

# ステップゲージの校正法と不確かさ評価

大澤 尊光\*

(平成18年9月29日受理)

## Step gauge calibration method and evaluation of the uncertainties

Sonko OSAWA

### 1. はじめに

ステップゲージは、座標測定機(CMM)の精度評価に用いられるアーティファクトで、ブロックゲージと同様に、端面間の距離を測定するものである。ステップゲージは、10 mmまたは、20 mmといった短尺ブロックゲージをいくつも貼りあわせ並べた形態のもの(図1(a)参照)、あるいは、スチール棒の中立軸上に短尺ブロックゲージを埋め込んだ形態のもの(図1(b)参照)がある。そのサイズは、大体、600~1500 mmのものが製造されている。座標測定機の評価では、ステップゲージのほうがブロックゲージに比べ10, 20 mmピッチという短いピッチ測定が可能であるため、有用であると考えられる。ここでは、産業技術総合研究所(産総研)で行っているステップゲージの校正(値付け)方法とその不確かさについて述べる。

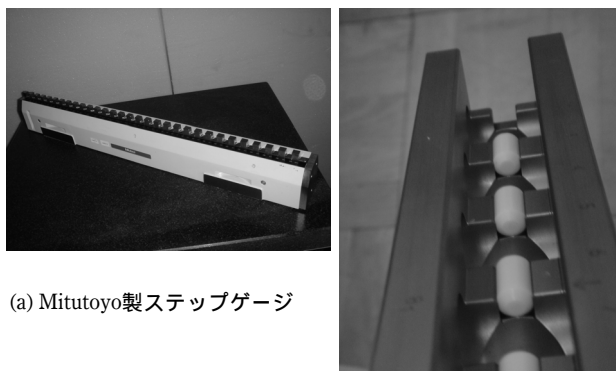


図1 ステップゲージ概観

\* 計測標準研究部門 長さ計測科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。

### 2. ステップゲージ校正装置<sup>1)</sup>

ブロックゲージは、光波干渉計によって直接校正されるため、高精度に値付けをすることができる。しかし、ステップゲージは、その構造上合致法を用いた干渉測定が不可能である。そこで、主要な標準研究機関ではレーザ干渉計と移動ステージを組み合わせた専用の装置を用いてステップゲージの校正を行っている。産総研では、レーザ干渉計(Agilent Technology製Agilent 5529A)と座標測定機(Leitz製PMM866P)を組み合わせた校正装置を開発し、校正サービスを行っている。図2は、本校正装置の概観図である。座標測定機の定盤の横にレーザ干渉計のレーザヘッドを載せるためのステージを設置している。本システムでは、座標測定機は、単に移動ステージとして利用しており、測定はレーザ干渉計の値を使用する。ステップゲージの間隔は、座標測定機のプロービングシステムから差動トランスによって発生するアナログ信号をもとに接触判定を行い、その接触の瞬間に発生するパルス信号と同期したレーザ干渉計の値とする。次項では、プロービングシステムの校正手法について詳しく述べる。

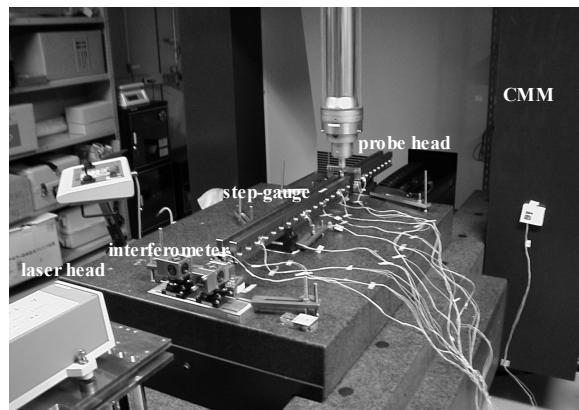


図2 ステップゲージ校正装置概観

また、ステップゲージの校正においては、レーザ干渉計の利用、ならびに測定物自体の熱膨張の影響から、環境測定が重要となる。そのため、温度測定、気圧測定、湿度測定に使用されるすべての機器は、産総研内で校正され、国家標準に対してトレーサビリティを保っている。

