

1990年国際温度目盛 (ITS-90)

〔日本語訳〕

1991年10月
計量研究所

The International Temperature Scale of 1990

1990年国際温度目盛は、1987年の第18回国際度量衡総会の決議7による要請に基づき、1989年の国際度量衡委員会で採択された。この温度目盛は1968年国際実用温度目盛および1976年暫定温度目盛に置き代わるものである。公式テキスト、Échelle Internationale de Température de 1990は、国際度量衡局から国際度量衡委員会議事録の一部として出版される。また、国際度量衡委員会によって承認された英語版テキスト、The International Temperature Scale of 1990は、Metrologia Vol. 27 (1990)に掲載されている。

1. 温度の単位

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15 \quad (2)$$

熱力学温度 (記号, T) と呼ばれる基礎物理量の単位はケルビン (記号, K) であり、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ という大きさであると定義されている。(第13回国際度量衡総会決議3および4)

初期の温度目盛が、 273.15 K 、すなわち氷点からの差という方法で定義されていたため、温度をこのように表現する習慣が残っている。熱力学温度をこのような方法で表現したものをセルシウス温度 (記号, t) と呼ぶ。セルシウス温度の単位はセルシウス度 (記号, $^{\circ}\text{C}$) であり、セルシウス温度は、

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15 \quad (1)$$

で定義される。

セルシウス温度の単位の大きさは定義からケルビンの大きさに等しい。温度の差はケルビンで表わしても、セルシウス度で表わしてもよい。

1990年国際温度目盛 (ITS-90) では、国際ケルビン温度 (記号, T_{90}) と、国際セルシウス温度 (記号, t_{90}) とを定義する。熱力学温度およびセルシウス温度と同様に、 T_{90} の単位はケルビンであり、 t_{90} の単位はセルシウス度である。 T_{90} と t_{90} の関係は、 T と t の関係と同じである。すなわち

2. 1990年国際温度目盛 (ITS-90) の原則

ITS-90は、 0.65 K から単色放射温度計を用いてプランクの放射則で実際に測定可能な高温域までを定義する。温度 T_{90} は、いくつかの付与された温度値をもつ実験的に実現可能な温度 (定義定点) で校正した特定の計器 (補間計器) 及びヘリウムの蒸気圧-温度の関係式で定義される。

ITS-90は、いくつかの温度領域と、その中の小領域とで構成されており、各温度領域で T_{90} が定義されている。これらのいくつかの温度領域は重なっており、重なっている温度領域では T_{90} の異なった定義が存在する。これらの異なった定義はすべて対等の資格である。非常に高い精度の測定では、同一温度でも定義が異なるために温度値に差が検出される場合がある。同様に、1つの定義を使ったとしてもITS-90で認められている補間計器 (例えば抵抗温度計など) の個体差により、定義定点以外の温度で T_{90} の値に差を検出することができる。ほとんど全ての場合、これらの差は、実用上無視できる程度であり、必要以上に複雑でない目盛の定義方法と両立し得る最小のレベルとなっている。

ITS-90は、この目盛が採用された時点での最良の推定に基づいて、定義された温度領域全体にわたって、ど

の温度でも T_{90} の値は T のよい近似値であるように構成されている。熱力学温度を直接測定するのに比べて、 T_{90} の測定はより容易であり、より精密で、高い再現性がある。

T_{90} の値と1968年国際実用温度目盛 (IPTS-68) で測られた温度 T_{68} の値とは表6および図1に示すように有意な差がある。

3. 1990年国際温度目盛の定義

0.65 K と 5.0 K の間では、 T_{90} は、 ^3He および ^4He の蒸気圧と温度の関係によって定義される。

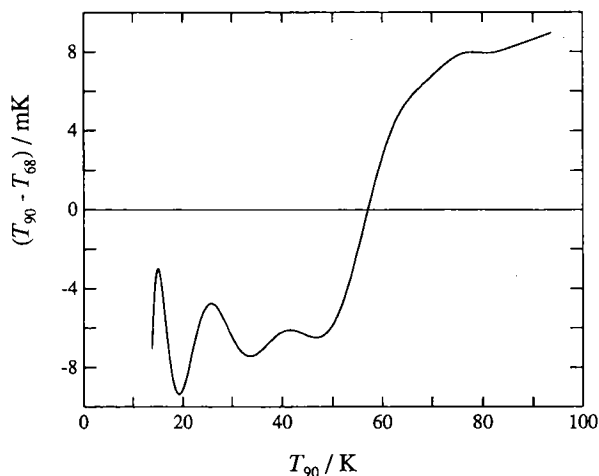


図1. (a)

