

経常研究

測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響

内藤 恭平* 石川 信幸* 片岡 智史*

Effect of Differences in Measurement Methods on Results of Measuring the Shape of the Inside of a Cylinder

NAITO Kyohei, ISHIKAWA Nobuyuki and KATAOKA Satoshi

測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響を調査するため、内径及び表面性状の異なる試験片を複数の手法で測定し、その評価と比較を行った。円筒内径の測定値は、特に測定子の大きさ及び測定物の表面性状に影響を受けており、接触式測定の結果よりも非接触式の測定結果の方が内径が大きく測定されることが分かった。測定手法による差はモルフォロジフィルタ及び表面粗さパラメータを用いることで補正が可能であることが分かった。

Key Words: 円筒内測定, 精密測定, 非接触測定, 表面性状

1 はじめに

昨今の機械加工技術の進歩や要求精度の向上に伴い、部品製造を行う下請け企業に対する加工品の精度検証の要求が多くなっている。産業技術センターでは、これらの要求を受けた企業に対して三次元座標測定機をはじめとする高精度測定機器を使用した測定支援を行ってきた。しかし、加工部品の形状複雑化が進み、直径数 mm～十数 mm 程度の小径深穴の測定など、非破壊での測定が困難なケースが増加している。自動車業界における車体軽量化のための部品の一体化などにより、この傾向は今後も続いていくことが予想される¹⁾。

これらのケースに対応するため、新たに円筒内形状測定機を導入した。この測定機は、測定部に光学検出器を有する小径プローブを挿入し回転させることで非破壊で小径深穴の円筒内形状を測定する事が可能である。しかし、このような手法の測定機は前例が少なく、従来の測定手法と比較して測定結果にどのような違いがあるか把握しておく必要がある。

本研究では、測定手法の違いによる円筒内形状測定結果への影響の調査を目的として、円筒内形状測定機及び三次元座標測定機をはじめとする従来装置を使用して、任意に作製した検証用試験片の形状測定を行い、測定結果の比較を行った。

2 研究の方法

2.1 検証用試験片の作成

2.1.1 円筒内径の異なる試験片

測定内径による測定値への影響を調査するため、 $\phi 15\text{ mm} \sim \phi 30\text{ mm}$ までの直径 2.5 mm おきの穴を加工した標準径試験片及び、 $\phi 1\text{ mm} \sim \phi 14\text{ mm}$ までの直径 1 mm おきの半円を加工した小径試験片を作製した。試験片の材料は A5052 板、板厚は 8 mm のものを使用し、加工にはワイヤ放電加工機を用いた。

2.1.2 表面性状の異なる試験片

測定物の表面性状による測定結果への影響を調査するため、複数の加工手法による穴加工試験片を作製した。穴直径は $\phi 20\text{ mm}$ で統一した。作製した試験片の詳細を表 1 に示す。

表 1 試験片加工条件

加工手法等	材質	加工条件等
ワイヤ放電加工	アルミ (A5052 材)	ワイヤ径 $\phi 0.25\text{ mm}$
ドリル加工	アルミ (A7150 材)	ドリル径 $\phi 20\text{ mm}$
エンドミル加工	アルミ (A7150 材)	工具径 $\phi 10\text{ mm}$, 等高線加工
リングゲージ	鋼製	購入品 (ミツトヨ製)
3D プリント造形	マルエージング鋼	レーザ焼結

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表2 測定手法及び測定条件

測定手法	測定子	測定点数等	繰返し数	装置精度
三次元座標測定機 LEGEX9106	φ2 mm ルビー球, 40 mm 超硬軸	32 点タッチ測定	3	±(0.35+L/1000) μm 最大許容指示誤差(MPE _L)
非接触輪郭形状測定機 MLP-3SP	スポット径 2 μm	スキャン測定 2.5[deg/s], 内径治具使用, Rθ 測定 0.1 deg ピッチ(標準径)	3	±(2.0+20L/1000) μm 最大許容指示誤差(MPE _L)
		インデックス測定, 断面測定, 5 μm ピッチ(小径)		
円筒内形状測定機 BoreInspect	スポット径 15 μm~30 μm	プローブ回転速度 6.0 rpm 0.00036 deg ピッチ	10	1 μm~3 μm 測定繰返し精度(1σ)

