

CMM 測定技術向上に関する研究 (第2報)

— 幾何公差測定における不確かさ低減手法について —

石黒輝雄・米山陽・佐野正明・中村哲夫^{*1}

Study on CMM Measurement Technology for Improvement (2nd report)

- About Uncertainty Reduction Technique in Geometric Tolerance Measurement -

Teruo ISHIGURO, Akira YONEYAMA, Masaaki SANNO and Tetsuo NAKAMURA^{*1}

要 約

機械金属の加工については製品の高精度・高機能化が進み、加工精度とともに機能を満足するための幾何公差も厳しく要求されるようになった。三次元座標測定機（以下 CMM）には、長さとしての JIS 規格 B 7440-2（2003）、スタイラス姿勢の変化による評価としての B7440-5 に基づいた標準はあるが、幾何公差については特に定められていない。複雑な形状の製品を測定するには、複数の要因による誤差が累積し、測定結果に大きな影響を及ぼす。本報では CMM による幾何公差の測定精度の検証を目的として、同軸度を対象として、プロービングによる測定における支配的要因を持つ変動項目の把握と幾何公差の評価を行った。その結果、影響を及ぼす主効果として影響する要因と不確かさについて算定ができた。

1. 緒 言

現在、加工製品の高精度・高機能化が進むとともに、要求される加工寸法精度と機能を満足するための幾何公差についても厳しく要求されるようになってきている。これにあたり、三次元座標測定機（以下 CMM と表記する）は、寸法と幾何公差を評価する測定機として非常に有効な機器であり重宝されているのが現状である。しかし、機器の性能表示としては、長さとしての JIS 規格 B 7440-2（2003）と、スタイラス姿勢の変化による評価についての B 7440-5 に基づいた標準はあるが、実際の幾何公差については特に定められていない。そのため複雑な形状の製品を測定するには CMM のもつ特性が測定結果に大きな影響を及ぼしていると考えられる。本報では CMM による幾何公差の測定精度の検証として、プロービングによる測定の変動要素の幾何公差に対する支配的要因を持つ項目を把握するとともに幾何公差を評価するための手法の提案を目的に検討を行った。

2. 実験方法

2-1 検証ゲージについて

第1報¹⁾では、同心度がそれぞれの測定円の中心座標による点座標の距離で求められることから、幾何公差の検証としての単純な評価を行った。本報では空間的な誤差による影響を把握することを目的に、同軸度について

検証することとした。JIS B 0021（1996）²⁾より、同軸度の定義として公差値に記号 ϕ が付けられた場合には、公差域は直径 t の円筒によって規制される。円筒公差域の軸線は、データムに一致する。これを踏まえて、検証ゲージについては大菱計器製作所製の円筒スコヤ $\phi 90 \text{ mm} \times L250 \text{ mm}$ を選定した。測定面は焼き入れ研削仕上げである。これを図1に示す治具にて固定することで両側からかつ全周にわたって円筒を測定できるようにした。スタイラスによる接触圧では振れなどが起こらないことをダイヤルテンションゲージにて確認を行っている。データム円筒は、端面から 47.5 mm の位置における左右均等に 25 mm 幅と 75 mm 幅を設定し、反対側はデータム円筒側の端面から 202.5 mm の位置における左右均等に 25 mm 幅と 75 mm 幅円筒について評価円筒とした。データム円筒は 5 mm ピッチと 15 mm ピッチによる6つの円（定ピッチにて測定した8点から最小二乗法で決められる円形体の中心）により計算される円筒の中心線をデータム軸直線 A とした。これに評価円筒とした 5 mm ピッチと 15 mm ピッチによる6つの円の中心（8点の定ピッチの座標値から最小二乗法で決められる円形体の中心）からデータム軸直線 A との距離の2倍（データム軸直線上に中心を置き、円形体の中心を通る幾何学的円の直径）の数値のうち最も大きいものを今回評価する同軸度とした。円筒スコヤの加工精度を確認するため、真円度測定機（AMETEC 社製 TR585）を使用して円筒度の

