【報告】

三次元測定機による幾何形状測定の精度評価

機械科　　北川剛弘*　大澤洋文　柳原　亘

Evaluation of the Geometry Shape Measurement Accuracy by CMM

Takahiro Kitagawa, Hirohumi Oosawa and Wataru Yanagihara

It was performed to evaluate uncertainty of the geometry shape measurement by CMM (Coordinate Measuring Machine). The results are as follows.

(1) In the case of the single stylus method, it is possible to measure roundness, cylindricity and squareness within ±1〜2.5 μm uncertainty. (2) In the case of the multi stylus method, the value of uncertainty increase 1〜1.5 μm compare with the single stylus method. (3) It was cleared that the main factor of uncertainty is bias of measurement value. And there is no effect on the measurement accuracy by the workpiece attitude, measuring position, measuring speed and stylus diameter.

１．はじめに

三次元測定機は、幾何形状要素の寸法や位置、形状偏差等を測定することにより、複雑形状部品を比較的簡単に評価することができることから、現在では広く生産現場に普及している。

一方、測定結果に対して不確かさを表示することが近年求められており、当センターでも、これまでに産総研によるボールプレートの持ち回り試験に参加するなど、所有する三次元測定機の不確かさの把握に努めてきた[1)2)]。しかし、真円度や円筒度、平面度、直角度といった幾何形状偏差に関しては不確かさの評価を行った経験がなく、これらの依頼測定に対してはこれまで精度保証ができない状況にあった。

そこで今回、当センターが所有する三次元測定機を使い、幾何形状測定における不確かさの評価を行ったので報告する。

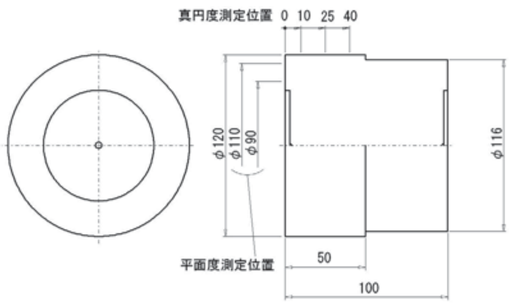
２．実験方法

２．１　測定対象物及び測定量

測定対象とした円筒型ゲージを図１に示す。測定量は、円筒部３断面の各真円度及び円筒度、上面の平面度、円筒軸と上平面の直角度の合計６項目とした。

真円度と平面度は、スキャニング測定により１周2000点のデータを取得したのち、２RCフィルタにより50山以下の成分を抽出して最小二乗法により求めた。ただし、平面度はϕ110とϕ90の円周上をそれぞれ測定し、１つの平面として評価した。また、円筒度は3断面の円測定データから、真円度と同様のフィルタ処理を行い、最小二乗法により求めた。

なお、当センター所有の真円度測定機（タリロンド300、テーラーホブソン社製）を用いて各測定量を測定し、これを校正値とした（表１）。適用したフィルタ等は３次元測定時と同じである。



材質：SCM415（浸炭・サブゼロ処理）

図１　円筒型ゲージ

表１　真円度測定機による測定結果（単位：μm）

真円度１（上面から10mm位置を測定）	0.30
真円度２（　〃　25mm　〃　）	0.30
真円度３（　〃　40mm　〃　）	0.35
円筒度（上記１～３の円測定データから計算）	0.50
平面度（上面ϕ90, ϕ110の円周上を測定）	2.30
直角度（上記の円筒と平面のデータから計算）	0.40

*）現　静岡県工業技術研究所

2．2　使用測定機と測定環境

測定に使用した三次元測定機の仕様を表2に、外観を図2に示す。装置は室温20±1℃の恒温室に設置されており、この環境で測定を行った。

表2　三次元測定機の仕様

機器名	Zeiss 社製 UPMC 850 CARAT	
20℃における 測定精度	1軸	0.5+L/900（μm）
	空間	0.8+L/600（μm）
プローブヘッド	HSSスキャニングプローブヘッド	
ソフトウェア	Calypso Ver4.8	

