

解説

国際温度目盛の課題と現状

櫻井弘久

(受取日: 1999年11月7日, 受理日: 1999年11月14日)

Present Status towards Revision of the International Temperature Scale of 1990

Hirohisa Sakurai

(Received November 7, 1999, Accepted November 14, 1999)

The ITS-90 survived for about 10 years without any fatal defects, except a few trivial ones, such as the data in the conversion table from IPTS-68 to ITS-90 in the range from 660 °C to 962 °C. In this article is explained the present status towards the revision of the ITS-90, including differences between the ITS-90 and thermodynamic temperatures measured by filter radiation thermometers and acoustic thermometers, non-uniqueness of high temperature platinum thermometers, and a new provisional scale below 1 K.

1. はじめに

1968年国際実用温度目盛 (IPTS-68) に代わる国際協約による温度標準, 「1990年国際温度目盛 (ITS-90)」¹⁻³⁾ を1989年の国際度量衡委員会 (CIPM) が採択してから10年が経過した。1989年の段階では, 国際温度目盛を作成するのに十分なデータがあったとは言えなかった。一方, 精密測定に偏りがちな国際温度目盛に対する, 主として通商分野からの圧力と, 熱力学温度からのずれを早急に修正する必要があるなどの時間的な制約の中で, 網渡り的に作成されたのがITS-90であった。このため, 決定後, 短期間で修正が必要になるということも予想されていた。しかし, 幸運にも, IPTS-68からITS-90へ変換するためのデータの一部 (660 °C ~ 962 °C) にミスがあった程度で, 致命的な欠陥は現在までのところ指摘されていない。しかし, 細部に

ついてはいくつか問題点が指摘されはじめた。

ITS-90を決定する際に最も議論があり, 課題と考えられていた点は,

1. 高温域 (660 °C ~ 960 °C) での補間計器である高温用白金抵抗温度計の安定度に問題があること
2. ITS-90の実現法を複数採用したため, 補間式や定義間に矛盾を生ずる可能性があること
3. ITS-90が熱力学温度からずれている可能性がある温度領域があること

などであった。このほか, 将来に向けての課題としては低温域の拡張方法であった。

ここでは, 上記の課題の現状, 現在指摘されているITS-90の問題点とその背景などについて, 公表されたデータを中心にまとめる。

2. 高温用白金抵抗温度計

高温用の白金抵抗温度計については、1989年当時、製法、絶縁抵抗の評価法および処理法、不安定の要因の特定など、問題が残された状態であり、ITS-90に対応できていなかった。ITS-90を設定する段階では、これらの問題は近い将来解決できるとの見通しであった。その後、白金と絶縁巻き棒（シリコン）との化学反応、温度計周囲にある高温金属蒸気による白金線の汚染なども無視できない問題であることなども指摘された。さらに、白金線の抵抗測定では、巻き棒の誘電率やそれに伴う熱起電力の発生なども指摘された。⁴⁾ これらは簡単に解決できる問題ではなく、現在までのところ、ほとんど手がつけられていない。従って、高温用白金抵抗温度計については、ITS-90作成当時から、ほとんど進展がないという状態である。

一方、この温度領域の実際の温度測定には、熱電対が使われているため、熱電対 (Type S) の特性式をITS-90に基づいて測定するという国際協力プロジェクトが行われた。^{5,6)} この結果は、IPTS-68からITS-90への変換式という形で公表されているほか、IECやJISなどの規格に反映されている。このため、高温用白金抵抗温度計の性能が不十分でも、工業分野など実用面では問題になっていない。白金抵抗温度計については、使用法を含めて、いろいろ工夫されている^{7,8)} が、根本的な改良についての報告はない。高温用白金抵抗温度計は開発に難しさがあるため、その代用品に関する研究や放射温度計の性能向上といった方向での研究が中心となっているのが実情である。

3. ITS-90の再現性

ITS-90では、いくつかの条件を満たせば任意の温度計が使える、また、温度領域によっては複数の実現法を採用している。このため同じITS-90の温度値でも、その実現法の違いによって温度値が異なる可能性がある。このような形式の標準を採用した背景には、IPTS-68で指摘されていた使用領域外からの校正時の不確かさの伝搬を避けることや、室温付近の再現性をよくするなどの理由とともに、実用性（経済性）と精度とのバランスを考慮せざるを得なくなったという時代背景があった。これらの状況から、ITS-90は、目盛の再現性（ユニークネス）を0.5 mK以内（660℃以下）にする、ということの一つの目安にして作成された。

