

## ITS-90のその後

## Current Topics on the ITS-90

櫻井弘久

(平成7年1月4日受理)

Hirohisa Sakurai

(Received January 4, 1995)

Current topics on the ITS-90 are provided with their background. The conversion table from the IPTS-68 to the ITS-90 was recently revised and new experimental data pointed out the ITS-90 is not completely a good approximation to thermodynamic temperature.

## 1. はじめに

1990年国際温度目盛(以下ITS-90と略す)が1990年から温度標準として採用され、以前に使われていた1968年国際実用温度目盛—1975年修正版(以下IPTS-68と略す)に置き換えられた。ITS-90の詳細についてはすでに本誌に必要となる情報を提供した<sup>1)</sup>。また、熱力学諸量の数値変換法についても本誌で解説され<sup>2)</sup>、さらにIUPAC熱力学委員会の資料が翻訳<sup>3)</sup>(以下「IUPACの資料」と略す。)されている。

ここでは、測温諮問委員会で現在検討されている事項を、その背景を含めて紹介する。

## 2. ITS-90とIPTS-68の差

両目盛の差はITS-90が決定された後の最も大きな問題点であった。IUPACの資料もその大部分が両目盛の差についてであるが、変換の際に考慮すべき「不確かさ」については正確さを欠いている。両目盛の変換式やテーブルになぜ曖昧さを残す結果となったかの経緯を紹介し、実際にIPTS-68で測られたデータをITS-90に変換する際の精度評価に参考にして頂きたい。

IPTS-68とITS-90の差に関して最も大きな問題は630℃～1064℃の領域にある。1990年以前の熱力学温度測定は、すべてIPTS-68からの差として報告されている。水の沸点が100℃から25 mKほどずれていると最初にGuildnerらが報告したのは1972年である<sup>4)</sup>。その後いろいろな方法で熱力学温度が測定されているが、これらの測定はほとんど1982年～1985年で終了している。その後、いくつかの補足測定が行われ熱力学温度と一致するようにITS-90が決められた。つまり、1985年頃にはIPTS-68と熱力学温度の差はほとんど明確になっていた。その当時国際度量衡局からの資料ではIPTS-68と熱力学温度との差は約800℃で0.6℃を越えると報告されており、温度目盛を改訂することが必要であるという最大の原動力となっていた。この温度領域の熱力学温度は放射温度計(NPL,BIPM,NRC)、熱雑音温度計(IMGC)で行われており、相互によく一致していると報告されていた<sup>5)</sup>。

しかし、IPTS-68では安定度の悪い熱電対が標準温度計となっており、これを白金抵抗温度計に変更することが温度目盛改訂の一つの条件となっていた。このための準備はNIST(当時のNBS)とNRLMが行っており、その後NIMが参入してきた。これらの研究所では白金抵抗温度計の特

性式をいくつかの温度定点を使って検討していた。しかし、1986年当時では高温用白金抵抗温度計の特性と熱力学温度を同時に評価する報告はなかった。このため白金抵抗温度計の特性を評価すること無しに上記のIPTS-68と熱力学温度との差が公表されていた。われわれはこの差のテーブルに疑問を持ち、熱電対と白金抵抗温度計の直接比較を行い、いくつかの誤差要因を加味しても800℃で熱力学温度とIPTS-68の差は0.2℃程度であることを報告した。

改訂の原動力を否定することになるこの報告は、IPTS-68と熱力学温度の差を検討していたグループからは何のコメントや引用もされなかった。しかし、当時放射温度計で熱力学温度測定を行っていたが、上記の熱力学温度測定の結果には加えられていなかったPTBには朗報となっていたようである。PTBではIPTS-68との差として熱力学温度を測定するのではなく、白金抵抗温度計の特性を直接熱力学温度で調べていた。

Fig.1はIPTS-68とITS-90(1990年以前は熱力学温度)との差について、1985年頃の公表値(点線)、白金抵抗温度計と熱電対の特性比較値<sup>6)</sup>、ITS-90のテキストに記載されているテーブル値(実線)を示す。1985年以降に測られた熱力学温度測定の結果がほとんどないにもかかわらず、図で見られるように1990年では、特に高温側では差が約半分修正されている。熱雑音温度計を使った熱力学温度測定の結果では、むしろIPTS-68は800℃近傍で0.8℃ほど差があると報告されており、差を大きくする要因はあっても、小さくする要因はわれわれのデータ以外にはなかった。

