

# ブロックゲージの校正法とその不確かさ

尾藤 洋一\*

(平成17年3月28日受理)

## Calibration method of gauge block and their uncertainties

Youichi BITOU

### 1. はじめに

ブロックゲージは、ブロックの端面間隔で長さを定義するもので、実用的な長さの標準器として広く用いられている。材質は、スチール、セラミック、タングステンカーバイトなどがある。長さは0.5 mm～1000 mmまで様々なものがあり、組み合わせにより任意の長さを構成することが可能である。長さの校正されたブロックゲージは、3次元測定器、電気マイクロメータ、ノギス等の校正に用いられる。

通常使用されるブロックゲージの校正は、コンパレータを用いて標準ブロックゲージとの機械的な比較により行われるが、より高精度な用途に用いられるブロックゲージや標準ブロックゲージは、光波干渉計により校正される。本報告では、産業技術総合研究所が提供している光波干渉計を用いたブロックゲージの校正法及びその不確かさについて述べる。

### 2. 長さ標準の体系（トレーサビリティ）

長さの単位である「メートル」は、「光が真空中を1/299782458秒間に進む行程の長さ」として定義されている。このメートルの定義を実現するためには、周波数値の勧告されている各種の周波数安定化レーザを用いる手法が最も一般的である<sup>1)</sup>。なかでも、ヨウ素安定化633 nmヘリウムネオンレーザは、各国の標準研究所が保有し、標準レーザとして採用されている。我が国のJCSS制度においても、長さの特定標準器としてヨウ素安定化633 nm

ヘリウムネオンレーザが指定されている。

この標準ヨウ素安定化633 nmヘリウムネオンレーザ、もしくはそれにトレーサブルな安定化レーザにより周波数校正されたレーザを光源として用いることにより、光波干渉計による長さ計測のトレーサビリティが確保される。産業技術総合研究所におけるブロックゲージ測定用光波干渉計においては、特定標準器と同型でかつ直接周波数校正されたヨウ素安定化633 nmヘリウムネオンレーザを光源の一つとして用いている。

### 3. 校正の方法

光波干渉計によるブロックゲージ長さの測定法では、ブロックゲージ (GB) を光学平面基板 (PL) に光学密着し、ブロックゲージの端面と基板平面間の長さを段差として測定する。図1にその原理図を示す。光波干渉計により測定されるブロックゲージの長さ $L$ は、

$$L = \frac{\lambda}{2}(N + \varepsilon) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\lambda$ は光源の波長（空气中）、 $N$ は干渉信号の整数部である。また、 $\varepsilon$ は干渉信号の端数部で、図1に示すように、ブロックゲージ端面と基板平面の干渉縞のずれから、

$$\varepsilon = \frac{b}{a} \quad (2)$$

と与えられる。ここで、干渉縞は図中の参照ミラー (MR) をわずかに傾けることにより観測される。

式(1)より、ブロックゲージの長さ $L$ を決定するには、干渉信号の整数部 $N$ を決定しなければならない。しかしながら、単一波長のみの測定では $N$ を決定することはできない。そこで、合致法と呼ばれる手法により $N$ を決定する。合致法では、複数の波長で同一のブロックゲージを測定し、複数の式(1)を用いて整数条件から $N$ を求める。

