

《第 8 回》

温度 (K) についての基礎解説と最新動向

山田 善郎 (計測標準研究部門)

1. まえがき

8 回に亘って連載してきたリレー解説「国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向」も今回で最終回を迎える。第 1 回の白田の概論¹⁾でも述べられているとおり、近い将来、国際単位系 (Le Système International d'Unités, SI) の基本 7 単位のうち、4 つの単位の再定義が予定されている。第 2 回~4 回で紹介されたキログラム (kg)、アンペア (A)、モル (mol) と並んで、本稿で解説する熱力学温度の単位ケルビン (K) も再定義が予定されている単位である。キログラムと同様、基礎定数の値による再定義へ向け、基礎定数の値の決定精度向上に各国標準研究機関が取り組んでいる。

本年 5 月、パリ郊外セーブル市にある国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) において、温度に関する技術諮問委員会が 2 年ぶりに開催された。(メートル条約を中心とした国際体制に関しては白田の概論参照¹⁾。)併設されたワーキンググループも含め活発な議論が行われ、再定義のための基礎定数の値決定の達成条件が国際度量衡委員会への勧告として採択された²⁾。いよいよ再定義が現実味を帯びてきた感がある。

SI の元が誕生した 1954 年以来、基本単位の一つとして組み込まれた熱力学温度 (Thermodynamic Temperature) の単位ケルビンの定義は水の三重点温度に基づく現在の定義とほぼ同じで変わっていない。キログラムと比べると歴史が浅いとはいえ、この 50 余年の間に物質の性質に基づく定義の限界が見え始め、より普遍的な物理定数の値による新たな定義への移行を指向することとなった。

その一方、我々が日常測定している温度は「1990 年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990, ITS-90)」と呼ばれる、各国の協定に基づく温度である³⁾。国際温度目盛は 1927 年に最初の目盛が採択されて以来、約 20 年に一度のペースで大幅な改訂が行われてきたものの、最後に 1990 年の改訂が行われて以来すでに 24 年経過している。本解説ではケルビン再定義の背景を解説するとともに、これに向けた各国の取組を紹介する。さらに熱力学温度と国際温度目盛の関係を明らかにすることを通し、将来の温度標準の体系について展望を試みる。

2. SI 単位ケルビン

2.1 現在のケルビンの定義

SI における熱力学温度の単位ケルビン (K) は「水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 」と定義され、さらに、セルシウス温度 ($^{\circ}\text{C}$) の値は、ケルビン (K) で表記した値から 273.15 引いたもの、と定義されている⁴⁾。水の三重点とは図 1 a) の水の状態図に模式的に示すように気相・液相・固相の三相が共存する状態であり、温度・圧力共に一意に決まるため再現性に優れる。水の三重点温度での温度計の校正に用いられるのが三重点セルである (図 1 b))。構造としては二重のガラス製容器であり、内管は上端が解放され、温度計が挿入できるようになっている。内管と外管の間には真空引きしたのちに純水が封入されている。内管の中に冷却用器具や寒剤を挿入して適切に冷却することで、内管を均一に取り囲む氷の層が形成される。その結果、セル上部の気相との界面に三相が共存する状態、すなわち、三重点が実現される (図 1 b) ,c))。温度計が検出するのは温度計挿入孔の底の方の温度であるため、水の深さによる静水圧の影響を補正して使用される。

では、水の三重点温度の再現性はどれくらい優れているのか。このことを検証する目的で 2002 年から 2004 年にかけて水の三重点セルの国際比較が実施された⁵⁾。世界 20 カ国の標準研究機関の水の三重点セルが国際度量衡局に集められ、国際度量衡局のセルとの温度差が精密に測定された。当時、たまたま国際度量衡局に客員研究員として滞在していた筆者も測定作業を一部手伝ったが、再現性に優れ、したがってケルビンの定義となっている温度を実現する三重点セルを比較する意味があるのか疑問に思ったものである。しかし、得られた結果は意外であった。

各国国家標準と国際度量衡局の標準との差およびその不確かさが求められた。これは標準偏差で $50\ \mu\text{K}$ 、最も高

い温度を示すセルと低い温度を示すセルでも約 170 μK で良く一致するという結果が得られた。温度が 273.16 K であるから、定義現示の再現性としては大雑把に 1 ppm を切るオーダと言える。