ステップゲージ校正においては接触式プローブが被測定面に接触した瞬間の長さを測定するためプロービングの繰返し性や接触判定法が非常に重要である。図3は、我々の所有する座標測定機のプロービングシステム（平行板バネ式）におけるプロービングの様子を示している。プロービングは、移動テーブルの移動方向に対して正、負側の2方向から行われる（内側測定、外側測定）。プロービング時には、プローブスタイラス及びワークの弾性変形等が生じるため、これら変形量とプローブ球の半径ならびに平行板バネの移動量等を含めた補正量をあらかじめ知っておく必要がある。これら補正量を求めるには市販のステップゲージの寸法ピッチにあわせて10もしくは20 mm程度の短いブロックゲージを用いる。ステップゲージの前にK級20 mmスチール製のブロックゲージをステップゲージの測定線上に配置し、正及び負方向からプロービングを行う。図4は、プロービング時のプローブヘッドの差動トランスからの信号の様子を示したものである。本測定におけるプロービング力は、7.5 Nである。差動トランスからのアナログ信号は、7.5 Nの押し込みを行った際に最大となり、その後手前に戻し、プロービング力が0.6 N程度の付近から信号が線形性を示す。この線形部分の数点を使用して縦軸をレーザ干渉計からの距離、横軸を差動トランスからの電圧とし、これらの関係の最小二乗直線を算出する。このプロービングをブロックゲージの前面と後面とに10回繰り返し行い、各面おのおのすべての最小二乗直線との偏差が最小となる部分を閾値として算出し、この値とブロックゲージの校正値からプロービングの補正値を算出する。以上のようにあらかじめプローブの変形等、未知のパラメータをブロックゲージを使用して算出しておく。これらプロービングシステム校正作業は、ステップゲージ測定の前後に行われ、補正値が決定される。以上、プロービングシステム校正法について述べた。次にステップゲージの測長法について述べる。

干渉式座標測定機を用いてステップゲージ測長を行う場合、2通りのレーザ干渉計を組むことが可能である。1つは、Single-path干渉計、もう1つは、Four-path干渉計である。Single-path干渉計は、座標測定機のテーブル上にコーナキューブを配置し、レーザヘッドの前に偏光ビームスプリッタ、参照光用のコーナキューブを配置し、座

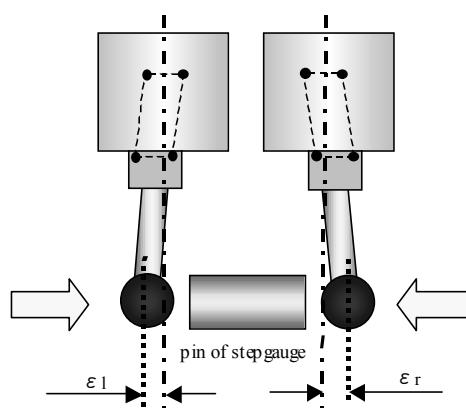


図3 プロービングの様子

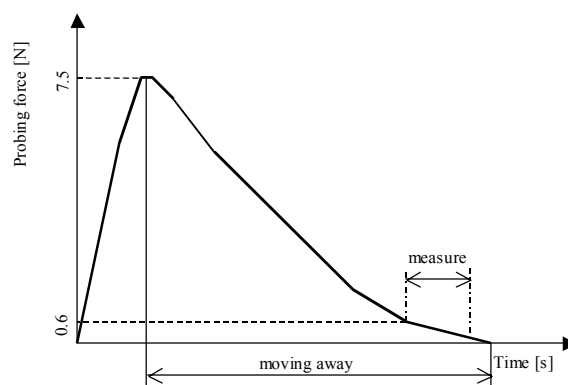


図4 プロービング特性

標測定機のプロービング信号と同期して測長を行う。産総研では、本手法によるシステムについて測定実験を行ってきたが、ばらつきが大きくステップゲージ校正には使用できないことを確認した。Single-path干渉システムにおいては、レーザ干渉計が測定するのは、CMMのテーブル手前に置いたコーナキューブとレーザヘッドの直前にある干渉計との間の距離である。そのため、ステップゲージ面と接触するプローブピンの挙動そのものを観察しているわけではなく、テーブル自体が温度変化により伸縮する影響やテーブルのピッチング、ヨーイング、振動等の影響を受けやすい。これは、本システムの測定ループが長く形成されていることによる。このことが測定のはらつきを生じる原因であると我々は、考えている。

