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：一次元寸法測定器
計量器等の種類：ブロックゲージ
（第５版）

（認定—部門—JCG201S31—０５）

改正：平成２３年１２月１９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　　http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/

目　次

事例１　ブロックゲージ(光波干渉測定法による)

光波干渉測定法によるブロックゲージの校正の不確かさの見積もりについては、次の参考文献に記載されている不確かさの見積もり事例を参照のこと。ただし、空気の屈折率算出式は、Philip E. Ciddor:Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, APPLIED OPTICS, vol.35, No.9, 20 March 1996 を用いることが望ましい。

[参考文献]

今井秀孝編：計測の信頼性評価 -トレーサビリティと不確かさ解析, (財)日本規格協会, 1996,p.121-129.

事例2　ブロックゲージ(比較測定法による)

比較測定法によるブロックゲージの校正の不確かさの見積もりについては、「GUM(1995)：計測における不確かさの表現ガイド」の付属書Ｈ．１端度器の校正及び以下の不確かさの見積もり事例を参照のこと。

（注１）本事例は、不確かさの見積もりの一事例を示したものであり、実際には登録事業者は諸条件を考慮して見積もりを行うこと。また、不確かさの成分ごとに見積もられた数値は、登録事業者自らがその根拠を示せることが必要である。

１．数学モデル

被校正ブロックゲージの長さは、比較測定器により同一呼び寸法の既知の標準ブロックゲージと比較し決定する。これらの二つのブロックゲージの比較における直接の出力はそれらの長さの差 d である。すなわち、

$$d = l(1+\alpha\theta) - l_S(1+\alpha_S\theta_S) \qquad \text{式 2.1}$$

である。ここで、

- l_S　：標準ブロックゲージの 20 ℃における長さ（校正された値）、
- α_S　：標準ブロックゲージの熱膨張係数、
- θ_S　：標準ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差、
- l　：被校正ブロックゲージの 20 ℃における長さ（求めたい値）、
- α　：被校正ブロックゲージの熱膨張係数、
- θ　：被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差、
- d　：測定した標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの寸法差

である。

式 2.1 から、被校正ブロックゲージの 20 ℃における長さ l は次式で表される。

$$l = \frac{l_S(1+\alpha_S\theta_S)+d}{1+\alpha\theta} \qquad \text{式 2,2}$$

テイラー展開し、高次の項を無視すると、式 2.2 は、

$$l = l_S + d + l_S(\alpha_S\theta_S - \alpha\theta) \qquad \text{式 2.3}$$

で表され、さらに被校正ブロックゲージと標準ブロックゲージの温度差を $\delta\theta = \theta - \theta_S$ 、被校正ブロックゲージと標準ブロックゲージの熱膨張係数の差を $\delta\alpha = \alpha - \alpha_S$ で表すと、式 2.3 は、

$$l = l_S + d - l_S(\delta\alpha\theta + \alpha_S\delta\theta) \qquad \text{式 2.4}$$

となる。式 2.4 において、右辺第３項は熱膨張に関する補正項である。

式 2.4 より、ブロックゲージの比較校正の合成標準不確かさ $u_c(l)$ は、厳密には次式で表される。ただし、$\delta\alpha$、$\delta\theta$、α_S 及び θ には相関がないと仮定する。

$$u_c^2(l) = u^2(l_S) + u^2(d) + l_S^2\theta^2u^2(\delta\alpha) + l_S^2\delta\alpha^2u^2(\theta) + l_S^2\delta\theta^2u^2(\alpha_S) + l_S^2\alpha_S^2u^2(\delta\theta) + l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + l_S^2u^2(\alpha_S)u^2(\delta\theta) \qquad \text{式 2.5}$$

ここで、式 2.5 右辺第１項から６項は不確かさの一次項、第７、８項は不確かさの二次項であり、各不確かさ成分は以下のとおりである。

$u(l_S)$　：標準ブロックゲージの 20 ℃における長さの不確かさ
$u(d)$　：標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの寸法差測定の不確かさ
$u(\delta\alpha)$：標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ
$u(\theta)$　：被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ
$u(\alpha_S)$：標準ブロックゲージの熱膨張係数の不確かさ
$u(\delta\theta)$：標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさ

２．校正式及び不確かさの評価式

ここでは、校正を以下の３種類に分類し、それぞれの場合において、校正式、不確かさの評価式、各不確かさ要因の評価例について述べる。

Ａ．熱膨張係数が同一のブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合（広く利用されている校正方式）
Ｂ．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（鋼製同士でわずかに熱膨張係数が異なる場合を含む）
Ｃ．熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行う場合（校正ごとの温度測定の結果を校正値に反映させる場合）

始めに分類Ａの評価例を述べた後、分類Ｂ及び分類Ｃについては分類Ａとの相違点を中心に述べることとする。

２．１ 熱膨張係数が同一のブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合（分類Ａ）

２．１．１ 校正式

熱膨張係数が同一のブロックゲージに対して、熱膨張補正を行わない校正方式は、広く利用されている。この場合、同一熱膨張係数のブロックゲージを 20 ℃の同一環境で測定していると考え、式 2.4 に対して$\delta\alpha = 0$、$\theta = 0$、$\delta\theta = 0$ と見なして、

$$l = l_S + d \qquad \text{式 2.6}$$

の簡単な校正式から l は求められる。

（注２）実際の測定では、$\delta\alpha$、θ、$\delta\theta$は 0 とはならず、それぞれの分布には、かたより（0 からの平均的な偏差）とばらつきが存在する。理想的には、 個々の測定ごとに$\delta\alpha$、θ、$\delta\theta$を測定し、式 2.4 により熱膨張補正を行う（すなわち上記分類Ｃ）か、予め求めた平均的な偏差で測定結果を補正し、ばらつき成分を不確かさとして計上するかのどちらかを行うべきである。
　しかしながら、実際の校正では、$\delta\alpha$、$\delta\theta = 0$ と見なして測定結果に熱膨張補正は行わないケースが殆どである。この場合は、0 とみなして補正を行わなかった$\delta\alpha$、$\delta\theta$の平均的な偏差の成分を不確かさに加える必要がある。また、θ及び分類Bにおける$\delta\alpha$における平均的な偏差（かたより）は、式2.5における一次項 $l_S^2\theta^2u^2(\delta\alpha)$及び$l_S^2\delta\alpha^2u^2(\theta)$の係数として用いられるべきである。しかしながら、不確かさ成分 $u(\theta)$の中にもかたより成分を重複して含める等、不確かさ成分の重複、欠落といった誤りが多数見受けられる。本ガイドでは、その様な誤りを防ぎかつ扱いを簡単にするため、熱膨張補正を行わない場合は、$\delta\alpha$、θ、$\delta\theta$は全て 0 とみなし、その平均的な偏差（かたより）はすべて不確かさ成分に含める扱いとする。具体例はそれぞれ、２．２．３（１）、２．１．３（５）、２．１．３（３）に示す。

２．１．２ 不確かさの評価式

式2.5の不確かさ評価式において、同一熱膨張係数のブロックゲージを 20 ℃の同一環境で測定する場合は、前節（注２）で述べた様に、$\delta\alpha = 0$、$\theta = 0$、$\delta\theta = 0$ と見なすので、

$$u_c^2(l) = u^2(l_S) + u^2(d) + l_S^2\alpha_S^2u^2(\delta\theta) + l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + l_S^2\,u^2(\alpha_S)u^2(\delta\theta)$$ 式 2.7

となる。さらに、$u(\delta\theta)$に関する一次項、二次項である式 2.7 の右辺第３項と第５項を比較すると、第５項／第３項＝$u^2(\alpha_S)/\alpha_S^2$ となり、この値（熱膨張係数とその不確かさの２乗比）は通常 1 %以下である。従って、式 2.7 の右辺第５項は無視することができ、結局、

$$u_c^2(l) = u^2(l_S) + u^2(d) + l_S^2\alpha_S^2u^2(\delta\theta) + l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)$$ 式 2.8

より合成標準不確かさが求められる。

２．１．３ 各不確かさ要因の評価例

式 2.8 に示した不確かさ評価式の各不確かさ要因の評価例を以下に示す。

（１）標準ブロックゲージの 20 ℃における長さの不確かさ：$u(l_S)$

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は以下の３つが考えられる。

① 標準ブロックゲージの校正の不確かさ：$u(l_{S1})$

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って校正される。校正証明書に記載されている拡張不確かさ(k =2)が 0.03 μm 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。

$$u(l_{S1}) = (0.03\ \mu\text{m}) / 2 = 0.015\ \mu\text{m}$$

② 標準ブロックゲージの経年変化による不確かさ：$u(l_{S2})$

標準ブロックゲージの経年変化による不確かさは、過去の校正結果より推定する。過去６年間の校正結果の変動より、標準ブロックゲージの校正周期内の経年変化の推定値は最大 0.02 μm であったとする。この変動は、一方向に片寄った一様分布（変動幅の２分の１を分布の中心とし、変動幅の２分の１を片側区間とする分布：中心 0.01 μm、区間幅 0～-0.02 μm）であると見なせるので、（注３）で説明する考え方により、標準不確かさは次のように見積もる。

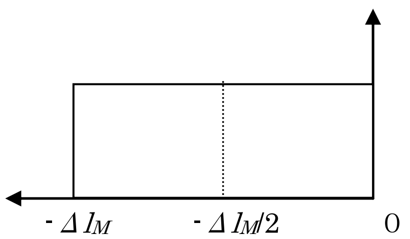
$$\begin{aligned} u^2(l_{S2}) &= (\text{偏り})^2 + (\text{区間})^2/3 \\ &= (0.02/2)^2 + (0.02/2)^2/3 \\ &= (0.02/\sqrt{3})^2 \end{aligned}$$

$$u(l_{S2}) = (0.02\ \mu\text{m})/\sqrt{3} = 0.0115\ \mu\text{m}$$

（注３）一般的に経年変化は、下図に示す様に、一方向（負：短くなる）に片寄った一様分布と考えることができる。この分布は、変動幅の２分の１を分布の中心とし、変動幅の２分の１を片側区間とする一様分布であり、この場合の不確かさは、以下のようになる。

$$\begin{aligned} u^2(l_{S2}) &= (\text{偏り})^2 + (\text{区間})^2/3 \\ &= (\Delta l_M/2)^2 + (\Delta l_M/2)^2/3 \\ &= (\Delta l_M/\sqrt{3})^2 \end{aligned}$$

$$u(l_{S2}) = \Delta l_M/\sqrt{3}$$



結果として変動幅／$\sqrt{3}$となるが、上記の考え方は、変動幅を両側一様分布における片幅と見なして、変動幅／$\sqrt{3}$と見積もる考え方とは異なる。

（注４）経年変化については、明らかな傾向が確認される場合にのみ不確かさとして計上する。校正の不確かさの範囲内でのばらつきは、経年変化とは考えない。通常、製造から 10 年程度以上経過したブロックゲージに対して経年変化の不確かさを計上する必要はない。また、経年変化の大きさは、ブロックゲージの長さに依存し、10 mm 程度以下の短いブロックゲージに対しては基本的に無視できる程度の大きさである。なお、通常、購入したばかりのブロックゲージはその経年変化の傾向は不明である。このような場合、JIS B 7506 に規定されている寸法許容差を採用し、経年変化による不確かさを見積もってもよい。