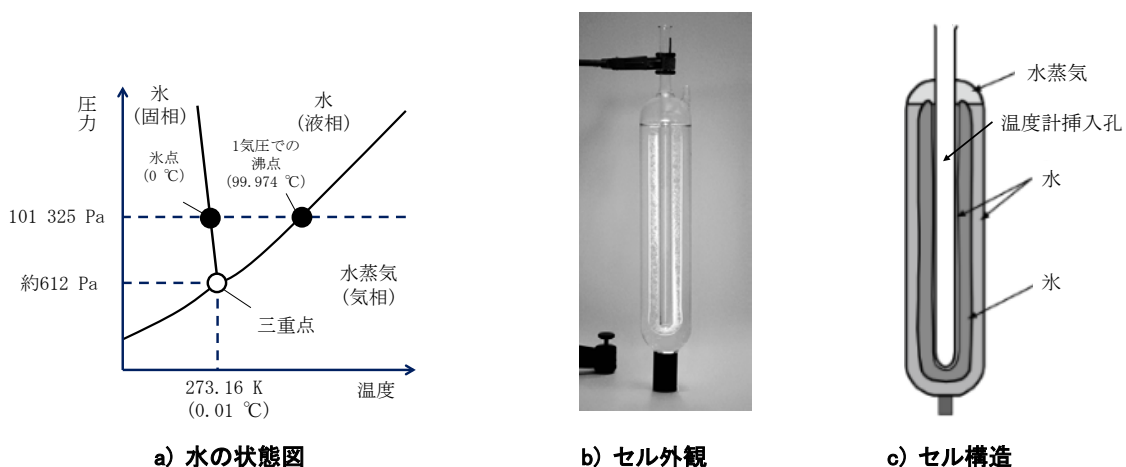


図 1 水の三重点セル(写真・図提供:産業技術総合研究所(産総研))

水の三重点は温度・圧力共に一意に決まるため再現性に優れ、ケルビンの定義に用いられる。温度計の校正に使用される水の三重点セルでは上部の気相との界面に三相が共存する三重点が実現される。

ところが、各国の差と不確かさをそれぞれ（正規分布を仮定して）確率密度分布で表し、その和として求めた各国国家標準と国際度量衡局との差の確率密度分布で表すと（図 2）、0 μK と約 100 μK 付近にピークを持つ 2 つの分布が重ね合わされているように見える。調査の結果、この 2 つの分布は水分子を構成する水素と酸素の同位体組成の扱いが異なる 2 つのグループに対応することが判明した。三重点温度は分子を構成する同位体の種類により変動し、複数の同位体が混在する場合はその組成比に依存する。温度が高い方の分布は同位体組成を評価し基準の組成比である VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) での温度に補正して報告した国に、もう一方の分布は補正を行わなかった国に対応することが明らかになった。同位体組成の補正を行うことは ITS-90 の補足文書で推奨されていたものの、ケルビンの定義あるいは ITS-90 の定義そのものには記載されていなかったため、各国で統一した対応がとられなかったのである。

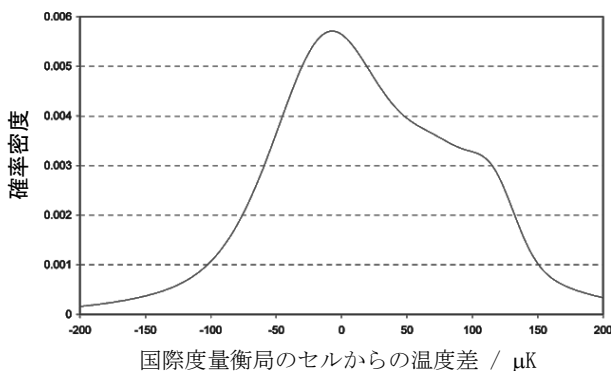


図 2 水の三重点セルの国際比較結果(BIPM の許可により転載)⁵⁾

各国国家標準と国際度量衡局の差を確率密度分布で表したものの、0 μK と約 100 μK 付近にピークを持つ 2 つの分布が重ね合わされている。ケルビンの定義の曖昧さがもたらした結果である。

この結果を受け、曖昧さを排除する目的で 2005 年に以下の VSMOW 組成比を記載した補足がケルビンの定義に追加され、現在に至っている。「この定義は、下記の物質量の比により厳密に定義された同位体組成を持つ水に関するものである：1 モルの ^1H あたり 0.000 155 76 モルの ^2H 、1 モルの ^{16}O あたり 0.000 379 9 モルの ^{17}O 、および 1 モルの ^{16}O あたり 0.002 005 2 モルの ^{18}O 。」⁴⁾

この補足により定義の曖昧さはとりあえず解消したものの、セルのガラスに含まれる異物溶出による汚染をどう防ぎ、その影響をどう評価するかということを含め、不純物の影響という課題は相変わらず残る。水の同位体組成の補正をめぐる混乱は物質の持つ性質に基づく現在の定義の限界を明らかにし、次に述べる物理定数の値による再定義に向けた各国の活動を後押しすることとなった。

2.2 ケルビンの再定義

熱力学温度の単位 K は「その大きさは、SI 単位 $s^{-2} m^2 kg K^{-1}$ (それは $J K^{-1}$ に等しい) で表したときのボルツマン定数 k の数値が正確に $1.380 6X \times 10^{-23}$ に等しくなるように設定される。」(X に入る数値はその時の知見で決定される) と再定義されることが計画されている⁶⁾。

ここで、なぜボルツマン定数の値を用いて熱力学温度の単位が定義できるのか、考えてみたい。例えば、理想気体の場合、個々の分子は他の分子と衝突する時以外は自由に動き、1 個の単原子分子の平均の運動エネルギーは、その質量 m と二乗平均速度 $\overline{v^2}$ を用いて、

