

現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第3報)*

—低熱膨張ブロックゲージを用いた温度補正の評価—

大 西 徹** 高 瀬 省 徳** 高 増 潔***

Study on Improvement Methods of CMM (Coordinate Measuring Machine) in Workshop Environment
— Evaluation of Temperature Correction Using Low-expansion Gauge Block —

Tohru OHNISHI, Shotoku TAKASE and Kiyoshi TAKAMASU

In recent years, the CMM (Coordinate Measuring Machine) quickly has been spreading in the manufacturing industry. With this phenomenon, the environmental condition and installation site of CMMs has been changed from the temperature control room to the workshop environment and the production line without air conditioning. However, even in severe environment the demand to high accuracy measurements by CMM has been enhancing still more. Therefore, the methods to evaluate and realize the high accuracy measurements by CMM in workshop environment have been investigated. In this paper, we clarify the factor of scale error and propose the effect and correction method of temperature measurement errors using scale error of CGB (Low-expansion Ceramics Gauge Block) and MGB (Metal Gauge Block).

Key words: CMM, coordinate measuring machine, workshop environment, temperature measurement error

1. 緒 言

三次元測定機（座標測定機, Coordinate Measuring Machine, 以下 CMM）は、機械部品の三次元形状、寸法、位置などを測定するために、広く機械産業分野で利用されている測定機であり、CMM の高精度化は、品質保証のうえで必要不可欠な要求である。生産システムが、グローバル化していく中で、部品を国際的に発注、受注することが生産の効率化において重要となり、CMM による測定は、測定室や恒温室で使われている状況から広く工場や生産現場（以下、現場環境）で使われるようになってきている。一方、このようなシステムでは、部品の設計、加工、組立工程を通して、品質保証を効率的に行い測定の不確かさを評価することが、コスト面からも重要な技術となっている¹⁾。

CMM を利用した測定における不確かさの評価については、多くの研究があるが CMM の精度評価、幾何学誤差の補正、測定戦略の影響などが大部分で、測定環境の影響を考慮したものは少ない。しかし、現場環境で CMM を使う場合には、温度、振動、ゴミ、供給空気などの環境の影響や校正方法、経年変化などの管理方法が問題となる。本研究では、現場環境で CMM を使う場合に問題となる要因を解析し、問題解決のための提案を行うことにより、現場環境における三次元測定機の高度化を行うことを目標にする²⁾³⁾。

第1報²⁾では温度変化による不確かさについて検討し、温度ドリフトを補正する方法を提案した。第2報³⁾では CMM の 21 個の幾何学誤差のうち、寄与率が高く、現場環境で校正

可能と考えられる直角誤差について検討し、簡易で短時間に現場環境で CMM の直角誤差を評価するとともに、補正する方法を提案してきた。

CMM に対しては、複雑な構造のため温度の時間的、空間的な変化によるたわみなどの変形のモデル化や有限要素法解析が行われ、温度変化により変形が生じない構造の研究が行われている。また、実際の CMM の温度変形を実験的に評価し、モデルとの比較や補正方法の提案も行われているが、比較的高精度の CMM が対象で、比較的良好な温度環境で行われている研究が大部分であり、現場環境に着目して温度を広い範囲で評価している研究はない^{4)~8)}。

ブロックゲージの寸法測定を行いその誤差を評価する目盛誤差は、従来は CMM のスケール精度、プローブ径補正などの静的な精度評価に使われていた。しかし、温度環境の悪い現場環境では温度補正の影響が最も大きいため、目盛誤差を評価することで温度測定の誤差および温度補正の効果を評価することができる。

温度補正の効果を評価するには、スケールとワークの温度補正の両方を評価する必要がある。ワークの温度補正に関しては、高精度な温度計か、熱膨張係数の分っているブロックゲージがあれば評価することができる。しかし、スケールの温度補正に関しては、評価することが難しい。方法として、スケールに高精度な温度計を取り付けることが考えられるが一般のユーザでは難しい。また、高精度な温度計や熱膨張係数の分っているブロックゲージがあっても、スケールとワークの温度補正の分離ができない。そこで、低熱膨張のブロックゲージがあれば、スケールだけの温度補正の評価ができる。

本報では、目盛誤差の要因となる誤差の検討を行うとともに、現場環境に置かれた CMM について、低熱膨張セラミック製ブロックゲージ（以下 CBG）の目盛誤差からスケールの

