

温度標準・IPTS

櫻井 弘久*

Summary of Recent Research Works on the IPTS-68

Hirohisa Sakurai

1. 序 論

国際実用温度目盛は、1927年の国際温度目盛(以下ITS-27と略す)から始まり、現在の1968年国際実用温度目盛(以下IPTS-68と略す)及び1976年暫定目盛に至っている。温度を数値で表現するときの基本である熱力学温度を最も手っとり早く得るには国際実用温度目盛に定められた方法を用いることである¹⁾。国際実用温度目盛は国際間の取り決めで決めた温度測定法であるが、二つの基本的事項については1927年以来踏襲している。一つはこの定義で得られた値(温度値)が熱力学温度をよく近似していること、他の一つは温度測定に必要とされるもっとも高い精度で再現する値を与えるものであること、である。つまり国際実用温度目盛は熱力学温度にもっとも近く、その再現性は熱力学温度測定より十分よい一つの温度測定法を示している。熱力学温度測定の精度は測定技術の改良と共に向上しており、また、温度測定に要求される精度も上がってきている。このため国際実用温度目盛も何回か改訂され、熱力学温度との一緻度、再現性とも向上し、現在のIPTS-68となっている。現在では多くの場合熱力学温度の測定は直接ユーザがする必要はほとんどなくなっており、国際実用温度目盛にトレーサブルな値を求めればこの値が熱力学温度をよく近似することになっているはずである。また、IPTS-68が熱力学温度からずれていることが明らかになった時でもIPTS-68を基にした温度測定であれば熱力学温度への変換が可能となる。

IPTS-68は既によく知られているように1381K以上の温度を定義している¹⁾。IPTS-68の細部は省略し、ここではIPTS-68の問題点と予想される新しい温度標

準についての現状をのべる。

2. IPTSの考え方

IPTSの出発点はメートル原器の熱膨張補正のため、その温度を測ることに端を発している。1927年の国際温度目盛の設定がいかに困難であったかは、例えば、近代温度計測の創始者であるChappuisが気体温度計を作りはじめ、その結果を示したのが1885年とすると約40年後にやっと最初の国際温度目盛ITS-27が決まったことが物語っている。この間の詳細は科学的興味とは別に現在のIPTSとの関連でも興味深い。ITS-27にPが抜けていることとも関連しているがITS-27はもともと熱力学温度で決めようと努力していた。結果は成功せず結局、

1. 熱力学温度との差をできる限り小さくする。
2. いくつかの温度定点の温度値をあたえる。
3. 内挿計器を用い定点間の温度を得られるようにする。
4. 内挿計器のちがいによる温度値をできる限り小さくする。
5. 熱力学温度測定より実用的で再現性のよい温度値が得られる。

ということに落ち着いた。これらの点はその後“P”が付けられ、そのまま現在のIPTSにあてはまる²⁾。更に測温諮問委員会では、新しいIPTSは今後大きな改訂をできるかぎりおこなわないで済ませるようにする方針で検討している(この辺が新しいIPTSが決められようとしていて、なかなか決まらない理由でもあろう)。

これらの点を中心にIPTS-68の問題点を次にまとめてみる。

3. IPTS-68の問題点

3.1 熱力学温度からのずれ

ITS-27からIPTS-48への改訂については、熱力学温度からのずれについての問題はほとんどなく、内挿

* 計量研究所温度標準研究室：茨城県新治郡桜村梅園
1-4 〒305

Thermometry Section, National Research
Laboratory of Metrology
1-4, Umezono, Ibaraki, 305

式の変更が主であった。ただ放射温度計領域(1063℃以上)で Wien の式から Planck の式への変更が熱力学温度からのずれと関係しているのみである。大幅な変更は IPTS-68 の時点で行われた。これは 1960 年の度量衡総会が熱力学温度の単位 kelvin を定義したことも関係しているが、この前後に多量の熱力学温度測定がなされている。これらの結果を踏まえて IPTS-68 は定義された。定義した当時の熱力学温度測定の精度と IPTS-68 の再現性はほぼ Fig. 1 と推定される^{1,9)}。逆にこの時点での IPTS-68 は点線 B の程度で熱力学温度と一致していると考えられていた。しかし熱力学温度 T と IPTS-68 の実現する温度 T_{68} とに差があるとの実験結果が報告された。一つは米国標準局(NBS)で行った気体温度計の測定の結果である⁴⁾。他の一つは 1968 年にはすでに測定結果は出ていたが、同じく NBS の音速温度計の結果、IPTS-68 の下端とヘリウム蒸気圧温度計とが熱力学温度的に接続されていないとの結果である⁵⁾。これをきっかけにその後熱力学温度測定が、放射温度計、雑音温度計、気体温度計、音速温度計および磁性温度計で行われ、次第にその測定法が改良され、 T_{68} と T との差がはつきりしてきた。