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT \quad (1)$$

と表されることが知られている。この式から、熱力学温度 T とは物質に内在する熱エネルギーに比例した状態量で、その比例係数がボルツマン定数 k であることがわかる。また、良く知られている理想気体の状態方程式も、 $k = R / N_A$ の関係を用いると、ボルツマン定数 k を用いて

$$p(T)V = NkT \quad (2)$$

と書き直すことができる。ここで、 $p(T)$ は熱力学温度 T における圧力、 V は気体の体積、 N_A はアボガドロ定数、 $N = nN_A$ は気体の分子数、 n は気体の物質量、 R は気体定数である。状態方程式の左辺、圧力と体積の積は、その体積中における理想気体分子のエネルギーに比例した量を表していると捉えることができる。

定積気体温度計 (Constant Volume Gas Thermometer, CVGT) と呼ばれる温度計はまさに(2)式の状態方程式を利用する。(有限の圧力や密度を持つ実気体では分子間相互作用を考慮したベリアル展開を用いて記述できることが知られており、実際にはこの形で用いる⁷⁾。次節の他の気体温度計でも同様。) 温度による水素ガス等の圧力変化を体積一定のもとで捉え、 $p(T)$ 、 V 、 N の測定値と k の値から熱力学温度 T を求めるものである。このような測定を一般に絶対測定と呼ぶ。これに対し、既知の温度、例えば水の三重点温度 T_{TPW} にある時との圧力比 $p(T) / p(T_{TPW})$ を測定、そこから V 、 N 、 k または補正量 (この説明では省略した) を知る必要なく T を求める方法を相対測定と言う。

絶対測定における熱力学温度 T とボルツマン定数 k の関係について考えてみる。絶対測定により T を求めるには k の値が必須である。現状、 k の値は様々な測定データを総合して求めた、不確かさを持つ値として Committee on Data for Science and Technology (CODATA) の推奨値に与えられている⁸⁾。一方、定期的に行われる CODATA の値の調整に反映される k の測定は、絶対測定を既知の温度で実施することで行われる。例えば定積気体温度計を用い、現在の定義である水の三重点温度 T_{TPW} で測定することで精密な k の値が求められる。再定義が行われる際には、その時の CODATA の推奨値が定義値となり、不確かさを持たなくなる。再定義後は k の値は定義値なので測定対象とはならず、逆に T_{TPW} の値が k の定義値を用いて測定して決められる対象となる。

さて、再定義が行われたことにより単位の定義現示精度が劣化しては元も子もない。水の三重点セルの再現性は 1 ppm を少し切るオーダであることを先に述べた。そこで、温度の技術諮問委員会は 2010 年の会合において再定義の条件として、1) (複数の測定結果を総合した) ボルツマン定数の値決定の相対標準不確かさが 1 ppm を下回ること、および、2) その測定が少なくとも原理的に異なる 2 つの方法の結果に基づくこと、を求める勧告を国際度量衡委員会に対して行った⁹⁾。さらに、本年の会合において、3) これら 2 つの方法のどちらもがそれぞれ 3 ppm 以下の相対標準不確かさの測定結果を含むことを求める勧告を採択した²⁾。ゴールを明確化することで確実にフィニッシュラインを通過しようという意図がうかがえる。

では、ボルツマン定数の決定精度は現状どのレベルにあるのであろうか。現在 Acoustic Gas Thermometer (AGT) を用いた測定結果が最も小さな不確かさが得られており、最新の報告をまとめたものを図 3 に示す¹⁰⁾。(なお、AGT、などの測定手法については次節で解説する。) 長年、1988 年の米国標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) の測定が最も不確かさが小さかったが、2011 年のフランス計量研究所-工芸院 (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - Conservatoire national des arts et métiers, LNE-Cnam) の報告の標準不確かさが 1 ppm に迫り、それを反映した CODATA 2010 の推奨値は 1 ppm を満たした。2013 年の英国物理研究所 (National Physical Laboratory, NPL) の報告は 1 ppm を下回っており、再定義のための 1 番目の条件が満たされることが確実に

となってきた。ただし、それぞれの測定値は不確かさの範囲内で一致しておらず、まだ課題が残されている。現在この原因究明に各国が協調して取り組んでいる。一方、2番目、3番目の条件に関してはドイツ物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) による Dielectric Constant Gas Thermometer (DCGT) を用いた最新の測定では 4.3 ppm の不確かさが報告されており¹¹⁾、現在行われている改良の結果が出る 1～2年後には条件が満たされる可能性が高い。ケルビン再定義の条件に近い将来満たされる期待が高まっている。

