

解 説

# ケルビンの定義改定と熱力学温度の測定

山田 善郎

産業技術総合研究所 計量標準総合センター

現：産業技術総合研究所 名誉リサーチャー

(受取日：2020年1月24日，受理日：2020年2月10日)

## Redefinition of the Kelvin and Thermodynamic Temperature Measurement

Yoshiro Yamada

National Metrology Institute of Japan, AIST

Currently Emeritus Researcher, National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology, Japan (AIST)

(Received Jan. 24, 2020; Accepted Feb. 10, 2020)

The unit for thermodynamic temperature in the International System of Units (SI), kelvin, was redefined in May 2019. In this article, an overview is given of the redefinition, its background and implications to future thermometry. The redefinition has no immediate impact: the temperature that we measure daily is on the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), which has its own definition independent from the definition of the unit kelvin. The efforts within the international metrology community towards the redefinition led to improvement in primary thermometry, and the difference between thermodynamic temperature  $T$  and ITS-90 temperature  $T_{90}$  has become available with improved accuracy. This will enable converting  $T_{90}$ , obtained by secondary thermometers, to  $T$ . In Japan, traceability for radiation thermometers in high-temperature range has already been implemented utilizing primary standards of high-temperature fixed points with assigned thermodynamic temperature, and the industry now has access to thermodynamic temperature above 1000 °C.

Keywords: kelvin, thermodynamic temperature, Boltzmann constant, International Temperature Scale of 1990, high-temperature fixed points, International System of Units

### 1. はじめに

昨年 (2019 年) 5 月，国際単位系 (Système international d'unités, SI) における質量の単位キログラム (kg) の定義が改定され，これまで百年以上にわたり定義の座に君臨してきた国際キログラム原器が廃止された。<sup>1,2)</sup> メディアでも多く取り上げられたので目にされた方も多いのではなかろうか。実はこの時，SI の 7 つの基本単位のうち，4 つの定義が同時に改定されている。キログラムのほかは，電流のアンペア (A)，物質量のモル (mol)，そして本稿で扱う熱力学温度のケルビン (K) である。新しい定義はいずれも基礎物理定数の値を精密に規定することによる定義となり，これにより SI の 7 つの基本単位すべてが何らかの自然界の定数により定義され，普遍性が得られることになった。器物や物質の性質に依存した定義から解放するこの改定は SI 導入以来の大きな変革であり，今後も予見しうる将来にわたりこれほど大きな変更は二度と起きないであろうと思われる。

本稿では，熱力学温度の単位ケルビンの定義改定に焦点を当て，温度測定へ直ちにどのような影響を与えるかを考察するとともに，定義改定がもたらす将来の温度測定の動向についても展望する。

### 2. ケルビンの定義改定

ケルビンに関しては従来，水の三重点温度を「273.16 K」とすることで定義されてきた。<sup>3)</sup> この間マイナーな修正はあったものの，SI 導入以来半世紀以上，変わることなく定義として用いられてきた。国際キログラム原器ほどではないものの，相当な長期にわたり定義の座にあったことになる。水の三重点とは，圧力により変動する氷点や沸点と異なり，温度と圧力が同時に決まるため，再現性に優れる。水の三重点を実現する標準器としては「水の三重点セル」

(Fig.1) が用いられる。これはガラス製の容器に純水を真空引きしたのち封入したもので，手順に則り水を一旦凝固させてからゆっくり融解させることで，液体の水，固体の水，気体の水蒸気のみが存在し，これら三相が共存する状態を作り出すことができる。中心に設けたガラス管に温度計を挿入して用いる。しかし，ここで用いる純水とは一体何をもちって純水というのであろうか。不純物を含まないことはもちろんであるが，水分子を構成する水素と酸素には同位体が複数存在する。同位体の組合せにより，三重点もわずかに異なる。標準の同位体組成を規定することはできるが (実際そのような規定が 2005 年に定義に追加されたが<sup>3)</sup>)，そのような水が現実には大量に入手できるわけではない。物質の性質に依存する単位の定義の限界がそこにあった。