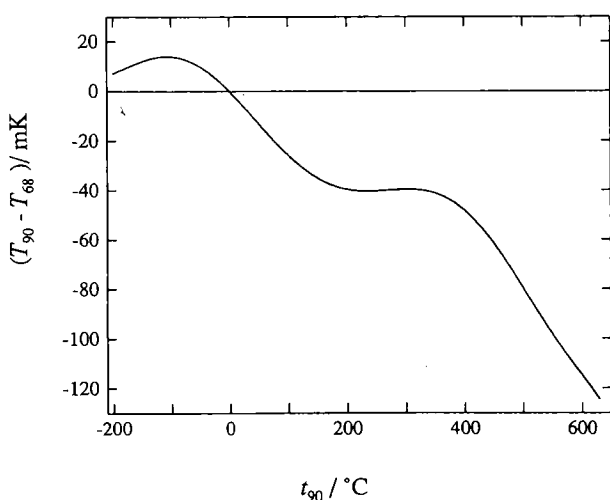


図1. (b)

図1. IPTS-68とITS-90の差
(a) 13.8K~83.8K
(b) 83.8K~630.6℃

3.0 K とネオンの三重点 (24.5561 K) 間では、 T_{90} は、3つの定義定点で校正され、定められた補間手続きを用いた気体温度計によって定義される。

平衡水素の三重点 (13.8033 K) と銀の凝固点 (961.78℃) の間では、 T_{90} は、定められた補間手続きを用いて、規定された組み合わせの定義定点で校正した白金抵抗温度計によって定義される。

銀の凝固点 (961.78℃) 以上では、 T_{90} は、一つの定義定点とプランクの放射則によって、定義される。

ITS-90の定義定点を表1に示す。感温部の侵没深さの影響やその他の要因によって生ずる定点温度への圧力の影響を表2に示す。

3.1 0.65 K から 5.0 K までの領域：ヘリウムの蒸気圧と温度の関係式

この領域での温度 T_{90} は、 ^3He と ^4He の蒸気圧 p を使って次式で定義される。

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [(\ln(p/\text{Pa}) - A_{10})/A_{11}]^i \quad (3)$$

係数 A_0 , A_1 , A_{10} および A_{11} の値は、 ^3He に関しては 0.65 K から 3.2 K の領域で、 ^4He については、1.25 K から 2.1768 K (λ点) の領域と 2.1768 K から 5.0 K の領域で、表3に与えられている。

3.2 3.0 K からネオンの三重点 (24.5561 K) までの領域：気体温度計

この領域での温度 T_{90} は、3つの定義定点で校正した定積型の ^3He または ^4He の気体温度計によって定義される。3つの定義定点は、ネオンの三重点 (24.5561 K)、水素の三重点 (13.8033 K) と 3.0 K から 5.0 K の間の一つの温度である。この最後の温度は、3.1で定められた ^3He または ^4He の蒸気圧温度計を使って決定される温度である。

この気体温度計によって実現できる T_{90} の正確さは気体温度計の構造と用いた気体密度に依存する。

3.2.1 3.0 K からネオンの三重点 (24.5561 K)

