

CMM 測定技術向上に関する研究

—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

Study on CMM measurement technology improvement

- About uncertainty reduction technique in geometric tolerance measurement -

Teruo ISHIGURO, Akira YONEYAMA, Masaaki SANO and Tetsuo NAKAMURA

要 約

加工製品の海外展開がすすみ、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（B7440-2(2003)）はあるが、幾何公差については JIS 規格が定められていない。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、同心度について対象に、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を把握と幾何公差の評価を行った。これによる結果、影響を及ぼす主効果として影響する要因および交互作用による効果と不確かさについての確認ができた。

1. 緒 言

現在、加工製品の高精度・高機能化が進むとともに海外展開がすすんでいる。部品に要求される加工精度の向上とともに、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。しかし、三次元座標測定機（以下 CMM と表記する）の性能表示としては、長さとしての JIS 規格（B7440-2(2003)）に基づいた標準はあるが、幾何公差については JIS 規格に定められていない。複雑な形状の製品を測定するには、複数のスタイラスまたはスタイラス姿勢を変化させることが必要不可欠であるが、これが要因による誤差が累積し、測定結果に大きな影響を及ぼしている。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を提案することを目的に検討を行った。

規制されるとある。円形公差域の中心は、データ点 B に一致する。これを踏まえて、検証ゲージについて考案した。（図1）検証ゲージのデータ点平面 A から 10mm の位置における、直径 $\phi 30$ mm の内周円筒の横断面の中心（16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）と同じくデータ点平面 A から 10mm の位置における直径 $\phi 72$ mm の外周円筒の横断面の中心（16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）からデータ点平面 A に下した垂線であるデータ点軸直線 B との距離の 2 倍（データ点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）の数値を今回評価する同心度とした。なお、データ点形体 A 上の直径 $\phi 90$ mm の円測定の座標値（16点）から最小二乗法で推定される幾何学的平面をデータ点平面 A としている。

2. 実験方法

2-1 検証ゲージについて

まず、本報では検証する幾何公差を同心度に設定した。理由として、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ため、幾何公差の検証としての単純な評価が可能と考えたためである。JISB0021（1996）¹⁾より、同心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 の円によって

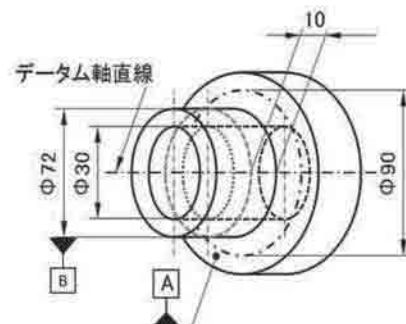


図1 検証ゲージ

次に、実際に検証ゲージ製作を行った。検証ゲージに求められる性能として、複数回の繰り返しにおいても測定値の変化が起こらないよう考慮し、材質は90MnV8を用い、ロックウェル硬度Cスケールにて57~60のものを用いた。これの測定面には研削仕上げを施し、粗さによる測定結果のばらつきを抑えることとした。検証ゲージの加工精度を確認するため、真円度測定機（AMETEC社製 TR585）、CMM（Zeiss社製 ZMC550）を使用して同心度の測定を行った。結果を表1に示す。TR585とZMC550の測定結果は多少異なるが、真円度測定機で測定した結果からデータム平面Aの平面度および外円筒・内円筒の測定箇所の真円度は表の程度と判断し、同心度は0.001mm程度に加工されているものと推定した。

表1 加工精度検証結果

	三次元座標測定機	真円度測定機
機種名	Zeiss ZMC550	AMETEC TR585
測定点数	16点 (1測定)	スキヤニング
データムA平面度	0.0004mm	0.0003mm
外円筒真円度	0.0005mm	0.0004mm
内円筒真円度	0.0012mm	0.0021mm
同心度	0.0003mm	0.0002mm

2-2 測定実験の検討

今回、同心度測定実験に用いるCMMは、弊所の保有するプローブヘッド位置を可変設定可能なM社製のものとした。主な仕様について表2に示す。また、同心度測定用に回転テーブルを持つ検証ゲージ固定治具を図2に示す。次に同心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 n_1, n_2 は連続的な測定の繰返し、測定の反復 R_1, R_2, R_3 は時間経過を置いた測定の繰返しであり、いずれも同心度測定の再現性を評価するための要因である。スタイラスの反転 (V) はスタイラスの方向を変えて測定するための要因であり、 $V_1(0^\circ)$ は図2の(-X)方向、 $V_2(180^\circ)$ は(+X)方向にスタイラスを設定する。スタイラスの反転と他の要因との関わりで発生する同心度の測定データの変動を定量的に評価することが重要だと考えられる。次に、スタイラスの速度 (S) は測定におけるスタイラスがゲージ表面に接触する速度を変えるための要因であり、 S_1 は 2mm/sec、 S_2 は 6mm/sec に設定する。さらに、図2に示す回転テーブルでゲージの設置方向 (D)、を $D_1(X$ 軸)、 $D_2(Y$ 軸)、 $D_3(斜め 45^\circ)$ の3方向に設定するとともに、図2に示す高さ設定治具によりゲージの高さ (H) を $H_1(低)$ 、 $H_2(高)$ とする。また、測定物のゲージテー

ブル上での設置位置 (P) を P_1 (基準球の校正位置)、 $P_2(P_1$ から(-Y)方向に 300mm 移動させた位置) の二箇所に変化させ、スタイラスの長さ (L) は $L_1(21mm)$ と $L_2(75mm)$ で同心度の測定を行う。これらのゲージの方向 (D_1, D_2, D_3)、ゲージの高さ (H_1, H_2)、ゲージの位置 (P_1, P_2) およびスタイラスの長さ (L_1, L_2) 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心度の測定評価が可能になる。図3に実験要因をまとめたものを示す。次に、同心度測定の実験要因を実行するに当たり、室温の周期的変化あるいはCMMの温度上昇などによる同心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測定順序の無作為化を行った。図4に測定順序表を示す。まず、例として各反復測定 R_1 においてスタイラスの長さ L ごとのブロックで同心度測定を行う。さらに各々のスタイラスの長さ L ごとのブロック内において、ゲージの位置 P と高さ H の4つの $P \times H$ ブロックを無作為化し、さらに、個々の $P \times H$ ブロック内をゲージの方向 D と測定速度 S の6つの $D \times S$ ブロックごとに無作為化して同心度測定を遂行することとした。

表2 CMMの主な仕様

測定範囲	705×1005×605mm
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

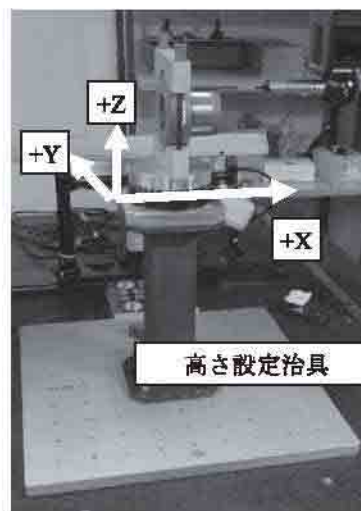


図2 検証ゲージと回転テーブルと高さ設定治具

繰返し測定: n_1, n_2
 スタイラスの反転: $V_1(0^\circ), V_2(180^\circ)$
 測定スピード: $S_1(2\text{mm/s}), S_2(6\text{mm/s})$ 高精度モード
 ワークの方向: $D_1(\text{X軸}), D_2(\text{Y軸}), D_3(\text{斜め}45^\circ)$
 ワークの高さ: $H_1(\text{低}), H_2(\text{高})$
 ワークの位置: $P_1(\text{基準球の校正位置}), P_2(P_1\text{から}(-Y)\text{方向に隔たった位置})$
 スタイラスの長さ: $L_1(21\text{mm}), L_2(75\text{mm})$
 測定の反復: R_1, R_2, R_3 測定データ総数: 576

図3 実験要因

				P1(奥)						P2(手前)								
				D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)		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)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)			
R1	L1(21)	H1(低)	n_1	$V_1(0^\circ)$														
			$V_2(180^\circ)$	⑥	④	⑤	1	③	①	②	③	④	②	4	⑤	①	⑥	
		n_2	$V_1(0^\circ)$															
		$V_2(180^\circ)$																
	H2(高)	n_1	$V_1(0^\circ)$															
		$V_2(180^\circ)$	①	④	⑤	3	②	⑥	③	⑥	①	⑤	2	②	④	③		
		n_2	$V_1(0^\circ)$															
		$V_2(180^\circ)$																
L2(75)	H1(低)	n_1	$V_1(0^\circ)$															
		$V_2(180^\circ)$	⑤	①	②	4	④	⑥	③	①	③	②	2	⑤	④	⑥		
	n_2	$V_1(0^\circ)$																
	$V_2(180^\circ)$																	
H2(高)	n_1	$V_1(0^\circ)$																
	$V_2(180^\circ)$	③	⑤	①	1	⑥	②	④	②	⑥	①	3	⑤	③	④			
	n_2	$V_1(0^\circ)$																
	$V_2(180^\circ)$																	

図4 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で測定した同心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心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う。この測定実験ではスタイラスの反転Vによって発生する同心度の変動を解析評価することが目的であるから、スタイラスの反転Vは母数因子と考え、他の要因は同心度のバラツキに影響する変量因子と考えており、不偏分散の構造は表4に示すようになる。

(1) 修正項: CF

$$CF = \frac{(\text{全測定データの合計})^2}{\text{全測定データ数}} = \frac{(890.112)^2}{576} = 1375.5136 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (1)$$

表3の同心度の測定データはCMMが示した値そのものであるが、表1に示したように測定箇所の外周円筒と内周円筒との同心度が極めて高精度に加工されているために、表3の測定データは同心度が「0.0」の理想状態に

対する測定した同心度の偏差と考える。したがって、修正項CFは、測定データ(同心度)のかたよりの平均的な変動を表しており、この変動はCMMとプローブシステムの挙動によってもたらされているものと判断する。

(2) 反復測定による測定データの変動: S_R

測定の反復の表5の補助表から、反復測定による同心度の変動 S_R が次式で計算される。

$$S_R = \frac{[(R_1\text{の合計})^2 + (R_2\text{の合計})^2 + (R_3\text{の合計})^2]}{\text{各Rに含まれるデータ数}} - CF = \frac{(264399.8461)}{192} - 1375.5136 = 1.5690 \quad (\text{自由度: } 2) \quad (2)$$

反復測定の変動 S_R は、測定を反復することによって発生する同心度の変動、すなわち同心度測定の間経過をおいた再現性を意味する。

(3) スタイラスの長さによる測定データの変動: S_L

スタイラスの長さを $L_1(21\text{mm}), L_2(75\text{mm})$ に変えることによって発生する同心度の変動 S_L は、表6のLPの補助表から次式で計算される。

$$S_L = \frac{[(L_1\text{の合計})^2 + (L_2\text{の合計})^2]}{\text{各Lに含まれるデータ数}} - CF = \frac{[(375.15)^2 + (514.96)^2]}{288} - 1375.5136 = 33.9355 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (3)$$

