

温度測定(II) —設計どおりの機能の確保—

三井清人*

温度測定(I)

—工業用計器を中心として—

1. はしがき
2. 温度測定の手法の選択
3. 温度計の機能とその表示法
4. 実用温度計の種類と特長

—以上「熱測定」Vol.3, No.3

5. 温度計測システムの総合機能

前節までに、計測の目的、温度範囲、精度、測定条件などに合わせて温度検出器を選ぶ段階まで話を進めた。次は、測定対象から出発してその温度を数値として取り出すまでの計測システム全体の設計及び機能維持に関する話に移る。

本講座の冒頭にも述べたように、温度計測技術においてはシステム設計という戦略決定の段階が特に重要であり、得られたデータの有効性を大きく支配する部分である。そうであるのに、この部分に関する通則や系統だった指針が不足しているのが現状である。以下に述べるのは、筆者が試みに行ったこの種の問題の整理であり、これに対する現場からのフィードバック情報を得て、将来さらにこの肉付けを図りたいと思う。

工業上の温度計測技術に関する問題点は色々の経路から筆者の見聞に達するが、これらを概観すると、温度検出器の性能そのものが問題となる例は比較的少なく、計測の目的に照らしてみても、より肝要なポイントとなるのは次のような事柄である。実験室における計測の場合も、ほぼ同様な事情にあることが多い。

- i) 温度検出器の取付け場所
- ii) 温度検出器の取付け方法
- iii) 必要な情報からみた適当な温度検出器の数
- iv) 検出器にマッチした表示計器の選び方
- v) システムとしての総合機能の検査
- vi) 使用中の精度管理
- vii) 環境因子の影響と校正周期

これらの項目のそれぞれについて一般的注意事項を述

べるとすれば、かなり抽象的な表現にならざるを得ない。そこで、実際に役立つ具体的な指針を作るには、各現場においてそこでの事情に最も適した方法をルール化しておくことが推奨される。その際に考慮に入れるべき主な事柄を次節以降で述べるが、説明の便宜上、温度計測システムを図1の形の一般的モデルに還元して表わし、各要素とその相互間の関係について図中に記入した用語を用いることとしたい。

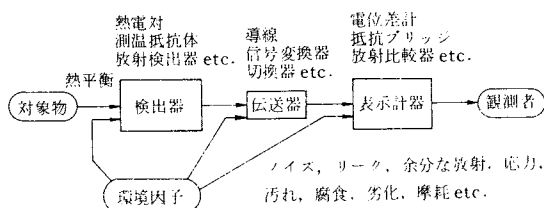


図1 温度計測システムのモデル

いうまでもなく、温度計測システムが正しい機能をもっているということは、測定対象の温度に正しく対応した数値を表示計器が表示していることである。この関係は、図1に示した情報の流れのどこか1個所に支障があっただけでそこなわれる。図1においてブロックで示した各々のユニットには、その入力と出力の間に定められた関係を保つ機能が要求されているが、その機能に支障が起る様態は、測定情報が正しく伝わらない場合と、余分な情報(外乱)が加わる場合とに大別され、後者に対して周知な検討を行うことは厄介である。計器類の出力は、本来の入力量以外のいくつかの因子の影響を受けるのが普通であって、ここではこれらの因子、即ち本来の入力量以外の因子を総称して環境因子と呼ぶことにする。注意すべきは、環境因子の中には周囲温度の変化や電磁気ノイズなどのように一時的(可逆的)な変化を及ぼすもののほかに、化学的作用などのように永久的(不可逆的)な変化を入力関係に与えてしまうものがあることである。この種の因子の影響を管理下において計測システムの機能を維持するには、定期的に検査・校正を行い、その結果を記録しておくことが要求される。

6. 対象物と温度検出器との関係

いうまでもないことであるが、対象物と温度計との間

* 工業技術院計量研究所：東京都板橋区加賀1-10-1
Kiyoto Mitsui: National Research Laboratory of
Metrology

