

寸法測定の標準温度

2022年7月1日

高増計測工学研究所

東京大学 名誉教授 高増潔

<https://www.takamasu-lab.org/>



利用上の注意

- このファイルの内容，表現，図（高増潔が作成したもの：
©takamasu-lab）は自由に使ってください
 - 改変，コピーなどは自由です
 - 特に許可，コピーライトの表示などは不要です
- 引用している図については，引用元の規則に従ってください
 - 講義での資料としては，自由に使えると思います
 - wikipedia関係は，パブリックドメインになっているものは自由に使えます
 - フリー素材は，フリーです
 - それ以外は，引用元の提示が必要になります
- もしも，お気づきの点，間違い，感想などがあれば，以下にメールしてください．対応するかは，状況によります．
 - takamasu@pe.t.u-tokyo.ac.jp



幾何特性仕様を定義する標準温度

- 幾何特性仕様（寸法，形状）を定義する標準温度の必要性
 - 全ての材料は，熱膨張係数（線熱膨張係数）を持つので，寸法や形状を定義するには，標準温度を明確にする必要がある
 - 鋼製の部品の場合，熱膨張係数は 10×10^{-6} 程度なので，1 mの寸法を1 μm 以下の精度で定義するには，0.1 $^{\circ}\text{C}$ 以下の精度で温度を定義する必要があるので，標準温度を決めることが必要である
 - 定義なので， ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ といった範囲を付ける必要はない
- 以上より，幾何特性仕様（寸法や形状）を決める温度（定義する温度）は，厳密に決めればよい
- 現在は，幾何特性仕様を決める温度は20 $^{\circ}\text{C}$ となっている



幾何特性仕様を検証する標準温度

- 幾何特性仕様を検証（寸法測定，形状測定）する場合の標準温度の必要性
 - 寸法測定で鋼製の部品を鋼製のスケールで測定することを考えると，標準温度で測定する必要性は必ずしも高くない→部品もスケールも同じように伸び縮みする
 - 実際の測定では，厳密に標準温度で測定できないので，測定不確かさとして評価することが必要
 - 部品とスケールの熱膨張係数の差がなければ，測定温度は寸法の測定値に影響しない
 - スケールの目盛りは標準温度でつける必要がある
 - 熱膨張係数の差が 1×10^{-6} 程度とすると，1 mの寸法を1 μm 以下の精度で測定するには，標準温度 ± 1 °Cの温度環境で測定する
 - 温度による測定不確かさの影響を評価すると，標準温度で測定することが測定不確かさを減少させることになる



測定温度と測定不確かさ

- 寸法測定を標準温度ですることが必要か
 - もともと厳密に標準温度20 °Cで測定することは不可能
 - 温度の偏差, 温度分布, 温度ドリフトなどが測定不確かさに影響する
 - どちらにしろ, 測定不確かさを評価することが必要
- 測定不確かさの評価
 - 寸法測定の測定不確かさにおける温度の影響は, 「精密測定02b-測定不確かさ2-寸法測定温度」および「測定不確かさ-ブロックゲージ2022Jun」を参照
 - 温度に関係する測定不確かさの以下の要因から計算する
 - 温度測定の不確かさ
 - スケールと測定物の温度の差
 - 標準温度20 °Cからの偏差
 - 熱膨張係数の不確かさ
 - スケールと測定物の熱膨張係数の差
 - 熱膨張係数の不確かさの影響を考えると, 標準温度にできるだけ近い温度で測定することが必要→恒温室 (20 °C) が必要



標準温度の歴史

■ 標準温度の変遷

- 1799年：メートルの定義, 16.25 °C (測量時の気温)
- 1824年：標準ヤード (英国), 16.67 °C (62 °F)
- 1889年：メートル原器, 0 °C (氷水の中で測定)
- 1896年：ブロックゲージ (スウェーデンのヨハンソン), 15 °C ~ 25 °C (中央値は20 °C = 68 °F) (ヨハンソンの工場の温度)
- 1918年：測定工具の標準温度 (ドイツ規格協会DIN), 20 °C
- 1924年：米国標準研究所 (NBS) の恒温室 (20 °C)
- 1931年：国際度量衡委員会 (CIPM), 20 °C
- 1932年：国際標準化協会 (ISA), 20 °C
- 1951年：国際標準化機構 (ISO) の勧告第1号, 20 °C
- 1975年：国際標準化機構 (ISO), ISO 1, 20 °C
- 標準温度20 °Cは, 日本, アジアなどでは低すぎて健康に悪い
 - 健康, 省エネルギーに問題がある, 電気量などは23 °Cが標準
→ 日本からISOで23 °Cへの変更を提案したが否決された

