¥2,800