

1990年国際温度目盛(ITS-90)について

櫻井 弘久

On the International Temperature Scale of 1990

Hirohisa SAKURAI

1. はじめに

1990年1月1日から温度標準の維持方式が変更になった^{1),2)}。従来使われていた『1968年国際実用温度目盛』(以下 IPTS-68と略す)が改訂され、温度標準は『1990年国際温度目盛』(以下英文名, The International Temperature Scale of 1990, の頭文字を使って, ITS-90, と略す)に基づいて設定, 維持されることになった。また, 暫定的に使われていた, 0.5 K~30 Kの温度領域の『1976年暫定目盛』(以下 EPT-76と略す)も廃止された。新しい目盛の公式文書(仏語版)は, 近く国際度量衡局から出版されるが, 英語版はすでに *Metrologia* 誌に掲載されている³⁾。

標準に関係するこれらの問題に関しては, 日本では, 日本学術会議第5部標準研究連絡委員会で審議されており, すでに関係学会誌を通してその概要が報告されている⁴⁾。また, 各関係分野では, 国際学術組織や国際機関を通して対処法などが検討されていることと思われる。メートル条約を通して12月末までに入手した資料については, 一般計測分野を対象として, ITS-90の定義部分の抄訳および概要を報告してある^{5),6)}。また, この改訂についての背景についてもすでに報告してある^{7),8)}。なお, ITS-90に関する必要最小限の情報を, ITS-90の概要として付録に示した。ここでは, ITS-90を使う上での補足的な事項を簡単に述べる。

2. 国際温度目盛の意義

熱力学温度は, 熱力学によってその物理量が厳密に定義されており, さらに, 国際単位系(SI)によって, 単位, ケルビン, が定義されている⁹⁾。SIでは『ケルビンは, 水の三重点の熱力学温度の1/273.16である。』とし

ており, このケルビンの大きさのあいまいさは, 水の三重点の実現精度で決まり, 約0.4 ppmである。SIに基づいて温度を求めるには, 熱力学温度を直接測定し, ケルビンの定義に基づいて数値(温度値)を求めることになる。しかし, 熱力学温度を直接測定することは実用的でない。さらに, 温度を測定する場合, 熱力学温度の測定精度よりよい再現性を必要とすることがある。このために, 熱力学温度をよく近似し, その再現性が熱力学温度を直接測定するよりはるかによい方法として, 国際的な取り決めによって規定した温度測定法が国際温度目盛である。

この国際温度目盛は, 基本的には,

- (i) 温度値が与えられた再現可能な温度(定義定点という)と,
- (ii) 定義定点の間を補間するための方法,

で構成されている。定義定点とは, 例えば, 水の三重点などの実験的に実現可能な温度を示し, 補間法とはある条件を満足した白金抵抗温度計と定められた補間式や物理法則などである。

IPTS-68の問題点として指摘されていた主な点は,

- (i) 熱力学温度を近似していない温度領域があり, 1 Kの大きさが温度によって異なる。
- (ii) 再現性が不十分な領域がある。
- (iii) 14 K以下が定義されていない。

などであった。ITS-90ではこれらの問題点のある程度解決している。特に熱電対が補間計器であった温度領域の一部が白金抵抗温度計に置き換えられたため, この温度領域の再現性は1桁以上向上した。

IPTS-68から構造上の主な変更点は, 0.65 Kから約13.8 Kまで新たに定義した点と, 630.74℃以上1064.43℃まで使われていた白金・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。これらの採用により, 国際単位系(SI)に基づいた温度として, ITS-90は, 熱力学温度との一致度が向上し, 実用上の温度測定に必要なほとんどの温度領域

が定義され、さらに、目盛の再現性も IPTS-68 以上に高められた。

3. ITS-90の補足説明

(a) 記号, 表現

SI では、熱力学温度の単位、ケルビン、を基本単位に、セルシウス温度の単位、セルシウス度を固有の名称を持った組立単位として扱っている。ITS-90 では、国際ケルビン温度と国際セルシウス温度を導入している。これは、熱力学温度と区別することが必要な場合に使用するためである。現在では両者は実験誤差内で一致しており、特に熱力学温度を SI の単位の定義に基づいて測定する場合を除き、両者を区別する必要はない。区別するときは、 T , T_{90} , t , t_{90} の記号を使う。

(b) ITS-90の定義

IPTS-68 が 13.81 K 以上を定義していたのに対し、ITS-90 では、0.65 K 以上を定義している。高温側はプランクの放射則で定義しているため、プランクの放射則で実際に測定可能な領域まで測定することができる。