* 原稿受付 平成 21 年 7 月 9 日

** 正 会 員 (財) 機械振興協会 技術研究所 (東京都東久留米市八幡町 1-1-12)

*** 正 会 員 東京大学工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

温度補正に関して実験的に評価した。また、鋼製のブロックゲージ（以下 MBG）の目盛誤差からワークの温度補正に関して実験的に評価し、スケールとワークの温度計を補正する手法を提案した。

2. 目盛誤差の要因となる温度測定誤差の分析

2.1 熱膨張補正の基本式の分析

式 (1) に示すワークの長さの計測値 L_w は、スケールの読み L_s にスケールの熱膨張補正、ワークの熱膨張補正を行ったものである。また、式 (2) に示す目盛誤差 E は、ワークの計測長さ L_w とワークの長さの校正值 L_c との差を比率で表したものである。ここで、 a_s と a_w はスケールおよびワークの熱膨張係数、 t_s と t_w はスケールおよびワークの温度である。

$$L_w = L_s(1 + a_s(t_s - 20) - a_w(t_w - 20)) \quad (1)$$

$$E = \frac{L_w - L_c}{L_c} = \frac{L_s(1 + a_s(t_s - 20) - a_w(t_w - 20)) - L_c}{L_c} \quad (2)$$

目盛誤差 E は、 L_w の持つ誤差を評価している。 L_w の持つ誤差として、以下の誤差が考えられる。スケールの誤差として

- a_s の誤差：スケールの熱膨張係数の誤差
- t_s の誤差：スケールの温度測定の誤差（倍率誤差およびオフセット誤差）
- L_s の誤差：スケールが持っている倍率誤差

ワーク測定の誤差として

- a_w の誤差：ワークの熱膨張係数の誤差
- t_w の誤差：ワークの温度測定の誤差（倍率誤差およびオフセット誤差）
- L_c の誤差：ワークの校正值の誤差

ここで、スケールに関する誤差のうち、 a_s の誤差および t_s の倍率誤差は温度が変化するとき同じ効果が現れ、 L_s の誤差と t_s のオフセット誤差も同様に同じ効果を持ちそれぞれ区別できない。ワークに関する誤差のうち、 a_w の誤差と t_w の倍率誤差および L_c の誤差と t_w のオフセット誤差はスケールに関する誤差と同様に区別できない。また、測定するワークがブロックゲージの場合、 L_c の校正值および a_w の値は高精度で分かっているとみなせるので、誤差はないと仮定して、温度計の誤差として以下の 4 つを考えることとする。

- dk_s （等価スケール温度係数誤差）：スケールの温度測定 t_s の倍率誤差とスケールの熱膨張係数の誤差が含まれる
- dt_{s0} （スケールオフセット誤差）：スケールの温度測定 t_s のオフセット誤差とスケールの倍率誤差が含まれる
- dk_w （等価ワーク温度係数誤差）：ワークの温度測定 t_w の倍率誤差とワークの熱膨張係数の誤差が含まれる
- dt_{w0} （ワークオフセット誤差）：ワークの温度測定 t_w のオフセット誤差とワークの校正誤差が含まれる

2.2 温度測定誤差の分析

ここで、 t_s および t_w をスケールおよびワークの正しい温度とすると、式 (3) に示すように測定温度 t_s^* および t_w^* は、それぞれ等価スケール温度係数誤差 dk_s 、スケールオフセット誤差 dt_{s0} 、等価ワーク温度係数誤差 dk_w 、ワークオフセット誤差 dt_{w0} を含むことになり、目盛誤差 E を記述できる。

$$\begin{aligned} t_s^* &= (1 + dk_s)t_s + dt_{s0}, & t_w^* &= (1 + dk_w)t_w + dt_{w0} \\ E &= \frac{L_w - L_c}{L_c} = \frac{L_s(1 + a_s(t_s^* - 20) - a_w(t_w^* - 20)) - L_c}{L_c} \\ &= a_s dt_{s0} + a_s dk_s(t_s - 20) - a_w dt_{w0} - a_w dk_w(t_w - 20) \end{aligned} \quad (3)$$

低熱膨張のブロックゲージを測定する場合、目盛誤差 E_C は、 $a_w = 0$ で以下のように表すことができる（式 (4)）。

$$\begin{aligned} E_C &= \frac{L_w^* - L_c}{L_c} = \frac{L_s(1 + a_s(t_s^* - 20)) - L_c}{L_c} \\ &= a_s dt_{s0} + a_s dk_s(t_s - 20) \end{aligned} \quad (4)$$

