

解 説

UDC 536.5.088 : 536.5.081

測 温 の 精 度 と 標 準 に つ い て*

(国際温度標準の変更にあたって)

高 田 誠 二**

Accuracy and Standards of Temperature Measurement

Seiji TAKATA

1. 序説—温度計測標準のトレーサビリティ*とその意義

鉄鋼業は温度計測研究の母体であるとも言えよう。筆者のもつ断片的な知識の中でさえ、19世紀後半のドイツにおける鉄鋼業の躍進と熱電的あるいは光学的な温度計測技法の実用化との関連とか、昭和10年代以後に日本学術振興会の分科会を中心として根気よく続けられてきている製鉄製鋼のための温度計測研究¹⁾²⁾とかの話は、強い印象のもとに記憶されている。近時の鉄鋼プロセスで利用されている温度計測技法³⁾、温度制御の手法⁴⁾、計算機制御の実例⁵⁾は、“かん”だけをたよりにしていたと言われるかつての鉄鋼操業のイメージをほとんど全面的にチェンジしてしまつたに違いない。有名な温度シンポジウムの第5回 (5th Symposium on Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry, 米国ワシントン, 1971年7月)に際して、赤外線ITVによる温度パターン計測技法とその高炉炉頂部装入物の温度パターン計測への応用という、すぐれた成果が日本から発表された⁶⁾ことは、この分野でのわが国の技術レベルの高さを物語つていると言えるであろう。

計測技術の進歩にはいろいろな段階がありうるが、その第一歩は“測れなかつたものを測れるようにする”ことをおいて他にありえまい。操炉に際して熟練者が肉眼で炉況を判定する以外に方法がなかつた時期と比べればともかくも熱電温度計をそう入するなり光高温計で観望するなりして“測れる”ようになったということ自体が画期的な進歩であつて、その測定精度 (正確さ and/ or 精密さ) の吟味などは、その次の段階の問題に属する。一方赤外線ITVによる高炉内温度パターン計測のような例では、測れなかつたものをはじめて測つたとい

う意義に加えて、ある空間領域内の温度分布の特徴的パターンを一挙にとらえるという新しい意義が顕著に認められる。この例でも、“真”温度は？、実効放射率は？といった吟味は二次と考へていつこうに差しつかえはない。

しかしながら、まさにその“次”の段階においては、温度計測の精度は？真温度は？という問いが重大な意味を露呈することになるはずである。今日“あるひとつの”熱電温度計をたよりにして操業をし、明日“他のひとつの”熱電温度計に切り変えて操業をしようという場合に、操業条件の再現性ひいては製品の品質や生産量の安定度は一体どの程度まで保証されるのか。同じく赤外線に着目するとしても、ITVを利用して得た結果と赤外線2波長温度計を利用して得た結果とでは、その解釈のうえに少なからぬ差異があるべきではないのか。“あるひとつの”事業場に設置されている光電高温計と“他のひとつの”事業場に設置されているそれとを仮に交換したとして、計測の結果に食い違いが生じないであろうか。企業合併の際に両者の計測システムはすんなりと結合できるものであろうか。

情報化、システム化のすう勢は鉄鋼業界においてもすでに顕著であろうが、情報の一般性を高めシステムの機能の信頼性を高めるためにも、計測はますます重視されなければならない。一般性と信頼性を志向する意味での計測は不可避免的に普遍性を要請するはずである。大量かつ高速に流通する情報によつて動かされる巨大なシステムが有機的な機能を発揮しうるためには、情報の源となる測定値の一貫性が保証されていなければならない。

測定とは“基準量と比較して、数値を用い量を表わす操作”であるとされている (JIS Z8104「計測用語 (計測一般)」。測定値の一貫性の問題は主として“基準量

* Traceability とは、標準の系統的な保持すなわち実際の計測が標準と正しく関係づけられているかどうかという意味

* 昭和46年9月20日受付 (依頼解説)