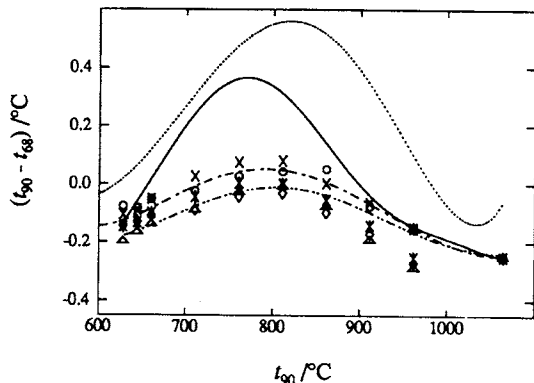


Fig.1 Differences between the ITS-90 and the IPTS-68 in the range from 630℃ to 1064℃.

CIPM's estimation at 1985 (-----), ITS-90's estimation (———), revised version by CCT (---), IEC's reference functions (·····), and measured values (○△◇×\*).

ITS-90は960℃以下の温度領域は白金抵抗温度計で、PTBの熱力学温度測定の結果を基に定義された。結果的に他の熱力学温度の測定値は無視されたことになったが、これに気が付いていたのは我々以外には、多分、PTBとIMGCのみであった。ITS-90のテキストを作成していたグループは、熱力学温度とIPTS-68の差を検討していたグループのデータを採用してしまった。ITS-90のテキストに記載されている両目盛の差が誤りである原因はここにある。筆者はいずれ修正されることを期待して、国内では600℃から960℃の領域ではこの変換テーブルを使用しないように勧めた。権威ある機関が発表しても、敢えて使わないという行為は技術力を測るバロメータと考えた。例えば1992年まで検討を依頼されていた理科年表のITS-90関連の部分についても、図および変換式の記載を控えることにしていた。残念ながら、現在の理科年表には誤った変換式が掲載されている。使わないことを希望している。

国際電気会議(IEC)では熱電対の規準関数を作る際に、ITS-90のテキストにあるテーブルに疑問を示し、これをきっかけに、ITS-90とIPTS-68を直接比較することが国際課題となった。公表された結果<sup>8)</sup>を見ると、ITS-90の変換テーブルが誤りであることを明確に示したのはNRLMとIMGCである。一部の研究所では誤った変換テーブルに合わせたデータを提出している。理由もなく発表が1年も遅れたNISTは、われわれのデータを見て再測定していたと疑われてもしかたがない。最終的にITS-90のテーブルは誤りであることがこの結果で明確になった。このことはIUPACの資料の最後に付録としてふれられている。なお、この式はNISTの2本の熱電対がIPTS-68を決めたときの基準の温度計であったことを理由に、実験データの不確かさをまったく無視して5 mKまで合わせ込んだという意味のない式であり、データ処理法に疑問が指摘されている。(翻訳されたIUPACの資料の式(14)のうち、 $t_4$ の項の係数の小数点の位置は誤りである。)

IECではこの変換式を使って、熱電対の全体の規準関数を作成している。S-熱電対についても、NISTが保持する2本の温度計を使ってS-熱電対の規準関数を作成した。つまり、S-熱電対についてはIPTS-68とITS-90の差は上で示した両目盛の差の式と一致するはずである。ところがFig.1に示すように後者(2点破線)と前者(実線)は0.1℃以上の差がある。5 mKまで合わせ込んだ変換式は0.1℃以上の不確かさがあることになる。これにNISTもIUPACの資料も気がついていないらしい。

なお、IPTS-68のテキストでは熱電対の安定性や再現性を考慮して、0.2℃程度の不確かさを考慮しなければならないとしており、どちらを使っても0.2℃程度の不確かさがある。NISTは、0.2℃の不確かな温度計に対して5 mKまで

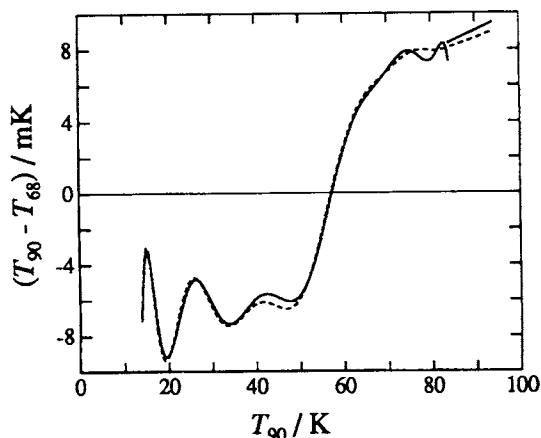


Fig.2 Differences between the ITS-90 and IPTS-68 below 100 K. solid lines : the proposed difference functions. dotted line : the best fitted function based on the ITS-90's table.

