

標準研究連絡委員会報告

—温度標準の維持方式の1990年1月1日からの変更について—

平成元年10月18日

日本学会議

標準研究連絡委員会

この報告は、第14期日本学術会議標準研究連絡委員会の審議結果
を取りまとめて発表するものである。

委員長	岡村 総吾 (第5部会員)
幹事	柏木 寛 (電子技術総合研究所)
幹事	服部 晋 (計量研究所)
委員	石黒 浩三 (東京理科大学)
	高良 和武 (高エネルギー加速器 科学研究奨励会)
	佐分利義和 (アンリツ㈱)
	霜田 光一 (慶応義塾大学)
	信貴豊一郎 (岡山理科大学)
	菅野 允 (玉川大学)
	森 英夫 (三菱電機㈱)
	森村 正直 (光計測技術開発㈱)
	山崎 弘郎 (東京大学)

温度標準の維持方式の1990年1月1日からの変更について

1. まえがき

現在の温度標準となっている「1968年国際実用温度目盛」(以下 I P T S - 6 8 と略す)を、1990年1月1日を期して国際的に新しい温度目盛に変更することが第77回国際度量衡委員会で勧告され、第78回国際度量衡委員会(1989年9月26~28日開催)は、第18回国際度量衡総会の決議に基づき、新しい温度標準として、「1990年国際温度目盛」(Échelle Internationale de Température de 1990)を採択した。公式文書は、国際度量衡局から1990年中に出版が予定されている。また、英文テキストは、Metrologia, Vol.27, No.1(1990)に掲載される予定である。

この変更は、最近の熱力学温度測定を中心とした測温技術の進歩によって指摘されていた I P T S - 6 8 の問題点を改良したものである。この目盛と I P T S - 6 8 との差は実際面で少なからぬ影響があり、この種の問題の審議機関である日本学術会議第5部標準研究連絡委員会では、学術諸団体を通じて日本国内での周知を目的として本文を作成した。温度標準の変更については、既に「電圧、抵抗および温度標準の維持方式

の1990年1月1日からの変更について』と題して¹⁾、上記勧告を基に I P T S - 6 8 からの差を中心に報告してあるが、定義についての詳細な記述がなされていなかった。本文はこの報告を補足するものであり、内容は、1990年国際温度目盛の概要を簡潔に述べたものである。

I P T S - 6 8 からの構造上の主な変更点は、0.65 K から約 13.8 K までを新たに定義した点と、630.74 °C 以上 1064.43 °C までに使われていた白金・10%ロジウム/白金熱電対を白金抵抗温度計とプランクの放射則に置き換えた点である。

2. 1990年国際温度目盛の表記法

1990年国際温度目盛（以下 I T S - 9 0 と略す）は、熱力学温度を正確に近似し、しかも比較的簡単に実現できる再現性のよい温度測定法を示したものである。従って、この目盛は、国際単位系（S I）に基づいており、国際単位系の変更を意味するものではなく、現在の熱力学温度測定の精度で熱力学温度に一致し、国際的に統一がとれた温度標準、または、実用的な精密温度測定法を規定したものである。

I T S - 9 0 によって測定された温度は、ケルビン（記号、K）またはセルシウス度（記号、°C）で表わされ、過去の習慣に従い、それぞれ、 T_{90} 、または、 t_{90} 、で記述される。 t_{90} は、熱力学温度と同様に、

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15$$

¹⁾（会誌名）．．． 卷（1989）．．． 頁

で定義されている^{*)}。

3. 1990年国際温度目盛の概要

I T S - 9 0 は、基本的には、

安定な相平衡状態（定義定点という）とその温度値、

定義定点の間を補間または補外する方法

で構成され、0.65 K以上、単色放射温度計とプランクの放射則を用いて測定可能な温度までを定義している。

I T S - 9 0 に採用された定義定点は、温度値が式で与えられたものと直接数値で与えられたものがある。定義定点とその温度値は表1に示すとおりである。また、定義定点以外の温度を求める方法としては、ヘリウムの蒸気圧測定による方法、定積気体温度計による方法、白金抵抗温度計による方法およびプランクの放射則による方法が採用されている。

I T S - 9 0 は温度領域により、実現法を細かく規定している。各温度領域の定義の概要は次のとおりである。

1) 0.65 K ~ 5.0 K : ヘリウム蒸気圧-温度の関係式

^{*)} I T S - 9 0 のテキストでは、数式中の無次元量を表記する方法として、物理量 X の単位を u とするとき、この物理量 X を単位 u で表わした数値を、 X/u 、とする方法を採用している。従って、 T_{90}/K は、物理量 T_{90} をケルビン K で表わしたときの数値を意味している。

この温度領域は、ヘリウム蒸気圧と温度の関係式で定義されている。
ITS-90の温度値 T_{90} 、と蒸気圧 p 、は、

$$T_{90}/K = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [\ln(p/\text{Pa}) - B] / C^i$$

で定義されている。なお、定数 A_0 、 A_i 、 B 、 C は、 ^3He 、 ^4He に対して与えられている（表2参照）。また、 p/Pa は、圧力 p を、単位パスカル、 Pa 、で表わした数値を意味している。

