JCSS不確かさ見積もりに関するガイド

登録に係る区分：長さ
校正手法の区分の呼称：形状測定器
計量器等の種類：測定顕微鏡
（第１版）

（JCG201S121―01）

制定：2026 年 3 月 6 日

独立行政法人製品評価技術基盤機構
認定センター

発行所　　独立行政法人製品評価技術基盤機構　認定センター

住所　　〒151-0066　東京都渋谷区西原2丁目49－10
TEL　　03－3481－1921（代）
FAX　　03－3481－1937
E-mail　　jcss@nite.go.jp
Home page　　https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/index.html

目 次

事例　各軸の測定精度

（注 1）以下の事例は、不確かさ見積もりの一事例を示したものであり、実際には校正事業者の諸条件を考慮して見積もりを行うこと。また、不確かさ成分ごとに見積もられた数値は、校正事業者自らがその根拠を示せることが必要である。

1. 測定の概要

本事例は、JIS B 7153 で規定する測定顕微鏡の「各軸の測定精度」（以下、測定精度）（注 2）を校正する場合の不確かさを示す。校正対象となる移動軸と平行に標準尺を置き、接眼レンズ視野の十字線を標準尺の基準点および校正点に順次合わせたときのテーブル移動量を測定顕微鏡のリニアスケールで読み取る。その際のリニアスケールの指示値と標準尺目盛間長さの差を測定精度の校正値とする。ただし、1 つの校正点について 3 回繰り返し測定を実施し、その平均値を校正結果とする場合を想定する。また、校正はほぼ 20 ℃に気温が保たれた恒温室で行い、校正時に標準尺およびリニアスケールの温度測定は実施しない場合を想定する。標準尺は JCSS 校正されたものを使用する。

（注 2）本事例は、JIS B 7153 で規定する「各軸の測定精度」の測定方法に準拠しているが、その校正値には、JIS B 7153 で規定する「任意の 2 点間内の開きの最大値」を採用していない。「任意の 2 点間内の開きの最大値」を校正値とする場合は、別途不確かさ見積もりが必要である。

2. 数学モデル

測定精度の校正値d_{20}は下記の式で表せる。

$$d_{20} = l(1+\alpha\theta) - l_{\mathrm{s}}(1+\alpha_{\mathrm{s}}\theta_{\mathrm{s}}) \tag{1-1}$$

ここで、

d_{20}： 20 ℃ における測定精度（校正値）
l： 校正時温度におけるリニアスケールの指示値
α：リニアスケールの熱膨張係数
θ：リニアスケール温度の 20 ℃ からの偏差
l_{s}： 20 ℃ における標準尺の目盛間の長さ
α_{s}： 標準尺の熱膨張係数
θ_{s}： 標準尺温度の 20 ℃ からの偏差

（1-1）式において、$l = l_{\mathrm{s}} + \Delta l$ とおいて、$\Delta l \cdot \alpha \cdot \theta ≒ 0$ とすると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} d_{20} &= l(1+\alpha\theta) - l_{\mathrm{s}}(1+\alpha_{\mathrm{s}}\theta_{\mathrm{s}}) \\ &= l - l_{\mathrm{s}} + l_{\mathrm{s}}\alpha\theta + \Delta l\cdot\alpha\cdot\theta - l_{\mathrm{s}}\alpha_{\mathrm{s}}\theta_{\mathrm{s}} \\ &≒ l - l_{\mathrm{s}} + l_{\mathrm{s}}(\alpha\theta - \alpha_{\mathrm{s}}\theta_{\mathrm{s}}) \end{aligned} \tag{1-2}$$

標準尺とリニアスケールの温度差を $\delta\theta = \theta - \theta_{\mathrm{s}}$、熱膨張係数の差を $\delta\alpha = \alpha - \alpha_{\mathrm{s}}$ とおくと、（1-2）式は次式となる。

$$d_{20} = l - l_{\mathrm{s}} + l_{\mathrm{s}}(\delta\alpha\cdot\theta + \alpha_{\mathrm{s}}\delta\theta) \tag{1-3}$$