— ^3He または ^4He を気体温度計に使用 —

4.2 K 以下まで使われる ^4He 気体温度計と ^3He 気体温度計では、それぞれの気体の第2ビリアル係数を使って、理想気体からの差をあらわに考慮しなければならない。この温度領域では T_{90} は、

表1. ITS-90の定義定点

番号	温 度		物質(a)	方法(b)	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}C$			
1	3~5	-270.15~-268.15	He	V	0.001 190 07
2	13.8033	- 259.3467	e-H ₂	T	
3	約17	約-256.15	e-H ₂	V	
4	約20.3	(または	He	G)
		約- 252.85	e-H ₂	V	
5	24.5561	(または	He	G)
		- 248.5939	Ne	T	
6	54.3584	- 218.7916	O ₂	T	0.008 449 74
7	83.8058	- 189.3442	Ar	T	0.091 718 04
8	234.3156	- 38.8344	Hg	T	0.215 859 75
9	273.16	0.01	H ₂ O	T	0.844 142 11
10	302.9146	29.7646	Ga	M	1.000 000 00
11	429.7485	156.5985	In	F	1.118 138 89
12	505.078	231.928	Sn	F	1.609 801 85
13	692.677	419.527	Zn	F	1.892 797 68
14	933.473	660.323	Al	F	2.568 917 30
15	1234.93	961.78	Ag	F	3.376 008 60
16	1337.33	1064.18	Au	F	4.286 420 53
17	1357.77	1084.62	Cu	F	

注：(a) ³Heを除き、全ての物質は自然同位元素組成である。e-H₂は、オルト水素とパラ水素の平衡状態である。

(b) 方法の記号の意味は次のとおりである。

V：蒸気圧，T：三重点（液相，気相，固相の平衡状態にある温度），G：気体温度計，M，F：融解点，凝固点（101325 Pa 下での液相，固相が平衡状態にある温度）

表2. 定点温度に対する圧力の影響^{#1}

物 質	平衡状態の温度値 K	圧 力 効 果	
		$(dT_{90}/dp)/(10^{-8} K/Pa) \cdot p$: 圧力	$(dT_{90}/dl)/(10^{-3} K/m)$: 深さ
平衡水素 (T)	13.8033	34	0.25
ネオン (T)	24.5561	16	1.9
酸素 (T)	54.3584	12	1.5
アルゴン (T)	83.8058	25	3.3
水銀 (T)	234.3156	5.4	7.1
水 (T)	273.16	-7.5	-0.73
ガリウム (M)	302.9146	-2.0	-1.2
インジウム (F)	429.7485	4.9	3.3
すず (F)	505.078	3.3	2.2
亜鉛 (F)	692.677	4.3	2.7
アルミニウム (F)	933.473	7.0	1.6
銀 (F)	1234.93	6.0	5.4
金 (F)	1337.33	6.1	10
銅 (F)	1357.77	3.3	2.6

注：*) ミリケルビン毎標準気圧と考えてよい。

#) 融解点と凝固点の基準圧力は1標準気圧（101325 Pa）である。三重点の圧力はセルの深さによる静流体圧による影響のみである。

表3. ヘリウム蒸気圧式 (3) の係数値とその係数値が有効な温度領域

係数	³ He 0.65 K ~ 3.2 K	⁴ He 1.25 K ~ 2.1768 K	⁴ He 2.1768 K ~ 5.0 K
A ₀	1.053 447	1.392 408	3.146 631
A ₁	0.980 106	0.527 153	1.357 655
A ₂	0.676 380	0.166 756	0.413 923
A ₃	0.372 692	0.050 988	0.091 159
A ₄	0.151 656	0.026 514	0.016 349
A ₅	-0.002 263	0.001 975	0.001 826
A ₆	0.006 596	-0.017 976	-0.004 325
A ₇	0.088 966	0.005 409	-0.004 973
A ₈	-0.004 770	0.013 259	0
A ₉	-0.054 943	0	0
A ₁₀	7.3	5.6	10.3
A ₁₁	4.3	2.9	1.9

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V} \quad (4.2 \text{ K} \leq T_{90} \leq 24.5561 \text{ K}) \quad (6)$$

$$(3.0 \text{ K} \leq T_{90} \leq 24.5561 \text{ K}) \quad (4)$$

の関係式で定義される。ここで、 p は気体温度計のヘリウムの圧力であり、 a 、 b 、 c は、3.2で規定された3つの定義定点点で測定された圧力から決定される。また、 V は容器の体積、 N は気体の物質量である。 $B_x(T_{90})$ は、使用するヘリウムの同位体の第2ビリアル係数、 $B_3(T_{90})$ または $B_4(T_{90})$ であり、次式で与えられる。