の望ましい関係は、接触方式においては良好な熱接触を得ること、非接触方式（放射温度計測）においてはまず第一に対象物がよく見えて、放射温度計の視野をカバーすることである。この“猫に鈴をつける”段階の問題は、計測の成否を大きく支配する性質のものであるが、一般には大ざっぱな指針しかないので、高い精度を望む場合にはユーザー自身がくわしい検討を行わなければならない。代表的な場合について、主な問題と対策を例示的に述べる。

保護管に納めた電気式温度計（測温抵抗体、熱電対など）やガラス製温度計を、対象物の中へさし込んで熱接触を図るという場合を考える。これは、 $-200 \sim +1,600$ ℃の範囲の温度計測に最も多く用いられる方法である。まず第一に検討すべきことは、温度検出素子の位置が対象物の代表温度を計るのに適しているかどうかであり、次には、保護管に沿う熱伝導及び周囲からの放射に比べて十分によい熱伝導が対象物と検出素子の間にあるかどうかである。多くの場合この2つの問題は互いにかみ合っており、しかも計測の目的あるいは課題の定義に最も深くかかわる部分である。何が対象物であるのかを改めて考えながら、状況に応じて次のような対策の当否を検討すべきである。

- i) 測定対象の定義を明確にし、温度検出器先端部のある程度の長さ（必要とする精度による）が対象物内の等温線に沿うように配置する（図2参照）。
- ii) さし込み深さが十分かどうかを試験するために、さし込み深さを変えるか、保護管の太さや肉厚を変えて測定を行う。およその目安として、 $-100 \sim +500$ ℃程度の領域で精度 ± 0.5 ℃の測定を行おうとすれば、少なくとも保護管直径の15～25倍のさし込み深さが必要である。
- iii) 対象物が熱伝導のよくない物質である場合には、検出素子との接触面積を広げると同時に、熱伝達を

増す工夫をする。対象物が静止した液体または気体の場合には、適当なかくはん、あるいは検出素子との相対運動を行わせるよう配慮する。静止した気体中に接触温度計をおいた場合の時定数はふつう数10分のオーダーである。自然対流の助けを借りる場合には、その効果の程を実際に確かめることがぜひ必要である。

- iv) 放射による誤差を生じる可能性を検討し、必要に応じて放射シールドを設ける等の対策を講じる。放射シールド自身の温度は対象物の温度と同じであることが理想であり、精密測定の場合にはこの温度と検出素子温度との差を実測し、差が大きい場合にはシールドを多重化したり、影響の程度を調べて補正を行う。
- v) 対象物内の温度分布を知ることは、対象物内の熱流の向きと大きさを推定して熱伝導誤差や遅れによる誤差の程度を知る上で意味が大きい。事情が許せば2個以上の検出器を適当に配置する。
- vi) 温度検出器が対象物に与える影響を検討して、必要な対策や補正を行う。保護管に沿う熱流（場合によっては保護管途中の温度を測定して熱流補償を行う）、余分な発熱（運動流体の場合）、予想外の温度場の乱れ（自然対流のパターンの変化その他）などを検討すべきである。

なお、この方式の検出器取付けに関して、固体測温孔内に検出器をさし込んで用いる場合の注意をつけ加えておく。この場合、測温孔と検出器保護管の直径ができるだけぴったりしていることが望まれるのはもちろんであるが、常温付近や低温領域では、すきまに適当な液体を入れて熱伝達を増すことが一般に推奨される。シリコンオイル、シリコングリス等を用いる例が多い。

次に、接触型温度検出器（電気式）の素子部分だけを対象物に密着させる場合について述べる。これは、実験室での精密計測に多用される方式であり、特に真空中や低温での計測には必須の方式である。実験室で多く使用される温度検出素子の大きさは、熱電対及びサーミスタ等では直径約0.5mm程度、白金測温抵抗体では抵抗線固定型の場合直径2～4mm、長さ10～40mm、無歪巻の精密型（カプセル型）の場合直径4.5～5mm、長さ40～50mmである。表面温度の計測には、薄膜型の熱電対及び抵抗素子が用いられる。また、直径0.5～5mm程度のフレキシブルな保護管中に熱電対または抵抗素子を絶縁して納めたスース型素子が、このような密着取付方式で便利に使用されることがある。