*1 CDT 研究所

測定を行った。結果は真円度測定機で測定した結果から両端からそれぞれ10 mm 位置からのデータム25 mm 幅円筒と25 mm 幅測定円筒との同軸度は0.8 μm 程度に加工されているものと推定した。

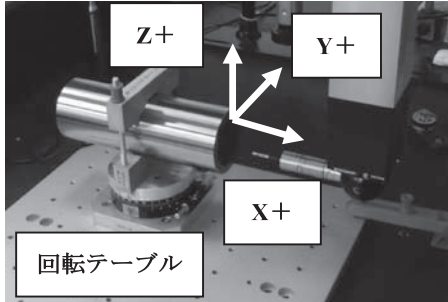


図1 検証ゲージと固定治具

2-2 測定実験の検討

同軸度測定実験に用いる CMM は、弊所の保有する装置でプローブヘッド位置を可変設定可能なモデルである。主な仕様についてと測定環境について表 1 に示す。次に同軸度測定に向けた実験要因について検討した。実験要因において、繰返し測定 n1, n2 は連続的な測定の繰返し、測定の反復 R1, R2, R3 は一定時間経過した測定の繰返しであり、いずれも同軸度測定の再現性を評価するための要因である。スタイラスのスピード S はスタイラスがゲージ表面に接触するスピードを変えるための要因であり、2 mm/sec (S1), 6 mm/sec (S2) に設定する。データム長さは幅 25 mm (W1), 75 mm (W2), 測定長さ L は 25 mm (W1), 75 mm (W2), さらに図 1 に示した回転テーブルでゲージの設置方向 D を D1 (X 軸), D2 (Y 軸), D3 (斜め 45°) の 3 方向に設

定するとともに、高さ設定治具によりゲージの高さ H を H1 (低), H2 (高) とする。これらのゲージの方向、ゲージの高さの水準を変化させることによって、プローブヘッドの設定位置、および CMM の座標値の測定位置を変化させることができ、プローブヘッドの位置決めの再現性と CMM の座標測定系の歪みなどの挙動を盛り込んだ同軸度の測定評価が可能になる。図 2 に実験要因をまとめたものを示す。次に、同軸度測定の実験要因を実行するに当たり、測定順序の無作為化を行った。これは、室温の周期的変化あるいは CMM の温度上昇などによる同軸度の測定結果の変動を平均化させ、測定実験の信頼性をより高めることを目的としている。図 3 に測定順序表を示す。まず、例として各反復測定 R1 において、高さ H の 2 個のブロックを無作為化し、さらに、個々の D×H×W×S ブロック内を 12 個のブロックごとに無作為化して同軸度測定を遂行することとした。ちなみに、今回の実験ではスタイラスの反転 (V) は測定するための要因として存在するが一通りの同軸度しか求められないため、スタイラスの反転と他の要因との関わりについての定量的に評価は行っていない。

表 1 CMM の主な仕様

測定範囲	705×1005×605 mm
プローブ	SP25M (レニショー製)
公称精度	MPE ^E 1.7+3L/1000 μm
	MPE ^P 1.7 μm
導入	平成 21 年 3 月
測定環境	20±1.0°C 50±10%