③ 密着（リンギング）層の不確かさ：$u(w)$

リンギングされた標準ブロックゲージを使用する場合は、密着層の不確かさも計上する。密着層のばらつきは、参考文献「工場測定器講座＜８＞ブロックゲージ（津上研蔵、日刊工業新聞社）」などによると、その標準偏差は 0.01 μm 程度と推定できるので標準不確かさは次のように見積もられる。

$$u(w) = \quad 0.01\ \mu\mathrm{m}$$

リンギングしない標準ブロックゲージを使用する場合、密着層の不確かさは考慮せず、以上の①及び②の要因を合成することにより、標準ブロックゲージの 20 ℃における長さの不確かさを見積もることができる。

$$\begin{aligned} u(l_{\mathrm{S}}) &= [u^2(l_{\mathrm{S1}}) + u^2(l_{\mathrm{S2}})]^{1/2} \\ &= [(0.015\ \mu\mathrm{m})^2 + (0.0115\ \mu\mathrm{m})^2]^{1/2} \\ &= 0.0189\ \mu\mathrm{m} \end{aligned}$$

リンギングされた標準ブロックゲージを使用する場合は、①、②及び③の要因を合成することにより、不確かさを見積もることができる。２本の標準ブロックゲージをリンギングしたとすると、校正の不確かさや経年変化の不確かさが$\sqrt{2}$倍になることに留意して、リンギングされた標準ブロックゲージの不確かさは、

$$\begin{aligned} u(l_{\mathrm{Sw}}) &= [u^2(l_{\mathrm{S1}}) \times 2 + u^2(l_{\mathrm{S2}}) \times 2 + u^2(w)]^{1/2} \\ &= [(0.015\ \mu\mathrm{m})^2 \times 2 + (0.0115\ \mu\mathrm{m})^2 \times 2 + (0.01\ \mu\mathrm{m})^2]^{1/2} \\ &= 0.0285\ \mu\mathrm{m} \end{aligned}$$

と見積もられる。

（２）標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの寸法差測定の不確かさ：$u(d)$

標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの寸法差測定の不確かさ要因は以下の３つが考えられる。

① 繰り返し測定（測定ばらつき）の不確かさ：$u(d_1)$

繰り返し測定の不確かさは、多数回測定による繰り返し性評価結果（プールされた実験標準偏差）より推定する。２本のブロックゲージの寸法差測定を多数回繰り返して、その標準偏差が 0.01 μm 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。

$u(d_1)$ =プールされた実験標準偏差= 0.01 μm

（注５）繰返し測定の不確かさを評価する際には、1 本のブロックゲージの同一箇所を繰り返し測定し、その標準偏差を用いることは不適切である。2 本のブロックゲージの寸法差測定を多数回繰り返して、その標準偏差を用いるべきである。

（注６）プールされた実験標準偏差を用いた不確かさ評価については、GUM4.2.4 を参照のこと。

② 比較測定器の系統誤差による不確かさ：$u(d_2)$

比較測定器の系統誤差は、校正済みの２本のブロックゲージによって構成される基準微小段差を用いた測定結果より推定する。一般にこの系統誤差は補正しないため、不確かさに含める。（ただし、たとえ系統誤差を補正したとしても、系統誤差の評価における不確かさは存在するため、この要因は考慮する必要があることに注意。）

実際の評価では、外部校正機関で校正されたブロックゲージ２本を並べた基準微小段差を、比較測定器で±5 μm 程度の範囲について、1 μm ずつ順次測定（例えば、プラス方向：呼び寸法 1 mm と 1.001 mm から 1.005 mm の組合せ、マイナス方向：呼び寸法 1 mm と 0.999 mm から 0.995 mm の組合せ）する。比較測定器から得られた測定結果を、校正証明書より計算された基準微小段差の値と比較することにより、系統誤差が見積もられる。なお、測定結果としては、前①項で挙げた繰り返し測定の不確かさが無視できる程度の測定回数より得られた平均値を用いる。

実際に比較測定器で±5 μm の基準微小段差を 1 μm ずつ順次測定した結果、校正証明書より計算された段差値からの偏差（かたより）の平均値 D_{ave} は 0.007 μm、標準偏差 σ_{D} は 0.008 μm であったとする。この測定結果に対して、基準微小段差値の校正不確かさ（ブロックゲージの校正不確かさの $\sqrt{2}$ 倍）を考慮することにより、ここでの標準不確かさは次のように見積もられる。

$$u(d_2) = (\text{平均値 } D_{\mathrm{ave}}{}^2 + \text{標準偏差 } \sigma_{\mathrm{D}}{}^2 + \text{基準微小段差の不確かさ }{}^2)^{1/2}$$
$$= \{(0.007\ \mu\mathrm{m})^2 + (0.008\ \mu\mathrm{m})^2 + 2\times[(0.03\ \mu\mathrm{m}) / 2]^2\}^{1/2}$$
$$= 0.0237\ \mu\mathrm{m}$$

（注７）使用する比較測定器の測定子が、その押込み量により測定の結果に明らかな影響を及ぼす場合、押込み量による不確かさを見積もる必要がある。

（注８）比較測定器の系統誤差による不確かさ評価では、基準微小段差の不確かさが大きく影響する。本ガイド文末の参考では、基準微小段差の不確かさの低減法を紹介している。

（注９）系統誤差に関しては、比例誤差が支配的であるとの考え方もあるが、基準微小段差を用いた測定結果より、明らかな比例誤差が認められる場合以外は、系統誤差を比例誤差として扱うべきではない。例えば、段差値 5 μm の基準段差より評価された不確かさの 1/5 をもってして、寸法差が 1 μm 程度の場合の不確かさとすべきではない。

③ 比較測定器の分解能による不確かさ：$u(d_3)$

比較測定器の分解能による不確かさは、装置仕様より推定する。比較測定器の分解能は、0.01 μm である。標準不確かさは、分解能の２分の１の区間内（±0.005 μm）の任意の点で等しい確率で存在する分布と推定し、次のように見積もる。

$$u(d_3) = (0.005\ \mu\mathrm{m}) / \sqrt{3} = 0.0029\ \mu\mathrm{m}$$

（注１0）ディジタル指示の分解能の不確かさ評価については、GUM 付属書 F の F.2.2.1 を参照のこと。

以上の３つの要因を合成することにより、標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの寸法差測定の不確かさは

$$
\begin{aligned}
u(d) &= [u^2(d_1) + u^2(d_2) + u^2(d_3)]^{1/2} \\
&= [(\underline{0.01\ \mu m})^2 + (\underline{0.0237\ \mu m})^2 + (0.0029\ \mu m)^2]^{1/2} \\
&= \underline{0.0259\ \mu m}
\end{aligned}
$$

と見積もられる。

（３）標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさ　：$u(\delta\theta)$

標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさは、温度差の実測値$\delta\theta_m$より推定する。両ブロックゲージに温度計を貼り付け、温度ならし後に測定した結果、温度差の平均値$\delta\theta_{ave}$は 0.008 ℃、標準偏差$\sigma_{\delta\theta}$は 0.010 ℃であったとする。この測定結果に対して、温度差測定そのものの不確かさも考慮して、温度差の不確かさ$u(\delta\theta)$を評価する。

温度差測定そのものの不確かさは、使用する温度計を（a）自己校正しない場合（２本の温度計をそれぞれ校正して用いる場合）と（b）自己校正する場合（２本の温度計を温度差測定用に校正して用いる場合）とで不確かさが大きく異なる。以下にそれぞれの場合の評価例を示す。

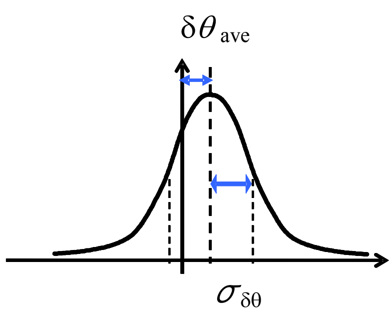
（a）温度計の自己校正を行わない場合

温度差測定には通常、校正済みの２本の温度計を用いる。温度差測定そのものの標準不確かさは、使用した２本の温度計個々の標準不確かさの２乗和によって見積もられる（同じ温度計の場合は、温度計校正の不確かさの$\sqrt{2}$倍)。校正証明書に記載されている拡張不確かさが $U_T(k=2)=$ 0.03 ℃であったとすると、標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさ$u(\delta\theta)$は、

$$
\begin{aligned}
u(\delta\theta) &= (\text{平均値}^2 + \text{標準偏差}^2 + \text{温度差測定の不確かさ}^2)^{1/2} \\
&= (\text{平均値}^2 + \text{標準偏差}^2 + 2\times\text{個々の温度計校正の不確かさ}^2)^{1/2} \\
&= \{(0.008\ ℃)^2 + (0.010\ ℃)^2 + 2\times[(0.03\ ℃)/2]^2\}^{1/2} \\
&= 0.0248\ ℃
\end{aligned}
$$

と見積もられる。

（注１1）この例の場合、温度差の実測値$\delta\theta_m$は下図のような分布となる。測定値の標準偏差$\sigma_{\delta\theta}$だけでなく、かたより$\delta\theta_{ave}$（温度差の平均値）が存在することを考慮して評価する必要がある。



ブロックゲージの校正時には温度差$\delta\theta = 0$ と見なしているので、温度差の実測値$\delta\theta_m$ において、０からの２乗偏差の期待値 $E[\delta\theta_m{}^2]$が不確かさの２乗成分として計上される。数学的に２乗偏差の期待値は、平均値と標準偏差の２乗和により与えられるので（注３参照）、

$$E[\delta\theta_m{}^2] = \delta\theta_{ave}{}^2 + \sigma_{\delta\theta}{}^2$$

と求められる。

(b) 温度差測定のために温度計の自己校正を行う場合

温度差測定の実験前に、使用する温度計（通常複数のセンサーを必要とする）を十分に均質温度と考えられる物体に近接して貼り付け、それぞれの温度計の差を確認し、補正した上で用いる場合や熱電対を用いる場合においては、温度差測定の不確かさは大幅に低減できる（例えば、温度差測定の不確かさが 0.003 ℃となる）。この場合、標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさ $u(\delta\theta)$ は、

$$\begin{aligned} u(\delta\theta) &= (\text{平均値}^2 + \text{標準偏差}^2 + \text{温度差測定の不確かさ}^2)^{1/2} \\ &= [(0.008\ ℃)^2 + (0.010\ ℃)^2 + (0.003\ ℃)^2]^{1/2} \\ &= 0.0132\ ℃ \end{aligned}$$

と見積もられる。

（４）標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ：$u(\delta\alpha)$

熱膨張係数の差の不確かさは、標準ブロックゲージの熱膨張係数の不確かさ $u(\alpha_S)$と被校正ブロックゲージの熱膨張係数の不確かさ $u(\alpha)$の合成（不確かさの２乗和）より求められる。従って、熱膨張係数が同一の場合は、熱膨張係数の不確かさの$\sqrt{2}$倍となる。

標準ブロックゲージ及び被校正ブロックゲージとして、JIS 規格相当の鋼製ブロックゲージを使用した場合、熱膨張係数は、$(11.5\pm1)\times10^{-6}\ K^{-1}$ とされている。この熱膨張係数の区間($\pm1\times10^{-6}\ K^{-1}$)において、任意の値をとる確率は等しいと推定できる。従って、この場合の熱膨張係数の不確かさ $u(\alpha)$ 及び $u(\alpha_s)$はともに $1/\sqrt{3}\times10^{-6}\ K^{-1}$ と見積もられる。よって、熱膨張係数の差の不確かさは、

$$\begin{aligned} u(\delta\alpha) &= [u^2(\alpha_S) + u^2(\alpha)]^{1/2} \\ &= [2\times(1\times10^{-6}\ K^{-1})^2/3]^{1/2} \\ &= 0.816\times10^{-6}\ K^{-1} \end{aligned}$$