IPTS-68で白金抵抗温度計が使われていた温度領域（14 K～660℃）は、1989年の段階でも比較的データがあった。しかし、室温以下については当時のデータの信頼性に問題があり、0.5 mKを越えるノンユニークネスが懸念されていた。しかし、現在のところ24 K～273.16 Kのサブレンジの補間式での24 K～54 Kの領域を除き、補間式や

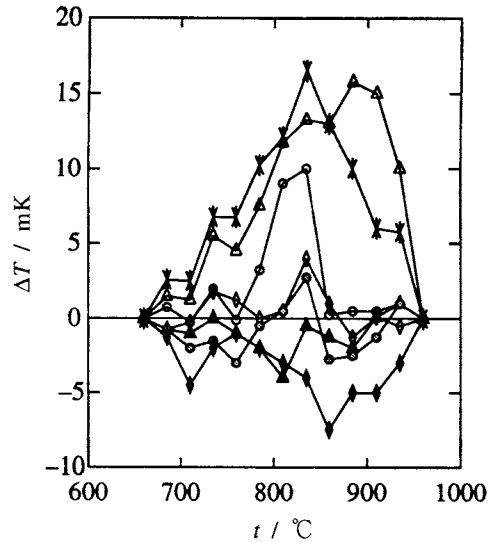


Fig.1 An example of non-uniqueness measurements of the ITS-90 in the range from 660℃ to 962℃.

温度計の個体差などによる0.5 mKを越えるノンユニークネスは報告されていない。IPTS-68では1～3 mKのノンユニークネスがあったのに比べて、ITS-90では改良されている。

14 K～24 Kの温度領域では、補間計器として「補間用気体温度計」と「白金抵抗温度計」という全く異なる温度計が使われている特異な温度領域である。この領域についてもノンユニークネスが0.5 mKを越えることはないと報告⁹⁾ されている。

一方、660℃から962℃の領域での温度計の違いによるノンユニークネスについては、1989年当時全くデータが無かった。この温度領域は、安定な白金抵抗温度計が得られにくいという問題もある。この温度領域のユニークネスを評価することがITS-90設定直後の最大の関心事であった。このため、ヒートパイプ炉を使った恒温槽が開発され、温度計の違いによる温度差の測定が行なわれている。¹⁰⁾ 複数の構造、製法法の異なる白金抵抗温度計をITS-90に従って校正し、個々の温度計の示す温度値（いずれもITS-90の温度値）の差を実験的に調べたものである。温度計を高温で使用すると抵抗値が変化し、校正の意味がなくなるという現状の温度計での実験であるため、必ずしもノンユニークネスのみが測定されているのではないが、20 mK～30 mK程度であると報告されている。測定結果の一例をFig.1に示す。ITS-90への改訂目的の一つが、熱電対を使う温度領域の精度を上げることであったが、IPTS-68の再現性が50 mK程度であったことを考えると、白金抵抗温度計を採用した利

点が、かなり薄れたということを示している。当時、白金抵抗温度計を使うことで、この温度領域は10 mK程度の再現性を予想していた。補間式に問題があるのか、温度計に問題があるのかは今のところ明確になっていないが、ノンユニークネスの議論より安定な温度計の製作法の確立の方が優先課題である。

4. 温度定点の問題点

ITS-90は温度定点の実現法を直接規定しているものではないが、補間式の係数を温度定点での校正で決定するという点で、温度定点に与えられた温度値の整合性が問題になる。これは温度定点の実現精度にも間接的に影響される。最近の温度定点の測定法および問題点について触れておく。

高温域での温度定点の実現法に関しては、従来の電気炉に対して、ヒートパイプ炉を使う方法が一般的になってきた。これにより定点セル内の温度分布が飛躍的に向上し、特殊なテクニックを使わないでも簡単に定点が実現できるようになってきた。従来凝固過程のみが測定されていたが、融解曲線を熱平衡状態で測定する¹¹⁾ことが試みられるようになってきた。

試料中の不純物の評価や熱平衡を得るためには、温度定点を断熱カロリメトリで実現するのが理想的であるが、温度標準の分野では敬遠されている。主な理由は、温度定点の実現法として金属の凝固点を測定する方法が歴史的に定着してしまったため、装置設計および測定に難しさがあるカロリメトリを敬遠している。温度定点の実現が温度計の校正を目的としていることも理由の一つである。このため熱平衡や不純物の評価は、ほとんど考慮されてなかったり、熱平衡状態で測定していない凝固曲線や融解曲線、強引に不純物評価を行っている例も見られるという状況である。