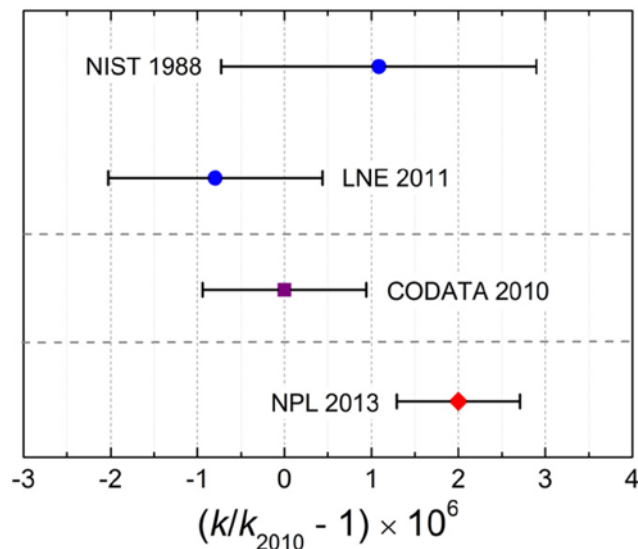


図3 AGTによるボルツマン定数 k の測定結果¹⁰⁾

横軸は CODATA 2010 との差の相対値。エラーバーは標準不確かさ。米国 NIST とフランス LNE の値は CODATA 2010 に反映されている。CODATA 2010 は相対標準不確かさ 1 ppm を切り、再定義の第一条件をクリアしたものの、その後の英国 NPL の測定結果と一致していない。

3. 測一次温度計による熱力学温度の測定

前節で理想気体の状態方程式で記述される系を用いる CVGT に言及した。このように、熱力学温度と他の独立した量の関係が、温度に依存する係数や不明な係数を含まない式で記述されるとき、この物理系を用いて他の量の測定から熱力学温度を絶対測定により、あるいは相対測定により求めることが可能である。このような温度計を一次温度計と呼ぶ¹²⁾。一次温度計でない温度計を二次温度計と呼ぶ。我々が日常使用しているサーミスタなどの抵抗温度計、熱電対、ガラス製温度計などは二次温度計である。一次温度計はケルビンの定義に基づき直接熱力学温度を測定できる半面、日常求められる温度測定を行うには再現性や使い勝手の面で適していない。これに対し、二次温度計は一般に使いやすく、再現性に優れるものの、一次温度計もしくは一次温度計を用いて決定された温度参照点などで校正して初めて正確な温度測定が可能になる。

現在、各国主要標準研究機関では、先の CVGT 以外にもいくつかの一次温度計の開発が進められている。その原理を下記にごく簡単に説明する。なお、より詳細な解説は文献 7), 13) などがあるので、興味のある方にはこちらを参照いただきたい。

3.1 音響気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer, AGT)

理想気体中の音速の二乗は、気体を構成する分子の二乗平均速度、ひいては kT に比例する。このことは下記の式で表される。

$$w^2(T) = \frac{\gamma_0}{m_{\text{gas}}} kT \quad (3)$$

ここで、 $w(T)$ は熱力学温度 T における音速、 m_{gas} は気体の平均分子質量、 γ_0 は理想気体の比熱比である。

音速の測定には金属製の疑球形音響共鳴器が用いられ、この中に試料気体の Ar または He を入れ、マイクロ波による共鳴器の精密な寸法計測と音響共鳴周波数測定により音速が求められる。疑球形が用いられるのは、マイクロ波共振三重項ピークを分離し寸法測定精度を高めるためである。

現在、室温付近で用いる一次温度計としては AGT が最も高精度であり、ボルツマン定数の決定および室温を含む温度域の熱力学温度と国際温度目盛の差（次節で解説）の精密測定に向けた開発が精力的に行われている。詳細は、最新のレビュー記事¹⁴⁾や本誌本年第5号に三澤による AGT の解説¹⁵⁾があるのでそちらを参照されたい。

3.2 誘電率気体温度計（Dielectric Constant Gas Thermometer, DCGT）¹³⁾

定積気体温度計同様、理想気体の状態方程式に基づく温度計である。理想気体の誘電率 ε と数密度 N/V の関係は $\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha_0 N/V$ で与えられ、これを用いれば(2)式の状態方程式は

$$p(T) = kT(\varepsilon - \varepsilon_0) / \alpha_0 \quad (4)$$

と書き換えられる。ここで、 ε_0 は真空の誘電率で値は厳密、 α_0 は分子分極率である。⁴He ガスを用いた場合、 α_0 は第一原理計算により 1 ppm 以下の不確かさで求められている。したがって、圧力と誘電率の測定から熱力学温度 T を求めることができる。

3.3 ジョンソンノイズ温度計（Johnson Noise Thermometer, JNT）

電子の熱運動に起因して抵抗体に生じる熱雑音（ジョンソンノイズ）の測定に基づく温度計である。周波数が十分低い領域では周波数に依存しないホワイトノイズとなり、二乗平均雑音電圧 $\langle U^2 \rangle$ は

$$\langle U^2 \rangle(T) = 4kTR\Delta\nu \quad (5)$$

と表すことが出来る¹³⁾。ここで、 $\Delta\nu$ は測定周波数帯域幅、 R は抵抗である。近年、AC ジョセフソン接合を利用した疑似ノイズ源を用い、この疑似ノイズと抵抗体の熱雑音を切り替えて比較測定する技術が開発されている^{16), 17)}。相関を持つ導線やアンプからの雑音の除去、装置のドリフトの影響排除が可能になるメリットがある。