図2　三次元測定機

2．3　測定方法

⑴　測定条件

誤差要因として表3に示す6要因を選択し、それぞれ2水準の組み合わせで、合計64回の多元配置実験を行った。ただし、測定の段取り変えを効率的に行うため、図3に示す順序の分割実験とした[3)]。図4～5に測定姿勢と測定位置を示す。

なお、φ8mmのスタイラスは標準測定圧の0.2Nで、φ3mmは剛性を考慮して0.1Nで校正を行った。剛性はそれぞれ70～130N/mmと10N/mmであった。

また、スキャニング測定の場合、測定物と同じサイズのマスターゲージを用意して動的校正を行えば高精度な測定が行えるが、日常の測定においては、必ずしもマスターゲージを用意できるとは限らないため、本研究ではあえて動的校正を行っていない。

⑵　シングルスタイラス法とマルチスタイラス法

長尺円筒形状の中央部真円度や、円筒外周溝部の端面平面度などを三次元測定する場合、シングルスタイラスでは測定できず、複数本のスタイラスを切り替えて測定するマルチスタイラス測定が必要な場合が多々ある。

表3　測定条件

要因	記号	水準	
反復	R	1回目	2回目
測定姿勢	S	垂直	傾斜
測定位置	P	左奥（原点側）	右手前（反原点側）
スタイラス径	D	8mm（長さ63.5）	3mm（長さ58）
測定速度	V	3mm/sec	6mm/sec
繰返し	n	1回目	2回目

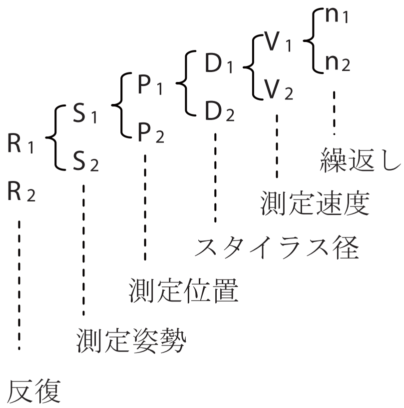
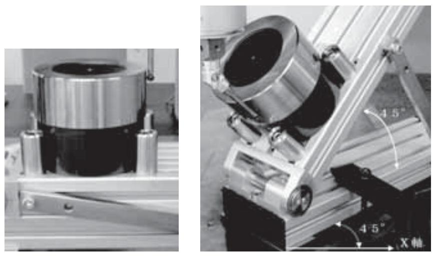


図3　測定順序



(a)垂直　(b)傾斜

図4　測定姿勢

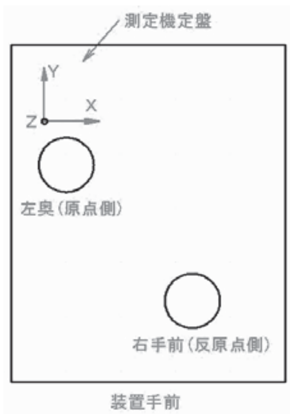
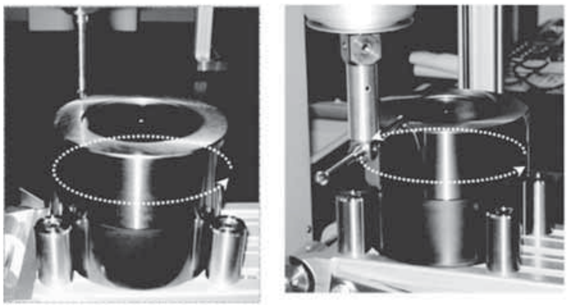


図5　測定位置

【報告】

そこで、両測定方法について2.3(1)に述べた条件でそれぞれ測定を行い、不確かさを求めた。図６に垂直姿勢を例に測定の様子を示す。



(a)シングルスタイラス　(b)マルチスタイラス

図６　測定の様子（垂直姿勢）

⑶　測定速度について

測定速度を決めるため、予備実験を行い測定速度と真円度の関係を調査した。その結果を図７に示す。

スキャニング測定時の測定速度は、測定物の径をDmmとすると、メーカー推奨値はD/20～D/10mm/secであり、今回の場合６～12mm/secとなるが、当センターの装置では、４mm/secからビビリや遠心力による脈動が発生し始め、測定速度の増加に伴って真円度が徐々に悪化した。そこで本研究では、脈動の発生しない３mm/secと推奨速度６mm/secの２水準を測定速度として設定した。

