

最近の低温度目盛とその実現法

稲 葉 章*

A New Temperature Scale and Its Realization Below 30 K

Akira Inaba

The definition and realization of a new temperature scale, The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76), are reviewed. The scale is intended to correct deviations of the IPTS-68 from the thermodynamic scale below 30 K and to set an international temperature scale down to 0.5 K. The realization of superconductive transition points as reference temperatures, the interpolation by gas thermometer and magnetic one, and the calibration of a germanium thermometer and a Rh-0.5% Fe alloy thermometer are illustrated.

1. はじめに

熱物性の精確な測定を行う場合には、使用する温度目盛が十分な精度で確保されている必要がある。熱力学温度(T)が望みの精度で手軽に得られるならば、温度目盛についてこれほどまでに悩まされずに済んだに違いない^{*1}。しかし残念ながら温度の標準は、現在最も絶対精度の低い標準のひとつで、その精度向上は遅々としている。とくに温度の定義点である水の三重点温度(273.16 K)から遠く離れた低温域、高温域では深刻である。だからこそ国際実用温度目盛(IPTS)が存在するのであるが、これがまた一面で温度目盛を複雑にしている感すらある。IPTSの精神は、十分な詳しさをもちしかも熱力学温度を再現することによって、温度に関係するデータに共有性を保証することにあるが、その最も確からしいとされる熱力学温度値が時代とともに書き換えられ、これに伴い IPTS も改訂されてゆくからである。実際、平衡水の三重点温度(13.8 K)以上で現在定められている IPTS-68^{3,4)}は、とくに 30 K 以下で熱力学温度から数 mK ずれていることが明らかになったために、また IPTS をさらに低温域へ拡張する目的で、1987 年には改訂が行われようとしている。

ここでは、その改訂にさきがけ 0.5 K ~ 30 K の低温領域で提案された暫定目盛(EPT-76)⁵⁾について解説を加え、その実現法を我々の結果を交えて述べたい。あえてここで紹介するのは、この目盛が熱容量測定に用いた場合に、熱容量の絶対値に対して 0.1% より大きい系統誤差をもち込まない構造になっていること⁶⁾、また従来 0.2 K ~ 5.2 K 領域にはヘリウム蒸気圧目盛($T_{68}^{7)}$, $T_{62}^{8)}$)という推奨目盛があったが、IPTS-68 との間は空白であったということから、暫定目盛ではあるが積極的に利用したい目盛だからである。EPT-76 は国際度量衡委員会(CIPM)が測温諮問委員会(CCT)の提案を受け採択したもので、新 IPTS が制定されれば両者の差も公表されるはずである。

2. 1976 年 0.5 K ~ 30 K 暫定温度目盛⁵⁾

EPT-76 成立の背景については文献 6) に譲ることにし、ここではポイントだけを簡単に説明し内容に入る。

2.1 EPT-76 のねらい

暫定目盛を作成するに際しては、IPTS-68 の低温側で指摘されていた幾つかの欠陥のうち当面解決可能な点に注目し、次の三つの目標をもって臨まれることとなった。

- (1) 熱力学的にスムーズな目盛であること、
 - (2) IPTS-68 とはネオンの沸点温度(27.1 K)で連続であること、
 - (3) 上の二点を満たす範囲で、30 K 以下で行われた熱力学温度測定の結果をできる限りとり入れること。
- ここで、条件(1)は EPT-76 の温度(T_76)が熱力学温度

* 計量研究所：茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4 〒305
National Research Laboratory of Metrology:
1-4, Umezono 1, Sakura-Mura, Niihari-Gun,
Ibaraki 305 ; 現 阪大・理・化学熱学実験施設

*1 例えば、Morrison らは熱容量の測定から逆に温度目盛のまずさを指摘した¹⁾。我々も、過去に悩まされた経験がある²⁾。

(T)と直線関係に近いことを意味している。熱力学温度測定が不十分な現段階においてあえて $T_{76} = T$ とすれば条件(2)は満たせず、EPT-76とIPTS-68がスムーズに接続されなくなるという事情がある。裏返して言えば、IPTS-68の熱力学温度目盛からのずれは30 K以上の領域にも及んでいるらしいということである。いずれにせよこれらの措置は、温度目盛の一致性をとくに必要とする精密熱容量測定にとっては有利なものとなっている。