と見積もられる。

（５）被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ：$u(\theta)$

被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさは、偏差温度の実測値θ_m より推定する。被校正ブロックゲージに温度計を貼り付け、温度ならし後の温度を多数回測定した結果、20 ℃からの平均偏差θ_{ave} は 0.05 ℃であり、その標準偏差σ_θは 0.10 ℃であったとする。この測定結果に対して、温度測定そのものの不確かさも考慮して、20 ℃からの偏差の不確かさ $u(\theta)$ を評価する。

具体的な不確かさの見積もり法としては、(a) 評価データの分布を利用する場合、(b) 温度の管理幅を利用する場合の２種類の評価法が考えられる。以下にそれぞれの評価例について示す。

(a) 評価データの分布を利用する場合

評価データの分布を利用する場合は（注１１）と同様に、ブロックゲージの校正時には 20 ℃からの温度偏差$\theta = 0$ と見なしているので、温度偏差の実測値θ_{m}において、0 からの２乗偏差の期待値 $E[\theta_{\mathrm{m}}^2]$が不確かさの２乗成分として計上される。最終的な標準不確かさは、温度測定の不確かさ（測定に使用した温度計の拡張不確かさ $U_{\mathrm{T}}(k=2)= 0.03$ ℃）を考慮し、次のように見積もる。

$$
\begin{aligned}
u(\theta) &= (\text{平均値}^2+\text{標準偏差}^2+\text{温度測定の不確かさ}^2)^{1/2}\\
&= (\theta_{\mathrm{ave}}^2 + \sigma_{\theta}^2 + u_{\mathrm{T}}^2)^{1/2}\\
&=[(0.05\ ℃)^2 + (0.10\ ℃)^2 + (0.015\ ℃)^2]^{1/2}\\
&= 0.113\ ℃
\end{aligned}
$$

（補足１）この例において、GUM などでは、被校正ブロックゲージ温度の 20 ℃からの平均偏差θ_{ave}(0.05 ℃)を用いて、式2.5右辺の第３項として「$l_{\mathrm{S}}^2\theta_{\mathrm{ave}}^2\, u^2(\delta\alpha)$」が、いわゆる不確かさの一次項として計上されている。この場合は、20 ℃からの偏差の不確かさ $u(\theta)$を

$$
\begin{aligned}
u(\theta) &= (\text{標準偏差}^2+\text{温度測定の不確かさ}^2)^{1/2}\\
&= (\sigma_{\theta}^2 + u_{\mathrm{T}}^2)^{1/2}\\
&=[(0.10\ ℃)^2 + (0.015\ ℃)^2]^{1/2}\\
&= 0.101\ ℃
\end{aligned}
$$

とし、不確かさの二次項 $l_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)$に計上することで、

$$
\begin{aligned}
\text{一次項＋二次項} &= l_{\mathrm{S}}^2\theta_{\mathrm{ave}}^2u^2(\delta\alpha) + l_{\mathrm{S}}^2\, u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)\\
&= l_{\mathrm{S}}^2\theta_{\mathrm{ave}}^2\, u^2(\delta\alpha) + l_{\mathrm{S}}^2\, u^2(\delta\alpha)\,(\sigma_{\theta}^2 + u_{\mathrm{T}}^2)\\
&= l_{\mathrm{S}}^2\, u^2(\delta\alpha)\,(\theta_{\mathrm{ave}}^2 + \sigma_{\theta}^2 + u_{\mathrm{T}}^2)
\end{aligned}
$$

となり、最終的な合成標準不確かさとしては上記(a)と同様の結果が得られる。

しかし、一次項「$l_{\mathrm{S}}^2\theta_{\mathrm{ave}}^2\, u^2(\delta\alpha)$」を計上したにもかかわらず、20 ℃からの偏差の不確かさ $u(\theta)$ を上記(a)で示した $u(\theta) = (\theta_{\mathrm{ave}}^2 + \sigma_{\theta}^2 + u_{\mathrm{T}}^2)^{1/2}$ として不確かさを計算してしまうと、一次項と二次項において不確かさ成分「$l_{\mathrm{S}}^2\theta_{\mathrm{ave}}^2u^2(\delta\alpha)$」がダブルカウントされてしまうので注意が必要である。

ここでは、上記の様な間違いを避けるため、補正に用いないかたより（$\delta\theta_{\mathrm{ave}}$、$\theta_{\mathrm{ave}}$）は全て不確かさ成分に含める（一次項の係数$\delta\alpha$、$\theta$ 、$\delta\theta$は全てゼロとする）という立場をとっている。

(b) 温度の管理幅を利用する場合

校正作業中のゲージ温度を確認し、管理幅内（例：20.0 ℃±0.3 ℃）で校正を実施している場合、管理限界値内の任意の点に等しい確率で存在する分布と推定し、標準不確かさを以下のように見積もる。

$$
\begin{aligned}
u(\theta) &= (\text{ゲージ温度の管理幅}^2/3+\text{温度測定の不確かさ}^2)^{1/2}\\
&= [(0.3\ ℃)^2 /3+ (0.015\ ℃)^2]^{1/2}\\
&= 0.174\ ℃
\end{aligned}
$$

（注１2）この場合、被校正ブロックゲージ温度の 20 ℃からの平均偏差θ_{ave} の期待値はゼロ

となるため、(補足１）で示した一次項「$l_S{}^2\theta_{ave}{}^2u^2(\delta\alpha)$」もゼロとなる。

（注１３）ゲージ温度の管理幅を利用して不確かさを評価する場合は、管理幅と実際の測定環境に起因する不確かさが、妥当な範囲で一致していなければならない。例えば、実際のゲージ温度が、管理幅の限界値付近で片寄った分布になっている場合、（例：管理幅が±0.3 ℃であるのに対して、実際の温度測定データは平均偏差θ_{ave}＝+0.25 ℃、標準偏差σ_0＝0.03 ℃であった場合）、実際の温度測定データから２．１．３（５）(a)に従って不確かさを評価すると、$u(\theta)$＝（[(0.25 ℃)^2 + (0.03 ℃)^2 + (0.015 ℃) ^{2}] $^{1/2}$＝0.252 ℃となるが、上記の管理限界内で一様分布とした評価では$u(\theta)$＝0.174 ℃となり、不確かさの過小評価となってしまうので注意が必要である。

また、校正中のゲージ温度を直接測定せずに、比較測定器近傍の空気温度又は比較測定器の測定台の温度で代用するような場合は、実際のゲージ温度との温度差、温度分布、応答時間を考慮する必要もある。

なお、管理幅を利用する場合であっても、ゲージ温度（空気温度等で代用する場合も含む）を確認する温度計は、校正されたものを用い、その校正不確かさを合成不確かさに計上しなければならない。

（注１４）標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの温度差の不確かさ、被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ評価の実験においては、日間変動、年間変動を考慮した実験を行うことが推奨される。また、測定者の立ち入りなど、実際の校正時の環境も考慮した実験を行うことが望ましい。

２．２ 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（分類Ｂ）

２．２．１ 校正式

熱膨張係数が異なるブロックゲージの校正においても、熱膨張補正を行わない場合は、基本的に校正式は同一熱膨張係数の場合と同じ式 2.6 となる。式 2.4 に対して、20 ℃の同一環境で測定するので $\theta = 0$、$\delta\theta = 0$ と見なし、さらに、熱膨張係数の差も補正を行なわないことから $\delta\alpha = 0$ と見なして、

$$l = l_S + d \qquad \text{式 2.6}$$

の簡単な校正式から l は求められる。

２．２．２ 不確かさの評価式

不確かさ評価式においても、前節と同様に、$\delta\alpha = 0$、$\theta = 0$、$\delta\theta = 0$ と見なすことにより、同一熱膨張係数の不確かさ評価式（式 2.8）と基本的には同じとなる。但し、比較測定器によっては、ブロックゲージの変形の影響による不確かさ $u(\delta l)$を考慮する必要があり、その場合は、

$$u_c^2(l) = u^2(l_S) + u^2(d) + l_S^2\alpha_S^2u^2(\delta\theta) + l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + u^2(\delta l) \qquad \text{式 2.9}$$

より合成標準不確かさが求められる。

２．２．３ 各不確かさ要因の評価例

式 2.9 に示した不確かさ評価式のうち、標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ $u(\delta\alpha)$及びブロックゲージの変形の影響による不確かさ $u(\delta l)$、以外の不確かさ要因の評価法は、２．１．３で示した評価法と全く同じである。以下にこの２要因における評価例を示す。

（１） 標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ：$u(\delta\alpha)$

熱膨張係数が異なる場合の熱膨張係数の差の不確かさは、２．１．３（４）で示した同一熱膨張係数のブロックゲージの場合の熱膨張係数の差の不確かさに、さらに、補正を行わなかった熱膨張係数の差そのもの（かたより$\delta\alpha_{ave}$）を加えることによって求められる。

具体例としては、(a) 同じ材質（鋼製）であっても、製造メーカなど何らかの先見情報により、わずかな熱膨張係数の差が判明している場合と、(b) 材質が全く異なり熱膨張係数に差がある場合の２例が考えられる。以下にそれぞれの評価例について示す。

(a) 同じ材質（鋼製）で熱膨張係数がわずかに異なる場合

標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージが同じ鋼製の場合であっても、標準ブロックゲージは特定のメーカ製であることから、予め JIS 規格とは異なる熱膨張係数の分布情報が得られる場合がある。例えば、標準ブロックゲージの熱膨張係数は 製造メーカのカタログ値より$(10.8\pm0.5)\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$、被校正ブロックゲージの熱膨張係数は JIS 規格相当で$(11.5\pm1)\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ であったとすると、それぞれの熱膨張係数の不確かさに、熱膨張係数の中央値の差$\delta\alpha_{ave} = 0.7\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ を考慮することにより、

$$\begin{aligned} u(\delta\alpha) &= [u^2(\alpha_S) + u^2(\alpha) + \delta\alpha_{ave}^2]^{1/2} \\ &= [(0.5\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3 + (1\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3 + (0.7\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2\ ]^{1/2} \\ &= 0.952\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1} \end{aligned}$$

として熱膨張係数の差の不確かさが見積もられる。

（補足２）この例においても（補足１）の場合と同様に、熱膨張係数の中央値の差$\delta\alpha_{ave}$を用いて、式 2.5 右辺の第４項として「$l_S^2\delta\alpha_{ave}^2u^2(\theta)$」が、いわゆる不確かさの一次項として計上されている例がある。この場合は、熱膨張係数の差の不確かさ$u^2(\delta\alpha)$を、２．１．３（４）で示したものと同様の評価式（個々のゲージにおける熱膨張係数の不確かさの２乗和）で求め、二次項「$l_S^2u(\theta)^2[u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)]$」として計上することで、

$$\begin{aligned}\text{一次項＋二次項} &= l_S^2\delta\alpha_{ave}^2u^2(\theta)+l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)\\ &= l_S^2\delta\alpha_{ave}^2u^2(\theta)+l_S^2[u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)]u^2(\theta)\\ &= l_S^2[u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)+\delta\alpha_{ave}^2]u^2(\theta)\end{aligned}$$

となり、最終的な合成標準不確かさとしては上記(a)と同様の結果が得られる。ただし、この場合において、20 ℃からの偏差の不確かさ$u(\theta)$に関して、平均偏差θ_{ave}に関する一次項「$l_S^2\theta_{ave}^2u^2(\delta\alpha)$」も同時に計上してしまうと、補正を行わない場合は、不確かさの計算式に誤りが生じてしまうので注意が必要である。以下に、式で具体的に説明する。二つの一次項を計上した場合、熱膨張係数の差に関する不確かさ成分$u_{\delta\alpha,\theta}$は、（補足１）で述べた不確かさのダブルカウントに注意すると、

$$\begin{aligned}u_{\delta\alpha,\theta}^2 &= \text{一次項 + 一次項 + 二次項}\\ &= l_S^2\theta^2u^2(\delta\alpha)+l_S^2\delta\alpha^2u^2(\theta)+l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)\\ &= l_S^2\theta_{ave}^2[u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)]+l_S^2\delta\alpha_{ave}^2(\sigma_\theta^2+u_T^2)\\ &\quad +l_S^2[u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)](\sigma_\theta^2+u_T^2)\end{aligned}\qquad \text{式 2.10}$$