しかし、高温域でもヒートパイプ炉の普及により、試料内および温度計との熱平衡状態を得るという意味では改良されてきた。熱の流れのある状態での「凝固プラトー」一辺倒の測定からは、少なくとも脱却しつつある。また、高純度の金属が入手可能になったのに伴い、従来6N*程度が利用されていたのに対して、7N以上の試料を使うのが一般的になってきた。この点も不純物の評価をしなくても必要な精度が得られるようになって、温度標準の供給という点では好ましくなっている。

低温域の定点については特に進展はないが、筆者はロードサイクル冷凍機の性能および信頼性が向上してきた時代の流れの中での新しい試みとして、冷凍機での低温標準の実現や供給を試みた。¹²⁻¹⁴⁾今後一般的な方法になる

かどうかは未定であるが、カロリメトリックな温度定点の測定には適しており、従来の方法よりよい結果が得られている。

温度定点の測定精度が向上したために、従来、無視されていたことがいくつか指摘されている。現在のところITS-90の問題点とか改良に直接関係するという状態ではないが、いくつか例をあげておく。

定点物質に関しては、同位体のあいまいさが指摘されている。ITS-90で温度定点に使われる定点物質の同位体組成は、天然の同位体組成とされており、水の場合は大洋の水と同一の組成とされている。水の三重点の温度への同位体組成の影響は、例えば、最も軽い $\text{H}_2\text{}^{16}\text{O}$ と天然同位体組成の水とでは約1.2 mKの差があり、比較的大きい温度差がある。一般の水の同位体組成比は大洋の水の組成比と必ずしも一致していないため、試料によって三重点温度が異なってくる。また、大洋の水についても場所によって、また、蒸留、凝固などの操作によっても組成比が変化する。水のソースや精製法の違いによる同位体組成の差から推定した三重点温度値のあいまいさは、0.085 mK程度になる。¹⁵⁾また、三重点状態で水と水の共存しているときには、水の同位体組成と水の同位体組成が異なるため、同位体比を測定した水を用いても問題点は残る。さらに、実際の三重点測定では、三重点セルと呼ばれるガラス製容器の中で実現された相平衡状態を利用している。この装置の試料では、同位体組成の不確かさのほかに、不純物や残留気体の影響の不確かさが同程度ある。これらを総合すると水の三重点温度のあいまいさは0.2 mKを越えることになる。

このことは、既にFurukawaらが報告していた複数の三重点セル間の温度差にほぼ一致している。¹⁶⁾ただし、Furukawaらは、いわゆる熱平衡状態の三重点を測定しているのではなく、ガラス製三重点セルの差のみを測定しているため、熱平衡状態の三重点ではさらに不確かさが増加する。同位体組成の影響を調べるために、現在、いくつかの試料による温度差の測定も行われている。ITS-90は0.5 mKを越えない再現性を目的にしているため、この結果が直接温度標準の問題となることはないが、温度の単位を決める基準温度でもあるため、今後も議論されることになると思われる。

その他の定点では、水素の三重点についての指摘がある。一つは水と同様に、同位体の問題で、水素試料中の重水素の組成は試料に大きく依存することが指摘されている。従来、定点試料中の重水素の組成は、天然の組成と大差がないと考えられていたが、実際の試料は製造法や精製法によって組成が異なり、水素の三重点温度は、試料により0.7 mK程度異なる可能性があることをPaveseが指摘している。今のところ実測値は報告されていないが、0.7 mKはITS-

*) 99.9999%

90でも問題になる不確かさであり、今後の課題となる。

他の一つは筆者が指摘したもので、平衡水素を得るための触媒が三重点温度に影響する点である。従来、平衡組成の水素を得るためにオルト-パラ変換触媒として、常磁性塩が使われていたが、試料全体を平衡組成にするために通常、液体のレベル以上に常磁性塩を定點セルの中に入れて測定することが推奨されていた。この触媒による影響は今まで測定されたことはなかったが、固体水素の比熱異常のみならず、三重点温度にも影響する¹⁴⁾ことが分かった。触媒の量を試料の量に比べて少なくすれば触媒の影響を小さくすることが可能であり、触媒の有無で三重点温度に約0.2 mKの差がある。

ITS-90を設定した直後、水銀の三重点、水の三重点、ガリウムの融解点の温度値の間に1 mK程度の矛盾があること指摘された。つまり、基準関数からの差を直線近似すると系統的なずれがあった。しかし、白金抵抗温度計の抵抗値が、この温度領域で基準関数に対して直線的に変化するという理論の根拠がなく、温度計の校正という立場からは、ITS-90のこれらの定點への付与値に矛盾はない¹⁷⁾ということになった。

5. 低温域への拡張

ITS-90は0.65 K以上の温度領域で定義されている。国際温度目盛は、熱力学温度との一致度の向上と温度領域の拡張が最初の1927年国際温度目盛からの課題であった。