表 3 測定データ

				P1(奥)								P2(手前)				単位 μm	
				D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)		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)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)		合計
R1	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	n1	0.5	0.8	0.8	0.4	0.6	1.2	0.8	0.6	0.7	0.8	0.5	0.5	8.20
			n2	0.7	0.6	0.4	0.9	0.7	0.9	1.0	0.8	0.5	0.8	0.6	0.0	7.90	
		V2(180°)	n1	0.8	0.2	3.5	2.4	1.8	2.1	1.7	1.4	0.5	2.0	0.3	3.7	20.40	
		n2	1.4	1.4	2.3	2.0	1.1	4.2	1.0	1.5	0.5	0.4	0.4	3.0	18.20		
		V1(0°)	n1	0.6	0.6	0.9	1.2	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	1.1	1.1	0.8	10.30	
		n2	1.0	0.7	0.8	1.1	0.5	0.7	0.5	0.2	0.5	0.9	0.8	0.7	8.40		
	L2(75)	H1(高)	V1(0°)	n1	1.5	3.7	1.0	0.8	4.2	1.9	2.2	3.4	2.2	1.8	1.2	1.3	25.20
			n2	3.7	2.7	0.7	1.0	3.2	3.7	1.0	1.6	1.0	1.6	1.2	1.3	22.70	
		V2(180°)	n1	1.0	1.0	0.7	0.9	0.5	1.0	1.5	1.5	1.2	0.8	0.9	1.2	12.00	
		n2	0.8	1.2	1.0	1.0	0.4	0.4	1.2	1.8	1.9	1.1	1.0	0.4	12.20		
		V1(0°)	n1	3.5	3.9	1.6	2.1	2.1	2.0	1.1	1.3	2.4	4.0	2.8	3.3	30.10	
		n2	2.4	2.4	2.5	2.9	0.8	2.3	0.5	1.3	4.4	4.5	3.4	4.5	31.80		
L2(75)	H2(高)	V1(0°)	n1	0.6	0.6	1.0	0.7	0.2	0.6	1.9	0.8	0.5	0.6	0.0	0.5	8.00	
		n2	0.5	0.9	0.7	0.7	0.3	0.2	1.2	0.2	2.2	0.8	0.7	0.3	8.70		
	V2(180°)	n1	4.9	3.3	2.7	1.8	2.4	1.7	2.8	4.3	1.2	5.0	0.7	3.8	34.60		
	n2	6.3	7.7	3.4	6.9	3.3	3.3	2.6	3.0	2.7	4.5	3.3	3.2	50.20			
	V1(0°)	n1	0.9	1.2	0.7	1.1	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.9	0.4	0.7	9.50		
	n2	0.6	0.8	0.9	0.7	0.8	0.1	1.0	0.9	0.9	0.6	0.6	0.5	8.40			
R2	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	n1	2.3	1.8	1.4	2.0	0.4	0.6	1.5	0.8	2.9	3.7	0.9	1.6	19.90
			n2	1.2	1.7	1.2	0.9	1.7	0.3	1.2	0.6	3.0	3.1	0.5	0.6	16.20	
		V2(180°)	n1	0.7	0.4	0.3	0.7	0.8	0.4	0.9	0.6	0.3	2.4	0.6	0.4	8.50	
		n2	0.6	0.4	0.7	0.5	0.8	0.3	0.8	3.4	0.4	0.4	0.7	0.4	9.20		
		V1(0°)	n1	4.3	5.5	1.5	1.6	1.3	3.1	3.2	4.7	1.3	2.2	1.3	1.5	31.50	
		n2	3.3	4.9	0.9	1.2	1.5	1.3	1.5	11.1	1.1	1.1	2.3	0.5	30.70		
	L2(75)	H1(高)	V1(0°)	n1	2.2	0.9	0.7	0.9	1.4	0.8	1.4	0.5	0.9	0.8	1.2	1.3	13.00
			n2	0.4	1.1	1.3	0.7	0.8	1.2	1.0	1.2	1.1	0.8	1.2	0.7	11.30	
		V2(180°)	n1	2.0	2.1	0.8	1.6	2.3	1.1	3.6	0.5	2.2	2.5	2.0	2.3	23.00	
		n2	1.7	0.7	1.4	1.8	1.0	1.6	0.4	1.8	1.0	3.0	2.4	5.2	22.00		
		V1(0°)	n1	1.1	0.5	0.9	0.8	0.5	0.2	0.7	0.6	0.5	2.4	0.7	0.4	9.10	
		n2	1.0	0.8	0.5	0.5	0.9	0.4	0.9	0.5	0.4	0.9	0.3	0.8	7.70		
L2(75)	H2(高)	V1(0°)	n1	8.8	4.5	1.2	2.1	2.2	1.5	4.4	5.4	1.0	5.5	1.2	1.8	37.20	
		n2	6.1	6.9	0.9	3.0	3.6	1.7	5.2	5.3	0.5	0.9	0.5	2.5	37.10		
	V2(180°)	n1	0.8	0.9	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	0.9	0.9	0.9	0.5	1.3	9.80		
	n2	0.4	0.6	0.4	1.0	0.3	0.5	0.9	0.9	1.0	1.0	0.6	0.8	8.33			
	V1(0°)	n1	2.3	4.2	1.1	0.8	0.5	2.2	0.4	0.1	1.8	2.3	0.3	1.0	16.74		
	n2	0.5	1.5	1.5	1.4	1.9	1.5	0.3	1.0	1.9	1.5	1.7	1.4	15.45			
R3	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	n1	0.3	0.2	1.1	0.6	2.2	0.8	0.9	0.4	0.6	0.5	0.6	0.5	8.84
			n2	0.8	0.4	0.4	1.0	0.8	0.9	0.7	0.7	0.5	0.2	0.3	0.5	6.95	
		V2(180°)	n1	5.0	3.5	0.1	1.0	2.4	4.8	1.7	2.6	0.8	0.7	2.0	0.3	24.87	
		n2	5.7	6.1	1.4	1.2	2.3	2.8	2.1	1.6	0.1	0.6	2.4	2.3	28.57		
		V1(0°)	n1	0.6	1.0	1.0	1.1	0.6	1.8	1.0	1.4	0.9	0.7	1.4	0.9	12.22	
		n2	1.7	0.4	0.8	1.0	1.5	1.1	1.4	1.5	0.8	0.7	1.1	0.7	12.47		
	L2(75)	H1(高)	V1(0°)	n1	1.5	0.4	3.7	1.0	3.7	0.2	2.8	3.6	1.0	3.1	1.3	4.7	26.82
			n2	2.8	1.3	1.5	4.3	1.1	6.1	4.0	4.0	5.5	3.4	1.0	0.7	35.65	
		V2(180°)	n1	1.3	1.2	2.6	0.8	0.6	0.4	0.6	1.4	0.7	0.1	0.8	0.4	10.81	
		n2	0.8	0.9	1.0	0.6	0.7	0.2	0.4	1.1	0.8	0.7	0.2	0.6	7.87		
		V1(0°)	n1	1.7	2.0	3.5	2.3	3.3	2.7	2.4	2.6	2.4	2.9	4.6	3.0	33.65	
		n2	3.4	2.8	2.0	1.3	2.1	0.3	2.1	3.6	0.6	1.5	4.3	3.3	27.37		
合計				94.80	93.24	61.04	67.03	67.52	68.95	73.10	90.87	80.98	62.13	58.89	71.38	890.11	
二乗和				331.62	348.20	116.74	152.00	148.94	178.44	188.71	348.10	130.35	231.01	122.88	190.40	2464.40	

表 4 不偏分散の構造

要因	自由度	不偏分散の構造
一般平均	1	$V_{S1} + 576\sigma_n^2$
R(反復測定)	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2 + 96\sigma_{E1}^2 + 192\sigma_n^2$
L(スタイルスの長さ)	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2 + 96\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{L5}^2 + 96\sigma_{L3}^2 + 144\sigma_{LH}^2 + 144\sigma_{LP}^2 + 288\sigma_n^2$
E1(RLの交互作用)	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2 + 96\sigma_{E1}^2$
P(ワークの位置)	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2 + 144\sigma_{P5}^2 + 96\sigma_{PD}^2 + 144\sigma_{PH}^2 + 144\sigma_{LP}^2 + 288\sigma_n^2$
L×P	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2 + 144\sigma_{LP}^2$
E2(RLPHの交互作用)	4	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 48\sigma_{E2}^2$
H(ワークの高さ)	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 144\sigma_{H5}^2 + 96\sigma_{HD}^2 + 144\sigma_{PH}^2 + 144\sigma_{LH}^2 + 288\sigma_n^2$
L×H	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 144\sigma_{LH}^2$
P×H	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2 + 144\sigma_{PH}^2$
E3(RLPHの交互作用)	9	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 24\sigma_{E3}^2$
D(ワークの方向)	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 96\sigma_{D5}^2 + 96\sigma_{HD}^2 + 96\sigma_{PD}^2 + 96\sigma_{LD}^2 + 192\sigma_n^2$
L×D	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 96\sigma_{LD}^2$
P×D	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 96\sigma_{PD}^2$
H×D	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2 + 96\sigma_{HD}^2$
E4(RLPHDの交互作用)	40	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 8\sigma_{E4}^2$
S(測定のスปีド)	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 96\sigma_{S5}^2 + 144\sigma_{HS}^2 + 144\sigma_{PS}^2 + 144\sigma_{LS}^2 + 288\sigma_n^2$
L×S	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 144\sigma_{LS}^2$
P×S	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 144\sigma_{PS}^2$
H×S	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 144\sigma_{HS}^2$
D×S	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2 + 96\sigma_{DS}^2$
E5(RLPHDSの交互作用)	66	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 4\sigma_{E5}^2$
V(スタイルスの反転)	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 144\sigma_{V5}^2 + 144\sigma_{DV}^2 + 144\sigma_{HV}^2 + 144\sigma_{PV}^2 + 144\sigma_{LV}^2 + 288\sigma_n^2$
L×V	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 144\sigma_{LV}^2$
P×V	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 144\sigma_{PV}^2$
H×V	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 144\sigma_{HV}^2$
D×V	2	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 96\sigma_{DV}^2$
S×V	1	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2 + 144\sigma_{SV}^2$
E6(RLPHDSVの交互作用)	137	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E8}^2$
E7(繰返し誤差)	288	σ_{E7}^2
S7(全変動)	576	

表5 Rの補助表

R1	310.00
R2	294.30
R3	285.81
合計	890.11
二乗和	264399.8461

表6 LPの補助表

	P1(奥)	P2(手前)	合計
L1(21)	202.68	172.47	375.15
L2(75)	250.30	264.66	514.96
合計	452.98	437.13	890.11
二乗和	103729.27	99790.82	203520.0889

(4) RLの交互作用による測定データの変動: S_{R1}

測定の反復Rとスタイラスの長さLの要因が相互に影響したときの同心度測定の変動 S_{R1} は、表7のRLPの補助表から次式によって計算される。

$$S_{R1} = [(R_1L_1 \text{の合計})^2 + (R_1L_2 \text{の合計})^2 + (R_2L_1 \text{の合計})^2 + (R_2L_2 \text{の合計})^2 + (R_3L_1 \text{の合計})^2 + (R_3L_2 \text{の合計})^2] / (\text{各RLに含まれるデータ数}) - CF - S_R - S_L$$

$$= (122.30)^2 + (187.70)^2 + (133.90)^2 + (160.40)^2 + (118.95)^2 + (166.86)^2 / 96 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 = 3.9540$$

(自由度: 2) (4)

RとLの要因の交互作用 S_{R1} はスタイラスの長さを変えて反復した同心度測定を行った際の同心度測定の再現性を意味する。

表7 RLPの補助表

		P1(奥)	P2(手前)	合計
R1	L1(21)	69.50	52.80	122.30
	L2(75)	93.10	94.60	187.70
R2	L1(21)	61.30	72.60	133.90
	L2(75)	78.70	81.70	160.40
R3	L1(21)	71.88	47.07	118.95
	L2(75)	78.50	88.36	166.86
合計		452.98	437.13	890.11
二乗和		34778.22	33705.72	68483.9489

(5) 測定物の設定位置を変えることによる測定データの変動: S_P

測定物の設定位置を、基準球の近傍とそこから(-Y)方向に300mmの位置による同心度測定を行った際、変動 S_P は表7のRLPの補助表から次式によって計算される。

$$S_P = [(P_1 \text{の合計})^2 + (P_2 \text{の合計})^2] / (\text{各Pに含まれるデータ数}) - CF$$

$$= [(452.98)^2 + (437.13)^2] / 288 - 1375.5136 = 0.4362$$

(自由度: 1) (5)