2. 2 検証用試験片の測定

本研究における試験片の測定には、三次元座標測定機((株)ミットヨ製 LEGEX9106), 非接触輪郭形状測定機(三鷹光器(株)製 MLP-3SP), 円筒内形状測定機(Novacam 社製, BoreInspect)を使用した。それぞれの測定機での測定条件を表2に示す。

なお、円筒内形状測定機は測定の際に基準器を必要とするため、φ2 mm, φ4 mm, φ10 mm, φ20 mm, φ30 mm のリングゲージを用意し、試験片径に最も近い直径のリングゲージを基準器とした。

また、測定機ごとに測定軸出しの手法が異なることによる測定値への影響を除外するため、測定は穴深さ方向に3断面の円測定を行った結果から円筒形状を計算し、その直径を測定値として扱うこととした。計算の際は、測定機ごとに設定した繰返し数分の測定を行い、その平均値を測定値として使用した。

3 結果及び考察

3. 1 円筒内径の異なる試験片の測定結果

横軸に試験片直径の設計値、縦軸に設計値と測定値の差でプロットしたグラフを図1に示す。φ15 mm 以上の標準径試験片において、測定手法による明確な傾向の違いが見られた。非接触輪郭形状測定機での測定値が最も大きく、次いで円筒内形状測定機であり、三次元座標測定機での測定結果が最も小さくなった。非接触輪郭形状測定機と三次元座標測定機の直径測定値は、φ15 mm 以上の試験片で平均して 11.5 μm, 円筒内形状測定機と三次元座標測定機は 4.3 μm の差であった。

また、試験片直径による傾向を見ると、円筒内形状測定機による結果では大きな変化がないのに対し、非接触輪郭形状測定機の結果ではφ15 mm 以上の標準径試験片と比較してφ14 mm 以下の小径試験片の測定結果が小さい傾向にあった。

3. 2 表面性状の異なる試験片の測定結果

表面性状の異なるφ20 mm の試験片の表面粗さパラメータを非接触輪郭形状測定機で測定した結果を表3に示す。

また、三次元座標測定機での直径測定値を基準とした時の、円筒内形状測定機、及び非接触輪郭形状測定機の直径測定値の差を表したグラフを図2に示す。なお、3Dプリンタ造形試験片に関しては、他試験片の結果と大きくスケールが異なったため、軸を分けてグラフ化した。

図2より、測定手法により表面性状による測定値への影響の受け方に違いがあることがわかる。

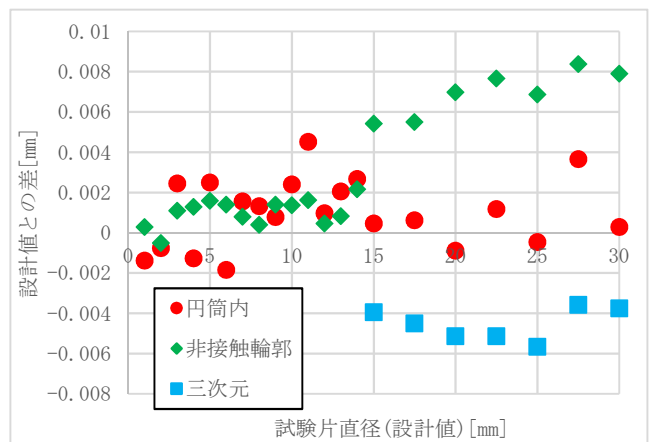


図1 各測定機における設計値と測定結果の差

表3 各試験片の表面粗さパラメータ

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rv [μm]	Rc [μm]	Rsk [-]
ワイヤ放電加工	2.57	28.78	15.02	10.25	-0.07
ドリル加工	4.79	28.92	13.42	19.83	0.22
エンドミル加工	1.81	13.56	5.30	5.73	0.69
リングゲージ	1.17	9.98	3.27	4.34	0.75
3D プリント	15.85	109.0	52.76	50.83	0.13