この取付方式に特有のことごとくとして、一般に次の注意が必要である。

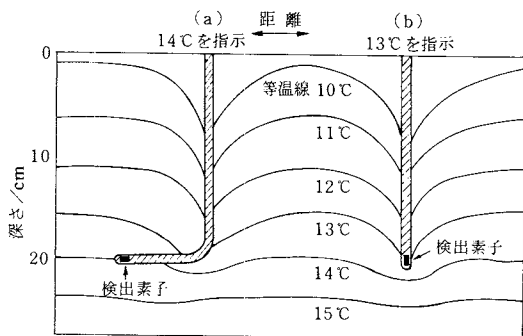


図2 土壌温度測定における検出器取付けのよい例(a)とよくない例(b)

- i) 一般に検出素子に対する保護が不十分であるから、雰囲気の影響や機械的衝激、電氣的リーク、ノイズ等に十分な注意を払う。
- ii) 保護管付きの場合と同様に、検出素子からある程度の長さの導線や支持材は、等温線に沿うように配置する。保護管付きの場合と異なるのは導線などがフレキシブルである点であり、屈曲させたり巻きつけたりして限られたスペースの中でも十分な長さをとれるなどの利点がある。
- iii) 検出素子が小さいという利点を生かして対象物に密着させる工夫をする。ただし、多くの場合電氣的絶縁を必要とするので、これを確保しながら良い熱接触を得るための材料と構造が問題となる。マイカ、ガラス、ポリマーなどの膜または管、あるいはガラス繊維、紙などと含浸材を組合せて圧着あるいは接着するなどの方法がよく用いられるが、使用温度域全体で耐久性があり、蒸気圧が小さいことが望まれる。絶縁されたシース型検出器及びカプセル型検出器は、金属性に対象物に直接に溶接やろう付けを行ってもよい。以上の密着は導線部のある長さにわたっても行わなければならない。
- vi) 真空中、極低温下あるいは断熱状態での精密計測においては、導線などの途中で適当なヒートアンカー（対象物に近い温度の物体への接触）を設けて、導線などに沿って対象物へ熱が出入りすることを防ぐ注意が必要である。また、器壁を通過して導線などを常温・常圧部へ取出すフィードスルーの構造について、電気測定上の誤差を起さぬ工夫が必要である。

放射温度計と対象物との関係についての具体的な注意事項は、手法や機器、あるいは対象物の種類や状況によってその重点が大きく異なるので、ここでは、一般的・共通的な事項を述べるにとどめる。

放射を用いて正しい温度を求めるには、用いる波長帯域における対象物の放射率（計測される状態（形や表面状態）での実効値）を知ることがぜひとも必要である。多くの場合、この値は推定によらざるを得ないが、正確さを期するにはできるだけ再現可能で完全放射体（黒体）に近い状態を作って観測することが望まれる。例えば、固体や液体の内部の温度を計測するのに、一端を閉じた耐火物の筒を対象物にさし込んで、その底の部分を放射温度計で観測することが行われる。

放射から温度を求めるには、何らかの方法で対象物からの放射と標準放射とが比較されるが、この比較が正当に行われているかどうかをよく検討する必要がある。対象物の大きさが、放射温度計が必要とする見込み角に比べ

て十分であるか（光高温計のように対象物を視定するものでは視野を十分に覆うように、また、この関係が距離係数で指定されている場合は、例えば距離係数が100であるなら直径1 cmの対象物は100 cm以内の距離から観測する）、光路の途中での放射の吸収、散乱などはどうか、特に、用いる波長帯域内に吸収バンドをもつ物質が介在していないか、対象物以外からの放射（迷光）が影響していないか、などを検討しなければならない。

7. 温度検出器と表示計器との関係

温度検出器とその出力表示計器とのそれぞれが、独立の計器として製造・販売され、適宜に組合わされて用いられているのは、接触方式の電気式温度計の場合にはほぼ限られる。従ってここでは、熱電対と測温抵抗体、及びそれらの出力表示用計器の場合を中心に述べるが、環境因子の影響などの問題は他の器種にも共通している。