そこで、式 (5) に示すように低熱膨張のブロックゲージに対して、2 つの温度 t_{s1} と t_{s2} で求めた目盛誤差 E_{C1} と E_{C2} から温度計の等価スケール温度係数誤差 dk_s とスケールオフセット誤差 dt_{s0} を求めることができ、スケールの温度計を補正することができる。

$$\begin{aligned} E_{C1} &= a_s dt_{s0} + a_s dk_s(t_{s1} - 20), & E_{C2} &= a_s dt_{s0} + a_s dk_s(t_{s2} - 20) \\ dk_s &= \frac{E_{C2} - E_{C1}}{a_s(t_{s2} - t_{s1})}, & dt_{s0} &= \frac{E_{C2}(t_{s1} - 20) - E_{C1}(t_{s2} - 20)}{a_s(t_{s2} - t_{s1})} \end{aligned} \quad (5)$$

次に、式 (5) で求めた、 dk_s および dt_{s0} により補正した t_s を使い、普通（鋼製）のブロックゲージの目盛誤差 E_M を、2 つ以上の複数の温度において測定し、評価することで、ワークの温度計の等価ワーク温度係数誤差 dk_w およびワークオフセット誤差 dt_{w0} を推定することができる。ワークの温度計を補正することができる（式 (6)、(7)）。

$$\begin{aligned} t_w^* &= (1 + dk_w)t_w + dt_{w0} \\ E_M &= \frac{L_w^* - L_c}{L_c} = \frac{L_s(1 + a_s(t_s - 20) - a_w(t_w^* - 20)) - L_c}{L_c} \\ &= -a_w dt_{w0} - a_w dk_w(t_w - 20) \end{aligned} \quad (6)$$

$$dk_w = -\frac{E_{M2} - E_{M1}}{a_w(t_{w2} - t_{w1})}, dt_{w0} = -\frac{E_{M2}(t_{w1} - 20) - E_{M1}(t_{w2} - 20)}{a_w(t_{w2} - t_{w1})} \quad (7)$$

2.3 温度測定誤差のまとめ

以上の分析の結果、温度変化のある環境で目盛誤差を評価することで、温度測定の誤差を分析できることが分かった。以下にまとめる。

- (1) 目盛誤差の誤差要因を分析し、スケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差、ワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差とワークオフセット誤差が要因と仮定できることを示した。
- (2) 低熱膨張のブロックゲージの 2 つ以上の温度における目盛誤差から、スケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差を評価でき、スケール温度計の補正を行うことができる。
- (3) スケール温度計の補正を行った状態で、普通（鋼製）のブロックゲージの 2 つ以上の温度における目盛誤差から、ワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差とワークオフセット誤差を評価することができ、ワーク温度計の補正が可能になる。

3. 温度測定誤差の評価実験

3.1 実験条件の設定

CBG（熱膨張係数： $a_C = (0 \pm 0.02) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ （ 20°C において））と MBG（熱膨張係数： $a_M = (10.8 \pm 0.5) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）を CMM の X 軸および Y 軸に平行に並べて設置した。CMM 付属の温度

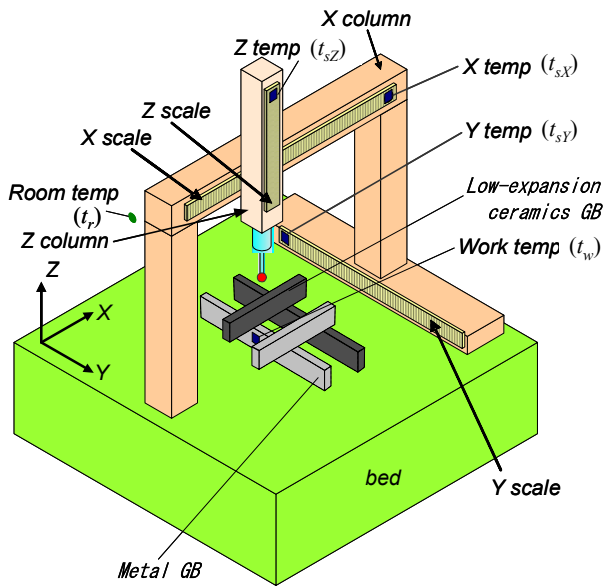


Fig. 1 Arrangement of metal gauge blocks (MBG), low expansion ceramic gauge blocks (CBG) and thermometers on the CMM