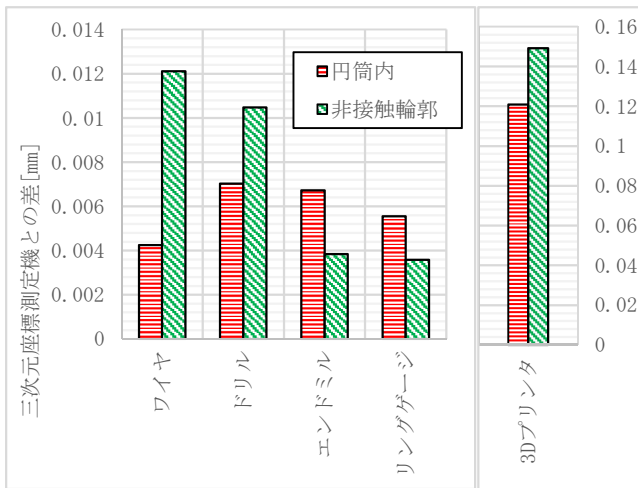


図2 三次元座標測定機を基準とした各測定機の差

3.3 測定プローブ径を考慮した直径値の補正

3.1項及び3.2項に示した結果から、各測定手法の結果の差は、測定物の表面性状及び測定に使用するプローブの大きさやレーザのスポット径の影響を受けていると推定した。測定結果が小さくなった三次元座標測定機は先端φ2mm(=2,000μm)のルビー球プローブを使用しているため、レーザスポット径が2μmである非接触輪郭形状測定機や、同じくスポット径が15μm~30μm程度である円筒内形状測定機と比較して、表面にある微細な幅の谷形状の情報が取得できず、結果として穴直径が小さく計算されたと考えられる。

この推定を検証するため、測定プローブ径の違いによる測定値の差を、モルフォロジフィルタにより補正することを試みた。モルフォロジフィルタは画像の構造抽出などに使用される演算²⁾で、要素界面を拡大・縮小することで基準以下の大きさの要素を除去する際などに使用される。

図3に、ワイヤ放電加工機で作製したφ20試験片の表面形状を非接触輪郭形状測定機で取得したデータ

(図中下の線)に対してモルフォロジフィルタを適用し、φ2mm円盤が通過した場合の経路(図中上の線)を計算した結果を示す。得られたそれぞれの線の平均高さの差を、プローブ径の違いによる補正值として使用し、三次元座標測定機による結果との差を比較した(図4)。

なお、円筒内形状測定機の測定結果は、出力されるデータ形式の違いから今回フィルタ処理に使用したソフトウェアでは取り扱えないため、非接触輪郭形状測定機で取得したデータを円筒内形状測定機のスポット径相当である15μmピッチで平均化したデータを作製し、代用した。

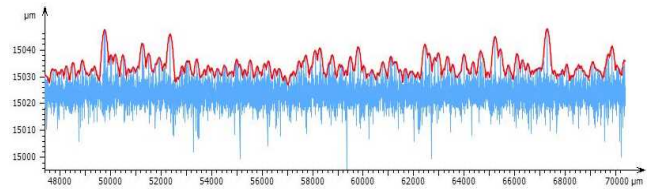


図3 モルフォロジフィルタの適用

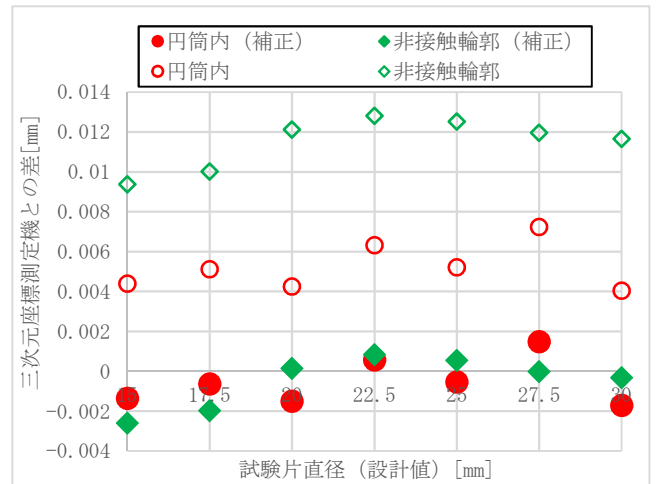


図4 モルフォロジフィルタを用いた補正後の差

図4のとおり、モルフォロジフィルタを使用することによってプローブ径による測定値の差を補正可能であることがわかった。

3.4 表面性状による測定値への影響

続いて、図2に示した表面性状の異なる試験片の測定結果に対して3.3項で求めたモルフォロジフィルタによる補正を適用した結果を図5に示す。

ワイヤ放電加工及びドリル加工試験片はいずれの測定機による結果もおおよそ補正ができていたのに対し、エンドミル加工試験片とリングゲージの円筒内形状測定機による測定値はその他の測定値と比較すると補正が不十分であるように見える。