まず第1に、検出器と表示計器とが性能の上でマッチしていることが重要であるが、これは計測の目的とも深くかかわる問題である。再現性（安定性）、感度、応答などの諸特性のいずれにおいても、計測システムの総合性能は、その中の最も劣る要素機器に支配されることはいうまでもなく、それが要求性能を満たすものでなくてはならない。その意味では、表示計器の性能は検出器のそれを上回るもの、言いかえれば良すぎるくらいのものが望まれるが、費用の点では検出器に比べて表示計器の方がはるかに高価であるため、実際には逆にならざるを得ない場合も多い。しかしながら、使い方の工夫や良い管理によって、公称性能以上を得ることも可能であり、実験室ではこのような例も多く見られる。

最も高精度を必要とする場合には、検出器として無歪巻きの白金抵抗体が用いられるが、これにマッチする精密抵抗測定器としては、6桁以上の表示機能をもち、再現性が ± 1 ppm程度（ ± 1 mKに相当）のブリッジまたは電位差計（いずれについても、測定電流として直流を用いるものと交流を用いるものがある）が用いられる。導線抵抗による誤差、寄生起電力による誤差などを除くために様々な工夫がほどこされ、それぞれに特色をもった製品（多くは外国製）が市販されている。計測標準の維持などの目的に多く使用されている代表的器種の特徴を表1に示す。このような精密測定器は、次節で述べるような定期的な（3～12ヶ月ごとの）検査や校正を行わなければ所期の性能を発揮できない。一方、このような機器を用いて6桁程度のデータを採録するには、数10秒ないし数分の時間が必要である。従って、対象物の温度がよく安定している（例えば変化速度が $1\text{mK}/\text{min}$ 以内の場合でない）と末尾の桁まで正しい結果が得られな

表1 主な精密抵抗測定器(1 ppm級)の特徴

器種	主な構成要素	特徴	製品例	
直流ブリッジ	ミューラーブリッジ	比例辺抵抗器, デケイド抵抗器, 導線切換器	切換器を操作して2回測定を行うことによって導線抵抗と寄生起電力を消去する	ミューラーブリッジ (リース&ノースラップ) (ティンズレイ)
	スミスブリッジ	比例辺抵抗器, デケイド抵抗器, 電流逆転器	導線抵抗がある程度まで等しければ, 1回の測定で7桁のデータ採取が可能	スミスブリッジ (ティンズレイ)
	カスターブリッジ	捲線比による電流比較器, 等電位検出器	抵抗比測定器であり, 分割精度(ダイヤル校正値)の長期安定性が特長, 自動化可能	DCCブリッジ(ギルドライン) 抵抗レンオメータ(タケダ理研)
交流ブリッジ	ケルビンブリッジ	2個の変成比インダクタンス, 位相敏感型零点検出器	抵抗比測定器であり, 捲線比によって測定値が得られる, 回路の切換えなしに導線抵抗, 寄生起電力を消去, データ採録自動化が比較的容易	インダクティブアームブリッジ (ティンズレイ) 自動交流ブリッジ (オートマテック・システム・) (ラボラトリー)
	変成比ブリッジ	交流電圧比変成器, 位相敏感型零点検出器		
直流電位差計	デケイド抵抗による電圧分割器, 検流計, 回路切換器	標準抵抗との比較器として用いる, 1個のデータ採取に電流逆転を含めて4回の測定が必要, 測定レンジが広い	電位差計 リース&ノースラップ ティンズレイ ギルドライン	
交流電位差計	変成比インダクタンスによる交流電圧分割器, 位相敏感型零点検出器	回路の切換えなしに寄生起電力を消去, 自動化が比較的容易, 測定レンジが広い	ACポテンショメータ (オートマテック・システム・) (ラボラトリー)	

い。変化する温度を追跡する必要があるときや自動制御の目的には, 導線切換え, 電流逆転などの操作が不要か, あるいは自動化されている器種を用い, 平衡検出器の出力を温度に換算して記録, あるいは制御に用いることが行われる。

