

精密測定信頼性技術に関する研究

ものづくり開発室 新保 栄一
情報システム室 山畑 利行

Evaluation of Uncertainty on ULM Calibrated with Measurement of Ring Gauges

Eiichi SHIMBO and Toshiyuki YAMAHATA

ULM型万能横型測長機を用いてリングゲージの校正における不確かさの評価を行った。その結果、リングゲージ校正の合成標準不確かさは $U_c=831\text{nm}$ 、拡張不確かさ $U=1662\text{nm}(k=2)$ であった。

1. はじめに

当研究所の万能横型測長機はアッペの測長原理に順守した、精密部品、ゲージ及び測定工具類等の測定・検査が可能な応用範囲の広い高精度長さ測定機である。また、精密部品、ゲージ類の長さ測定の依頼試験および設備使用業務において、測定結果は数点を長さ測定し、その平均値としていた。近年、精密測定に不確かさの概念が導入されるようになり、当研究所においても測定結果に不確かさを付記する必要性が生じた。今回、内径標準であるリングゲージ校正の不確かさについて検討したので報告する。

2. 実験方法

実験には、50mm、49mm(25mm+24mmのリングゲージ)、14.5mm、14mmのブロックゲージとブロックゲージ用内測標準ジグを組合せた内径標準を用い、50mm、14mmのリングゲージを万能測長機により校正を行った。使用測定機器は、万能横型測長機にカルツァイス製ULM600、校正用ブロックゲージにツガミ製K級ブロックゲージ、リングゲージにカルツァイス製を用いた。万能測長機、ブロックゲージ及びリングゲージは温度ならし及び清掃を十分行った。測定室の室温仕様は 20 ± 1 、湿度仕様は $55\pm 5\%$ である。万能測長機は測定子；5mm、測定力；2.5Nおよび1.0Nとし、ブロックゲージは測定開始の1時間前に測定テーブルに設置・固定した。リングゲージの内径測定は午前と午後それぞれ5測定を行った。アライメントは水平と垂直方向に対し行った。校正用ブロックゲージ・内測標準ジグの中央を測定し、次に標準リングゲージの内径測定を行った。その時の測長ユニット

のガラススケールおよび対物温度センサーの温度をモニター及び温度の安定を確認し、記録した。

3. 実験結果及び不確かさの解析

標準ブロックゲージの20における長さに起因する不確かさ $u(L_{R20})$ は次のとおりである。標準ブロックゲージは、外部校正機関により光波干渉測定法により校正されている。この拡張不確かさ $(k=2)$ は $0.03\mu\text{m}$ である。標準ブロックゲージの校正の標準不確かさは $u(L_{R20,cal})=0.03\mu\text{m}/2=0.015\mu\text{m}$ となる。標準ブロックゲージの経年変化による不確かさ： $u(L_{R20,year})$ は、過去の校正結果から

$$u(L_{R20,year})=0.015\mu\text{m}$$

である。

オプチカルフラットを使用した実験により、ブロックゲージ用内測標準ジグの測定平面に縞が生じなかった。その平面度は $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以下と推測する。標準ジグ両端2個の標準治具の平面度による標準不確かさは

$$u(f)=\{(0.1\mu\text{m}/3)^2+(0.1\mu\text{m}/3)^2\}=0.082\mu\text{m}$$

ブロックゲージのリングゲージの不確かさは過去の実験結果より10nm以下であった。

$$u(r)=\{(10\text{nm})^2\times 3\}=17\text{nm}$$

したがって、 $u(L_{R20})=(15^2+15^2+82^2+17^2)=85\text{nm}$ となる。

次に測定者による繰返し測定の不確かさを求める。校正用リングゲージの校正値は校正証明書より真値は、50mmでは $M_1=50.0016\text{mm}$ 、14mmでは $M_2=13.9996$ 、データ個数 $r_0=40$ 、 y_1 および y_2 は各リングゲージ呼び寸法の測定データの計であるから

$$r=r_0(M_1^2+M_2^2)$$

$$\begin{aligned}
&=107845.9521088 \\
&=(1/r) \cdot (M_1 y_1 + M_2 y_2) \\
&=0.854610669 \\
S &=(1/r) \cdot (M_1 y_1 + M_2 y_2)^2 \\
&=107844.138032200 \\
S_T &=\text{個々のデータ}(y_{ij})\text{の2乗の和} \\
&=107844.138037798 \\
S_e &=S_T - S \\
&=0.000055984 \\
V_e &=1/(k r_0 - 1) \cdot S_e \\
&=0.000000708654
\end{aligned}$$

したがってSN比は

$$\begin{aligned}
&=(1/r) \cdot (S - V_e) / V_e \\
&=14111014.96(\text{mm}^{-2})
\end{aligned}$$

測定者による繰返し測定の不確かさ $u(d_{\text{repet}})$ は

$$u(d_{\text{repet}}) = 3 / \sqrt{S} = 0.000799(\text{mm})$$

万能測長機ULM600の測定精度は $\pm 0.3 \mu\text{m}$ であるから万能測長機の測定の不確かさ $u(d_{\text{ULM600}})$ は

$$u(d_{\text{ULM600}}) = 0.0003 / \sqrt{3} = 0.000173(\text{mm})$$

である。また、その測定の再現性は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ で

$$u(d_{\text{stabi}}) = 0.0001 / \sqrt{3} = 0.0000577(\text{mm})$$

したがって、寸法差の標準不確かさ $u(d)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}
u(d) &= \sqrt{u(d_{\text{repet}})^2 + u(d_{\text{ULM600}})^2 + u(d_{\text{stabi}})^2} \\
&= \sqrt{(799\text{nm})^2 + (173\text{nm})^2 + (58\text{nm})^2} \\
&= 820\text{nm}
\end{aligned}$$