³Heに関しては、

$$B_3(T_{90})/\text{m}^3\text{mol}^{-1} = \{ 16.69 - 336.98 (T_{90}/\text{K})^{-1} + 91.04 (T_{90}/\text{K})^{-2} - 13.82 (T_{90}/\text{K})^{-3} \} \cdot 10^{-6} \quad (5a)$$

であり、⁴Heに関しては、

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

である。

3.2.2 4.2 Kからネオンの三重点 (24.5561 K)

-⁴Heを気体温度計に使用-

この温度領域の T_{90} は、

$$T_{90} = a + bp + cp^2$$

の関係式で定義される。ここで、 p は気体温度計の圧力、 a 、 b 、 c は、3.2で規定された3つの定義定点点で測定された圧力から決定される。但し、最も低い定義定点点の温度は4.2 Kから5.0 Kの間になければならない。

3.3 平衡水素の三重点 (13.8033 K) から銀の凝固点 (961.78°C) までの領域：白金抵抗温度計

この領域では、 T_{90} は白金抵抗温度計で定義される。規定された組み合わせの定義定点点で白金抵抗温度計を校正し、それらの定義定点点の間の温度を補間するために定められた基準関数と定められた偏差関数が用いられる。

一つの白金抵抗温度計で13.8033 Kから961.78°Cの全ての温度領域で高い精度を確保することはできないし、全温度領域を一つの白金抵抗温度計でカバーすることすらできない。以下で示す温度領域のうち、ある白金抵抗温度計が使用できる温度領域は、通常、その温度計の構造で決まってくる。

この領域の温度は、温度 T_{90} での抵抗値 $R(T_{90})$ と、水の三重点での抵抗値 $R(273.16 \text{ K})$ の比 $W(T_{90})$ 、すなわち、

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16 \text{ K}) \quad (7)$$

を使って決定される。*)

*) 過去の温度目盛では、273.15 Kでの抵抗値との比で表されていたが、この $W(T_{90})$ の定義は、これらの目盛で使われていた抵抗比と異なる。

使用できる白金抵抗温度計は純粋で歪のない白金で作られ、次の2つの条件の少なくとも1つを満足しなければならない。

$$W(29.7646^\circ\text{C}) \geq 1.118\ 07 \quad (8a)$$

$$W(-38.8344^\circ\text{C}) \leq 0.844\ 235 \quad (8b)$$

アルミニウムの凝固点を越える温度で使用する白金抵抗温度計は、さらに、次の条件を満足しなければならない。

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.2844 \quad (8c)$$

白金抵抗温度計を使用する温度領域では、温度領域により、温度 T_{90} は、次のいずれかの偏差関数 $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ で定義される。**)

$$\begin{aligned} W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = & a [W(T_{90}) - 1] \\ & + b [W(T_{90}) - 1]^2 \\ & + \sum_{i=1}^5 d_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = & a [W(T_{90}) - 1] \\ & + b [W(T_{90}) - 1] \ln [W(T_{90})] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = & a [W(T_{90}) - 1] \\ & + b [W(T_{90}) - 1]^2 + e [W(T_{90}) - 1]^3 \\ & + f [W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 a, b, d_i, e, f, n は、温度領域ごとに与えられた偏差関数の条件と、定義定点の規定された組み合わせで白金抵抗温度計を校正することにより決定される。また、 $W_r(T_{90})$ は基準関数と呼ばれ、温度領域により次式で定義される。

$$\begin{aligned} \ln [W_r(T_{90})] = & C_0 \\ & + \sum_{i=1}^{12} C_i \{[\ln (T_{90}/273.16\text{ K}) + 1.5] / 1.5\}^i \\ & (13.8033\text{ K} \leq T_{90} \leq 273.16\text{ K}) \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} W_r(T_{90}) = & D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left\{ \frac{T_{90}/\text{K} - 754.15}{481} \right\}^i \\ & (0^\circ\text{C} \leq t_{90} \leq 961.78^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (13a)$$