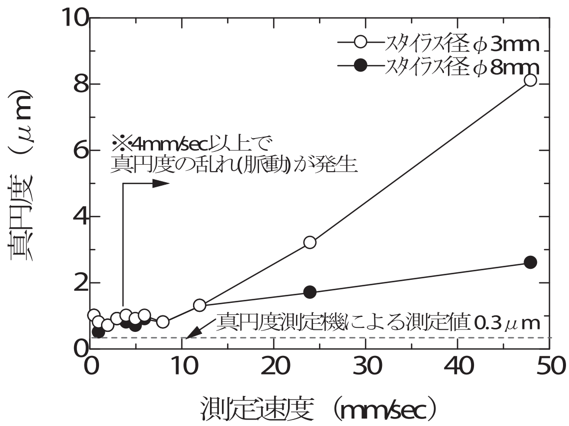


図７　測定速度と真円度測定結果の関係

３．結果と考察

３．１　分散の推定と不確かさの算出

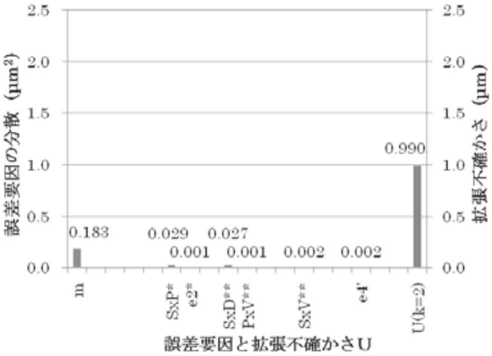
各誤差要因に起因する変動を推定し、不確かさを算出するために分散分析を行った[3)]。分析には各測定値から校正値（表１）をそれぞれ引いた偏差データを用いた。

表４　分散分析表の一例（真円度１をシングルスタイラス測定した場合）　**: 危険率１％で有意　＊：危険率５％で有意

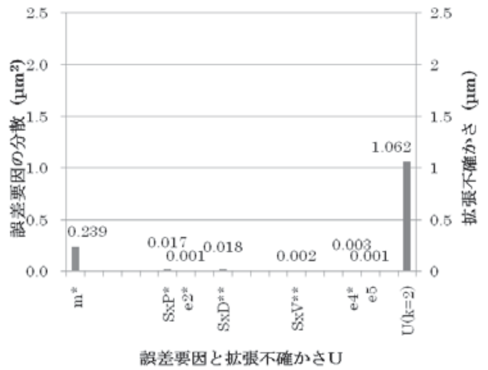
誤差要因		二乗和S	自由度φ	不偏分散V		不偏分散の期待値
一般平均	m	12.6914	1	12.6914		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{e1}^2+16\sigma_{PxV}^2+16\sigma_{RxD}^2+16\sigma_{S\times P}^2+16\sigma_{SxV}^2+16\sigma_{SxD}^2+16\sigma_{DxV}^2+32\sigma_{R}^2+32\sigma_{S}^2+32\sigma_{P}^2+32\sigma_{D}^2+32\sigma_{V}^2+64\sigma_{m}^2$
測定の反復	R	0.0039	1	0.0039		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{e1}^2+32\sigma_{R}^2$
測定姿勢	S	0.6602	1	0.6602		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{e1}^2+16\sigma_{SxV}^2+16\sigma_{SxD}^2+16\sigma_{SxP}^2+32\sigma_{S}^2$
１次誤差	e1	0.0352	1	0.0352		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{e1}^2$
測定位置	P	0.0189	1	0.0189		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{PxV}^2+16\sigma_{RxD}^2+16\sigma_{SxP}^2+32\sigma_{P}^2$
交互作用	S×P	0.4727	1	0.4727	*	$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2+16\sigma_{SxP}^2$
２次誤差	e2	0.0191	2	0.0095	*	$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+8\sigma_{e2}^2$
ｽﾀｲﾗｽ径	D	0.1914	1	0.1914		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+16\sigma_{DxV}^2+16\sigma_{PxD}^2+16\sigma_{SxD}^2+32\sigma_{D}^2$
交互作用	S×D	0.4389	1	0.4389	**	$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+16\sigma_{SxD}^2$
交互作用	P×D	0.0189	1	0.0189	**	$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2+16\sigma_{PxD}^2$
３次誤差	e3	0.0220	5	0.0044		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+4\sigma_{e3}^2$
測定速度	V	0.0189	1	0.0189		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+16\sigma_{DxV}^2+16\sigma_{PxV}^2+16\sigma_{SxV}^2+32\sigma_{V}^2$
交互作用	S×V	0.0264	1	0.0264	**	$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+16\sigma_{SxV}^2$
交互作用	P×V	0.0002	1	0.0002		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+16\sigma_{PxV}^2$
交互作用	D×V	0.0014	1	0.0014		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2+16\sigma_{DxV}^2$
４次誤差	e4	0.0256	12	0.0021		$\sigma_{e5}^2+2\sigma_{e4}^2$
繰返し誤差	e5	0.0650	32	0.0020		σ_{e5}^2