合わせ込んだ7次式を提案していることになり、測温諮問委員会は何の躊躇もなくこの式を再報告<sup>6)</sup>している。しかも一つのデータから異なった結果を出していることになる。

白金抵抗温度計領域の変換式についてはすでに報告されており<sup>6),7)</sup>、またIUPACの資料にもある。ここではいくつかの注意事項のみを記することになる。

IUPACの資料で13.8 K~73.15および83.8 K~903.75 Kの変換式が与えられ、73.15 K~83.8 Kの約10 Kの領域が空白になっている。これらの式は国際度量衡局のメートル条約関係資料から引用されているが、こちらの資料では10Kの空白領域がなくなっていた。Fig.2に示すように、この領域で与えられた式はこの10 Kの領域で異常な振る舞いをする関数である<sup>7)</sup>。単なるデータ処理法の幼稚さから生じた結果である。同様の指摘を測温諮問委員会にも行ったが、IUPACの資料ではこの指摘に基づいて10Kの空白の温度領域を設けたと考えられる。理由を明確にするか、式を変更すべきである。熱関連のデータを処理する場合には注意が必要である。むしろ、この式にとらわれずに必要とする温度領域でITS-90のテキストから両目盛の差を適当な関数で近似して変換する方法を推奨する。

同様に、30 K~54 Kの温度領域は変換式に1 mK程度の誤りがあることも指摘していた<sup>7)</sup>。単なるデータ処理の誤りであろう。修正するのが良識と考えるのは欧米には通用しないようである。

最後にNISTの名譽のために一言。83.7 K~903.75 Kの変換式はG. Furukawaを中心に誤差を評価してNISTで作成されたものであり、IUPACの資料に書かれているよう

なRusbyの力作ではないことを強調しておく。83.7 K以下の式と比べれば別人が作ったことが理解できると思われる。勝手に他人の式や結果を引用している。

### 3. 熱力学温度との差

ITS-90は熱力学温度と一致するように決められたとされている。しかし、すでに述べたようにITS-90を決めるための熱力学温度の測定は1980年代半ばで終了している。ITS-90は最初1987年に最終決定する予定で準備されていた。しかし、高温域での白金抵抗温度計の開発が思わしくなく、延期せざるを得なくなった。このため、この期限を目処に熱力学温度を測定していた多くの研究所はこれ以降データが出なくなった。一方、この期限とは無関係に熱力学温度を測定していたグループもいくつかあった。しかし、これらの後発組のデータはそれ以前のデータを否定するものもあった。測温諮問委員会では、強引にこれらのデータの公表を拒んで、前者のデータでITS-90を決めていった。1990年直後から、これらのデータが吹き出し始めた。

最も顕著な例が、室温から90 Kまでの領域であり、測温諮問委員会ではこの温度領域で2~3 mKで熱力学温度と一致するとしていた。この温度領域は、国際度量衡局長のQuinnらがNPLで行っている全放射温度計とNMLの気体温度計を中心にNMLのKempがまとめたものである。これとは別にPTBのWeberやソ連が行っていた気体温度計があったが、前者は完全に無視され、後者は温度計の校正という手段で前者に一致させられた。残念ながら、最近の結果では後発組の結果が正しいとの意見になりつつあり、ITS-90と熱力学温度との差は、100 K近傍で10 mK程度であると推定されている。熱力学温度測定を評価することは非常に難しく、素人集団が無理にかき回しても正解が得られるものではない。正確な誤差評価を行える第三者がいなくなった現在、測定法の改良や新しい測定法の開発が必要になっている。

現在熱力学温度測定が特に必要な温度領域は、4K以下、4 K~24 K、80 Kから室温、400℃~1000℃である。

### 4. 用語の定義

ITS-90に限らず、従来の温度目盛でもテキストに用いられている用語については、特殊な意味を持たせていた。IPTS-68ではテキストに説明があり、特殊な意味で使ったために生ずる誤解を解消していた。ITS-90では用語解説が省略され、しかも、テキスト作成者が誤解している向きもあり、一般に使われている用語との混乱も生じている。例えばITS-90ではガリウムに対して「融解点」が定義定点とされているが、いわゆる融解しつつある状態ではなく、1気圧下での固相と液相の平衡状態であり、凝固点とまったく