高温域はプランクの放射則がある関係で、放射温度計測の技術が進歩すれば自動的にその実現精度が向上する。国際温度目盛は、プランクの放射式に含まれる一つの定数と、一つの温度定點の温度値を与えることにより、分光放射輝度の比で任意の温度が決定できる構造となっている。このため基準の定點温度の実現精度に依存するという欠点があるが、測温精度は放射測定技術の向上に対応できる構造となっている。実用性と不変性の両面から、今後とも変更されることはない。

一方、低温域については、技術的な進歩に応じて拡張がなされてきた。現在、3.2 K以下0.65 Kまでは³Heの蒸気圧と温度の関係で定義されている。国際温度目盛は、個々の試料(温度計)に依存しない物性量や物理法則を優先して使う方向で検討されてきた。蒸気圧目盛は前者の、プランクの放射式は後者の例である。白金抵抗温度計は、個々の温度計によって異なる抵抗値を使った例外の温度計である。

低温側への拡張も、ほぼ、この方針で検討されてきた。1998年オランダのライデン大で「1 K以下の温度標準の設定に向けてのワークショップ」が開催され、一つの方向が得られた。このワークショップの目的は、1 K以下1 mKま

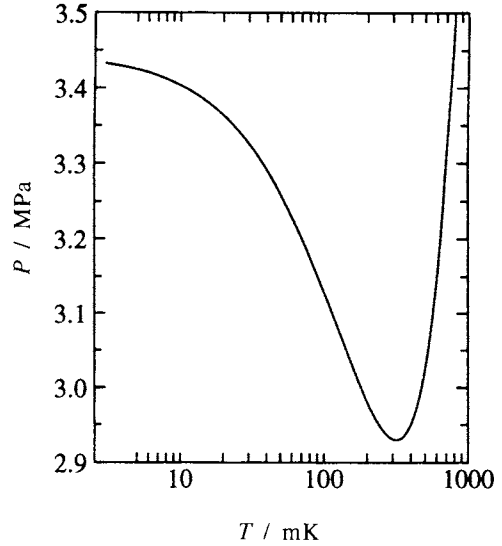


Fig.2 The temperature-pressure relation of the liquid-solid equilibrium of ³He below 1 K.

での国際温度目盛を設定するための検討であった。この温度領域で温度標準として採用するには、

- ・温度目盛が0.5 mK以内(または、50 mKでは1%以内)で再現可能であること、
 - ・0.65 KでITS-90とのスムーズな接続が可能であること、
- の2点が最小限の必要事項である。

1 K以下の温度標準としては、³Heの融解曲線、熱雑音温度計、白金NMR温度計、常磁性温度計、第二音波温度計などが考えられていた。これらのうち、上記の条件を満たす温度標準としては、³Heの融解曲線が最も有力な候補である。³Heの融解曲線を何らかの熱力学温度測定法により、温度と圧力の関係式を測定しているのは、米国標準研究所(NIST)/フロリダ大学のグループと、ドイツの標準研究所(PTB)の二つである。ほかにも間接的なデータがある。これら二つの目盛の差は、30 mKまでは0.3%以内で互いに一致している。しかし、この温度域以下では、例えば、6 mKで1.3%程度の差があり、1998年の時点ではこの差の原因は解明されなかった。NISTとフロリダ大のグループでは、低温側をフロリダ大で、高温側をNISTで測定しているなど目盛のスムーズさの問題があった。その後、補正などが検討され、PTBの測定結果を採用する方向で²¹⁾まとめられている。³He融解曲線の温度と圧力関係をFig.2に示しておく。³Heの融解曲線を採用する利点は、

1. 一つの方法で約3桁の温度領域をカバーできる。
2. 一つの固相転移(Néel点, 0.88 mK)と二つの超流動転移点(A: 2.41 mK, B: 1.87 mK)および圧力最小点

(315 mK, 2.93107 MPa) が温度および圧力定点として利用できる。

などである。さらに、PTBの温度/圧力の関係式を採用する利点は、一つの研究所で全領域を測定しており、目盛のスムーズさが確保できている点である。問題点は低温下での圧力測定法で、現在、ダイヤフラム圧力計が使用されているが、特殊な製作技術と校正法が必要であり、あまり一般的ではない。なお、³He融解曲線目盛を国際温度目盛にするため、1999年の国際度量衡総会では、³Heの固相液相曲線の温度/圧力の関係式を作成することを要請するという決議をおこなっている。²²⁾ ここ1年程度で、暫定目盛として採用されることになるとと思われる。