【報告】

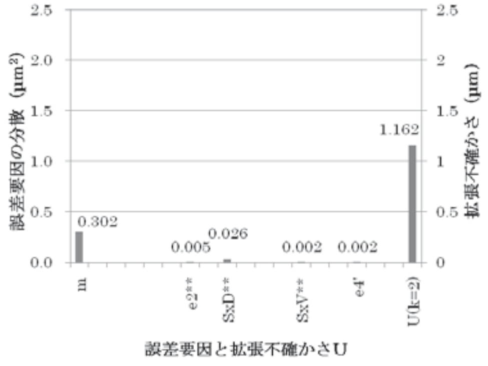
分散分析結果の一例（真円度１シングルスタイラス測定の場合）を表４に示す。その他の測定量に対しても同様の分散分析を行った後、不偏分散の期待値の構造式を基に、有意な要因について分散成分を推定した。結果を図８⒜〜⒧に示す。図中には、分散成分の合計の平方根をとり、包含係数として２を掛けた拡張不確かさＵも併せて示す。なお、不確かさを求めるに当たり、一般平均ｍは他の要因に比べて今回影響が大きかったことから、有意でない場合も不確かさの計算に入れることにした。これは、今回の実験は水準数が少なく自由度が小さいため、検定精度が低いことを考慮したためである。