測定物の設定位置を P_1, P_2 に変更することは、CMMのY軸による測定位置を変化させ、基準球に近い位置と離れた位置で測定した際の同心度の変動を意味する。

(6) LPの交互作用による測定データの変動: S_{LP}

スタイラスの長さLと測定物の設定位置Pが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{LP} は、表6のLPの補助表から次式によって計算される。

$$S_{LP} = [(L_1P_1 \text{の合計})^2 + (L_1P_2 \text{の合計})^2 + (L_2P_1 \text{の合計})^2 + (L_2P_2 \text{の合計})^2] / (\text{各LPに含まれるデータ数}) - CF - S_L - S_P$$

$$= 203520.0889 / 144 - 1375.5136 - 33.9355 - 0.4362 = 3.4488$$

(自由度: 1) (6)

交互作用 S_{LP} は、スタイラスの長さLと測定物の設定位置Pが変わることによる要因が相互に関係した際の同心度測定の変動を意味する。

(7) RLPの交互作用による測定データの変動: S_{R2}

測定の反復R、スタイラスの長さLおよび測定物の設定位置Pの要因が相互に影響したとき、同心度測定の変動 S_{R2} は表7のRLPの補助表から次式で計算される。

$$S_{R2} = [(R_1L_1P_1)^2 + (R_1L_1P_2)^2 + \dots + (R_3L_2P_2)^2] / (\text{各RLPに含まれるデータ数}) - CF - S_R - S_L - S_{R1} - S_P - S_{LP}$$

$$= 68483.0489 / 48 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 - 3.9540 - 0.4362 - 3.4488 = 7.8920 \text{ (自由度: 4) (7)}$$

交互作用 S_{R2} は、測定の反復が関わる測定データの変動であり、これら3つの要因が関わる同心度測定の再現性を意味している。

(8) 測定物の設定高さを変えることによる測定データの変動: S_H

測定物の設定高さを図2に示すように変化させて同心度測定を行ったとき、同心度測定の変動 S_H は表8のLHの補助表から次式によって計算される。

$$S_H = [(H_1 \text{の合計})^2 + (H_2 \text{の合計})^2] / (\text{各Hに含まれるデータ数}) - CF = [(402.48)^2 + (487.63)^2] / 288 - 1375.5136 = 12.5877 \text{ (自由度: 1) (8)}$$

測定物の設定高さを H_1, H_2 に変化させることは、CMMのZ軸の測定位置が変わることによる同心度測定の変動を意味している。

表8 LHの補助表

	H1(低)	H2(高)	合計
L1(21)	159.82	215.33	375.15
L2(75)	242.66	272.30	514.96
合計	402.48	487.63	890.11
二乗和	84426.31	120514.30	204940.6069

(9) LH, PHの交互作用による測定データの変動: S_{LH} ,

S_{PH}

スタイラスの長さLと測定物の設定高さHが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{LH} は、表8のLHの補助表から次式によって計算される。

$$S_{LH} = [(L_1H_1 \text{の合計})^2 + (L_1H_2 \text{の合計})^2 + (L_2H_1 \text{の合計})^2 + (L_2H_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 LH に含まれるデータ数}) - CF - S_L - S_H = 204940.6069 / 144 - 1375.5136 - 33.9355 - 12.5877 = 1.1619$$

(自由度: 1) (9)

測定物の設定の位置Pと高さHが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{PH} は、表9のPHの補助表から次式次式によって計算される。

$$S_{PH} = [(P_1H_1 \text{の合計})^2 + (P_1H_2 \text{の合計})^2 + (P_2H_1 \text{の合計})^2 + (P_2H_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 PH に含まれるデータ数}) - CF - S_P - S_H = 200666.8255 / 144 - 1375.5136 - 0.4362 - 12.5877 = 4.9822$$

(自由度: 1) (10)

交互作用 S_{LH} はスタイラスの長さLと測定物の設定高さH, 交互作用 S_{PH} は測定物の設定位置Pと高さHの要因が相互に関係したときの同心度測定の変動を意味している。

表9 PHの補助表

	P1(奥)	P2(手前)	合計
H1(低)	191.81	210.67	402.48
H2(高)	261.17	226.46	487.63
合計	452.98	437.13	890.11
二乗和	105000.85	95665.98	200666.8255

(10) RLPHが関わる高次の交互作用による測定データの変動: S_{R3}

測定の反復R, スタイラスの長さL, 測定物の設定の位置Pと高さHの要因が相互に影響した際, 同心度測定の変動 S_{R3} は表10のRLPHの補助表から次式にて計算される。

$$S_{R3} = [(R_1L_1P_1H_1)^2 + (R_1L_1P_2H_1)^2 + \dots + (R_3L_2P_2H_2)^2] / (\text{各 RLPH に含まれるデータ数}) - CF - S_R - S_L - S_{R1} - S_P - S_{1P} - S_{R2} - S_H - S_{LH} - S_{PH}$$

$$= 34935.1805 / 24 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 - 3.9540 - 0.4362 - 3.4488 - 7.8920 - 12.5877 - 1.1619 - 4.9822 = 10.1518$$

(自由度: 9) (11)

交互作用 S_{R3} は、測定の反復の影響および高次の交互作用LPHの影響を含めた測定データの変動であり、RLPHの要因が関わる同心度測定の再現性を意味している。

(11) 測定物の設定方向を変えることによる測定データの変動: S_D

測定物の設定方向を D_1, D_2, D_3 の3方向に変化させて同心度測定を行った際, 表11のLDの補助表から同心度測定

の変動 S_D は次式によって計算される。

表10 RLPHの補助表

			P1(奥)	P2(手前)	合計
R1	L1(21)	H1(低)	31.70	24.00	55.70
		H2(高)	37.80	28.80	66.60
	L2(75)	H1(低)	38.40	47.80	86.20
		H2(高)	54.70	46.80	101.50
R2	L1(21)	H1(低)	24.70	29.30	54.00
		H2(高)	36.60	43.30	79.90
	L2(75)	H1(低)	30.50	38.80	69.30
		H2(高)	48.20	42.90	91.10
R3	L1(21)	H1(低)	26.54	23.58	50.12
		H2(高)	45.34	23.48	68.83
	L2(75)	H1(低)	39.97	47.19	87.16
		H2(高)	38.53	41.17	79.70
		合計	452.98	437.13	890.11
		二乗和	17945.77	16989.41	34935.1805

$S_D = [(D_1 \text{の合計})^2 + (D_2 \text{の合計})^2 + (D_3 \text{の合計})^2] / (\text{各 D に含まれるデータ数}) - CF$

$$= [(351.81)^2 + (271.78)^2 + (266.52)^2] / 192 - 1375.5136 = 23.7966 \quad (\text{自由度: 2}) \quad (12)$$

測定物の設定方向を D_1, D_2, D_3 の3方向に変化させることは、同心度を測定するCMMの測定の位置, およびプローブシステムの設定方向を変えることになり、三次元座標測定系とプローブシステムの挙動とを結びつけて同心度測定の変動を評価するためである。

表11 LDの補助表

	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合計
L1(21)	154.11	106.41	114.63	375.15
L2(75)	197.70	165.37	151.89	514.96
合計	351.81	271.78	266.52	890.11
二乗和	62835.18	38670.33	36210.61	137716.1161

(12) LD, PD, HDの交互作用による測定データの変動:

S_{LD}, S_{PD}, S_{HD}

スタイラスの長さLと測定物の設定方向Dが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{LD} は、表11のLDの補助表から次式によって計算される。

$$S_{LD} = [(L_1D_1 \text{の合計})^2 + (L_1D_2 \text{の合計})^2 + \dots + (L_2D_3 \text{の合計})^2] / (\text{各 LD に含まれるデータ数})$$

$$- CF - S_L - S_D = 137716.1161 / 96 - 1375.5136 - 33.9355 - 23.7966 = 1.2972 \quad (\text{自由度: 2}) \quad (13)$$

測定物の設定の位置Pと方向Dが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{PD} は、表12のRLPHDの補助表から次式によって計算される。

$$S_{PD} = [(P_1D_1 \text{の合計})^2 + (P_1D_2 \text{の合計})^2 + \dots + (P_2D_3 \text{の合計})^2] / (\text{各 PD に含まれるデータ数}) - CF - S_P -$$

$$S_D = (187.84)^2 + (128.67)^2 + (136.47)^2 + (163.97)^2 + (143.11)^2 + ($$

130.05)² / 96-1375.5136-0.4362-23.7966=3.8321
(自由度: 2) (14)

表 12 RLPHD の補助表

		P1(奥)			P2(手前)			合 計
		D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	
L1(21)	H1(低)	8.40	12.70	12.80	8.80	8.20	9.00	55.70
	H2(高)	14.50	7.50	15.80	10.40	10.00	8.40	88.90
L2(75)	H1(低)	18.20	12.70	9.50	10.20	20.10	17.50	86.20
	H2(高)	24.80	17.80	12.00	18.80	17.50	12.50	101.50
L1(21)	H1(低)	10.50	8.90	5.30	7.70	16.80	5.80	64.00
	H2(高)	20.10	7.40	9.10	28.40	9.20	7.70	79.90
L2(75)	H1(低)	11.10	9.20	10.20	10.40	12.10	19.30	99.30
	H2(高)	27.50	9.70	11.00	23.00	12.10	7.80	91.10
L1(21)	H1(低)	11.10	7.59	7.85	5.59	10.45	7.54	50.12
	H2(高)	21.97	8.58	18.79	10.65	4.09	8.76	68.83
L2(75)	H1(低)	9.81	14.35	18.01	19.55	15.95	11.99	87.18
	H2(高)	14.08	14.16	10.22	14.48	9.82	17.07	79.70
	合 計	187.84	128.87	136.47	183.97	143.11	130.05	890.11
	二乗和	3418.24	1518.99	1684.94	2701.83	1948.68	1594.98	12867.7513

測定物の設定の高さ H と方向 D が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{HD} は、表 13 の HD の補助表から次式によって計算される。

$$S_{HD} = [(H_1D_1 \text{の合計})^2 + (H_1D_2 \text{の合計})^2 + \dots + (H_2D_3 \text{の合計})^2] / (\text{各 HD に含まれるデータ数}) - CF - S_H - S_D = 139325.4443 / 96 - 1375.5136 - 12.5877 - 23.7966 = 39.4088 \quad (\text{自由度: 2}) \quad (15)$$

表 13 HD の補助表

	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合 計
H1(低)	127.15	146.04	129.29	402.48
H2(高)	224.66	125.74	137.23	487.63
合 計	351.81	271.78	266.52	890.11
二乗和	66639.24	37138.23	35547.98	139325.4443

交互作用 S_{LD}, S_{PD}, S_{HD} は、測定物の設定の方向 D とスタイラスの長さ L, 測定物の設定の位置 P, および測定物の設定の高さ H の要因が相互に関係して、三次元座標測定系とプローブシステムの双方の動きと挙動によって発生する同心度測定の変動を意味している。

(13) RLPHD が関わる高次の交互作用による測定データの変動: S_{E3}

測定の反復 R, スタイラスの長さ L, 測定物の設定の位置 P と高さ H, および測定物の設定方向 D の要因が複雑に関係したとき、これらによる同心度測定の変動を一括して S_{E4} で表すと、変動 S_{E4} は表 12 の RLPHD の補助表から次式によって計算される。

$$S_{E4} = [(R_1L_1P_1H_1D_1)^2 + (R_1L_1P_2H_2D_2)^2 + \dots + (R_3L_2P_2H_2D_3)^2] / (\text{各 RLPHD に含まれるデータ数}) - CF - S_R - S_L - S_{P1} - S_P - S_{LP} - S_{E2} - S_H - S_{LH} - S_{PH} - S_{E3} - S_D - S_{LD} - S_{PD} - S_{HD} = 12867.7513 / 8 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 - 3.9540 - 0.4362 - 3.4488 - 7.8920 - 12.5877 - 1.1619 - 4.9822 - 10.1518 - 23.7966 - 1.2972 - 3.8321 - 39.4088 = 84.5016$$

(自由度: 40) (16)

この高次の交互作用 S_{E4} は、測定の反復と LPHD の要因が

関わる交互作用, および高次の交互作用 LPH, LHD, PHD, LPHD の影響を含めた測定データの変動であり, RLPHD の各要因が複雑に関わる同心度測定データの再現性が評価できる。

