

大型鍛鋼品の寸法検査へのレーザートラッカーの適用と不確かさ評価

Application of Laser Tracker for Dimensional Inspection
of Large Forgings and Its Uncertainty Evaluation大矢 卓寛
Takahiro Ohya坂口 智洋
Tomohiro Sakaguchi仁村 弘樹
Hiroki Nimura

要 旨

寸法検査は、顧客図面仕様の準拠を証明するために品質保証上極めて重要である。ISO/TC 213 が開発している、GPS（製品の幾何特性仕様）規格に代表される様に、製品形状に関連する要求は近年詳細かつ厳しくなっている。巻尺等の従来の簡易測定器による寸法検査の測定値の精度は、検査員の技量、技能に大きく依存する。そこで当社では、厳しい寸法要求をより確実に満足するため、ポータブル 3 次元座標測定機であるレーザートラッカー Leica AT960-LR を導入し、その結果工場内至る所で高精度での寸法測定の実施が可能となった。

3 次元座標測定機による特定形状の寸法測定の不確かさは、タスク固有の不確かさ（Task specific uncertainty）であり、測定数、測定部位、測定データの評価方法などの測定戦略が不確かさに影響を与えるため、その評価は容易ではない。またレーザートラッカーによる、大型鍛鋼製品の 3 次元寸法測定の不確かさの評価の報告例は少ない。そこで本報告では、簡易測定器との不確かさの比較、ならびにベストフィット形体のパラメータの不確かさを解析的な誤差伝搬と Monte Carlo 法を用いて評価した。その結果、レーザートラッカーの適用によって、測定の不確かさを小さくできることが分かり、信頼性の高い寸法測定に寄与できると結論付けられた。

— Synopsis —

Dimensional inspection is essentially important to prove conformance to specifications of customers' drawings in terms of quality assurance. Requirements concerning geometry of products are getting detailed and strict as represented by GPS (Geometrical Product Specifications) standards currently being developed by ISO/TC 213.

The accuracy of measurement value highly relies on the skill and ability of inspectors as to dimensional inspection by conventional simple measuring equipment such as steel tape measure. In order to satisfy strict geometrical requirements with confidence, we have introduced a portable 3D coordinate measuring machine, Leica Laser Tracker AT960-LR, which enables to perform dimensional inspection everywhere in machine shops with high accuracy.

The uncertainty for the measurements of specific configurations by 3D coordinate measuring machine, what is called Task specific uncertainty, is challenging to evaluate since the uncertainty depends on the measuring strategy, namely the number of data points to obtain, the location of data points and the evaluation method of obtained data points, etc. Few studies have been reported concerning the uncertainty evaluation for laser tracker measurements of large and complex forgings. Here we compare the uncertainty between the laser tracker and the conventional simple measuring equipment and evaluate the uncertainty of parameters of the best-fit feature by the analytical error propagation and Monte Carlo method. As a result, it is concluded that introduction of the laser tracker can reduce the measuring uncertainty and contribute to reliable dimensional measurements.

1. 緒 言

当社では、外径が7mを超えるシェル、ノズル一体型ヘッド等、大型で複雑形状の鍛鋼製品を多く製造している。巻尺、マイクロメータ、テンプレート等による簡易測定器による寸法検査の測定値の精度は、検査員の技量、技能に大きく依存する。また製品によっては、定盤への設置、昇引作業が必要となる場合もある。

ISO/TC 213が開発しているGPS（製品の幾何特性仕様）規格に代表される様に、製品形状に関連する要求は近年詳細かつ厳しくなっている。場合によっては、当社製品に対し、ISO14253に従った、測定の不確かさの評価や、寸法公差に不確かさを考慮した上で合否判定を行う要求が適用されることがある。