** 計量研究所 工博

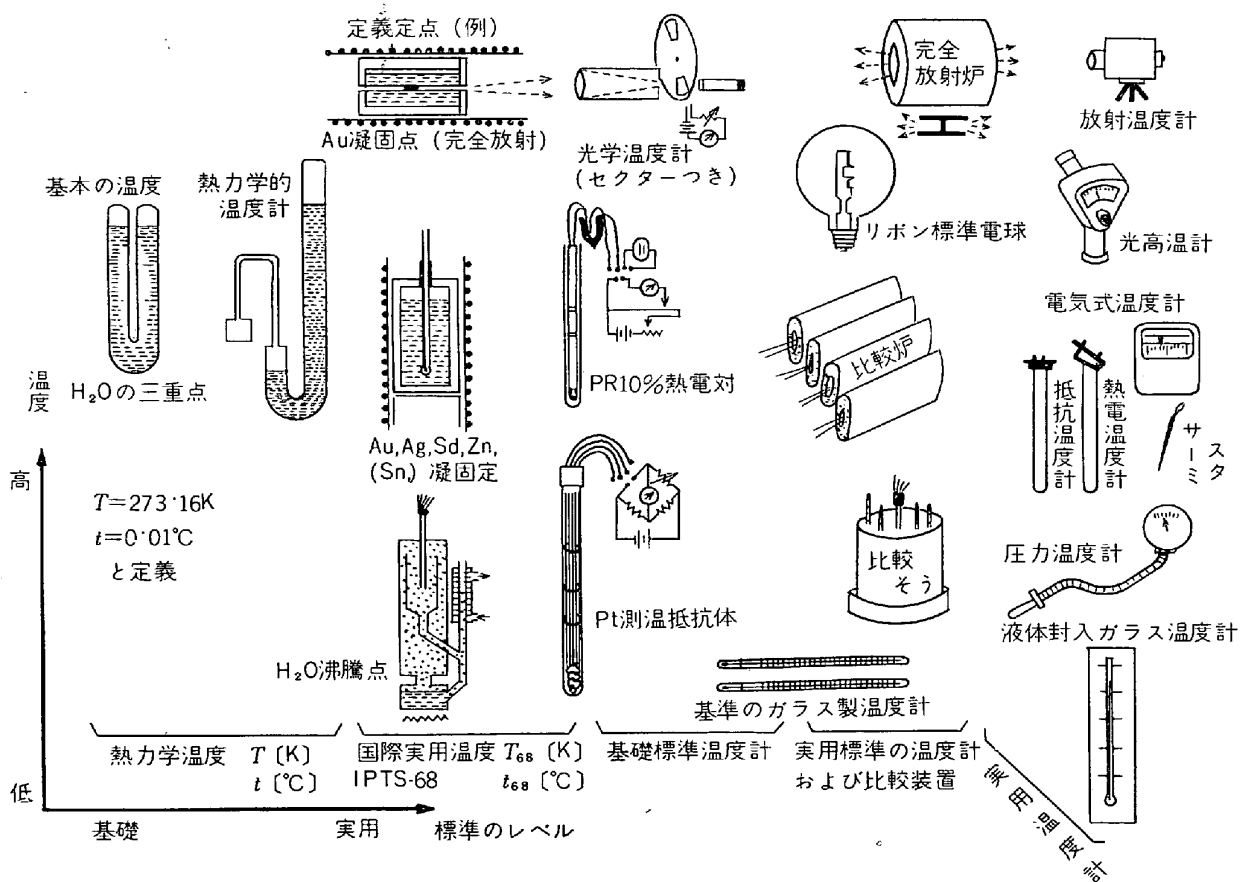


図 1 温度計測標準のトレーサビリティ (traceability)

との比較”の問題に帰着すると言えよう。これを温度計測の場合について具体的に考えれば、さきにあげたような各種の温度計が、それぞれさまざまな条件下で、一貫性ある測定値を示すかどうかの問題に通ずるのであり、さらに現実的に言えば、図 1 に示すような体系（この図は、すでに多くの機会に利用したものの再録であつて、恐縮であるが）の全体の一貫性が確保されていて“基準量との比較”が、現場から基礎標準研究所に至るまで、矛盾なく結びつけられているかどうか（いわゆる標準のトレーサビリティが整えられているかどうか）の問題に通ずるわけである。

2. 現場の温度計測標準

図 1 の右端は現場すなわち温度計測の最前線を意味する。鉄鋼業の場合について言えば、温度計測の最前線とは、浸漬熱電対または 2 色温度計による溶銑温度の測定、PR 熱電対による熱風炉炉内温度の測定、消耗形熱電対による溶鋼温度の測定、放射温度計または光電管温度計による圧延温度の測定などが、文字どおりの最前線に相当することになるだろうが、社内の分析室や研究室では液体封入ガラス温度計や測温抵抗体による精密な温度測定が重要な役をはたしているであろう。こうして列挙してみれば、鉄鋼業では、図 1 右端に示すような温度計

のほとんどすべてのタイプのものが、日常的に利用されているわけである。

さて、それらの温度計の正確さはどのようにして確保されるのであろうか。基準との比較はどのようにして行なわれるのであろうか。幸いにして最近この種の問題に関する代表的な例解の発表⁷⁾に接することができたのでその要点を表 1 と表 2 に紹介しておく。

表 1 は鉄鋼プラントにおける温度計測の 2 次標準の例であつて、これらは常用温度計のチェックのために用いられる。すなわちこれらの 2 次標準は図 1 右端から一歩だけ左へ寄つた段階での基準の役をするのである。表 1

表 1 鉄鋼業における温度計測の 2 次標準の例⁷⁾

名 称	適用温度範囲	比較の対象とする 1 次標準
Pt 測温抵抗体	-200~1 630°C	Pt 測温抵抗体
PtRh·Pt 熱電対	600~1 700°C	PtRh·Pt 熱電対, Pd 線
CA 熱電対	400~1 200°C	400~600°C : Pt 測温抵抗体 600~1 200°C : PtRh·Pt 熱電対
光高温計	800~1 800°C	光高温計用標準電球
ランドパイロメーター	400~1 300°C	PtRh·Pt 熱電対