(14) 測定スピードを変えることによる測定データの変動: S_S

測定速度を S₁, S₂ に変化させて同心度測定を行ったとき、表 14 の LS の補助表から同心度測定の変動 S_S は次式によって計算される。

$$S_S = [(S_1 \text{の合計})^2 + (S_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 S に含まれるデータ数}) - CF = [(416.53)^2 + (473.58)^2] / 288 - 1375.5136 = 5.6505 \quad (\text{自由度: 1}) \quad (17)$$

測定スピードを変化させることは、同心度の測定データに現れる測定スピードの影響を三次元座標測定系とプローブシステムとの関係性を評価するためである。

表 14 LS の補助表

	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	合 計
L1(21)	169.23	205.92	375.15
L2(75)	247.30	267.66	514.98
合 計	416.53	473.58	890.11
二乗和	89796.0829	114044.922	203841.0049

(15) LS, PS, HS, DS の交互作用による測定データの変動: S_{LS}, S_{PS}, S_{HS}, S_{DS}

スタイラスの長さ L と測定のスPEED S が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{LD} は、表 14 の LS の補助表から次式によって計算される。

$$S_{LS} = [(L_1S_1 \text{の合計})^2 + (L_1S_2 \text{の合計})^2 + \dots + (L_2S_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 LS に含まれるデータ数}) - CF - S_L - S_S = 203841.0049 / 144 - 1375.5136 - 33.9355 - 5.6505 = 0.4630 \quad (\text{自由度: 1}) \quad (18)$$

測定物の設定の位置 P と測定のスPEED S が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{PS} は、表 15 の PS の補助表から次式によって計算される。

$$S_{PS} = [(P_1S_1 \text{の合計})^2 + (P_1S_2 \text{の合計})^2 + \dots + (P_2S_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 PS に含まれるデータ数}) - CF - S_P - S_S = 199482.4285 / 144 - 1375.5136 - 0.4362 - 5.6505 = 3.6944 \quad (\text{自由度: 1}) \quad (19)$$

表 15 PS の補助表

	P1(奥)	P2(手前)	合 計
S1(2mm/s)	223.76	192.77	416.53
S2(6mm/s)	229.22	244.36	473.58
合 計	452.98	437.13	890.11
二乗和	102610.346	96872.0825	199482.4285

測定物の設定の高さHと測定のスปีドSが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{HS} は、表16のHSの補助表から次式によって計算される。

$$S_{HS} = [(H_1S_1 \text{の合計})^2 + (H_1S_2 \text{の合計})^2 + \dots + (H_2S_2 \text{の合計})^2] / (\text{各HSに含まれるデータ数}) - CF - S_H - S_S$$

$$= 200703.8125 / 144 - 1375.5136 - 12.5877 - 5.6505 = 0.0247$$

(自由度: 1) (20)

表16 HSの補助表

	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	合計
H1(低)	187.9	214.6	402.48
H2(高)	228.6	259.0	487.63
合計	416.53	473.58	890.11
二乗和	87576.4585	113127.354	200703.8125

測定物の設定の方向Dと測定のスปีドSが相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{DS} は、表17のDSの補助表から次式で計算される。

$$S_{DS} = [(D_1S_1 \text{の合計})^2 + (D_1S_2 \text{の合計})^2 + \dots + (D_2S_2 \text{の合計})^2] / (\text{各DSに含まれるデータ数}) - CF - S_D - S_S$$

$$= 134920.0123 / 96 - 1375.5136 - 23.7966 - 5.6505 = 0.4561$$

(自由度: 2) (21)

表17 DSの補助表

	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合計
S1(2mm/s)	167.70	122.62	126.21	416.53
S2(6mm/s)	184.11	149.16	140.31	473.58
合計	351.81	271.78	266.52	890.11
二乗和	62019.78	37284.37	35615.86	134920.0123

交互作用 S_{LS} , S_{PS} , S_{HS} , S_{DS} は、測定子が測定面に接触するときの測定スปีドとスタイラスの長さL, 測定物の設定の位置P, 測定物の設定の高さH, および測定物の設定方向Dの要因が相互に関係して、三次元座標測定系とプローブシステムの双方の動きと挙動によって発生する同心度測定の変動を意味している。

(16) RLPHDSが関わる高次の交互作用による測定データの変動: S_{B5}

測定の反復R, スタイラスの長さL, 測定物の設定の位置Pと高さH, 測定物の設定方向D, および測定のスปีドSの要因が複雑に関係したとき、これらによる同心度測定の変動を一括して S_{B5} で表すと、変動 S_{B5} は表18のRLPHDSの補助表から次式で計算される。

$$S_{B5} = [(R_1L_1P_1H_1D_1S_1)^2 + (R_1L_1P_2H_2D_1S_2)^2 + \dots + (R_2L_2P_2H_2D_2S_2)^2] / (\text{各RLPHDSに含まれるデータ数}) - CF - S_R - S_L - S_{E1} - S_P - S_{LP} - S_{R2} - S_H - S_{LH} - S_{PH} - S_{E3} - S_D - S_{LD} -$$

$$S_{PD} - S_{HD} - S_{E4} - S_S - S_{LS} - S_{PS} - S_{HS} - S_{DS}$$

$$= 6687.4043 / 4 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 - 3.9540 - 0.4362 - 3.4488 - 7.8920 - 12.5877 - 1.1619 - 4.9822 - 10.1518 - 23.7966 - 1.2972 - 3.8321 - 39.4088 - 84.5016 - 5.6505 - 0.4630 - 3.6944 - 0.0247 - 0.4561 = 53.0935$$

(自由度: 66) (22)

この高次の交互作用 S_{B5} は、測定の反復とLPHDSの要因が関わる交互作用、および高次の交互作用LPH, LPD, LPS, LHD, LHS, LDS, PHD, PDS, HDS, LPHD, LPDS, LHDS, PHDS, LPHDSの影響を含めた測定データの変動であり、RLPHDSの各要因が複雑に関わる同心度測定データの再現性を評価するためである。

表18 RLPHDSの補助表

		P1(高)						P2(低)						合計
		D1(45°)		D2(90°)		D3(45°)		D1(45°)		D2(90°)		D3(45°)		
		S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	
R1	L1(21°)	8.00	8.00	7.00	6.20	6.00	6.00	4.00	4.00	2.00	4.00	1.00	2.00	18.20
	L2(75°)	8.00	7.70	6.00	4.30	6.00	7.00	4.00	6.00	4.00	2.00	4.00	4.30	6.00
	L3(150°)	7.70	8.00	5.00	6.00	6.00	5.70	4.00	6.00	6.00	10.00	8.10	6.00	66.87
R2	L1(21°)	12.00	12.00	1.00	10.00	6.00	5.00	6.00	6.00	6.00	10.00	4.70	7.00	101.23
	L2(75°)	6.00	6.00	4.00	4.20	6.00	1.00	4.00	6.00	7.00	6.00	6.00	6.00	64.00
	L3(150°)	6.00	11.00	6.00	4.00	6.00	3.10	6.00	6.00	6.10	6.10	4.00	6.00	70.00
R3	L1(21°)	6.00	6.00	4.00	4.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	66.87
	L2(75°)	14.00	12.70	3.00	6.00	7.00	3.00	11.00	11.00	6.00	6.00	6.10	6.10	91.10
	L3(150°)	6.00	7.70	6.00	4.30	6.00	4.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	66.87
R4	L1(21°)	11.70	16.00	5.00	3.70	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	66.87
	L2(75°)	6.00	6.00	6.00	7.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	67.10
	L3(150°)	7.10	6.00	6.10	6.00	6.70	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	70.70
合計	64.00	64.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	6687.4043
二乗和	874.877	406.118	364.976	412.057	412.057	404.466	416.451	408.668	478.496	493.7167	349.8077	468.216	6687.4043	

(17) スタイラスの方向を反転することによる測定データの変動: S_V

スタイラスの方向を V_1 , V_2 に反転させて同心度測定を行ったとき、表19のLVの補助表から同心度測定の変動 S_V は次式によって計算される。

$$S_V = [(V_1 \text{の合計})^2 + (V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各Vに含まれるデータ数}) - CF$$

$$= [(229.29)^2 + (660.82)^2] / 288 - 1375.5136 = 323.2954$$

(自由度: 1) (23)

スタイラスの方向を反転させることにより、同心度の測定を行うときの三次元座標測定系の移動が大きくなること、およびプローブシステムの位置決め再現性が測定データに影響すると考えられ、これらと同心度測定の変動との関わりを評価することができる。

表19 LVの補助表

	L1(21°)	L2(75°)	合計
V1(0°)	103.92	125.37	229.29
V2(180°)	271.23	389.59	660.82
合計	375.15	514.96	890.11
二乗和	84365.0793	167498.005	251863.0843

(18) LV, PV, HV, DV, SVの交互作用による測定データの変動: S_{LV} , S_{PV} , S_{HV} , S_{DV} , S_{SV}

スタイラスの長さLと反転Vが相互に関係する同心度測定の変動 S_{LV} は、表19のLVの補助表から次式で計算される。

$$S_{LV} = [(L_1V_1 \text{の合計})^2 + (L_1V_2 \text{の合計})^2 + \dots +$$

$$\dots + (L_2V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 LV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_L - S_V = 251863.0843 / 144 - 1375.5136 - 33.9355 - 323.2954 = 16.3048 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (24)$$

測定物の設定の位置 P とスタイラスの反転 V が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{PV} は、表 20 の PV の補助表から次式によって計算される。

$$S_{PV} = [(P_1V_1 \text{の合計})^2 + (P_1V_2 \text{の合計})^2 + \dots + (P_2V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 PV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_P - S_V = 244930.1509 / 144 - 1375.5136 - 0.4362 - 323.2954 = 1.6587 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (25)$$

表 20 PV の補助表

	P1(奥)	P2(手前)	合計
V1(0°)	110.9	118.4	229.29
V2(180°)	342.1	318.7	660.82
合計	452.98	437.13	890.11
二乗和	129326.784	115603.367	244930.1509

測定物の設定の高さ H とスタイラスの反転 V が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{HV} は、表 21 の HV の補助表から次式によって計算される。

$$S_{HV} = [(H_1V_1 \text{の合計})^2 + (H_1V_2 \text{の合計})^2 + \dots + (H_2V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 HV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_H - S_V = 250476.5445 / 144 - 1375.5136 - 12.5877 - 323.2954 = 28.0238 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (26)$$

表 21 HV の補助表

	H1(低)	H2(高)	合計
V1(0°)	125.1	104.2	229.29
V2(180°)	277.4	383.5	660.82
合計	402.48	487.63	890.11
二乗和	92583.584	157892.961	250476.5445

測定物の設定の方向 D とスタイラスの反転 V が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{DV} は、表 22 の DV の補助表から次式によって計算される。

$$S_{DV} = [(D_1V_1 \text{の合計})^2 + (D_1V_2 \text{の合計})^2 + \dots + (D_2V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 DV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_D - S_V = 166657.2007 / 96 - 1375.5136 - 23.7966 - 323.2954 = 13.4069 \quad (\text{自由度: } 2) \quad (27)$$

表 22 DV の補助表

	D1(X軸)	D2(Y軸)	D3(45°)	合計
V1(0°)	84.5	79.8	65.1	229.29
V2(180°)	267.3	192.0	201.5	660.82
合計	351.81	271.78	266.52	890.11
二乗和	78602.1993	43233.338	44821.6634	166657.2007

測定スピード S とスタイラスの反転 V が相互に関係したときの同心度測定の変動 S_{SV} は、表 23 の SV の補助表から次式によって計算される。

$$S_{SV} = [(S_1V_1 \text{の合計})^2 + (S_1V_2 \text{の合計})^2 + \dots + (S_2V_2 \text{の合計})^2] / (\text{各 SV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_S - S_V = 246518.9881 / 144 - 1375.5136 - 5.6505 - 323.2954 = 7.4779 \quad (\text{自由度: } 1) \quad (28)$$

表 23 SV の補助表

	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	合計
V1(0°)	116.8	112.5	229.29
V2(180°)	299.7	361.1	660.82
合計	416.53	473.58	890.11
二乗和	103483.972	143035.016	246518.9881