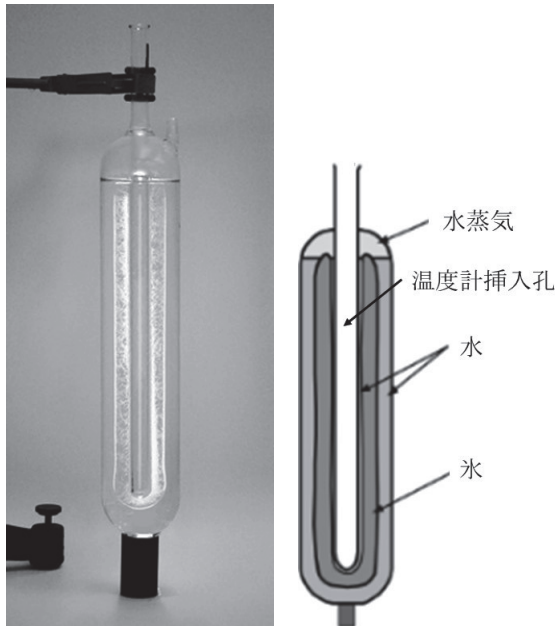


Fig.1 Triple point of water cell (Photo and schematic by AIST).

新しい定義では、「ケルビン（記号はK）は、熱力学温度のSI単位であり、ボルツマン定数 $k$ を単位 $\text{J K}^{-1}$  ( $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$  に等しい) で表わしたときに、その数値を $1.380\,649 \times 10^{-23}$ と定めることによって定義される」。<sup>4,5)</sup> ボルツマン定数 $k$ は物質に内在する熱的エネルギーに関わる各種状態方程式に「 $kT$ 」の形で登場する。ここで、 $T$ は単位ケルビンで表した熱力学温度である。このことから、 $T$ は熱的エネルギーに比例した物理量であり、その比例係数が $k$ であることが分かる。 $k$ を表す数値の大きさを決めることが、ある熱的エネルギー量に対応した $T$ を表す数値の大きさを決めること、すなわち、 $T$ は単位ケルビンの何倍かを決めることと等しく、つまり単位ケルビンの大きさを決めることになることと理解できる。

定義改定の前後で、測定される温度の値が変わってしまったのは世の中に混乱を来す。連続性が保たれるよう、年月をかけて、定義に用いられるボルツマン定数 $k$ の値の精密測定が各国で行われた。<sup>6)</sup> 最も正確に従来の定義にもとづく温度が実現できる水の三重点温度においてこの測定は行われ、例えば理想気体に近いArやHeのガスを用い、その中での音速を精密測定し、音速と温度を結びつける状態方程式（この中に「 $kT$ 」が登場する）から $k$ の値を求めた。そして、音速測定以外も含め三種類の異なる物理的原理に基づく複数の測定結果間での一致を確認し、それらの重みづけ平均として $k$ の値を決定した。<sup>7)</sup> 定義改定時、このようにして決定された $k$ の値は相対標準不確かさ $0.37 \times 10^{-6}$ を持っていたが、改定により不確かさを持たない定義値となった。逆に、水の三重点温度の273.16 Kは不確かさを持たない定義値から、改定後は相対標準不確かさ $0.37 \times 10^{-6}$ （約0.000 1 Kに相当）を持つ温度値となった<sup>8)</sup>。今後、技術が向上し測定精度が高まれば、より小さな桁まで温度値が求まり、不確かさも小さくなることが想定される。

新しいケルビンの定義は従来の定義のいくつかの課題を克服する以下の特長をもつ。

1) 物質固有の性質に依存せず、定義の普遍性が得られる。

従来の定義は「水」という物質固有の性質を利用してため、標準器で実現される温度はガラスのセルに密封さ

れる水の同位体組成に依存するという課題があった。またセル内での水のガラスからの汚染の懸念もあった。新しい定義ではこのような問題から解放される。

2) 特定の温度域・温度計を優遇しない。

従来の定義では水の三重点温度の実現精度のみが他の温度より飛びぬけて高く、水の三重点温度から離れると急速に精度が低下した。新しい定義ではどの温度でも直接定義が実現可能である。