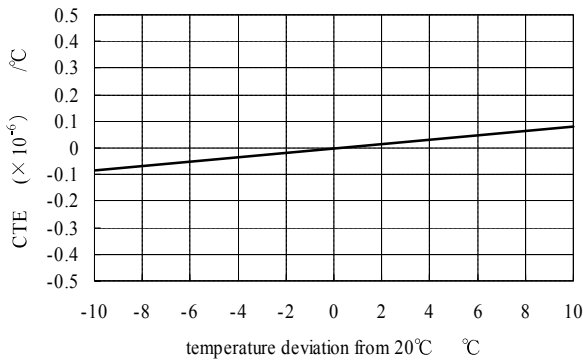


Fig. 2 Temperature dependence of coefficient of thermal expansion on CBG

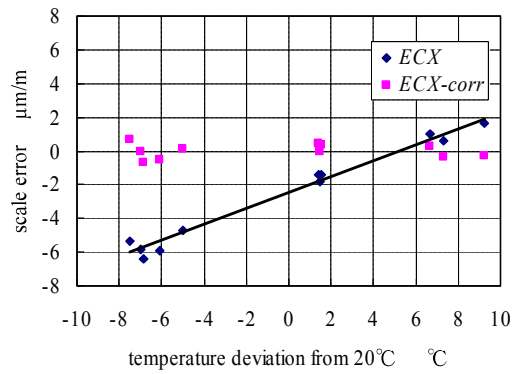
計 (温度精度: $\pm 0.3^\circ\text{C}$) は, X 軸スケール (熱膨張係数: $a_s = 10.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) の右側, Y 軸スケールの後側, Z 軸スケールの上側にそれぞれ取り付けられ, ワーク温度計が 1 個用意されている. ワーク温度計は, Y 軸に設置した MBG の中央に取り付けた. また, 室温用に CMM 付属の温度計とは別の温度計 (温度精度: $\pm 0.07^\circ\text{C}$) を設置した. そのときの CBG, MBG および温度計の配置の関係を図 1 に示す.

- t_w CMM 付属のワーク温度
- t_{sX} CMM 付属の X スケール温度
- t_{sY} CMM 付属の Y スケール温度
- t_{sZ} CMM 付属の Z スケール温度
- t_r 室内温度

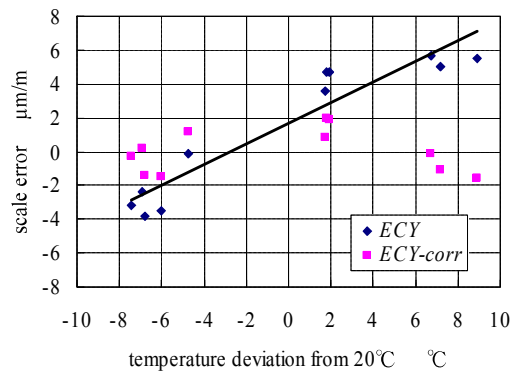
X 軸に CBG と MBG の 600mm, Y 軸に CBG と MBG の 800mm を設置したときの, それぞれの記号を以下のように定義する.

- E_{CX} X 軸方向に設置した CBG の目盛誤差
- E_{CY} Y 軸方向に設置した CBG の目盛誤差
- E_{MX} X 軸方向に設置した MBG の目盛誤差
- E_{MY} Y 軸方向に設置した MBG の目盛誤差

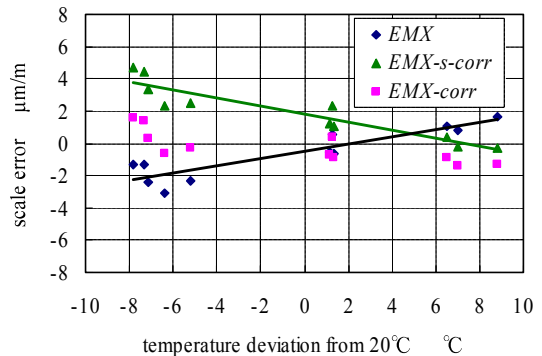
CBG の熱膨張係数の温度依存性を図 2 に示す⁹⁾. この図から CBG の熱膨張係数は 20°C において, $a_C = 0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である