そこで、このような厳しい寸法測定要求に対応するため、当社ではポータブル3次元座標測定機であるレーザートラッカーLeica AT960-LRを導入した。本報告では簡易測定器である巻尺との不確かさの比較、ならびに誤差行列による解析的な誤差伝搬、Monte Carlo法（MCM）を用い、ベストフィット形体のパラメータの不確かさについて議論した。そして大型鍛鋼品の寸法測定にレーザートラッカーを適用し、寸法測定の信頼性について評価した。

2. レーザートラッカーの原理

レーザートラッカーは、再帰反射性ターゲットを継続的にレーザーで追跡し、3次元座標を測定できるポータブルなシステムである。レーザートラッカーはターゲットの光学中心の水平方向、垂直方向の角度ならびに距離を測定する。今回導入したLeica AT960の場合、角度は角度エンコーダー、距離はAIFM（Absolute Interferometer）により⁽¹⁾極座標として3次元座標を測定することができる。

Leica AT960は、ターゲットとして一般的なSMR（Spherically Mounted Retroreflector）である1.5inch Red Ring Reflector（RRR）でなく、T-Probeというアームレス、ワイヤレスのタッチプローブがあり、T-Probeに埋め込まれたLEDとレーザートラッカーのカメラによりT-Probeの6自由度の姿勢を認識することで、SMRでは測定が困難であった入り組んだ形状や深部も測定することができる。図1にLeica AT960システムを示す。

測定は測定面に対してプローブを接触させるだけで可能であり、固定測定モードの場合、1点の測定値は（サンプリングレート）×（測定時間）だけ測定された多点の平均値である。サンプリングレートは1000点/sec.、Stationary Fastモードでは約0.5 sec.の測定時間のため、1点の測定値は約500点の平均値であり、またその

RMS（Root Mean Square）が70 μ mより大きい場合は自動的に棄却される様に設定されている。よって測定時のプローブの不安定性、振動、風の影響等による測定誤差を低減することができる。



図1 Leica AT960 システム

3. レーザートラッカー精度

Leica AT960の仕様によれば、絶対距離 L （m）（レーザートラッカーと測定対象の距離）における、RRRを使用した場合の1点の精度 U_{RRR} （ μ m）は

$$U_{RRR}=15+6L \quad \text{式(1)}$$

とされ、直交座標系の各方向の最大許容誤差に相当する。これは、包含係数 $k=2$ の拡張不確かさ、すなわち95%信頼区間に相当すると考えられる。

また、T-Probeを使用した場合の1点の精度 $U_{T-Probe}$ （ μ m）は、上記の不確かさに35 μ mを加算する必要がある、

$$U_{T-Probe}=50+6L \quad \text{式(2)}$$

となる^{(1),(2)}。

2点間距離測定の場合は、上記の各1点の不確かさ U を合成し、 $\sqrt{U^2+U^2}=\sqrt{2}U$ と表現できる。

そこで、実際の測定環境での精度を評価するために、製品の測定と同一の環境における2点間距離精度の評価を実施した。

基準として、公称1000mmのスケールバーを用い、絶対距離 L を種々変更し、スケールバー校正値とレーザートラッカーによる測定値を比較した。ターゲットはRRRならびにT-Probe（200mmスタイラスエクステンション）を使用し、各絶対距離 L で両端をそれぞれ10回ずつ測定し、 10^2 の測定値の組み合わせから標準偏差の2倍である 2σ を評価し、表1と図2に示す。図2の破線はLeica仕様に基づく最大許容誤差である。

表1 絶対距離と測定精度、ばらつきの関係

絶対距離 L (m)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
RRR	誤差平均値 (μm)	27.1	9.6	3.7	8.6	-4.2	26.4	31.2	5.7	14.9
	2σ (μm)	3.4	7.8	14.6	20.8	18.7	24.4	39.9	62.8	68.7
T-Probe	誤差平均値 (μm)	12.1	69.3	23.8	13.0	39.6	12.1	-21.8	23.0	8.8
	2σ (μm)	43.9	46.6	64.6	61.5	68.3	81.2	76.1	93.1	108.3