同じ状態である。IPTS-68 のテキストの様に、用語の定義を記述すべきであった。

この他にも、目盛のユニークネス、コンシステンシーなどの用語が誤解されやすい。現在これらの用語について検討が行われつつあるが、これについても、あまりよい結果は期待できない。

## 5. 誤差評価

測定結果を表現するとき、その結果の確かさを数値で示すことは科学技術報告書には不可欠である。しかし、分野によって、または、人によってその表現方法が異なっていた。特に物理定数を決める分野では発表されたデータをどのように評価して解析するかで長い間議論が続いていた。このため、国際標準化機構 (ISO) が中心となって不確かさの表記法を統一するための努力がなされてきた。1992 年秋にその結果がまとめられ、IUPAC, ISO, BIPM などの国際機関が統一した表現法を採用するための文書を作成した<sup>9)</sup>。日本でも日本学術会議を通して学会誌などで広報されている。この文書では従来の「誤差」という表現の曖昧さや、混乱を解消するために「不確かさ」(英語「Uncertainty」, 正式の日本語訳は決定されていない) という表現を使って記述することになっている。この表現法は物理定数の調整に端を発しているため、必ずしもすべての分野で採用できるかは不明の部分もあるが、従来統一がとれていなかった表現法を統一するという意味で高い評価が得られつつある。

この文書の主旨は、どのような手続きで不確かさを評価したかを明確に記述することにある。発表された数値がどの程度の確かさであるかは、従来、著者のみが行っていた。このため著者が見落としていた要因があった場合には発表された数値は意味が無くなっていた。これに対して、不確かさを評価した手続きを明確にすることにより、担当者以外でも不確かさの要因を再評価することができ、発表された数値が利用できることになる。誤差要因を見落としたために見かけ上の精度がよいということを選避ことができ、精度評価の誤りが担当者以外にもわかるという利点がある。

温度関係では温度計の校正という手段で標準が供給されており、また、国際比較が行われているが、従来その校正値の確かさについては曖昧であった。測温諮問委員会では国際比較などを中心にその評価法を検討することになっている。現在では各国の足並みが揃わないため調整中の段階であるが、将来校正された温度計の確かさが明確に記述されることになる。

## 6. おわりに

以上 ITS-90 後の動向について述べたが、まだ多くの問題

が残されている。メートル条約関係の諮問委員会が形骸化している現在、わが国の学協会から IUPAC などの国際機関に働きかけ、標準のユーザ側から問題点を指摘することが必要な時期であると思える。なお、温度標準関係の情報はヨーロッパを中心に動いており、詳細を正確に把握することは困難である。本稿には筆者の意見が含まれていることをお断りしておく。

## 標準研究所の略号

- IMGC : Istituto di Metrologia G. Colonnetti (伊)
- NML : National Measurement Laboratory (豪)
- NIM : National Institute of Metrology (中)
- NIST : National Institute for Standards and Technology (米)
- NRLM : National Research Lab. of Metrology (日)
- NPL : National Physical Laboratory (英)
- PTB : Physikalisch-Technische Bundesanstalt (独)
- BIPM : Bureau International des Poids et Mesures (国際度量衡局)

## 文 献

- 1) 櫻井弘久, 熱測定 **17**, 137 (1990) .
- 2) 斉藤一弥, 熱測定 **18**, 105 (1991) .
- 3) 木村隆良, 菅 宏, 熱測定 **21**, 180 (1994) .
- 4) L.A. Guildner, R. L. Anderson, R.E. Esinger, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol.4, 313 (1972) .
- 5) 櫻井弘久, 応用物理 **57**, 1353 (1988) .
- 6) 1990 年国際温度目盛 (日本語訳), 計量研究所報告 **40**, 308 (1991) .
- 7) 櫻井弘久, 田村 収, 新井 優, 計量研究所報告 **41**, 307 (1992) .
- 8) R.L. Rusby, Hudson and M. Duxieux, *metrologia* **31**, 149 (1994) .
- 9) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (International Organization for Standardization, 1993) .

## 要 旨

ITS-90 に関する最近の問題点について解説する。IPTS-68 からの変換表が最近変更され、また、最新の熱力学温度の測定結果では、ITS-90 が必ずしも熱力学温度に一致していないことが指摘されている。