ここで係数、 C_0, C_i, D_0, D_i は表4に与えられている。

また、(12a)に0.1 mK以内で等価な逆関数は、

$$\begin{aligned} T_{90}/273.16\text{ K} = & E_0 \\ & + \sum_{i=1}^{15} E_i \left\{ \frac{(W_r(T_{90}))^{1/6} - 0.65}{0.35} \right\}^i \\ & (13.8033\text{ K} \leq T_{90} \leq 273.16\text{ K}) \end{aligned} \quad (12b)$$

であり、(13a)に0.13 mK以内で等価な逆関数は、

$$\begin{aligned} T_{90}/\text{K} - 273.15 = & F_0 \\ & + \sum_{i=1}^9 F_i \left\{ \frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right\}^i \\ & (0^\circ\text{C} \leq t_{90} \leq 961.78^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (13b)$$

である。両式の係数 E_0, E_i, F_0, F_i は表4に与えられている。

各温度領域で使用する偏差関数、偏差関数の条件と偏差関数の係数を決定するための定義定点は以下に、また、まとめた形で表5に示す。

- (1) 平衡水素の三重点 (13.8033 K) から水の三重点 (273.16 K) までの領域

この温度領域では、偏差関数(9)を条件 $n=2$ で使用する。偏差関数の係数 a, b, d_i は、平衡水素の三重点 (13.8033 K)、ネオンの三重点 (24.5561 K)、酸素の三重点 (54.3584 K)、アルゴンの三重点 (83.8058 K)、水銀の三重点 (234.3156 K)、水の三重点 (273.16 K) および 17.0 K と 20.3 K に近いもう2つの温度値で白金抵抗温度計を校正して決定する。最後の2つの定義定点は次のどちらかの方法で決定される温度である。

一つは、3.2で説明してある気体温度計を用いて決定した温度であり、この場合、二つの温度はそれぞれ、16.9 K と 17.1 K の間と、20.2 K と 20.4 K の間になければならない。他の一つは、平衡水素の蒸気圧-温度関係を用いて決められる温度であり、この場合、二つの温度はそれぞれ、17.025 K と 17.045 K の間と、20.26 K と 20.28 K の間になければならない。この精密な温度値は、それぞれ次式(14a)および(14b)から決定される。

$$T_{90}/\text{K} - 17.035 = (p/\text{kPa} - 33.3213) / 13.32 \quad (14a)$$

$$T_{90}/\text{K} - 20.27 = (p/\text{kPa} - 101.292) / 30 \quad (14b)$$

ここで p は平衡水素の蒸気圧である。

- (2) ネオンの三重点 (24.5561 K) から水の三重点 (273.16 K) までの領域

この温度領域では、偏差関数(9)を条件 $d_4 = d_5$

**) 偏差関数(9),(10),(11)の右辺の $W(T_{90})$ は、 $W_r(T_{90})$ で置き換えてもよい。但し、定義定点での測定から決定する係数の値は両者で異なる。

表4. 基準関数 (12a), (12b), (13a), 及び (13b) 式の係数值

基準関数 (12a)		基準関数 (12b)			
係数	値	係数	値	係数	値
C_0	-2.135 347 29	E_0	0.183 324 722	E_{13}	-0.091 173 542
C_1	3.183 247 20	E_1	0.240 975 303	E_{14}	0.001 317 696
C_2	-1.801 435 97	E_2	0.209 108 771	E_{15}	0.026 025 526
C_3	0.717 272 04	E_3	0.190 439 972		
C_4	0.503 440 27	E_4	0.142 648 498		
C_5	-0.618 993 95	E_5	0.077 993 465		
C_6	-0.053 323 22	E_6	0.012 475 611		
C_7	0.280 213 62	E_7	-0.032 267 127		
C_8	0.107 152 24	E_8	-0.075 291 522		
C_9	-0.293 028 65	E_9	-0.056 470 670		
C_{10}	0.044 598 72	E_{10}	0.076 201 285		
C_{11}	0.118 686 32	E_{11}	0.123 893 204		
C_{12}	-0.052 481 34	E_{12}	-0.029 201 193		

