

3. 3 測定過程と測定誤差の関連：測定過程解析装置による実験

実物測定のためのマンマシンシステムにおいて、人間による測定作業の過程がその成果である測定結果に対し大きな影響を持つと考え、測定過程と測定誤差の関連について実験的に検討した。まず、測定作業として接触式寸法測定を取り上げ、その測定過程を記録するために測定過程解析装置を試作した。次に、実験を行い、得られた2つの特性、すなわち、測定結果の解析及び測定過程の記録により、それらの間の関連について検討を進めた。評価技術の面では、測定の個人差を表現するS/N比及び測定過程の解析方法の問題である。

3. 3. 1 実験の目的

一般に、正しい測定を行うためには測定を慎重に行うべきことが、各種測定マニュアル等に指示されている。また、慎重さはよい測定者の適性の1つであると考えられている。しかし、実際の経験から言えば、同じ測定であっても測定者により測定時間に大きな差があり、時間を長くかける測定者が必ずしも慎重であるとはいえないし、測定時間が長い測定者が良い測定を行うとも限らない。また、一見慎重に見える測定者が、必ずしも誤差の小さい測定を行っているとは限らない。そこで、測定の実験である測定結果の誤差の内容を明らかにするとともに、測定中の測定者による操作の過程を記録することにより測定過程の特徴と測定誤差との関連について検討を進めた。

本節では、第一に測定者による測定過程を記録するための測定過程解析装置を試作し、実験を行った。第二に測定誤差の解析、第三に操作過程の解析を行い、それらの関連を明らかにした。

3. 3. 2 測定過程解析装置の試作

試作した測定過程解析装置(図 3.3.1)は、測定者による測定操作の過程を記録するためのものであり、実際の測定を行う測定器部とその操作過程を記録するモニター部により構成されている。

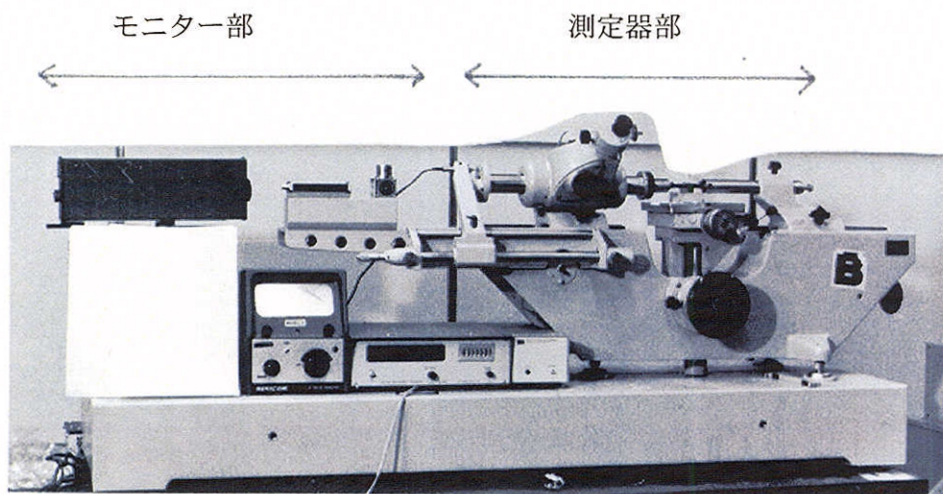


図 3.3.1(a) 操作過程解析装置 (本体)

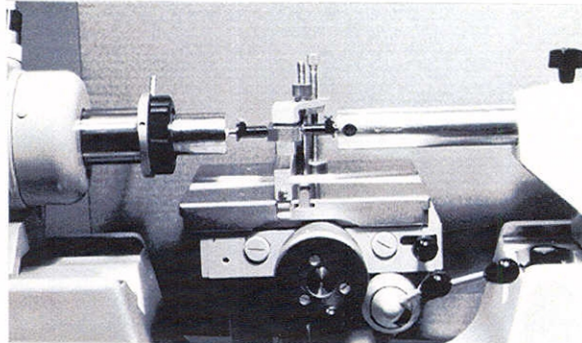


図 3.3.1 (b) 操作過程解析装置 (操作部)