（1-3）式より、測定精度d_{20}の合成標準不確かさ$u(d_{20})$は次式で表せる。

$$u^2(d_{20}) = u^2(l_s) + u^2(l) + {l_{\mathrm{s}}}^2\delta\theta^2u^2(\alpha_{\mathrm{s}}) + {l_{\mathrm{s}}}^2\theta^2u^2(\delta\alpha) + {l_{\mathrm{s}}}^2\delta\alpha^2u^2(\theta) + {l_{\mathrm{s}}}^2{\alpha_{\mathrm{s}}}^2u^2(\delta\theta)$$

$$+{l_s}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)+{l_s}^2u^2(\alpha_s)u^2(\delta\theta) \qquad (1\text{-}4)$$

「JCG201S31 不確かさ見積もりに関するガイド　長さ（ブロックゲージ）」の事例 2 で「熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合」の考え方を採用し、（1-4）式において $\delta\alpha=0$、$\theta=0$、$\delta\theta=0$ とみなし、$u(\delta\alpha)$、$u(\theta)$、$u(\delta\theta)$の中に $\delta\alpha$、θ、$\delta\theta$ が偏差成分として含まれると考えて評価する。従って、（1-4）式は次式となる。

$$u^2(d_{20})=u^2(l_s)+u^2(l)+{l_s}^2{\alpha_s}^2u^2(\delta\theta)+{l_s}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)+{l_s}^2u^2(\alpha_s)u^2(\delta\theta) \qquad (1\text{-}5)$$

(1-5)式の右辺第 3 項と第 5 項を比較すると、$u^2(\alpha_s)/{\alpha_s}^2$ は通常 0.01 以下であるため、第 5 項は無視することができ、(1-5)式は次式となる。

$$u^2(d_{20})=u^2(l_s)+u^2(l)+{l_s}^2{\alpha_s}^2u^2(\delta\theta)+{l_s}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) \qquad (1\text{-}6)$$

(1-6)式を用いて測定精度d_{20}の合成標準不確かさを求める。

3. 各不確かさ要因の評価例

（1）標準尺の不確かさ： $u(l_s)$

①標準尺の校正の不確かさ： $u(l_{s1})$

標準尺を外部で校正した際の拡張不確かさ（*k*=2）が 0.4 ㎜であったとすると、標準不確かさは次のように見積もられる。

$$u(l_{s1})=0.4\ \mu\mathrm{m}/2=0.2\ \mu\mathrm{m}$$

②標準尺の経年変化による不確かさ： $u(l_{s2})$

過去の校正結果の変動に基づいて、標準尺の校正周期内の経年変化が最大で 0.1 ㎜と推定されるとき、0 ㎜～0.1 ㎜の範囲を持つ一様分布（一方向に偏った一様分布）を考えて、以下のように標準不確かさを見積もる。

$$u^2(l_{s2})=(0.1\ \mu\mathrm{m}/2)^2+(0.1\ \mu\mathrm{m}/2)^2/3$$
$$=\left(0.1\ \mu\mathrm{m}/\sqrt{3}\right)^2$$
$$u(l_{s2})=0.1\ \mu\mathrm{m}/\sqrt{3}=0.058\ \mu\mathrm{m}$$

③標準尺の平行調整による不確かさ： $u(l_{s3})$

測定顕微鏡のテーブル移動軸と平行に標準尺を設置する際にズレが発生すると、コサイン誤差が発生して不確かさ要因となる。例えば、テーブルの X 軸に平行に標準尺を設置する場合、X 軸方向の 100 ㎜に対して、標準尺の Y 軸方向へのズレを ±10 ㎜ まで許容するならば、コサイン誤差の最大値Δl_sは、以下の計算で求めることができる。

$$\Delta l_s=100\ \mathrm{mm}-\sqrt{(100\ \mathrm{mm})^2-(10\ \mu\mathrm{m})^2}=0.0005\ \mu\mathrm{m}$$