6. 熱力学温度測定の現状

熱力学温度は、温度標準を決めるときの最大の関心事であり、国際温度目盛は熱力学温度の測定精度が向上したときに、大幅に改訂されてきた。

白金容器および白金合金容器を使ったNISTの気体温度計で測定した熱力学温度とIPTS-68の差が、実用的な温度測定でも検出可能な程度(100℃で約26 mK)あったことが、IPTS-68を改訂する要因の一つであった。これらの結果とはかの気体温度計、全放射温度計、熱雑音温度計、音速温度計¹⁸⁾の結果などを考慮して、最終的にITS-90が決められた。しかし、その中心はNISTの気体温度計であった。高温域も、これらの気体温度計で測定した黒体温度を基準にして、放射温度計での測定結果を使ってITS-90は決められている。

ITS-90を決定する段階で、NISTのこれらの気体温度計は、450℃近傍での再現性が数mKであるのに対して、二つの温度計の温度値には約30 mKの系統的な差があった。実際は、これらの平均値がITS-90となっている。この差を気体温度計を使って再測定することは困難であるため、現在、いくつかの方法での熱力学温度測定法が検討されており、放射温度計による結果と音速温度計による結果が一部公表されている。

ここ20年ほどの光学関連の技術的な進歩は、光検出器の性能や放射測温法の精度を飛躍的に向上させてきた。また、クライオラジオメータの開発により、クライオラジオメータで直接、またはこれで校正した放射温度計を使うことにより、黒体の熱力学温度を直接測定しても、その不確かさが0.05%という状況になってきた。このため、ITS-90を決めたときのように、基準黒体の温度を気体温度計での測定結果に頼らないで、放射温度計で、直接、熱力学温度を測定することが可能になった。²³⁾ つまり、実際は放射温度計をクライオラジオメータで校正するという作業を行うことになるが、原理的には、水の三重点の代わりに物理定数を

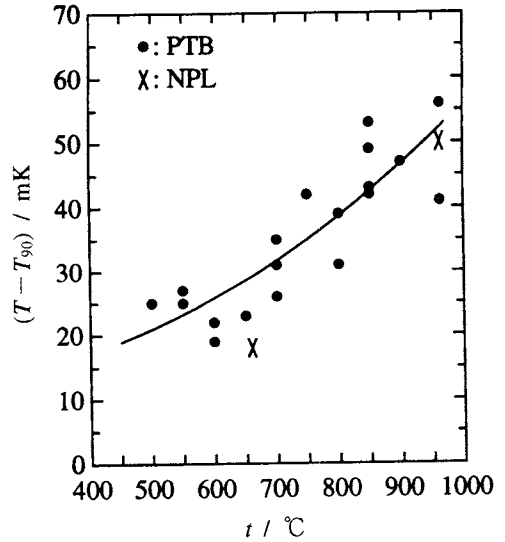


Fig.3 The differences between thermodynamic temperatures and the ITS-90 in the range from 700 K to 1200 K measured by filter radiation thermometers measured at PTB and NPL's fixed point measurements indicated by X.

通して、熱力学温度を測定できることになる。また、従来、高温域での測定が中心であったが、低温域の測定も可能になってきた。

このような狭帯域放射温度計を使って、Stockら²⁴⁾(PTB)は、熱力学温度とITS-90の差の測定している。その一例をFig.3に示す。この結果は、基準温度を使わずにクライオラジオメータなどで校正した放射温度計を使って、直接熱力学温度を約14 mKという驚異的な測定精度で測定している。この結果は、NISTの二つの気体温度計の450℃近傍での平均値より18 mK高い温度値を示しており、NISTの白金合金容器を使った気体温度計の結果²⁵⁾と3 mKで一致していることになる。Fig.3の曲線は最小二乗法で推定した値である。この結果のみで直接、気体温度計の不確かさを評価できるということではないが、従来、気体温度計しか使えなかった温度領域も、放射温度計で気体温度計と同程度の精度で測定することが可能であることを示している。

一方、この測定とは独立に行った英国標準研究所(NPL)のMartinらの同様の狭帯域放射温度計での銀およびアルミニウムの凝固点の測定結果²³⁾をFig.3にXで示した。両者はよく一致している。しかし、同様に測定したNPLの金の凝固点の測定結果は、この曲線の延長線とは一致していない。ITS-90の金の凝固点の付与値に誤りがあるか、測定上の誤りかは今のところ確認されていない。なお、PTBの過

去に測定した金の凝固点のデータを補正した結果はこの曲線上にあると報告されている。金の凝固点のITS-90の付与値の問題は別にしても、これらの結果は、ITS-90が高温側で熱力学温度からずれていることを明確に示している。