図5は、Four-path干渉計の概要図である。座標測定機のテーブル上に2つの偏光ビームスプリッタ、1/4板、コーナキューブを配置し、CMMのZ軸に固定されたプロービングシステムのすぐ横に2枚の平面鏡を取り付け、平面鏡とレーザ干渉計との間の距離を測定する。このFour-path干渉計は、ステップゲージ干渉測定において多

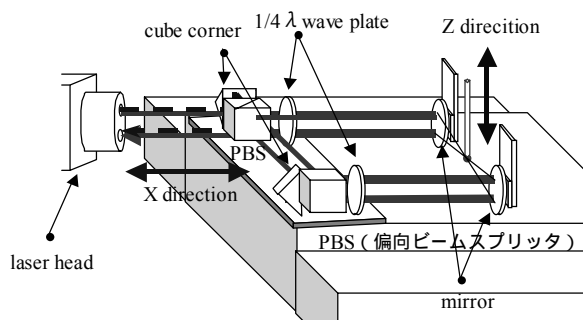


図5 Four-path干渉計システム

く利用されている<sup>2),3)</sup>。この手法は、プローブスタイラスのすぐ隣に平面鏡2枚を配置して4光路の中心位置にスタイラスの中心（測定点）がくるようになっている。そのため、プローブにピッチングやヨーイングが生じて測定長は、常にスタイラス中心と干渉計との間の距離となる。Four-path干渉計では、測定におけるばらつきは、0.1 μm以下とSingle-path干渉計の場合と異なり非常に安定した測定結果が得られた。本システムでは、プローブスタイラス横にミラーを配置し、測定を行っている。そのため、スタイラス自身の運動誤差ならびに振動、ステージの温度変化による影響を受けにくい。本システムは、Single-pathシステムと比べ測定ループが短くなり、安定した測定が得られている。以上のことから、我々はステップゲージ校正システムにFour-path干渉計を採用した。次に干渉測定において重要となる環境測定について述べる。

ステップゲージ校正は、レーザ干渉計を使用して測定を行うため、環境変化による影響が大きい。特に、温度、気圧、湿度が重要となっている。温度センサは、安定性の観点から白金温度センサを用いている。白金温度センサは、自己発熱を生じるが、電流を0.5 mA流して使用する場合には、熱容量的にステップゲージへの影響はない。本システムでは、白金温度センサをステップゲージに片側4ヶ所、合計8個取り付け、被測定物の熱膨張に対する補正を行い、測定室内の温度も2ヶ所で測定し、レーザの波長補正に用いている。気圧は、シリコンレゾナントセンサを利用したデジタル圧力計を測定位置とほぼ同じ高さにセッティングし、測定している。湿度は、光学式露点計により測定している。

レーザの波長は、測定した温度、気圧、湿度からCiddorの式<sup>4)</sup>を用いて補正される。ゲージの測定においては、ゲージ本体の線膨張係数の不確かさが大きいいため、なるべく物体の温度を20℃に近づけることが重要である。

### 3. 校正方法

ステップゲージ校正は、以下に示す手順で行われる。図6にステップゲージ校正手順のフローチャートを示す。

#### 1) 器物搬入、清浄

ステップゲージを座標測定機上に配置し、測定面をエチルアルコール等により、清浄する。

#### 2) 測定面の傾き測定

ステップゲージの面の傾きが校正値に影響を及ぼすため、あらかじめその傾きを測定する。測定には、座標測定機を用い、1測定面に対して5点の測定を行う。校正の際に測定点となる位置での測定値を基準とし、上下左右に2 mmずつ移動した位置での測定値との相対値で傾きを算出する。