\* 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。

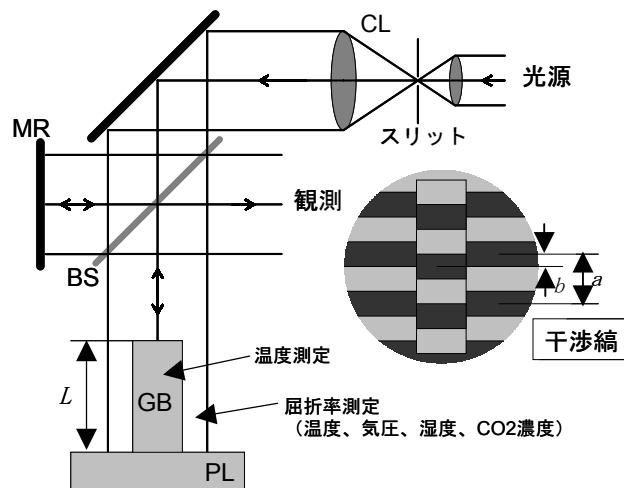


図1 ブロックゲージ干渉計の構成図

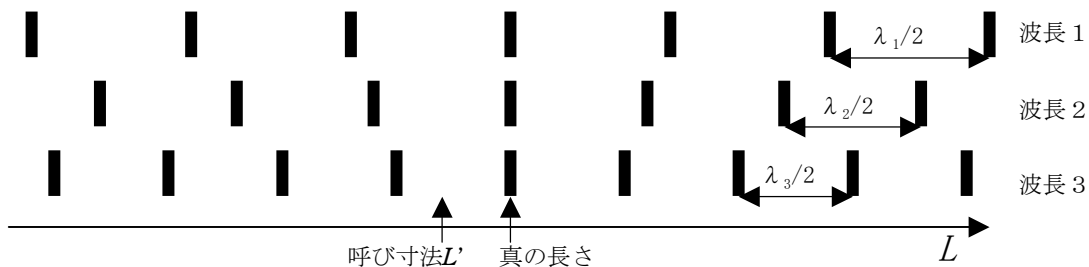


図2 3つの波長による合致の例

ブロックゲージの場合、測定対象となるゲージの長さは呼び寸法 $L'$ から数 $\mu\text{m}$ の範囲にあることがわかっており、2種類から4種類の波長を使用すれば $N$ を決定することができる。3つの波長を用いた場合の測定例を図2に示す。図では、各波長における端数 $\varepsilon$ の測定結果からの「あり得る長さ」をそれぞれの線で、その不確かさを線の太さで表している。図2に示すように、「あり得る長さ」の組み合わせから、真の長さが一意的に求められる。

#### 4. 校正の不確かさ

##### 4.1 校正値の関数モデル

長さの標準器としてのブロックゲージの長さ(校正値) $l$ は、20℃における機械的な長さとして定義されており、合致法により光学的に求められたブロックゲージ長さ $L$ に対していくつかの補正が必要となる。ブロックゲージ長さの校正値 $l$ は、

$$l = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{2n} (N_i + \varepsilon_i) + \Delta t \alpha L' + \Delta l_s + \Delta l_\phi \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 $m$ は合致法に用いるレーザー光源

の数で、産総研の場合 $m = 3$ である。 $n$ は空気の屈折率で、Ciddorの式と呼ばれる経験式より求められる。 $\Delta t \alpha L'$ はブロックゲージの熱膨張に対する補正項で、 $\Delta t$ はブロックゲージ温度の20℃からのずれ、 $\alpha$ はブロックゲージの熱膨張係数である。 $\Delta l_s$ は干渉計の入射ピンホール(スリット)の大きさによる補正項である。 $\Delta l_\phi$ はブロックゲージと基板平面との材質(複素屈折率)や表面粗さの違いに対する補正項(位相差補正)である。

また、期待値が0であり補正項としては入らないが、不確かさの要因となる項目として、干渉計の光学素子やブロックゲージ平面の歪による不確かさ、光学密着(リンギング)による不確かさ、レーザー光束の入射角度に関する不確かさがある。

##### 4.2 不確かさの要因と評価

産業技術総合研究所では、呼び寸法250 mmまでのブロックゲージを測定する干渉計(短尺ブロックゲージ干渉計)と1000 mmまでのブロックゲージを測定する干渉計(長尺ブロックゲージ干渉計)を、測定長さに応じて使用している。2台の干渉計に関して、不確かさの要因は全く同じあり、その各大きさもほぼ同じである。以下で

は、1000 mmまでのブロックゲージを測定する長尺ブロックゲージ干渉計について、4.1節で述べた各要因の標準不確かさの評価結果を示す。

#### 4.2.1 光源波長の不確かさ

長尺ブロックゲージ干渉計用の光源としては、3本の周波数安定化レーザを用いている<sup>2)</sup>。そのうちの一つは、前述したように国家標準レーザに直接トレーサブルなヨウ素安定化オフセットロックHe-Neレーザ(波長633 nm)である。残りの2本は、ヨウ素安定化Nd:YAGレーザ(波長532 nm)<sup>3)</sup>及び、ルビジウム安定化半導体レーザ(波長780 nm)<sup>4)</sup>である。

長さ1000 mmまでのブロックゲージに対して、合致法により干渉信号の整数部Nを決定するためには、 $1 \times 10^{-9}$ より良い周波数不確かさを有する3本以上の安定化レーザが必要となる。上述の3本の周波数安定化レーザの周波数不確かさはいずれも $1 \times 10^{-10}$ よりも小さく(波長標準研究室により確認)、合成標準不確かさに対しては、ほとんど無視できる大きさである。また、出力光強度も全て0.5 mW以上の高出力が得られており、CCDカメラなどにより干渉縞を容易に観測できる。