表 2 鉄鋼業における温度計測の1次標準の例⁷⁾

名 称	適用温度範囲	管 理 精 度
基準ガラス製温度計	-56~+350°C (8本組)	±0.1°C
Pt 測温抵抗体	-200~+630°C	100°C 未満: ±0.1°C 100°C 以上: ±0.1%
PtRh-Pt 熱電対	600~1700°C	±0.1%
光高温計標準電球	800~1800°C	±5°C
純 Pd 線	1552°C	—

に列挙した標準器のうちで標準電球だけは、直接に温度を測るための道具でなくやや異質であるが、これについても JIS Z8706(光高温計による温度測定方法)の中の解説をはじめ近年の研究報告⁶⁾などの文献があり、他の標準温度計と同様にひろく知られているものと言えよう。

つぎに、これらの2次標準をチェックするための標準器すなわち1次標準を、上記の文献⁷⁾から紹介する(表2)。表1と表2とのつながりは、表1の右端の欄に示されている。表2については、その右端の欄に示されている管理精度に注意する必要がある。現場の最前線で働く常用温度計をどの程度の精度で管理すべきかは、プラントごとにまた対象ごとに異なるので、簡単な表に整理して示すことは困難ようであるが、表2すなわちプラント内1次標準の段階でなら、管理すべき精度はおのずから評価できるものようである。ただしここで“評価”と称することがらの内容は、実はかなり複雑なものであると言わなければならない。ひと口に言えば、ここでは現場からの“需要”と基礎標準研究所の“供給”の能力とが交錯しているものであり、そこに生ずるある意味の矛盾がひとまず止揚されて、ひとつの釣り合いを形づくっているとも言えよう。

3. 基礎標準へのトレーサビリティ

常用温度計←(比較)→2次標準器←(比較)→1次標準器という系統の具体的な例をわれわれは表1と表2で知ったわけであるが、さらに進んで、より基礎的な温度計測標準がどうなっているかを考えようとする場合、話がここで2つの道に分かれることに注意しなければならない。一方のルートは、表2の上の4つの標準器からさらにいつそう基礎的な標準“器”に結ばれてゆくものであるが、他方のルートは、表2の最下のものすなわち“温度定点”(Pd融解点はその一例)に結ばれてゆくものである。

第1のルートについては、話はここで一般に企業を離れて公共機関にもちこまれることになる。すなわち企業の1次標準器は国立・公立その他の機関に搬入され校正される。この種の公的な校正作業はこれまで主として計

量研究所(通商産業省の工業技術院の試験研究所のひとつ)で行なわれてきており、その行政上の根拠は“計量法”という法律で定められた“基準器検査”、“比較検査”および工業技術院で制度化されている“依頼試験”などであつた。一方地方の公設機関とくに東京都の工業技術センターもかねてから電気式温度計の校正業務に少なからぬ熱意を示してきていたが、近年この種の業務に対する社会の needs はいちじるしく高まり、公共機関の作業の拡充・能率化がよよく要請されるに至つた。幸いにして今年(1971年)4月から特殊法人・日本電気計器検定所本社標準部においても電気式温度計の依頼試験の業務が始められて着々と成果があがっていることは、特記に値することと言えよう。なお、計量研究所にせよ電気計器検定所にせよ、それぞれの地方支所・地方試験所もこれらの仕事の一部を分担しているので、詳細は各所にお問い合わせ願いたい。

さて、表3に日本電気計器検定所における電気式温度計の依頼試験の内容の要点を示す。この業務内容は、かねてから計量研究所で行なつてきた依頼試験業務の内容をほぼそのままにコピーしたものになつていて、ひと口に言えば表3は現今ルーチン化されている公共機関の校正業務の要約と考えてよい。このほか光高温計用標準電球については計量研究所で1000~1800°Cの範囲の輝度温度(波長0.65μm)に関する校正業務を行なつている(試験精度±5°C)が、この仕事も来年度から日本電気計器検定所へ拡大されてゆく予定である。

ここで表2の右端、すなわち企業側で管理上“要求”される精度と、表3の右端、すなわち公共機関側で“供給”される精度との、照応の実態を検討しておく必要がある。2つの表で精度の表現式が異なるが、Pt測温抵抗体のばあい-50°C~+600°Cの範囲では“需要”精度よりも“供給”精度のほうがよいわけであるから、不都合は生じない。ただし上記以外の温度範囲とくに-50°C以下については問題が残されている(計量研究所では扱っているのであるが完全にルーチン化されてはいない)。Pt-Rh系の熱電対の場合、表3の±0.01mVというのは、熱電特性から略算して500°Cで±0.2%、1000°Cで±0.1%に相当するから、この“供給”精度は、表2の“需要”精度と比べてかろうじて compara-

表 3 日本電気計器検定所における電気式温度計の依頼試験(昭和46年4月開始)