2.2 EPT-76の定義

EPT-76は0.5 K～30 Kの間に11個の参照点を用意し、その温度値を与えることで定義されている(表1)。IPTS-68のシステムと異なる最大の点は、与えられた参照点のうち一つ以上の点を選びここで校正された熱学的内挿計器を用いて目盛を実現することで、そのための特定の標準計器は指定されていない。

2.3 EPT-76を実現する方法

次の四つの方法が実現法として認められている。

- (a) 気体温度計や磁性温度計などの熱力学温度計を内挿用計器とし、表1に示す一つ以上の参照点で校正して用いる方法、
- (b) 13.8 K以上の領域で、 T_{68} に対し表2に示す補正を施す方法、

Table 2. Differences between the EPT-76 (T_{76}) and the IPTS-68 (T_{68})⁵⁾

T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)
13.81	5.6	19.0	7.4	24.5	2.1
14.0	4.6	19.5	7.3	25.0	1.6
14.5	3.0	20.0	6.9	25.5	1.1
15.0	2.0	20.5	6.4	26.0	0.7
15.5	2.2	21.0	5.8	26.5	0.3
16.0	2.6	21.5	5.3	27.0	0.0
16.5	3.6	22.0	4.8	27.1	0.0
17.0	4.6	22.5	4.2	28.0	0.0
17.5	5.6	23.0	3.7	29.0	0.0
18.0	6.5	23.5	3.2	30.0	0.0
18.5	7.2	24.0	2.7		

- (c) 5 K以下の領域で、ヘリウム蒸気圧目盛に対し表3に示す補正を施す方法、

- (d)すでに供給体制にある各国の主に国立研究所所有の目盛に対し補正を施す方法。

以上のいずれの方法で目盛を作成しても良いとされており、内挿用計器の違いや参照点の選択による差から生じる目盛の不一致の程度については言及していない。

2.4 他の温度目盛との比較

EPT-76が採用されるまでには、従来の目盛や各国で独自に確立された目盛が、安定度の優れた白金やゲル

Table 1 Reference points of the 1976 provisional 0.5 K to 30 K temperature scale (EPT-76)⁵⁾

Reference point	Assigned temperature T_{76} (K)
Superconducting transition point of cadmium	0.519
Superconducting transition point of zinc	0.851
Superconducting transition point of aluminium	1.1796
Superconducting transition point of indium	3.4145
Boiling point of $^4\text{He}^a$	4.2221
Superconducting transition point of lead	7.1999
Triple point of equilibrium hydrogen ^b	13.8044
Boiling point of equilibrium hydrogen at a pressure of 33 330.6 pascal (25/76 standard atmosphere) ^b	17.0373
Boiling point of equilibrium hydrogen ^{a,b}	20.2734
Triple point of neon ^c	24.5591
Boiling point of neon ^{a,b,c}	27.102

Superconducting transition point: the transition temperature between the superconducting and the normal state in zero magnetic field as given by NBS-SRM 767.

^a Boiling point under a pressure $p_0 = 101325$ Pa (1 standard atmosphere).

^b These are the four lower defining points of the IPTS-68. (Note: the values of temperature assigned to these points in EPT-76 are not the same as those assigned in IPTS-68.)

The term equilibrium hydrogen means here that the hydrogen should have its equilibrium ortho-para composition at the relevant temperature.

^c The two neon points are for neon with the natural isotopic composition of 2.7 mmol of ^{21}Ne and 92 mmol of ^{22}Ne per 0.905 mol of ^{20}Ne .

Table 3. Differences between the EPT-76 (T_{76}) and the helium vapour pressure scales (the 1958 ^4He scale (T_{58}) and the 1962 ^3He scale (T_{62}))⁵⁾

T_{vp} (K)	$T_{vp}-T_{76}$ (mK)	T_{vp} (K)	$T_{vp}-T_{76}$ (mK)	T_{58} (K)	$T_{58}-T_{76}$ (mK)
0.5	-1.9	1.8	-3.9	3.2	-6.6
0.6	-2.1	2.0	-4.1	3.4	-6.8
0.8	-2.5	2.2	-4.4	3.6	-7.0
1.0	-2.9	2.4	-4.9	3.8	-7.0
1.2	-3.2	2.6	-5.4	4.0	-7.1
1.4	-3.5	2.8	-5.9	4.2	-7.1
1.6	-3.7	3.0	-6.3	4.5	-7.1
		3.2	-6.6	5.0	-7.1