基準関数 (13a)		基準関数 (13b)	
係数	値	係数	値
D_0	2.781 572 54	F_0	439.932 854
D_1	1.646 509 16	F_1	472.418 020
D_2	-0.137 143 90	F_2	37.684 494
D_3	-0.006 497 67	F_3	7.472 018
D_4	-0.002 344 44	F_4	2.920 828
D_5	0.005 118 68	F_5	0.005 184
D_6	0.001 879 82	F_6	-0.963 864
D_7	-0.002 044 72	F_7	-0.188 732
D_8	-0.000 461 22	F_8	0.191 203
D_9	0.000 457 24	F_9	0.049 025

表5. 白金抵抗温度計を使用する温度領域の偏差関数, 条件及び校正点

温度領域	偏差関数 ^{*)} とその条件	校正点 ^{**)}
13.8033 K ~ 273.16 K	(9) 式, $n=2$	2 ~ 9
24.5561 K ~ 273.16 K	(9) 式, $n=0, d_4=d_5=0$	2, 5 ~ 9
54.3584 K ~ 273.16 K	(9) 式, $n=1, d_2=d_3=d_4=d_5=0$	6 ~ 9
83.8058 K ~ 273.16 K	(10) 式	7 ~ 9
234.3156 K ~ 29.7646 °C	(11) 式, $e=f=0$	8 ~ 10
0 °C ~ 660.323 °C	(11) 式, $f=0$	9, 12 ~ 14
0 °C ~ 419.527 °C	(11) 式, $e=f=0$	9, 12, 13
0 °C ~ 231.928 °C	(11) 式, $e=f=0$	9, 11, 12
0 °C ~ 156.5985 °C	(11) 式, $b=e=f=0$	9, 11
0 °C ~ 29.7646 °C	(11) 式, $b=e=f=0$	9, 10
660.323 °C ~ 961.78 °C	(11) 式	9, 12 ~ 15 ^{*)}

*) 本文の式の番号

**) 表1の定義定数の番号

#) 補間式の係数 a, b, e は 0 °C ~ 660.323 °C の温度領域での値を使い, f は銀の凝固点と水の三重点での測定から決定する。

$n=0$ で使用する。偏差関数の他の係数 a , b , d_1 , d_2 , d_3 は、水素の三重点 (13.8033 K), ネオンの三重点 (24.5561 K), 酸素の三重点 (54.3584 K), アルゴンの三重点 (83.8058 K), 水銀の三重点 (234.3156 K), 水の三重点 (273.16 K) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(3) 酸素の三重点 (54.3584 K) から水の三重点 (273.16 K) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (9) を条件 $d_2=d_3=d_4=d_5=0$, $n=1$ で使用する。偏差関数の他の係数 a , b , d_1 は、酸素の三重点 (54.3584 K), アルゴンの三重点 (83.8058 K), 水銀の三重点 (234.3156 K) と水の三重点 (273.16 K) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(4) アルゴンの三重点 (83.8058 K) から水の三重点 (273.16 K) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (10) を使用する。偏差関数の係数は、アルゴンの三重点 (83.8058 K), 水銀の三重点 (234.3156 K) と水の三重点 (273.16 K) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(5) 水銀の三重点 (-38.8344°C) からガリウムの融解点 (29.7646°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $e=f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a , b は、水銀の三重点 (-38.8344°C), 水の三重点 (0.01°C) とガリウムの融解点 (29.7646°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(6) 0°C からアルミニウムの凝固点 (660.323°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a , b , e は、水の三重点 (273.16 K), すずの凝固点 (231.928°C), 亜鉛の凝固点 (419.527°C) とアルミニウムの凝固点 (660.323°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(7) 0°C から亜鉛の凝固点 (419.527°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $e=f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a , b は、水の三重点 (273.16 K), すずの凝固点 (231.928°C) と亜鉛の凝固点 (419.527°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(8) 0°C からすずの凝固点 (231.928°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $e=f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a , b は、水の三重点 (273.16 K), インジウムの凝固点 (156.5985°C) とすずの凝固点 (231.928°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(9) 0°C からインジウムの凝固点 (156.5985°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $b=e=f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a は、水の三重点 (273.16 K) とインジウムの凝固点 (156.5985°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(10) 0°C からガリウムの融解点 (29.7646°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を条件 $b=e=f=0$ で使用する。偏差関数の係数 a は、水の三重点 (273.16 K) とガリウムの融解点 (29.7646°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