3) 水の三重点の実現不確かさに制約されない。

従来の定義ではその実現に水の三重点温度の測定が必須であり、その不確かさが他の熱力学温度の実現の不確かさに影響を与えていた。新しい定義ではこのような制約はない。

### 3. 国際温度目盛と熱力学温度

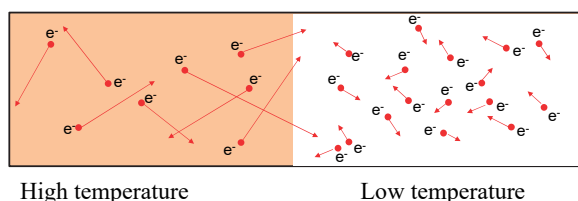
今回のケルビンの定義改定は、我々が産業現場や日常生活で測定している温度値にどのような影響を与えるであろうか。

我々が測定している温度は実は古典力学や統計力学の概念に対応した物理的意味を持つ熱力学温度ではなく、熱力学温度を近似した人為的な温度である。この温度は国際的な協約に基づく国際温度目盛によるもので、その定義はSIにおけるケルビンの定義とは独立に存在する。従って、今回のケルビンの定義改定は国際温度目盛に何ら影響を与えることはなく、我々が日常測定している温度は何ら変化しない。

では、国際温度目盛は何のために存在し、何故我々は熱力学温度ではなく、国際温度目盛による温度を測定するのであるか。これを理解するために、初期の温度計を開発した人の状況を想像してみよう。質量の標準である分銅や天秤、容積の標準である桁などが古代の遺跡からも発見されるのに対し、温度計の発明ははるかに遅く、ガリレオ・



Fig.2 Liquid in glass thermometer from 17<sup>th</sup> century Italy (Replica, owned by AIST) (Photo by AIST).



**Fig.3** Schematic of motion of free electrons in a conducting wire.

ガリレイの時代とされている。当時の温度計を **Fig.2** に示す。温度の変化に応じ液柱の高さが変化するので、基準の二点の間を決め、間を等分することでこの高さに目盛をふれば温度を数値化することができる。このとき、基準の二点はどこに決めればよいのであろうか。

精密な水銀入りガラス製温度計を開発したファーレンハイトは、体温を 96 °F に、寒剤として用いられ当時実験的得られた最も低い温度であった氷と塩化アンモニウムの共融点温度を 0 °F としたとされる。こうすると氷点の温度は 32 °F になるため、これと 96 °F の間の間隔は 64 °F となり因数が多く分割するのに好都合と考えた。現在でも一部の国で使われている華氏温度目盛の元である。一方、セルシウスは水の沸点と氷点を基準の二点する温度目盛を考案した。ただし、セルシウスが提案した目盛は水の沸点を 0 °C、氷点を 100 °C とするもので、現在のセルシウス温度目盛とは逆転していた。

ファーレンハイトやセルシウスが活躍した 18 世紀前半は熱力学が学問として確立する前で、彼らは目盛の「ゼロ」をどこに持っていくべきか悩んだに違いない。特に、温度という量が負の値を持つことに違和感を覚えたことが、彼らの目盛の選択から見て取れるのではなかろうか。絶対零度の存在が理解されるようになったのは 19 世紀の半ばになってからである。さらに、絶対零度は人間が体感できないヴァーチャルな状態であることも影響しているであろう。その結果、現在でも我々は冬場の気温が「-5 °C」になることを受け入れる一方、温度を「10 % 下げる」という表現を用いることはない。