となる。しかしながら、正しい不確かさ成分$u_{\delta\alpha,\theta}$は、２．１．３（５）で示した20 ℃からの偏差の不確かさ$u(\theta)$と上記２．２．３（１）で示した熱膨張係数の差の不確かさ$u(\delta\alpha)$から、式 2.9 に示した様に、二次項のみから求められ

$$\begin{aligned}u_{\delta\alpha,\theta}^2 &= \text{二次項}\\ &= l_S^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta)\\ &= l_S^2[\delta\alpha_{ave}^2+u^2(\alpha_S)+u^2(\alpha)](\theta_{ave}^2+\sigma_\theta^2+u_T^2)\end{aligned}\qquad \text{式 2.11}$$

と与えられる。式 2.11 を展開して式 2.10 と比較すると式 2.10 においては「$l_S^2\theta_{ave}^2\delta\alpha_{ave}^2$」の項が欠落している。この項は、本来は補正値として扱われるものであり、補正を行わない場合は、不確かさ成分として含まれてなければならない。つまり、式 2.10 においては不確かさ成分のカウントミスが生じている。

以上、（補足１）及び（補足２）より、熱膨張に関する補正を行わない場合において、平均的なかたよりθ_{ave}や$\delta\alpha_{ave}$を用いて不確かさの一次項を計上すると、不確かさ成分のダブルカウントやミスカウントなどの誤りが生じる場合があり注意が必要である。熱膨張に関する補正を行わない場合は、熱膨張に関する一次の係数$\delta\alpha$、θ、$\delta\theta$を 0 と見なして、かたよりを全て不確かさ成分に含めることにより、上記の誤りは防ぐことができる。

(b) 材質が異なる場合

標準ブロックゲージが鋼製で被校正ブロックゲージがセラミックス製であった場合、熱膨張係数の差の不確かさは、それぞれ規格値及び製造メーカのカタログ値より推定する。JIS 規格では、鋼製ブロックゲージの熱膨張係数は$(11.5\pm1)\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$とされている。また、カタログでは、セラミックス製ブロックゲージの熱膨張係数

は$(9.5\pm1)\times10^{-6}$ K^{-1} とされている。従って、両ブロックゲージの熱膨張係数の中央値の差$\delta\alpha_{\mathrm{ave}}=2.0\times10^{-6}$ K^{-1} と考えられる。それぞれの熱膨張係数の不確かさ（区間の$1/\sqrt{3}$）と熱膨張係数の中央値の差$\delta\alpha_{\mathrm{ave}}$ を考慮することにより、熱膨張係数の差の不確かさは次のように見積もられる。

$$\begin{aligned} u(\delta\alpha) &= [u^2(\alpha_{\mathrm{S}}) + u^2(\alpha) + \delta\alpha_{\mathrm{ave}}{}^2]^{1/2} \\ &= [(1\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3 + (1\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3 + (2\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2]^{1/2} \\ &= 2.16\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1} \end{aligned}$$

（２）ブロックゲージの変形の影響による不確かさ：$u(\delta l)$

ブロックゲージの変形の影響による不確かさは、ブロックゲージの物性値、比較測定器の仕様を用いた計算値より推定する。ヘルツの式により、標準ブロックゲージ（鋼製）と被校正ブロックゲージ（セラミックス製）の比較校正の際の変形量の差を計算した結果、変形量に差はなかったとする。よって、変形の影響による不確かさは 0 μm とする。

$$u(\delta l) = 0\ \mu\mathrm{m}$$

（注１５）【ヘルツの公式】

標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの材質の組み合わせによっては、変形量に差が出る場合がある。実際の校正でこの差を補正しない場合は、不確かさを見積もらなければならない。弾性接触における球の接触面における変形、応力については、ヘルツの公式[1)]で求められる。

二つの球を接触した場合、両中心の接近量δは次式で与えられる。

$$\delta^3 = \frac{9}{16}\cdot\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\cdot\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^2\cdot P^2 . \qquad \text{式 2.12}$$

ここで、E_1, E_2は縦弾性係数（ヤング率）、ν_1, ν_2はポアソン比、Pは集中荷重、R_1, R_2は球の半径である。ブロックゲージの場合は球と平面との接触なので、$R_2=\infty$とすると、式2.12は

$$\delta^3 = \frac{9}{16}\cdot\frac{1}{R_1}\cdot\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^2\cdot P^2 , \qquad \text{式 2.13}$$

となる。

参考文献

1) 中原一郎、*材料力学下巻*、養賢堂、1968.

２．３ 熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行う場合（分類Ｃ）

２．３．１ 校正式

熱膨張補正を行う場合は、20 ℃からの温度偏差を個々の校正ごとに測定（実測値θ_{m}）する。そして、得られた温度偏差から、熱膨張係数の差に関する補正を加えた、

$$l = l_{\mathrm{S}} + d - l_{\mathrm{S}}\delta\alpha\theta \qquad \text{式 2.14}$$

が校正式となる。なお、熱膨張係数の差には、何らかの先見情報より得られた標準ブロックゲージ及び被校正ブロックゲージそれぞれの熱膨張係数分布の中央値の差$\delta\alpha_{\mathrm{ave}}$を用いる。従って、具体的な校正値としては、

$$l = l_{\mathrm{S}} + d - l_{\mathrm{S}}\delta\alpha_{\mathrm{ave}}\theta_{\mathrm{m}} \qquad \text{式 2.15}$$

より求められる。

２．３．２ 不確かさの評価式

熱膨張補正を行う場合は、式 2.5 において$\delta\alpha$ 及びθ はゼロとならないので、式 2.8、式 2.9 とは異なり、$\delta\alpha$ 及びθに関する一次項が存在する（温度差$\delta\theta$に関しては、同一環境で測定するので$\delta\theta = 0$と見なす）。従って、この場合の不確かさ評価式は

$$\begin{aligned} u_{\mathrm{c}}^2(l) = {} & u^2(l_{\mathrm{S}}) + u^2(d) + l_{\mathrm{S}}^2\theta^2u^2(\delta\alpha) + l_{\mathrm{S}}^2\delta\alpha^2u^2(\theta) + l_{\mathrm{S}}^2\alpha_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\theta) \\ & + l_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + u^2(\delta l) \end{aligned} \qquad \text{式 2.16}$$

となる。ここで、式 2.16 中のθには、個々の校正毎に実測された温度偏差値θ_{m}を用いることが理想ではあるが、そうすると校正毎に不確かさ $u_{\mathrm{c}}(l)$が変動してしまうので、不確かさの評価式としては、予め実測された多数の温度偏差値より求められる２乗平均偏差 $\mathrm{E}[\theta_{\mathrm{m}}^2]$より、不確かさ $u_{\mathrm{c}}^2(l)$を求める。従って、具体的には

$$\begin{aligned} u_{\mathrm{c}}^2(l) = {} & u^2(l_{\mathrm{S}}) + u^2(d) + l_{\mathrm{S}}^2\mathrm{E}[\theta_{\mathrm{m}}^2]u^2(\delta\alpha) + l_{\mathrm{S}}^2\delta\alpha_{\mathrm{ave}}^2u^2(\theta) + l_{\mathrm{S}}^2\alpha_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\theta) \\ & + l_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + u^2(\delta l) \\ = {} & u^2(l_{\mathrm{S}}) + u^2(d) + l_{\mathrm{S}}^2(\theta_{\mathrm{ave}}^2 + \sigma_\theta^2)u^2(\delta\alpha) + l_{\mathrm{S}}^2\delta\alpha_{\mathrm{ave}}^2u^2(\theta) + l_{\mathrm{S}}^2\alpha_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\theta) \\ & + l_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) + u^2(\delta l) \end{aligned} \qquad \text{式 2.17}$$

より合成標準不確かさが求められる。また、ここでの不確かさ要因 $u(\delta\alpha)$及び $u(\theta)$は、補正に用いた$\delta\alpha_{\mathrm{ave}}$及び$\theta_{\mathrm{m}}$に対する不確かさと考えられる。

（注１６）式 2.16 中のθとして用いられるのは実測された温度偏差値θ_{m}の平均値θ_{ave}の 2 乗θ_{ave}^2ではないことに注意する。平均偏差値の 2 乗θ_{ave}^2のみを不確かさに計上するとすると、例えば 20.05 ℃±0.1 ℃の温度環境と 20.05 ℃±1 ℃の温度環境の不確かさが同じになってしまい、明らかに不適当である。不確かさの算出は、2 乗偏差の期待値を求めることが基軸となっている。
（注１１）で示した様に、２乗偏差の期待値は、平均値の２乗と標準偏差の２乗の和で与えられるので、

$$\mathrm{E}[\theta_{\mathrm{m}}^2] = \theta_{\mathrm{ave}}^2 + \sigma_\theta^2$$

となる。

（注１７）式2.17の右辺第４項と第６項は、$u^2(\theta)$に関する一次項、二次項であるが、第６項／第４項= $u^2(\delta\alpha)/\delta\alpha_{\mathrm{ave}}^2$ となり、この値（熱膨張係数の差とその不確かさの２乗比）は通常無視できない。よって、式 2.7 の右辺第５項と異なり式 2.17 の右辺第４項は計上する必要がある。

２．３．３ 各不確かさ要因の評価例

式 2.17 に示した不確かさ評価式のうち、標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ $u(\delta\alpha)$及び被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ $u(\theta)$、以外の扱いは２．１．３及び２．２．３で示した不確かさ評価法と全く同じである。以下にこの二要因における評価例を示す。

（１） 標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ：$u(\delta\alpha)$

ここでの熱膨張係数の差の不確かさ $u(\delta\alpha)$の評価法は、２．１．３（４）で示した同一ゲージの場合の熱膨張係数の差の不確かさの評価法と同じである。

２．２．３（１）（b）と同様に、標準ブロックゲージが鋼製で被校正ブロックゲージがセラミックス製であり、鋼製ブロックゲージの熱膨張係数は$(11.5\pm1)\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$、セラミックス製ブロックゲージの熱膨張係数は$(9.5\pm1)\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$であったとする。熱膨張係数の差の不確かさ $u(\delta\alpha)$は 、それぞれの熱膨張係数の不確かさ（区間の $1/\sqrt{3}$）の 2 乗和より求められ、

$$
\begin{aligned}
u(\delta\alpha) &= [u^2(\alpha_{\mathrm{S}}) + u^2(\alpha)]^{1/2} \\
&= [(1\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3 + (1\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})^2/3]^{1/2} \\
&= 0.816\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}
\end{aligned}
$$

と与えられる。また、一次の係数として用いられる$\delta\alpha_{\mathrm{ave}}$ は、熱膨張係数の中央値の差より、

$$
\delta\alpha_{ave} = 2.0\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}
$$

と与えられる。

（２）被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ：$u(\theta)$

ここでの被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ $u(\theta)$は、個々の校正ごとに実測された温度θ_{m} に対する不確かさである。この不確かさは、測定に使用している温度計の校正不確かさより求められる。前節と同様に校正証明書に記載されている拡張不確かさ $U_{\mathrm{T}}(k=2)= 0.03$ ℃であったとすると、温度偏差の不確かさ $u(\theta)$は、

$$
\begin{aligned}
u(\theta) &= u_{\mathrm{T}} \\
&= 0.015\ ℃
\end{aligned}
$$

と見積もられる。

（注１８）実際は、白金温度センサの自己加熱、被校正ブロックゲージへの温度センサの密着度、被校正ブロックゲージ内の温度分布による不確かさなどを考慮しなければいけない場合もある。