定義法に関して ITS-90 で最も大きく変わった点は、複数の実現法を多量に採用した点、定義定点から沸点を除いた点、熱電対を補間計器から外した点である。

沸点を削除した理由は、再現性の面からと言われているが明確ではない。圧力測定が不用であるとの理由もあるが、低温域では Vapor pressure point (蒸気圧点) が採用されており、圧力測定が必要である。沸点、蒸気圧点とも液相/気相の熱平衡状態であるが、両者の違いは、後者は、蒸気圧が 1 気圧に限定されていない点である。従来、沸点の実現法が誤解されることが多かった点から、今回の表現に変更されたとも考えられる。また、金属定点は、凝固点または融解点が採用されており、101325 Pa 下での液相/固相平衡状態である。精密測定にはこれらの定点の実現時に圧力測定が必要である。

ガリウムは融解点が採用された。融解点は、1 気圧下での液相/固相の熱平衡状態であり、状態としての定義は、凝固点と全く同じである。ITS-90 のテキストでは、物質の状態と定義定点の実現法とを、混同している。ガリウム点は、最初三重点が定義定点として予定されていたが、一部有力研究機関から、三重点の温度を融解曲線から測定することが指摘され、そのままテキストに採用された。われわれはテキストを作成する時点で、この混同を指摘したが変更されなかった。定義定点の状態を指す語として、英文テキストでは、乱暴に、'state' としているが、入手した仏文テキストでは、'type' となっており、凝固点、融解点が物質の状態を区別していない点が意識されていると窺える。ガリウム点は、三重点を実現

し、2 mK と静流体圧の補正を加えるか、1 気圧に加圧しその圧力測定から必要な補正をするかのいずれかの方法で実現する。なお、ITS-90 のテキストは、最初英文で作成され、国際度量衡局で仏文にされ、公式文書となる。

複数の実現法に関しては、テキストにも書かれているように、互いに全く同等の資格であり、優劣はない。IPTS-68 でも、一部採用されていたが、ITS-90 には大量に採用された。利用者には必要温度領域のみで温度計を校正できるため便利になり、また、特に中温域では、必要以上の高温で温度計を校正する必要がなくなったため、温度計の安定度が確保され、温度測定での精度が向上している。複数の定義間の一致度については、テキストでは、定義の複雑さとのバランスを考慮して、十分小さいとしているが、今後の課題である。

熱電対については、最初の国際温度目盛を決めた 1927 年当時からの課題であったが、今回の改訂で姿を消した。しかし、高温域で使用できる白金抵抗温度計の製法が必ずしも確立されているものではなく、また、白金抵抗温度計を直接実用的に使用することも出来ない。実用的には、熱電対が使われる。熱電対は、高温域では最も良く使われている温度センサーの一つであり、今後変更はないと考えられる。現状では白金抵抗温度計の良さを高温域で利用できる分野は限られている。

(c) 熱力学温度との一致度

ITS-90 に関する熱力学温度との一致度についてはまだ十分な情報がない。IPTS-68 ではテキストに一致度が記載されていたが、IPTS-68 の 1975 年修正版¹⁰⁾では削除されている。ITS-90 のテキストにも記載されていない。また、定義定点の温度値についてもその決定の過程は報告されていない。例えば、金の凝固点が 1064.18 °C と決定された理由は不明である。この温度領域では、放射温度計による定点間の比較が行われているが、水の三重点を基準にした熱力学温度の測定は、1968 年以後行われていない。1967 年以前では、気体温度計による測定データが多数あったが、これらのデータを再評価した形跡は全くなく、また、放射温度計による測定結果をいかに処理したかも明確ではない。1983 年での金の凝固点の評価は、1064.24 °C であった¹¹⁾。放射温度計による測定では、系統誤差が大きく、その評価法は測定者によって異なり、関係者以外が再評価することは不可能に近い。1983 年からの値の差、60 mK は放射温度計の誤差の数倍であり、単なる平均値を得る方法の差とは考えられない。いずれにしても、高精度の熱力学温度測定の結果によって決定した値ではない。

その他の温度領域に関しても、例えば 1985 年の評価で

は、400°C 近辺での IPTS-68 と熱力学温度との差は 61 mK であった¹¹⁾。これに対して、ITS-90 の Table 6 では 48 mK となり、約 13 mK 変更されている。この温度領域の気体温度計の系統誤差は数 mK 程度とされており¹²⁾、変更の根拠はいまのところ不明である。系統誤差が数 mK であるとの評価自身が誤りで、数十 mK であるとも考えられる。