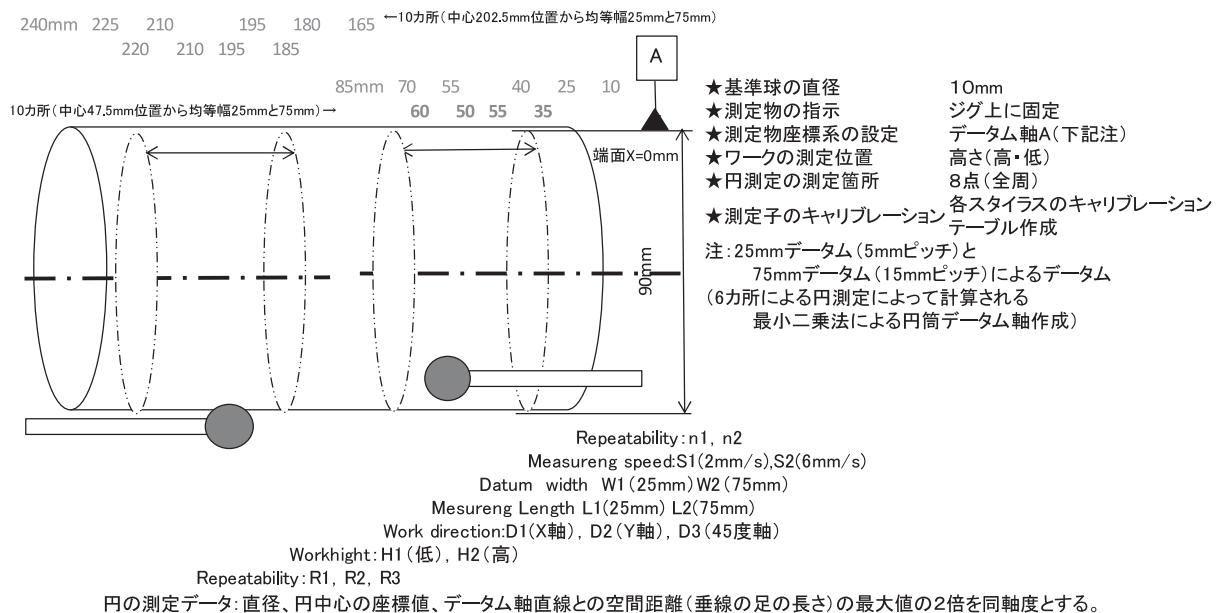


図 2 実験要因

高さ	データ長	同軸度計算対象	D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)																										
			S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)																									
			a	b	c	d	e	f																									
R1	H1(低)	25mm	25mm円筒	n1	A	2																											
			n2	⑧								⑤	⑫	①	④	⑦																	
		75mm	25mm円筒	n1								B	1																				
			n2	⑪																②	⑨	⑥	③	⑩									
		H2(高)	25mm	25mm円筒																n1	①	⑫	④	⑨	②	⑪							
				n2																B	1												
	75mm円筒		n1	7																								⑤	⑧	③	⑥	⑩	
	n2																																
	75mm		25mm円筒																														n1
			n2																														
	75mm円筒	n1																															
	n2																																

図3 測定順序表 (測定の反復 R1 のブロック抜粋)

3. 結果

3-1 測定データの解析

実験計画に従って CMM で測定した同軸度の測定データを表 3 に示す。この測定実験による各々の要因ごとの同軸度の変動を求めめるため、この測定データから分散分析を行う。実験計画で取り上げた要因の変動は二次の交互作用まで求め、それ以上の高次の交互作用と測定の反復との交互作用はプールして解析を行った。この測定実

験による、不偏分散の構造を表 4 に示す。同軸度の測定結果に対して上記に示す分散分析を行った結果、表内の * 印あるいは ** 印で示した要因が統計的に有意になった。* 印は 95% の信頼性で有意、** 印は 99% の有意になることを示す³⁾。すなわち、*、** 印が付けられた要因 (実験条件) によって同軸度の測定データが大きく変動していると統計的に判断できることになる。

