

**標準研究連絡委員会報告**

—— 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 ——

**平成元年7月25日**

**日本学術会議**

**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)
	信實豊一郎 (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)

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

1. まえがき

第77回国際度量衡委員会（1988年10月4～6日開催）は電圧標準および抵抗標準の維持方式の変更に関する勧告と，温度スケールの変更に関する勧告を採択した。これら3つの勧告は1990年1月1日を期して国際的に有効となる。我が国がこれに従うことは言うまでもない。

これらの勧告と解説および実施のための注意は，国際度量衡局長 T. J. Quinn名で“News from BIPM”としてMetrologia, Vol. 26, No. 1(1989) pp. 69-74に発表された。これらの勧告が実施されると，例えば電圧標準は約8ppm大きくなる（この標準を用いて電圧測定すると測定値は約8ppm小さくなる）など実際面で少からぬ影響がある。その他の事情をも考慮して同局長は実施に先立って，関係各国内で今回の変更の周知方を国際度量衡委員（飯塚幸三前工業技術院長）を通じて要望してきた。

これを受けて，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検討した。本文は学術諸団体を通じて日本国内での周知を目的として作成したものである。内容は勧告の要点とその解説，今回の標準の変更とSI単位の関係および変更の及ぼす影響などをできるだけ簡潔に述べた。さらに詳細に関心のある方は上記Metrologia誌を一読されたい。

## 2. 電圧標準および抵抗標準の維持方式の変更について

まず初めに、電圧標準および抵抗標準の変更に関する勧告1および2の主旨を示す。

### ① 勧告1の主旨

交流ジョセフソン効果の比例係数を表すジョセフソン定数(Josephson constant)  $K_J$  に対する協定値(conventional value)を  $K_{J-90}$  と表し、 $K_{J-90} = 483\,597.9\text{GHz/V}$  と定義することおよびジョセフソン効果を用いて電圧の校正を行う各国の標準研究所が、1990年1月1日以降上記の値を一斉に使い始めるよう勧告する。

### ② 勧告2の主旨

量子化ホール抵抗を表すフォン・クリツィング定数(von Klitzing constant)  $R_K$  に対する協定値(conventional value)を  $R_{K-90}$  と表し、 $R_{K-90} = 25\,812.807\ \Omega$  と定義することおよび量子ホール効果を用いて抵抗の校正を行う各国の標準研究所が、1990年1月1日以降上記の値を一斉に使い始めるよう勧告する。

以下に、上記の主旨の勧告の意味合いと波及効果について述べる。

電気および磁気に限定了測定のための実用上の基本的な標準は、電圧標準と抵抗標準である。1970年代中期より、各国の標準研究所が電圧標準をジョセフソン効果を用いて維持、供給していることは周知のことである。今回の勧告を実施しても、このことに変更はない。一方、抵抗

---

\*寸法測定から実験的な電気容量が高精度で決まるよう機械的に組立てられた特殊なコンデンサ。

標準については、これまで、国家の責任において管理された一群の標準抵抗器あるいはクロスキャパシタ\*を用いて、維持、供給が行われてきた。勧告2は、1990年1月1日を期して従来の抵抗標準維持方式を改め、量子ホール効果を用いた抵抗標準を新たに採用することを意味している。

ジョセフソン素子に周波数  $f$  の電磁波を照射すると、 $V = (h/2e) n f$  で表される量子化電圧  $V$  を取り出すことができる。一方、二次元電気伝導を示す半導体素子を高磁場 ( $\geq 10$  T) および極低温 ( $\leq 1$  K) の環境下に置くと、 $R_H = h/ie^2$  で表される量子化ホール抵抗  $R_H$  を取り出すことができる。ここで、 $h$  はプランク定数、 $e$  は素電荷、 $n$  と  $i$  は共に整数を表す。ジョセフソン効果および量子ホール効果は、それぞれ8桁あるいは7桁以上の桁まで普遍的な現象であると確信されるに至っている。したがって、定数  $2e/h$  および  $h/e^2$  を決定すれば、両効果を用いて普遍性を備えた電圧標準と抵抗標準を実現することができる。勧告に示される  $K_J$  および  $R_K$  は、それぞれ一般的には  $2e/h$  および  $h/e^2$  を意味するが、敢えて  $K_J$  および  $R_K$  というように異なった表現をした意味とそれらの値の決定の背景は次のとおりである。

S I (国際単位系) では、電磁気量の単位は S I の基本単位である  $m$ ,  $kg$ ,  $s$ ,  $A$  ( $A$  の定義は真空の透磁率  $\mu_0$  を  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  と定義するのと等価である。) からの誘導単位である。したがって、現行の S I の枠組では、 $2e/h$  および  $h/e^2$  は種々の基礎物理定数の測定結果を物理法則および統計学に基づいて評価を行った上で決定されるべき測定量である。