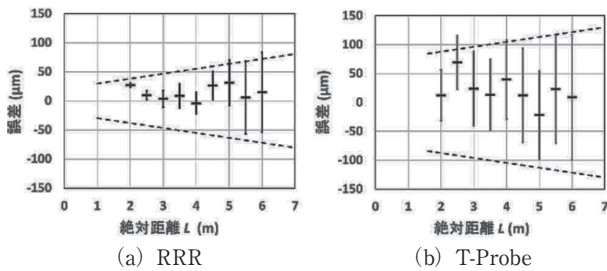


図2 絶対距離と測定精度、ばらつきの関係

2σ は L の増加に伴い大きくなっており、誤差平均値にはばらつきが見られる。RRRについてLeica仕様は、弊社測定環境における95%信頼区間として極めて妥当なものであることが分かった。

T-Probeの場合は、Leica仕様は必ずしも95%信頼区間として妥当とは言えないが、これはスタイラスエクステンション長さや測定環境の影響のためと考えられる。しかし、実際の使用上問題となる精度の差ではないと評価できる。

4. 従来測定方法との比較

前章において、レーザートラッカーの2点間距離精度が検証できたため、シェルの高さ寸法測定について、従来の方法である巻尺による測定と、レーザートラッカー(T-Probe)による測定を比較した。同形状のシェル6製品(内径 ϕ 4200mm)を対象とし、図3にシェル高さ測定の様式図を、表2に測定結果を示す。

表2の結果から、巻尺、レーザートラッカーによる測定結果には大きな差は見られない。巻尺の最小目盛は1mmであるのに対し、レーザートラッカーは $1\mu\text{m}$ 以下まで測定結果を表示できる。従って、レーザートラッカーの適用によって分解能を著しく向上させることができる。不確かさについては6章で詳細に評価する。

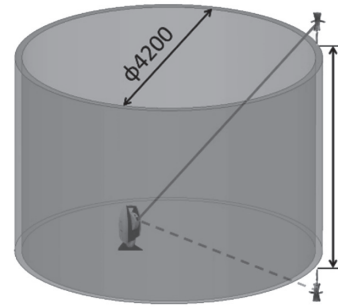


図3 シェル高さ測定

表2 シェル高さ測定結果の比較

製品	高さ測定結果 (mm)	
	巻尺	レーザートラッカー (T-Probe)
No.1	2867.0	2866.761
No.2	2867.0	2866.771
No.3	2867.0	2866.755
No.4	2867.0	2866.855
No.5	2867.0	2866.727
No.6	2866.0	2865.839

5. 不確かさ評価の方法

不確かさ評価のためには、測定結果に影響を与える主要な要素をすべてピックアップし合成する必要がある。

本報告では、測定対象長さが大きいため、

- ・機器の精度、検定公差
- ・機器の分解能
- ・熱膨張

を支配的な不確かさ要素であると判断した。

5.1 熱膨張の不確かさの取扱い

製品の幾何特性仕様及び検証に用いる標準基準温度は 20°C である⁽³⁾ため、測定対象の温度が 20°C と異なる場合には補正が必要である。

本報告では、製品内の温度差、ばらつきについては製品が十分大きく、測定時間が短いため無視できるものとする。

レーザートラッカー測定の場合、測定した製品温度と製品の熱膨張係数から温度補正を実施する必要がある。この場合の熱膨張補正量 d の数学モデルは、

$$d = l \alpha_w T_w \quad \text{式 (3)}$$

となり、熱膨張の不確かさ u_T は

$$u_T^2 = l^2 T_w^2 u^2(\alpha_w) + l^2 \alpha_w^2 u^2(T_w) \quad \text{式 (4)}$$

と表現できる⁽⁴⁾。

ここで、 l は測定対象長さ、 T_w は製品温度の20℃からの偏差、 α_w は製品の熱膨張係数である。 $u(\cdot)$ は各パラメータの不確かさである。