音速温度計の方は室温付近での測定結果²⁶⁾が得られている。音速温度計では、圧力 p 、温度 T の理想気体の音速 $u(p, T)$ の関係式、

$$\frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} k T$$

$$u(p, T)^2 = \frac{\gamma}{3} v_{rms}^2$$

を使って、音速測定から熱力学温度を求める。²⁶⁾ ここで、 v_{rms} はガスの平均速度、 k はボルツマン定数、 γ は定積比熱と定圧比熱の比である。実際の温度測定では、水の三重点での温度と圧力、 T_w 、 P_w とすると、

$$\frac{T}{T_w} = \lim_{p_w, p \rightarrow 0} \frac{u(p, T)^2}{u(p_w, T_w)^2}$$

で理想気体を近似する。

Moldover らの音速温度計は球形容器の共振周波数から音速を測定する音速温度計であり、従来の円筒形の共振器を使った音速温度計より精密な測定が可能となっている。なお、共振周波数と測定精度の関係で、作動流体にはアルゴンが使われている。また、体積をマイクロ波で測るなど特殊な技術を駆使している。NISTでは気体定数、 R 、を測定することが目的で開始され、水の三重点での気体定数の測定の終了後、ガリウム点での測定が行なわれていた。¹⁸⁾ その後、温度測定用に再整備し、現在、 -40°C から 30°C の結果が公表されている。

Fig.4 に音速温度計によるITS-90と熱力学温度との差を示す。Moldover らの結果のうち、気体定数を測定した装置でそのままガリウムの融解点を測定した結果は、新しい結果と約 4 mK の差があるが、ガリウム点の測定に使用したアルゴンは、純度に問題があったとのことである。また、Edwing らの結果はMoldover らの新しい結果とよく一致している。なお、**Fig.4** の実線はMoldover らの結果の最適値であり、破線はIPTS-68とITS-90との差である。ITS-90はIPTS-68に対して 30°C で約 7 mK の低い値である。今回の結果は、熱力学温度は 30°C でITS-90より約 4.6 mK 高い値で、ITS-90の修正が大きすぎたという結果である。なお、Moldover らの音速温度計は 700 K まで、つまり、PTBの放射温度計の下限と接続可能な温度までの測定が予定されている。

低温側での気体温度計については、1) 気体の吸着、2) 容器の熱膨張、を中心に検討されており、PTBのWeberは、

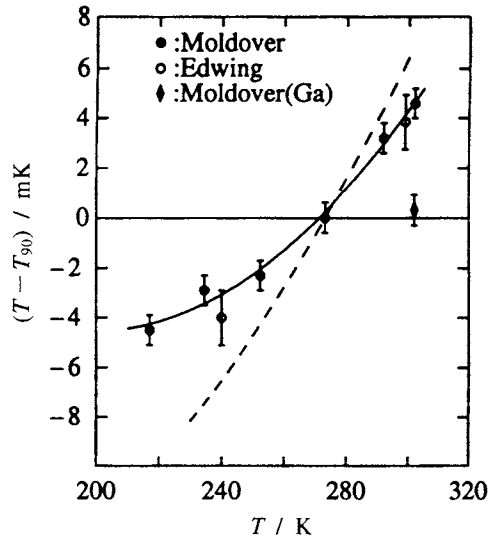


Fig.4 The differences between thermodynamic temperatures and the ITS-90 in the range from 240 K to 300 K measured by Moldover *et al.*^{18,26)} using acoustic thermometers and by Edwing *et al.* The broken line indicates the differences between the ITS-90 and the IPTS-68.

150 K 近傍で約 10 mK 程度ITS-90の温度値が熱力学温度より高いと指摘している。²⁰⁾ IPTS-68とITS-90の差は 14 mK であり、ITS-90の修正が大きすぎたという結果である。

低温域では新しい試みとして、気体のレイリー散乱を利用する方法での気体温度計が開発されている。²⁸⁾ 従来の気体温度計では、作動流体のガスが容器壁へ吸着する量の補正や気体容器の膨張の補正などが大きな不確かさとなっており、評価することが困難な要因であった。これに対して、この方法ではこれらの要因が影響しない点に特徴がある。温度の異なる二つのセルの気体を同一圧力にして散乱光の強度比を測定することにより、気体の密度比を散乱光の強度比として測定する。欠点としては、散乱強度が必ずしも密度のみに依存しない点と散乱光の検出感度に限界がある点である。実際は、散乱強度が得られるクリプトンやキセノンなどで測定されており、補正項などが検討されている段階である。 10 ppm 程度の不確かさで測定することが可能とされている。