交互作用 S_{LV} , S_{PV} , S_{HV} , S_{DV} , S_{SV} は、スタイラスの方向の反転 V とスタイラスの長さ L, 測定物の設定の位置 P, 測定物の設定の高さ H, 測定物の設定方向 D, および測定スピード S の要因が相互に関係して、三次元座標測定系とプローブシステムの双方の動きと挙動によって発生する同心度測定の変動を意味している。

(19) RLPHDSV が関わる高次の交互作用による測定データの変動: S_{E6}

測定の反復 R, スタイラスの長さ L, 測定物の設定の位置 P と高さ H, 測定物の設定方向 D, 測定スピード S, およびスタイラスの方向の反転の要因が複雑に関係したとき、これによる同心度測定の変動を S_{E6} で表すと、変動 S_{E6} は表 24 の RLPHDSV の補助表から次式で計算される。

$$S_{E6} = [(R_1L_1P_1H_1D_1S_1V_1)^2 + (R_1L_1P_2H_2D_1S_1V_2)^2 + \dots + (R_2L_2P_2H_2D_2S_2V_2)^2] / (\text{各 RLPHDSV に含まれるデータ数})$$

$$-CF - S_R - S_L - S_H - S_D - S_P - S_S - S_V - S_{E1} - S_{E2} - S_{E3} - S_{E4} - S_{E5} - S_{E6} - S_{E7} - S_{E8} - S_{E9} - S_{E10} - S_{E11} - S_{E12} - S_{E13} - S_{E14} - S_{E15} - S_{E16} - S_{E17} - S_{E18} - S_{E19} - S_{E20} - S_{E21} - S_{E22} - S_{E23} - S_{E24} - S_{E25} - S_{E26} - S_{E27} - S_{E28} - S_{E29} - S_{E30} - S_{E31} - S_{E32} - S_{E33} - S_{E34} - S_{E35} - S_{E36} - S_{E37} - S_{E38} - S_{E39} - S_{E40} - S_{E41} - S_{E42} - S_{E43} - S_{E44} - S_{E45} - S_{E46} - S_{E47} - S_{E48} - S_{E49} - S_{E50} - S_{E51} - S_{E52} - S_{E53} - S_{E54} - S_{E55} - S_{E56} - S_{E57} - S_{E58} - S_{E59} - S_{E60} - S_{E61} - S_{E62} - S_{E63} - S_{E64} - S_{E65} - S_{E66} - S_{E67} - S_{E68} - S_{E69} - S_{E70} - S_{E71} - S_{E72} - S_{E73} - S_{E74} - S_{E75} - S_{E76} - S_{E77} - S_{E78} - S_{E79} - S_{E80} - S_{E81} - S_{E82} - S_{E83} - S_{E84} - S_{E85} - S_{E86} - S_{E87} - S_{E88} - S_{E89} - S_{E90} - S_{E91} - S_{E92} - S_{E93} - S_{E94} - S_{E95} - S_{E96} - S_{E97} - S_{E98} - S_{E99} - S_{E100} - S_{E101} - S_{E102} - S_{E103} - S_{E104} - S_{E105} - S_{E106} - S_{E107} - S_{E108} - S_{E109} - S_{E110} - S_{E111} - S_{E112} - S_{E113} - S_{E114} - S_{E115} - S_{E116} - S_{E117} - S_{E118} - S_{E119} - S_{E120} - S_{E121} - S_{E122} - S_{E123} - S_{E124} - S_{E125} - S_{E126} - S_{E127} - S_{E128} - S_{E129} - S_{E130} - S_{E131} - S_{E132} - S_{E133} - S_{E134} - S_{E135} - S_{E136} - S_{E137} - S_{E138} - S_{E139} - S_{E140} - S_{E141} - S_{E142} - S_{E143} - S_{E144} - S_{E145} - S_{E146} - S_{E147} - S_{E148} - S_{E149} - S_{E150} - S_{E151} - S_{E152} - S_{E153} - S_{E154} - S_{E155} - S_{E156} - S_{E157} - S_{E158} - S_{E159} - S_{E160} - S_{E161} - S_{E162} - S_{E163} - S_{E164} - S_{E165} - S_{E166} - S_{E167} - S_{E168} - S_{E169} - S_{E170} - S_{E171} - S_{E172} - S_{E173} - S_{E174} - S_{E175} - S_{E176} - S_{E177} - S_{E178} - S_{E179} - S_{E180} - S_{E181} - S_{E182} - S_{E183} - S_{E184} - S_{E185} - S_{E186} - S_{E187} - S_{E188} - S_{E189} - S_{E190} - S_{E191} - S_{E192} - S_{E193} - S_{E194} - S_{E195} - S_{E196} - S_{E197} - S_{E198} - S_{E199} - S_{E200} - S_{E201} - S_{E202} - S_{E203} - S_{E204} - S_{E205} - S_{E206} - S_{E207} - S_{E208} - S_{E209} - S_{E210} - S_{E211} - S_{E212} - S_{E213} - S_{E214} - S_{E215} - S_{E216} - S_{E217} - S_{E218} - S_{E219} - S_{E220} - S_{E221} - S_{E222} - S_{E223} - S_{E224} - S_{E225} - S_{E226} - S_{E227} - S_{E228} - S_{E229} - S_{E230} - S_{E231} - S_{E232} - S_{E233} - S_{E234} - S_{E235} - S_{E236} - S_{E237} - S_{E238} - S_{E239} - S_{E240} - S_{E241} - S_{E242} - S_{E243} - S_{E244} - S_{E245} - S_{E246} - S_{E247} - S_{E248} - S_{E249} - S_{E250} - S_{E251} - S_{E252} - S_{E253} - S_{E254} - S_{E255} - S_{E256} - S_{E257} - S_{E258} - S_{E259} - S_{E260} - S_{E261} - S_{E262} - S_{E263} - S_{E264} - S_{E265} - S_{E266} - S_{E267} - S_{E268} - S_{E269} - S_{E270} - S_{E271} - S_{E272} - S_{E273} - S_{E274} - S_{E275} - S_{E276} - S_{E277} - S_{E278} - S_{E279} - S_{E280} - S_{E281} - S_{E282} - S_{E283} - S_{E284} - S_{E285} - S_{E286} - S_{E287} - S_{E288} - S_{E289} - S_{E290} - S_{E291} - S_{E292} - S_{E293} - S_{E294} - S_{E295} - S_{E296} - S_{E297} - S_{E298} - S_{E299} - S_{E300} - S_{E301} - S_{E302} - S_{E303} - S_{E304} - S_{E305} - S_{E306} - S_{E307} - S_{E308} - S_{E309} - S_{E310} - S_{E311} - S_{E312} - S_{E313} - S_{E314} - S_{E315} - S_{E316} - S_{E317} - S_{E318} - S_{E319} - S_{E320} - S_{E321} - S_{E322} - S_{E323} - S_{E324} - S_{E325} - S_{E326} - S_{E327} - S_{E328} - S_{E329} - S_{E330} - S_{E331} - S_{E332} - S_{E333} - S_{E334} - S_{E335} - S_{E336} - S_{E337} - S_{E338} - S_{E339} - S_{E340} - S_{E341} - S_{E342} - S_{E343} - S_{E344} - S_{E345} - S_{E346} - S_{E347} - S_{E348} - S_{E349} - S_{E350} - S_{E351} - S_{E352} - S_{E353} - S_{E354} - S_{E355} - S_{E356} - S_{E357} - S_{E358} - S_{E359} - S_{E360} - S_{E361} - S_{E362} - S_{E363} - S_{E364} - S_{E365} - S_{E366} - S_{E367} - S_{E368} - S_{E369} - S_{E370} - S_{E371} - S_{E372} - S_{E373} - S_{E374} - S_{E375} - S_{E376} - S_{E377} - S_{E378} - S_{E379} - S_{E380} - S_{E381} - S_{E382} - S_{E383} - S_{E384} - S_{E385} - S_{E386} - S_{E387} - S_{E388} - S_{E389} - S_{E390} - S_{E391} - S_{E392} - S_{E393} - S_{E394} - S_{E395} - S_{E396} - S_{E397} - S_{E398} - S_{E399} - S_{E400} - S_{E401} - S_{E402} - S_{E403} - S_{E404} - S_{E405} - S_{E406} - S_{E407} - S_{E408} - S_{E409} - S_{E410} - S_{E411} - S_{E412} - S_{E413} - S_{E414} - S_{E415} - S_{E416} - S_{E417} - S_{E418} - S_{E419} - S_{E420} - S_{E421} - S_{E422} - S_{E423} - S_{E424} - S_{E425} - S_{E426} - S_{E427} - S_{E428} - S_{E429} - S_{E430} - S_{E431} - S_{E432} - S_{E433} - S_{E434} - S_{E435} - S_{E436} - S_{E437} - S_{E438} - S_{E439} - S_{E440} - S_{E441} - S_{E442} - S_{E443} - S_{E444} - S_{E445} - S_{E446} - S_{E447} - S_{E448} - S_{E449} - S_{E450} - S_{E451} - S_{E452} - S_{E453} - S_{E454} - S_{E455} - S_{E456} - S_{E457} - S_{E458} - S_{E459} - S_{E460} - S_{E461} - S_{E462} - S_{E463} - S_{E464} - S_{E465} - S_{E466} - S_{E467} - S_{E468} - S_{E469} - S_{E470} - S_{E471} - S_{E472} - S_{E473} - S_{E474} - S_{E475} - S_{E476} - S_{E477} - S_{E478} - S_{E479} - S_{E480} - S_{E481} - S_{E482} - S_{E483} - S_{E484} - S_{E485} - S_{E486} - S_{E487} - S_{E488} - S_{E489} - S_{E490} - S_{E491} - S_{E492} - S_{E493} - S_{E494} - S_{E495} - S_{E496} - S_{E497} - S_{E498} - S_{E499} - S_{E500} - S_{E501} - S_{E502} - S_{E503} - S_{E504} - S_{E505} - S_{E506} - S_{E507} - S_{E508} - S_{E509} - S_{E510} - S_{E511} - S_{E512} - S_{E513} - S_{E514} - S_{E515} - S_{E516} - S_{E517} - S_{E518} - S_{E519} - S_{E520} - S_{E521} - S_{E522} - S_{E523} - S_{E524} - S_{E525} - S_{E526} - S_{E527} - S_{E528} - S_{E529} - S_{E530} - S_{E531} - S_{E532} - S_{E533} - S_{E534} - S_{E535} - S_{E536} - S_{E537} - S_{E538} - S_{E539} - S_{E540} - S_{E541} - S_{E542} - S_{E543} - S_{E544} - S_{E545} - S_{E546} - S_{E547} - S_{E548} - S_{E549} - S_{E550} - S_{E551} - S_{E552} - S_{E553} - S_{E554} - S_{E555} - S_{E556} - S_{E557} - S_{E558} - S_{E559} - S_{E560} - S_{E561} - S_{E562} - S_{E563} - S_{E564} - S_{E565} - S_{E566} - S_{E567} - S_{E568} - S_{E569} - S_{E570} - S_{E571} - S_{E572} - S_{E573} - S_{E574} - S_{E575} - S_{E576} - S_{E577} - S_{E578} - S_{E579} - S_{E580} - S_{E581} - S_{E582} - S_{E583} - S_{E584} - S_{E585} - S_{E586} - S_{E587} - S_{E588} - S_{E589} - S_{E590} - S_{E591} - S_{E592} - S_{E593} - S_{E594} - S_{E595} - S_{E596} - S_{E597} - S_{E598} - S_{E599} - S_{E600} - S_{E601} - S_{E602} - S_{E603} - S_{E604} - S_{E605} - S_{E606} - S_{E607} - S_{E608} - S_{E609} - S_{E610} - S_{E611} - S_{E612} - S_{E613} - S_{E614} - S_{E615} - S_{E616} - S_{E617} - S_{E618} - S_{E619} - S_{E620} - S_{E621} - S_{E622} - S_{E623} - S_{E624} - S_{E625} - S_{E626} - S_{E627} - S_{E628} - S_{E629} - S_{E630} - S_{E631} - S_{E632} - S_{E633} - S_{E634} - S_{E635} - S_{E636} - S_{E637} - S_{E638} - S_{E639} - S_{E640} - S_{E641} - S_{E642} - S_{E643} - S_{E644} - S_{E645} - S_{E646} - S_{E647} - S_{E648} - S_{E649} - S_{E650} - S_{E651} - S_{E652} - S_{E653} - S_{E654} - S_{E655} - S_{E656} - S_{E657} - S_{E658} - S_{E659} - S_{E660} - S_{E661} - S_{E662} - S_{E663} - S_{E664} - S_{E665} - S_{E666} - S_{E667} - S_{E668} - S_{E669} - S_{E670} - S_{E671} - S_{E672} - S_{E673} - S_{E674} - S_{E675} - S_{E676} - S_{E677} - S_{E678} - S_{E679} - S_{E680} - S_{E681} - S_{E682} - S_{E683} - S_{E684} - S_{E685} - S_{E686} - S_{E687} - S_{E688} - S_{E689} - S_{E690} - S_{E691} - S_{E692} - S_{E693} - S_{E694} - S_{E695} - S_{E696} - S_{E697} - S_{E698} - S_{E699} - S_{E700} - S_{E701} - S_{E702} - S_{E703} - S_{E704} - S_{E705} - S_{E706} - S_{E707} - S_{E708} - S_{E709} - S_{E710} - S_{E711} - S_{E712} - S_{E713} - S_{E714} - S_{E715} - S_{E716} - S_{E717} - S_{E718} - S_{E719} - S_{E720} - S_{E721} - S_{E722} - S_{E723} - S_{E724} - S_{E725} - S_{E726} - S_{E727} - S_{E728} - S_{E729} - S_{E730} - S_{E731} - S_{E732} - S_{E733} - S_{E734} - S_{E735} - S_{E736} - S_{E737} - S_{E738} - S_{E739} - S_{E740} - S_{E741} - S_{E742} - S_{E743} - S_{E744} - S_{E745} - S_{E746} - S_{E747} - S_{E748} - S_{E749} - S_{E750} - S_{E751} - S_{E752} - S_{E753} - S_{E754} - S_{E755} - S_{E756} - S_{E757} - S_{E758} - S_{E759} - S_{E760} - S_{E761} - S_{E762} - S_{E763} - S_{E764} - S_{E765} - S_{E766} - S_{E767} - S_{E768} - S_{E769} - S_{E770} - S_{E771} - S_{E772} - S_{E773} - S_{E774} - S_{E775} - S_{E776} - S_{E777} - S_{E778} - S_{E779} - S_{E780} - S_{E781} - S_{E782} - S_{E783} - S_{E784} - S_{E785} - S_{E786} - S_{E787} - S_{E788} - S_{E789} - S_{E790} - S_{E791} - S_{E792} - S_{E793} - S_{E794} - S_{E795} - S_{E796} - S_{E797} - S_{E798} - S_{E799} - S_{E800} - S_{E801} - S_{E802} - S_{E803} - S_{E804} - S_{E805} - S_{E806} - S_{E807} - S_{E808} - S_{E809} - S_{E810} - S_{E811} - S_{E812} - S_{E813} - S_{E814} - S_{E815} - S_{E816} - S_{E817} - S_{E818} - S_{E819} - S_{E820} - S_{E821} - S_{E822} - S_{E823} - S_{E824} - S_{E825} - S_{E826} - S_{E827} - S_{E828} - S_{E829} - S_{E830} - S_{E831} - S_{E832} - S_{E833} - S_{E834} - S_{E835} - S_{E836} - S_{E837} - S_{E838} - S_{E839} - S_{E840} - S_{E841} - S_{E842} - S_{E843} - S_{E844} - S_{E845} - S_{E846} - S_{E847} - S_{E848} - S_{E849} - S_{E850} - S_{E851} - S_{E852} - S_{E853} - S_{E854} - S_{E855} - S_{E856} - S_{E857} - S_{E858} - S_{E859} - S_{E860} - S_{E861} - S_{E862} - S_{E863} - S_{E864} - S_{E865} - S_{E866} - S_{E867} - S_{E868} - S_{E869} - S_{E870} - S_{E871} - S_{E872} - S_{E873} - S_{E874} - S_{E875} - S_{E876} - S_{E877} - S_{E878} - S_{E879} - S_{E880} - S_{E881} - S_{E882} - S_{E883} - S_{E884} - S_{E885} - S_{E886} - S_{E887} - S_{E888} - S_{E889} - S_{E890} - S_{E891} - S_{E892} - S_{E893} - S_{E894} - S_{E895} - S_{E896} - S_{E897} - S_{E898} - S_{E899} - S_{E900} - S_{E901} - S_{E902} - S_{E903} - S_{E904} - S_{E905} - S_{E906} - S_{E907} - S_{E908} - S_{E909} - S_{E910} - S_{E911} - S_{E912} - S_{E913} - S_{E914} - S_{E915} - S_{E916} - S_{E917} - S_{E918} - S_{E919} - S_{E920} - S_{E921} - S_{E922} - S_{E923} - S_{E924} - S_{E925} - S_{E926} - S_{E927} - S_{E928} - S_{E929} - S_{E930} - S_{E931} - S_{E932} - S_{E933} - S_{E934} - S_{E935} - S_{E936} - S_{E937} - S_{E938} - S_{E939} - S_{E940} - S_{E941} - S_{E942} - S_{E943} - S_{E944} - S_{E945} - S_{E946} - S_{E947} - S_{E948} - S_{E949} - S_{E950} - S_{E951} - S_{E952} - S_{E953} - S_{E954} - S_{E955} - S_{E956} - S_{E957} - S_{E958} - S_{E959} - S_{E960} - S_{E961} - S_{E962} - S_{E963} - S_{E964} - S_{E965} - S_{E966} - S_{E967} - S_{E968} - S_{E969} - S_{E970} - S_{E971} - S_{E972} - S_{E973} - S_{E974} - S_{E975} - S_{E976} - S_{E977} - S_{E978} - S_{E979} - S_{E980} - S_{E981} - S_{E982} - S_{E983} - S_{E984} - S_{E985} - S_{E986} - S_{E987} - S_{E988} - S_{E989} - S_{E990} - S_{E991} - S_{E992} - S_{E993} - S_{E994} - S_{E995} - S_{E996} - S_{E997} - S_{E998} - S_{E999} - S_{E1000} - S_{E1001} - S_{E1002} - S_{E1003} - S_{E1004} - S_{E1005} - S_{E1006} - S_{E1007} - S_{E1008} - S_{E1009} - S_{E1010} - S_{E1011} - S_{E1012} - S_{E1013} - S_{E1014} - S_{E1015} - S_{E1016} - S_{E1017} - S_{E1018} - S_{E1019} - S_{E1020} - S_{E1021} - S_{E1022} - S_{E1023} - S_{E1024} - S_{E1025} - S_{E1026} - S_{E1027} - S_{E1028} - S_{E1029} - S_{E1030} - S_{E1031} - S_{E1032} - S_{E1033} - S_{E1034} - S_{E1035} - S_{E1036} - S_{E1037} - S_{E1038} - S_{E1039} - S_{E1040} - S_{E1041} - S_{E1042} - S_{E1043} - S_{E1044} - S_{E1045} - S_{E1046} - S_{E1047} - S_{E1048} - S_{E1049} - S_{E1050} - S_{E1051} - S_{E1052} - S_{E1053} - S_{E1054} - S_{E1055} - S_{E1056} - S_{E1057} - S_{E1058} - S_{E1059} - S_{E1060} - S_{E1061} - S_{E1062} - S_{E1063} - S_{E1064} - S_{E1065} - S_{E1066} - S_{E1067} - S_{E1068} - S_{E1069} - S_{E1070} - S_{E1071} - S_{E1072} - S_{E1073} - S_{E1074} - S_{E1075} - S_{E1076} - S_{E1077} - S_{E1078} - S_{E1079} - S_{E1080} - S_{E1081} - S_{E1082} - S_{E1083} - S_{E1084} - S_{E1085} - S_{E1086} - S_{E1087} - S_{E1088} - S_{E1089} - S_{E1090} - S_{E1091} - S_{E1092} - S_{E1093} - S_{E1094} - S_{E1095} - S_{E1096} - S_{E1097} - S_{E1098} - S_{E1099} - S_{E1100} - S_{E1101} - S_{E1102} - S_{E1103} - S_{E1104} - S_{E1105} - S_{E1106} - S_{E1107} - S_{E1108} - S_{E1109} - S_{E1110} - S_{E1111} - S_{E1112} - S_{E1113} - S_{E1114} - S_{E1115} - S_{E1116} - S_{E1117} - S_{E1118} - S_{E1119} - S_{E1120} - S_{E1121} - S_{E1122} - S_{E1123} -$$