一方、巻尺での測定の場合、製品との温度慣らしを十分に行い、温度補正は行わない。巻尺の社内検定は20℃に温度管理された室内で実施している。巻尺と製品の熱膨張係数の差は小さいため、現場での巻尺使用時の20℃からの温度差よりも、巻尺と製品の温度差が小さいことが重要となる。

この場合の熱膨張に起因する長さ d の数学モデルは、

$$d = l(T_w \delta\alpha + \alpha_s \delta T) \quad \text{式 (5)}$$

ここで T_w は製品の20℃からの偏差、 $\delta\alpha$ は製品と巻尺の熱膨張係数の差、 α_s は巻尺の熱膨張係数、 δT は製品と巻尺の温度差である。

熱膨張の標準不確かさ u_T は、 $\delta\alpha \sim \delta T \sim 0$ とみなし、

$$u_T^2 = l^2 T_w^2 u^2(\delta\alpha) + l^2 \alpha_s^2 u^2(\delta T) \quad \text{式 (6)}$$

と表現できる⁽⁵⁾。

5.2 測定戦略に依存する不確かさ

3次元座標測定機による、特定形状の寸法測定の不確かさはタスク固有の不確かさ (Task specific uncertainty) であり、測定数、測定部位、測定データの評価方法などの測定戦略が不確かさに影響を与える⁽⁶⁾。本報告では、最小二乗法によるベストフィット形体 (円、球) パラメータ (中心点、半径) の不確かさについて、

(1) GUM⁽⁵⁾に従う不確かさの伝播則を用いた誤差行列による解析的評価

(2) モンテカルロ法 (MCM) による評価

の2つの方法を用いて不確かさを算出した。

(1) GUMに従う不確かさの伝播則を用いた誤差行列による解析的評価

最小二乗法において、観測方程式、正規方程式、最小二乗解はそれぞれ

$$\begin{cases} \mathbf{d} = \mathbf{A}\mathbf{P} \\ \mathbf{A}^t \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \mathbf{A}^t \mathbf{S}^{-1} \mathbf{d} \\ \mathbf{P} = (\mathbf{A}^t \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{S}^{-1} \mathbf{d} \end{cases} \quad \text{式 (7)}$$

の関係で表現される。ここで \mathbf{A} はヤコビ行列、 \mathbf{d} は測定値ベクトル、 \mathbf{P} はパラメータベクトル、 \mathbf{S} は各測定点の誤差行列である。パラメータの誤差行列 \mathbf{S}_p は

$$\mathbf{S}_p = (\mathbf{A}^t \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \quad \text{式 (8)}$$

で表され、各測定点の誤差が、最小二乗法による形体パラメータの誤差へどのように寄与するか評価することができる。本報告では、誤差は測定点に相関がなく、単一の分散 σ_0^2 を持つと仮定する。この場合、各測定点の誤差行列 \mathbf{S} は、

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sigma_0^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_0^2 \end{pmatrix} = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \quad \text{式 (9)}$$

と σ_0^2 と単位行列との積で表せる⁽⁷⁾。

(a) 円の最小二乗法の場合

最小二乗円のパラメータを中心点 (p_1, p_2) と半径 (p_3) とし、最小二乗円中心が原点となるように平行移動、測定点を極座標で表現 ($x_i = r_i \cos \theta_i, y_i = r_i \sin \theta_i$) すれば、ヤコビ行列 \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\cos \theta_n & -\sin \theta_n & -1 \end{pmatrix} \quad \text{式 (10)}$$

となる。

(b) 球の最小二乗法の場合

円の場合と同様に、最小二乗球のパラメータを中心点 (p_1, p_2, p_3) と半径 (p_4) とし、最小二乗球中心が原点となるように平行移動、測定点を極座標で表現すれば ($x_i = r_i \sin \theta_i \cos \varphi_i, y_i = r_i \sin \theta_i \sin \varphi_i, z_i = r_i \cos \theta_i$)、ヤコビ行列 \mathbf{A} は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_1 \cos \varphi_1 & -\sin \theta_1 \sin \varphi_1 & -\cos \theta_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin \theta_n \cos \varphi_n & -\sin \theta_n \sin \varphi_n & -\cos \theta_n & -1 \end{pmatrix} \quad \text{式 (11)}$$