万能測長機の長さ測定結果の表示は 0.00001mm の分解能であり、表示装置の分解能による不確かさ $u(R)$ は

$$u(R) = \sqrt{2 \times (0.000005 / 3)^2} = 4 \times 10^{-6}(\text{mm})$$

計測データよりブロックゲージとリングゲージの間には、 ± 0.1 以下の温度差であった。ブロックゲージとリングゲージの温度差の標準不確かさ $u(\Delta T)$ は、 $0.1 / \sqrt{3} = 0.058$ となる。

ブロックゲージとリングゲージの線膨張係数は、JIS B 7506の規格より、 $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6} / \text{C}$ である。この値が中心値に対して対称に矩形分布すると考えると、ブロックゲージとリングゲージの線膨張係数の差の標準不確かさ $u(\Delta \alpha)$ は

$$\begin{aligned}
u(\Delta \alpha) &= \sqrt{2 \times (1 \times 10^{-6} / 3)^2} \\
&= 0.82 \times 10^{-6} / \text{C}
\end{aligned}$$

リングゲージ温度の 20C からの偏差の不確かさ $u(\Delta T)$ は計測データから ± 0.5 以内であるから、この幅で矩形分布するとして、標準不確かさを $u(\Delta T) = 0.5 / \sqrt{3} = 0.29$ とした。

実験で使用した標準ブロックゲージの校正証明書にある線膨張係数は $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6} / \text{C}$ である。ブロックゲージの線膨張係数の標準不確かさは、 $u(\Delta \alpha) = 1 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} / \text{C}$ とした。

ブロックゲージとリングゲージの変形量と接触子の接触変形量の差 L_c は、FEM解析により求めた。リングゲージ 50mm では片側のジグで $L_c = 0.11 \mu\text{m}$ 、

表1 リングゲージ校正の不確かさの評価

標準不確かさの成分 $u(x_i)$	不確かさの個別要因	標準不確かさの値	感度係数 f / x_i	$u_i(l)$ nm	type
$u(L_{R20})$ $u(L_{R20, \text{cal}})$ $u(L_{R20, \text{year}})$ $u(f)$ $u(r)$	標準ブロックゲージの20における長さ 標準ブロックゲージの校正 標準ブロックゲージの経年変化 ブロックゲージ用内測標準ジグ平面度 リングゲージによる不確かさ	85nm 15nm 15nm 82nm 17nm	1	85	B A B B
$u(d)$ $u(d_{\text{repet}})$ $u(d_{\text{ULM600}})$ $u(d_{\text{stabi}})$	寸法差の標準不確かさ 測定者による繰返し測定の不確かさ 万能測長機の測定の不確かさ 万能測長機の測定の再現性	820nm 799nm 173nm 58nm	1	820	A B B
$u(\Delta T)$	ブロックゲージとリングゲージの温度差の標準不確かさ	0.058 33nm	L_N / s $L_N = 50 \times 10^6$	$0.67 \times 10^{-6} \cdot L_N$ 33	B
$u(\Delta \alpha) \cdot u(\Delta T)$	ブロックゲージとリングゲージの線膨張係数の差の標準不確かさ・リングゲージ温度の20からの偏差の不確かさ	$0.82 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.29$ 12nm	L_N $L_N = 50 \times 10^6$	$0.24 \times 10^{-6} \cdot L_N$ 12	B
$u(\Delta \alpha) \cdot u(\Delta T)$	ブロックゲージの線膨張係数の標準不確かさ・ブロックゲージとリングゲージの温度差の標準不確かさ	$0.58 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.058$ 2nm	L_N $L_N = 50 \times 10^6$	$0.034 \times 10^{-6} \cdot L_N$ 2	B
$u(L_c)$	ブロックゲージとリングゲージの変形量と接触子の接触変形量の差	98nm	1	98	B
$u(R)$	表示装置の分解能	4nm	1	4	B
合成標準不確かさ U_c		831nm			
拡張不確かさ $U = k U_c (k=2)$		1662nm			

14mmでは $L_c=0.12\mu\text{m}$ であった。したがって、ブロックゲージとリングゲージの変形量と接触子の接触変形量の差の標準不確かさは

$$u(L_c) = \{(0.12\mu\text{m}/3)^2 + (0.12\mu\text{m}/3)^2\} \\ = 0.098\mu\text{m}$$

リングゲージ校正の不確かさの評価を表1に示す。リングゲージの合成標準不確かさ $U_c(L_N)$ は、次のようになる。

$$U_c(L_N) = [(85\text{nm})^2 + (820\text{nm})^2 + (33\text{nm})^2 + (12\text{nm})^2 \\ + (2\text{nm})^2 + (98\text{nm})^2 + (4\text{nm})^2]^{1/2} \\ = 831\text{nm}$$

したがって、測定者による合成標準不確かさ $U_c=831\text{nm}$ ，拡張不確かさ $U=1662\text{nm}(k=2)$ である。

4.まとめ

内径標準であるリングゲージの校正における不確かさの評価を行い、その結果次のことが明らかになった。

研究所の万能横型測長機および精密測定室の環境において、リングゲージ校正の合成標準不確かさは $U_c=831\text{nm}$ ，拡張不確かさ $U=1662\text{nm}$ である。