まず 0℃ 以下では Cetas ら⁶⁾が磁性温度計の上限を 83 K まであげて T_{68} と T との差を指摘してきっかけをつくり、その後、気体温度計、熱雑音温度計などで熱力学温度の測定がなされた。中心は気体温度計でその測定下限が 1 K までのびた。Fig. 2 は Kemp ら⁷⁾がまとめた 0℃ 以下の IPTS-68 と熱力学温度との差である。Fig. 1 で示したように IPTS-68 はこの領域で 10 mK 程度の熱力学温度からの差があると設定時点で考えられていたことからほぼ妥当ではあるが、低温側でのスムーズさの欠如が予想以上に大きい。現在、この領域での測定精度はほぼ 1 mK 程度であり、1968 年当時に比べて一桁程度熱力学温度測定の精度が向上している。

同様に室温以上についての測定も、NBS の気体温度計がきっかけとなって、熱雑音温度計や放射温度計などいくつかの熱力学温度測定がなされた。この中心は NBS の気体温度計の結果である。Fig. 3 は 0℃ 以上で IPTS-68 とこの気体温度計による熱力学温度との差である。この差は Fig. 1 からわかるように予想以上に大きい。その後 Quinn らが全放射温度計で -40℃ から 100℃ の温度領域での熱力学温度測定を行い実験誤差内でこの測定と同様の結果を得た⁸⁾。

高温側は NBS の気体温度計の結果を参照温度とした放射温度計や熱雑音温度計での測定がおこなわれている。Fig. 4 はこれらをまとめたものである⁹⁾。但し 630℃ 以上では内挿用標準温度計が熱電対であるため結果の

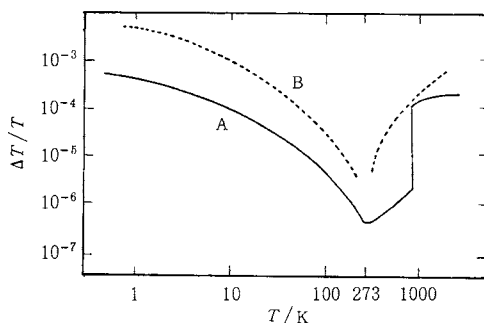


Fig. 1 Reproducibility of thermodynamic temperature measurements(B) and IPTS-68(A).

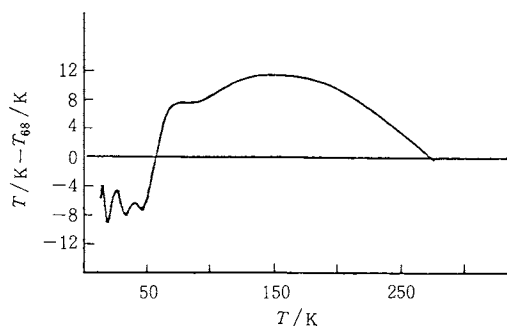


Fig. 2 Differences between IPTS-68 and thermodynamic temperature below 0°C.

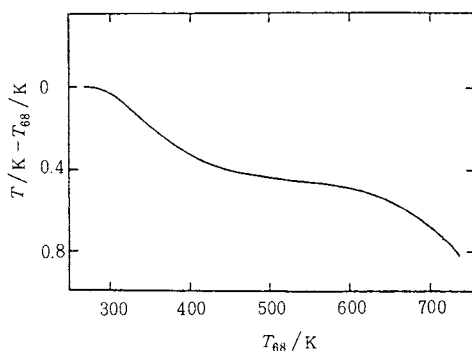


Fig. 3 Differences between IPTS-68 and thermodynamic temperature by NBS gas thermometry.