測定器部は、実際に測定者が測定を行う部分であり、UHM (カールツァイス社製万能測長器) を基本とし、それに改良を加えた接触式寸法測定器である。これによる寸法測定において、測定者は、図 3.3.2 のように次の操作を行う。

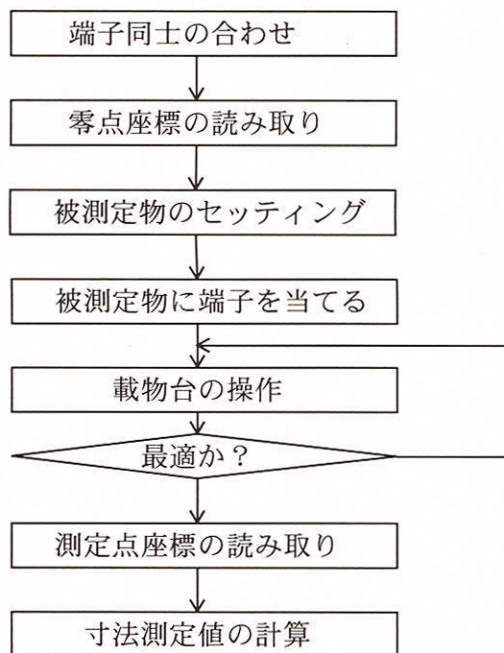


図 3.3.2 測定者の操作と測定過程

まず、端子同士を合わせゼロ点座標を読み取り、次に被測定物を端子で挟み、載物台の操作 (水平方向と端子方向に垂直な方向の2方向の操作が可能) により、最適測定位置を捜す。測定者が最適と判断した時点で測定点座標を読み、それとゼロ点座標の差が寸法値となる。ここで、最適測定位置とは、この場合は平面端子で被測定物の両端を挟み込む測

定であることから、測定点座標が最小となる位置に相当する。

測定者が最適位置を捜すために見るスピンドルの動きの情報の表示方法として、

- ①通常のUHM測定に使用する顕微鏡（50倍）による内蔵スケールの直接視
- ②モニター用レーザ干渉計によるデジタル表示、
- ③電気マイクロメータによるアナログ表示

の3種の表示方法が可能であるようにした。この表示方法は、それぞれ、

- ①アナログ・スケール表示、
- ②デジタル・カウンター表示、
- ③アナログ・メータ表示

に対応している。また、アナログ・メータ表示に使用する電気マイクロメータのセンサーは、端子を被測定物に当てた時点で、スピンドル表面に設定した。このセンサーの測定力は100g以下であり、測定操作には大きな影響を与えないと判断した。

モニター部は、測定者による操作過程を取り出し、記録させるためのものである。操作過程として、寸法測定中のスピンドルの動きを記録することとした。操作中にスピンドルの動きを記録することによって、最終結果である測定値との関係の強い特性値を取ることができ、また、測定者がどのような時点で判断をしているかが明らかになる。モニター部の測定器の条件としては、スピンドルに余分の測定力がかからないこと、しかも、測定範囲が広くとれることである。両者を満足するレーザ干渉計をモニター部に用いた。レーザ干渉計のパルスカウンタの出力は、インターフェイスを介して、計算機にデジタル記録し、測定過程解析のデータとして利用した。また、前に述べたように、パルスカウンタのデジタル・カウンタ表示を測定者に提示することにより、測定者への判断情報のフィードバック方法の水準とした。

3. 2. 3 実験計画

測定過程記録装置を用い、表 3.3.1 の実験因子を取り上げた実験計画により、測定状況を変化させ、寸法測定のパフォーマンスの違いを明らかにするための実験を行った。

測定者10人に対して、条件のすべての組み合わせでデータを取る多元配置のわりつけで実験を行った。測定者は、工学部学生6名及び計量研究所職員4名の計10名で、いずれもUHMによる測定の実験はほとんどない者である。測定方法に慣れるため、初めに測定者に操作方法、判断方法を教え何回か練習した後に、本実験の測定を行った。