絶対零度を目盛の基準の二点の一つとする熱力学温度目盛をケルビン卿は提案した。これが国際的に採用されたのはさらに一世紀経った 20 世紀の半ばになってからである。

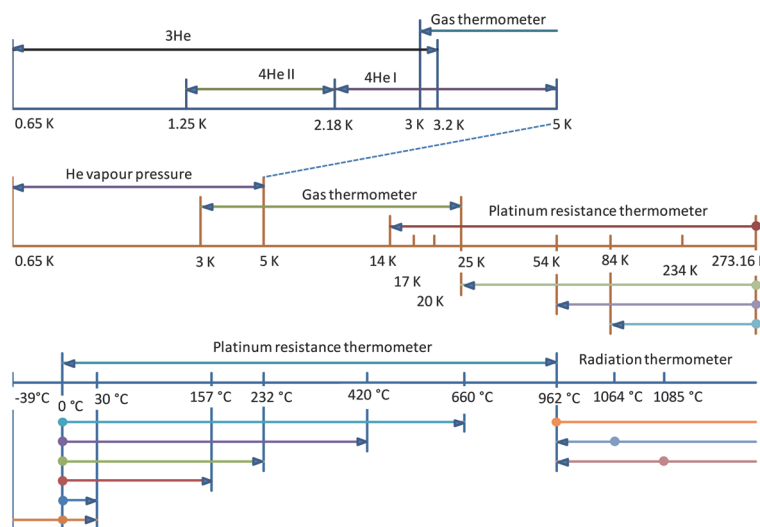
これほど時間がかかったのは、絶対零度が既存のセルシウス温度目盛のどこにあるのか、精度よく求めるのが極めて困難であったことも影響している。<sup>9)</sup>

SI が導入されケルビンがその基本単位となって半世紀以上経過した今も、我々は熱力学温度を測定できていない。それは、我々が日常使用している温度計では、少なくとも今は、熱力学温度を測定できないためである。

例えば、産業界で最も広く用いられている温度計の一つである熱電対について考えてみる。二本の異なる金属細線の両端に発生する電位差（の差）が両端の温度に依存することを利用して温度を測定するセンサである。熱起電力により電位差が発生する原理を **Fig.3** に模式的に示す。金属細線中の自由電子の運動状態は温度に依存し、温度が高いと激しく運動し、温度が低いとじっとしている。細線中に温度分布があると、自由電子は高温側から活発に飛び出し遠くに移動し、低温側に達すると動きが止まり戻れなくなる。このように熱により電子を移動させる作用が熱起電力である。結果的に電子密度が高温側で低く低温側で高くなり電位差が生じる。金属細線の一端が高温で他端が低温とすると、両端に発生した電位差によりそれ以上の自由電子の移動が抑えられる。この電位差は両端の温度のほか、金属の種類にも依存する。異なる金属を対にすることで電位差（の差）を検出できるようになり、そこから温度を知ることができる。<sup>10)</sup>

単位温度当たりどれだけ熱起電力が発生するかはゼーベック係数で表される。しかし、このゼーベック係数は第一原理から求められるわけではなく実験的に決定されるため、電位差の測定だけから温度を求めることは出来ない。あらかじめ様々な既知の温度で発生する電位差を調べておく（すなわち、熱起電力表を事前に作っておく）ことで温度が測定できるのである。このための「既知の温度」として用意されているのが、国際温度目盛である。

国際温度目盛は再現性の高い温度定点（定義定点）と、再現性の高い温度計（補間計器）を用いて定義されている。定義定点としては当初の国際温度目盛に用いられていた氷点や水の沸点は現在ではより再現性の高い定点に置き換わり、低温側では様々な物質の三重点や蒸気圧点など、高温側では金属の凝固点などが用いられて広い温度域をカバーしている。補間計器は定義定点間を補間・外挿して連続的な目盛を定義している。



**Fig.4** Schematic representation of the ranges, sub-ranges and interpolation instruments of ITS-90.<sup>11)</sup>  
The temperatures shown are approximate only. (Reproduced with permission.)