保持が困難であり、後に触れるように高温用白金抵抗温度計が開発されつつあり、現在は熱電対より白金抵抗温度計が使われている。一時金点及び銀点の IPTS-68 の付与値が問題にされたが、熱力学温度との差が 0.2 K を越えることはなさそうである。

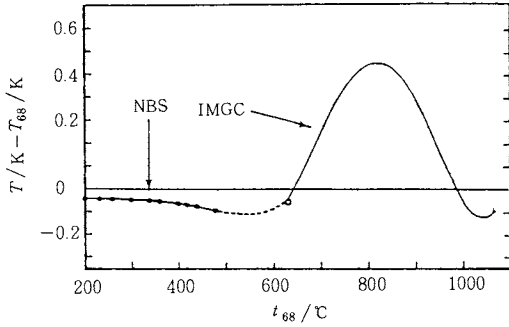


Fig. 4 Differences between IPTS-68 and thermodynamic temperature found in NBS gas thermometry (—●—), NPL pyrometry (---), and IMGC noise thermometry.

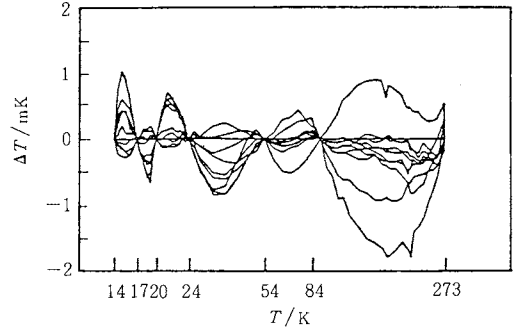


Fig. 5 Differences between 10 thermometers and a reference thermometer when calibrated on IPTS-68.

3.2 目盛の唯一性

もう一つの問題点は目盛の再現性に関するもの—目盛の唯一性—である。これは主として温度定点の実現精度によるものと温度計による個体差によるものがある。前者は何等かの国際比較等で解決できる問題であるが、後者はかなり本質的な問題であり、測定も難しい。最初にこの問題に触れたのは Wardら¹⁰⁾で、0°C以下で35本の温度計を同一装置で比較し、温度計による IPTS-68の示す値の差を測定した。さらにこの結果に含まれない型の温度計についての測定もなされた¹¹⁾。Fig. 5は0°C以下での温度計の違いによる IPTS-68の示す値の差である¹¹⁾。

室温以上では数本の温度計を任意の温度で精密に比較することが容易でなく、今のところ定義定点で校正した温度計を用いて他の安定した二次定点を測定し、その温度計による値の差から推定する方法がとられているが、まとまった報告は出されていない。

3.3 内挿計器・その他

今回の改訂の一つの目的は、IPTS-68の内挿計器として問題があることが最初から考えられていた630°C～1063°Cに使われている熱電対を、別の安定な温度計に変えることである。これはITS-27当時からのものであるが1968年当時他の安定な温度計が存在しなかったためそのまま使われた。この領域についてはその後高温用白金抵抗温度計の開発がNBS(米国)、NIM(中国)及び計量研で行われており、ある程度の成果があがっている。一例としてFig. 6に温度計の安定度をしめす¹²⁾。熱電対に比べて2ケタ程度の安定性はあると思われるが、放射温度計との比較が困難で抵抗—温度特性が十分に測定できないのが現状である。

IPTSのもう一つの重要な要素に定義温度範囲がある。今回の改訂を後らせているのは上記の高温用白金抵

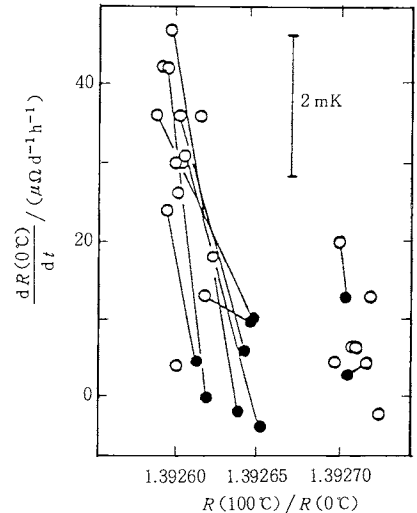


Fig. 6 Short term drift of the doubled helix high temperature platinum thermometers at the triple point of water when exposed at 1100°C for 10 h. ○: initial drift, ●: after annealing. Solid lines indicate the same thermometers.