心度測定データの再現性を示すものである。

(20) 繰返し測定の変動: S_{E7}

$$S_{E7} = (\text{測定データの全二乗和}) - CF - S_R - S_L - S_{B1} - S_P - S_{LP} - S_{E2} - S_H - S_{LH} - S_{PH} - S_{B3} - S_D - S_{LD} - S_{PD} - S_{HD} - S_{B4} - S_S - S_{LS} - S_{PS} - S_{BS} - S_{DS} - S_{ES} - S_V - S_{LV} - S_{PV} - S_{HV} - S_{DV} - S_{SV} - S_{BS}$$

$$= 2464.3969 - 1375.5136 - 1.5690 - 33.9355 - 3.9540 - 0.4362 -$$

$$3.4488 - 7.8920 - 12.5877 - 1.1619 - 4.9822 - 10.1518 - 23.7966 - 1.2972 - 3.8321 - 39.4088 - 84.5016 - 5.6505 - 0.4630 - 3.6944 - 0.0247 - 0.4561 - 53.0935 - 323.2954 - 16.3048 - 1.6587 - 28.0238 - 13.4069 - 7.4779 - 195.2760$$

$$= 207.1023 \quad (\text{自由度: } 288) \quad (30)$$

表 24 RLPHDSV の補助表

RLPHDSV			P1(奥)												P2(手前)			単位 μm
			D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)		D1(X軸)		D2(Y軸)		D3(45°)		合計			
			S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)	S1(2mm/s)	S2(6mm/s)				
R1	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	1.2	1.4	1.2	1.3	2.1	1.8	1.4	1.2	1.8	1.1	0.5	18.10			
			V2(180°)	2.2	1.6	5.8	4.4	2.9	6.3	2.7	2.9	1.0	2.4	0.7	6.7	39.60		
		H2(高)	V1(0°)	1.6	1.3	1.7	2.3	1.2	1.6	1.2	1.0	1.4	2.0	1.9	1.5	18.70		
	V2(180°)		5.2	5.4	1.7	1.8	7.4	5.6	3.2	5.0	3.2	3.4	2.4	2.6	47.90			
	V1(0°)		1.8	2.2	1.7	1.9	0.9	1.4	2.7	3.3	3.1	1.7	1.9	1.6	24.20			
	L2(75)	H1(低)	V2(180°)	5.9	6.3	4.1	5.0	2.9	4.3	1.6	2.6	6.8	8.5	6.2	7.8	62.00		
V1(0°)			1.1	1.5	1.7	1.4	0.5	0.8	3.1	1.0	2.7	1.4	0.7	0.8	16.70			
H2(高)		V2(180°)	11.2	11.0	6.1	6.7	5.7	5.0	5.4	7.3	3.9	9.5	4.0	7.0	84.80			
	V1(0°)	1.5	2.0	1.6	1.8	1.4	0.9	1.8	1.8	1.8	1.5	1.0	1.2	17.90				
	V2(180°)	3.5	3.5	2.6	2.9	2.1	0.9	2.7	1.8	5.9	6.8	1.4	2.2	36.10				
R2	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	1.3	0.8	1.0	1.2	1.2	0.7	1.7	4.2	0.7	2.8	1.3	0.8	17.70		
			V2(180°)	7.8	10.4	2.4	2.8	2.8	4.4	4.7	15.8	2.4	3.3	3.6	2.0	62.20		
		H2(高)	V1(0°)	2.6	2.0	2.0	1.6	2.2	2.0	2.4	1.7	2.0	1.4	2.4	2.0	24.30		
	V2(180°)		3.7	2.8	2.2	3.4	3.3	2.7	4.0	2.3	3.2	5.5	4.4	7.5	45.00			
	V1(0°)		2.1	1.3	1.4	1.1	1.4	0.6	1.8	1.1	0.9	3.3	1.0	1.0	16.80			
	L2(75)	H1(低)	V2(180°)	12.7	11.4	2.1	5.1	5.8	3.2	9.6	10.7	1.5	6.4	1.7	4.1	74.30		
V1(0°)			1.1	1.5	0.9	2.0	0.8	1.0	2.0	1.7	1.9	1.9	1.1	2.1	17.93			
H2(高)		V2(180°)	2.8	5.7	2.6	2.2	2.4	3.7	0.8	1.1	2.9	3.8	2.0	2.3	32.19			
	V1(0°)	1.0	0.6	1.4	1.5	3.0	1.7	1.6	1.1	1.2	0.7	0.8	1.0	15.59				
	V2(180°)	10.7	9.7	1.5	2.2	4.7	7.4	3.8	4.2	0.9	1.3	4.4	2.6	58.24				
R3	L1(21)	H1(低)	V1(0°)	2.3	1.4	1.8	2.1	2.1	2.6	2.3	2.8	1.7	1.3	2.5	1.5	24.69		
			V2(180°)	4.3	1.7	5.2	5.3	4.8	6.3	6.9	7.5	6.5	6.5	2.3	5.4	62.47		
		H2(高)	V1(0°)	2.1	2.1	3.6	1.4	1.3	0.5	1.1	2.5	1.4	0.8	1.0	0.8	18.68		
	V2(180°)		5.1	4.8	5.5	3.6	5.5	3.1	4.5	6.4	3.0	4.4	8.9	6.3	61.02			
	合計		94.80	93.24	61.64	67.03	67.52	68.95	73.10	90.87	80.98	82.13	58.88	71.36	890.11			
	二乗和			638.72	643.71	218.37	261.54	271.31	296.82	318.42	639.43	223.82	426.27	232.92	345.26	4514.59		

3-2 測定データの解析

分散分析した結果を表 25 の分散分析表に示す。表 4 に示した不偏分散の構造に従って解析を行った。まず、得られた各実験要因における分散の大きさの検定を行った。

(1) V_{B6} を V_{E7} で検定:

$$V_{B6}/V_{E7} = 1.4254/0.7191 = 1.982 > F(137/288) = F(120/240; 0.01) = 1.43$$

ここで、 $F(120/240; 0.01) = 1.43$ は F 表²⁾の分母の分散の自由度 240、分子の分散の自由度 120 の 1% 値を示す。したがって、 V_{B6} は V_{E7} に対して 1% の危険率で有意となる。すなわち、 V_{B6} は V_{E7} に対して 1% の危険率で大きいと判断できる。 V_{B6} はスタイラスの反転と測定実験で取り上げた繰返し測定以外の因子とが関わる高次の交互作用によって発生する分散であり、連続的な繰返し測定の分散 V_{E7} より大きいことが統計的に判断できた。表 4 不偏分散の構造から、 $\sigma_{E7}^2 = 0.7191$ 、 $\sigma_{B6}^2 = (1.4254 - 0.7191)/2 = 0.3532$ と推定される。

(2) V_{SV} 、 V_{DV} 、 V_{HV} 、 V_{PV} 、 V_{LV} を V_{B6} で検定:

$$V_{SV}/V_{B6} = 7.4779/1.4254 = 5.246 > F(1/137) = F(1/120; 0.05) = 3.92$$

となり、 V_{SV} は V_{B6} に対して 5% の危険率で有意となる。こ

こで、 $F(1/120; 0.05) = 3.92$ は F 表の分母の分散の自由度 120、分子の分散の自由度 1 の 5% 値を示す。以下、同様にして V_{B6} で検定すると、表 25 分散分析に示すように V_{DV} は 5% の危険率、 V_{HV} 、 V_{LV} は 1% の危険率で V_{B6} に対して有意となるが V_{PV} は有意とならない。したがって、スタイラスの方向を反転させることと測定のスピード、測定物の方向、測定物の高さ、およびスタイラスの長さなどの各水準を変えることとの交互作用効果で発生する同心度の分散は、高次の交互作用によって発生する分散 V_{B6} より大きいと統計的に判断できる。統計的に有意になった交互作用効果の分散成分は、不偏分散の構造から次のように推定される。

$$\sigma_{SV}^2 = (7.4779 - 1.4254)/144 = 0.0420$$

$$\sigma_{DV}^2 = (6.7035 - 1.4254)/96 = 0.0550$$

$$\sigma_{HV}^2 = (28.0238 - 1.4254)/144 = 0.1847$$

$$\sigma_{LV}^2 = (16.3048 - 1.4254)/144 = 0.1033$$

以上の解析の結果から、スタイラスの反転の不偏分散 V_V の構造は、 $V_V = \sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{B6}^2 + 144\sigma_{SV}^2 + 96\sigma_{DV}^2 + 144\sigma_{HV}^2 + 144\sigma_{LV}^2 + 288\sigma_V^2$ となり、 V_V は次式で合成される分散 V_{B6}^* で検定することになる。 $V_{B6}^* = \sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{B6}^2 + 144\sigma_{SV}^2 + 96\sigma_{DV}^2 + 144\sigma_{HV}^2 + 144\sigma_{LV}^2$

$$=V_{SV}+(V_{DV}-V_{EB})+(V_{VH}-V_{EB})+(V_{LV}-V_{EB})=V_{SV}+V_{DV}+V_{VH}+V_{LV}-3V_{EB}$$

$$=7.4779+6.7035+28.0238+16.3048-3 \times 1.4252=54.2338$$

この合成分散 V_{E6} の等価自由度 f^* は次式から推定される。

$$(V_{SV}+V_{DV}+V_{VH}+V_{LV}-3V_{EB})^2/f^* =$$

$$V_{SV}^2/f_{SV}+V_{DV}^2/f_{DV}+V_{VH}^2/f_{VH}+V_{LV}^2/f_{LV}+(3V_{EB})^2/f_{EB}$$

$$=54.2338^2/f^*=7.4779^2/1+6.7035^2/2+28.0238^2/1+16.3048^2/1+(3 \times 1.4252)^2/137$$

$$f^*=54.2338^2/1129.7008=2.60$$

$$\text{したがって、} V_V/V_{E6}^*=323.2954/54.2338=5.961 <$$

$$F(1/2.60) \approx F(1/2:0.05)=98.50$$

となり、スタイラスの反転による分散 V_V は合成分散 V_{E6}^* に対して有意にならない。すなわち、スタイラスを反転することによる主効果は有意にならないが、その影響はスタイラスの長さ L 、測定物の高さ H と方向、測定物の速度などの要因との交互作用の効果に現れていると考えられる。

(3) V_{E5} と V_{E6} の合成

$V_{E5}/V_{E6}=0.8044/1.4254=0.564 < F(66/137:0.05)$ であるから、 V_{E5} と V_{E6} を合成（以下プーリングとする）して次式に示す分散 V_{E5}^* を作る。

$$V_{E5}^*=(53.0935+195.2760)/(66+137)=1.2235 \quad (f_{E5}^*=203)$$

分散 V_{E5}^* は測定物の速度およびスタイラスの反転と反復測定、スタイラスの長さ、測定物の位置、測定物の高さ、測定物の方向などの因子が関わる高次交互作用によって発生する同心度の分散である。分散 V_{E5}^* には $\sigma_{E7}^2+2\sigma_{E6}^2+4\sigma_{E5}^2$ の分散成分がふくまれるが、これを σ_{E5}^{*2} で表す。

(4) V_{DS} , V_{HS} , V_{PS} , V_{LS} を V_{E5}^* で検定：

V_{DS} , V_{HS} , V_{PS} , V_{LS} の分散は何れも分散 V_{E5}^* に対して有意にならないために不偏分散 V_S の構造は $\sigma_{E5}^{*2}+288\sigma_S^2$ となり、分散 V_S は V_{E5}^* で検定することになる。

$$V_S/V_{E5}^*=5.6505/1.2235=4.618 > F(1/203:0.05) \approx$$

$$F(1/200:0.05)=3.89$$

となり、 V_S は V_{E5}^* に対して5%の危険率で有意となる。ここで、 $F(1/200:0.05)=3.89$ はF表の分母の分散の自由度200、分子の分散の自由度1の5%値を示す。すなわち、測定物の速度を変えることによって発生する同心度の分散 V_S は高次の交互作用によって発生する分散 V_{E5}^* よりも大きいと統計的に判断できる。不偏分散の構造から V_S の分散成分は $\sigma_S^2=(5.6505-1.2235)/288=0.0154$ と推定される。

(5) V_{E4} を V_{E5}^* で検定：

$$V_{E4}/V_{E5}^*=2.1125/1.2235=1.727 > F(40/203:0.01) \approx$$

$$F(40/200:0.01)=1.69 \text{ となり、} V_{E4} \text{ は } V_{E5}^* \text{ に対して1\%の}$$

危険率で有意となる。分散 V_{E4} は測定物の方向と反復測定、スタイラスの長さ、測定物の位置、測定物の高さなどの因子が関わる高次の交互作用によって発生する同心度の分散を意味している。不偏分散の構造から V_{E4} の分散成分は $\sigma_{E4}^2=(2.1125-1.2235)/8=0.1111$ と推定できる。

(6) V_D , V_{HD} , V_{PD} , V_{LD} を V_{E4} で検定：

$V_{HD}/V_{E4}=19.7044/2.1125=9.328 > F(2/40:0.01)=5.18$ であり、 V_{HD} は V_{E4} に対して1%の危険率で有意となる。不偏分散の構造から V_{HD} の分散成分は

$$\sigma_{HD}^2=(19.7044-2.1125)/96=0.1832$$

と推定できる。同様に、 V_{PD} , V_{LD} を V_{E4} で検定すると何れも有意にならない。したがって、測定物の方向 D の不偏分散 V_D の構造は、 $\sigma_{E5}^{*2}+8\sigma_{E4}^2+96\sigma_{HD}^2+192\sigma_D^2$ となるから、 V_D は V_{HD} で検定することになり、明らかに有意にならない。すなわち、測定物の方向を変えることによって発生する同心度の分散 V_D の主効果は、測定物の方向と高さの交互作用によって発生する分散 V_{HD} に対して無視できる。

(7) V_{E3} と V_{E4} のプーリング：

明らかに、 V_{E3} は V_{E4} に対して有意にならないから V_{E3} と V_{E4} をプーリングして、分散 V_{E3}^* を作成する。

$$V_{E3}^*=(10.1518+84.5016)/(9+40)=1.9317 \quad (f_{E3}^*=49)$$

分散 V_{E3}^* は測定物の方向と高さ、反復測定、スタイラスの長さ、測定物の位置などの因子が関わる高次交互作用によって発生する同心度の分散である。この分散 V_{E3}^* には $\sigma_{E3}^{*2}+8\sigma_{E4}^2+24\sigma_{E3}^2$ の分散成分が含まれるが一括して σ_{E3}^{*2} で表す。