1990年に改訂された1990年国際温度目盛（International Temperature Scale of 1990, ITS-90）である<sup>12)</sup>。下限温度は0.65 Kで、2000年には下限温度0.9 mKまでの低温拡張である暫定低温度目盛（Provisional Low Temperature Scale, PLTS-2000）が採択されている<sup>13)</sup>。一方、上限温度はない。

定義定点の温度値は不確かさを持たない定義値として与えられている。補間計器を規定の定義定点で校正し、（実験的に求められた）規定の補間式を適用することで連続的な目盛が定義される。ITS-90の定義定点と補間計器をFig.4に示す。

定義定点の温度値と補間式は目盛が熱力学温度をできるだけ正確に再現できるように定義されている。そのため、改訂が行われるたびに熱力学温度を正しく近似するように定義値の見直し、補間方法の見直しが行われてきた。

先に書いたように国際温度目盛を用いて熱電対に目盛を付けた場合、熱電対で測定されるのは国際温度目盛の温度であり、熱力学温度ではない。何故かという、国際温度目盛は熱力学温度を近似しているものの、両者は完全に一致しているわけではない。ITS-90が導入された当時、近似精度が最もよくなるように改訂が行われたが、後述のように30年経過して両者には無視できないずれがあることが明白になった。また、ITS-90の実現不確かさには熱力学温度の近似の不確かさは含まれない。これを含めると不確かさが大きくなり、折角の温度計の再現性の良さを活用できないからである。従って、熱力学温度の測定ではない。

#### 4. 一次温度計とケルビンの定義改定

国際温度目盛の改定時、定義定点の温度値はどのように決めたのであろうか。このためには、その定点の熱力学温度を測定できる温度計が必要である。

熱力学温度を測定できる温度は一次温度計と呼ばれる。一次温度計は、それが捉える量と熱力学温度の関係が十分よく理解されており、その関係が状態方程式で表され、そこに用いられる定数が温度に顕著に依存することなく既知であることが求められる。<sup>14)</sup> 一次温度計以外の温度計は二次温度計と呼ばれる。先の例の熱電対や水銀入りガラス製温度計をはじめ、我々が普段目にする温度計は全て二次温度計である。一次温度計の詳細については解説<sup>15,16)</sup>を参照されたい。

一次温度計の一例としてFig.5に示す定積気体温度計がある。<sup>17)</sup> これは球体の中をHeなどの気体で満たし、温度により変化する圧力 $p(T)$ を精密に測定し、一定の体積 $V$ および熱力学温度 $T$ との関係を表す理想気体の状態方程式 $p(T)V(=nRT)=NkT$ を適用して $T$ を求める。ここで、 $n$ は物質質量、 $N$ は分子数、 $R$ は気体定数である。なお、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ビリアル展開を適用する。試料の気体ヘリウムを保持する球形の気体容器、寒剤の液体ヘリウム、真空断熱系などで構成され、Fig.5の概観からも見て取れる通り汎用的な温度計のイメージからは程遠い。

定積気体温度計以外にも様々な一次温度計の開発が進められていて、それらにより広い温度域がカバーされるようになってきている。室温付近で現状最も精度が高い一次温度計は音響気体温度計と呼ばれ、理想気体中の音速と温度の関係を記述する状態方程式を用いる。<sup>16,18)</sup> 2章の説明にもあるように、この温度計を主に用いてボルツマン定数の精密測定が行われた。

ケルビンの定義改定に向けたボルツマン定数の値の精密測定を目的に各国標準研究機関が一次温度計の開発に精力的に取り組んだ結果、熱力学温度測定精度はこの十数年で飛躍的に向上した。改定後は一次温度計の測定温度域を水



Fig.5 Constant volume gas thermometer. (Photo by AIST)