意図的に水準を変化させた因子は次の通りである。

測定者への判断情報のフィードバックの因子（F）は、前述の通り測定者が最適測定位置を捜し、判断するためのスピンドルの動きの表示方法であり、その水準は前に述べた3種類である。アナログ・スケール表示の場合は、UHMのスケールを使うため顕微鏡を覗く形になり、被測定物を目視するためには、顕微鏡から目を離す必要がある。また、デジタル・カウンター表示、アナログ・メータ表示の場合は、カウンターあるいはメータを見ながら、UHM操作部を操作することが可能であり、比較的容易に被測定物の様子を直接見ることができる。

表 3.3.1 実験の因子と特性値

実験に取り上げた因子

- ・測定者 (H) 10名
- ・判断情報のフィードバック方法 (F)
 - F 1: アナログ・スケール表示 (顕微鏡+直尺)
 - F 2: デジタル・カウンター表示 (レーザ干渉計表示部)
 - F 3: アナログ・メータ表示 (電気マイクロ表示部)
- ・被測定物: 形状 (K) 大きさ (M)
 - K 1: 球 M 1 = 22.224 (mm)
 - M 2 = 11.906 (mm)
 - K 2: 円柱 M 3 = 50.650 (mm)
 - M 4 = 50.475 (mm)
 - K 3: 直方体 M 5 = 22.500 (mm)
 - M 6 = 13.970 (mm)
- ・大反復 (D): 反復 (R) 4回
 - D 1: 前半 (R 1, R 2)
 - D 2: 後半 (R 3, R 4)
- ・繰り返し (n) 2回

特性値: UHM 内蔵スケールの読み (測定者による読み)
レーザ干渉計によるスピンドルの位置 (測定過程)

被測定物の形状 (K) として、使用した平面端子との接触が、点、線、面となるように、球、円柱、直方体の3種類を選び、各形状について2つの計6個を測定させた。表中のMの値は熟練者が測定した結果であり、これを標準値として利用した。接触が点、線、面になるに従って、最適点を探す操作が複雑になるはずである。また、点接触の場合は、本来、端子を当てればそのまま最適点になるはずであるが、実際には、端子表面と球の表面の接触のなじみの問題などで、被測定物である球を回転させるとスピンドルが移動する場合があった。また、平面端子の平行度については実験を始める時点でチェックし調整した。

被測定物6個の測定はランダムに行い、それぞれの最初に端子同士を合わせた零点の読み取り、被測定物を挟んだ繰り返し1回目の測定、さらに、一旦端子を離し被測定物の姿勢を変え、繰り返し2回目の測定を行った。いずれも、UHM内蔵スケールの読み取りは測定者に行わせた。一方、測定過程については、端子を被測定物に当て操作を開始した時点から、1秒に1回、スピンドルの動きをレーザ干渉計の出力として記録した。

3. 2. 4 測定誤差の解析

実験により得られた測定結果である寸法値 (UHM内蔵スケール読み取り値) により、最終結果である測定の誤差の傾向を検討した。まず、寸法値の標準値からの偏差をデータとし、解析を行った。この偏差データは、標準値を真の値と考えれば、誤差に相当する値である。

測定者による誤差の傾向を見るために次のような解析を行った。偏差データを、反復4回の内R 1, R 2を前半 (D₁)、R 3, R 4を後半 (D₂) の大反復として2つに分け、測定者 (H)、表示方法 (F)、被測定物の形状 (K)、大反復 (D) 毎のデータ (8個) をひとまとめとした。すなわち、同じ形状で大きさの異なる試料 (M)、小反復 (R) 及び測定の繰り返しのデータをひとまとめにして二乗和の分解のための分散分析を行った。表

3-3-2 に、二乗和の分解の例を示す。

表 3-3-2 SN比を求めるための二乗和の分解の例
(HFKD毎に分散分析：真の値からの偏差)

Source	d.f.	S	V
m	1	2.1013	2.1013
M	1	0.0313	0.0313
R (M)	2	2.9725	1.4863
e 3	4	0.2050	0.0513
T	8	5.3051	