となる。

これらヤコビ行列 \mathbf{A} を式 (8) に代入すれば、形体パラメータへの誤差を解析的に、GUMに従う不確かさの伝播則を用いて評価することができる。

(2) モンテカルロ法 (MCM) による評価

円、球の場合の評価例を挙げたが、形体が異なる場合は平面、円筒、円錐等の形体に応じそれぞれのヤコビ行列の導出が必要であり、さらに形体パラメータ間の評価を含む場合は、モデル式が微分可能な数式として表現できない場合や、テイラー展開による近似が十分に成立しない可能性があり、GUMに従う不確かさの伝播則が適用できない場合がある。

GUM Supplement1⁽⁸⁾において、不確かさの伝播則を用いない、MCMにより直接出力量の確率分布を求める方法が文書化されている。

3次元測定には、測定ソフトウェアが必要であり、測定点群を与えれば、最小二乗法に基づくベストフィット形体パラメータの評価が可能となる。理想的な測定点座標に対し、各測定点の誤差を与えた測定点群を入力することで、MCMによる測定対象量の分布の直感的な評価が可能となる。

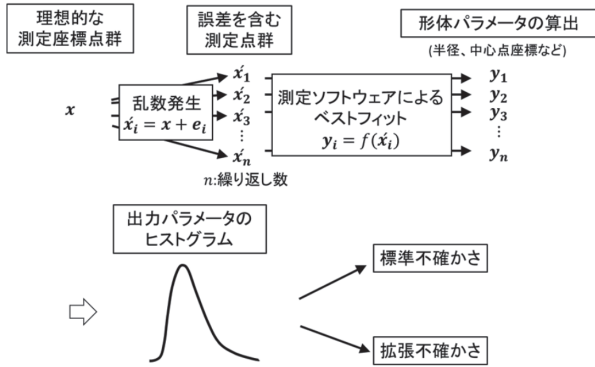


図4 MCMフローチャート

ここでは各測定点の不確かさは測定位置に依存せず、各直交座標軸方向に正規分布である誤差を持つと仮定し、理想的な測定点に誤差を与えたデータを測定ソフトウェアに入力、最小二乗法によるベストフィット形体のパラメータを出力させることで、ヒストグラムから確率分布を直接求めることが可能となる。図4にMCMのフローチャートを示す。本報告におけるシミュレーションの繰り返し数は1000とし、正規分布に従う誤差はExcel 2013で与え、測定ソフトウェアはPolyworks 2016を使用した。

6. 不確かさの算出と考察

6.1 シェル高さ測定の不確かさ

(1) 巻尺によるシェル高さ測定の不確かさ

巻尺によるシェル高さ寸法測定の不確かさを以下のように算出した。感度係数の算出について、 $l=3000$ mm、 $T_w=10^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_s=12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定した。不確かさの成分の最大許容誤差について、検定公差は、3mにおけるはJIS B 7512の1級の許容差から ± 0.5 mm、分解能は巻尺の最小目盛から1mm、温度差は $\pm\sqrt{2} \times 1^\circ\text{C}$ 、熱膨張係数差は $\sqrt{2} \times 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の $\pm 10\%$ とし、各標準不確かさはそれぞれ仮定した分布による係数で最大許容誤差を除して算出した。

表3 巻尺によるシェル高さ測定の不確かさ

不確かさの成分	各標準不確かさ	評価方法	感度係数	合成標準不確かさへの寄与(μm)
検定公差	$\frac{500}{\sqrt{3}}$ (μm)	Type B 矩形分布	1	289
分解能	$\frac{500}{2}$ (μm)	Type B 正規分布	1	250
熱膨張係数差 $u(\delta\alpha)$	$\frac{\sqrt{2} \times 0.1 \times 12 \times 10^{-6}}{2}$ ($^\circ\text{C}$)	Type B 正規分布	lT_w	25.5
温度差 $u(\delta T)$	$\frac{\sqrt{2} \times 1}{2}$ ($^\circ\text{C}$)	Type B 正規分布	$l\alpha_s$	25.5
合成標準不確かさ				$u = 384$ (μm)
拡張不確かさ($k=2$)				$U = 7.7 \times 10^2$ (μm)