３．合成標準不確かさ

３．１ 熱膨張係数が同一のブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合（分類Ａ）

熱膨張係数が同一のブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合の標準不確かさの成分のまとめ例を表１に示す。

表１　熱膨張係数が同一で熱膨張補正を行わない場合の不確かさ成分のまとめ

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	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l) \equiv \lvert c_i \rvert u(x_i)$ (nm)
$u(l_S)$ $u(l_{S1})$ $u(l_{S2})$ (２本をﾘﾝｷﾞﾝｸﾞした場合) $u(l_{Sw})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの 20 ℃における長さ 標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの校正 標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの経年変化 ﾘﾝｷﾞﾝｸﾞされた標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞ	18.9 nm 15 nm 11.5 nm (28.5 nm)	１	18.9 (28.5)
$u(d)$ $u(d_1)$ $u(d_2)$ $u(d_3)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの寸法差測定 繰り返し測定 比較測定器の系統誤差 比較測定器の分解能	25.9 nm 10.0 nm 23.7 nm 2.9 nm	１	25.9
$u(\delta\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差[*1]	0.0132 ℃	$l_S\alpha_S$ (α_S =11.5×10^{-6} K^{-1})	$15.2\times10^{-8}\cdot l_S$
$u(\delta\alpha)u(\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差・ 被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差[*2]	0.816×10^{-6} K^{-1}・ 0.113 ℃	l_S	$9.22\times10^{-8}\cdot l_S$

*１：標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差の不確かさが(b)の場合

*２：被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさが(a)の場合

上記の個々の標準不確かさを式 2.8 に代入し、合成標準不確かさは次のようになる。ただし、l_S は nm の単位である。なお、リンギングされた標準ブロックゲージを用いる場合は、$u(l_S)$ = 18.9 nm を、$u(l_{Sw})$ = 28.5 nm に置き換える。

$$u_c(l) = [(18.9\ \text{nm})^2 + (25.9\ \text{nm})^2 + (15.2\times10^{-8}\times l_S)^2 + (9.22\times10^{-8}\times l_S)^2]^{1/2}$$

$$= [(32.1\ \text{nm})^2 + (17.8\times10^{-8}\cdot l_S)^2]^{1/2}$$

３．２ 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（分類Ｂ）

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（被校正ブロックゲージがセラミックス製の場合）の標準不確かさの成分のまとめ例を表２に示す。

表２　熱膨張係数が異なるが熱膨張補正を行わない場合の不確かさ成分のまとめ

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	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l) \equiv \vert c_i \vert u(x_i)$ (nm)
$u(l_S)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの 20 ℃における長さ	18.9 nm	1	18.9
$u(l_{S1})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの校正	15 nm		
$u(l_{S2})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの経年変化	11.5 nm		
$u(d)$	測定した標準及び被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの寸法差測定	25.9 nm	1	25.9
$u(d_1)$	繰り返し測定	10.0 nm		
$u(d_2)$	比較測定器の系統誤差	23.7 nm		
$u(d_3)$	比較測定器の分解能	2.9 nm		
$u(\delta\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差*1	0.0132 ℃	$l_S\alpha_S$ (α_S=11.5×10^{-6} K^{-1})	15.2×10^{-8}・l_S
$u(\delta\alpha)u(\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差*2・被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差*3	2.16×10^{-6} K^{-1}・0.113 ℃	l_S	24.4×10^{-8}・l_S
$u(\delta l)$	ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの変形の影響	0 nm	1	0

*１：標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差の不確かさが(b)の場合

*２：標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差の不確かさが(b)の場合

*３：被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさが(a)の場合

上記の個々の標準不確かさを式 2.9 に代入し、合成標準不確かさは次のようになる。ただし、l_S は nm の単位である。

$$u_c(l) = [(18.9\ \mathrm{nm})^2 + (\underline{25.9\ \mathrm{nm}})^2 + (15.2\times10^{-8}\times l_S)^2 + (24.4\times10^{-8}\times l_S)^2 + (0\ \mathrm{nm})^2]^{1/2}$$
$$= [(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (28.7\times10^{-8}\cdot l_S)^2]^{1/2}$$

３．３ 熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行う場合（分類Ｃ）

熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行う場合（被校正ブロックゲージがセラミックス製の場合）の標準不確かさの成分のまとめ例を表３に示す。

表３　熱膨張補正を行う場合の不確かさ成分のまとめ

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	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l) \equiv \lvert c_i \rvert u(x_i)$ (nm)
$u(l_S)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの 20 ℃における長さ	18.9 nm	1	18.9
$u(l_{S1})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの校正	15 nm		
$u(l_{S2})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの経年変化	11.5 nm		
$u(d)$	測定した標準及び被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの寸法差	25.9 nm	1	25.9
$u(d_1)$	繰り返し測定	10.0 nm		
$u(d_2)$	比較測定器の系統誤差	23.7 nm		
$u(d_3)$	比較測定器の分解能	2.9 nm		
$u(\delta\alpha)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差	0.816×10^{-6} K^{-1}	$l_S\theta_m$ ($\theta_m = (\theta_{ave}^2 + \sigma_\theta^2)^{1/2}$ ＝0.112 ℃)	$9.14 \times 10^{-8} \cdot l_S$
$u(\theta)$	被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差	0.015 ℃	$l_S\delta\alpha_{ave}$ ($\delta\alpha_{ave}$ =2.0× 10^{-6} K^{-1})	$3.00 \times 10^{-8} \cdot l_S$
$u(\delta\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差*1	0.0132 ℃	$l_S\alpha_S$ (α_S =11.5× 10^{-6} K^{-1})	$15.2 \times 10^{-8} \cdot l_S$
$u(\delta\alpha)u(\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差・被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差	0.816×10^{-6} K^{-1}・0.015 ℃	l_S	$1.22 \times 10^{-8} \cdot l_S$
$u(\delta l)$	ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの変形の影響	0 nm	1	0

＊１：標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差の不確かさが(b)の場合

上記の個々の標準不確かさを式 2.17 に代入し、合成標準不確かさは次のようになる。ただし、l_S は nm の単位である。

$$
\begin{aligned}
u_c(l) &= [(18.9\ \mathrm{nm})^2 + (\underline{25.9\ \mathrm{nm}})^2 + (9.14 \times 10^{-8} \times l_S)^2 + (3.00 \times 10^{-8} \times l_S)^2 \\
&\quad + (15.2 \times 10^{-8} \times l_S)^2 + (1.22 \times 10^{-8} \times l_S)^2 + (0\ \mathrm{nm})^2]^{1/2} \\
&= [(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (18.0 \times 10^{-8} \cdot l_S)^2]^{1/2}
\end{aligned}
$$

４．拡張不確かさ

拡張不確かさ(k =2)は、次のようになる。

４．１ 熱膨張係数が同一のブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行わない場合

$$U(k=2) = 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (17.8\times10^{-8}\cdot l_S)^2]^{1/2}$$

例:呼び寸法 100 mm のブロックゲージの場合

$$\begin{aligned} U(k=2) &= 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (17.8\times10^{-8}\times0.1\times10^9\ \mathrm{nm})^2]^{1/2} \\ &= 2\times\underline{36.7\ \mathrm{nm}} \\ &= \underline{0.074\ \mu\mathrm{m}} \end{aligned}$$

４．２ 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

$$U(k=2) = 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (28.7\times10^{-8}\cdot l_S)^2]^{1/2}$$

例:呼び寸法 100 mm のセラミックスブロックゲージの場合

$$\begin{aligned} U(k=2) &= 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (28.7\times10^{-8}\times0.1\times10^9\ \mathrm{nm})^2]^{1/2} \\ &= 2\times\underline{43.1\ \mathrm{nm}} \\ &= \underline{0.086\ \mu\mathrm{m}} \end{aligned}$$

４．３ 熱膨張係数が異なるブロックゲージを測定し、熱膨張補正を行う場合

$$U(k=2) = 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (18.0\times10^{-8}\cdot l_S)^2]^{1/2}$$

例:呼び寸法 100 mm のセラミックスブロックゲージの場合

$$\begin{aligned} U(k=2) &= 2\times[(\underline{32.1\ \mathrm{nm}})^2 + (18.0\times10^{-8}\times0.1\times10^9\ \mathrm{nm})^2]^{1/2} \\ &= 2\times\underline{36.8\ \mathrm{nm}} \\ &= \underline{0.074\ \mu\mathrm{m}} \end{aligned}$$

（注１９）上記では、l_S に呼び寸法の値を代入し計算している。

（注２０）４．２と４．３の違いは、結局、補正項 $l_S\theta_m\,\delta\alpha_{ave}$ に関する成分が不確かさに含まれているかいないかによる。ここでの計算例によれば、

$$\begin{aligned} l_S\theta_m\,\delta\alpha_{ave} &= l_S\mathrm{E}[\theta_m^{\,2}]^{1/2}\,\delta\alpha_{ave} \\ &= l_S\,(\theta_{ave}^{\,2} + \sigma_\theta^{\,2})^{1/2}\delta\alpha_{ave} \\ &= l_S\cdot(0.112\ ℃)\cdot(2.0\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}) \\ &= 22.4\times10^{-8}\cdot l_S\ \mathrm{nm} \end{aligned}$$

となる。

５．有効自由度の取扱い

５．１ 一般指針

信頼の水準約 95 %に対応する拡張不確かさの決定においては、原則的に以下の考え方を採用してよい。

・有効自由度ν_{eff}が 9 以上ある場合は、信頼の水準約 95 %を持つ区間の包含係数 k として 2 が採用可能。(JCSS 校正方法と不確かさに関する表現(JCG200) 5 項)

・タイプ B 評価された標準不確かさの自由度ν_{i}は、∞(無限大)と仮定可能。(GUM 付属書 G.4.3)

以下に、不確かさ要因毎の自由度に関する留意点を示す。

標準不確かさの成分 $u(x_{\mathrm{i}})$	不確かさの個別要因	自由度に関する留意点
$u(l_{\mathrm{S}})$ $u(l_{\mathrm{S1}})$ $u(l_{\mathrm{S2}})$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの 20 ℃における長さ 標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの校正 標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの経年変化	通常、これらの不確かさの自由度は、∞と考えればよい。ただし、外部校正機関の校正証明書に有効自由度ν_{eff}が記載されている場合はその値を用いる。
$u(d)$ $u(d_1)$ $u(d_2)$ $u(d_3)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの寸法差測定 繰り返し測定 比較測定器の系統誤差 比較測定器の分解能	実験に基づく不確かさ評価を行う場合は、測定回数を 10 回以上にすることにより、自由度を 9 以上とすることができる。また、プールされた実験標準偏差を利用し不確かさ評価することにより、被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの校正作業における測定回数を低減できる。
$u(\delta\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度差[*1]	温度評価の実験においては、10 個以上のデータを取得することにより自由度を 9 以上とすることができるが、実際には数多くのデータ（例えば 20 回以上）から不確かさ評価をすることが望ましい。また、時間、日、季節の変動を考慮した実験をすることが望ましい。これは、被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差：$u(\theta)$も同様である。
$u(\delta\alpha)u(\theta)$	標準ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞと被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの熱膨張係数の差・被校正ﾌﾞﾛｯｸｹﾞｰｼﾞの温度の 20 ℃からの偏差	二次項の自由度は、各標準不確かさの自由度が 9 以上であれば、同様に 9 以上であると考えてよい。