T_{vp} means an average of T_{62} and T_{58} up to 3.2 K

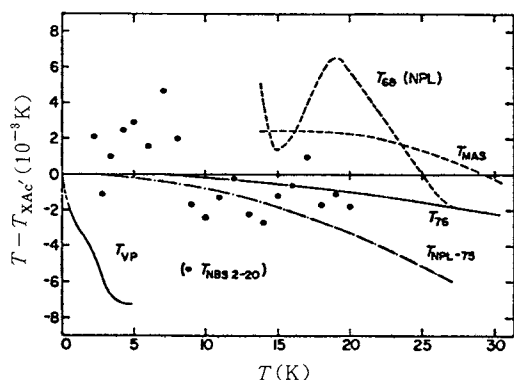


Fig. 1. A comparison of low temperature scales and the definition of the EPT-76 in terms of T_{XAc} .⁶⁾

マニウム、あるいはロジウム-鉄合金などの抵抗温度計を介して相互比較されてきた^{9, 10)}。その結果は、磁性温度目盛のひとつで現在のところ最も熱力学温度に近いとされている T_{XAc} との差として表わされている (図1)⁶⁾。採用された T_{76} と T_{68} および T_{vp} との差は、表2および表3のとおりである。また NPL (英) の気体温度目盛 (T_{NPL-75})¹¹⁾ は T_{76} とは直線関係にあるが、NBS (米) の音速温度目盛 ($T_{NBS\ 2-20}$)¹²⁾ と NML (豪) の磁性温度目盛 (T_{MAS})¹³⁾ ともわずかに異なっており、熱力学温度計の絶対精度の低さが浮きぼりにされている。現在のところ、 T_{76} は 10 K 以下では熱力学温度と 1 mK 以内で一致しているとされており⁶⁾、27.1 K では T_{68} と 0.5 mK のスムーズさで接続していることが確認されている¹⁴⁾。

3. 熱力学的内挿による目盛の作成

EPT-76 は草案の段階ではロジウム-鉄合金温度計が標準計器として候補にあげられたが、1 mK 以上の精度で目盛を作成するには参照点の数が少なすぎるという

理由で見送られた。そこで熱力学的な内挿計器を用いることにし、気体温度計と磁性温度計とが推奨されている。

3.1 気体温度計

低温における気体温度計では、誤差要因として (1) 理想気体からのずれ、(2) 容器内壁への気体の吸着、(3) 死容積、(4) 圧力や温度の変化に伴う容器の容積変化、(5) 熱分子圧効果などがある。Berry はこれらの誤差要因に対して慎重な考察を行い、20 K での一点校正によって 2.6 K ~ 27.1 K の範囲で目盛を作成した¹¹⁾。しかし気体温度計を内挿用計器として用いる場合には、補正の見積り誤差が目盛に与える影響は緩和される。Barber は 4.2 K と 20 K の 2 点で校正を行い、この間を気体温度計で内挿する方法を示した¹⁶⁾。我々は最近、In 点 (3.4 K) と Pb 点 (7.2 K)、e- H_2 三重点 (13.8 K) の三点校正で気体温度目盛を作成することによって、Ta (4.5 K) と Nb (9.3 K) の超伝導転移温度を決定した¹⁶⁾。その実験条件は、容器 (銅製) の容積 345 cm³、死容積 7.1 cm³、ヘリウムガス量は 20 K で約 200 Torr であった。Berry によれば、ビリアル補正を小さくして目盛の精度を上げるには、この程度の低圧条件で行う必要がある¹¹⁾。その場合に、目盛の実現精度は圧力計の精度で限られることになり、我々が行った石英ブルドン管式圧力計を用いた簡便法では精度 ± 2 mK と見積られた。