工業計測用の白金測温抵抗体やサーミスタなどの検出器に対しては, 表1の測定器の桁数の少ないものが用いられるほか, 最近ではデジタル電圧計, 抵抗計などが多く用いられる。これらの機器の測定原理は多様であり, 個別に検討する必要があるが, 精度を限定する要素は多くの場合内部にもっている標準電圧(ツェナーダイオード), 標準抵抗などの安定性である。また, この種のエレクトロニックな測定器は入力インピーダンスが大きいという特徴をもっているが, ブリッジ等に比べて一般にノイズの影響を受けやすいことに注意しなければならない。

熱電対の出力である起電力の測定には, 表1に示した直流電位差計や上述のデジタル電圧計などが用いられるが, この場合には測温抵抗体の場合と違って電圧の絶対値が必要であり, その標準の維持管理には標準抵抗の場合よりも神経を使わなければならない。また, 熱電対を用いて温度の絶対値を求めるには, 基準接点の温度を確定しなければならない。氷点などの定点を用いることが多いが, 基準接点に測温抵抗体を取りつけて, 0℃との温度差に相当する起電力を電氣的に補償する例も多い。

温度検出器と表示計器の間に介在する実行上の問題は広義のノイズとリークという形に概括できる。その原因となるのは, 熱電対素線・導線の不均質による寄生起電力, 切換器・ターミナルの性能不良, 導線間の絶縁不良・誘導, 外来の電磁波に対するシールド不良などである。

寄生起電力の中には, 例えば導線接合部のターミナルに風が当たって温度がゆらぎ, 平衡検出器の指示がふらつくといったような周期数秒のものもあれば, 熱電対素線や導線(これらはいずれも必ず温度勾配を受ける)中に徐々に発生する不均質のように, 数100時間で影響が現われるといったものもある。後者のような因子のチェックは, 定期的な検査とその記録の整理・保存によって初めて可能である。

多数の検出器の出力を, 切換スイッチで選択して順次に多点測定する例がよくあるが, この目的に用いる切換器(スキヤナー)の性能はきびしく吟味しなければならない。ノイズや寄生起電力を0.1 μV以下にしようとするれば, 接点の材質・構造, 温度の安定化, 電磁シールドなどに特別な工夫を必要とする(市販品については特註が必要)。

8. 現場における校正と精度管理

温度標準の出発点は, 国際単位系(SI)の基本単位の1つである“熱力学温度の単位ケルビン(記号:K)”であり, その大きさは水の三重点の温度の1/273.16と定義されている。なお, セルシウス度(記号:℃)もSI単位であり, その大きさはケルビンと同じである。ケルビンで表わした温度 T とセルシウス度で表わした温度 t との関係は, $T/K = t/℃ + 273.15$ である。

SI単位に基づいた温度計測を行うには, この単位をもとにして作られている国際温度標準, 即ち“1968年国際実用温度目盛(IPTS-68)”¹⁾によって校正された標準温度計か, またはこのIPTS-68に対するトレーサビリティ(校正の経路が確立されている度合い)が明らかな温度計を用いなければならない。その場合に注意を

要することは、温度計の校正値というものは、校正時の条件（おそらくは使用現場では再現しがたい理想的な条件）での温度（入力）と指示（出力）との関係を与えるものであって、条件が異なったり、また校正してから長時間経過した後では必ずしも正しくないことである。使用現場での校正や検査は、この点を確かめる重要な意味をもっている。

温度計（温度検出器）の入出力関係は、原則的には1個ごとに異なっていると考えるべきであるが、同種類の計器の特性はある程度まで似かよっているので、本稿(I)において示したようなその器種の代表的な特性をベースとして、個々の特性とこれとの差を求めるという形で校正が行われるのがふつうである。この作業を行うには、必要な温度範囲で入出力関係を決定するのに十分な個数の基準温度を作り、その温度における計器の指示を求める。必要な基準温度の個数、言い換えれば校正点間隔は、その計器の特性がどの程度よく知られているかということと、必要とする精度によってきまる。特性がよく把握されている代表例である精密型白金测温抵抗体 ($R(100^\circ\text{C})/R(0^\circ\text{C}) \geq 1.3925$ のもの) の場合には、 $-183 \sim +630^\circ\text{C}$ の範囲に4個の基準点、即ち約200°Cおきに1個の基準点があれば、この範囲で精度 $\pm 1\text{mK}$ の目盛定めが可能である。規格熱電対の場合は、50~100°Cおきに校正点をとる例が多く、代表的特性からの