3.4 絶対放射温度計（Absolute Radiation Thermometer, ART）¹⁸⁾

放射温度計は下記プランクの放射則に基づき、分光放射輝度 L_λ の測定を通じて温度 T を測定する。

$$L_\lambda(T) = \frac{2c^2h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{ch}{k\lambda T}) - 1} \quad (6)$$

ここで、 c は真空中の光速、 h はプランク定数、 λ は波長を表す。波長 λ は測定光学系で決まり、他は物理定数として与えられる。放射温度計の光検出器が捉える光量信号から対象の放射輝度を求めることは、途中光路の損失や光学系の視野サイズ・視野角、さらには検出器の絶対応答特性が不明であり、直接は可能ではない。このため、一般の放射温度計は既知の温度 T_0 での校正を経て分光放射輝度比 $L_\lambda(T)/L_\lambda(T_0)$ を測定する相対測定を行うことで、これらの情報なしに温度 T を求めている。

これに対し、 $L_\lambda(T)$ を絶対測定して T を求めるのが ART である。別途絶対分光放射輝度特性を精密評価した波長可変一様光源を用いて絶対校正する方法などが開発されている^{18), 19)}。

現状 ART は可視光あるいは近赤外光の波長域で実用化され、約 1000 °C 以上の高温域の熱力学温度測定に適用されている。

これら以外にも、Fermi 分布を利用する光電子分光温度計²⁰⁾、ドップラー幅温度計（Doppler Broadening Thermometer, DBT）²¹⁾など、各種一次温度計の開発が進められている。

4. 国際温度目盛

4.1 熱力学温度の近似としての国際温度目盛

二次温度計を用いた再現性ある温度測定を可能にすることを目的に、メートル条約の下で国際温度目盛が定められている。三重点のように、物質の相転移温度の高い再現性を利用した温度計校正用の参照点のことを温度標準の世界では「温度定点」と呼ぶ。各種純金属の凝固温度、Ar や酸素などの三重点、He および H₂ の蒸気圧点などがその例である。国際温度目盛は複数の温度定点を用い、これら温度定点の温度値を定義として与え、さらにこれら定点間を補間する温度計と補間式を定めることで途切れのない目盛を定義している。

現在用いられている 1990 年国際温度目盛（ITS-90）³⁾および 2000 年に行われた低温域拡張である暫定低温度

目盛(Provisional Low Temperature Scale (PLTS-2000 目盛)²²⁾)を合わせると、下限温度 0.9 mK から目盛が定義されている。高温側は放射温度計を計器とし、プランクの放射則に基づく定点からの補外で定義されており、上限はない。ITS-90 の定義に用いられる定点温度(概略値)と補間計器および定義の温度レンジ・サブレンジを模式的に図 4 に示す。

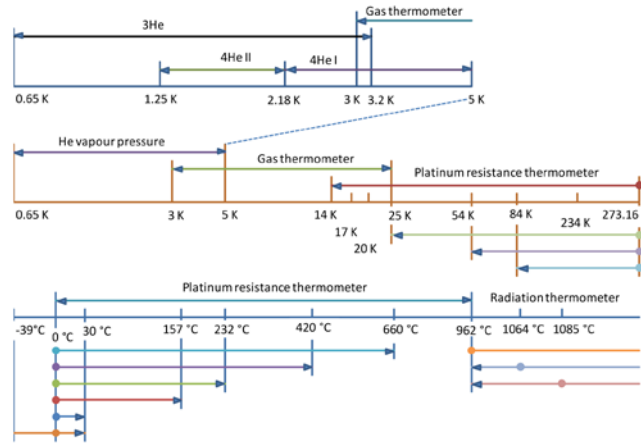


図 4 ITS-90 の構成(BIPM の許可により転載)²³⁾
 定義定点および補間計器。補間計器のレンジの重複、サブレンジの選択肢を許すことで定義の柔軟性を持たせている。定点温度は概略値。

先に述べたように、国際温度目盛は約 20 年に一度、大幅に改訂されてきた。これまでの目盛改訂では、まず、既存の温度定点がより性能の優れたものと入れ替えられるとともに新しい温度定点が追加されてきた。例えば、ITS-90 への改訂の際、氷点(約 273.15 K)が、10 mK 高温の水の三重重点に置き換えられ、金点(約 1064 °C)の約 20 K 高温側に銅点(約 1085 °C)が追加されるなどした。次に、定点温度の定義値の見直しが行われた。改訂の際、その時の知見に基づき熱力学温度の最適な近似値となるように定点温度の定義値が決められているものの、20 年経過する間、新たな測定データが追加され、また測定精度の向上もあり、国際温度目盛と熱力学温度の不一致が顕著になってくる。このズレを解消するよう定点温度の定義値の見直しが行われた。ITS-90 が導入された際には例えば金点温度が -0.25 K 動くこととなった。さらに、補間計器・補間方法の見直しも行われた。ITS-90 以前は熱電対が用いられていた高温域は、銀点(約 962 °C)を境に抵抗温度計と放射温度計でカバーされる定義となり、熱電対は補間計器ではなくなった。