3.2 磁性温度計

もともと 4 K 以下で古くから用いられてきた熱力学温度計であるが、常磁性塩の選択により 83 K まで高温側で使用され¹³⁾、EPT-76 が設定されるまでに重要な役割を果たした。一般には、塩の磁化率をコイルの相互インダクタンスの読み X で測定する方法が用いられており、 $X = A + B/(T_{76} + \Delta + (r/T_{76})) = A + B/T_{76} + C/T_{76}^2 + D/T_{76}^3$ を用いて 4 点で校正する⁶⁾。ここで A , B は塩とコイル、インダクタンスブリッジに依存するパラメータ、 Δ , r はキュリー則からのずれを示すパラメータで塩の形や結晶の状態 (単結晶か多結晶か)、単結晶の場合には結晶軸の方向に依存する。常磁性塩としては、 $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (CMN)^{17, 18)}、 $\text{Mn}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MAS)^{13, 17, 19, 20)}、 $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (GS)^{13, 19)}、 $\text{Cr}(\text{NH}_3\text{CH}_3)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (CMA)¹⁷⁾、 $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ (GMO)²⁰⁾ などが用いられ、最近では高温用として $\text{Gd}(\text{PO}_3)_3$ も注目されている²¹⁾。このうち CMN は 0.5 K ~ 3.2 K で用いる場合には $\Delta \sim r \sim 0$ であるため、二点校正で十分精度よく目盛が作成できるとされている¹⁸⁾。

4. EPT-76 実現の実際

参照点の実現から始め、以上述べた内挿法により目盛を作成するのであるが、実際に使用できる目盛とするに

は抵抗温度計にトレースしておく必要がある。ここでは超伝導転移点の実現法と、抵抗温度計への値づけの実例について述べる。なお、三重点の実現に関しては文献22)を参照されたい。

4.1 超伝導転移点

参照点としての超伝導転移は電気抵抗を直接測定するよりは、一般にはマイスナー効果による磁化率の変化により検出される。これは前者では試料にリード線を取り付ける必要があるが、後者ではコイルを用いて非接触的に検出できるからである。転移点(T_c)は地球磁場程度の外部磁場にも敏感で、しかも化学的不純物の他に同位元素(多くは $T_c \propto M^{-1/2}$)やアニールの影響を受けやすい。そこでEPT-76ではNBSの標準物質(SRM-767)を指定している。

4.1.1 NBS-SRM-767

表1に示した5種類の超伝導金属線(Cd, Zn, Al, In, Pb)が、コイル付きのデバイスとして市販されている²³⁾。全体は径1.5 cm長さ4 cmで銅ブロックにねじ込めるようになっている。コイルは、一次コイルと二次コイルから成り、その相互インダクタンスは約2 mHある。各試料の転移に伴い約10 μ Hずつ変化するが、これを簡単なブリッジで検出する。我々は図2のようにX-Y記録計上で検出している。地球磁場は約50 μ Tあって、例えばInについては T_c を約4 mKだけ下げる。これを1 μ T以下にするため、我々はミュールドを二重にしている。コイルの一次電流が作り出す交流磁場も1 μ T以下にすべきで、このデバイスでは20 μ A以下で用いることになっている。

SRM-767から得られた過去数年間のデータを調査したところ、転移の幅はCd [0.6~6 mK], Zn [3~11 mK], Al [2.5~2.9 mK], In [0.7~1.9 mK], Pb [0.2~1.4 mK]でかなりばらついていたが、転移点(インダクタンス変化の中心)の個体差はCd [0.7 mK], Zn [1.5 mK], Al [0.6 mK], In [0.3 mK], Pb [1.1 mK]程度

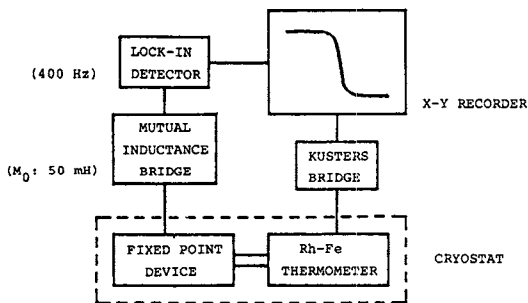


Fig. 2. Block diagram of the transition measurement scheme.¹⁶⁾

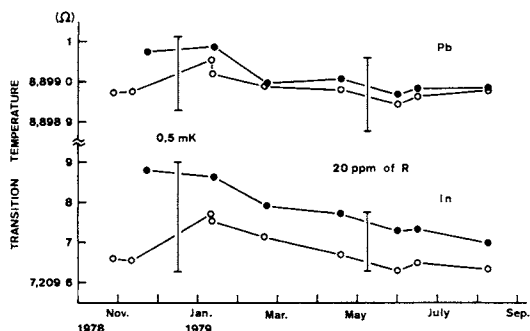


Fig. 3. Apparent run-to-run reproducibility of the T_c in lead and indium samples of two SRM devices.²⁴⁾