200°C 以下の温度域は、気体温度計を含め、雑音温度計など何件かの熱力学温度の測定が準備されている。^{20,27)} また、誘電率を使ったPTBの気体温度計の結果も既に公表されており、上記の音速温度計が 700 K まで拡張され、放射温度計との差が確認できれば、ITS-90の熱力学温度からの

ずれの全体像が明らかになる。

一方、ITS-90で初めて定義された ^3He の蒸気圧目盛についても熱力学温度からのずれが指摘されている。 ^3He の蒸気圧目盛はヘリウムの物性値と熱力学を用いて計算することが可能である。しかし、完全にすべての係数を必要な精度で求められないため、実験結果に整合させるように定数を決めることになる。この結果、ITS-90の蒸気圧の式は0.6 Kで約1.2 mK程度低い温度値になると報告されている。^{29,30)} この差はITS-90の予想範囲を超えており、 ^3He 融解曲線が暫定目盛になる際に、この暫定目盛と整合させるために、なんらかの修正が行われる可能性がある。

7. おわりに

最初に述べたように、現在のところITS-90の致命的な欠点や矛盾は指摘されていない。が、熱力学温度との差が指摘されはじめている。ITS-90の温度値の修正や補間式の変更は、熱力学温度の測定結果で決まる。いくつかの熱力学温度測定が進行中で、これらの結果が出揃うまではITS-90の温度値や補間式が変更されることはない。

大きな動きとしてはITS-90の低温域の拡張で、PTBの測定結果をベースに ^3He の融解曲線が近く暫定目盛という形で採用される。その後、熱力学温度との矛盾がなければ、国際温度目盛としての採用となる。

ここではITS-200xに向けての温度標準の状況を筆者の知る範囲でまとめた。国際単位系³¹⁾の多くの基本量は、(単位の定義) = (実現法)、という図式で、単位の定義に基づいて標準が設定され、測定精度の向上は単位の定義を変更することで対処してきた。温度標準は、単位の定義とは別に国際温度目盛という標準を採用してきた。これと似た立場にあったのが電気標準である。³²⁾ 単位の定義を変えずに、半世紀以上、高精度化とニーズに対応してきた。このような特殊事情にあった「ケルビン」の定義の見直しについても、その再現性の指摘とともに、最近、意見が出てくるようになった。ここでは、これは「標準の話ではない」という観点と、個人的には「見直されることはない」との考えで、触れなかった。「ケルビン」を見直すとするれば、気体定数かボルツマン定数を通して、力学量に結びつけるのが時代の流れである。³³⁾ 実際に、Moldoverらの音速温度計は気体定数を測定しているし、放射温度計ではボルツマン定数をおして熱力学温度を測定している。温度の単位の量子標準化が見えてきている。

最後に個人的意見であるが、今後のITS-90の構造的な検討項目としては、現在、白金抵抗温度計が補間計器として使われている660℃～962℃(アルミニウムの凝固点から銀の凝固点)の温度範囲での補間計器があると考えている。高温域での現在の白金抵抗温度計の危うさの程度と、ク

イオラジオメータや光学系の進歩による放射温度計の測定精度とで、どちらを選択するかという問題である。国際温度目盛の本来の姿である「個々の温度計には依存しないで標準を設定できる」という考え方や「測定精度の将来性」という観点からは、後者に軍配が上がる。実は、クライオラジオメータが開発された直後の1987年に、オーストラリア標準研究所(NML)のR.C. Kempが、この温度領域を放射温度計で定義することを提案していた。残念ながら筆者はこれに強烈に反対した一人であった。白金抵抗温度計に可能性があると考えた見通しのあまさを悔いている。このほかにこの温度領域ではナトリウムの蒸気圧目盛もあるが、現状ではナトリウム蒸気圧目盛が温度標準に採用される可能性はほとんどないと考えている。