(d) 補間用気体温度計

ITS-90 では、3.0 K から 24.5 K の温度領域を定積気体温度計を用いて定義している。熱力学温度を求める気体温度計では、各種の補正が必要であるが、補間計器として扱う方法は、Barber 氏の提案¹³⁾によるものである。Barber 氏の提案は、24.5 K と 4.2 K の 2 点で補正量を校正する補間用気体温度計であった。これに対して、2 点校正では精度面で不十分であることと、ピリアル係数の温度依存性から、3 点校正の提案¹⁴⁾を行った。その後、³He を用いた気体温度計による熱力学温度測定がなされ、³He の場合でも、3 点校正で十分な精度が得られることが確認された¹⁵⁾。

ITS-90 のテキストでは、気体温度計の構造によって精度が決まるとしているが、一般的な構造の気体温度計の場合、構造よりもヘリウムの密度の方が精度に影響する。580 mol/m³、つまり、0°C で約 13 気圧の密度にすると、ITS-90 に従って校正した補間用気体温度の誤差は、0.2 mK 程度である。これに対して、死体積を気体容器の 5% 程度としても、その時の誤差は、この数分の 1 程度である。一般の気体温度計では、死体積は 5% を超えることはないように設計されている。気体密度を下げるのが補正用に使用するには不可欠である。

(e) 白金抵抗温度計

ITS-90 に使われる白金抵抗温度計は、式(7)または(8)の条件を満足するものに限られている。この条件は、IPTS-68 での条件¹⁰⁾ $\alpha \geq 0.003925$ と全く同等である。また、銀の凝固点まで使用する白金抵抗温度計に付加された条件(9)は、白金抵抗温度計の絶縁抵抗を規定するためである。亜鉛の凝固点以上で使用する白金抵抗温度計は、白金センサー部分に石英を使用したものに限られる。マイカを巻枠に使用したものは、500°C 以上で使用するマイカに含まれている不純気体により白金線が汚染され、劣化する可能性がある。

白金抵抗温度計を使用する温度領域では、特に室温付近を中心に、実現法が複数ある点が IPTS-68 と異なる。この複数の定義間で温度値を一致させるためには、定義定点の正確な実現が必要となっている。定義定点の実現誤差は、定義定点以外の温度で誤差が拡大される。定義定点の実現精度が 0.5 mK であっても、定義定点以外で

は 1 mK を越えることがある。現在の定義定点の温度値は、将来定義定点の実現法が改良されると変更されることも考えられる。

(f) IPTS-68 からの変換

IPTS-68 から ITS-90 への変換は、図¹⁾および Table 6 で与えられている。しかし、この表に与えられた数値は、平均的な変換値であり、全ての場合にこの数値の桁数まで変換できるものではない⁷⁾。特に、630°C 以上は、IPTS-68 の再現性により、 ± 0.2 K 以上の誤差がある。なお、変換は、温度領域によっては、近似的に次式が使えると言われている¹⁶⁾。

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

$$(-200^\circ\text{C} \leq t_{68} \leq 630^\circ\text{C})$$

ここで、係数 a_i は、

$$a_1 = -0.14542, \quad a_2 = -0.26722, \quad a_3 = 1.06471, \quad a_4 = 1.131286, \\ a_5 = -4.25835, \quad a_6 = -1.59924, \quad a_7 = 7.29176, \quad a_8 = -3.52573$$

である。また、1064°C 以上は、

$$(t_{90} - t_{68}) / ^\circ\text{C} = -0.25 \{ (t_{68} / ^\circ\text{C} + 273.15) / 1337.33 \}^2$$

で近似できる。

(g) ヘリウム蒸気圧温度目盛

ITS-90 では、5.0 K 以下をヘリウム蒸気圧温度目盛によって定義している。定義としては、非常に明快であり、利用価値も高い。しかし、ITS-90 では、2.1765 K 以下で ⁴He の超流動状態の蒸気圧を定義として採用している。超流動状態の精密な蒸気圧測定法は現在のところ技術的に確立されたものではなく、定義として取り入れた根拠は明白ではない。