であったという⁶⁾。我々の経験では、InやPbのような低融点金属は市販の99.99%以上の金属線を3時間程度アニールすれば、 T_c はSRM-767と1 mK以内で一致するようである²⁴⁾。

温度サイクルによる影響については、PbとInについて約9ヶ月間 T_c を調べたところ図3のような結果が得られた。しかしこれは二次温度計として用いたロジウム-鉄合金温度計のドリフトとして説明することができ、 T_c そのものは0.1 mK程度で安定であることがわかった²⁴⁾。

4.1.2 Ta, Nbの超伝導転移点

Ta点(4.5 K)はヘリウム沸点に代る参照点として、Nb点(9.3 K)は新たな参照点として有用である。とくにNbは第2種超伝導体で、磁場の影響を受けにくいので用途があろう。ただ両者とも3000℃に及ぶ高融点金属で、気体を吸蔵しやすく金属不純物も除きにくい。 T_c は試料精製の条件によって大きく変わる²⁵⁾。一般には高融点金属の T_c は参照点とはなりにくいと考えられているが、多数の試料について T_c を測定し残留抵抗比の逆数 $R(4.2 K)/R(300 K)$ に対してプロットした結果(図4、図5)、両金属中に含まれるガス不純物の効果(図中の直線A、B)と金属不純物の効果(図中の直線C)を分離することができた¹⁶⁾。このように不純物のタイプによって T_c への寄与が異なる現象はめずらしい。また市販の歪をもった試料では、電気抵抗で検出した T_c (図中の黒丸)がインダクタンスで検出した T_c (図中の白丸)よりも常に高く、試料中の不均一さが反映されている。純試料を得るには帯域融解精製した後、 10^{-9} Torr以上の超高真空中でしかも融点直下で処理(ガス出しとアニール)すればよいことがわかった。TaおよびNbの T_c は T_{76} 目盛では、それぞれ4.4924 K, 9.2877 Kと決定された¹⁶⁾。

4.2 抵抗温度計の特性とその校正

EPT-76は0.5 K~30 Kの領域に及んでいるが、高温側ではやはり白金抵抗温度計が安定で、信頼性の点では

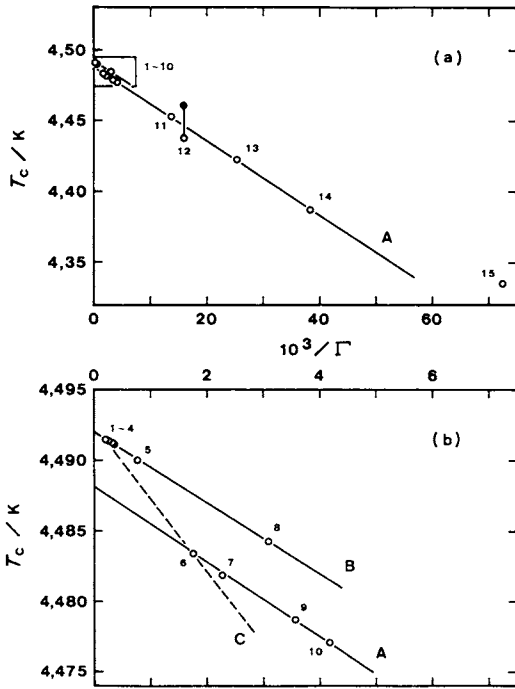


Fig. 4. Plots of T_c vs. inverse residual resistance ratio for tantalum specimens.¹⁶⁾

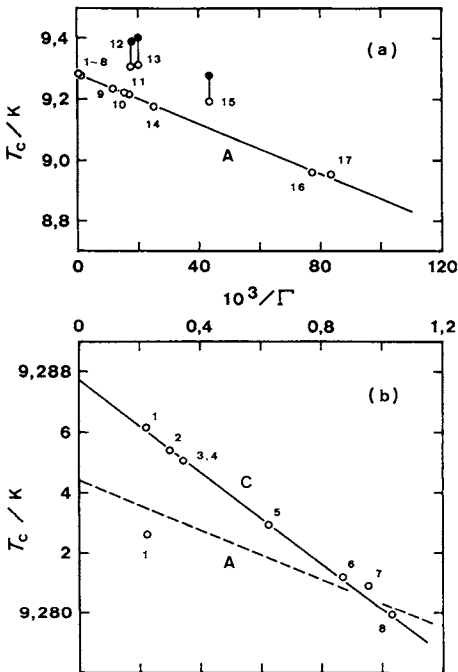


Fig. 5. Plots of T_c vs. inverse residual resistance ratio for niobium specimens.¹⁶⁾