抗温度計の開発が思うように進まないことと13.81 K以下をどう定義するかに明快な答えがない点にある。一応低温端は1 Kとし、ヘリウム蒸気圧温度計で3 Kまたは4.2 Kまで定義することは決められているが、それから先の決定的な提案がない。つまりよい内挿計器がない。

前節でもふれたが、温度定点の実現法の違いにより定点の値が異なるという結果が、国際比較により明らかになった。これらの調整は今後行われるであろう。

4. 新国際実用温度目盛について

国際実用温度目盛の改訂が測温諮問委員会で議論され

Table 1. The skeleton of the successor to the IPTS-68

Defining Fixed Points	Interpolation method (instruments)	Comments
gold(F) silver(F) aluminium(F) zinc(F) tin(F) water(T)	Planck's Law platinum resistance thermometer with a polynomial func.	Reference temp: Au or Ag. long stem type
argon(T) oxygen(T) neon(T) hydrogen(B) hydrogen(T)	platinum resistance thermometer with a reference func. and a deviation func.	capsule type
(lead(S)) helium-4(B) helium-3(B)	interpolation gas thermometer (or thermodynamic temperature) helium vapor pressure scale	He(3) gas therm. is proposed from 14 K to 3 K with three ref. points He(3) and/or He(4)
1 K		

T: Triple point, B: boiling point, S: superconducting transition point.

初めて既に5年以上たっている。いまだに最終案ができ上がらない点について、国際度量衡局のQuinn氏によると、

1. IPTS-68を決定する際に急ぎすぎたためその欠点が大きくなったと判断する人が多い。このため現在の測温諮問委員会委員が神経質になり議論が多く先に進まない。

2. 待てばまつほどいいデータが出てくるため最終案をつくりにくい。

3. 今後部分的修正のみで済ませるようにしたい。という点をあげている。改訂の目的は新IPTSが熱力学温度をよく表現し、唯一性を向上させることにある。現在の予想では新IPTSと熱力学温度の差を低温で1mK、高温でも2~3mKにし、唯一性をそれぞれ0.5mK、1mK程度になるとしている。骨子をTable 1に示す。特に詳しく説明する必要はないと思われるが、点線の部分が未確定の箇所である。最終案は来年秋以降との話である。

5. おわりに

現在の温度標準の基であるIPTS-68の問題点と現在までに得られた結果をまとめてみた。世界に誇る熱・温度測定の実験家を持つ日本からの寄与が残念ながら非常に少ない。それに比べてヨーロッパの研究の速さには全く驚かされる。人・予算の問題より研究体制などの問題

であろうが、温度標準のような仕事は日本の研究体制には向かないことは確からしい。こういう仕事は外国にまかせておいた方がいいのだろうか。

引用文献

- 1) “1968年国際実用温度目盛”, コロナ社, 東京 (1972).
- 2) 櫻井弘久, 計測と制御 **24**, 1092 (1985).
- 3) 櫻井弘久, 臨床化学分析談話会夏期セミナー記録集 **7**, 118 (1980).
- 4) L. Guildner, R. Edsinger, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **80A-5**, 738 (1976).
- 5) H. Plumb, G. Cataland, *Metrologia* **2**, 127 (1966).
- 6) T. Cetas, *Metrologia* **12**, 27 (1976).
- 7) R. Kemp, L. Besley, W. Kemp, *Metrologia* **21**, 139 (1985).
- 8) T. Quinn, J. Martin, *Metrologia* **20**, 163 (1984).
- 9) L. Crovini, A. Actis, *Metrologia* **14**, 69 (1978).
- 10) S. Ward, J. Compton, *Metrologia* **15**, 31 (1979).
- 11) H. Sakurai, R. Kemp, *Metrologia* **21**, 201 (1985).
- 12) S. Sawada, M. Arai, H. Sakurai, “Temperature measurement”, China Academic Pub. (1986) p. 232.