表3に示した各試験片の表面性状パラメータを確認すると、補正がエンドミル加工試験片及びリングゲージは、他試験片と比較してRsk(スキューネス, 歪度)が大きいことがわかる。

Rskは表面性状の山谷の対称性を見る無次元数であり、Rsk>0であるほど、図6に示すような山よりも谷の領域が多い表面であることを示している³⁾。3.3項で述べた通り、円筒内形状測定機のモルフォロジフィルタによる補正值を算出するときは非接触輪郭形状測定機の測定結果の平均化データを代用している。図6の形状を例にとると、図中の範囲を平均化し、破線で示した高さの測定点が計算される。しかし、実際の円筒内形状測定機による取得データの場合、光干渉法

を測定原理としているため、高さ方向で光の干渉強度（反射強度）が最も強くなる谷底の位置を測定点として取得すると推定される。この差により、代用データから算出した補正量が小さく計算されたと考えられる。

これによる差を再度補正する為、エンドミル加工及びリングゲージ試験片の測定結果に対して、各表面の山高さ R_c に対し、全高さ R_z における谷深さ R_v の比率をかけた値を補正值として適用した結果を図7に示す。

図5に示す結果と比較して、 R_{sk} を考慮した計算によって数値の補正が可能であることがわかった。

これらの結果から、特に R_{sk} の大きな表面では、平均化フィルタによるデータの代用の際に実測値との測定点差を考慮に入れる必要があることがわかった。

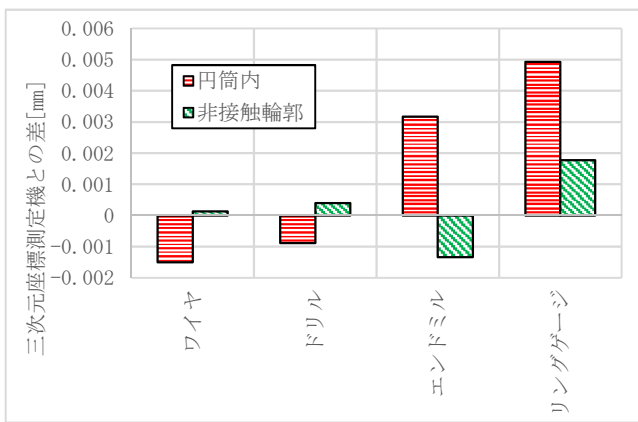


図5 補正後の各表面試験片の三次元座標測定機との差

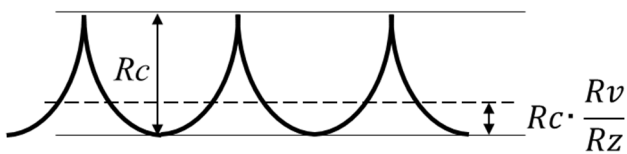


図6 R_{sk} の大きな表面の補正

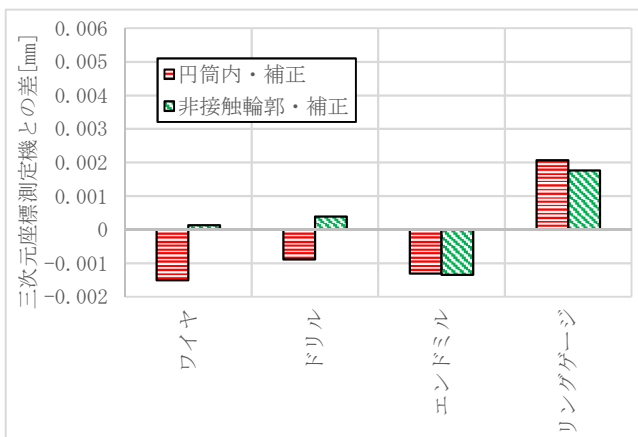


図7 R_{sk} を考慮した再補正後の差

3.5 レーザ入射角による表面性状の影響

図1に示した結果のうち、非接触輪郭形状測定機による測定結果が標準試験片 ($\phi 15 \text{ mm} \sim \phi 30 \text{ mm}$) では設計値に対して平均で $+6.9 \mu\text{m}$ の差であるのに対し、小径試験片 ($\phi 1 \text{ mm} \sim \phi 14 \text{ mm}$) では平均して $+1.0 \mu\text{m}$ 程度であり、異なる傾向を示している。