表 3 測定データ

高さ	データ長	同軸度計算対象	D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)				
			S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)			
			a	b	c	d	e	f			
R1	H1(低)	25mm	25mm円筒	n1	0.00150	0.00173	0.00386	0.00925	0.00261	0.00590	
			n2	0.00504	0.00844	0.00392	0.00568	0.00253	0.00653		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00183	0.00200	0.00537	0.01205	0.00261	0.00629	
			n2	0.00502	0.00880	0.00600	0.00786	0.00305	0.00687		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00282	0.00295	0.00151	0.00527	0.00138	0.00254	
			n2	0.00696	0.00574	0.00211	0.00293	0.00104	0.00320		
	H2(高)	25mm	25mm円筒	n1	0.00282	0.00295	0.00321	0.00750	0.00145	0.00266	
			n2	0.00696	0.00556	0.00366	0.00454	0.00082	0.00320		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00661	0.01020	0.00827	0.00523	0.00327	0.00104	
			n2	0.00588	0.00793	0.00470	0.01565	0.00682	0.00292		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00697	0.01185	0.01080	0.00610	0.00337	0.00091	
			n2	0.00629	0.00918	0.00731	0.01565	0.00770	0.00430		
R2	H1(低)	25mm	25mm円筒	n1	0.00815	0.01151	0.00367	0.00379	0.00732	0.00354	
			n2	0.00688	0.00804	0.00202	0.00239	0.00496	0.00247		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00894	0.01233	0.00463	0.00392	0.00710	0.00314	
			n2	0.00730	0.00879	0.00384	0.00409	0.00496	0.00247		
		H2(高)	25mm	25mm円筒	n1	0.00649	0.01005	0.00711	0.00762	0.00542	0.00678
				n2	0.00610	0.00541	0.00515	0.00388	0.00749	0.00406	
	75mm		25mm円筒	n1	0.00746	0.01209	0.00936	0.00837	0.00702	0.00883	
			n2	0.00615	0.00538	0.00623	0.00441	0.00963	0.00454		
	75mm		25mm円筒	n1	0.00621	0.00646	0.00487	0.00345	0.00489	0.01035	
			n2	0.00724	0.00654	0.00233	0.00105	0.00300	0.00087		
	R3	H1(低)	25mm	25mm円筒	n1	0.00632	0.00631	0.00695	0.00370	0.00642	0.00412
				n2	0.00728	0.00635	0.00231	0.00126	0.00448	0.00087	
75mm			25mm円筒	n1	0.00835	0.00795	0.00239	0.00468	0.00448	0.00670	
			n2	0.00565	0.01032	0.00221	0.00246	0.00040	0.00286		
75mm			25mm円筒	n1	0.00889	0.00801	0.00550	0.00468	0.00450	0.00699	
			n2	0.00537	0.01005	0.00506	0.00574	0.00099	0.00279		
H2(高)		25mm	25mm円筒	n1	0.00801	0.00869	0.00347	0.00445	0.00694	0.00739	
			n2	0.00962	0.01120	0.00220	0.00201	0.00487	0.00406		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00813	0.00880	0.00337	0.00445	0.00688	0.00716	
			n2	0.00904	0.01105	0.00228	0.00194	0.00522	0.00406		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00551	0.00990	0.00972	0.01447	0.00496	0.01020	
			n2	0.00963	0.00327	0.00688	0.00430	0.00484	0.00635		
R3	H1(低)	25mm	25mm円筒	n1	0.00596	0.01037	0.01167	0.01447	0.00575	0.01131	
			n2	0.01033	0.00401	0.00835	0.03205	0.00508	0.00678		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00665	0.00856	0.00614	0.00173	0.00178	0.00477	
			n2	0.00939	0.00746	0.00432	0.00288	0.00162	0.00439		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00662	0.00853	0.00764	0.00284	0.00178	0.00477	
			n2	0.00971	0.00755	0.00397	0.00416	0.00201	0.00439		
	H2(高)	25mm	25mm円筒	n1	0.00490	0.00405	0.00242	0.01005	0.00597	0.00306	
			n2	0.00185	0.00909	0.00432	0.01022	0.00478	0.00642		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00504	0.00560	0.00332	0.01243	0.00732	0.00306	
			n2	0.00176	0.00948	0.00708	0.01349	0.00498	0.00810		
		75mm	25mm円筒	n1	0.00385	0.00350	0.00197	0.00635	0.00202	0.00616	
			n2	0.00357	0.00498	0.00274	0.00601	0.00409	0.00376		
75mm	25mm円筒	n1	0.00421	0.00333	0.00317	0.00828	0.00202	0.00616			
	n2	0.00372	0.00505	0.00520	0.00875	0.00391	0.00376				