差をスムーズな関数で近似して用いる方法が推奨される。

予じめ校正された温度計の特性を現場の条件でチェックするために行う検査においては、1~3点程度の基準点を設けるだけで十分な効果をあげることができる。くわしい校正を要することがわかった場合には、計量研究所、日本電気計器検定所、公設工業技術センター、計測器メーカーなどに依頼して再校正を行うのが一般によい管理方法といえる。

校正や検査に用いる基準温度を作るには、以下に述べるように標準温度計による方法（比較法）と温度定点による方法（定点法）とがある。

8.1 比較法

すでに他の機会に十分な精度で校正されている標準温度計の指示を正しい温度とみなして行う校正法であり、これを実行するには、使用する温度計のそばに標準温度計を一時的に取付けて同時測定を行う方法と、使用する温度計を対象物から取りはずして標準温度計とともに比較用温槽に入れて行う方法とがある。校正の精度は、標準温度計の精度と比較装置の良否によってきまるが、特に注意すべきは、異種の、あるいは形の異なる温度計を比較する場合に、熱接触状態や遅れの違いによって予想外に大きな誤差が生じることである。比較法に用いる主な標準温度計及び標準器を表2に示す。

比較装置としては、液体温槽（使用液体の例を低温側

表2 比較法による校正のための標準器

標準器の種類		温度範囲	最高精度
ガ ラ ス 製 温 度 計	最小目盛 0.1°C	0°C~100°C -50°C~0°C, 100°C~300°C	±0.03°C ±0.05°C
	以下	300°C~360°C	±0.1°C
	最小目盛 0.2°C	0°C~100°C	±0.05°C
		100°C~200°C	±0.06°C
		-50°C~0°C, 200°C~300°C 300°C~360°C	±0.1°C ±0.15°C
	最小目盛 0.5°C	0°C~100°C	±0.1°C
		-50°C~0°C, 100°C~300°C	±0.2°C
		300°C~360°C	±0.3°C
		-50°C~200°C	±0.2°C
	最小目盛 1°C	200°C~360°C	±0.3°C
		360°C~450°C	±1.0°C
		450°C~600°C	±2.0°C
白金测温抵抗体		-260°C~630°C 定義定点において	温度に換算して ±0.02°C " ±0.01°C ~ ±0.002°C
白金・ロジウム10/白金熱電対 PR熱電対(JIS)		0°C~1100°C 1100°C~1500°C 定義定点において	" ±1.0°C " ±3°C " ±0.2°C
光高温計用 標準リボン電球	大 型	900°C~1500°C 1500°C~2000°C	" ±5°C " ±6°C
	小 型	900°C~2000°C	" ±10°C

表3 IPTS-68の定義定点¹⁾

平 衡 状 態	国際実用温度の与えられた値	
	T_{68}	t_{68}
平衡水素の固相、液相及び気相の間の平衡(平衡水素の三重点) 33330.6 Pa(25/76標準気圧)の圧力における平衡水素の液相と気相の間の平衡	13.81 K	-259.34 °C
	17.042 K	-256.108 °C
平衡水素の液相と気相の間の平衡(平衡水素の沸点)	20.28 K	-252.87 °C
ネオンの液相と気相の間の平衡(ネオンの沸点)	27.102 K	-246.048 °C
酸素の固相、液相及び気相の間の平衡(酸素の三重点)	54.361 K	-218.789 °C
アルゴンの固相、液相及び気相の間の平衡(アルゴンの三重点)	83.798 K	-189.352 °C
(酸素の液相と気相の間の平衡(酸素の露点))	90.188 K	-182.962 °C
水の固相、液相及び気相の間の平衡(水の三重点)	273.16 K	0.01 °C
(水の液相と気相の間の平衡(水の沸点))	373.15 K	100 °C
すずの固相と液相の間の平衡(すずの凝固点)	505.1181 K	231.9681 °C
亜鉛の固相と液相の間の平衡(亜鉛の凝固点)	692.73 K	419.58 °C
銀の固相と液相の間の平衡(銀の凝固点)	1235.08 K	961.93 °C
金の固相と液相の間の平衡(金の凝固点)	1337.58 K	1064.43 °C