#### 3) アライメント作業

アライメント作業は、レーザ光のアライメントとステップゲージのアライメントがある。レーザ光のアライメント作業は、4分割フォトダイオードを使用したアライメント装置を座標測定機の移動テーブルの手前側に配置し、テーブルを移動させた際にレーザ光が常にフォトダイオードの中央にくるようにレーザヘッドの位置と向きを調整する。ステップゲージのアライメント作業は、座標測定機のZ軸ラムにダイヤルゲージを取り付け、ゲージの側面をなぞることにより行う。ダイヤルゲージの振れが2 μm以下になるまで繰返し、アライメント作業を行う。

#### 4) 温度センサの貼り付け

温度センサは、ゲージに片面4個ずつ、計8個を等間隔に貼り付け、校正用のブロックゲージにも1個貼り付ける。その他、室温測定用に2個のセンサを用いている。

#### 5) ステップゲージ測定

測定の前にゲージ面の清浄や温度慣らしは十分に行う必要がある。次に実際の測定について説明する。ゲージ測定の前に2章にて説明したプローブ校正を行う。ブロックゲージの前面と後面をそれぞれ5回プロービングし、プローブ校正を行った後、ステップゲージ測定に入る。0点基準となる一番手前側のピンから順番に測定し、720 mmの面まで測定した後、再び720 mm面から0 mmへ向かって測定を行う。これは、測定の際に発生する温度ドリフト等の影響を低減するものである。この作業を1工程とし、実際の校正作業では、5行程を繰返し行う。最終的な測定値は、1工程の前後に行われる環境測定の結果を空気の屈折率の補正に適用した後、5工程の平均値から導かれる。この一連の作業を時間をずらして3回行う。その3回の測定結果の平均値を用いて校正値を算出する。

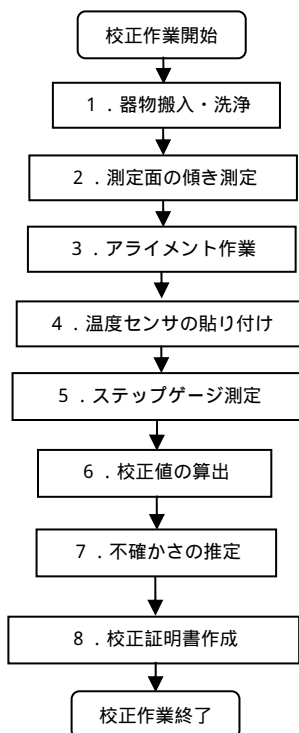


図6 ステップゲージ校正作業の流れ

## 6) 校正値の算出

測定によって得られた測定値から様々な補正量を測定値に反映させることによって校正値を算出する。

校正におけるモデル式は、以下のように表される。

$$l_{SG} = m\lambda - L\alpha_{SG}\Delta t_{SG} - \delta_{ASG} - \delta_{AL}$$

ここで、

$l_{SG}$  : 20 におけるそれぞれのステップゲージ面の位置

$m$  : 反射鏡の距離内の波長数

$\lambda$  : 空気中におけるレーザー波長

$L$  : ステップゲージの公称値

$\alpha_{SG}$  : ステップゲージの線膨張係数

$\Delta t_{SG}$  : ステップゲージの20 からの温度差

$\delta_{ASG}$  : ステップゲージの設置に対するコサイン誤差の補正

$\delta_{AL}$  : レーザの設置に対するコサイン誤差の補正

## 7) 測定の不確かさ算出

校正結果に対して不確かさを算出する。詳しい算出方法は、次章にて説明する。

## 8) 校正証明書作成

## 4. 不確かさ

校正における不確かさのモデル式は、以下のように表される。

$$u(l_{SG})^2 = m \times u(\lambda)^2 + L \times u(\alpha_{SG})^2 \times \Delta t_{SG} + L \times \alpha_{SG} \times u(\Delta t_{SG})^2 + u(\delta_{ASG})^2 + u(\delta_{AL})^2 + u(P)^2 + u(G)^2 + u(Pcal) + u(I)^2 + u(D)^2 + u(Geo)^2 + u(Lres)^2$$