円筒内形状測定機による測定結果では、直径の変化による傾向の差は見られなかったことから、この差は試験片形状の違いによるものではなく、非接触輪郭形状測定機による測定の際のレーザ入射方向が関係しているものと考えられる。

図8に非接触輪郭形状測定機の測定手法の概略図を示す。標準径試験片の測定は、内径測定用治具を用いた回転測定 ($R\theta$ 測定) によって行っているため、レーザは常に測定面に対して垂直に入射される。小径試験片では径の小ささから同様の測定が困難であるため、垂直方向から照射したレーザを走査する断面測定によって測定を行っている。断面測定による測定では、半円の端に近づくにつれレーザ入射角が大きくなる(図9)。これにより、端付近の表面性状、特に入射角度によりレーザの死角となる谷深さ R_v 成分の影響が小さくなると推定した。

検証のため、ワイヤ放電加工で作製した小径試験片の $\phi 12 \text{ mm}$ 半円を断面測定及び回転測定で測定した結果を図10に示す。回転測定での測定結果の方が $5.24 \mu\text{m}$ 大きく計算され、最小二乗円に対する偏差成分 ($\times 200$ 表示) を見ると、回転測定の結果では位置によってほぼ変化していないのに対して断面測定では円の端に近づくほど偏差が小さくなっている。

小径試験片の設計値からの差の平均 $1.0 \mu\text{m}$ に断面測定と回転測定の測定値差 $5.24 \mu\text{m}$ を足すと、標準径試験片の設計値からの差の平均 $6.9 \mu\text{m}$ におおよそ一致する。

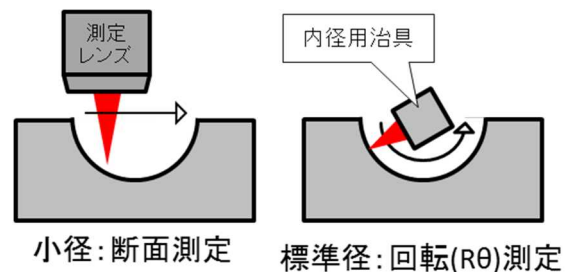


図8 非接触輪郭形状測定機の測定手法概略図

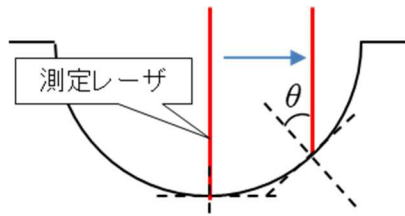


図9 断面測定時のレーザー入射角の変化

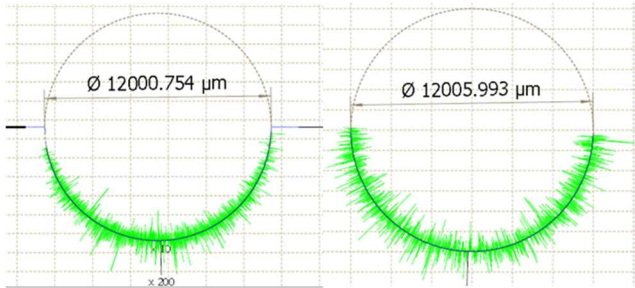


図10 φ12 mm 半円の測定結果
(左：断面測定 右：回転測定)

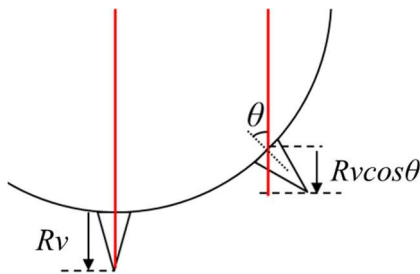


図11 レーザ入射角による谷深さ Rv 成分への影響

今回の試験片におけるレーザー入射角による谷深さ Rv の影響を、計算で求めることを試みる。レーザー入射角が θ である際の谷深さ Rv の成分は、図11に示すように $Rv \cos \theta$ で表すことができる。測定により取得された表面データへの Rv 成分の影響は、レーザー入射角 θ を $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲で積分した面積の比で表現できるのではないかと考えた。

回転測定では常に $\theta = 0 \text{deg}$ 、つまり $\cos \theta = 1$ であるので、Rv 成分の積分は

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} Rv d\theta = Rv [\theta]_{-\pi/2}^{\pi/2} = Rv \cdot \pi \quad \dots(1)$$