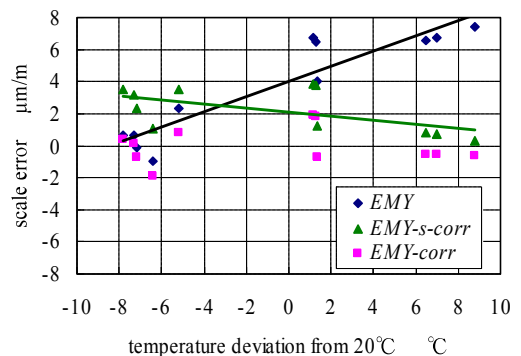
(a) scale error of CBG on X axis



(b) scale error of CBG on Y axis



(c) scale error of MBG on X axis



(d) scale error of MBG on Y axis

Fig. 3 Scale error before and after correction of thermometers of scale and work

が、20℃からの偏差が10℃あると、 $a_C = 0.08 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度になっていることが確認できる。そこで、CBGの熱膨張係数の温度依存性については、式(4)に熱膨張係数の温度依存性を補正する項を追加することによって補正した(式(8))。

$$E_C = a_s dt_{s0} + a_s dk_s (t_s - 20) - a_c t_w \quad (8)$$

3.2 温度計の補正

2章に基づいて、日にちを変えて20℃からの偏差が-8℃から+9℃程度までの11種類における目盛誤差 E_{CX} と E_{CY} から、XおよびYスケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差の評価を行い、目盛誤差 E_{CX} と E_{CY} に対して、XおよびYスケール温度計の補正を行った($E_{CX-corr}$, $E_{CY-corr}$)。また、XおよびYスケール温度計の補正を行った状態で($E_{CX-s-corr}$, $E_{CY-s-corr}$)、目盛誤差 E_{MY} から、ワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差とワークオフセット誤差の評価を行い、目盛誤差 E_{MX} と E_{MY} に対して、ワーク温度計の補正を行った($E_{MX-corr}$, $E_{MY-corr}$)。結果を図3に示す。これらの図から、20℃からの偏差によって目盛誤差が変化していることが分かった。CBGの目盛誤差 E_{CX} と E_{CY} およびMBGの目盛誤差 E_{MX} と E_{MY} は、スケール温度計とワーク温度計を2章の式(4), (5), (6)および(7)に基づいて補正することにより、目盛誤差を最大7.4 $\mu\text{m}/\text{m}$ から2 $\mu\text{m}/\text{m}$ 以下へ減少させることができた。表1に補正のために求めたX, Yスケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差およびワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差とワークオフセット誤差を示す。

3.3 温度補正結果の検証

等価スケール温度係数誤差に関して分析を行う。等価スケール温度係数誤差は、スケール温度計の倍率誤差とスケールの熱膨張係数の誤差、さらに、CBGの熱膨張係数の誤差を含んでいる。スケール温度計の倍率誤差とスケールの熱膨張係数の誤差については、分離して評価できなくてもスケール温度計の等価スケール温度係数誤差による補正を行なうことができるが、CBGの熱膨張係数の不確かさは、分離して評価できないと等価スケール温度係数誤差による補正に影響を与える。しかし、CBGの熱膨張係数の不確かさは、 $0.02 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ で10℃の温度変化に対して0.02 $\mu\text{m}/\text{m}$ 程度である。次に、スケールオフセット誤差に関して分析を行う。スケールオフセット誤差は、スケール温度計のオフセット誤差とスケールの倍率誤差を含んでいる。しかし、これらを分離して評価できなくてもスケール温度計のスケールオフセット誤差による補正を行なうことができる。

CMM付属の温度計に関して分析を行う。図4にY軸に設置したMBGのCMM付属のワーク温度 t_w とその隣に設置したCMM付属の温度計とは別の温度計(温度精度: $\pm 0.07^\circ\text{C}$)のワーク温度 t_{wY} の1日間の変化を示す。また、図5にCMM付属のワーク温度 t_w とワーク温度 t_{wY} の相関図を示す。これらの図から、CMM付属のワーク温度測定 t_w の倍率誤差は小さく、10℃の温度変化に対して0.01℃程度である。これに対して、オフセット誤差は0.170℃であることが確認できる。また、目盛誤差 E_{MY} から、ワーク温度計の評価を行ったワークオフセット誤差とCMM付属のワーク温度 t_w とワーク温度 t_{wY} の相関図から求めた、CMM付属のワーク温度計のオフセット誤差との差は0.026℃となり、よく一致した。さらに、相関図から求めた、ワーク温度 t_w と実際のワーク温度 t_w とは、0.03℃以