ここで、 $u(\ )$ は対応する量の不確かさを表す。それぞれの記号は次のものを表す。

$P$  : プロローブの再現性による不確かさ

$G$  : ブロックゲージ校正の不確かさ

$Pcal$  : プロローブ校正の不確かさ

$I$  : ステップゲージのピンの傾きによる不確かさ

$D$  : プロローブによる被測定物の変形による不確かさ

$Geo$  : CMMの幾何学誤差による不確かさ

$Lres$  : レーザ干渉計の分解能

これら測定の不確かさの要因は、測定長さに依存しない要因と、測定長さに依存する要因に分けることができる。

長さに依存しない項について、その要因、大きさは以下の通りである。

## 1) プロローブの再現性による不確かさ (Bタイプ)

$$u(P)$$

測定長さが一番短く、かつプロローブの方向がゼロの面と逆になる面 (例えばミットヨ型のステップゲージの場合10 mmの測定面, KOBA型の場合は20 mmの測定面) を多数回測定しそのばらつきの大きさを評価した。それぞれの測定においてはステップゲージをセッティングし直し、繰り返し性ではなく、再現性を評価した結果、ばらつきは100 nm (= ±50 nm) を越えることはなかった。したがってこの要因による不確かさは $\sqrt{3}$ で割って28.9 nmである。

なお、実際の測定においてばらつきがこの領域を越えた測定値は削除するため、この領域にデータは必ず入る。またこの領域を越える測定値が多い場合は、その測定データセット自体を破棄する。

2) ブロックゲージの校正の不確かさ (Bタイプ)  $u(G)$ 

デフレクション量の補正に使用する20 mmのブロックゲージは光波干渉により値付けられており、その値付けの不確かさとして校正証明書に記載されているものを採用する。ブロックゲージの測定はできるだけ中央部分を使って行い、ブロックゲージにはK級のものを使用するため、測定部位

による不確かさは無視できるとする．校正値が95 %の信頼性で表されたものである場合は，2で割る．

3) プローブ校正の不確かさ (Bタイプ)  $u(Pcal)$

ブロックゲージを使用し，プローブの校正を行っているが，ブロックゲージの取り付けによるコサイン誤差が生じる．ダイヤルゲージを使用してこれを合わせているが，垂直面内では，ブロックゲージの厚さが9 mmであり，使用しているダイヤルゲージの分解能が1目盛り10  $\mu\text{m}$ のため，スキャン領域を8 mm，目測による測定限界を5  $\mu\text{m}$ とすると，6 nmの不確かさが生じる．水平面内については，35 mmのスキャン領域があるため，1 nm以下の不確かさとなるため，これは無視できる．そこで，ブロックゲージの取り付けによる不確かさは，6 nm．これは，矩形分布であると仮定し，この要因による不確かさは $\sqrt{3}$ で割って3.5 nmである．

また，ブロックゲージでプローブを校正する際にプローブのたわみ量・プローブ先端球の半径補正量を計算するが，そのばらつきの標準偏差が72 nmある．これをブロックゲージのコサイン誤差による不確かさと合成する．この値は， $\sqrt{3.5^2 + 72^2} = 72 \text{ nm}$ ．

4) ステップゲージのピンの傾きによる不確かさ

(Bタイプ)  $u(I)$

個々の測定面は傾きを持っているため測定部位が異なると，それは不確かさの要因となる．座標測定機あるいはレーザ干渉計により，それぞれの被測定物に対してこの傾きを実測する．実験の結果，これらの値は極めてよい一致を示すため，いずれかの測定を行えば十分である．中央の測定部分に対して上下左右それぞれ2 mmずれた点を実測した結果，最大でも3  $\mu\text{m}$ 以下の幅であった．実際の測定では測定部位のずれは最大で0.1 mm以下と仮定すると，その値を40で割り75 nmとなる．この不確かさは，矩形分布として仮定し， $\sqrt{3}$ で割って43.3 nm．水平方向と垂直方向に同じことが起こるので，それらを合成すると $43.3 \times \sqrt{2} = 30.6 \text{ nm}$ ．