試験品の種類	試 験 点	最高試験精度
Pt測温抵抗体	4導線式	±0.03度
	上記以外	±0.05度
PR 熱電対	0°C~1100°C	±0.01mV
CA, IC, CC 熱電対	0°C~1000°C	±0.05mV

ble というところであるが、温度範囲のほうで比べると 1 100°C 以上 1 700°C までの部分に重大な供給欠除が認められる。(この点も計量研究所で鋭意、研究が進められているが、ルーチン化にはやはり多少の時間が必要である)。光高温計用標準電球の場合需要も供給も $\pm 5^\circ\text{C}$ なので、一応マッチしているが、需要は実はもう一段ときびしくなっていることを察せられる。

以上の略述からすでに明らかであろうが、この問題について今日すでにいくつかの供給欠除が指摘されるのであつて、公共機関とくに計量研究所はその解決に大きな努力を払っているのであるが、その状況は別稿⁹⁾その他の同所の報告によつてご承知いただきたい。

ところで、表 2 についてすでに注意をうながした“温度定点”の問題、あるいは具体的に言えば“温度定点による温度標準とそのトレーサビリティ”の問題が、つぎに考察されなければならない。

4. 温度定点の役割

そもそも計測の標準というもののしくみを論ずる場合に、信頼できる計測器を基本と考えるか、あるいは一定不変な物理的状态を基本と考えるかという大問題がつかぬにつきまとう(学術的な論述ではないが拙著⁹⁾を参照していただければ幸いである)。本稿で今まで見てきたのは主として“標準(の計測)器”のつながりのことであつた。しかし“温度が一定不変な状態”すなわち“温度定点”というものは古くから注目され、18世紀にセルシウス、ファレンハイ、レオーミュールらが温度計の改良とそれらの標準化のために氷点や水の沸騰点を利用したことはよく知られているところであろう。

温度定点については、基礎的な研究¹⁰⁾だけでなく、きわめて実用的な応用も考えられるようになった(たとえば純金属および合金 20 余種のピースを原子炉内に置きそれらの熔融の有無を観察して 100~1 600°C の範囲の温度を精度 20°C で調べることができる¹¹⁾)。表 2 に記載されていた Pd 線は温度定点として利用するためのものであつて、“純金属線熔融による熱電対校正法”はこの Pd をはじめ Au, Pt, Cu, Al, Zn, Pb にまで適用できることになった。この技法の実用化については日本学術振興会の分科会および計測自動制御学会の温度計測研究専門委員会の寄与するところが顕著であつた²⁾¹²⁾。なお筆者らは純金属小片の融解に着目して放射温度計を校正することを試みている¹³⁾。また、金属ではなく各種の有機物質の三重点、融固点を利用して常温付近の温度計測標準を充実させることも可能になり¹⁴⁾、しかもそれが熱電対の補償導線の特性試験への応用という形で鉄鋼業での温度計測に導入されつつあるのは、われわれの喜びとするところである。

ところで、当然のことながら温度定点による温度計測標準は融解点その他の特定なひとつの温度での基準を与

えるにすぎない。いわば離散的な標準の役しかない。しかし、いくつかの温度定点を組み合わせて合理的に利用すると、連続的な標準の代役ともいふべき働きをさせることができる。白金・ロジウム系の熱電対についてはそのような可能性はすでに各方面で議論されている¹⁵⁾。

5. 国際実用温度目盛の意義と構成

ここで図 1 に立ちもどると、その中央よりやや左寄りにいくつかの温度定点のスケッチが認められるであろう。図 1 の右端から中央あたりまでには、実用温度計←(比較)→(何段階かの)標準温度計という系統、すなわちわれわれが 3. で考察した系統が図示されているわけであるが、その左方に温度定点が図示されているということの意義をここで吟味しておかなければならない。

多少の考察によつて理解されるはずのことであるが、上記の←(比較)→で結ばれた系統には本来なら終点は存在しない。既述の公共機関が依頼に応じて試験を行なう際の標準温度計は、いつたい何との“比較”によつてその正確さを保証されているのであろうか。他の量たとえば質量の標準の場合には、国際キログラム原器という世界唯一の特定物体(パリ郊外の国際度量衡局の地下原器庫に厳重に保管されている)が究極の標準の役をするのであつて、わが国の日本キログラム原器(計量研究所に保管)は国際キログラム原器と綿密に比較されてそれ自身の正確さが明らかにされている。そしてわが国の質量測定はすべてこの原器に結びつけられている(原器へのトレーサビリティが確立されている)。

質量標準のトレーサビリティは上述のとおりきわめて即物的でわかりやすいが、温度の計測標準の場合原器に対応する唯一の物体としての究極の標準器は存在しない(それを考案し実現することは決して不可能ではあるまいが、俗にいつてそれはまったく“使いものにならない”し、しいてそれを使いこなそうとしてもいたずらに混乱を招くだけであろう——その点は後に再考する)。