（参考）各要因の標準不確かさの自由度ν_{i}が全て 9 以上の場合は、有効自由度ν_{eff}が 9 以上となることが明らかであり、Welch-Satterthwaite の式（GUM 付属書 G.6.4）で有効自由度ν_{eff}を計算する必要はない。ただし、不確かさ評価文書には、この考え方により信頼の水準約 95 %を持つ区間の包含係数 k を 2 とした旨の表明は必要である。

５．２ 有効自由度ν_{eff}の計算

標準不確かさの自由度ν_{i}に 9 未満のものがあり、その標準不確かさが合成標準不確かさに対して支配的に寄与する場合は、Welch-Satterthwaite の式（GUM 付属書 G.6.4）により有効自由度ν_{eff}を計算する。

ただし、GUM には本事例で紹介している「二次項」及び「かたよりを補正せずに不確かさに含める場合」の有効自由度の具体的な計算方法について記載がなく、現在、確立した考えはない。ここでは、JCSS 等技術委員会長さ分科会で検討した現実的な対応方法を紹介する。

①二次項の自由度は、一方の不確かさ要因の自由度が 9 以上ならばそちらを（両方とも自由度が 9 以上ならば、自由度の大きい方を）係数として考え、もう一方の不確かさ要因の自由度を用いて計算する。ブロックゲージ比較校正の場合、二次項には必ず「熱膨張係数の不確かさ」或いは「熱膨張係数の差の不確かさ」のどちらかが入っており、ほとんどの場合はこれらをタイプ B としているため自由度∞となり、係数として考えることができる。

②偏りを補正せずに不確かさに考慮している場合（例えば、被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさで実測値から求めた平均値を不確かさに含めている場合）の自由度は、∞と考えて良いとする。

上記に基づき、具体的な計算例を示す。

ブロックゲージ校正の不確かさの評価式は２．１．２の式 2.8 とし、右辺第４項の二次項の自由度を考える。

$$u_{\mathrm{c}}^2(l) = u^2(l_{\mathrm{S}}) + u^2(d) + l_{\mathrm{S}}^2\alpha_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\theta) + l_{\mathrm{S}}^2u^2(\delta\alpha)u^2(\theta) \qquad \text{式 2.8(再提示)}$$

・標準ブロックゲージと被校正ブロックゲージの熱膨張係数の差の不確かさ：$u(\delta\alpha)$

この不確かさは、２．１．３（４）において JIS 規格値から矩形分布で評価されており、その自由度は∞と仮定できるので、前述の①を適用しこの不確かさは、有効自由度の計算において係数として扱う。（この不確かさの自由度は、ブロックゲージ校正の不確かさの有効自由度の計算では考慮しないことに注意。）

・被校正ブロックゲージの温度の 20 ℃からの偏差の不確かさ：$u(\theta)$

この不確かさは、２．１．３（５）(a)において 20 ℃からの平均偏差θ_{ave}0.05 ℃、その標準偏差σ_{ave}0.10 ℃及び温度測定の不確かさ（温度計の校正不確かさ）0.015 ℃の３つの要因で評価しているので、これらから有効自由度を求める。偏りを補正せずに不確かさとしている 20 ℃からの平均偏差θ_{ave}については、前述②を適用し自由度を∞とする。標準偏差σ_{ave}は計算に用いた自由度（データ数-1：ここでは 19 とする）を用いる。温度計の不確かさは上位校正機関からの校正証明書に包含係数は 2 とされていたとし自由度は∞とする。これら３つの要因の自由度から有効自由度を Welch-Satterthwaite の式で計算する。

合成標準不確かさ：　$u_{\mathrm{c}}(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + u_3^2(y) + \ldots + u_n^2(y)}$

有効自由度：

$$\nu_{\mathrm{eff}} = \frac{u_{\mathrm{c}}^4(y)}{\sum_{i=1}^{n}\frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_{\mathrm{c}}^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{\nu_1} + \frac{u_2^4(y)}{\nu_2} + \frac{u_3^4(y)}{\nu_3} + \ldots + \frac{u_n^4(y)}{\nu_n}}$$

したがって、

$$\nu_{\text{eff-u}(\theta)} = \frac{0.113^4}{\dfrac{0.05^4}{\infty}+\dfrac{0.10^4}{19}+\dfrac{0.015^4}{\infty}}$$

=30.9

・ブロックゲージ校正の不確かさの有効自由度の計算

他の標準不確かさとともに二次項も含めた、ブロックゲージ校正の不確かさの有効自由度を計算する。

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{c}}^4(y)}{\sum_{i=1}^{n}\dfrac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_{\text{c}}^4(y)}{\dfrac{u_1^4(y)}{\nu_1}+\dfrac{u_2^4(y)}{\nu_2}+\dfrac{u_3^4(y)}{\nu_3}+\ldots+\dfrac{\left(L_S u(\delta\alpha)u(\theta)\right)^4}{\underset{\uparrow\ \text{二次項の自由度}}{30.9}}}$$

（注２１）「支配的に寄与する」の意味については、「JCSS 校正方法と不確かさに関する表現(JCG200)」の 5.7 注記を参照のこと。

以上

参考　比較測定器の系統誤差の不確かさの低減方法

１．比較測定器の系統誤差による不確かさの低減

比較測定器の系統誤差の評価（事例２の２．１．３（２）②項）において、使用される基準微小段差（2 本のブロックゲージで構成する微小段差）は、トレーサビリティの観点からその不確かさの考慮が必要となる。基準微小段差の不確かさを考慮する場合、通常、ブロックゲージの絶対寸法校正不確かさの$\sqrt{2}$倍（2 本のブロックゲージを使用するため）の不確かさを計上するため、系統誤差の不確かさ評価における基準微小段差の不確かさが大きく影響を与える。この影響を低減するため、次のような対応方法がある。

①　基準微小段差の段差値を直接校正し不確かさを低減させる方法

光波干渉測定法により基準微小段差の段差値を直接校正することにより、小さな不確かさで基準微小段差が利用できる。このガイドの作成時において、光波干渉測定法による基準微小段差の値付けができ、外部からの校正依頼の受付可能な機関は、産業技術総合研究所のみである。なお、JCSS 技術的要求事項適用指針（JCT20102 長さ：ブロックゲージ、各種長さ測定用校正器で測定面が平面であるもの（光波干渉測定法による））では、2 本のブロックゲージで構成する微小段差も JCSS 登録対象であることを記述している。従って、将来的に微小段差の校正事業者が JCSS 登録されれば、JCSS 校正も可能となる。

② 多数の基準微小段差を使用して不確かさを低減させる方法

多数の基準微小段差を使用して系統誤差を評価する方法を用いることにより、絶対寸法を JCSS 校正されたブロックゲージで構成された基準微小段差を用いても、小さな不確かさで評価が可能となる。評価方法の詳細は２項のとおりである。この評価方法は、参考文献をもとに JCSS 等技術委員会長さ分科会で検討し、より現実的な方法として提示している。数学的により厳密な評価法に関しては、参考文献をご参照のこと。なお、参考文献の評価法では、過小評価となる場合もあるので注意が必要である。

参考文献：

a）細谷肇，眞下寛治, 尾藤洋一, 榎原研正：ブロックゲージ比較測長器のかたよりに対する不確かさ評価の高精度化手法の提案, 2010 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集
b）尾藤洋一, 榎原研正：既知のかたよりを補正しない場合の不確かさ評価に関する一考察, 精密工学会誌掲，74，6，604-610（2008）
c）尾藤洋一, 細谷肇, 眞下寛治, 榎原研正：既知のかたよりを補正しない場合の不確かさ評価（第２報）, 精密工学会誌，76，9，1036-1042（2010）

（参考）

参考文献の a）及び c）は、「群馬県立群馬産業技術センター　研究報告　平成 22 年度」に転載されており、以下の URL から確認が可能である。

http://www.tec-lab.pref.gunma.jp/research/report/

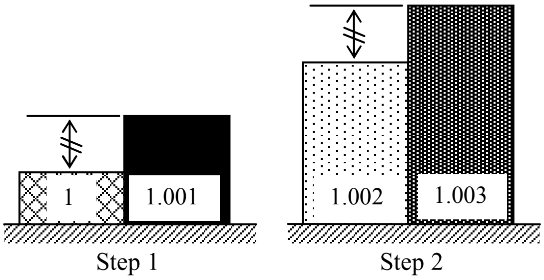
２．多数の基準微小段差を使用して基準微小段差の不確かさを低減させる方法

２．１　多数の基準微小段差を使用した不確かさの低減の考え方

比較測定器の系統誤差評価（事例２：２．１．３．（２）②節）において、一つの段差値（例えば 1 μm）における偏差値（かたより値）を、多数の基準微小段差の平均値を用いて求めることにより、基準微小段差そのものに起因する不確かさを低減することができる。不確かさ低減の考え方は以下のとおりである。組み合わせを独立なものとするか、独立でないものとするかによりその評価方法に違いがあるが、どちらの評価も利用可能である。

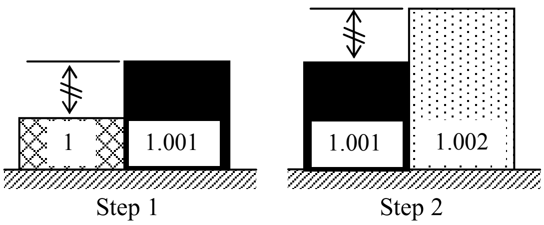
独立な組み合わせ：ある段差値（基準微小段差）を、複数のブロックゲージを用いて多数構成する際に、同一のブロックゲージが他の組み合わせで使用されないことをいう。例えば、1 μm の基準微小段差に（1 mm, 1.001 mm）と（1.002 mm, 1.003 mm）の組み合わせを用いる場合。

$$(\text{基準微小段差の不確かさを}\frac{1}{\sqrt{\text{組み合わせ数}}}\text{倍にできる})$$



独立でない組み合わせ：ある段差値（基準微小段差）を、複数のブロックゲージを用いて多数構成する際に、同一のブロックゲージが標準器側と被校正品側の両方に使用（基準微小段差の構成に２回使用）されていることをいう。例えば、1 μm の基準微小段差に（1 mm, 1.001 mm）と（1.001 mm, 1.002 mm）の組み合わせを用いる場合。

$$(\text{基準微小段差の不確かさを}\frac{1}{\text{組み合わせ数}}\text{倍にできる})$$



① 用語の定義

ブロックゲージ寸法（校正値）：l_G

ブロックゲージの校正値の不確かさ：u_G

ブロックゲージ校正値の誤差（未知の値）：Γ

基準段差の真値（未知の値）：λ

基準微小段差の測定値：x

基準微小段差の誤差：γ

基準微小段差の不確かさ：u_{ref}

基準微小段差の測定値とブロックゲージの校正値から計算された値との偏差(かたより)：D
比較測定器の誤差（未知の値、かたよりの真値）：Δ

（注１）この参考においては、GUM の付属書 H.1 にあわせブロックゲージ寸法を記号 l で表しているが、１項の参考文献では異なる記号（ブロックゲージ寸法：L、基準微小段差値：l）で表されていることに注意。

② 1 つの基準微小段差の不確かさ

基準微小段差（例えば 1 μm）を構成する 2 本のブロックゲージを a, b とし、その寸法をそれぞれ l_{Ga} と l_{Gb} とする。比較測定器の標準器側に a、被校正側に b として段差を測定すると、かたよりの測定値（基準微小段差の測定値とブロックゲージの校正値から計算された値との偏差）$D_{1\mu\mathrm{m}}$ ($D_{b\text{-}a}$)は、

$$
\begin{aligned}
D_{1\mu\mathrm{m}} = D_{b\text{-}a} &= x_{b\text{-}a} - (l_{Gb} - l_{Ga}) \\
&= (\lambda_{b\text{-}a} + \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}}) - (\lambda_{b\text{-}a} + \Gamma_b - \Gamma_a) \\
&= \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}} - (\Gamma_b - \Gamma_a) \qquad \text{式 R1}
\end{aligned}
$$