5) プロービングの被測定物への変形による不確かさ

(Bタイプ)  $u(D)$

プロービングによる測定力は，被測定物を変形させる．被測定物の変形量は，プローブのたわみ量とあわせてブロックゲージの測定による補正が行われるので，本来無視できる．しかしながらブロックゲージとステップゲージの材質が異なる場合にはその補正が必要であるが，その正確な値は不明である．そのため特に補正は行わず，材質の違いによる最大の差を測定の不確かさとして取り扱う．プロービング力による被測定物の変形はヘルツの弾性接近量であると仮定して，その大きさを推定する．

プロービング力による弾性接近量を下記式<sup>5)</sup>により計算する．プローブは球，被測定面は平面であるので，その大きさは

$$k \left( \frac{p^2}{2r} \right)^{1/3} \quad [\mu\text{m}]$$

である．ここで $p$ はプロービング力であり，0.2 Nで測定を行う． $r$ はプローブの半径であり直径8 mmのものを使用する．プローブはルビー製である．プローブ，被測定物ともに超硬であると仮定すると $k=0.32$ である．この時の接近量は55 nmである．またいずれも鋼と同じヤング率とポアソン比を持つと仮定すると $k=0.42$ であり，この時の接近量は72 nmである．以上よりその差 $\delta_D = 17 \text{ nm}$ より影響が大きいことはないとは仮定する．

6) レーザ干渉計の分解能 (Bタイプ)  $u(Lres)$

シングルパスのレーザ干渉計が持つ分解能は，10 nmであるが，本システムでは，4パスの干渉システムとなっているため，その分解能は2.5 nm．この影響による不確かさは， $2.5/\sqrt{12} = 0.7 \text{ nm}$ である．

長さに依存する項については，以下の通りである．

7) ステップゲージのコサイン誤差による不確かさ

(Bタイプ)  $u(\delta_{ASG})$

ステップゲージの設置の際には，ゲージメーカーの指示する方法によりアライメントを入念に行う．大きさの制限によりそのアライメント方法を採用できない場合は，座標測定機のZ軸の先端にダイヤルゲージを取り付けゲージの側面をアライメント面としてセッティングを行う．アライメントによる誤差は，最大測定長さ720 mmに対して，最大でも $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以下にすることは経験的に十分可能であり，設置角度誤差 $\theta = 0.1/720$ となる．この影響は，10 nm/1000 mm．この範囲で一様分布すると仮定するとステップゲージのセッティングのコサイン誤差は，これを $\sqrt{3}$ で割って6 nm/1000 mmである．

8) レーザのアライメントのコサイン誤差による不確かさ (Bタイプ)  $u(\delta_{AL})$

レーザと三次元測定機の移動軸は可能な限り一致するようにする．アライメント用4分割ダイオードを用いてセッティングすると最大測定長さ720 mmに対して，0.1 mm以下の誤差にすることは可能である．この影響は，10 nm/1000 mm．この範囲で矩形分布すると仮定するとレーザのアライメントのコサイン誤差は，これを $\sqrt{3}$ で割って6 nm/1000 mmである．

9) ステップゲージの温度測定の不確かさ (Bタイプ)

$u(\Delta t_{SG})$

たとえ温度計自体が正しくても，ステップゲージの温

度そのものを測定していることにはならないので、この不確かさの要因が存在する。経験的に $\pm 5$  mKよりよい精度で測定できると判断し、ステップゲージの温度測定の不確かさを5 mKとする。この要因は矩形分布と考えられる。また、温度測定の不確かさには温度計自体の値付けの不確かさも考慮する必要がある。これは、経験的に $\pm 5$  mK以下である。この不確かさは、正規分布である。また温度計の自己発熱の補正は行っていない。使用する電流値は0.5 mAであり、その際の自己発熱による影響は2 mK程度である。この要因は長さに換算する際にはステップゲージの熱膨張係数に掛け合わされ、その大きさは、 $0.005 \times 11.5 \times 10^{-6} \times 2/\sqrt{3} = 66.4 \times 10^{-9}$ 。