Table 1 Result of magnification error and offset error of thermometers on X scale, Y scale and work

	X scale	Y scale		Work
dk_s	0.046	0.058	dk_w	-0.011
dt_{s0} (°C)	-0.236	0.160	dt_{w0} (°C)	0.196

Table 2 Result of scale error and standard deviation before and after correction of thermometers of scale and work; unit is $\mu\text{m}/\text{m}$

	before correction		after correction	
	scale error	Standard deviation	scale error	Standard deviation
E_{CX}	-6.4	3.04	0.7	0.43
E_{CY}	5.6	4.04	1.9	1.31
E_{MX}	-3.4	1.84	2.4	1.48
E_{MY}	7.4	3.25	1.8	1.41

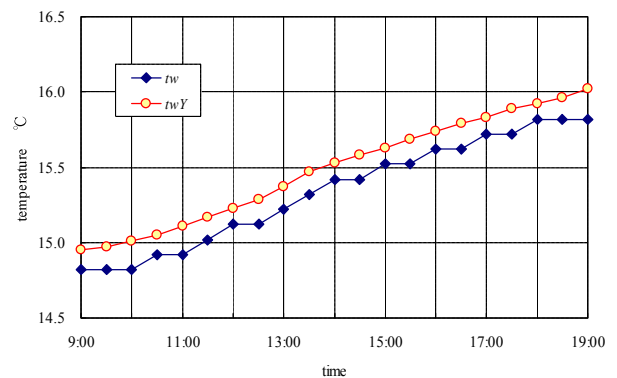


Fig. 4 Variation of work temperatures of MBG on Y axis t_w and t_{wY} in a day

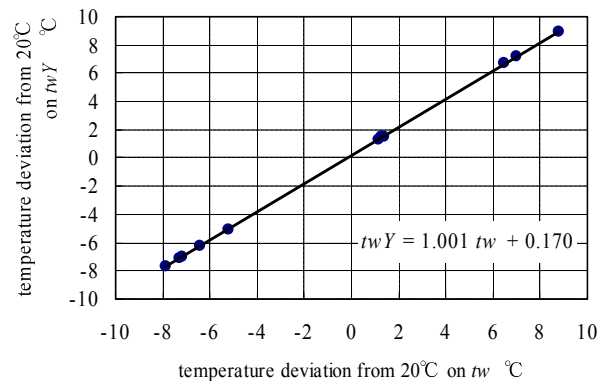


Fig. 5 Correlation diagram of work temperatures of MBG on Y axis t_w and t_{wY}

内で一致した。これらのことから、CMM付属の温度計の温度精度($\pm 0.3^\circ\text{C}$)は、ほとんどがオフセット誤差であり、温度計の倍率誤差および測定の際のばらつき等は、少ないことが分かった。

等価ワーク温度係数誤差に関して分析を行う。等価ワーク温度係数誤差は、ワーク温度計の倍率誤差とワークの熱膨張係数の誤差を含んでいる。ワークの熱膨張係数の誤差は、測定する測定物によって変わるので、これらを分離して評価できなければ、ワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差による補正はできない。また、MBGの熱膨張係数の不確かさは、 $0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ で10℃の温度変化に対して0.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ 程度もある。これらのことから、ワーク温度計の等価ワーク温度係数誤差による補正は困難であることが分かった。次に、ワークオフ

セット誤差に関して分析を行う。ワークオフセット誤差は、ワーク温度計のオフセット誤差とワークの校正値誤差を含んでいる。これらを分離して評価できなければ、ワーク温度計のワークオフセット誤差による補正に影響を与える。ワークの校正値誤差は $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 程度あるが、ワークオフセット誤差と CMM 付属のワーク温度計のオフセット誤差とはよく一致していることから、普通（鋼製）のブロックゲージの目盛誤差から、ワーク温度計のワークオフセット誤差の補正が可能であることが分かった。