と表せる。式 R1 の右辺第 2 項は、かたよりの測定値 $D_{1\mu\mathrm{m}}$ に含まれる基準微小段差の誤差 $\gamma_{1\mu\mathrm{m}}$ に相当する。

$$\gamma_{1\mu\mathrm{m}} = \Gamma_b - \Gamma_a \qquad \text{式 R2}$$

式 R2 の両辺を二乗して期待値をとると、

$$\mathrm{E}[\gamma_{1\mu\mathrm{m}}^2] = \mathrm{E}[\Gamma_b^2] + \mathrm{E}[\Gamma_a^2] \qquad (\because\ \Gamma_a、\Gamma_b \text{ は相関がない})$$

となり、誤差の期待値の推定値が不確かさであることから、

$$u_{ref}^2 = u_G^2 + u_G^2 = 2\,u_G^2 = (\sqrt{2}\,u_G)^2 \qquad \text{式 R3}$$

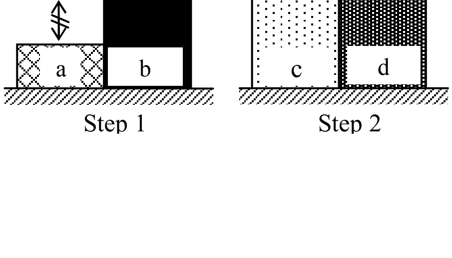
と表される。

したがって、1 つの基準微小段差の不確かさ u_{ref} は、ブロックゲージの校正不確かさ u_G の $\sqrt{2}$ 倍であり、1 組のブロックゲージ対（=2 本のゲージ）の不確かさを表している。

③ 独立な組み合わせの基準微小段差の場合

a. 2 組の独立な基準微小段差

同じ段差値となる独立な 2 組の基準微小段差を利用した場合、4 本のブロックゲージを用意し、1 組目の基準微小段差として比較測定器の標準器側に a、被校正側に b として段差を測定し、さらに 2 組目として標準器側に c、被校正側に d として段差を測定する。



それぞれの基準微小段差の測定値と校正値との偏差（かたより）は、

1 組目　$D_{b\text{-}a} = x_{b\text{-}a} - (l_{Gb} - l_{Ga})$　　式 R4
2 組目　$D_{d\text{-}c} = x_{d\text{-}c} - (l_{Gd} - l_{Gc})$　　（$D_{d\text{-}c}$ も 1 μm 付近）　　式 R5

となる。ここで、式 R4 と式 R5 の平均値 $\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}$ を考えると、

$$\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}} = \frac{D_{b-a} + D_{d-c}}{2}$$

$$= \frac{\left[x_{b-a} - \left(l_{Gb} - l_{Ga}\right)\right] + \left[x_{d-c} - \left(l_{Gd} - l_{Gc}\right)\right]}{2}$$

$$= \frac{\left[\left(\lambda_{b-a} + \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}}\right) - \left(\lambda_{b-a} + \Gamma_b - \Gamma_a\right)\right] + \left[\left(\lambda_{d-c} + \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}}\right) - \left(\lambda_{d-c} + \Gamma_d - \Gamma_c\right)\right]}{2}$$

$$= \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}} - \frac{\left(\Gamma_b - \Gamma_a\right) + \left(\Gamma_d - \Gamma_c\right)}{2} \qquad \text{式 R6}$$

と表せる。式 R6 の右辺第 2 項は、かたよりの測定値の平均値 $\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}$ に含まれる基準微小段差の誤差成分 $\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}$ に相当する。

$$\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}} = \frac{\left(\Gamma_b - \Gamma_a\right) + \left(\Gamma_d - \Gamma_c\right)}{2} \qquad \text{式 R7}$$

式 R7 の両辺を二乗して期待値をとると、

$$\mathrm{E}[\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}] = \frac{\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{b}}^2] + \mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{a}}^2] + \mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{d}}^2] + \mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{c}}^2]}{4}$$

となり、さらに不確かさを用いて次のように表せる。

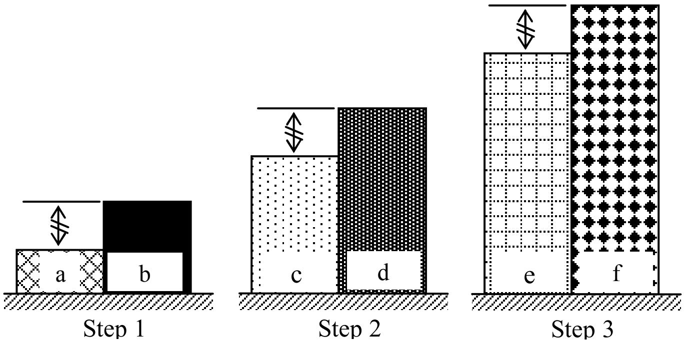
$$u_{ref}^2 = \frac{u_G^2 + u_G^2 + u_G^2 + u_G^2}{4} = \frac{4u_G^2}{4} = \left(\frac{\sqrt{2}u_G}{\sqrt{2}}\right)^2 \qquad \text{式 R8}$$

したがって、1 つの段差値に 2 組の独立な基準微小段差の平均値を利用するとその不確かさは、1 組のゲージ対の不確かさ $\sqrt{2}u_G$ の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍となる。

b. 3 組の独立な基準微小段差

3 組の独立な基準微小段差の場合も a.と同様に、基準微小段差の誤差 $\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(3組)}}$ は次のように表せる。

$$\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(3組)}} = \frac{\left(\Gamma_b - \Gamma_a\right) + \left(\Gamma_d - \Gamma_c\right) + \left(\Gamma_f - \Gamma_e\right)}{3} \qquad \text{式 R9}$$



式 R9 の両辺を二乗して期待値をとると、

$$\mathrm{E}[\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(3組)}}]=\frac{\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{b}}^2]+\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{a}}^2]+\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{d}}^2]+\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{c}}^2]+\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{f}}^2]+\mathrm{E}[\Gamma_{\mathrm{e}}^2]}{9}$$

となり、不確かさを用いて次のように表せる。

$$u_{ref}^2=\frac{u_G^2+u_G^2+u_G^2+u_G^2+u_G^2+u_G^2}{9}=\frac{6u_G^2}{9}=\left(\frac{\sqrt{2}u_G}{\sqrt{3}}\right)^2 \qquad \text{式 R10}$$

したがって、1 つの段差値に独立な N 組の基準微小段差を利用するとその不確かさは、1 つの段差（ゲージ対）の不確かさ $\sqrt{2}u_G$ の $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 倍になる。

最終的に、事例２：２．１．３．（２）②節で述べた比較測定器の系統誤差評価の不確かさ $u(d_2)$は、例えば±5 μm の範囲（1 μm ステップ）で、各段差値ごとに N 組の独立な基準微小段差を用いたとすると、

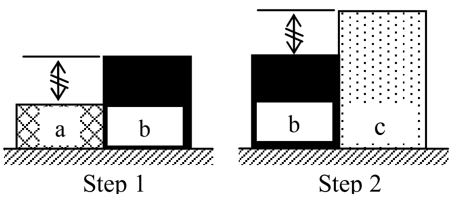
$$u^2(d_2)=\text{平均値 } D_{\mathrm{ave}}{}^2+\text{標準偏差 } \sigma_{\mathrm{D}}{}^2+\text{基準微小段差の不確かさ}^2$$
$$=D_{\mathrm{ave}(\pm 5\,\mu\mathrm{m})}{}^2+\sigma_{\mathrm{D}(\pm 5\,\mu\mathrm{m})}{}^2+\left(\frac{\sqrt{2}u_G}{\sqrt{N}}\right)^2 \qquad \text{式 R11}$$

と求められる。

④ 独立でない組み合わせの基準微小段差の場合

a. 2 組の独立でない基準微小段差

1 つの段差値に独立でない 2 組の基準微小段差を利用した場合、1 組目の基準微小段差として比較測定器の標準器側に a、被校正側に b として段差を測定し、さらに 2 組目として標準器側に b、被校正側に c として段差を測定する。



それぞれの基準微小段差の測定値と校正値との偏差（かたより）は、

1 組目　$D_{b\text{-}a} = x_{b\text{-}a} - (l_{Gb} - l_{Ga})$　式 R4

2 組目　$D_{c\text{-}b} = x_{c\text{-}b} - (l_{Gc} - l_{Gb})$　（$D_{c\text{-}b}$ も 1 μm 付近）　式 R12

となる。ここで、式 R4 と式 R12 の平均値 $\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}'$ を考えると、

$$\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}' = \frac{D_{b-a} + D_{c-b}}{2}$$

$$= \frac{[x_{b-a} - (l_{Gb} - l_{Ga})] + [x_{c-b} - (l_{Gc} - l_{Gb})]}{2}$$

$$= \frac{[(\lambda_{b-a} + \Delta_{1\mu m}) - (\lambda_{b-a} + \Gamma_b - \Gamma_a)] + [(\lambda_{c-b} + \Delta_{1\mu m}) - (\lambda_{c-b} + \Gamma_c - \Gamma_b)]}{2}$$

$$= \Delta_{1\,\mu\mathrm{m}} - \frac{(\Gamma_c - \Gamma_a)}{2} \qquad \text{式 R13}$$

と表せる。式 R13 の右辺第 2 項は、かたよりの測定値の平均値 $\overline{D_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}'$ に含まれる基準微小段差の誤差成分 $\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}'$ に相当する。

$$\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}' = \frac{(\Gamma_c - \Gamma_a)}{2} \qquad \text{式 R14}$$

式 R14 の両辺を二乗して期待値をとると、

$$\mathrm{E}[\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(2組)}}'^2] = \frac{\mathrm{E}[\Gamma_\mathrm{c}^2] + \mathrm{E}[\Gamma_\mathrm{a}^2]}{4}$$

となり、さらに不確かさを用いて次のように表せる。

$$u_{ref}^2 = \frac{u_G^2 + u_G^2 +}{4} = \frac{2u_G^2}{4} = \left(\frac{\sqrt{2}u_G}{2}\right)^2 \qquad \text{式 R15}$$

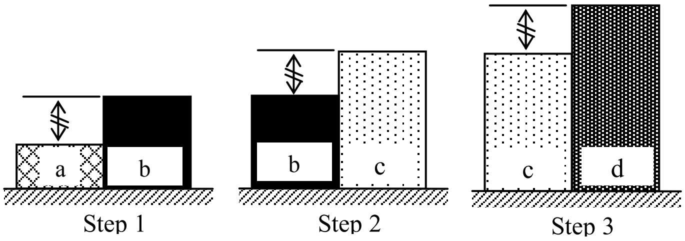
したがって、独立な段差を 4 組使った場合と同等の不確かさとなる。

b. 3 組の独立でない基準微小段差

3 組の独立な基準微小段差の場合も a.と同様に、基準微小段差の誤差 $\overline{\gamma_{1\,\mu m(３組)}}'$ は次のように表せる。

$$\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(3組)}}' = \frac{(\Gamma_b - \Gamma_a) + (\Gamma_c - \Gamma_b) + (\Gamma_d - \Gamma_c)}{3}$$

$$= \frac{(\Gamma_d - \Gamma_a)}{3} \qquad \text{式 R16}$$



式 R16 の両辺を二乗して期待値をとると、

$$\mathrm{E}[\overline{\gamma_{1\,\mu\mathrm{m}(3組)}}'^{2}] = \frac{\mathrm{E}[\mathit{\Gamma}_{\mathrm{e}}^{2}] + \mathrm{E}[\mathit{\Gamma}_{\mathrm{a}}^{2}]}{9}$$