この二乗和の分解をもとにして、次のように、誤差分散のプーリングの方法を変えて、ばらつきを表す4つの誤差分散を求めた。

$$E_1 : V_1 = S_m / 4$$

$$E_2 : V_2 = (S_m + S_{R(M)}) / (4 + 2)$$

$$E_3 : V_3 = (S_m + S_{R(M)} + S_M) / (4 + 2 + 1)$$

$$E_4 : V_4 = (S_m + S_{R(M)} + S_M + S_{e3}) / (4 + 2 + 1 + 1)$$

プーリングした誤差 E_1, E_2, E_3, E_4 を、それぞれ、繰返誤差、操作誤差、反復誤差、総合誤差と呼ぶ。繰返誤差は短時間内の同じ設定での測定の繰り返しのばらつき、操作誤差は被測定物を取り替えるという操作が加わったときのばらつき、反復誤差は一連の測定操作を時間をおいて反復したときのばらつき、さらに、総合誤差はかたよりとばらつきを含めた誤差分散、に対応する。この因子の名を誤差の種類（因子Eと表記する）と呼ぶことにする。それぞれの誤差分散 V_i の逆数の対数変換を行い、次のSN比の形にし、測定の良さの指標とした。すなわち、

$$\eta_i = 10 \log (1 / V_i)$$

全体の傾向を見るために、上記SN比の分散分析を行った。表 3.3.3 にその結果を示す。誤差の種類、形状、大反復によって、SN比の大きさに差があることが分かった。

さらに、測定者ごとの誤差の傾向の違いを検討するために、交互作用 $E \times H$ の平均値のグラフを図 3.3.2 に描いた。測定者については、左から総合誤差 E_4 のSN比の小さい順番に並べた。SN比全体の分散分析の中で、交互作用 $E \times H$ の効果は大きくないが、測定者による誤差の大きさの傾向の違いを見るために必要な交互作用である。

表 3.3.3 全体のSN比の分散分析

Source	S	f	V
E(誤差の種類)	16217.38	3	5405.72
H(測定者)	5615.16	9	623.90
F(フィードバック)	1460.09	2	730.12
D(大反復)	1633.24	1	1633.30
K(形状)	4091.29	2	2045.64
E*F	955.08	6	159.18
E*K	805.62	6	134.27
E*H	1300.27	27	48.16
H*F	2248.99	18	124.94
H*D	1814.17	9	201.57
H*K	2959.91	18	164.44
F*D	410.47	2	205.24
F*K	554.67	4	138.67
H*F*D	2481.27	18	137.85
H*D*K	2503.28	18	139.07
F*D*K	701.32	4	175.33
H*F*D*K	4635.60	36	128.77
e	12291.73	536	22.93

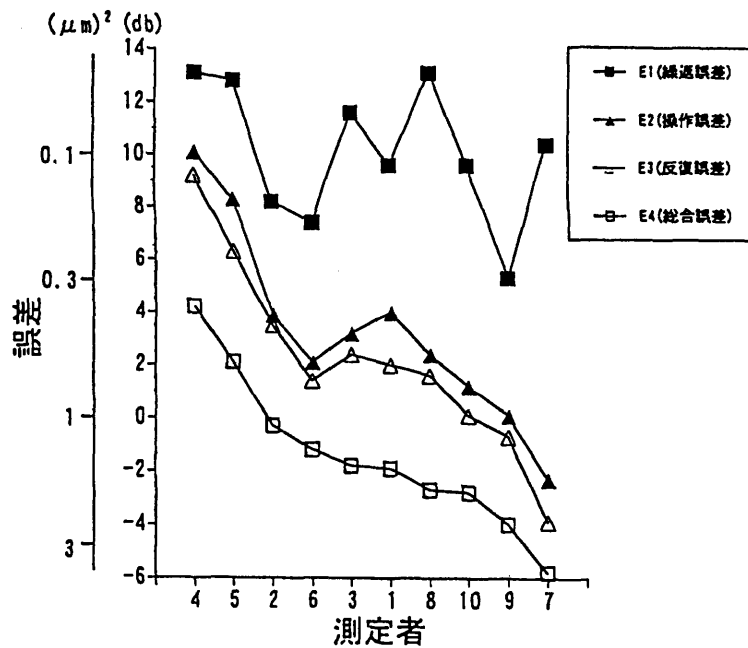


図 3.3.2 測定者ごとの誤差の傾向の違い
(交互作用 E × H の平均値)

図 3.3.2 から次のことが明らかになった。

- ①繰返し誤差 E_1 と他の誤差 E とは、その大小に全く相関がなく、繰返し誤差が小さくても操作・反復・総合誤差が小さくなるとは限らない。
- ②操作誤差と反復誤差の変化の様子は似ており、相関が高い。
- ③操作誤差・反復誤差は、総合誤差と全体としての変化の傾向は似ている。