今われわれは、4. の冒頭に述べた大問題に再び直面しているのである。つまり温度計測の究極の標準として、世界唯一の特定の標準温度計を考えるべきか、あるいは温度が一定不変の状態、すなわち温度定点を考えるべきかという段階まで考察を深めてきたわけである。そして前者は“使いものにならない”と上に述べたのであるが、その理由は次のような説明から明らかになる。現今もつとも信頼できる標準温度計は Pt 測温抵抗体および所要の周辺機器によつて構成されると思われる。それらを現代最高の技術のもとに整備し、細心の注意のもとに保守しつつ使用すれば 0~600°C 程度の温度範囲で $\pm 0.001^\circ\text{C}$ よりよい精度が確保されるであろう(ついでながらこの精度を表 2 の右端の値と対比してみていただきたい)。この精度は一般の産業計測からの“需要”に対しては十分満足すべきものと判断されるけれども、では

0°C 以下はどうか、600°C 以上はどうかとなると、数多くの研究⁹⁾はなされているものの、-250°C 程度まで、あるいは +1100°C 程度までの範囲を越えるものではないし、常温をへだたるほどに精度の低下は覚悟しなければならぬ。さらに温度範囲をひろげて考えようとする、本質的な限界に行きあたることになる。なぜなら Pt は 1800°C では完全に融解してしまうので測温抵抗体の素線としての役をはたしえなくなるからである。Pt 測温抵抗体が究極の温度標準器として“万能”でないことは、明白であろう。

かりに話を常温付近に限るとしても、この標準器がつねに $\pm 0.001^\circ\text{C}$ の精度で正確さを保ちつづけていることは、どのようにして証明されるのであろうか。キログラム原器については多年の研究（各国に配られている原器との系統的な相互比較）の結果、 10^{-6} の精度が確認されている⁹⁾が、常識的に言えばこれは 1 個の物体の質量が保存されるかどうかの問題なのであるから、摩擦その他のことを警戒しておけば心配はないと考えられよう。それに対して標準温度計のほうは、ある範囲内にもせよ、さまざまな温度にさらされる宿命にあつて、しかも温度と電気抵抗との関数関係の保存（不変性）が要求されるのであるから、近時の信頼性工学における議論などからしても、質量の原器よりはるかに苛酷な動作条件を課せられていると考えなければならない。参考までに電気抵抗測定用の標準器（標準抵抗器）の安定性のデータ¹⁶⁾を参照すると、温度 20°C の精密恒温器内に常時きわめて注意ぶかく保管されている場合に $\pm 10^{-6}$ の程度と評価されている。抵抗標準のこの精度を Pt 測温抵抗体にあてはめれば $\pm 0.0002^\circ\text{C}$ 程度となる。抵抗の基本標準とさして違わない精度で Pt 測温抵抗体の精度を管理しなければならないというのはもともと無理な注文なのであつて、結局 Pt 測温抵抗体を温度計測の究極の基準とする考えそのものに欠陥があると言わざるをえない。いつそう現実的に考えて、究極の基準として製作・保管してある Pt 測温抵抗体の特性が、あるとき突然に、予想のまったく困難な性質の変化を呈したと仮定してみよう。それが約束として究極の基準の扱いをされているのであるからには、上記の変化に対応して“すべての”基準温度計と“すべての”実用温度計の目盛り特性表なりは改められなければならないわけである。そこにひき起こされる混乱は、はかり知れないであろう。

標準温度計の考えだけで究極の温度計測標準を構成することの非現実性は、こうして十分に論証されたと言えよう。ところで一方、温度定点はすでに指摘したとおり離散的な標準の役しかなかった。特定唯一の標準温度計に依存せず、しかも離散的でない究極の温度標準は、一体どのように構成されるべきなのであろうか。18世紀以来のこの設問は、1854年ケルビンが提唱した熱力学温度目盛の考えと、1927年以後メートル条約のもとにオーソラ

イズされてきている国際実用温度目盛とによつて、解決された。

これら2つの基礎的な温度目盛については、教科書その他にも詳述されているので、それらの構成の理念は周知のことと思われるが、国際的な協約（とりきめ）としての内容にはさまざまな変遷があつた。変遷に応じての報道にもわれわれは努力してきたつもりであるが、ここでは古い文献の列挙は省略し、現行すなわちメートル条約にもとづく国際的な最高機関である国際度量総会の最新の決議に沿う記述を、付録と表3に示しておく。

表4は1968年国際実用温度目盛 (IPTS-68) の構成をまとめて表現したもの¹⁷⁾である。一見して明らかであるが、その構成はまことに複雑緻密であつて、今それを解説する余裕はない。国際協約テキストの完訳資料¹⁸⁾その他文献^{19)~22)}を参照していただきたい（また、あえて言えばこの種の問題のディテイルは計量研究所におまかせ願つてよいと考える）。

ただし、IPTS というもののしくみについては一言しておく。表4に見られるとおり、IPTS では“標準温度計”たとえば Pt 抵抗温度計と“温度定点”たとえば水の沸点、亜鉛の凝固点とが併用されているのであつて、前に考察した 1) 標準温度計のみをたよりにする考えの欠陥（不変性の保証の欠除）も、また 2) 温度定点のみをたよりにする考えの欠陥（離散的な性格）も、ともにたくみに回避されている。一例をあげれば表4の随所に見られる関数 W とは、Pt 抵抗温度計（ただし、特定の条件をみたまものであればよいのであつて、特定唯一のものを意味するのではない）の 0°C （1つの温度定点）における抵抗 $R(0^\circ\text{C})$ に対する、任意の（定義しようとする）温度における抵抗 R との“比”であつて、比 W と温度との関係をベースにすることによつて、抵抗 R と温度との関係をベースにすることの難点を回避しているわけである。また表4の中のいくつかの数式は、温度定点方式の離散的な性格を補うための“補間”公式と解しておけばよい。