このように、国際温度目盛は熱力学温度をもっとも良く近似する二次温度計用の目盛となるよう維持されてきた。では、ITS-90 は熱力学温度をどれだけ精度よく近似しているのだろうか。温度の技術諮問委員会は各国標準研究機関による一次温度計を用いた熱力学温度と ITS-90 の差 ($T - T_{90}$) の測定結果を集める作業を継続的に行っている。改訂から 20 年以上経過し、その間の測定結果をグラフ化したのが図 5 である。ITS-90 と熱力学温度の差がはっきり見えている。

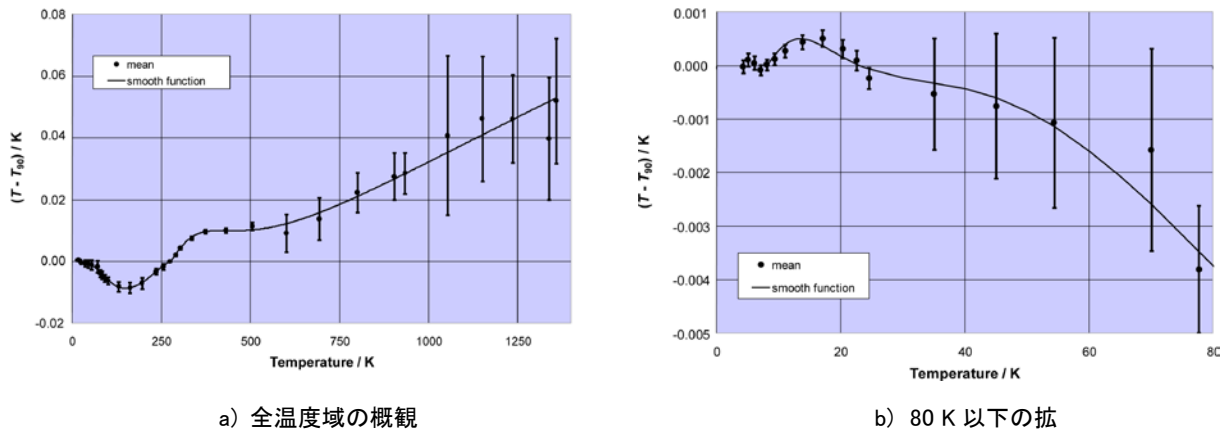


図 5 $T - T_{90}$ の推定値(BIPM の許可により転載)²⁴⁾
 黒丸は各温度における測定の平均、エラーバーは標準不確かさ。実線の平滑関数は黒丸をフィッティングして得られた。不確かさの範囲を超えた ITS-90 の熱力学温度からのかい離が明確になってきた。

4.2 ITS-90の課題

上記熱力学温度の近似精度は、T-T90が熱力学温度測定精度およびITS-90実現精度と比較して十分小さい間は目をつぶる事ができたものの、もはや無視できるレベルではない。何らかの形でこの差に対応することが求められるようになりつつある。

このほかに、ITS-90にはいくつかの課題が指摘されている²³⁾。まず、ITS-90とPLTS-2000を融合して一つの目盛にする必要がある。次に、白金抵抗温度計で定義されているAI点(約660℃)からAg点(約962℃)の温度域は高温に曝される温度計の安定性に課題がある。また、962℃以上の放射温度計で定義されている温度域では銅点から高温には温度定点が定義に用いられていないため、温度が高くなるにしたがって目盛実現精度が劣化するという課題がある。

さらに、ITS-90の本質的な課題として、定義が唯一とにならない「ノンユニークネス」がある。ITS-90は定義実現方法に柔軟性を持たせることを意図して同じ温度に対し複数の定義が重複して存在する構成を採用している(図4参照)。ノンユニークネスには下記3種類ある²³⁾。

タイプ1：同じ温度域で、同じ定点の組合せで、同じ種類の温度計を複数用いた場合

ITS-90の定義は温度定点間を補間する計器についてはその性能をある程度は規定しているが、個々の計器が全く同じ特性であることはないため、定義に基づくわずかに異なる補間目盛が計器ごとに実現される。

タイプ2：同じ温度域で、異なる種類の温度計を用いた場合。

例えば、14 Kから25 Kの間は白金抵抗温度計を補間計器として定義するレンジとCVGTを補間計器として定義するレンジが重複する。

タイプ3：同じ温度域で、単一の温度計を用い、異なる定点の組合せを用いた場合

例えば、水の三重点(約0℃)からGa点(約30℃)は、水の三重点に加えて、Sn点(約232℃)・Zn点(約420℃)を用いる3点校正、In点(約156℃)・Sn点を用いる3点校正など、異なる校正点の組合せからなる6種類のサブレンジによる定義が併存する。