表 4 不偏分散の構造と分散分析表

要 因	二乗和	自由度	不偏分散	不偏分散の構造	分散成分
一般平均	9567.6951	1	9567.6951	** $S_1 + 288\sigma_m^2$	$\sigma_m^2 = 33.1825$
R(反復測定)	34.6150	2	17.3075	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 16\sigma_{E_2}^2 + 48E_1^2 + 96\sigma_R^2$	
H(ワーク高さ)	0.1170	1	0.1170	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 16\sigma_{E_2}^2 + 48\sigma_{E_1}^2 + 72\sigma_{HS}^2 + 72\sigma_{HL}^2 + 72\sigma_{HW}^2 + 48\sigma_{HD}^2 + 144\sigma_H^2$	
E1(RHの交互作用)	172.1287	2	86.0644	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 16\sigma_{E_2}^2 + 48\sigma_{E_1}^2$	$E_1' = E_2 + E_1$
D(ワークの方向)	244.3242	2	122.1621	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 16\sigma_{E_2}^2 + 48\sigma_{DS}^2 + 48\sigma_{DL}^2 + 48\sigma_{DW}^2 + 48\sigma_{HD}^2 + 96\sigma_D^2$	
H×D	31.6264	2	15.8132	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 16\sigma_{E_2}^2 + 48\sigma_{HD}^2$	
E2(RHDの交互作用)	324.0105	8	40.5013	*	$\sigma_{E_2}^2 = 1.6372$
W(データムの長さ)	202.6453	1	202.6453	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 72\sigma_{WS}^2 + 72\sigma_{WL}^2 + 48\sigma_{DW}^2 + 72\sigma_{HW}^2 + 144\sigma_W^2$	
H×W	57.0618	1	57.0618	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 72\sigma_{HW}^2$	
D×W	219.1499	2	109.5750	** $\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2 + 48\sigma_{DW}^2$	$\sigma_{DW}^2 = 1.9848$
E3(RHDWの交互作用)	200.2905	14	14.3065	** $\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 8\sigma_{E_3}^2$	$\sigma_{E_3}^2 = 1.0545$
L(円筒の長さ)	52.0578	1	52.0578	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 72\sigma_{LS}^2 + 72\sigma_{WL}^2 + 48\sigma_{DL}^2 + 72\sigma_{HL}^2 + 144\sigma_L^2$	
H×L	1.3451	1	1.3451	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 72\sigma_{HL}^2$	
D×L	45.8101	2	22.9050	*	$\sigma_{DL}^2 = 0.3549$
W×L	18.0709	1	18.0709	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2 + 72\sigma_{WL}^2$	
E4(RHDWLの交互作用)	76.4437	31	2.4659	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 4\sigma_{E_4}^2$	$E_4' = E_5' + E_4$
S(測定スピード)	112.0872	1	112.0872	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 72\sigma_{LS}^2 + 72\sigma_{WS}^2 + 48\sigma_{DS}^2 + 72\sigma_{HS}^2 + 144\sigma_S^2$	
H×S	1.8196	1	1.8196	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 72\sigma_{HS}^2$	
D×S	23.1777	2	11.5888	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 48\sigma_{DS}^2$	
W×S	47.5842	1	47.5842	** $\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 72\sigma_{WS}^2$	$\sigma_{WS}^2 = 0.5724$
L×S	0.5698	1	0.5698	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2 + 72\sigma_{LS}^2$	
E5(RHDWLSの交互作用)	451.6451	66	6.8431	$\sigma_{E_6}^2 + 2\sigma_{E_5}^2$	$E_5' = E_5 + E_6$
E6(繰返し誤差)	886.7637	144	6.1581	$\sigma_{E_6}^2$	$\sigma_{E_6}^2 = 6.1581$
S _r (全変動)	3203.3442	288	11.1227		

4. 考 察

一般平均は測定データのかたよりの影響を示している。すなわち、測定したワークが真円度測定機による円筒スコヤの円筒度が 0.8 μm に加工されていると仮定すると、同軸度の測定データの理想値は 0.8 μm であるが、実際には表 3 に示す同軸度の測定結果が得られた。一般平均は理想値に対する測定データのかたよりの変動量の平均（一回の測定当たりの変動量）を表わしている。一般平均が 99%の信頼性で有意になることは、他の測定条件に起因する同軸度のばらつきに対して、かたよりの影響が大きいことを示している。すなわち、この CMM で同軸度を測定すると、測定データのかたよりが発生することになる。二次誤差 E2 (RHD の交互作用) が 95%の信頼性で有意、および三次誤差 E3 (RHDW の交互作用) が 99%の信頼性で有意になることは、測定の反復 R、測定の高さ H、ワークの設定方向 D、およびデータム形体の長さ W などに関わる測定条件が変化したとき、同軸度の測定データの再現性に乏しいことを示している。すなわち、この CMM で同軸度の測定を行うとすると、これらの 4 条件の影響が複雑に絡み合って同軸度の測定データが大きく変動することを示している。