10) ステップゲージの温度分布による不確かさ (Aタイプ)  $u(\Delta t_{SG})$

ステップゲージの8カ所に温度計を付けて校正の前と後に測定を行った実測値の標準偏差をステップゲージの温度分布による不確かさとする。部屋の温度は周期的に三角波に近い変動をしているため、ステップゲージの温度も同様の変化をしていると考え、この要因の分布は矩形である。温度分布が最も良くなった場合、通常20 mK程度であり、この場合において、その大きさは、 $0.02 \times 11.5 \times 10^{-6}/\sqrt{3} = 132.8 \times 10^{-9}$ 。

11) レーザ干渉計の周波数の不確かさ (Bタイプ)  $u(\lambda)$

レーザの周波数(つまり真空中の波長)は、所内の校正依頼により633 nmよう素安定化ヘリウムネオンレーザとのピットを取って測定し、その値を使って長さ測定を行う。周波数の変動も同時に測定した結果、最大で1.5 MHzであると所内校正報告書に記載されているためレーザ干渉計の周波数の不確かさを1.5 MHzとする。この範囲で矩形分布であると仮定できる。この要因による長さ測定への影響は $3.17 \times 10^{-9}$ である。

12) 環境温度の変化によるレーザ干渉計の波長の不確かさ (Aタイプ)  $u(\lambda)$

長さ測定に用いるレーザ干渉計の波長は、真空中の波長と環境の温度、湿度、気圧を用いてCiddorの式により計算する。温度は二つのセンサを用いてデータセットごとに校正の前後に測定する。実際の測定値の標準偏差を不確かさとして長さに対する影響を計算する。矩形分布と仮定する。

13) 気圧の変化によるレーザ干渉計の波長の不確かさ

(Aタイプ)  $u(\lambda)$

レーザ干渉計の波長に対する気圧の影響を測定する。気圧はデータセットごとに校正の前後に測定する。実際の測定値の標準偏差を不確かさとして長さに対する影響を計算する。矩形分布と仮定する。

14) 環境湿度によるレーザ干渉計の波長の不確かさ

(Aタイプ)  $u(\lambda)$

レーザ干渉計の波長に対する湿度の影響を測定する。湿度はデータセットごとに校正の前後に測定する。実際の測定値の標準偏差を不確かさとして長さに対する影響を計算する。矩形分布と仮定する。

15) CO<sub>2</sub>濃度によるレーザ干渉計の波長の不確かさ

(Bタイプ)  $u(\lambda)$

レーザ干渉計の波長に対するCO<sub>2</sub>濃度の影響を考える。この値は経験的に50 ppm程度と仮定して不確かさを見積もった。本影響による分布は、矩形分布と仮定する。

16) ステップゲージの熱膨張係数の不確かさ (Bタイプ)

$u(\alpha_{SG})$

校正器物であるステップゲージの熱膨張係数とその不確かさとして、ステップゲージのメーカによって示されている値を使用する。カスタムメイドのもので熱膨張係数が全く未知なものに関しては基本的に校正依頼を受け付けられない。通常スチール製の線膨張係数は、 $11.5 \times 10^{-6}$ であり、その不確かさは、 $1 \times 10^{-6}$ 程度である。よって、ここでは線膨張係数の不確かさを $1 \times 10^{-6}$ とし、計算する。この不確かさの要因は、ステップゲージの平均温度の20 から差に掛け合わされた形で、合成不確かさに寄与する。したがってこの要因の影響を極力小さくするためには、ステップゲージの温度を極力20に近くして測定すべきである。