#### 4.2.2 端数測定の不確かさ

干渉信号の端数 $\varepsilon$ は、図1に示すような干渉縞画像から、フーリエ変換法を利用してコンピュータにより自動計算で求められる。具体的には、フーリエ変換によりブロックゲージおよび基板平面上の縞の位相を計算し、その差から縞のずれ量、つまり端数 $\varepsilon$ を求める。

本手法の不確かさは、長さ10 mmのブロックゲージを用いて、波長走査干渉計により確認した<sup>5)</sup>。光源の波長を適当に変えることで、端数部 $\varepsilon$ を適当に変化させることが可能である。そして、その時の波長を高精度な波長計で測定することにより端数測定の不確かさを見積もることができる。なお、測定に長さ10 mmと短いゲージを用いているのは、端数測定以外の不確かさの要因を減らすためである。このようにして確認した本手法による端数部 $\varepsilon$ の測定不確かさ(標準偏差)は0.01程度であった。

#### 4.2.3 空気屈折率の不確かさ

Ciddorの式では、空気温度、気圧、湿度、CO<sub>2</sub>濃度といった環境パラメータから空気屈折率を求める<sup>6)</sup>。空気屈折率測定の不確かさとしては、各環境パラメータの測定不確かさが要因となる。環境パラメータの測定不確かさについては、測定そのものの不確かさと分布に関する不確かさの両方を見積もる必要がある。

気温測定は白金抵抗温度計を用いて行っている。その測定不確かさは、当研究室が保有している標準温度計の不確かさ、標準温度計による気温測定用温度計の校正時の不確かさ、気温測定時のばらつき等により求められ、5 mKと見積もった。気温分布に関する不確かさは、干渉計内の気温分布の測定から12 mKとした。

気圧測定の不確かさは、気圧計の校正証明書(所内校正)の値と経年変化の見積もりから、0.07 hPaと見積もった。気圧分布に関する不確かさは、過去に蓄積されたデータから0.01 hPaとした。

湿度測定の不確かさは、露点温度計の校正証明書(所内校正)の値から、露点0.1 °Cとし、湿度分布に関する不確かさは、過去に蓄積されたデータから0.05 °Cと見積もった。

CO<sub>2</sub>濃度の測定不確かさは、校正用ガスの不確かさと経年変化の見積もりから、トータルで30 ppmと見積もった。

#### 4.2.4 熱膨張補正の不確かさ

ブロックゲージの熱膨張補正の不確かさは、ブロックゲージの温度測定 $\Delta t$ に関する不確かさと熱膨張係数 $\alpha$ に関する不確かさに大別される。

ブロックゲージの温度測定は気温測定と同様に、白金抵抗温度計を用いて行われる。その測定不確かさは、気温測定の場合と同様の手法で求められ、6 mKと見積もった。また、ブロックゲージ温度の分布に関する不確かさは、温度分布の測定結果から、4 mKと見積もった。

ブロックゲージの熱膨張係数は、スチールの場合、ISOなどでは $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6}$  1/Kとされているが、明記されていれば別の値でもよい。産業技術総合研究所では、日本製のブロックゲージの場合、岡路らによって測定された値( $10.7 \times 10^{-6}$  1/K)を用いており<sup>7)</sup>、その不確かさは $0.2 \times 10^{-6}$  1/Kである。また、ブロックゲージ測定温度の20 °Cからのずれの平均値は80 mKである。ブロックゲージの熱膨張係数に関する標準不確かさは、これらの値の積により、 $0.2 \times 10^{-6} \times 0.08 \times L' = 1.6 \times 10^{-8} \cdot L'$ と求められる。

#### 4.2.5 入射ピンホール大きさによる補正の不確かさ

入射ピンホール大きさによる補正量 $\Delta l_s$ は、

$$\Delta l_s = \frac{r^2}{4f^2} L' \quad (4)$$

と表される。ここで、 $r$ は入射ピンホールの半径、 $f$ はコリメータレンズ(CL)の焦点距離である。長尺ブロック

ゲージ干渉計の場合、 $r = 0.2 \text{ mm}$ 、 $f = 800 \text{ mm}$ であり、この補正量 $\Delta l_0$ に関する不確かさは、入射ピンホール半径 $r$ の不確かさによって決まる。入射ピンホール半径 $r$ の不確かさを実測することは困難であるので、製造者仕様等からさらに余裕を見て、標準不確かさを $0.05 \text{ mm}$ と見積った。この不確かさより与えられる補正量 $\Delta l_0$ に関する標準不確かさは、 $2 \times 10^{-9} \cdot L$ であり、合成標準不確かさに対してはほとんど無視できる大きさである。