表3に示す通り各標準不確かさを合成し、合成標準不確かさ $u=384\mu\text{m}$ 、拡張不確かさ ($k=2$) は $U=7.7 \times 10^2\mu\text{m}$ と算出された。

(2) レーザートラッカーによるシェル高さ測定の不確かさ

レーザートラッカー(T-Probe)によるシェル高さ寸法測定の不確かさを以下の様に算出した。感度係数の算出について、 $l=3000$ mm、 $T_w=10^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_w=12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定した。

不確かさの成分の最大許容誤差について、2点間距離精度は式(2)に $L=5$ mを代入、熱膨張係数は $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の $\pm 10\%$ 、温度は $\pm 1^\circ\text{C}$ とし、各標準不確かさはそれぞれ仮定した分布による係数または包含係数で最大許容誤差を除して算出した。

またレーザートラッカーの分解能は1μm以下であり、他の不確かさ成分より十分小さく、その不確かさは無視することができるため、ここでは考慮しない。

表4 レーザートラッカーによるシェル高さ測定の不確かさ

不確かさの成分	各標準不確かさ	評価方法	感度係数	合成標準不確かさへの寄与(μm)
2点間距離精度	$\frac{\sqrt{2}(50+6L)}{2}$ (μm)	-	1	56.6
熱膨張係数 $u(\alpha_w)$	$\frac{0.1 \times 12 \times 10^{-6}}{2}$ ($^\circ\text{C}$)	Type B 正規分布	lT_w	18.0
温度 $u(T_w)$	$\frac{1}{2}$ ($^\circ\text{C}$)	Type B 正規分布	$l\alpha_w$	18.0
合成標準不確かさ				$u = 62.0$ (μm)
拡張不確かさ($k=2$)				$U = 1.2 \times 10^2$ (μm)

表4に示す通り各標準不確かさを合成し、合成標準不確かさ $u=62.0\mu\text{m}$ 、拡張不確かさ ($k=2$) は $U=1.2 \times 10^2\mu\text{m}$ と算出された。

以上の結果から、レーザートラッカーの適用によって不確かさを大きく低減することができ、より信頼性のある寸法測定が可能となった。

6.2 円、半球測定 of 形体パラメータの不確かさ

内径φ 3669 のリング状鍛鋼品と SR1855 のドーム状鍛鋼品のレーザートラッカーの測定について不確かさを以下の様に算出した。

(a) 誤差行列 (GUM)、(b) MCM、(c) 実測データの3つの評価方法により、内径、中心点座標のばらつきを比較した。比較のため、測定位置、点数は共通して図5の通り(円:8点、半球:16点)である場合とし、各評価を行った。

実測データは、レーザートラッカー (RRR) を使用し、各測定位置について10点ずつ測定し、全組み合わせ(円:10⁸通り、半球:10¹⁶通り)のうちランダムに1000組を選び出し、MCMと同様に標準偏差を算出した。

評価 (a) 誤差行列 (GUM) ならびに (b) MCM について、各測定点の標準偏差σ₀は、式(1)においてL=2mでのU_{RRR}/2に相当するσ₀=13.5μmとした。表5,6に各評価方法における円、半球測定 of 形体パラメータの標準偏差を示す。