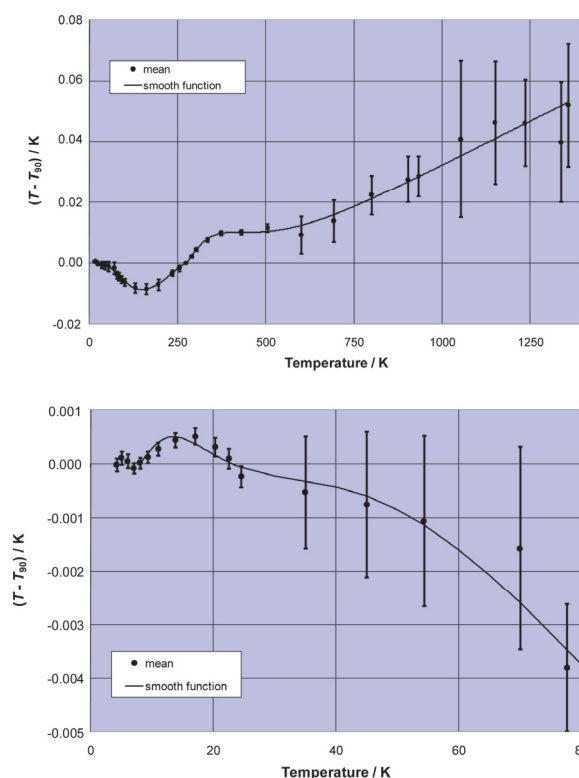


Fig.6 Estimated difference between thermodynamic temperature and ITS-90.<sup>19)</sup> (Reproduced with permission.)

の三重点温度以外に広げる研究開発が進められている。その結果、熱力学温度とITS-90の差 $(T - T_{90})$ が高精度で明らかになってきている。<sup>8,19)</sup> Fig.6に示すように、例えば室温付近で両者の差は4 mKに達する。

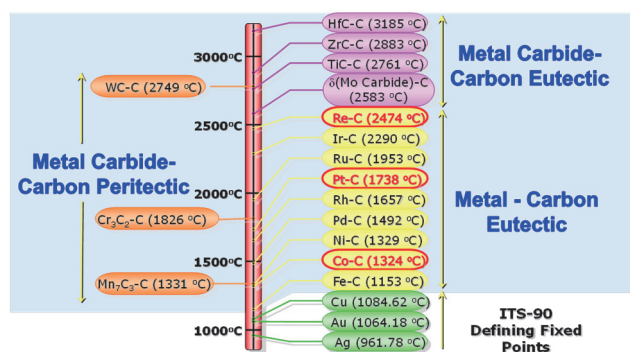


Fig.7 High-temperature fixed points of metal-carbon systems. The temperatures shown are approximate only.

ITS-90 は導入から 30 年を経過し、これまでの大幅改訂周期の 20 年を大きく超えている。国際温度目盛を再度改訂し、この差を解消すべきかどうか、これから議論が始まると予想される。一方で、もう一つの可能性がある。Fig.6 で表される  $(T - T_{90})$  が高精度で求められることになれば、二次温度計で測定した  $T_{90}$  の値を差の分だけ補正して  $T$  を求めることができるようになる。その際、補正の不確かさを考慮する必要があるが、使用する二次温度計の再現性や温度測定の要求精度から考えて不確かさが十分小さいケースも多いであろう。熱電対や放射温度計を用いた測定ではすでに十分な精度である。

## 5. 高温定点と熱力学温度測定

ITS-90 の定義定点の最高温度は銅の凝固点(1084.62 °C)である。筆者はこれより高温の 3000 °C 前後までの温度域に実用的な温度定点(高温定点)を多数提案した(Fig.7)。<sup>20)</sup> これら高温定点はいずれも金属-炭素系(共晶・包晶)合金の融解温度を用いるもので、るつぼグラファイトによる金属の汚染を抑制できることから高融点金属の融解温度を再現性良く実現できるようになった。