2) 3.0 K ~ 24.5561 K : 気体温度計

この温度領域は、3つの温度で校正した補間用定積気体温度計によって定義されている。 T_{90} と気体温度計の気体の圧力 p 、は次式、

$$T_{90} = a + b p + c p^2$$

(4.2 K ~ 24.5561 K)

または、

$$T_{90} = \frac{a + b p + c p^2}{1 + B_x(T_{90}) N/V}$$

(3.0 K ~ 24.5561 K)

で定義されている。ここで、係数、 a 、 b 、 c は、装置に依存する定数であり、ヘリウムの蒸気圧測定により得られた温度、水素の三重点の温度およびネオンの三重点の温度で決定する。 N/V は気体密度である。 $B_x(T_{90})$ は、 ${}^3\text{He}$ および ${}^4\text{He}$ のビリアル係数（それぞれ $x=3$ および $x=4$ ）であり、 ${}^3\text{He}$ については、

$$B_3(T_{90}) / \text{m}^3 \text{mol}^{-1} = \{16.69 - 336.98 (T_{90}/\text{K})^{-1} + 91.04 (T_{90}/\text{K})^{-2} - 13.82 (T_{90}/\text{K})^{-3}\} \cdot 10^{-6}$$

であり、 ${}^4\text{He}$ については、

$$B_4(T_{90}) / \text{m}^3 \text{mol}^{-1} = \{16.708 - 374.05 (T_{90}/\text{K})^{-1} - 383.53 (T_{90}/\text{K})^{-2} + 1799.2 (T_{90}/\text{K})^{-3} - 4033.2 (T_{90}/\text{K})^{-4} + 3252.8 (T_{90}/\text{K})^{-5}\} \cdot 10^{-6}$$

である。

なお、上式が使える補間用気体温度計は、気体温度計の構造、ヘリウムの圧力（気体密度）などに制限があるため、別途国際度量衡局から出版される「補足資料」に詳細が記載される予定である。

3) 13.8033 K ~ 961.78 °C : 白金抵抗温度計

この温度領域は、定められた条件を満足する白金抵抗温度計、定義定點、定められた補間手続き、によって定義されている。この手続きは、温度 T_{90} での白金抵抗温度計の抵抗値 $R(T_{90})$ と、水の三重点での抵

抗値 R (273.16 K) との比, $W(T_{90})$, すなわち,

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273.16 \text{ K})$$

の関数で表現されている。

白金抵抗温度計は, 次の条件のいずれかを満足しなければならない。

$$W(29.7646 \text{ }^\circ\text{C}) \geq 1.11807$$

または,

$$W(-38.8344 \text{ }^\circ\text{C}) \leq 0.844235$$

さらに, 銀の凝固点まで使用する白金抵抗温度計は, 上記いずれかの条件と次の条件を満足しなければならない。

$$W(961.78 \text{ }^\circ\text{C}) \geq 4.2844$$

$W(T_{90})$ は, 基準関数, $W_r(T_{90})$, と 偏差関数, $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$, の和で定義されている。この温度領域では, 定義定点で白金抵抗温度計の抵抗値を測定し, 偏差関数の定数を決定し, 抵抗値の測定から温度 T_{90} , を求める。

基準関数 $W_r(T_{90})$ は, 次式で与えられている。

$$\ln [W_r (T_{90})] =$$

$$A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \{ [\ln (T_{90} / 273.16 \text{ K} + 1.5) / 1.5] \}^i$$

($T_{90} \leq 273.16 \text{ K}$)

および

$$W_r (T_{90}) =$$

$$C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \{ (T_{90} / \text{K} - 754.15) / 481 \}^i$$

($T_{90} \geq 273.15 \text{ K}$)

ここで、定数 A_0 , A_i , C_0 , C_i は表 3 に示すとおりである。

偏差関数は表 4 に示す温度領域に対応して次式のいずれかを使用する。

$$(1) \quad W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] \\ + b [W(T_{90}) - 1]^2 \\ + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln (W(T_{90}))]^{i+n}$$

$$(2) \quad W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] \\ + b [W(T_{90}) - 1]^2 + c [W(T_{90}) - 1]^3 \\ + d [W(T_{90}) - W(660.323 \text{ } ^\circ\text{C})]^2$$

$$(3) \quad W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] \ln(W(T_{90}))$$

定数, a , b , c_1 , d は, 定義定点での抵抗値の測定から決定する. また, n は温度領域によって, $0 \sim 2$ が与えられている. 温度領域とこれらの定数を決定する定義定点及び使用する式を表4に示す.

4) 961.78℃以上: プランクの放射則

銀の凝固点以上は, 温度 T_{90} は次式で定義されている.

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_{90}(x))} = \frac{\exp(c_2 [\lambda T_{90}(x)]^{-1} - 1)}{\exp(c_2 [\lambda T_{90}]^{-1} - 1)}$$

ここで, $T_{90}(x)$ は, 銀の凝固点(1234.93 K), 金の凝固点(1337.33 K), または銅の凝固点(1357.77 K)を意味する. また, $L_\lambda(T_{90})$, $L_\lambda(T_{90}(x))$ は, 温度 T_{90} または, $T_{90}(x)$ での波長 λ での黒体の分光放射密度である. また, $c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$ である.