となり、不確かさを用いて次のように表せる。

$$u_{ref}^{2} = \frac{u_G^2 + u_G^2}{9} = \frac{2u_G^2}{9} = \left(\frac{\sqrt{2}u_G}{3}\right)^2 \qquad \text{式 R17}$$

独立な段差を 9 組使った場合と同等の不確かさとなる。

したがって、1 つの段差値に独立でない段差を N 組使うと N^2 組の独立な段差を使った場合と同じ、$\sqrt{2}u_G$ の $\dfrac{1}{N}$ 倍になる。

最終的に、事例２：２．１．３．（２）②節で述べた比較測定器の系統誤差評価の不確かさ $u(d_2)$は、例えば±5 μm の範囲（1 μm ステップ）で、各段差値ごとに N 組の独立でない基準微小段差を用いたとすると、

$$u^2(d_2) = D_{\mathrm{ave}(\pm 5\,\mu\mathrm{m})}'^{2} + \sigma_{\mathrm{D}(\pm 5\,\mu\mathrm{m})}'^{2} + \left(\frac{\sqrt{2}u_G}{N}\right)^2 \qquad \text{式 R18}$$

と求められる。

２．２評価方法例

　ここでは、２．１項で紹介した２つの多数の基準微小段差を利用する方法のうち、より少ない実験で不確かさの低減が可能な「独立でない組み合わせによる評価」について、その具体的な評価手順を示す。

①JCSS校正されたブロックゲージを準備する。
　＜使用するブロックゲージの例＞
　呼び寸法：1 mm, 1.001 mm, 1.002 mm, 1.003 mm, 1.004 mm, 1.006 mm, 1.008 mm

②独立でない多数の基準微小段差の組み合わせを作り、比較測定器で全ての段差を測定する。
　各段差測定の繰り返しは、比較測定器の繰り返し測定の不確かさが無視できる程度の測定回数で行う。

表１：独立でない多数の基準微小段差の組み合わせ

基準微小段差の寸法	組み合わせ No.			
	Ⅰ		Ⅱ	
	標準器側	被校正品側	標準器側	被校正品側
-4 μm	1.004 mm	1 mm	1.008 mm	1.004 mm
-3 μm	1.003 mm	1 mm	1.006 mm	1.003 mm
-2 μm	1.002 mm	1 mm	1.004 mm	1.002 mm
-1 μm	1.001 mm	1 mm	1.002 mm	1.001 mm
0 μm	1 mm	1 mm	-	-
+1 μm	1 mm	1.001 mm	1.001 mm	1.002 mm
+2 μm	1 mm	1.002 mm	1.002 mm	1.004 mm
+3 μm	1 mm	1.003 mm	1.003 mm	1.006 mm
+4 μm	1 mm	1.004 mm	1.004 mm	1.008 mm

（参考）
・この例では、段差範囲±4 μmの組み合わせとしているが、実際のブロックゲージ校正手順等から範囲を決定する。
・基準微小段差の段差寸法毎の組み合わせの数Nが、不確かさ低減に寄与することを考慮し、組み合わせ数（この例では2組）を決定する。(参考の２．２⑤項を参照)
・基準微小段差の組み合わせ方は、表1以外でも可能である。(参考の２．３項を参照)
・繰り返し測定の不確かさが無視できる程度の測定回数とは、繰り返し性評価結果（事例２の２．１．３（２）①項のプールされた実験標準偏差）を、√(一組の基準微小段差での測定回数n×段差組み合わせ数N)で除した値が、他の不確かさと比較して十分小さいことを示している。例えば、繰り返し測定の不確かさが0.01 μmで、比較測定器の系統誤差の評価を測定回数5回、段差組み合わせ2組とした場合以下のとおりである。

$$\text{系統誤差の評価における繰り返しの不確かさ}=\text{繰り返し性評価結果}/\sqrt{n\times N}$$

$$=0.01\ \mu\text{m}/\sqrt{\text{測定回数５回}\times\text{段差組み合わせ２組}}$$

$$=\underline{0.0032\ \mu\text{m}\quad\text{（無視可）}}$$

・0 μmの測定については、繰り返し測定の不確かさ評価のデータ（事例２の２．１．３（２）①項）を代用しても良い。例えば、この実験で用いる2本のブロックゲージの上位校正機関の校正値が標準器側+0.01 μm と被校正側+0.02 μm で、繰り返し性評価データの平均値（標準器の補正がされていない値）が+0.015 μmであった場合、補正した平均値+0.005 μm(=0.015 μm- (0.02 μm -0.01 μm))を代用データとする。ただし、比例誤差分を持つような比較測定器の場合、0 μm（呼び寸法が同じ2本のゲージ）の測定データを使用しないと、比例

誤差が重畳してしまうので注意が必要である。

③基準微小段差毎にかたより値の平均値を求める。

表２：基準微小段差毎のかたより値の平均値計算例

基準微小段差の寸法	組み合わせ No.毎のかたより値（=測定値ー標準値）		各段差寸法でのかたより値の平均値
	Ⅰ	Ⅱ	
-4 μm	0.004 μm	0.006 μm	0.005 μm
-3 μm	○○ μm	○○ μm	-0.007 μm
-2 μm	○○ μm	○○ μm	-0.004 μm
-1 μm	○○ μm	○○ μm	0.009 μm
0 μm	0.005 μm	-	0.005 μm
+1 μm	○○ μm	○○ μm	-0.006 μm
+2 μm	○○ μm	○○ μm	0.007 μm
+3 μm	○○ μm	○○ μm	-0.005 μm
+4 μm	○○ μm	○○ μm	0.009 μm
		平均値 D_{ave}	0.0014 μm
		標準偏差 σ_D	0.0068 μm

（注２）標準値は、2本のブロックゲージの校正値から求めた値。

（注３）組み合わせNo.毎のかたより値は、n回の繰り返し測定の平均値。この例では５回の繰り返し測定の平均値を想定している。

④比較測定器のかたより値の不確かさを求める。

＜表２のデータを用いた計算＞

$$\text{かたより値} = \sqrt{(\text{平均値}D_{ave}{}^2+\text{標準偏差}\sigma_D{}^2)} = \sqrt{[(0.0014\ \mu\text{m})^2+(0.0068\ \mu\text{m})^2]} = \underline{0.0069\ \mu\text{m}}$$

⑤ブロックゲージの校正の不確かさ（2本分）を段差毎の組み合わせ数Nで除して、基準微小段差の不確かさを求める。

＜ブロックゲージ校正の拡張不確かさ(k=2)が0.03 μmとした場合の計算例＞

$$\text{基準微小段差の不確かさ} = \sqrt{\{2\times[\text{ブロックゲージ校正の拡張不確かさ}\ /2]^2\}/N} = \sqrt{\{2\times[(0.03\ \mu\text{m})/2]^2\}/2\text{組}} = \underline{0.0106\ \mu\text{m}}$$

⑥比較測定器の系統誤差の不確かさを、かたより値及び基準微小段差の不確かさの合成により決定する。

＜④項と⑤項の値による計算例＞

$$\text{比較測定器の系統誤差の不確かさ} = \sqrt{[(0.0069\ \mu\text{m})^2+(0.0106\ \mu\text{m})^2]} = \underline{0.0126\ \mu\text{m}}$$

２．３基準微小段差の組み合わせ例

基準微小段差に次のブロックゲージを使用した場合の組み合わせ例を紹介する。

呼び寸法：1 mm, 1.001 mm, 1.002 mm, 1.003 mm, 1.004 mm, 1.005 mm, 1.006 mm, 1.007 mm, 1.008 mm, 1.009 mm（10 本）

（参考）

・呼び寸法が1.01 mmのブロックゲージを組み合わせに含めると、独立でない組み合わせにおいても2組の5 μmの基準微小段差ができる。
・呼び寸法は、上記以外（例えば、0.991 mmから0.999 mmのセット）でも可能。
・段差値ごとに採用する組み合わせの数が異なる場合は、参考の２．１③、④の式はそのまま使用できないので注意。
・また、段差値ごとに採用する組み合わせの数を揃えるために、独立でない組み合わせの段差を 2 種類独立に用意するなどして評価も可能だが、独立な組み合わせと独立でない組み合わせが混在するため、参考の２．１とは異なる基準微小段差の不確かさ評価が必要となる。
・呼び寸法の組み合わせが同じブロックゲージでも、別のブロックゲージ同士の組み合わせであれば、両者は独立な段差として考えられる。

① 独立な組み合わせ例

表３：独立な 1 μm 段差（最大 5 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.009	1.008
	1.007	1.006
	1.005	1.004
	1.003	1.002
	1.001	1
＋	1.008	1.009
	1.006	1.007
	1.004	1.005
	1.002	1.003
	1	1.001

表４：独立な 2 μm 段差（最大 4 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.007	1.005
	1.006	1.004
	1.003	1.001
	1.002	1
＋	1.005	1.007
	1.004	1.006
	1.001	1.003
	1	1.002

表５：独立な 3 μm 段差（最大 4 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.009	1.006
	1.005	1.002
	1.004	1.001
	1.003	1
＋	1.006	1.009
	1.002	1.005
	1.001	1.004
	1	1.003

表６：独立な 4 μm 段差（最大 4 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.007	1.003
	1.006	1.002
	1.005	1.001
	1.004	1
＋	1.003	1.007
	1.002	1.006
	1.001	1.005
	1	1.004

表７：独立な 5 μm 段差（最大 5 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.009	1.004
	1.008	1.003
	1.007	1.002
	1.006	1.001
	1.005	1
＋	1.004	1.009
	1.003	1.008
	1.002	1.007
	1.001	1.006
	1	1.005

② 独立でない組み合わせ例

表８：独立でない 1 µm 段差（最大 9 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.009	1.008
	1.008	1.007
	1.007	1.006
	1.006	1.005
	1.005	1.004
	1.004	1.003
	1.003	1.002
	1.002	1.001
	1.001	1
＋	1.008	1.009
	1.007	1.008
	1.006	1.007
	1.005	1.006
	1.004	1.005
	1.003	1.004
	1.002	1.003
	1.001	1.002
	1	1.001

表９：独立でない 2 µm 段差（最大 4 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.008	1.006
	1.006	1.004
	1.004	1.002
	1.002	1
＋	1.006	1.008
	1.004	1.006
	1.002	1.004
	1	1.002

表１０：独立でない 3 µm 段差（最大 3 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.009	1.006
	1.006	1.003
	1.003	1
＋	1.006	1.009
	1.003	1.006
	1	1.003

表１１：独立でない 4 μm 段差（最大 2 組合わせ）

符号	標準器側/mm	被校正品側/mm
－	1.008	1.004
	1.004	1.000
＋	1.004	1.008
	1.000	1.004

以上

今回の改正のポイント

◇文書名の「校正手法の区分（呼称)」を「校正手法の区分の呼称」に変更。
◇事例 2　式番号及び注釈番号を変更。
◇事例 2　2.1.3(2)② 評価例及び注 8 の記述を変更。一様分布による評価に関する注釈を削除。
◇事例 2　2.1.3(2)　$u(d)$の値を変更。
◇事例 2　2.1.3(5)　注 14 に温度の実験に関する注記を追加。
◇事例 2　3. 表１、表２及び表３の数値を変更。
◇事例 2　4. 拡張不確かさの数値を変更。
◇事例 2　5. 有効自由度の取扱いを追加。
◇参考　比較測定器の系統誤差の不確かさ低減方法を追加。
（全文追加の事例 2 の 5 項及び参考を除き、変更点には下線が付してあります。）