6. 熱力学温度へのより一層のアプローチ

究極の温度標準という言葉ですでに何回も用いたが、上述の IPTS もなお“究極”と呼ぶにはふさわしくない。なぜなら Pt 測温抵抗体の抵抗比 W というようなものは、Pt という特定物質の性質にかかわり合うのであるから、ケルビンの唱えた“個々の物質の性質とまったく無関係な”普遍的な温度標準とは意味を異にする。真に普遍的な、したがつて真に究極的と見なしうる温度標準は、いうまでもなく熱力学温度目盛（付録）であり、IPTS もまた、その奥に熱力学温度目盛というものが考えられているからこそ、“究極の一步手前の実際標準”の役をにないえているのである。

さて、われわれは図1の右端から考察を始めて、今よう

表 4 1968 年国際实用温度目盛の骨組み¹⁷⁾

新しい国際实用温度目盛 IPTS-68 の定義

温度範囲	指定された装置, 方法	$T_{68}, t_{68}, T_{68}-273.15$ を求める式
1064.43°C 以上	黒体放射 L : 黒体のエネルギー輝度の波長 λ での分光密度	$\frac{L(T_{68})}{L(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp[c_2/(\lambda T_{68}(\text{Au}))] - 1}{\exp[c_2/(\lambda T_{68})] - 1} \dots\dots (1)$ $c_2 = 0.014388$ メートル・ケルビン
1064.43°C } 630.74°C	白金-10%ロジウム/白金熱電対 条件: $E_{\text{Au}} = 10\,300\mu\text{V} \pm 50\mu\text{V}$ $E_{\text{Au}} - E_{\text{Ag}} = 1\,183\mu\text{V}$ $+ 0.158(E_{\text{Au}} - 10\,300\mu\text{V}) \pm 4\mu\text{V}$ $E_{\text{Au}} - E(630.74^\circ\text{C}) = 4\,766\mu\text{V}$ $+ 0.631(E_{\text{Au}} - 10\,300\mu\text{V}) \pm 8\mu\text{V}$	冷接点 0°C の起電力 $E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2 \dots\dots (2)$ a, b, c の決定: 630.74°C (3式で定める) の E 銀の凝固点の E 金の凝固点の E
630.74°C } 0°C	白金抵抗温度計 条件: $W(100^\circ\text{C}) > 1.39250$ ただし $W(T_{68}) = R(T_{68})/R(0^\circ\text{C})$	$t_{68} = t'$ $+ 0.045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419.58^\circ\text{C}} - 1 \right)$ $\left(\frac{t'}{630.74^\circ\text{C}} - 1 \right)^\circ\text{C} \dots\dots (3)$ $t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \dots (4)$ α, δ の決定: 水の沸点の $W(t')$ (あるいは, ずずの凝固点の $W(t')$) 亜鉛の凝固点の $W(t')$
273.15K } 90.188K	$W(T_{68}) = W_{c_{\text{tr}-68}}(T_{68}) + \Delta W(T_{68})$ $W_{c_{\text{tr}-68}}(T_{68})$ は次式 $\dots\dots (5)$ $T_{68} = \sum_{i=0}^{20} A_i (\ln W)^i \dots\dots (6)$ A_i の値	$\Delta W = A_4 t_{68} + B_4 t_{68}^3 (t_{68} - 100^\circ\text{C})$ $t_{68} = T_{68} - 273.15 \dots\dots (7)$ A_4, B_4 の決定: 水の沸点の ΔW (ただし $W_{c_{\text{tr}-68}}(100^\circ\text{C}) = 1.39259668$) 酸素沸点の ΔW とする
90.188K } 54.361K	A_i	$\Delta W = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2 \dots\dots (8)$ A_3, B_3, C_3 の決定: 酸素沸点の ΔW 酸素三重点の ΔW 酸素の沸点で $d(\Delta W)/dT_{68}$ を (7) と一致させる
54.361K } 20.28K	A_i	$\Delta W = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3 \dots (9)$ A_2, B_2, C_2, D_2 の決定: 酸素三重点の ΔW ネオン沸点の ΔW 平衡水素沸点の ΔW 酸素三重点で $d(\Delta W)/dT_{68}$ を (8) と一致させる
20.28K } 13.81K	A_i	$\Delta W = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3 \dots (10)$ A_1, B_1, C_1, D_1 の決定: 平衡水素沸点の ΔW 17.042K の ΔW 平衡水素三重点の ΔW 平衡水素沸点で $d(\Delta W)/dT_{68}$ を (9) と一致させる