- 沢辺雅二：精密測定の歴史1 長さの単位と情報の変遷, 精密工学基礎講座
- 沢辺雅二：校正に用いる標準温度設定の経緯と問題点, 精密工学会誌 66 (11), 2000, 1701
- NKSホームページ 長さ計の標準温度：20 °Cはどうやって決まったの?, https://www.nks-wa-hakaru.jp/2014/0911_000000/



JIS B0680 (ISO 1)

■ JIS B0680:2007

- 製品の幾何特性仕様（GPS）－製品の幾何特性仕様及び検証に用いる標準温度
 - 製品の幾何特性仕様及び検証に用いる標準温度は、20 °Cとする

■ JIS B0680:2022（改正作業中）

- 製品の幾何特性仕様（GPS）－製品の幾何特性及び寸法特性の仕様に関する標準基準温度
 - 基準温度 (reference temperature)
 - 幾何特性又は寸法特性の定義の一部として指定された、均一な温度をもつ物体の温度
 - 標準基準温度 (standard reference temperature)
 - 国際的に合意された基準温度
 - 幾何特性及び寸法特性の規定のための標準基準温度の値は、 $t_{90} = 20\text{ °C}$ に固定されるものとする。
 - 20 °CがITS-90による20 °Cと明確に記述した→ITS-90には熱力学温度からの偏差があるが、ITS-90で定義することとしている
 - 「検証に用いる」との記述はなくなった



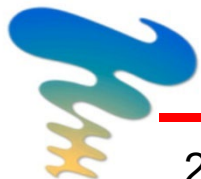
熱力学温度とITS-90の関係

- 工業的に使われる温度計はITS-90に従っている
 - ITS-90（1990年国際温度目盛）
 - 熱力学温度と近似的に合うように作られた実用的な温度目盛（1990年に決定した）
 - 物質の三重点，凝固点など温度定点（定義定点）と，その温度定点の間を補間する白金抵抗温度計や放射温度計など温度計によって定義
 - 常温付近の温度定点
 - アルゴンの三重点（ $-189.3442\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），
水銀の三重点（ $-38.8344\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），水の三重点（ $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），
ガリウムの融点（ $29.7646\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），
インジウムの凝固点（ $156.5985\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
 - ITS-90の偏差
 - ITS-90は近似のため，偏差があることが分かっている
 - 2011年に作られた偏差の補正式が，CODATAに記載されている
 - 20°C での偏差は， 2.8 mK で1 mの鋼（熱膨張係数 11×10^{-6} ）の寸法では約30 nmの偏差が生じる→ブロックゲージなどでは無視できないがITS-90を使うことに決まっている



メモ：ITS-90の偏差（1）

- IT-90は熱力学温度に対する、当時の最良近似であるが、その後の研究で偏差が確認されている
- 2011年の研究のまとめたデータによる偏差が以下の論文に示され、BIPMの推奨値となっている（この値にも不確かさがある）
 - 次ページの表は、以下の論文による
 - Present Estimates of the Differences Between Thermodynamic Temperatures and the ITS-90, J. Fischer et.al, Int J Thermophys 32, 2011, 12-25による
 - 中野享，温度標準の変遷と現状，国計連長さ分科会，2019を参考とした
 - このデータでは、前述したように、20 °Cで2.8 mKの偏差がある
- 今後の動向
 - 2019年に熱力学温度の定義がボルツマン定数に変わったこともあり、制定から30年以上たったITS-90を見直す動きがある（低温，高温ではすでに見直されつつある）
 - しかし、変更の影響が広い範囲であること、作業量（多くの研究が必要）が大変などのため、まだ時間がかかると思われる