以上の16の要因以外に、理論的に明白に存在する不確かさの要因として、ステップゲージの支持方法による不確かさがある。ステップゲージはベッセル点で支持する。例としてKOBAYASHI製の1 mのステップゲージを例に計算すると、ベッセル点で支持した場合のゲージの鉛直方向への最大たわみは564 nmであり、その際の長さ測定への影響は無視できる。したがってベッセル点から微小量支持位置がずれたことによる影響も同様に無視できる。

合成標準不確かさ $u_c$ は、長さ依存しない不確かさ $u_f$ および長さ依存する不確かさ $u_l$ の二乗和であるので、 $u_c = \sqrt{(u_f)^2 + (u_l)^2}$ 。拡張不確かさ $U$ は $U = k \times u_c$ となる。不確かさのパジャネット表を表1に示す。

5. おわりに

今回、産総研で行われているステップゲージ校正に関して、そのシステムと不確かさ事例を紹介した。ステップゲージは、座標測定機や工作機械の精度評価に使用されるが、測定機の精度も向上しているため、ステップゲージ校正の不確かさを小さくすることは、大変重要にな

ステップゲージの校正法と不確かさ評価

表1 ステップゲージ校正の不確かさ計算例  
(長い要因名は省略している)

No.	要因	大きさ	分布	タイプ	不確かさ[μm]
長さに依存しない項					
1	プローピング	0.050 μm	Rect	B	0.029
2	ブロックゲージ	0.012 μm	Norm	B	0.012
3	プローブ校正	0.072 μm	Norm	B	0.072
4	ピンの傾き	0.075 μm	Rect	B	0.031
5	プローピングによる変形	0.017 μm	Norm	B	0.017
6	レーザ干渉計分解能	0.003 μm	Rect	B	0.001
合成不確かさ					0.086
長さに依存する項					
7	Cos誤差(ゲージ)	0.1 mm/720 mm	Rect	B	0.006
8	Cos誤差(レーザ)	0.1 mm/720 mm	Rect	B	0.006
9	温度測定	5 mK	Norm	B	0.066
10	温度分布	20 mK	Rect	A	0.133
11	波長(周波数)	1.5 MHz	Rect	B	0.002
12	波長(温度)	95 mK	Rect	A	0.053
13	波長(気圧)	53 Pa	Rect	A	0.141
14	波長(湿度)	0.64 %	Rect	A	0.008
15	波長(CO <sub>2</sub> )	50 ppm	Rect	B	0.004
16	熱膨張係数	1.0E-6	Rect	B	0.115
合成不確かさ					0.241

$$U = 2\sqrt{0.086^2 + (0.24L)^2} \quad [\mu\text{m}] \quad L: \text{測定長さ [m]} \quad (k = 2)$$

例として1 m測定では,  $U = 0.51 [\mu\text{m}] \quad (k = 2)$  となる.

ってきている. 産総研では今後, ステップゲージ校正に関する高度化を行い, 不確かさを低減を図っていく予定である.

また, ステップゲージは, その形状により支持点等を変化させるとその自重によるたわみ等の影響により値が変化することがある. 実際に使用する場合は, 校正を行った際に支持した点でステップゲージを支えることが必要であり, 今後, ユーザへの, ステップゲージ使用に関する知識の啓発が必要であると考えられる.

参考文献

1) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵: ステップゲージ校正用干渉式三次元測定機の開発, 精密工学会誌, Vol.68 No.5 pp.687-691 (2002).

2) P.S.Lingard, M.E.Purss, C.M.Sona and E.G. Thwaite, Length-Bar and Step-Gauge Calibration Using a Laser Measurement System with a Coordinate Measuring Machine, Annals of the CIRP, Vol 40,1 (1991).  
3) M.Abbe, M.P.Starrenburg and M.Sawabe, Results from step gauge calibration using a bi-axial laser interferometer, Proceedings of the 6th IMEKO SYMPOSIUM, pp. 9-13.  
4) P.E.Ciddor, Refractive index of air: new equations for the visible and the near infrared, Appl. Opt. Vol.35, pp1566-1573 (1996).  
5) 津村喜代治, 基礎精密測定, 共立出版株式会社.