図中に赤字で示した共晶点(Re-C, Pt-C, Co-C)について、各国標準研による共同作業を通じたその熱力学温度値の決定が完了し、<sup>21-23)</sup> ケルビンの定義改定を機に整備された国際文書<sup>14)</sup>の付属書にも記載され、<sup>24)</sup> 実用期を迎えている。WC-C 包晶点(約 2749 °C)など、これら以外の 4 つの高温定点についても熱力学温度値決定が現在進められている。高温定点を用いて放射温度計を校正することで、これら定点を含む広い温度域で ITS-90 の代わりに熱力学温度の測定が可能になった。

2018 年から我が国の 960 °C 以上の高温域放射温度目盛の標準供給は高温定点トレーサブルに変更され、世界に先駆け ITS-90 から脱却し熱力学温度の測定に移行するとともに不確かさも約半分に低減した。今後各国で同様の動きが加速すると予想される。放射温度計に関しては全温度域で熱力学温度が測定される日も近いであろう。

## 6. おわりに

ケルビンの定義改定により我々が普段行う温度測定は何ら影響を受けないことを述べた。改定によって混乱が起きないよう、測定される温度値の連続性を保つべく細心の注意を払った結果である。その一方で、では何のために定義を改定する必要があったのか、疑問を持つ人も多いのではなかろうか。

今回の定義改定のために、国際度量衡委員会の測温諮問

委員会では様々な文書の整備を行った。改訂された SI の国際文書<sup>4)</sup>の付属書<sup>14)</sup>と位置付けられているこれらの文書では、各種一次温度計による熱力学温度の測定方法が解説されている。ITS-90 および PLTS-2000 も「定義された目盛」としてこの文書の中の一つの章として扱われている。これまで ITS-90 および PLTS-2000 の文書しかなかったのとは比べ、大きな変化である。これからは熱力学温度を測定していこう、という意思表示のようにも見える。

国際温度目盛は国際的な協約として決められているため、世の中では絶対的なもの、金科玉条のように扱われているように思う。しかし、本来測定したいのは熱力学温度であり、国際温度目盛は熱力学温度が測れないためにそれを近似したものとして用意されたにすぎない。しかも、4 章で示したように両者は明白にずれている。国際温度目盛は厳密には SI トレーサブルとは言えないのである。

これ以外にも国際温度目盛には課題がある。3 章で記述した ITS-90 の定義は唯一の定義とならない。補間計器の温度計を二個用いて目盛を実現した場合、それぞれが定義を実現したことになるが、補間温度域で両者が完全に一致する保証はない。一個の温度計を用いた場合でも、Fig.4 で示すように定義定点の選び方に冗長性があるため同じ温度で複数の目盛の実現方法があり、これらが完全に一致するとは思えない。ノン・ユニークネスと呼ばれる課題である。また、水の三重点に関し温度値が同位体組成に依存する問題があることを 2 章で述べたが、同じ事が ITS-90 の定義定点に用いられている三重点・蒸気圧点に言える。このため、水のほか、平衡水素、ネオンに関しその標準同位体組成とこれとの違いによる温度値の補正方法が技術的付属文書として近年追加<sup>25)</sup>され、ITS-90 はますます複雑なものとなった。

今回の定義改定で同時に改訂されたアンペアに関しては、従来協定値が用いられてきた電圧標準、抵抗標準との不整合が解消され改定により SI トレーサビリティが確保された。<sup>26)</sup> ケルビンに関しては ITS-90 と熱力学温度の不整合は定義が改定されても解消されず、周回遅れの感がある。しかし、将来、今回の定義改定を振り返ったとき、これを機に熱力学温度の実用的な測定が開始された、そう思える日が来ることを期待する。