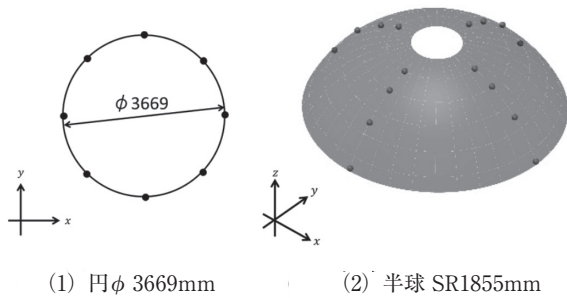


図5 測定形体と測定点位置

表5 円測定 of 形体パラメータの標準偏差

評価方法	標準偏差 (μm)		
	中心点 x座標 σ _x	中心点 y座標 σ _y	半径 σ _r
(a) 誤差行列 (GUM)	6.75	6.75	4.77
(b) MCM	6.66	6.79	4.79
(c) 実測データ	0.94	0.96	0.63

表6 半球測定 of 形体パラメータの標準偏差

評価方法	標準偏差 (μm)			
	中心点 x座標 σ _x	中心点 y座標 σ _y	中心点 z座標 σ _z	半径 σ _r
(a) 誤差行列 (GUM)	7.35	7.35	17.1	12.9
(b) MCM	7.42	7.43	17.6	13.4
(c) 実測データ	2.17	2.45	5.36	3.72

円の内径測定、半球 SR 測定について、GUM に従う誤差行列による解析的評価と MCM には大きな差異が見られないが、実測データから得られる標準偏差は前者に比べてかなり小さい。

これは、レーザートラッカーの誤差は、レーザー進行方向の誤差に比べ、レーザー進行直交方向の誤差の方が大きい。径測定においてはレーザー進行直交方向の誤差による影響が小さいためであると考えられる。また、この実測データは連続的な測定であるため、繰り返し性は評価されているが、再現性、系統誤差による不確かさは評価されないことも原因の一部である。

半球測定において、σ_z はσ₀ よりも大きくなっている。16点を等方的に測定しても、形体パラメータの不確かさは、各測定点の不確かさより必ずしも小さくはならない。形体に対して測定可能な領域が不十分である場合には、最小二乗法ではなく、真円度や輪郭度などの幾何公差に置き換えた評価が適している。

MCM の結果、ならびに径については6.1項と同様に熱膨張の不確かさを合成すれば、拡張不確かさ(k=2)は表7の様に評価された。

表7 形体パラメータの拡張不確かさ

(1) 円φ 3669mm

拡張不確かさ (μm)		
中心点 x座標 U _x	中心点 y座標 U _y	半径 U _r
13	14	33

(2) 半球 SR1855mm

拡張不確かさ (μm)			
中心点 x座標 U _x	中心点 y座標 U _y	中心点 z座標 U _z	半径 U _r
15	15	35	41

拡張不確かさとして、機械加工精度、公差に対して十分に小さい値が得られた。

6.3 複数形状製品の架空点測定 of 不確かさ

図6は、当社で製造する典型的なノズル一体型ヘッド部材である。このような部材において、ノズル中心点の径方向距離の測定は、定盤上への配置、投影等が必要であり、測定値の精度は作業者の技能に依存する。このような寸法測定は不確かさの要素が多く、評価が非常に難しい。

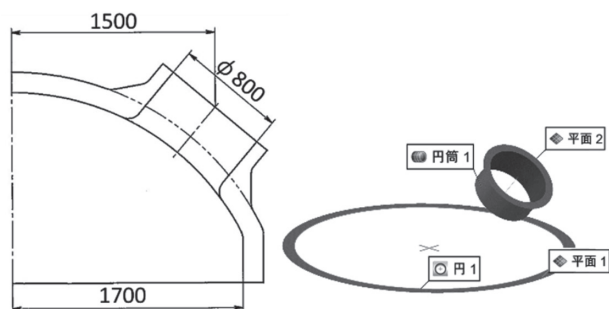


図6 ノズル一体型ヘッド形状と測定要素

レーザートラッカー測定の場合は場所を選ばず、精度だけでなく作業性も高い。特に架空点の測定においてはレーザートラッカーに非常に大きな優位性がある。

このような架空点の測定には、ノズル円筒軸と端面の交点の算出などが必要であり、不確かさの評価において、解析的な数学モデルを構築することは現実的ではない。よってGUM 枠組みにおける評価は非常に困難である。