やく図1の左端に到達した。いわゆるトレーサビリティの最後のくさは、IPTS ←(比較)→熱力学温度という結び目にあたるわけであるが、この結び目における精度

の“需要”と“供給”の関係はどうなのであろうか。結論をさつそく書けば、1) IPTS は、詳細緻密な協約(表4)のゆえに、ばらつき(偶然誤差)のきわめて少ない

（“精密さ”のよい）標準の役をするが、真の究極である熱力学温度への合致の良否という意味のかたより（系統誤差）はかならずしも少なくはない（“正確さ”はかならずしもよくない）、他方 2) 熱力学温度目盛は字義どおりの究極の標準とされるものであるがゆえに、それ自身が（協約として）絶対に正確であり、かたよりはなく正確さは理想的によいのであるが、なにぶんにも抽象的理論に立つものであつて、それを実験的に realize する際の困難はきわめて大きく、ひいてはばらつき（偶然誤差）が多く精密さがあるということになる。この 2 つの温度目盛の間の精度の需要・供給の関係は、独特な様相を呈しているのである。

熱力学温度目盛についても研究はこつこつと続けられている²³⁾。その成果として、上記 2 つの温度目盛の差（食い違い）があらわにされることもまれではない。そのときに処置は、論理的には“*IPTS* の構成を修正して、より正確に熱力学温度目盛に合致させる”ことをおいてほかにないはずである。そのような処置の集積とともに“すべての温度計測が究極の標準によりよくトレースされる”ようになるのである。

7. 温度標準の切り変えのポリシー

IPTS が年代つきで -48 とか、-60 とか呼ばれてきたのも、前節末尾に述べた処置の年代区分を明らかにするためになされたことであつた。そして今や -68 という年代の付せられた最新の協約への移行処置がとられつつあるわけで、その経緯や方策は他の機会にも述べた²⁰⁾¹⁷⁾¹⁹⁾が、移行に伴う温度値変更量は表 5 および図 2 に示すとおりである。この変更量を、実用上の需要精度たとえば

表 2 と比較するとき、今回の移行処置が意外に深刻な問題を宿していることが理解されるであろう。もつともわかりやすい例は Pd 融解点において見られる。これまでの値は表 2 にあつたとおり 1552°C であつたが、新しい値は 1554.3°C となる。

わが国の場合公けの移行は計量法の改正の後になされるのであるが、それは 1971 年末の頃となろう。他の国も逐次に移行を進めており、たとえばドイツは 1970 年 12 月 1 日づけで移行を宣言している²⁴⁾。科学技術の見地からのみでなく輸出入の問題などから見ても、日本に

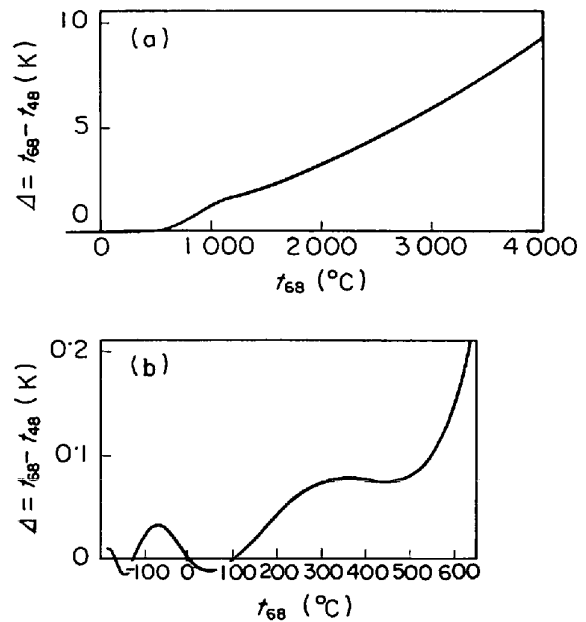


図 2 新旧温度値の差

表 5 新旧温度値の差 $\Delta = t_{68} - t_{48}$ (単位はケルビン)

$t_{68}^{\circ}\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-100	0.022	0.013	0.003	-0.006	-0.013	-0.013	-0.005	0.007	0.012		
0	0.000	0.006	0.012	0.018	0.024	0.029	0.032	0.034	0.033	0.029	0.022
$t_{68}^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0.000	-0.004	-0.007	-0.009	-0.010	-0.010	-0.010	-0.008	-0.006	-0.003	0.000
100	0.000	0.004	0.007	0.012	0.016	0.020	0.025	0.029	0.034	0.038	0.043
200	0.043	0.047	0.051	0.054	0.058	0.061	0.064	0.067	0.069	0.071	0.073
300	0.073	0.074	0.075	0.076	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.076	0.076
400	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.074	0.075	0.076	0.077	0.079
500	0.079	0.082	0.085	0.089	0.094	0.100	0.108	0.116	0.126	0.137	0.150
600	0.150	0.165	0.182	0.200	0.22	0.25	0.27	0.30	0.32	0.35	0.38
700	0.38	0.40	0.43	0.46	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65
800	0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.80	0.83	0.86	0.89	0.92	0.94
900	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	0.21	1.24
1000	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.44			
$t_{68}^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000		1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
2000	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.3	5.6	5.9
3000	5.9	6.2	6.5	6.9	7.2	7.5	7.9	8.2	8.6	9.0	9.3