1) すべての三重点と平衡水素の一つの定点(17.042 K)とを除き、与えられた温度値は、
圧力 $P_0 = 101325 P_0$ (1標準気圧)における平衡状態に対するものである。

からあげると、液化ガス、ベンジン、アルコール、フロン、水、シリンダー油、シリコン油、硝子(その他)や熱伝導のよい金属ブロックなどが用いられ、放射温度計の場合には黒体炉や標準電球が用いられる。温度の安定性と一様性が重要であることはいうまでもない。

8.2 定点法

定点法による基準温度は自然現象に基づくものであって、世界中どこでも、またいつ実現しても一定不変であることが大きな特長である。必要な精度に比べて十分な純度の試料物質(大ざっぱに、 $\pm 1 \text{ mK}$ の精度を得るには10 ppmの純度が必要)を用い、真の平衡温度を与えるような装置と方法を選ぶことが大切である。最適の手法は、試料物質の特性によっていろいろであり、一概に述べることはできないが、高精度を必要とする場合には数10 g~1 kg程度の試料を用い(ただし、蒸気圧を静的

に測定する場合は1 g程度)、定点セル、るつぼ等の中でゆっくり相変化を行わせる。簡便に実現するには、金属線溶融法(熱電対の測温接点を切離してその間に試料物質(長さ5 mm程度の金属線)をつなぎ、電気炉の中で加熱して融解点を観測する方法)あるいは類似のやり方によって、1 g以内の微量の試料で $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 程度の精度を得ることができる。

広く用いられる定点として、IPTS-68の定義定点を表3に、また、IPTS-68(75年修正版)に収録されている二次基準点を表4に示した。

文 献

- 1) 計量研究所, “1968年国際実用温度目盛” コロナ社(1971)