これらのことを踏まえて、スケールとワークの温度計を補正する前と後の最大目盛誤差と標準偏差を表 2 に示す。これらの結果から、スケールとワークの温度計を補正することにより、目盛誤差とその標準偏差は小さくなり、Y 軸に平行においた CBG の目盛誤差 E_{CY} では、 $5.6\mu\text{m}/\text{m}$ 、標準偏差 $4.04\mu\text{m}/\text{m}$ であった最大目盛誤差が $1.9\mu\text{m}/\text{m}$ 、標準偏差 $1.31\mu\text{m}/\text{m}$ へ減少し、また、MBG の目盛誤差 E_{MY} では、 $7.4\mu\text{m}/\text{m}$ 、標準偏差 $3.25\mu\text{m}/\text{m}$ であった最大目盛誤差が $1.8\mu\text{m}/\text{m}$ 、標準偏差 $1.41\mu\text{m}/\text{m}$ へ減少することが確認できた。

個々のブロックゲージの熱膨張係数を高精度に測定し、その値を付けた熱膨張係数付のブロックゲージも提供されており、その不確かさは、 $0.035 \times 10^{-6}/\text{C}$ である¹⁰⁾。このブロックゲージを使用すれば、等価ワーク温度係数誤差のワーク温度計の倍率誤差とワークの熱膨張係数の誤差を分離し、ワーク温度計の倍率誤差による補正も可能である。しかし、前述したようにワーク温度計の倍率誤差は少ないため、改善効果も少ないと考えられる。

4. 結 言

現場環境における CMM の高度化における問題点として、目盛誤差の要因となる誤差を熱膨張補正の誤差として分析を行った。また、現場環境に置かれた CMM の CBG の目盛誤差からスケール温度計を評価するとともに、MBG の目盛誤差からワーク温度計を評価し、これらの温度計を補正することの有効性を確認した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 低熱膨張のブロックゲージの目盛誤差からスケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差を評価し、さらに、普通（鋼製）のブロックゲージの目盛誤差からワーク温度計のワークオフセット誤差を評価することにより、スケールとワークの温度計の補正が可能となり、目盛誤差を減少させることができることを示した。
- (2) 本研究に用いた CMM 付属の温度計の温度精度を決めて

いる要因は、ほとんどがオフセット誤差であり、温度計の倍率誤差と測定の際のばらつき等は、少ないことを指摘した。

- (3) スケール温度計の等価スケール温度係数誤差とスケールオフセット誤差およびワーク温度計のワークオフセット誤差を評価した値を補正值として、温度補正を行なうことの有効性を実験により確認した。

今後は、現場環境の問題点である振動、ゴミ、空気などの環境の影響や校正方法、温度計の設置位置、ブローピングシステムの評価などの管理方法について検討し、現場環境の CMM の高度化を目指す。

謝 辞

この研究は、競輪の補助金を受けて行われたこと、また、この研究の一部は（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けた（独）産業技術総合研究所の協力を得て行ったことを付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高増潔：バーチャル三次元測定機計測，計測と制御，**40**, 11 (2001) 801.
- 2) 大西徹，高瀬省徳，高増潔：現場環境における三次元測定機の高度化（第 1 報）－温度ドリフトの評価および補正－，精密工学会誌，**73**, 2 (2007) 270.
- 3) 大西徹，高瀬省徳，高増潔：現場環境における三次元測定機の高度化（第 2 報）－直角誤差補正－，精密工学会誌 **73**, 7 (2007) 818.
- 4) A. Balsamo, D. Marques, S. Sartori, A Method for Thermal-Deformation Corrections of CMMs, Annals of the CIRP 39/1, 1990, 557.
- 5) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, Compensation of Static and Transient Thermal Errors on CMMs, Annals of the CIRP 50/1, 2001, 377.
- 6) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, B. Schacht, Interaction between workpiece and CMM during geometrical quality control in non-standard thermal conditions, Precision Engineering 26, 2002, 93.
- 7) M.H. Attia, S. Fraser, A generalized modelling methodology for optimized real-time compensation of thermal deformation of machine tools and CMM structures, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, 1001.
- 8) 阿部誠，高増潔，大園成夫，沢辺雅二：空間座標の比較測定による CMM の構成（第 1 報）－パラメトリックエラーモデルの構成とそのシミュレーション－，精密工学会誌，**66**, 3, (2000), 483.
- 9) 野瀬哲郎，高橋史明，中林正史，森田英彦，小杉展正：超低熱膨張セラミックス“NEXCERA”，新日鉄技報 第 374 号 (2001) 6.
- 10) Mitutoyo Information 《Gauge Block》 No.4.