一方、MCM の場合は、形体間の複雑な処理を含む評価であっても出力結果のばらつきの評価が可能となる。

図6の円1、平面1についてはRRRでの測定、円筒1、平面2についてはT-Probeでの測定を想定し、各測定点の標準偏差は式(2)、(3)の $L=2m$ での $U_{RRR}/2$ に相当する $\sigma_0=13.5\mu m$ (RRR)、 $\sigma_0=31\mu m$ (T-Probe)とした。測定点は円、平面については8点、円筒は12点等方的に測定したと仮定し、MCMシミュレーションを実施した。シミュレーションにおけるノズル中心点の径方向距離のばらつきを評価し、図7に示す。

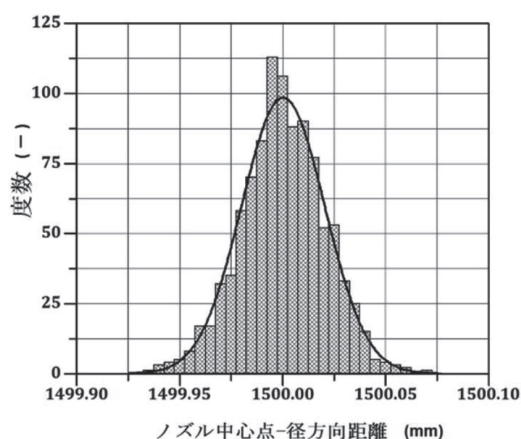


図7 ノズル中心点-径方向距離のMCMによるヒストグラム

MCMによって評価される標準偏差 σ は、 $\sigma=20.2\mu m$ であった。

6.1項と同様に熱膨張の不確かさを合成すれば、拡張不確かさ $U(k=2)$ は $U=48\mu m$ と算出された。

以上より、レーザートラッカーとMCMを適用すること

で、既存の簡易測定器、GUM 枠組みでは評価が困難な測定の不確かさを評価することができた。

7. 結 言

大型鍛鋼品の寸法測定へのレーザートラッカーの導入により、既存の簡易測定器と比べ分解能、精度が向上し、測定の不確かさを大きく低減できることが分かった。また大型製品の定盤への設置、昇引作業などを省略することができ、場所を選ばず高精度での寸法測定が可能となった。

形体パラメータの不確かさ評価について、GUMに従う不確かさの伝播則を用いた誤差行列による解析的評価とMCMによる評価の結果に大きな差は見られなかった。MCMによる評価は、GUM 枠組みでは現実的でない、形体間の複雑な処理を含む不確かさ評価を可能にする、優れた評価方法である。レーザートラッカーとMCMによる評価により、定量的に測定の精度と信頼性を保証することが可能となり、加工公差、精度に対して十分小さい不確かさであることが分かった。

今後は、レーザートラッカー測定を最終寸法検査だけでなく、最終機械加工前、最中での寸法測定への適用し、納入形状が確保されているか検証のための余肉分布測定や、測定結果の加工制御へのフィードバックを検討していきたい。

参 考 文 献

- (1) HEXAGON METROLOGY: Product Brochure "Leica Absolute Tracker AT960"
- (2) HEXAGON METROLOGY: Product Brochure "Leica Absolute Trackers Probing Solutions"
- (3) ISO 1:2016
- (4) ISO/TR 16015:2003
- (5) JCGM 100:2008
- (6) 萩野, 阿部: "Virtual CMMによる座標測定の不確かさ推定(第1報): 校正済み円筒による検証", 精密工学会学術講演会講演論文集, 2006年度精密工学会春季大会, (2006), p. 1063-1064
- (7) 高増, 古谷, 大園: "座標計測における形体パラメータの信頼性", 精密工学会誌, Vol. 63, No. 11, (1997), p. 1594-1598
- (8) JCGM 101:2008