今回の勧告に至る過程では、1988年6月までに公表された多数の基礎物理定数の最新の測定結果が考慮された。その際、次の2点を考慮して、

$2e/h$ および $h/e^2$ に相当する量をそれぞれ $K_J$ および $R_K$ と表した。すなわち、

a) 現実の実験条件下において量子化ホール抵抗 $R_H$ を $R_H=h/ie^2$ と表す厳密な理論的根拠は存在せず、その関係はあくまで仮定である。ジョセフソン効果についても、厳密には同様の事情にある。

b) 今回の勧告の最大の目的は、一般的な基礎物理定数としての $2e/h$ 、 $h/e^2$ の値を示すのでなく、あくまで実用的な観点から、ジョセフソン効果電圧標準および量子ホール効果抵抗標準を全世界的に統一して用いるための根拠を与える定数の値を示すのが目的である。

最終的に決定された $K_J$ の値は $K_J=483\,597.9(1\pm 4\times 10^{-7})\text{GHz/V}$ 、 $R_K$ の値は $R_K=25\,812.807(1\pm 2\times 10^{-7})\Omega$ である。ここで $\pm 4\times 10^{-7}$ および $\pm 2\times 10^{-7}$ は、それぞれSIに基づいて決定された $K_J$ および $R_K$ の値が持つ標準偏差(所謂 $1\sigma$ )に相当する不確かさである。つまり、それらの不確かさは、決定された $K_J$ や $R_K$ がSIに基づく真値に対して、それらの不確かさの範囲内で、ある一定の未知量だけずれているかも知れないことを意味している。勧告1、2に示される $K_{J-90}$ 、 $R_{K-90}$ は、 $K_J$ および $R_K$ の持つ不確かさを削除して、主値だけを定義した定数である。添え字90は1990年1月1日を期して $K_{J-90}$ 、 $R_{K-90}$ が定義されることを意味している。

一般的な電磁気量の測定において、SI全体の体系を考慮する必要のない、すなわち、長さ、質量、時間(あるいは、周波数)の標準まで遡って、それらの標準を求めないものが殆どである。このような実用的な電磁気量の測定において、ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準が基本的な標準となる。そこで使われる定数が $K_{J-90}$ であり $R_{K-90}$ である。 $K_{J-90}$ 、 $R_{K-90}$ を使う限りにおいては、ジョセフソン効

果電圧標準や量子ホール効果抵抗標準の持つ再現性や普遍性の良さを十分に利用することができる。すなわち、電圧や抵抗の校正において、長さ、質量、時間の標準ではなく、ジョセフソン効果電圧標準や量子ホール効果抵抗標準から出発すれば、 $10^{-7}$ – $10^{-8}$ 台、あるいは、それより小さな不確かさで、2次標準器の校正を行うことが技術的に可能である。しかも、その校正值は、校正の不確かさの範囲内で、世界的に統一がとれていることになる。もし、その校正值にSI全体の体系を考慮する必要があるれば、校正值の不確かさに上述の $K_J$ や $R_K$ の値の持つ不確かさを機械的に加えればよい。このように、上記の勧告を受け入れることにより、場所や時刻には依存しない世界的に統一のとれた電圧や抵抗の“量子標準”が実現することになる。

上記の勧告の実施に当たっての実際上の影響は、1990年1月1日以前と以降では同一の2次標準器の校正值に差が生じることである。特に電圧標準については、これまで $K_{J-90}$ に相当する量に対して、我が国は483 594.0 GHz/Vという1972年の勧告値を使ってきたので、1990年以降に校正される2次電圧標準器の値は、それ以前と比べて約 $8 \times 10^{-8}$ だけ小さくなる。抵抗標準については、今後の実験に待たねばならないが、我が国の場合には、大きくとも $\pm 5 \times 10^{-7}$ を越えることはないものと予想される。

### 3. 温度標準の変更について

温度標準の変更に関する勧告3の主旨は次のとおりである。

#### ③ 勧告3の主旨

ITS-90(International Temperature Scale of 1990:1990年国際温度目盛)と IPTS-68(International Practical Temperature Scale of 1968:1968年国際実用温度目盛)との間に図 1 に示す差があることを留意しつつ、温度標準を維持、供給する各国の標準研究所が、1990年1月1日以降一斉に ITS-90を採用することを勧告する。