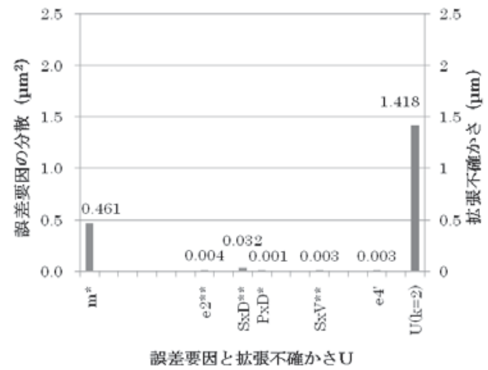
⒜真円度１（シングルスタイラス）



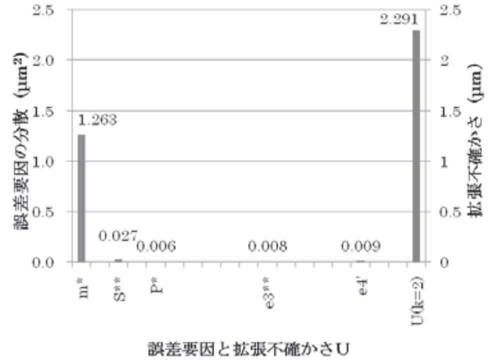
⒝真円度２（シングルスタイラス）



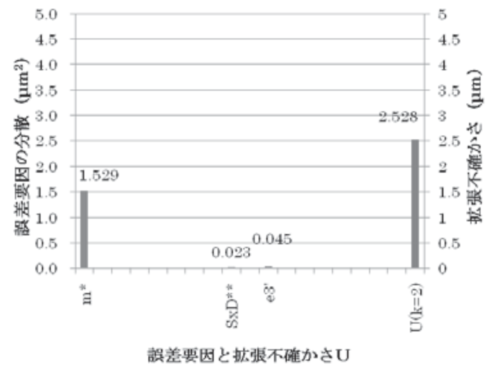
⒞真円度３（シングルスタイラス）



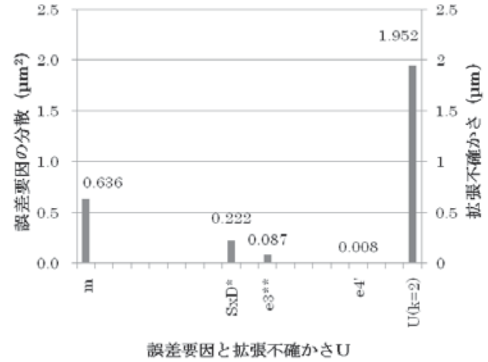
⒟円筒度（シングルスタイラス）



⒠平面度（シングルスタイラス）

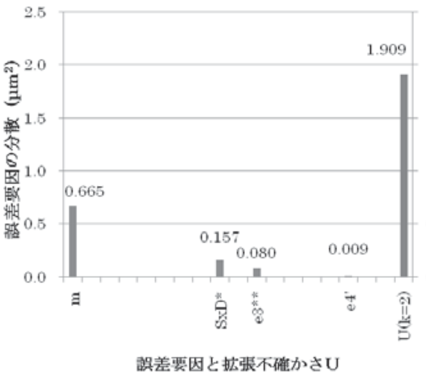


⒡直角度（シングルスタイラス）

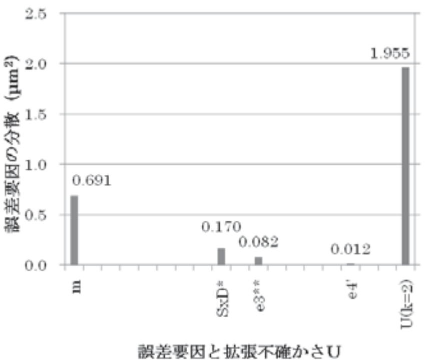


⒢真円度１（マルチスタイラス）

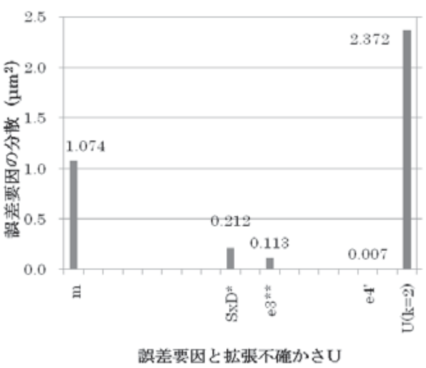
【報告】



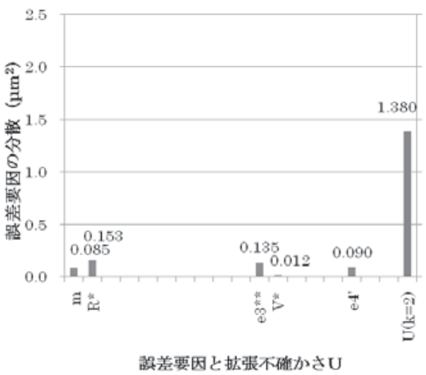
⒣真円度２（マルチスタイラス）



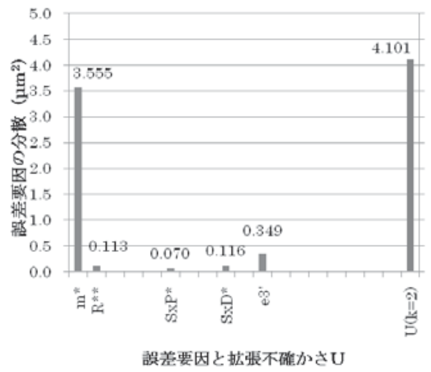
⒤真円度３（マルチスタイラス）



⒥円筒度（マルチスタイラス）



⒦平面度（マルチスタイラス）



⒧直角度（マルチスタイラス）

図８　誤差要因の分散の推定値と拡張不確かさ

３．２　考察

今回使用した円筒型ゲージは、平面度の測定対象面上に研削痕（クリッス・クロッス、斜子目）が予想以上に深く残ってしまっていた（図９）。このため、平面度の測定結果と校正値はスタイラス径の影響を受けて、正しく測定機の性能を評価することができなかった。今後、ラップ加工を施して、研削痕を無くした上で再度評価を行う必要がある。