文 献

- 1) H. Preston-Thomas, *metrologia* **27**, 3-10 (1990); *ibid.* **27**, 107 (1990).
- 2) 計量研究所, 計量研究所報告 **40**, 308-317 (1991).
- 3) 櫻井弘久, 熱測定 **17**, 137-144 (1990).
- 4) R. J. Berry, *metrologia* **32**, 11-25 (1995).
- 5) G. W. Burns, G. F. Strouse, B. W. Mangum, M. C. Croakin, W. F. Guthrie, P. Marcarino, M. Battuello, Ho Ken Lee, J. C. Kim, K. Gam. C. Ree, M. V. Chattle, M. Arai, H. Sakurai, A. I. Phkhodum, N. P. Moiseeva, S. A. Perevalova, M. J. de Groot, J. Zhang, K. Fan, and S. Wu, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry Vol.6*, pp.537-540, American Institute of Physics (1992).
- 6) G. W. Burns, G. F. Strouse, B. W. Mangum, M. C. Croakin, W. F. Guthrie, P. Marcarino, M. Battuello, Ho Ken Lee, J. C. Kim, K. Gam, C. Ree, M. V. Chattle, M. Arai, H. Sakurai, A. I. Phkhodum, N. P. Moiseeva, S. A. Perevalova, M. J. de Groot, J. Zhang, K. Fan, and S. Wu, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry Vol.6*, pp.541-546, American Institute of Physics (1992).
- 7) M. Arai and H. Sakurai, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry Vol.6*, pp.439-442, American Institute of Physics (1992).
- 8) K. D. Hill, *Proceedings of TEMPMEKO'96*, pp.123-128, Edited by P. Marcarino (1997).
- 9) C. W. Meyer, *Proceedings of TEMPMEKO'99*, to be published.
- 10) P. Marcaiono, R. Dematteis, X. Li, M. Arai, M. de Groot, and H. G. Nubbemeyer, *Proceedings of TEMPMEKO'96*, Edited by P. Marcarino (1997).

- 11) E. Renaot, M. Elgourdon, and G. Bonnier, Proceedings of TEMPMEKO'99, to be published.
- 12) H. Sakurai and O. Tamura, TEMPMEKO'90, pp.112-117, Finnish Society of Automatic Control (1990).
- 13) A. G. Steele, Proceedings of TEMPMEKO'96, pp.75-80, Edited by P. Marcarino (1997).
- 14) H. Sakurai, Proceedings of TEMPMEKO'99, to be published.
- 15) J. V. Nicholas, T. D. Drasfield, and D. R. White, *metrologia* **33**, 256-257 (1996).
- 16) G. T. Furukawa and W.R. Bigge, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, pp.291-297, American Institute of Physics (1982).
- 17) L. Crovini, *metrologia* **31**, 399-400 (1995).
- 18) M. R. Moldover and J. P. M. Trusler, *metrologia* **25** 165-187 (1988).
- 19) R. Rusby and M. Durieux, Toward an International Temperature Scale from 0.65 K to 1 mK, Leiden University (1998).
- 20) R. Rusby, R. P. Hudson, M. Durieux, K. Grohmann, H. J. Jung, P. M. Steur, and J. V. Nicholas, *metrologia* **33**, 409-414 (1996).
- 21) M. Durieux, Proceeding of Tempmeko'99, to be published.
- 22) 1999年国際度量衡総会決議 I (温度目盛の 0.65 K 以下への拡張), T. J. Quinn, *metrologia*, to be published.
- 23) N. P. Fox, J. E. Martin, and D. H. Nettleton, *metrologia* **28**, 357-374 (1991).
- 24) M. Stock, J. Fisher, R. Friedrich, H. J. Jung, and B. Wende, *metrologia* **32**, 441-444 (1995/96).
- 25) R. E. Edsinger and J. E. Schooley, *metrologia* **26** 95-106 (1989).
- 26) M. R. Moldover, S. J. Boyes, C. W. Meyer, and A. R. H. Goodwin, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104-11, 11-46, 1999, <http://www.nist.gov/jres>.
- 27) D. R. White, R. Galleano, A. Actis, H. Brixy, M. de Groot, J. Dubbeldam, A. L. Reesink, F. Edler, H. Sakurai, R. L. Shepard, and J. C. Gallop, *metrologia* **33**, 325-335 (18996).
- 28) G. Edwards and S. Boys, Proceedings of TEMPMEKO'99, to be published.
- 29) B. Fellmuth and G. Shuster, *metrologia* **29**, 415-423 (1992).
- 30) A. L. Reesink and M. Duxieux, *metrologia* **33**, 401-408 (1996).
- 31) 計量研究所訳編 国際単位系第7版、日本規格協会 (1999).
- 30) 遠藤 忠, 日本物理学会誌 **54**, 787-792 (1999).
- 31) 清水忠雄, 日本物理学会誌 **54**, 827-829 (1999).

要 旨

1990年国際温度目盛についての現状と指摘されている問題点とその背景を述べる。現在まで、ITS-90の致命的な欠陥は指摘されていないが、熱力学温度とのずれが報告されはじめている。また、白金抵抗温度計を補間計器とする温度領域のうち、660℃以上の高温域での温度計の個体差が予想以上に大きい可能性があることが指摘されている。国際温度目盛の低温域の拡張を目的に、³Heの融解曲線を使った1 K以下1 mKまでの暫定目盛の設定が準備されている。