おける移行は時を失することなく、しかも混乱を生ずることなく実施されなければならない。既述の国公立機関は着々と移行の準備を整えているが、現場の計測の最前線に至るまでのトレーサビリティ全体の再編成のためには、関係諸方面での綿密な問題処理が必要である（たとえば計器の目盛の書き改めからコンピューター・プログラムの組みなおしに至るまで）。幸いに日本鉄鋼協会ではこの課題の合理的処理のための小委員会（委員長は下間照男氏）が設けられ精力的な検討が続けられている。官庁側も、工業技術院・国際標準研究連絡会議を中心として日本産業技術振興協会・産業計測標準委員会などと提携しつつ、処置に疎漏の生じないように、十分に意を用いている。各界においても十分な配慮がなされることを期する次第である。

8. 後 記

IPTS の変更そのものについてはすでに他誌で何回か解説したので、本稿では鉄鋼業における温度計測標準トレーサビリティの理念の普及を主眼として執筆した。そのためかえつて冗漫な論調に終始したかとおそれる次第であるが、計測標準の意義を考察していただくために、多少とも資するところがあれば幸いである。

(1971年9月15日)

付録 熱力学温度の定義²⁰⁾

熱源 A と熱源 B との間で動作する可逆サイクルにおいて、作業物質が B に与える熱量に対する、作業物質が A から得る熱量の比を $k_{A,B}$ とすれば、熱力学の第 2 法則により、一般的関係

$$k_{A,B} = k_{A,B}^{-1}$$

が成立し、 $k_{A,B}$ したがって $k_{B,A}$ は作業物質の性質とは無関係であつて、A, B の温度だけできまる。そこで両熱源の温度 T_A および T_B の値を

$$k_{A,B} = T_A / T_B$$

となるように選ぶことができる。この原則にしたがつて表現された温度が熱力学温度である。

つぎに温度の基準点(基本定点)として水の三重点(添字 tr)を採用し、その熱力学温度 T_{tr} を

$$T_{tr} = 273.16\text{K}$$

と規約すれば、任意の熱源(添字 x)の熱力学温度 T_x は

$$T_x = 273.16 k_{x,tr} \text{K}$$

で表わされる。これが現今の熱力学温度の定義であつて、国際単位系(SI)はこれを 6 基本量のひとつに採用し、量記号 T 、単位名ケルビン(kelvin)、単位記号 K を規定している。

またセルシウス温度(量記号 t 、単位記号 $^{\circ}\text{C}$)は $t = T - 273.15\text{K}$ で定義される。

文 献

- 1) 菅野: 計測と制御, 9(1970)7, p. 531
- 2) 学振製鋼19委員会: 高温測定と溶鋼温度, (1960), 日刊工業新聞社
- 3) 大島, 鈴木: 計測と制御, 9(1970)11, p. 837
- 4) 鈴木: プロセス計測制御便覧, 新版(1970), p. 137 日刊工業新聞社
- 5) 松田: 計測と制御, 9(1970)6, p. 460
- 6) T. SHIMOTSUMA, et al.: Preprint, 5th Symposium on Temperature (1971年6月, ワシントン)
- 7) 島田: 計測自動制御学会, 第15回温度計測部会 (1970年12月8日)資料, 鉄鋼業における温度計測の精度管理
- 8) 高田: 計量研究所第4回学術講演会 (1971年6月29日)資料, 日本産業技術振興協会入手可能
- 9) 高田: 単位の進化(ブルーボックス), (1970), 講談社
- 10) 高田: 日本金属学会会報, 8(1969) 1, p. 14
- 11) P. G. SALGADO, et al.: Abstract, 5th Symposium (既出)
- 12) 下間, ほか: 計測と制御, 4(1965)12, p. 848
- 13) 伊藤, 高田: 第10回計測自動制御学会・学術講演会 (1971年8月, 徳島)
- 14) 高田, 内山: 計測と制御, 4(1965)12, p. 814 および望月, 内山: 応用物理, 39(1970)2, p. 173
- 15) 花田, 吉武: 13) と同様に発表
- 16) 平山: 応用物理, 38(1969)6, p. 591
- 17) 望月: 応用物理, 38(1969)6, p. 585
- 18) 計量研究所報告, 18(1969)3, p. 134
- 19) 同上, p. 114
- 20) 高田: 計測と制御, 8(1969)6, p. 378
- 21) 高田: 計測と制御, 9(1970)8, p. 599
- 22) 三井, 小川: 計測と制御, 9(1970)9, p. 669
- 23) たとえば K. MITSUI, et al.: Preprint, 5th Symposium (既出)
- 24) PTB-Mitteilungen 1971-1, p. 31

注) 文献18) は近く単行本として出版される予定。また 1), 21) および 22) を含む講義シリーズの合本が計測自動制御学会で頒布されている。