群をぬいている。IPTS-68を満たす白金温度計は、抵抗比 $W(T) = R(T)/R(0^\circ\text{C})$ で表わせば $W(100^\circ\text{C}) \geq 1.39250$ のものであるが、4.2 Kでは $W(4.2\text{ K}) \leq 7 \times 10^{-4}$ と小さくなる。しかし 13.8 K以下でも、簡単な多項式で表わすことで 4.2 Kで 2 mK, 8 Kで 0.5 mKの精度をもつ目盛ができるという報告もある²⁶⁾。とはいえ全領域では無理で、今のところゲルマニウム温度計かロジウム-鉄(0.5%)温度計ということになる。

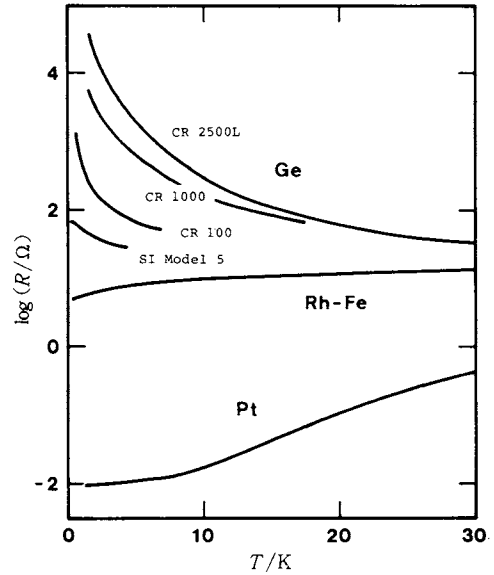


Fig. 6. Characteristics of the resistance in platinum, germanium, and Rh-Fe alloy thermometers.

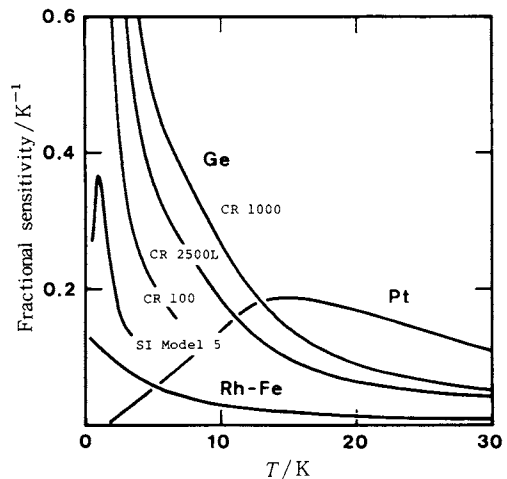


Fig. 7. Characteristics of the fractional sensitivity in platinum, germanium, and Rh-Fe alloy thermometers.

例として、我々が使用している温度計の抵抗特性を図6に示す。また感度特性を図7で比較した。温度計の感度を議論する場合には dR/dT よりも、 dR/RdT で比較する方が实际的である。ただ自己加熱を小さくするために、測定電流は十分小さくする必要がある。そこで、この量にさらに測定電流を掛けた量が使用時の温度計の感度をよく反映する。我々は、ゲルマニウム温度計については出力電圧が1 mVになるように、またロジウム-鉄温度計では0.5 mAの測定電流を使用しているが、上の意味では後者の方が有利であることがわかる。

4.2.1 ゲルマニウム温度計

市販の30個のゲルマニウム温度計に100回の温度サイクルを加えた場合の安定性が調査されたが²⁷⁾、抵抗値に飛びが見られる素子が意外に多く、4.2 Kで1 mK以下であっても20 Kでは2 mK以上に及ぶこともあったという。また10 k Ω 以上の高抵抗では、回路の絶縁抵抗が誤差として問題になり、測定器によっては入力インピーダンスの問題も加わってくるために使用は避けたい。従って、0.5 K~30 Kの領域をカバーするには安定性のよい素子を2個以上選び、校正する必要がある。