となる。

一方断面測定では、

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} Rv \cdot \cos \theta d\theta = Rv [\sin \theta]_{-\pi/2}^{\pi/2} = Rv \cdot 2 \quad \dots(2)$$

となるので、(1)、(2)式より、断面測定によって無視される Rv 成分は

$$Rv \frac{\pi - 2}{\pi} \quad \dots(3)$$

(3)式で表すことができる。表3よりワイヤ放電加工試験片の Rv は $15.02 \mu\text{m}$ であるので、計算される成分は

$5.46 \mu\text{m}$ となる。この値は、図10に示したレーザー入射角の差による測定値差とおおよそ等しくなった。

3.6 円筒内形状測定機の最大許容指示誤差相当値の算出

本研究において使用した三次元座標測定機、及び非接触輪郭形状測定機は、測定装置中に基準器を持つ装置であるため、測定メーカーの定義する最大許容指示誤差 (MPE_E) の数値が定義されている。円筒内形状測定機は装置内に基準器を持たないため、MPE_E は定義されていないが、使用する測定機が必要な精度を満たすかどうかの指標として MPE_E を用いるケースがあるため、本研究で得られた各測定機での測定結果から、円筒内形状測定機の MPE_E 相当値の算出を試みた。

図12に、円筒内形状測定機の測定結果を、前項まで得られた補正を適用したうえで、三次元座標測定機、非接触輪郭形状測定機それぞれを基準として整理したグラフを示す。

それぞれの測定点には、円筒内形状測定機の最大繰り返し精度である $\pm 3 \mu\text{m}$ の誤差範囲を表示している。傾きとして三次元座標測定機を基準とした測定結果の近似直線の値、繰り返し精度範囲を十分内包できる切片をそれぞれ設定し、円筒内形状測定機の MPE_E 相当値を $\pm (7+60 \times L/1000) \mu\text{m}$ (Lは測定直径 [mm]) と算出した。

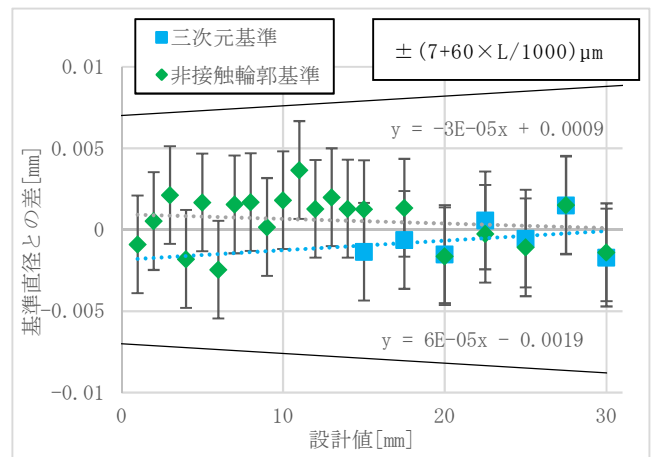


図12 各装置を基準にした円筒内形状測定機の測定値

4 おわりに

内径寸法の異なる試験片、及び表面性状の異なる試験片を複数の測定手法で測定・比較し、以下の知見を得た。

- (1) 三次元座標測定機での測定値と比較して、非接触輪郭形状測定機、円筒内形状測定機の測定値が大きくなる傾向にあった。
- (2) 測定手法による結果の差は、測定物の表面性状、測定機器のプロブ径・スポット径の影響による

ものと考えられ、モルフォロジフィルタの使用や表面粗さの考慮により測定手法ごとの差の補正が可能であった。

- (3) 非接触輪郭形状測定機を使用した測定の場合、レーザー入射角によって測定値に影響が出ることが分かった。
- (4) 三次元座標測定機、非接触輪郭形状測定機の測定結果を基準として、円筒内形状測定機の最大許容指示誤差(MPE_E)相当値を $\pm(7+60 \times L/1000)\mu\text{m}$ と算出した。

参考文献

- 1) 小倉翔吾, 瀬戸雅宏ら: “成型加工”, 33 卷 8 号, 289-293, (2021)
- 2) 浅野晃: “電子情報通信学会”, 4 卷, 2 号 113-122, (2010)
- 3) 宮下勤: “精密工学会誌”, 73 卷 2 号, 201-205, (2007)