(8) V_{PH} , V_{LH} を V_{E3}^* で検定：

$$V_{PH}/V_{E3}^*=4.9822/1.9317=2.58 < F(1/49:0.05) \approx$$

$$F(1/50:0.05)=4.03$$

であり V_{PH} は V_{E3}^* に対して有意とはならない。同様に、 V_{LH} も有意にはならない。したがって、測定物の高さ H の不偏分散 V_H の構造は、 $\sigma_{E3}^{*2}+96\sigma_{HD}^2+288\sigma_H^2$ となるから、 $\sigma_{E3}^{*2}+96\sigma_{HD}^2$ の合成分散 V_{E3}^{**} で検定することになる。

$$V_{E3}^{**}=\sigma_{E3}^{*2}+96\sigma_{HD}^2=\sigma_{E3}^{*2}+\sigma_{E5}^{*2}+8\sigma_{E4}^2+96\sigma_{HD}^2-(\sigma_{E5}^{*2}+8\sigma_{E4}^2)$$

$$=V_{E3}^*+V_{HD}-V_{E4}=1.9317+19.7044-2.1125=19.5236$$

分散 V_H は 12.5877 であるから明らかに V_{E3}^{**} に対して有意にならない。すなわち、測定物の高さを変えることによって発生する同心度の分散 V_H は高次の交互作用によって発生する分散 V_{E3}^{**} よりも大きいとは云えない。

(9) V_{E2} と V_{E3}^* のプーリング：

明らかに、 V_{E2} は V_{E3}^* に対して有意にならないから V_{E2} と V_{E3}^* をプーリングして、分散 V_{E2}^* を作成する。

$$V_{E2}^*=(7.8920+10.1518+84.5016)/(4+9+40)=1.9348 \quad (f_{E2}^*=53)$$

分散 V_{E2}^* は測定物の高さ H と位置、反復測定、スタイラスの長さなどの因子が関わる高次交互作用によって発生する同心度の分散である。分散 V_{E2}^* には $\sigma_{E3}^{*2}+48\sigma_{E2}^2$ の分散成分が含まれるが、これを σ_{E2}^{*2} で表す。

(10) V_{LP} , V_P を V_{E2}^* で検定：

$$V_{LP}/V_{E2}^*=3.4488/1.9348=1.78 < F(1/53:0.05) \approx$$

$$F(1/50:0.05)=4.03$$

であり V_{LP} は V_{E2}^* に対して有意とはならない。また、測定物の位置 P の不偏分散 V_p の構造は $\sigma_{E2}^{*2}+288\sigma_p^2$ となるから、合成分散 V_{E2}^* で検定して有意にはならない。したがって、測定の位置 P に関わる全ての要因効果は統計的に有意とはならず、同心度測定には測定の位置 P は影響しないと判断される。

(11) V_{E1} と V_{E2}^* のプーリング：

明らかに、 V_{E1} は V_{E2}^* に対して有意にならないから V_{E1} と V_{E2}^* をプーリングして、分散 V_{E1}^* を作成する。

$$V_{E1}^* = (3.9540 + 7.8920 + 10.1518 + 84.5016) / (2 + 4 + 9 + 40) = 1.9364$$

$$(f_{E1}^* = 55)$$

分散 V_{E1}^* は測定物の高さ と位置、スタイラスの長さ、反復測定などの因子が関わる高次交互作用によって発生する同心度の分散である。分散 V_{E1}^* には $\sigma_{E2}^{*2} + 96\sigma_{E1}^2$ の分散成分が含まれるが、これを σ_{E1}^{*2} で表す。

(12) V_L , V_R を V_{E1}^* で検定：

スタイラスの長さ L の不偏分散 V_L の構造は $\sigma_{E1}^{*2} + 288\sigma_L^2$ となるから、分散 V_L は分散 V_{E1}^* で検定する。

$V_L / V_{E1}^* = 33.9355 / 1.9364 = 17.525 > F(1/55; 0.01) = 7.12$ であるから、 V_L は V_{E1}^* に対して 1% の危険率で有意となる。すなわち、スタイラスの長さを変えることによって発生する同心度の分散 V_L は、分散 V_{E1}^* に対して 1% の危険率で大きいと統計的に判断できる。不偏分散 V_L の構造から分散 V_L の分散成分 σ_L^2 は

$$\sigma_L^2 = (33.9355 - 1.9364) / 288 = 0.1111$$

と推定される。また、明らかに V_R は V_{E1}^* に対して有意とはならず、同心度の測定データの再現性は確保されていると判断できる。

(13) 測定データの平均的なかたより：

一般平均の不偏分散 V_n は、測定データのかたよりの平均的な変動を表しており、その構造は $S_T + 576\sigma_n^2$ であるから、 V_n を S_T で検定すると明らかに有意となる。 V_n の分散成分 σ_n^2 は次のように推定できる。

$$\sigma_n^2 = (1375.5136 - 1.8904) / 576 = 2.3848$$

表 25 分散分析表

要因	二乗和	自由度	不偏分散	不偏分散の構造	(μm) ²	分散成分
一般平均	1375.5136	1	1375.5136 **	$S_T + 576\sigma_n^2$		$\sigma_n^2 = 2.3848$
R(反復測定)	1.5690	2	0.7845	$\sigma_{E1}^{*2} + 102\sigma_R^2$		
L(スタイラスの長さ)	33.9355	1	33.9355 **	$\sigma_{E1}^{*2} + 288\sigma_L^2$		$\sigma_L^2 = 0.1111$
E1(RLの交互作用)	3.9540	2	1.9770	$\sigma_{E2}^{*2} + 96\sigma_{E1}^2$	$E1^2 = E2^2 + E1$	
P(ワークの位置)	0.4362	1	0.4362	$\sigma_{E2}^{*2} + 288\sigma_P^2$		
L×P	3.4488	1	3.4488	$\sigma_{E2}^{*2} + 144\sigma_{LP}^2$		
E2(RLPの交互作用)	7.8920	4	1.9730	$\sigma_{E3}^{*2} + 48\sigma_{E2}^2$	$E2^2 = E3^2 + E2$	
H(ワークの高さ)	12.5877	1	12.5877	$\sigma_{E3}^{*2} + 96\sigma_H^2 + 288\sigma_{H1}^2$		
L×H	1.1619	1	1.1619	$\sigma_{E3}^{*2} + 144\sigma_{LH}^2$		
P×H	4.9822	1	4.9822	$\sigma_{E3}^{*2} + 144\sigma_{PH}^2$		
E3(RLPHの交互作用)	10.1518	9	1.1280	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_{E1}^2 + 24\sigma_{E2}^2$	$E3^2 = E1^2 + E2^2$	
D(ワークの方向)	23.7966	2	11.8983	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_D^2 + 96\sigma_{D1}^2 + 192\sigma_{D2}^2$		
L×D	1.2972	2	0.6486	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_{L1}^2 + 96\sigma_{L2}^2$		
P×D	3.8321	2	1.9161	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_{P1}^2 + 96\sigma_{P2}^2$		
H×D	39.4088	2	19.7044 **	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_{H1}^2 + 96\sigma_{H2}^2$		$\sigma_{HD}^2 = 0.1832$
E4(RLPHDの交互作用)	84.5016	40	2.1125 **	$\sigma_{E3}^{*2} + 8\sigma_{E1}^2$		$\sigma_{E4}^2 = 0.1111$
S(測定のスピード)	5.6505	1	5.6505 *	$\sigma_{E3}^{*2} + 288\sigma_S^2$		$\sigma_S^2 = 0.0154$
L×S	0.4630	1	0.4630	$\sigma_{E3}^{*2} + 144\sigma_{LS}^2$		
P×S	3.6944	1	3.6944	$\sigma_{E3}^{*2} + 144\sigma_{PS}^2$		
H×S	0.0247	1	0.0247	$\sigma_{E3}^{*2} + 144\sigma_{HS}^2$		
D×S	0.4561	2	0.2280	$\sigma_{E3}^{*2} + 96\sigma_{DS}^2$		
E5(RLPHDSの交互作用)	53.0935	66	0.8044	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 4\sigma_{E2}^2$	$E5^2 = E1^2 + E2^2$	
V(スタイラスの反転)	323.2954	1	323.2954	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{E2}^2 + 96\sigma_{E3}^2 + 144\sigma_{E4}^2 + 144\sigma_{E5}^2 + 288\sigma_V^2$		
L×V	16.3048	1	16.3048 **	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{LV}^2$		$\sigma_{LV}^2 = 0.1033$
P×V	1.6587	1	1.6587	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{PV}^2$		
H×V	28.0238	1	28.0238 **	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{HV}^2$		$\sigma_{HV}^2 = 0.1847$
D×V	13.4069	2	6.7035 *	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 96\sigma_{DV}^2$		$\sigma_{DV}^2 = 0.0550$
S×V	7.4779	1	7.4779 *	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2 + 144\sigma_{SV}^2$		$\sigma_{SV}^2 = 0.0420$
E6(RLPHDSVの交互作用)	195.2760	137	1.4254 **	$\sigma_{E7}^2 + 2\sigma_{E1}^2$		$\sigma_{E6}^2 = 0.3532$
E7(繰返し誤差)	207.1023	288	0.7191	σ_{E7}^2		$\sigma_{E7}^2 = 0.7191$
S ₁ (全変動)	1088.8833	576	1.8904			

4. 考 察

(1) M社製三次元座標測定機によって同心度測定を行うとき、スタイラスの方向を反転させることとスタイラスの長さ、ゲージ設定の高さと方向、および測定のスปีドなどの条件を変えることによって、同心度の測定結果が大きく変動することが明らかになった。

(2) スタイラスの長さを変えること、およびゲージ設定の高さと方向の組合せで同心度の測定結果が大きく変動することも明らかになった。

(3) 検証ゲージの測定方向をX軸方向に設定してゲージの設定高さを変化させると同心度の測定結果が変動する。これはスタイラスを反転させて同軸度を測定する際、Z軸測定系がX軸上で大きく移動することに伴って、XZ軸測定系を支えている空気軸受の隙間が変動し、X軸測定系の傾きが発生していると考えられる。また、設定高さに対応してZ軸の上下移動とX軸測定系の傾きが重なり合わさって、同心度の測定結果を変動させていることが推測される。したがって、同心度測定を可能な限り高精度に行うためには、Y軸方向に向けてゲージを設定し、X軸測定系の移動範囲を少なくすることが有効であると推測される。

(4) 検証ゲージの設定位置に関わる要因 P, LP, PH, PD, PS, PV による変動がすべて統計的に有意とならないが、影響がないのではなく、スタイラスの反転とX軸測定系の測定範囲との関係で、偶然ほぼ中央付近の前方と後方にゲージを設定していたためであると思われる。

(6) 今回の同心度の測定実験で統計的に有意となった要因に関わる同心度の変動の分散成分は、 $\sigma_{E7}^2=0.7191$, $\sigma_{E6}^2=0.3532$, $\sigma_{SV}^2=0.0420$, $\sigma_{DV}^2=0.0550$, $\sigma_{HV}^2=0.1847$, $\sigma_{LV}^2=0.1033$, $\sigma_S^2=0.0154$, $\sigma_{E4}^2=0.1111$, $\sigma_{HD}^2=0.1832$, $\sigma_L^2=0.1111$, $\sigma_{m2}=2.3848$

となった。これらの分散成分を全て合計した合成標準不確かさ σ_c は、 $\sigma_c=\pm(4.2629)/2=\pm 2.06$ となり、 $k=2$ とすると拡張不確かさUは $U=k\sigma_c=\pm 4.12\mu\text{m}$ となる。

(7) スタイラスを反転させないで測定できる場合には、 σ_{E6}^2 , σ_{SV}^2 , σ_{DV}^2 , σ_{HV}^2 , σ_{LV}^2 の分散成分の影響がなくなり、同心度測定の拡張不確かさが小さく、より高精度な測定につながる。

5. 結 言

CMMを用いて幾何公差における同心度の評価について行った。同心度の測定を行うために以下の結果を得た。
○Y軸方向に向けてゲージを設定し、X軸測定系の移動範囲を少なくして測定することが有効

○スタイラスを反転させないで測定できる場合は、より高精度な測定につながる

また、CMMの同心度測定に関する不確かさは $\sigma=\pm 2.13\mu\text{m}$ を得た。一般的な不確かさは 2σ と考えるため、 $2\sigma=\pm 4.26\mu\text{m}$ がこのCMMを用いた同心度測定の不確かさの見積りとなる。

参考文献

- 1) JISB0021(1998),18-11, 日本工業標準調査会
- 2) 中村義作：よくわかる実験計画法,近代科学社, P.184-187(1997)