代表的なゲルマニウム温度計(CR 1000)の校正例を図8に示す。1.6 K~27 Kの領域で多項式 $\log T = \sum_{i=0}^{15} a_i (\log R)^i$ に最小自乗法を用いてフィットさせたものである。一般に、校正点は $\log T$ にして等間隔に多項式の次数の4倍あれば十分であるといわれている。

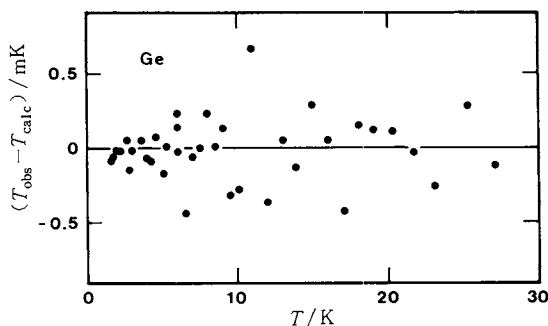


Fig. 8. Calibration of a germanium thermometer. The deviations from the scale obtained by the method of least-squares are shown.

同じ半導体を用いたものにカーボン温度計があるが、現在のところ0.1%より良い安定性は期待できない。抵抗特性はゲルマニウム温度計に比べ簡単な関数で表わされるとされ、歪みのないカーボンガラス温度計の開発が期待されている²⁸⁾。

4.2.2 ロジウム-鉄合金温度計

温度計としての可能性が指摘されてから²⁹⁾、種々の濃

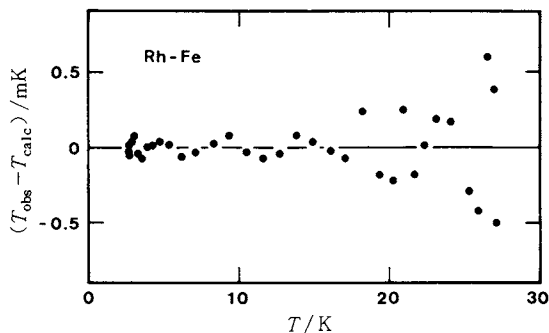


Fig. 9. Calibration of a Rh-Fe alloy thermometer. The deviations from the scale obtained by the method of least-squares are shown.

度の合金が試されたが、最終的にはRh-0.5% Feとされた³⁰⁾。この種の温度計では抵抗値の飛びは報告されていないが、-5 ppm/year 程度のドリフトがみられる³¹⁾。図3で示した我々の結果も、これが原因と思われる。

温度計1個で0.5 K~300 Kでの測定が可能であるが、0.5 K~4 Kでは4次式、0.5 K~20 Kで8次式、0.5 K~24 Kで9次式、0.5 K~27 Kの場合には11次式を用いることによって、いずれも0.2 mK以内でフィットできるとされている³²⁾。図9は、26 K~27 Kの領域で多項式

$T = \sum_{i=0}^{10} a_i x^i$ にフィットした結果である。ここでは、あらかじめ校正した領域($R_l \leq R \leq R_u$)で $x = (2R - R_u - R_l) / (R_u - R_l)$ に変数変換しておき($-1 \leq x \leq +1$)、Chebyshev 多項式を用いている³²⁾。

合金温度計は熱接触さえうまくすれば、10 mKの低温まで感度があるため使用可能だと言われ、SQUIDを零点検出器として用いたブリッジを使えば自己加熱の問題が解決できるとされている³³⁾。

5. 0.5 K 以下での実用温度目盛

0.5 K 以上については暫定目盛ができ、IPTSへの見通しがついた。いま、0.5 K 以下でIPTSが必要かという議論がある²⁸⁾。NBSはすでにこの領域で、SRM-768として5個の超伝導転移点、W(16 mK)、Be(22 mK)、Ir(99 mK)、AuAl₂(161 mK)、AuIn₂(206 mK)を用意している³⁴⁾。しかし、核整列ガンマ線温度計³⁵⁾や磁性温度計などの熱力学温度計がここでは直接用いられてきた。もしIPTSが必要という結論がでたとしても、これまでの白金温度計のように定点で内挿する必要があるのか、それとも1064℃以上の放射温度計のように定点を1個与え物理法則(例えばキュリー則)で外挿法を示すにとどめるのか、議論が分かれているところである。