このように、ノンユニークネスとは目盛定義そのものの持つ曖昧さであり、補間計器を用いた定義に基づく限り避けられない本質的な課題である。温度域によっては目盛実現技術向上によりノンユニークネスの大きさが目盛の実現不確かさと同等になり、ノンユニークネスの低減が求められる状況になりつつある。そのためには、補間計器の性能条件をより厳しいものとし補間式の精度を上げるなどの改善が必要になってくるかもしれない。

5. 今後の見通しと社会へのインパクト

ケルビン再定義による我々の日常生活や産業界への影響は、直接的にはない。何故ならば、我々が日頃温度計で測定しているのはITS-90による温度であり、ITS-90は再定義によりなら影響を受けないからである。一方、熱力学温度測定に関しては、現状、定義に用いられている水の三重点温度だけは高い精度で測定できるものの、そこから少しでも離れると同じ精度では測定できないという状況にある。再定義により、どの温度でも同等に温度測定が行えるようになるというメリットがある。

長期的に見れば、kの値の高精度測定を目指した研究を通して一次温度計の性能が向上したことを受け、広い温度域でT-T90の測定が活発化すると予想される。熱力学温度の近似としてITS-90の精度限界がより明確になってくるであろう。その結果、図5に示したT-T90をさらに小さい不確かさで表すことが出来れば、T90の測定からTを換算して求めることが現実的になってくる。また、先にあげたようにITS-90には多くの課題があり、それらの解決も含めた国際温度目盛の改訂、すなわち次期国際温度目盛「ITS-XX」の議論が始まると思われる。

高温域に目を向けると、ITS-90の定義定点中最高温度である銅点より高温側に、筆者らが提案した金属-炭素共晶/包晶合金の融点を利用する高温定点がすでに実用化され、約2748℃までの温度域で温度計の校正に活用されている^{25),26)}。これらのうち、性能の優れる3つの定点について熱力学温度をARTを用いて精密に測定する国際プロジェクトが完了する来年には国際的に承認された温度値および不確かさが決定できる予定である²⁷⁾。定点温度値が決まれば、これら高温定点を最上位標準とするトレーサビリティ体系が構築できるようになり、高温域の放射温度計や熱電対による測定の信頼性向上が期待される。ケルビンの再定義とは直接はリンクしないものの、その後の温度標準体系に取り込まれ、熱力学温度の参照標準として、またはITS-XXの定義定点として活用されることが期待される。

6. 終わりに

4つのSI基本単位の再定義に関する議論が本格化したのは、筆者の知る限り、単位の技術諮問委員会の議長である Mills らの 2005 年の論文²⁸⁾ がきっかけである。標準関係者は一様に驚き、時期尚早と口をそろえたものである。当時、確かにプランク定数およびボルツマン定数の測定精度は見劣りし、新しい定義に基づきキログラムを現示した場合、現在の定義によるより精度が劣ることが明らかであった。ケルビンにしても同様であった。

以来、十年近くを経て、基礎定数の決定精度が向上し、再定義に近い将来行われる機運が高まっている。十年を早いとみるか、遅いととらえるかはその人次第であるが、基礎標準の世界における大きな潮流が山場を越えつつある。

質量の再定義に関わるプランク定数の測定に関して、本連載掲載期間中にも米国 NIST およびカナダ国家研究院 (National Research Council, NRC) から最新の測定結果がそれぞれ報告された¹⁰⁾。これらの結果により再定義に向けての不確かさ条件は一部満たされ、再定義に一步近づいた感がある。しかし、両者の結果は不確かさ範囲内で一致していない。今後この差がどう解消されていくか、興味深い。

温度の技術諮問委員会を見る限り、関係者の関心は再定義後に移りつつある。本年5月の温度の技術諮問委員会では熱力学温度の測定の必要性が「宣言」として採択された²⁹⁾。その目的は、短期的には再定義後のケルビンの現示のため、中期的には 1300 K より高温および 1 K より低温の (熱力学温度測定精度が ITS-90 の精度に優る) 両温度域における熱力学温度の標準供給のため、長期的にはより熱力学温度との整合性の高い新たな国際温度目盛の基礎となるため、である。英国 NPL は AGT によるボルツマン定数の測定は完了したと明言し、(水の三重重点温度以外の) 熱力学温度測定にすでに研究の舵を切った。各国標準研の各種一次温度計による T-T90 の測定が様々な温度域で進んだ先にどのような展開が待っているのか、また、筆者らが開発した高温定点がそこにどう貢献していくのか、興味を持たれるところである。

(2014年7月11日受付)