5. むすび

以上 ITS-90 を利用する際の補正事項を述べた。ITS-68 が熱力学温度からずれていることを指摘されてから、既に 15 年を越えている。一部の温度領域のみ修正しても、問題の解決にならないことから、その改訂が遅れていたと聞いている。しかし、ITS-90 を決定する過程に実際に関係してみると、その問題の多さを感じた。今回の改訂が必ずしも十分でないことは関係者は一番よく知っている。しかし、IPTS-68 の欠点のいくつかは解決したことも確かである。また、熱力学温度との一致度は確実に IPTS-68 より向上しているが、まだ十分な精度とはいえない。なお、メートル条約の下部機関の一つである測温諮問委員会では、ITS-90 に関連して、誤差の評価についての研究の促進を勧告している。

文 献

- 1) 岡村総吾, 応用物理 58, 1400 (1989).
- 2) T. J. Quinn, *Metrologia* 26, 69 (1989).
- 3) H. Preston-Thomas, *Metrologia* 27, 3 (1989).
- 4) 例えば, 日本学術会議標準研究連絡委員会, 日本物理学会誌, 45, 44 (1990).
- 5) 櫻井弘久, 計測と制御 29, 268 (1990).
- 6) 櫻井弘久, 応用物理 59, (1990).
- 7) 櫻井弘久, 応用物理 57, 1353 (1988).
- 8) 櫻井弘久, 熱測定 12, 224 (1986).
- 9) 高田誠二, 計測と制御 8, 378 (1969).
- 10) H. Preston-Thomas, *Metrologia* 12, 7 (1976).
- 11) H. Preston-Thomas and P. Giacomo, Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 (Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, 1983) p.17.
- 12) H. Preston-Thomas, T. J. Quinn and R. Hudson, *Metrologia* 21, 75 (1985).
- 13) C. R. Barber, Temperature, Its measurement and Control in Science and Industry (Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972)9.
- 14) H. Sakurai and K. Mitsui, Documents du Comité consultatif de Thermométrie-13 (Bureau International Poids et Mesures, Sèvres, 1980) CCT/80-28.
- 15) P. P. M. Stuer, *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl.* 26, 26-3 (1987).
- 16) R. Rusby: 私信.

付録

ITS-90の概要

1. ま え が き

第78回国際度量衡委員会(1989年)は, 第18回国際度量衡総会(1987年)の決議7に基づき, 『1968年国際実用温度目盛(1975年修正版)』(IPTS-68)および『1976年暫定目盛』(EPT-76)に代わる新しい温度標準として『1990年国際温度目盛』(Échelle Internationale de Température de 1990, 以下「ITS-90」と略す)を採用し, 1990年1月1日を期して新しい温度標準に変更することを勧告した。

2. 1990年国際温度目盛の意義と表記法

ITS-90では, 熱力学温度およびセルシウス温度に相当する物理量として, 国際ケルビン温度および国際セルシウス温度を定義する。これらの単位は, それぞれ, ケルビン(記号, K)およびセルシウス度(記号, °C)である。

国際ケルビン温度, T_{90} と国際セルシウス温度, t_{90} の関係は, 熱力学温度とセルシウス温度の関係と同様に,

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15 \quad (1)$$

と定義する。

3. 1990年国際温度目盛の概要

ITS-90は, 基本的には, IPTS-68と同様に, 再現可能な温度(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の温度領域を定義する。

ITS-90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をTable 1に示す。また, 実験的に各定義定点を実現する際に必要となる定義定点の温度の圧力依存性については, その推奨値をTable 2に示す。

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(0.65 K~5.0 K), 定積気体温度計による方法(3.0 K~24.5561 K), 白金抵抗温度計による方法(13.8033 K~961.78°C), プランクの放射則による方法(961.78°C以上)を使用する。

ITS-90での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

この温度領域の温度は, ヘリウム蒸気圧と温度の関係式を用いて定義される。温度 T_{90} は, ヘリウムの蒸気圧

Table 1³⁾ Defining fixed points of the ITS-90.

Number	Temperature		Substance ^a	State ^b	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}C$			
1	3 to 5	- 270,15 to - 268,15	He	V	
2	13,8033	- 259,3467	e-H ₂	T	0,001 190 07
3	≈ 17,	≈ - 256,15	e-H ₂ (or He)	V(or G)	
4	≈ 20,3	≈ - 252,85	e-H ₂ (or He)	V(or G)	
5	24,5561	- 248,5939	Ne	T	0,008 449 74
6	54,3584	- 218,7916	O ₂	T	0,091 718 04
7	83,8058	- 189,3442	Ar	T	0,215 859 75
8	234,3156	- 38,8344	Hg	T	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H ₂ O	T	1,000 000 00
10	302,9146	29,7646	Ga	M	1,118 138 89
11	429,7485	156,5985	In	F	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	F	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	F	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	F	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag	F	4,286 420 53
16	1337,33	1064,18	Au	F	
17	1357,77	1084,62	Cu	F	

^a All substances except ³He are of natural isotopic composition, e-H₂ is hydrogen at the equilibrium concentration of the ortho-and para-molecular forms.