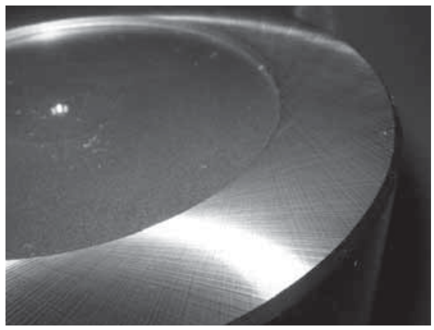


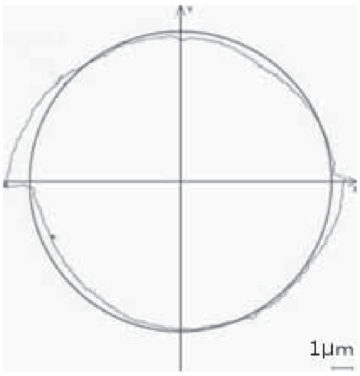
図９　円筒型ゲージ端面の研削痕

その他の測定量については、マルチスタイラスによる直角度の測定を除き、反復Rの効果は認められず、実験の再現性は概ね良好と言える。また、シングルスタイラスとマルチスタイラスの両測定方法とも、測定姿勢S、測定位置P、スタイラス径D、測定速度Vの効果は認められず、いずれの条件で測定しても有意なばらつきは生じていない。すなわち、今回の測定条件の範囲では当センターの三次元測定機はこれらの要因の影響を受けにくいと言える。

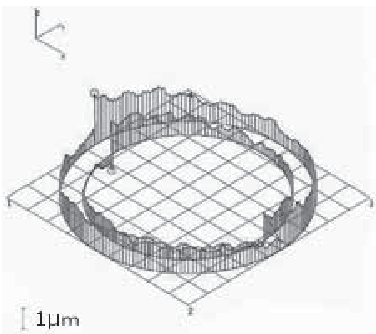
各誤差要因及びそれらの交互作用の中では、かたよりｍの効果が支配的である。これは、三次元測定

機の構造がアッベの原理を満たしておらず、真円度測定機と比較して、誤差が大きく出やすいためと考えられる。

拡張不確かさは、マルチスタイラスの場合、シングルスタイラスと比べて約1～1.5μm増しとなった。これは、スタイラスを校正する際に、マルチスタイラスを構成する各スタイラス球の中心座標が数μmのばらつきを持つため、測定中のスタイラス切り替え箇所で図10のような食い違いを生じた結果と考えられる。従って、当センターの三次元測定機の場合、マイクロメートルオーダーの精度が求められる測定にはマルチスタイラス測定は適さないと言える。



⒜真円度の例



⒝平面度の例

図10　マルチスタイラス測定の結果

4．まとめ

当センターが所有する三次元測定機を用いて幾何形状測定における不確かさ評価を行い、次の結果を得た。

⑴　シングルスタイラス測定の場合、真円度は±1μm、円筒度は±1.5μm、直角度は±2.5μm程度の測定が可能である。

⑵　マルチスタイラス測定の場合、校正時のばらつきが原因で、不確かさは1～1.5μm程度大きくなる。

⑶　今回の測定条件の範囲では、測定姿勢、測定位置、スタイラス径、測定速度の効果は認められず、測定値のかたよりが不確かさの主要因であった。

本研究で得られた知見を今後の技術相談や設備使用に活用し、地域中小企業の技術支援に生かして行きたい。

謝辞

本研究において貴重な助言を頂いた、長野県CDT研究所中村哲夫氏に感謝します。

参考文献

1）大澤洋文他：「三次元測定機を用いたボールプレート測定における不確かさ算出について」静岡県工業技術研究所研究報告第2号、(2009)
2）柳原亘他：「簡易検査ゲージを用いた三次元測定における不確かさ算出について(第1報)」静岡県工業技術研究所研究報告第3号、(2010)
3）永田　靖：「入門実験計画法」日科技連、(2000)