## 文 献

- 1) The International System of Units (SI); <https://www.bipm.org/en/measurement-units/> (2019) (2020年1月24日確認).
- 2) 藤井賢一：新たな時代を迎えた国際単位系 (SI) —基礎物理定数による基本単位の定義改定、さらばキログラム原器—、プランク定数に基づくキログラムの新しい定義がもたらすもの、計測と制御, **58-5**, 336/340 (2019).
- 3) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2006).
- 4) The International System of Units (SI), 9th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2019); <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/sibrochure/SI-Brochure-9-EN.pdf> (2020年1月24日確認).
- 5) 山田善郎：新たな時代を迎えた国際単位系 (SI) —基礎物理定数による基本単位の定義改定、さらばキログラム原器—、ケルビンのボルツマン定数に基づく定義がもたらす未来の温度測定、計測と制御 **58-5**, 349/354 (2019).
- 6) J. Fischer *et al.*, The Boltzmann project, *Metrologia* **55**, R1/R20 (2018).

- 7) D. B. Newell *et al.*: The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  for the revision of the SI, *Metrologia* **55**, L13/L16 (2018).
- 8) G. Machin: The kelvin redefined, *Meas. Sci. Technol.* **29**, 022001 (2018).
- 9) 大石二郎: 「私の  $T_0$  研究 24 年の記録」, 中央印刷 (東京) (1984).
- 10) 計測自動制御学会温度計測部会編: 「温度計測-基礎と応用-」, コロナ社 (東京) (2018) .
- 11) Guide to the Realization of the ITS-90 1. Introduction [https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90\\_1\\_Introduction\\_2018.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_1_Introduction_2018.pdf) (2020年1月24日確認) .
- 12) H. Preston-Thomas: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, **27**, 3/10 (1990) / 1990 年国際温度目盛 (ITS-90), 計量研究所報告 40-4, 308/317 (1991).
- 13) Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures, 89<sup>th</sup> meeting, 129/130 (2000). <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/PLTS-2000.pdf>
- 14) CCT: *Mise-en-pratique* for the realization of the kelvin in the SI (2019) <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf> (2020年1月24日確認) .
- 15) 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, 計量標準報告, 8-4, 423/440 (2013).
- 16) 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, 9-1, 75/98 (2014) .
- 17) O. Tamura, S. Takasu, T. Nakano, H. Sakurai: *Int. J. Thermophys.* **32**, 1366/1377 (2011).
- 18) 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).
- 19) Estimates of the Differences between Thermodynamic Temperature and the ITS-90 (2010). [https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Estimates\\_Differences\\_T-T90\\_2010.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Estimates_Differences_T-T90_2010.pdf) (2020年1月24日確認) .
- 20) 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**, 918/921 (2003) .
- 21) G. Machin *et al.*: A Concerted International Project to Establish High-Temperature Fixed Points for Primary Thermometry, *Int. J. Thermophys.* **28**, 1976/1982 (2007).
- 22) E. R. Woolliams *et al.*: Thermodynamic temperature assignment to the point of inflection of the melting curve of high-temperature fixed points, *Phil. Trans. R. Soc. A* **374**: 20150044 (2016).
- 23) D. H. Lowe *et al.*: The equilibrium liquidus temperatures of rhenium-carbon, platinum-carbon and cobalt-carbon eutectic alloys, *Metrologia* **54**, 390/398 (2017).
- 24) G. Machin *et al.*: MeP-K Relative Primary Radiometric Thermometry (2017); [https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018\\_Relative\\_Primary\\_Radiometry.pdf](https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018_Relative_Primary_Radiometry.pdf) (2020年1月24日確認) .
- 25) Technical Annex for the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). [https://www.bipm.org/utis/en/pdf/MeP\\_K\\_Technical\\_Annex.pdf](https://www.bipm.org/utis/en/pdf/MeP_K_Technical_Annex.pdf) (2020年1月24日確認).
- 26) 金子晋久: 新たな時代を迎えた国際単位系 (SI) —基礎物理定数による基本単位の定義改定, さらばキログラム原器—, アンペアの定義の変遷と電気素量に基づく定義がもたらす新たな計測技術, 計測と制御 **58-5**, 341/348 (2019).



山田 善郎  
Yoshiro Yamada

E-mail: y.yamada@aist.go.jp