^b For complete definitions and advice on the realization of these various states, see "Supplementary Information for the ITS-90". The symbols have the following meanings: V: vapour pressure point; T: triple point (temperature at which the solid, liquid and vapour phases are in equilibrium); G: gas thermometer point; M, F: melting point, freezing point (temperature, at a pressure of 101 325 Pa, at which the solid and liquid phases are in equilibrium)

p を用いて,

$$T_{90}/K = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [\ln(p/\text{Pa}) - B]/C \quad (2)$$

で定義される。定数 A_0, A_i, B, C は、ヘリウムの同位元素の種類 ³He, ⁴He とその状態により異なる値を持つ。これらの定数を Table 3 に示す。

2) 3.0K~24.5561K:ヘリウム気体温度計

この温度領域の温度は、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る。温度 T_{90} は、気体温度計のヘリウム圧力 p に対して、

$$T_{90} = a + b p + c p^2 \quad (3)$$

(4.2 K ~ 24.5561 K)

または、

$$T_{90} = \frac{a + b p + c p^2}{1 + B_x(T_{90}) N/V} \quad (4)$$

(3.0 K ~ 24.5561 K)

で定義される。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の気体温度計の圧力測定から決定される。また、(3)式は、⁴Heのみで使用される。 N/V は気体密度である。 $B_x(T_{90})$ は、³Heおよび⁴Heのビリアル係数(それぞれ $x = 3$ および $x = 4$)であり、⁴Heについては、

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

であり、⁴Heについては、

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

である。

なお、補間用気体温度計によって実現される温度値の精度は、気体温度計の構造、ヘリウムの圧力(気体密度)などに依存する。

Table 2³⁾ Effect of pressure on the temperatures of some defining fixed points[#]

Substance	Assigned value of equilibrium temperature T_{90}/K	Temperature with pressure, p $(dT/dp)/(10^{-8}K \cdot Pa^{-1})^*$	Variation with depth, l $(dT/dl)/(10^{-3}K \cdot m^{-1})^{**}$
e-Hydrogen (T)	13,8033	34	0, 25
Neon (T)	24,5561	16	1, 9
Oxygen(T)	54,3584	12	1, 5
Argon(T)	83,8058	25	3, 3
Mercury(T)	234,3156	5, 4	7, 1
Water (T)	273,16	- 7, 5	- 0, 73
Gallium	302,9146	- 2, 0	- 1, 2
Indium	429,7485	4, 9	3, 3
Tin	505,078	3, 3	2, 2
Zinc	692,677	4, 3	2, 7
Aluminium	933,473	7, 0	1, 6
Silver	1234,93	6, 0	5, 4
Gold	1337,33	6, 1	10
Copper	1357,77	3, 3	2, 6

* Equivalent to millikelvins per standard atmosphere

** Equivalent to millikelvins per metre of liquid

The reference pressure for melting and freezing points is the standard atmosphere ($P_0 = 101\,325\text{Pa}$). For triple points (T) the pressure effect is a consequence only of the hydrostatic head of liquid in the cell

3) 13.8033K ~ 961.78°C:白金抵抗温度計

この温度領域の温度は、定められた条件を満足する白金抵抗温度計、定義定点、定められた補間手続き、によって定義される。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 $R(273.16\text{K})$ との比、 $W(T_{90})$ 、すなわち、

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

の関数で表現される。また、使用す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。

$$W(29.7646^\circ\text{C}) \geq 1.11807 \tag{8}$$

または、

$$W(-38.8344^\circ\text{C}) \leq 0.844235 \tag{9}$$

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。

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.2844 \tag{10}$$

この温度領域では、定義定点での白金抵抗温度計の抵

Table 3³⁾ Values of the constants for the helium vapour pressure Eqs. (2), and the temperature range for which each equation, identified by its set of constants, is valid.