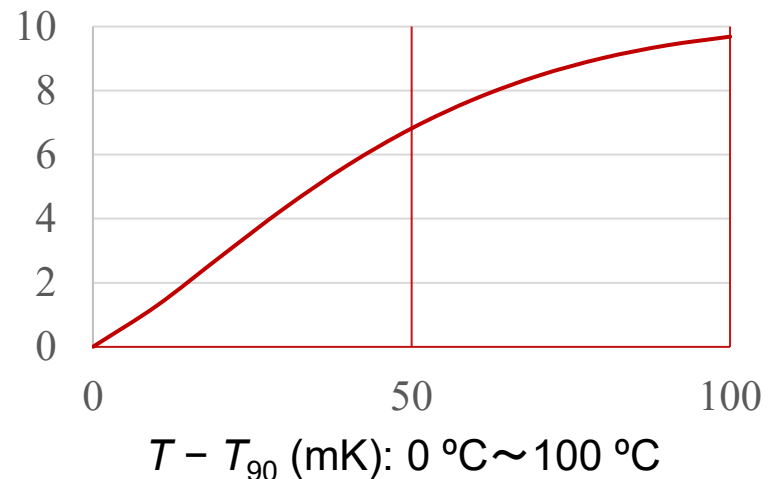
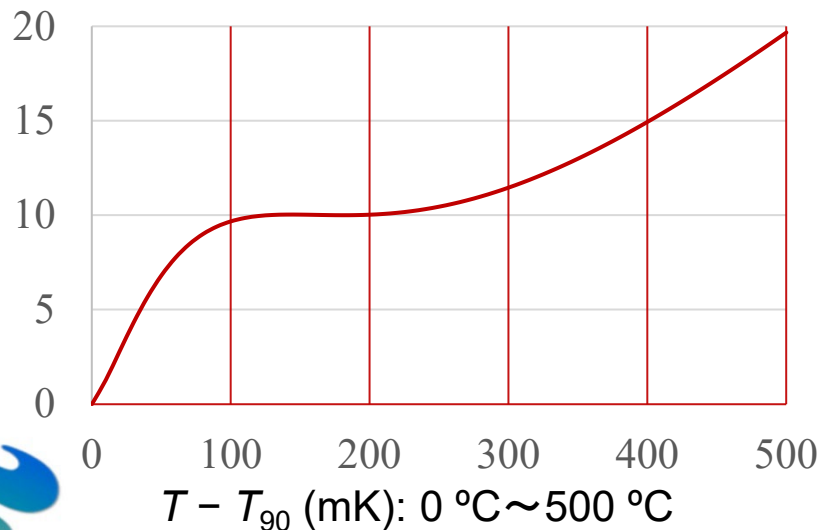
メモ：ITS-90の偏差（2）

- ITS-90の偏差は，多くの研究がされている
 - 2011年にまとめたデータでは， $d_{T_{90}}$ （mKで表した T_{90} の偏差， $T - T_{90}$ ）の0 °Cから1000 °Cは，以下の式で近似できる
 - 20 °Cでは，2.8 mKの偏差がある