#### 4.2.6 レーザ光束の入射角度に関する不確かさ (コサインエラー)

レーザ光束の入射角度に関する不確かさは、ブロックゲージ及び基板平面に対してレーザ光束が垂直に入射しないために生じるもので、コサインエラーと呼ばれている。入射角度の不確かさは、コーナーキューブミラー、オートコリメータ及び干渉縞の空間周波数により確認され、90度に対して18.4秒と見積もった。この値から求められるコサインエラーの標準不確かさは、 $4 \times 10^{-9} \cdot L$ である。

#### 4.2.7 位相差補正の不確かさ

通常の長尺ブロックゲージ干渉計を用いた測定の場合、基板平面にはブロックゲージと同材質のものを用いることとしている。この場合、複素屈折率の違いは無視でき、

位相差による補正量 $\Delta l_0 = 0$ としている。不確かさとしては、表面粗さの違いが要因となるが、スチール製のブロックゲージ及び平面基板の場合、その違いは経験から $\pm 15 \text{ nm}$ 以内と見積もられている。従って、標準不確かさは $15/\sqrt{3} = 8.7 \text{ nm}$ となる。

基板平面にブロックゲージと同材質のものを用いなかった場合、産総研では補助ゲージ法と呼ばれる手法により補正量 $\Delta l_0$ を求めている<sup>8)</sup>。この手法により求められる補正量 $\Delta l_0$ の不確かさは、上述の値とほぼ同程度の大きさである。

#### 4.2.8 干渉計の光学素子やブロックゲージ平面の歪による不確かさ

干渉計の光学素子やブロックゲージ平面の歪による不確かさは、実際に光学素子やブロックゲージ表面の形状を測定することにより、 $\pm 15 \text{ nm}$ 以内と見積もられている。従って、標準不確かさは $15/\sqrt{3} = 8.7 \text{ nm}$ となる。

#### 4.2.9 リンギングによる不確かさ

リンギングによる不確かさは、ブロックゲージと基板平面の表面形状の良否、測定者の技能により変動するが、過去の実験データから $\pm 10 \text{ nm}$ 以内と見積もられている。従って、標準不確かさは $10/\sqrt{3} = 5.8 \text{ nm}$ となる。

表1 各要因別の標準不確かさ

要因分類	個別要因	各要因の不確かさ $u(x_i)$	測長値への変換 $(\partial f / \partial x_i) \cdot u(x_i)$	長さに換算した標準不確かさ $u_i(L)$	タイプ
光源波長	校正の不確かさ	$\Delta \lambda / \lambda = 1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10} \cdot L$	$1 \times 10^{-10} \cdot L$	A
空気の屈折率の補正	気温測定	5 mK	$0.93 \cdot 0.005 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$0.465 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	気温分布	12 mK	$0.93 \cdot 0.012 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$1.12 \times 10^{-8} \cdot L$	A
	気圧測定	0.07 hPa	$0.27 \cdot 0.07 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$1.89 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	気圧分布	0.01 hPa	$0.27 \cdot 0.01 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$0.27 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	湿度(露点)測定	0.1 °C	$0.035 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$0.35 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	湿度(露点)分布	0.05 °C	$0.035 \cdot 0.05 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$0.175 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	CO <sub>2</sub>	30 ppm	$0.015 \cdot 0.3 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$0.45 \times 10^{-8} \cdot L$	B
熱膨張補正に関する不確かさ	ゲージ温度測定	6 mK	$0.006 \cdot 10.7 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$6.42 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	ゲージ温度分布	4 mK	$0.003 \cdot 10.7 \cdot 10^{-6} \cdot L$	$4.28 \times 10^{-8} \cdot L$	A
	熱膨張係数	$0.2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$	$0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.08 \cdot L$	$1.6 \times 10^{-8} \cdot L$	B
アライメントによる不確かさ	入射ピンホールの大きさ	0.05 mm	$2 \cdot 10^{-9} \cdot L$	$0.2 \times 10^{-8} \cdot L$	B
	入射角度	18.4 秒	$4 \cdot 10^{-9} \cdot L$	$0.4 \times 10^{-8} \cdot L$	A
端数測定	端数測定	0.01	$0.01 \cdot \lambda/2$	3.2 nm	A
光学素子の歪み	光学素子の歪み	15 nm	$15/\sqrt{3}$	8.7 nm	B
位相差補正	位相差補正	15 nm	$15/\sqrt{3}$	8.7 nm	B
リンギング	リンギング	10 nm	$10/\sqrt{3}$	5.8 nm	B