	³ He 0.65K to 3.2K	⁴ He 1.25K to 2,1768K	⁴ He 2,1768K to 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	-0,00 4325
A_7	0,088 966	0,005 409	-0,00 4973
A_8	-0,004 770	0,013 259	0
A_9	-0,054 943	0	0
B	7,3	5,6	10,3
C	4,3	2,9	1,9

抗値から補間式の定数を決定し、抵抗値の測定から温度 T_{90} を求める。

補間式は Table 5 に示す温度領域に対応して次式のいずれかを使用する。

$$(a) W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln(W(T_{90}))]^{i+n} \tag{11}$$

$$(b) W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + c [W(T_{90}) - 1]^3 + d [W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2 \tag{12}$$

$$(c) W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] \ln(W(T_{90})) \tag{13}$$

係数、 a, b, c_i, c, d は、白金抵抗温度計に依存する定数であり、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と条件を Table 5 に示す。なお、水の三重点は抵抗比を求めるために必要である。

$W_r(T_{90})$ は基準関数であり、次式で定義される。

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \{ [\ln(T_{90} / (273.16\text{K}))] + 1.5 \}^i \tag{14}$$

$$(13.8033\text{K} \leq T_{90} \leq 273.16\text{K})$$

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \{ (T_{90}/K - 754.15) / 481 \}^i \tag{15}$$

$$(273.15\text{K} \leq T_{90} \leq 1234.93\text{K})$$

Table 4 The constants A_0, A_i, C_0 and C_i in the reference functions of equations (14) and (15).

A_0	- 2, 135 347 29	A_8	0, 107 152 24	C_3	- 0, 006 497 67
A_1	3, 183 247 20	A_9	- 0, 293 028 65	C_4	- 0, 002 344 44
A_2	1, 801 435 97	A_{10}	0, 044 598 72	C_5	0, 005 118 68
A_3	0, 717 272 04	A_{11}	0, 118 686 32	C_6	0, 001 879 82
A_4	0, 503 440 27	A_{12}	- 0, 052 481 34	C_7	- 0, 002 044 72
A_5	- 0, 618 993 95	C_0	2, 781 572 54	C_8	- 0, 000 461 22
A_6	- 0, 053 323 22	C_1	1, 646 509 16	C_9	0, 000 457 24
A_7	0, 280 213 62	C_2	- 0, 137 143 90		

ここで、定数 A_0, A_i, C_0, C_i は Table 4 に示すとおりである。

4) 961.78 °C以上：プランクの放射則

銀の凝固点以上の温度領域はプランクの放射測で定義される。温度 T_{90} は次式から求める。

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_{90}(x))} = \frac{\exp(c_2 [\lambda T_{90}(x)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2 [\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad (16)$$

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。

5) ITS-90と過去の目盛の差

ITS-90と過去の目盛差を Table 6 に示す。この温度差は、温度計に依存するものであり、ここで示した値は平均的な値である。温度計の個体差などにより、実際の温度差はこの表に示した値とは異なる。

Table 5 Interpolation functions and calibration points for platinum resistance thermometers in the various ranges in which they define T_{90} .

Temperature range	Interpolation equation	Calibration points ^{*)}
13,8033 K ~ 273,16 K	Eq. (11), $n=2$	2~8
24,5561 K ~ 273,16 K	Eq. (11), $n=0, c_4=c_5=0$	2, 5~8
54,3584 K ~ 273,16 K	Eq. (11), $n=1,$ $c_2=c_3=c_4=c_5=0$	6~8
83,8058 K ~ 273,16 K	Eq. (13)	7, 8
234,3156 K ~ 29,7646 °C	Eq. (12), $c=d=0$	8, 10
0 °C ~ 29,7646 °C	Eq. (12), $b=c=d=0$	10
0 °C ~ 156,5985 °C	Eq. (12), $b=c=d=0$	11
0 °C ~ 231,928 °C	Eq. (12), $c=d=0$	11, 12
0 °C ~ 419,527 °C	Eq. (12), $c=d=0$	12, 13
0 °C ~ 660,323 °C	Eq. (12), $d=0$	12~14
660,323 °C ~ 961,78 °C	Eq. (12)	15#)

*) see Table 1

#) Coefficients a, b, and c are determined used with $d=0$ from the measurements of calibration points 12-14, and d is determined from calibration point 15.

Table 6 3) Differences between ITS-90 and EPT-76, and between ITS-90 and IPTS-68 for specified values of T_{90} and t_{90} .

T_{90}/K	$(T_{90} - T_{76})/mK$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10						-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}/K	$(T_{90} - T_{68})/K$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10						-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		
$t_{90}/^{\circ}C$	$(t_{90} - t_{68})/^{\circ}C$									
	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
$t_{90}/^{\circ}C$	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	-0.128	-0.130	-0.132	-0.134	-0.136	-0.138
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
$t_{90}/^{\circ}C$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000	-0.26	-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