0 ㎜～0.0005 ㎜の範囲を持つ一様分布（一方向に偏った一様分布）を考えて、以下のように標準不確かさを見積もる。

$$u^2(l_{s3})=(0.0005\ \mu\mathrm{m}/2)^2+(0.0005\ \mu\mathrm{m}/2)^2/3$$
$$=\left(0.0005\ \mu\mathrm{m}/\sqrt{3}\right)^2$$
$$u(l_{s3})=0.0005\ \mu\mathrm{m}/\sqrt{3}=0.00029\ \mu\mathrm{m}$$

標準尺の不確かさ $u(l_s)$ は、①～③の要因を合成することで次の様に得られる。

$$u(l_s)=\{u^2(l_{s1})+u^2(l_{s2})+u^2(l_{s3})\}^{1/2}$$
$$=\{(0.2\ \mu\mathrm{m})^2+(0.058\ \mu\mathrm{m})^2+(0.00029\ \mu\mathrm{m})^2\}^{1/2}$$
$$=0.208\ \mu\mathrm{m}$$

（2）リニアスケールの不確かさ： $u(l)$

①リニアスケール分解能による不確かさ： $u(l_1)$

リニアスケールの分解能が 1 ㎜ の場合、±0.5 ㎜ の区間で一様分布であると考え、分解能による不確かさは以下の値となる。

$$0.5\ \mu\mathrm{m}/\sqrt{3} = 0.29\ \mu\mathrm{m}$$

1 つの測定値を得るのにリニアエンコーダの読み取りを 2 回行う（基準点、測定位置）ことから$\sqrt{2}$ 倍することと、校正時の繰り返し数が 3 回で、その平均値を校正値とすることから、$\sqrt{3}$ で割ることで、$u(l_1)$ が得られる。

$$u(l_1) = 0.29\ \mu\mathrm{m} \times \sqrt{2}/\sqrt{3} = 0.24\ \mu\mathrm{m}$$

②リニアスケール指示値の繰り返し性による不確かさ： $u(l_2)$

リニアスケール指示値は、様々な要因によって測定毎にばらつきが生じる。各校正点において 3 回繰り返し測定の平均値を校正値とし、それを 20 点の校正点で実施したとする。これらの測定で得られた値（3×20 = 60 データ）と、「JCG201S11 不確かさ見積もりに関するガイド　長さ（共通）」の手順を用いて繰り返しの標準偏差を求め、得られた値を $u(l_2)$ とする。ここでは、以下が得られたと考える。

$$u(l_2) = 1.2\ \mu\mathrm{m}$$

リニアスケールの不確かさ $u(l)$ は、①～②の要因を合成することで次の様に得られる。

$$\begin{aligned} u(l) &= \{u^2(l_1) + u^2(l_2)\}^{1/2} \\ &= \{(0.24\ \mu\mathrm{m})^2 + (1.2\ \mu\mathrm{m})^2\}^{1/2} \\ &= 1.22\ \mu\mathrm{m} \end{aligned}$$

（3）標準尺とリニアスケールの温度差の不確かさ： $u(\delta\theta)$

事前の温度測定などにより、標準尺とリニアスケールとの温度差が ±0.5 ℃ の範囲にあることが分かっているとき、その区間で一様分布を持つと考えることで、$u(\delta\theta)$は以下となる。

$$u(\delta\theta) = 0.5\ ℃/\sqrt{3} = 0.289\ ℃$$

（4）標準尺とリニアスケールの熱膨張係数の差の不確かさ： $u(\delta\alpha)$

標準尺の熱膨張係数が$\alpha_\mathrm{s} = (8.5 \pm 0.5) \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$で与えられている場合、その区間を持つ一様分布を考えることで、標準尺の熱膨張係数の不確かさ $u(\alpha_\mathrm{s})$ は以下となる。

$$u(\alpha_\mathrm{s}) = 0.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}/\sqrt{3} = 0.29 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

リニアスケールの熱膨張係数が$\alpha = (9.0 \pm 0.5) \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$で与えられている場合、その区間を持つ一様分布を考えることで、リニアスケールの熱膨張係数の不確かさ $u(\alpha)$ は以下となる。

$$u(\alpha) = 0.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}/\sqrt{3} = 0.29 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