6. おわりに

精密に熱物性を測定している者には温度目盛の重要さがわかるが、温度標準に従事している者は理解していないという苦言をしばしば耳にする。しかし、今回の暫定目盛の内容からわかるように、温度目盛の最大のニーズが熱測定にあることは十分に意識している。この目盛を使用した結果、新たな要請が出てくれば、それは温度標準の精度向上につながることになるだろう。

最後に、本稿執筆中にMcMaster 大学のMorrison 教授に接する機会を得、幾つかの助言を頂いたのでこの紙面をお借りして感謝の意を表したい。

文 献

- 1) W. T. Berg and J. A. Morrison, *Proc. Roy. Soc. A* **242**, 467 (1957)
- 2) 千原秀昭, 稲葉 章, 低温工学 **10**, 84 (1975)
- 3) The International Practical Temperature Scale of 1968, *Metrologia* **5**, 35 (1969)
- 4) The International Practical Temperature Scale of 1968. Amended Edition 1975, *Metrologia* **12**, 7 (1976)
- 5) The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale, *Metrologia* **15**, 65 (1979)
- 6) M. Durieux, D. N. Astrov, W. R. G. Kemp, and C. A. Swenson, *Metrologia* **15**, 57 (1979)
- 7) F. G. Brickwedde, H. Van Dijk, M. Durieux, J. R. Clement, and J. K. Logan, *J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.)* **64A**, 1 (1960)
- 8) R. H. Sherman, S. G. Sydoriak, and T. R. Roberts, *J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.)* **68A**, 579 (1964)
- 9) L. M. Besley and W. R. G. Kemp, *Metrologia* **13**, 35 (1977)
- 10) S. D. Ward and J. P. Compton, *Metrologia* **15**, 31 (1979)
- 11) K. H. Berry, *Metrologia* **15**, 89 (1979)
- 12) H. H. Plumb and G. Cataland, *Metrologia* **2**, 127 (1966)
- 13) T. C. Cetas, *Metrologia* **12**, 27 (1976)
- 14) M. S. Anderson and C. A. Swenson, *Rev. Sci. Instrum.* **49**, 1027 (1978)
- 15) C. R. Barber, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry* (Instrument Society of America, New York, 1972) Vol. **4**, p. 99
- 16) A. Inaba, to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.* (1980)
- 17) T. C. Cetas and C. A. Swenson, *Metrologia* **8**, 46 (1972)
- 18) R. L. Rusby and C. A. Swenson, to be published in *Metrologia*
- 19) C. Van Rijn and M. Durieux, *Temperature*, **4**, 73 (1972)
- 20) V. T. Shkraba, V. A. Pavlov, G. A. Kytin, T. S. Pan'kiv, and D. N. Astrov, *Izm. Tekhn* **17**, 32 (1974)
- 21) B. W. Mangum and W. J. Bowers, Jr., *Proc. 15th Int. Conf. Low Temp. Phys., J. Phys.* **39**, 1175 (1978)
- 22) 稲葉 章, 熱測定 **7**, 4 (1980)
- 23) J. F. Schooley, R. J. Soulen, Jr. and G. A. Evans, Jr., *NBS Special Publication* 260-44 (1972)
- 24) A. Inaba and K. Mitsui, to be published in *Metrologia*
- 25) 竹内 伸, 稲葉 章, 固体物理 **15**, 113 (1980)
- 26) J. L. Tiggelman and M. Durieux, *Temperature* **4**, 489 (1972)
- 27) L. M. Besley and H. Plumb, *Rev. Sci. Instrum.* **49**, 68 (1978)
- 28) Comité Consultatif de Thermométrie, Working Group V, 3rd Report (1980)
- 29) B. R. Coles, *Phys. Lett.* **8**, 243 (1964)
- 30) R. L. Rusby, *J. Phys. F: Metal Phys.* **4**, 1265 (1974)
- 31) R. L. Rusby, *Inst. Phys. Conf. Ser.* No 26, *Temperature Measurement 1975* (The institute of Physics, London, 1975) p. 125.
- 32) R. L. Rusby, unpublished
- 33) R. J. Soulen, Jr., private communication.
- 34) R. J. Soulen, Jr. and R. B. Dove, *NBS Special Publication* 260-62 (1979)
- 35) P. M. Berglund, H. K. Collan, G. J. Ehnholm, R. G. Gylling and O. V. Lounasmaa, *J. Low Temp. Phys.* **6**, 357 (1972)