D×W の交互作用が 99%の信頼性で有意になることは、ワークの設定方向 D とデータム形体の長さ W の測定条件の組合せで、同軸度の測定データが大きく変動することを示している。これは CMM 本体の固有の特性（例えば、XYZ 軸測定系の歪み）と関係するものと思

われる。すなわち、この CMM は Z 軸測定系の移動によって X 軸測定系の tilting が発生して、これが同軸度の測定データの変動に影響しているものと推定される。

表 5 に示す DW の二元表に示されるように、D1 (X 軸) 方向にワークを設定した場合には、他の測定条件に比して同軸度の測定データの変動が大きい。また、D2 (Y 軸) と D3 (45°) 方向に設定した場合には、データム形体が長い方が同軸度の測定データの変動は小さい。

D×L の交互作用が 95%の信頼性で有意になることは、ワークの設定方向 D と同軸度を測定する円筒の長さ L との組合せで、同軸度の測定データがばらついていることを示している。表 6 に示す DL の二元表に示されるように、やはり D1 (X 軸) 方向にワークを設定すると、他の方向に設定するよりも同軸度の測定データの変動が大きいことが示されている。

W×S の交互作用が 99%の信頼性で有意になることは、データム形体の長さ W と測定スピード（測定子が円筒面に接触する早さ）の組合せで、同軸度の測定データが大きくばらついていることを示している。すなわち、表 7 に示す WS の二元表に示されるように、データム形体の長さが短いほど、かつ測定スピードが速いほど、同軸度の測定データの変動は大きいことが示されている。

統計的に有意になった要因の分散成分の値を推定すると表 4 に示した分散分析表の値になる。これらの分散成分を合計すると $\sigma^2 = 44.9444$ となり、標準偏差は $\sigma^T = \pm 6.70$ となる。したがって、この CMM の同軸度測定の信

頼性（不確かさ）は $k=2$ で $U=\pm 13.40 \mu\text{m}$ と推定される。

表 5 DW 二元表

DW	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合 計
W1(25)	323.76	377.79	249.22	950.78
W2(75)	332.64	185.30	191.25	709.19
合 計	656.40	563.10	440.47	1659.97
二乗和	215468.43	177066.207	98688.45663	491,223.0931

表 6 DL 二元表

DL	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合 計
L1(25)	320.85	234.07	213.83	768.76
L2(75)	335.54	329.02	226.64	891.21
合 計	656.40	563.10	440.47	1659.97
二乗和	215536.877	163047.567	97090.14092	475674.5848

表 7 WS 二元表

WS	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	合 計
W1(25)	401.2	549.6	950.78
W2(75)	338.9	370.2	709.19
合 計	740.15	919.82	1659.97
二乗和	275848.8023	439112.0427	714960.8451

5. 結 言

CMM を用いた同軸度について

(1) (ワーク方向 D) と (データム長さ W) の組合せで、データが大きく変動する。

また、X 軸方向にワークを設置した場合、他の 2 方向より測定値の変動が大きい。同様の理由にて (ワーク方向 D) と (円筒の長さ L) の組合せで、データが大きく変動する。

(2) (データム長さ W) と (計測速度 S) の組み合わせで、データム長さが短いほど、測定スピードが速いほど測定値の変動が大きい。

(3) プローブ姿勢変更による影響と CMM 固有の各軸における特性が、測定値のばらつきに大きく影響する。

これらにより、CMM の同心度測定に関する不確かさ $U=\pm 13.40 \mu\text{m}$ ($k=2$) を得た。

参考文献

- 1) 石黒輝雄 他:CMM 測定技術向上に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.29, pp.1-6 (2015)
- 2) 日本工業標準調査会:JIS B 0021 (1998)
- 3) 中村義作:よくわかる実験計画法, 近代科学社, pp.184-187 (1997)