表 4 二次基準点¹⁾

平衡状態 ²⁾	国際実用温度		平衡状態	国際実用温度	
	T_{68} (K)	t_{68} (°C)		T_{68} (K)	t_{68} (°C)
標準水素の固相、液相および気相の間の平衡(標準水素の三重点)	13.956	-259.194	安易香酸の固相、液相および気相の間の平衡(安易香酸の三重点)	395.52	122.37
標準水素の液相と気相の間の平衡(標準水素の沸点)	20.397	-252.753	インジウムの固相と液相の間の平衡(インジウムの凝固点) ³⁾	429.784	156.634
13.956Kと30Kとの間の温度領域では			ビスマスの固相と液相の間の平衡(ビスマスの凝固点) ³⁾	544.592	271.442
$\log \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$			カドミウムの固相と液相の間の平衡(カドミウムの凝固点) ³⁾	594.258	321.108
$A = 1.734791$			鉛の固相と液相の間の平衡(鉛の凝固点) ³⁾	600.652	327.502
$B = -44.62368K$			水銀の液相と気相の間の平衡(水銀の沸点)	629.81	356.66
$C = 0.0231869K^{-1}$			$p = 90kPa$ から $104kPa$ までは		
$D = -0.000048017K^{-2}$			$t_{68} = \{ 356.66 + 55.552 (\frac{p}{p_0} - 1) - 23.03 (\frac{p}{p_0} - 1)^2 + 14.0 (\frac{p}{p_0} - 1)^3 \} ^\circ C$		
ネオンの固相、液相および気相の間の平衡(ネオンの三重点)	24.561	-248.589	いおうの液相と気相の間の平衡(いおうの沸点)	717.824	444.674
ネオンの液相と気相の間の平衡			$p = 90kPa$ から $104kPa$ までは		
24.561Kと40Kの間の温度領域では			$t_{68} = \{ 444.674 + 69.010 (\frac{p}{p_0} - 1) - 27.48 (\frac{p}{p_0} - 1)^2 + 19.14 (\frac{p}{p_0} - 1)^3 \} ^\circ C$		
$\log \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$			銅-アルミニウム共融合金の固相と液相の間の平衡	821.41	548.26
$A = 4.61152$			アンチモンの固相と液相の間の平衡(アンチモンの凝固点) ³⁾	903.905	630.755
$B = -106.3851K$			アルミニウムの固相と液相の間の平衡(アルミニウムの凝固点)	933.61	660.46
$C = -0.0368331K^{-1}$			銅の固相と液相の間の平衡(銅の凝固点)	1358.03	1084.88
$D = -4.24892 \times 10^{-4}K^{-2}$			ニッケルの固相と液相の間の平衡(ニッケルの凝固点)	1728	1455
窒素の固相、液相および気相の間の平衡(窒素の三重点)	63.146	-210.004	コバルトの固相と液相の間の平衡(コバルトの凝固点)	1768	1495
窒素の液相と気相の間の平衡(窒素の沸点)	77.344	-195.806	パラジウムの固相と液相の間の平衡(パラジウムの凝固点)	1827	1554
63.146Kと84Kの間の温度領域では			白金の固相と液相の間の平衡(白金の凝固点)	2042	1769
$\log \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \log \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$			ロジウムの固相と液相の間の平衡(ロジウムの凝固点)	2236	1963
$A = 5.893271$			アルミナの固相と液相の間の平衡(アルミナの凝固点)	2327	2054
$B = -403.96046K$			イリジウムの固相と液相の間の平衡(イリジウムの凝固点)	2720	2447
$C = -2.3668$			ニオブの固相と液相の間の平衡(ニオブの融解温度)	2750	2477
$D = -0.0142815K^{-1}$			モリブデンの固相と液相の間の平衡(モリブデンの融解温度)	2896	2623
$E = 72.5872 \times 10^{-6}K^{-2}$			タンダステン ⁴⁾ の固相と液相の間の平衡(タンダステンの融解温度)	3695	3422
$T_0 = 77.344K$					
アルゴンの液相と気相の間の平衡(アルゴンの沸点)	87.294	-185.856			
酸素の液相と気相の間の平衡					
54.361Kと94Kの温度領域					
$\log \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \log \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$					
$A = 5.961546$					
$E = -467.45576K$					
$D = -0.01321301K^{-1}$					
$E = 50.8041 \times 10^{-6}K^{-2}$					
$T_0 = 90.188K$					
無水炭酸の固相と気相の間の平衡(無水炭酸の昇華点)	194.674	-78.476			
194Kと195Kの間の温度領域では					
$T_{68} = \{ 194.674 + 12.264 (\frac{p}{p_0} - 1) - 9.15 (\frac{p}{p_0} - 1)^2 \} K$					
水銀の固相と液相の間の平衡(水銀の凝固点)	234.314	-38.836			
氷と、空気飽和した水との間の平衡(氷点) ⁴⁾	273.15	0			
フェノキシベンゼン(ジフェニルオキシド)の固相、液相および気相の間の平衡(フェノキシベンゼンの三重点)	300.02	26.87			

1) この表に記載した温度は編集するに当って使用し得る最もよいものである。現在、この温度の正確さを示すことにはできないが、誤差は記載数字の最後の桁のいくつかがである。国際度量衡委員会のもとでこれらの温度の正確さの評価がなされ、時々公表されること が期待される。

2) この表の中では、平衡状態は圧力 $p_0 = 101325 Pa$ (1標準気圧) である。ただし、三重点と明らかに許容される圧力範囲とはこの例でない。

3) これらの凝固点に対する圧力変化の影響については IPTS テキストの表 5 を参照。

4) 氷点は水の三重点より 10mK 低い温度に非常に近い。