以上がITS-90の定義の概要である.

IPTS-68でも温度領域によっては温度を決定する方法が複数あったが, ITS-90では, さらに多くの方法が採用された. これに対して, 1つの方法で T_{90} が定義されるのが望ましいとの意見もあるが,

例えば、室温付近のみを測定するのに、銀の凝固点まで校正をする必要があるとすると、温度計の安定度、操作の煩雑さなどで必ずしも実用的でなく、また、たとえ一つの定義であっても、温度計の個体差によって温度計ごとに温度値が異なることは避けられない。ITS-90の実現法の違いによる温度差は、この個体差と同程度になるように工夫されている。なお、ITS-90とIPTS-68の差は、既に図で公表されているとおりである。

表1. 定義定点

番号	物質	状態	温度 T_{90}/K
1	He	V	3~5
2	e-H ₂	T	13.8033
3	e-H ₂	V	約17
4	e-H ₂	V	約20.3
5	Ne	T	24.5561
6	O ₂	T	54.3584
7	Ar	T	83.8058
8	Hg	T	234.3156
9	H ₂ O	T	273.16
10	Ga	M	302.9146
11	In	F	429.7485
12	Sn	F	505.078
13	Zn	F	692.677
14	Al	F	933.473
15	Ag	F	1234.93
16	Au	F	1337.33
17	Cu	F	1357.77

注：記号の説明

V：蒸気圧測定による定点。ヘリウムに関しては本文参照。水素に関しては、次式を使う。

$$T_{90}/K = 17.035 + (p/kPa - 33.3226) / 13.32$$
$$(17.025 \text{ K} \leq T_{90} \leq 17.045 \text{ K})$$

および

$$T_{90}/K = 20.27 + (p/kPa - 101.295) / 30$$
$$(20.26 \text{ K} \leq T_{90} \leq 20.28 \text{ K})$$

但し、17 Kと 20.3 Kは、補間用気体温度計から得られた温度値を使用することができる（テキストでは気体温度計点（記号，G）とも記載されている）。

T：気相，液相，固相の平衡状態（三重点）

MおよびF：101325 Paの圧力下での液相，固相の平衡状態（Mは融解点，Fは凝固点を意味する）

e-H₂：オルト／パラ水素の平衡組成

表2. ヘリウム蒸気圧式の定数

	^3He 0.65K~3.2 K	^4He 1.25 K~2.1768 K	^4He 2.1768 K~5.0 K
A ₀	1.053447	1.392408	3.146631
A ₁	0.980106	0.527153	1.357655
A ₂	0.676380	0.166756	0.413926
A ₃	0.372692	0.050988	0.091159
A ₄	0.151656	0.026514	0.016349
A ₅	-0.002263	0.001975	0.001826
A ₆	0.006596	-0.017976	-0.004325
A ₇	0.088966	0.005409	-0.004973
A ₈	-0.004770	0.013259	0
A ₉	-0.054943	0	0
B	7.3	5.6	10.3
C	4.3	2.9	1.9

表 3. 基準関数の定数

A_0	-2.13534729	C_0	2.78157254
A_1	3.18324720	C_1	1.64650916
A_2	-1.80143597	C_2	-0.13714390
A_3	0.71727204	C_3	-0.00649767
A_4	0.50344027	C_4	-0.00234444
A_5	-0.61899395	C_5	0.00511868
A_6	-0.05332322	C_6	0.00187982
A_7	0.28021362	C_7	-0.00204472
A_8	0.10715224	C_8	-0.00046122
A_9	-0.29302865	C_9	0.00045724
A_{10}	0.04459872		
A_{11}	0.11868632		
A_{12}	-0.05248134		

表4. 偏差関数と偏差関数の定数を決定するための定義定点

温度領域	偏差関数 (注1)	定義定点 (注2)	条件
13.8033 K - 273.16 K	1	2-9	$n=2$
24.5561 K - 273.16 K	1	2,5-9	$n=0,$ $c_4 = c_5 = 0$
54.3584 K - 273.16 K	1	6-9	$n=1$ $c_2 = c_3 = 0$ $c_4 = c_5 = 0$
83.8058 K - 273.16 K	3	7-9	
234.3156 K - 302.9146 K	2	8-10	$c=d=0$
0 °C - 29.7646 °C	2	9,10	$b=c=d=0$
0 °C - 156.5985 °C	2	9,11	$b=c=d=0$
0 °C - 231.928 °C	2	9,11,12	$c=d=0$
0 °C - 419.527 °C	2	9,12,13	$c=d=0$
0 °C - 660.323 °C	2	9,12-14	$d=0$
0 °C - 961.78 °C	2	9,12-15	(注3)

(注1) 偏差関数の番号は本文の式の番号である。

(注2) 定義定点の番号は表1の左欄の番号である。

(注3) 0 °C - 660.323 °Cで a , b , c の値を決定し、銀の凝固点で、 d の値を決定する。