(11) アルミニウムの凝固点 (660.323°C) から銀の凝固点 (961.78°C) までの領域

この温度領域では、偏差関数 (11) を使う。偏差関数の係数 a , b , e は、 $f=0$ の条件で、水の三重点 (273.16 K), すずの凝固点 (231.928°C), 亜鉛の凝固点 (419.527°C) とアルミニウムの凝固点 (660.323°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。偏差関数の係数 f は、これらの a , b , e の値を使い、水の三重点 (273.16 K) と銀の凝固点 (961.78°C) で白金抵抗温度計を校正して決定する。

3.4 銀の凝固点 (961.78°C) 以上の領域：プランクの放射則

銀の凝固点以上では、温度 T_{90} は次式で定義される。

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}(T_{90}(X))} = \frac{\exp(c_2/[\lambda T_{90}(X)]) - 1}{\exp(c_2/[\lambda T_{90}]) - 1} \quad (15)$$

ここで、 $T_{90}(X)$ は、銀の凝固点 ($T_{90}(\text{Ag}) = 1234.93$ K), 金の凝固点 ($T_{90}(\text{Au}) = 1337.33$ K), 銅の凝固点 ($T_{90}(\text{Cu}) = 1357.77$ K) のいずれか一つを指す*。

* これらの定義定点の温度値は、式 (15) に対して互いに矛盾は生じていないと考えられる。

$L_\lambda(T_{90})$ と $L_\lambda(X)$ は、それぞれ、温度 T_{90} 、 $T_{90}(X)$ での黒体の(真空中の)波長 λ での分光放射輝度である。また、 $c_2 = 0.014388 \text{ m}\cdot\text{K}$ である。

追 記

本資料は、『1990年国際温度目盛』の仏文公式テキストおよび国際度量衡委員会で承認された英文テキストを基に、国際計量研究連絡委員会温度標準分科会および計量研究所関係者によって作成された日本語訳テキストである。仏文及び英文テキストの一部には記述の不統一、編集上の誤りなどがあり、本資料では上記テキストの作成主旨を尊重しつつ、可能な範囲で記述順序の変更や修正を行った。また、温度目盛の定義と直接関係のない部分を一部省略した。これらの変更点の詳細については、次号の計量研究所報告に掲載予定の『1990年国際温度目盛に関する補足資料』で解説する。なお、参考のために、従来の温度目盛からの変換式を本資料の付録として追加した。

[付録1]

IPTS-68およびEPT-76からの変換式

IPTS-68とITS-90の差 $T_{90} - T_{68}$ および1976年暫定目盛 T_{76} との差は数値として表6に示してある。この表の数値はこれらの温度目盛の差の平均的な値であり、実際の温度計による温度差の精度をこの数値が示す桁数まで保証したものではない。この表の値から過去の温度目盛で測られた温度値を必要な温度範囲でITS-90に変換することができる。1976年暫定温度目盛(EPT-76)とIPTS-68からの変換のための近似式の例を以下に示す。

(1) 5 Kから27 KでのEPT-76からの変換式

$$(T_{90} - T_{76})/\text{mK} = -0.0056 (T_{90}/\text{K})^2 \quad (\text{I})$$

(2) 13.8 Kから83.8 KでのIPTS-68からの変換式

$$(T_{90} - T_{68})/\text{K} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{13} \alpha_i ((T_{90} - 40 \text{ K})/40 \text{ K})^i \quad (\text{II})$$

(3) 83.8 K～630.6℃でのIPTS-68からの変換式

$$(t_{90} - t_{68})/^\circ\text{C} = \sum_{i=1}^8 \beta_i (t_{90}/630^\circ\text{C})^i \quad (\text{III})$$

(4) 1064℃以上でのIPTS-68からの変換式

$$(T_{90} - T_{68})/\text{K} = -0.25 \{ (T_{90}/\text{K}) / 1337.33 \}^2 \quad (\text{IV})$$

ここで、係数 α_i 、 β_i の値を付表1に示す。

これらの式の精度は、式(IV)を除き、表6に対して1～1.5 mK程度であるが、実際の温度計では校正誤差や温度計の個体差(ノノユニークネス)のためにさらに大きな差が生ずることがある。1064℃以上については、金の凝固点の温度値の差から直接波長依存性を考慮した変換式がプランクの放射則(15)から求められる。