#### 4.3 合成標準不確かさ

4.2節で述べた各要因別の標準不確かさを表1に示す。要因別の不確かさから見積もられるブロックゲージ校正の合成標準不確かさ $u_c(L')$ は、

$$\begin{aligned} u_c(L') &= (14^2 \text{ nm}^2 + 8.2^2 \times 10^{-16} \cdot L'^2)^{1/2} \\ &= (14^2 + 8.2^2 \times 10^{-4} \cdot L'^2)^{1/2} \text{ nm} \quad (L' \text{ mm}) \end{aligned} \quad (5)$$

と与えられる。また、拡張不確かさは、

$$U = k u_c \quad (k = 2) \quad (6)$$

と与えられる。式(5)より、1000 mmのスチール製ブロックゲージにおける合成標準不確かさは83 nmである。表1より、ブロックゲージの温度測定、気温測定、気圧測定の不確かさが影響の大きい要因であることがわかる。呼び寸法250 mmまでのブロックゲージを測定する短尺ブロックゲージ干渉計の不確かさに関しては、表1に示した値とほぼ同じ大きさであるが、装置や環境の違いにより細部には若干の違いがある。その詳細は文献<sup>8)</sup>を参照されたい。

なお、産業技術総合研究所のブロックゲージ校正に関しては、2台の光波干渉計により（短尺ブロックゲージ干渉計および長尺ブロックゲージ干渉計）、CIPM基幹国際比較およびAPMP域内基幹比較に参加し、全て良好な結果を得ている<sup>9)</sup>。

#### 5. おわりに

ブロックゲージの光波干渉計による測定法は、リング等のための技能習得が多少必要ではあるが、測定そのものはさほど難しい技術ではない。4.3節でふれたように、校正（不確かさ）のポイントは、測定環境や温度測定（熱膨張補正）の不確かさといった点にある。また、熱膨張補正の問題は、校正されたブロックゲージを実際に用いる場面においても、更なる不確かさの大きな要因

となっていることが多い。これに対して、最近、温度の影響の非常に小さいブロックゲージとして低熱膨張ガラス製ブロックゲージが開発され、熱膨張が要因となる不確かさの低減が図られている<sup>10)</sup>。

#### 参考文献

- 1) T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the meter (1997)," *Metrologia* **36**, 211-244 (1999).
- 2) 尾藤洋一, 平井亜紀子, 吉森秀明, 洪鋒雷, 大苗敦, 岩崎茂雄, 瀬田勝男: 3本の安定化レーザを用いた長尺ブロックゲージ干渉計の開発, *精密工学会誌* **68**, 542-547 (2002).
- 3) Y. Bitou, K. Sasaki, S. Iwasaki, and F.-L. Hong, "Compact I<sub>2</sub>-stabilized frequency doubled Nd:YAG laser for long gauge block interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 2867-2871 (2003).
- 4) Y. Bitou, K. Sasaki, H. Inaba, F.-L. Hong, and A. Onae, "Rubidium stabilized diode laser for high precision interferometer," *Opt. Eng.* **43**, 900-903 (2004).
- 5) Y. Bitou and K. Seta, "Gauge block measurement using a wavelength scanning interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 6084-6088 (2000).
- 6) P. E. Ciddor, "Refractive index of air; new equations for visible and near infrared," *Appl. Opt.* **35**, 1566-1573 (1996).
- 7) M. Okaji, N. Yamada, and H. Moriyama, "Ultra-precise thermal expansion measurements of ceramic and steel gauge blocks with an interferometric dilatometer," *Metrologia* **37**, 165-171 (2000).
- 8) 平井亜紀子: ブロックゲージの光波干渉測長における不確かさ評価, *標準化と品質管理* **55**, 91-97 (2002).
- 9) <http://kcdb.bipm.org/AppendixB/>
- 10) 尾藤洋一, 大澤尊光, 高辻利之: 低熱膨張ガラス製長尺ブロックゲージの光波干渉計による校正不確かさの評価, *精密工学会誌* **71**, 602-605 (2005).