参 考 文 献

- 1) 白田孝：国際単位系（SI）の体系紹介と最新動向（概論）、計測と制御、53-1, 74/79（2014）
- 2) Recommendation to the CIPM T1 2014 On a new definition of the kelvin (2014)
http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary_reports/RECOMMENDATION_web_version.pdf
- 3) H. Preston-Thomas: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 27-1, 3/10 (1990)
1990年国際温度目盛（ITS-90）〔日本語訳〕、計量研究所報告、40-4, 60/69（1991）
- 4) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2006)
- 5) M. Stock et al.: Final Report on CCT-K7 Key Comparison of Water Triple Point Cells (2006) Appendix B of the BIPM key comparison database kcdb.bipm.org/
- 6) Resolution 1 Resolutions adopted at the 24th meeting of the CGPM (2011), <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24%20CGPM%20Resolutions.pdf>
- 7) 三澤哲郎：音響気体温度計による熱力学温度測定に関する調査研究、産総研計量標準報告、9, 75/98（2014）
- 8) P. J. Mohr, B. N. Taylor, and D. B. Newell: CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010, *Rev. Mod. Phys.* 84-4, 1527/1605 (2012)
- 9) Recommendation to the CIPM T2 2010 Considerations for a new definition of the kelvin (2010)
<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCT25.pdf>
- 10) M. J. T. Milton, R. Davis and N. Fletcher: Towards a new SI: a review of progress made since 2011, *Metrologia* 51 R21/R30 (2014)
- 11) C. Gaiser, T. Zandt, B. Fellmuth, J. Fischer, O. Jusko and W. Sabuga: Improved determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry, *Metrologia* 50 L7/L11 (2013)
- 12) B. Fellmuth, C. Gaiser and J. Fischer: Determination of the Boltzmann constant—status and prospects, *Meas. Sci. Technol.* 17 R145/R159 (2006)
- 13) J. Fischer, B. Fellmuth, C. Gaiser, T. Zandt, L. Pitre et al.: The IMERAPlus Joint Research Project for Determinations of the Boltzmann Constant, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8*, AIP Conf. Proc. 1552, (C. W. Meyer ed.) 1/10 (2013)
- 14) M. R. Moldover, R. M. Gavioso, J. B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta and J. T. Zhang: Acoustic gas thermometry, *Metrologia* 51, R1/R19 (2014)
- 15) 三澤哲郎：音響気体温度計による熱力学温度測定に関する調査研究、計測と制御、53-5, 444/451（2014）
- 16) J. Qu, Y. Fu, J. Zhang, H. Rogalla, A. Pollarolo, and S. P. Benz: Flat Frequency Response in the Electronic Measurement of Boltzmann's Constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62-6, 1518/1523 (2013)
- 17) K. Yamazawa, W. L. Tew, A. Pollarolo, H. Rogalla, P. D. Dresselhaus and S. P. Benz: Improvements to the Johnson Noise Thermometry System for Measurements at 505 – 800 K, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8*, AIP Conf. Proc. 1552, (C. W. Meyer ed.) 50/55 (2013)
- 18) 山口祐：黒体放射による熱力学温度測定に関する調査研究、産総研計量標準報告、8, 423/440（2013）
- 19) Y. Yamaguchi, Y. Yamada, J. Ishii: Supercontinuum Source-Based Facility for Absolute Calibration of Radiation Thermometers, *Int. J. Thermophys.*, submitted
- 20) I. Kinoshita, E. Kobayashi and J. Ishii: Preliminary Experiments of Photoelectron Thermometry, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8*, AIP Conf. Proc. 1552, (C. W. Meyer ed.) 915/919 (2013)
- 21) C. Lemarchand, S. Mejri, P. L. T. Sow, M. Triki, S. K. Tokunaga, S. Briauudeau, C. Chardonnet, B. Darqui'e and C. Daussy: A revised uncertainty budget for measuring the Boltzmann constant using the Doppler broadening technique on ammonia, *Metrologia* 50, 623/630 (2013)
- 22) Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures, 89th meeting, 129/130 (2000)
<http://www.bipm.org/utis/en/pdf/PLTS-2000.pdf>
- 23) Supplementary Information for the ITS-90 (2013)
http://www.bipm.org/en/publications/mep_kelvin/its-90_supplementary.html
- 24) Estimates of the Differences between Thermodynamic Temperature and the ITS-90 (2010)
http://www.bipm.org/utis/en/pdf/Estimates_Differences_T-T90_2010.pdf

- 25) 山田善郎：金属－炭素共晶を用いた高温度標準の動向、計測と制御、42-11, 918/921 (2003)
- 26) 笹嶋尚彦：世界最高温度の温度定点を実用化、AIST Today, 11-6, 26 (2011)
- 27) G. Machin, K. Anhalt, P. Bloembergen, M. Sadli, Y. Yamada and E. R. Woolliams: Progress Report for the CCT-WG5 High Temperature Fixed Point Research Plan, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8*, AIP Conf. Proc. 1552, (C. W. Meyer ed.) 317/322 (2013)
- 28) I. M. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor and E. R. Williams: Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come, *Metrologia*, 42-2, 71/80 (2005)
- 29) Declaration on Requirement for new determinations of thermodynamic temperature (2014), http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary_reports/DECLARATION_web_version.pdf