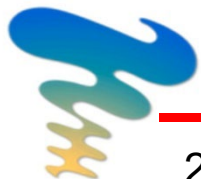
$$U = \frac{273.16}{T_{90}}$$

$$d_{T_{90}} = T - T_{90}$$

$$= T_{90}(0.0497 - 0.3032 U^2 + 1.0254 U^4 - 1.2895 U^6 + 0.5176 U^8)$$



高増潔作成©takamasu-lab



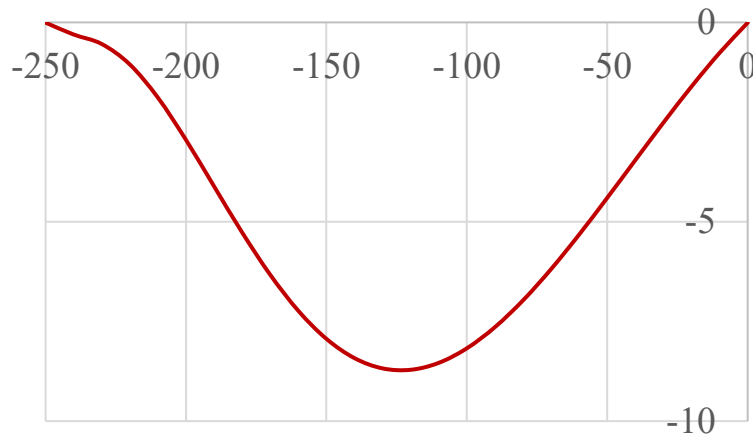
メモ：ITS-90の偏差（3）

■ 0 °C以下は下記の式

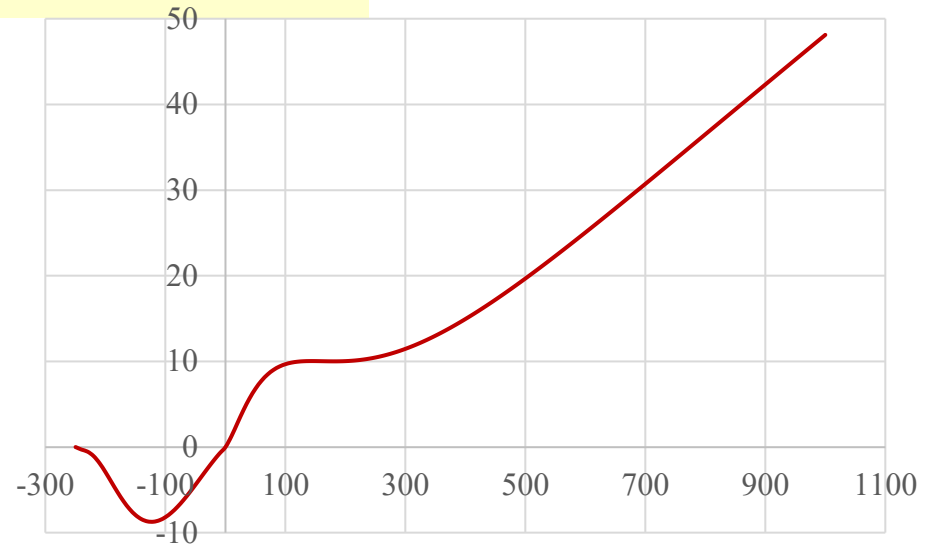
$$V = \log_{10} \left(\frac{T_{90}}{273.16} \right)$$

$$d_{T_{90}} = T - T_{90}$$

$$\begin{aligned} &= 44.2457V - 176.311V^2 - 1539.85V^3 - 3636.85V^4 \\ &\quad - 4198.98V^5 - 2613.19V^6 - 841.922V^7 - 110.322V^8 \end{aligned}$$



$T - T_{90}$ (mK): -250 °C ~ 0 °C



$T - T_{90}$ (mK): -250 °C ~ 1000 °C

高増潔作成©takamasu-lab



メモ：ITS-90の偏差（4）

■ グラフのExcelシート

ITS90の偏差の近似式				
J. Fischer, Int J Thermophys,32, 2011, 12-25による				
水の三重点0.01°Cから銅の融点1085°Cまでの近似				
		c0	c1	c2
		0.0497	-0.3032	1.0254
摂氏 t	絶対温度T	0	1	2
0	273.16	0.0497	-0.3032	1.0254
10	283.16	0.0497	-0.28216	0.888043
20	293.16	0.0497	-0.26324	0.772935
30	303.16	0.0497	-0.24616	0.675887
40	313.16	0.0497	-0.23069	0.593604
50	323.16	0.0497	-0.21663	0.523469
60	333.16	0.0497	-0.20383	0.463394
70	343.16	0.0497	-0.19212	0.411695
80	353.16	0.0497	-0.18139	0.367008
90	363.16	0.0497	-0.17154	0.328224
100	373.16	0.0497	-0.16247	0.29443

ITS90の偏差の近似式				
J. Fischer, Int J Thermophys,32, 2011, 12-25による				
水の三重点0.01°C以下の近似				
		b0	b1	b2
		4.42E+01	#####	#####
摂氏 t	絶対温度T	0	1	2
-270	3.16	#####	#####	1.12E+04
-260	13.16	#####	#####	3.52E+03
-250	23.16	#####	#####	1.90E+03
-240	33.16	#####	#####	1.18E+03
-230	43.16	#####	#####	7.92E+02
-220	53.16	#####	#####	5.53E+02
-210	63.16	#####	#####	3.96E+02
-200	73.16	#####	#####	2.88E+02
-190	83.16	#####	#####	2.12E+02
-180	93.16	#####	#####	1.57E+02
-170	103.16	#####	#####	1.16E+02
-160	113.16	#####	#####	8.63E+01