さらに、熱膨張係数の差$\delta\alpha$は以下で求められる（(1-5) 式を求める際に、$\delta\alpha$ が$u(\delta\alpha)$ に含まれるとみなしているため評価が必要）。

$$\delta\alpha = \alpha - \alpha_\mathrm{s} = 0.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

これらより、$u(\delta\alpha)$ は以下となる。

$$u(\delta\alpha) = \{u^2(\alpha_s) + u^2(\alpha) + \delta\alpha^2\}^{1/2}$$
$$= \{(0.29 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2 + (0.29 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2 + (0.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2\}^{1/2}$$
$$= 0.650 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

(5) リニアスケール温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ： $u(\theta)$

事前の温度測定などにより、リニアスケールの温度の 20 ℃ からの偏差が±1 ℃の範囲にあることが分かっているとき、その区間で一様分布を持つと考えることで、$u(\theta)$は以下となる。

$$u(\theta) = 1\ ℃/\sqrt{3} = 0.577\ ℃$$

4. 合成標準不確かさ

測定精度の不確かさバジェットを表 1 に示す。

表 1　測定精度の不確かさバジェット

不確かさ要因	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $\partial f/\partial x_i$	不確かさへの寄与 $\lvert\partial f/\partial x_i\rvert \times u(x_i)$	タイプ
標準尺の不確かさ：$u(l_s)$	0.208 mm	1	0.208 mm	
①校正の不確かさ：$u(l_{s1})$	0.20 mm			B
②経年変化の不確かさ：$u(l_{s2})$	0.058 mm			B
③平行調整による不確かさ：$u(l_{s3})$	0.00029 mm			B
リニアスケールの不確かさ：$u(l)$	1.22 mm	1	1.22 mm	
①分解能による不確かさ：$u(l_1)$	0.24 mm			B
②繰り返し性による不確かさ：$u(l_2)$	1.2 mm			A
標準尺とリニアスケールの温度差の不確かさ：$u(\delta\theta)$	0.289 ℃	$8.50 \times 10^{-6} \times l_s$ K^{-1}	$2.45 \times 10^{-6} \times l_s$	B
標準尺とリニアスケールの熱膨張係数の差の不確かさ・リニアスケールの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ：$u(\delta\alpha)u(\theta)$	0.650×10^{-6} K^{-1} ×0.577 ℃	l_s	$0.375 \times 10^{-6} \times l_s$	B

(注)標準不確かさ及び感度係数の計算に以下の熱膨張係数を使用した。

標準尺の熱膨張係数：$\alpha_s = (8.5 \pm 0.5) \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$

リニアスケールの熱膨張係数：$\alpha = (9.0 \pm 0.5) \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$

これより、測定精度の合成標準不確かさは次式となる。

$$u(d_{20}) = \{(1.2\ \mu\mathrm{m})^2 + (2.5 \times 10^{-6} \times l_s)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

例えば、$l_s = 100\ \mathrm{mm}$ の場合、$u(d_{20})$は次のとおりとなる。

$$u(d_{20}) = 1.3\ \mu\mathrm{m}$$

5. 拡張不確かさ

表 1 より、タイプ A となるのは、繰り返し性による不確かさ $u(l_2)$ のみである。各校正点において 3 回の繰り返し測定を行い、校正点が 20 点である場合を考える。「JCG201S11 不確かさ見積もりに関するガイド　長さ（共通）」の手順に従って $u(l_2)$ の自由度 ν を求めると、以下となる。

$$\nu = (3 - 1) \times 20 = 40$$

従って、有効自由度 ν_{eff} は次式で得られる。

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(d_{20})}{\frac{u^4(l_2)}{\nu}} = 50$$

$\nu_{\text{eff}} \geqq 9$ であることから、包含係数 k=2 を採用する。$l_{\text{s}} = 100\ \text{mm}$ の場合の測定精度の拡張不確かさは次式となる。

$$U = 2.5\ \mu\text{m}$$