以下に、上記の主旨の勧告の意味合いと波及効果について述べる。

現在、温度標準は S I で定められた熱力学温度を数値表現し、熱力学温度測定 of 再現性のより良い協定温度値を得る手段として IPTS-68 を用いて実現されている。IPTS-68 は、これまでの研究から次のような欠点を持つことが明らかになってきた。すなわち、

- a) 熱力学温度を表していない温度領域がある。例えば、蒸気圧 101325 Pa の下での水の沸点は、IPTS-68 では 100℃ であるが、熱力学温度では約 99.975℃ である。
- b) 温度定点間を補間する補間計器の再現性の悪い温度領域がある。すなわち、630-1064℃ の領域で要求されている温度測定の不確かさは 0.01 K であるのに対して、IPTS-68 で指定されている補間計器の白金-ロジウム / 白金熱電対で実現できる温度測定の不確かさは約 0.2 K である。
- c) 補間計器の個体差が大きい。IPTS-68 で指定された他の温度領域での補間計器においても、低温域で約 3 mK、室温から 200℃ で約 0.5 mK、420℃ 以下で約 1 mK の個体差があり、温度測定に要求される不確かさを必ずしも満足していない。
- d) 水素の三重点温度 13.81 K 以下の温度領域は IPTS-68 では定義されていない。



これらの欠点を改善して，上記の勧告により新たにITS-90が設定されることになる。IPTS-68と同様にITS-90も定義温度定点，補間計器および補間式で定義されることに変化はない。ITS-90では，新たに0.65 K以上の温度が設定され，温度標準の精度も向上する。ITS-90の細部は測温諮問委員会で検討中である。

なお，本文作成にあたっては，標準研究連絡委員会基礎定数小委員会の原 宏（千葉工業大学），遠藤 忠（電子技術総合研究所），櫻井弘久（計量研究所）の各位の御協力を得たものである。

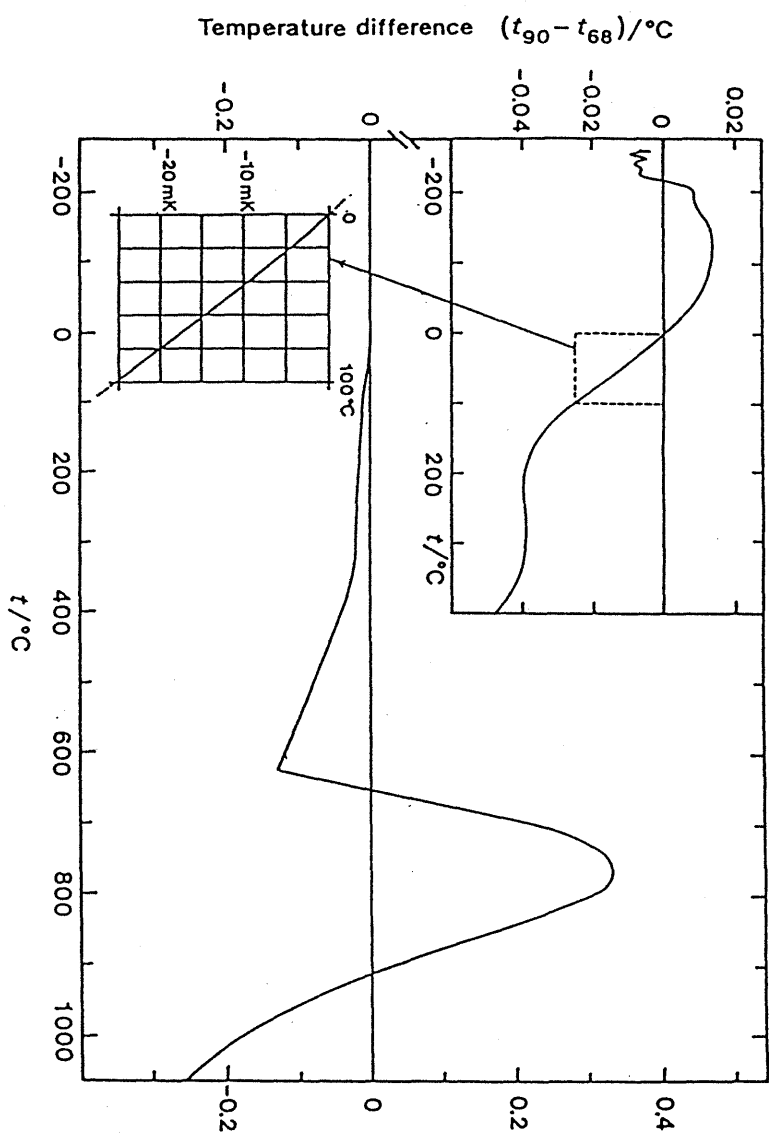


図 1. ITS-90 と IPTS-68 の差