630℃から960℃の温度領域に関しては、表6に与えられている数値の正確さについては疑問な点が残されている。この温度領域では、IPTS-68に使われていた熱電対の安定度と実際の測定データがどのような手段で行われたかを考慮して変換しなければならない。特に、630℃の接合点での異常は熱物性値の測定結果では報告されていないことを考慮すると、これらの測定値はIPTS-68の値ではないことも予想され、変換式による形式的な変換ができない場合が多いと考えられる。630℃～960℃ではITS-90とIPTS-68の差の実測が行われ、現在検討が進められている。

付表1. 近似式の係数値

i	(13.8 K～83.8 K)	(83.8 K～630.6℃)
	α_i	β_i
0	-0.006 204	
1	0.005 002	-0.151 642
2	-0.062 443	-0.261 170
3	-0.084 734	1.192 867
4	1.524 400	0.952 865
5	0.039 167	-4.597 716
6	-9.490 021	0.743 540
7	7.155 748	4.367 434
8	20.905 656	-2.370 120
9	-30.530 830	
10	-4.807 870	
11	32.569 695	
12	-21.999 229	
13	4.789 603	

表6. ITS-90とEPT-76及びIPTS-68との差

 $(T_{90} - T_{76}) / \text{mK}$

T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0						-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
10	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.0
20	-2.2	-2.5	-2.7	-3.0	-3.2	-3.5	-3.8	-4.1		

 $(T_{90} - T_{68}) / \text{K}$

T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10					-0.006	-0.003	-0.004	-0.006	-0.008	-0.009
20	-0.009	-0.008	-0.007	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006
30	-0.006	-0.007	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006
40	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006
50	-0.006	-0.005	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002
60	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007
70	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
80	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
90	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009

T_{90}/K	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0.009	0.011	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012
200	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001		

 $(t_{90} - t_{68}) / ^\circ\text{C}$

$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
-100	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.010	0.008	0.008
0	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.012

$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.013	-0.016	-0.018	-0.021	-0.024
100	-0.026	-0.028	-0.030	-0.032	-0.034	-0.036	-0.037	-0.038	-0.039	-0.039
200	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.039	-0.039	-0.039
300	-0.039	-0.039	-0.039	-0.040	-0.040	-0.041	-0.042	-0.043	-0.045	-0.046
400	-0.048	-0.051	-0.053	-0.056	-0.059	-0.062	-0.065	-0.068	-0.072	-0.075
500	-0.079	-0.083	-0.087	-0.090	-0.094	-0.098	-0.101	-0.105	-0.108	-0.112
600	-0.115	-0.118	-0.122	-0.125	-0.08	-0.03	0.02	0.06	0.11	0.16
700	0.20	0.24	0.28	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36	0.36	0.35
800	0.34	0.32	0.29	0.25	0.22	0.18	0.14	0.10	0.06	0.03
900	-0.01	-0.03	-0.06	-0.08	-0.10	-0.12	-0.14	-0.16	-0.17	-0.18
1000	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26

$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000	-0.19	-0.26	-0.30	-0.35	-0.39	-0.44	-0.49	-0.54	-0.60	-0.66
2000	-0.72	-0.79	-0.85	-0.93	-1.00	-1.07	-1.15	-1.24	-1.32	-1.41
3000	-1.50	-1.59	-1.69	-1.78	-1.89	-1.99	-2.10	-2.21	-2.32	-2.43

〔付録2〕 用語の仏語、英語との対照表

熱力学温度	température thermodynamique	thermodynamic temperature
セルシウス温度	température Celsius	Celsius temperature
セルシウス度	degré Celsius	degree Celsius,
定義定点	point fixe de définition	defining fixed point
校正	étalonnage	calibration
補間	interpolation	interpolation
三重点	point triple	triple point
融解点	point de fusion	melting point
凝固点	point de congélation	freezing point
基準関数	fonction de référence	reference function
偏差関数	fonction écart	deviation function
分光放射輝度	densités spectrales de la luminance énergétique	spectral concentrations of the radiance