このような傾向は次のようなことから生じていると考えられる。繰返し誤差には測定者が意識しコントロールできる部分が多いが、反復誤差、操作誤差には測定者の意図が入りにくい。即ち、繰返し測定では測定者が直前の測定値を記憶しており意識的に測定値を揃えることが可能であるが、形状を変えた測定操作が入っている反復・操作誤差では測定値の記憶が困難であり、測定値を意識的に揃えることができない。従って、反復・操作誤差には、測定者の意図は入り込みにくく、測定者によるばらつきとして測定者のパフォーマンスの差が現れる。

また、かたよりの成分が含まれる総合誤差は反復誤差・操作誤差とその変化の傾向が似ている。この場合のかたよりは、3. 2節で検討したように、負の方向には限界値を持ち、正の方向にシフトしており、それをどれだけ小さくできるか、という形で、最適測定位置を探すための操作の結果である。すなわち、この場合のかたよりは、測定操作をうまく行えば小さくなる、という性質を持っている。顕微鏡測定における標線合わせなどの場合のかたよりは標線の合わせ方の個人差を表し、かたよりが小さいことが必ずしも測定の上まきに対応しないが、それとは異なり、この場合にはかたよりが小さいことと操作がうまく行われたこととは対応をもっている。

従って、総合誤差は、測定操作をどれだけうまくできるかという点で、測定のパフォーマンスを表している。かたよりが含まれる総合誤差が、測定のばらつきを表す反復・操作誤差と変化の傾向が似ていることは、反復で安定している測定者は最適点を探す操作においてもうまく操作を行うことを示している。

誤差評価の立場からいうと、比較的容易に求めることができることから一般的に行われている、単なる測定の繰返しのばらつきを見るということだけでは、総合的な測定誤差の傾向を判断することはできない、ということを示唆している。

測定者の特徴を詳しくみるために、測定者 H 毎に大反復 D で SN 比がどのように変化しているかを表す交互作用 $H \times D$ についての SN 比の平均値のグラフを図 3-3-3 に描いた。大反復 D では、ほとんどの測定者で、後半の方が SN 比が高くなり、測定のばらつきは減少している。後半の SN 比の高くなり方で見ると、測定者 H_8 、 H_2 、 H_7 はほとんど変化はないが、他の測定者は、後半で SN 比は高くなっており、測定が上達している。これは、被験者である測定者は UHM 測定に関してはほとんど経験のない初心者であることから、習熟効果が現れたと考えてよい。

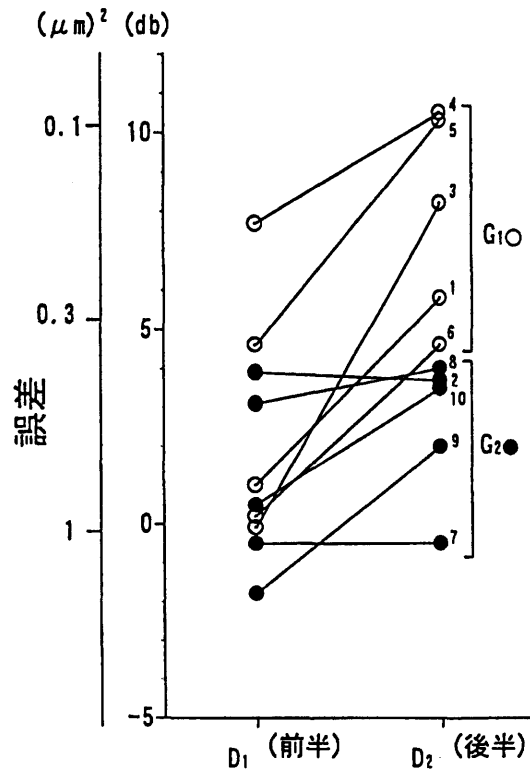


図 3.3.3 測定者ごとの習熟効果

図 3.3.3 をもとにして、測定者を二つのグループに分けることを考える。すなわち、

①後半のSN比が大きく、測定がうまくなったグループ (G 1) と、

②後半のSN比が小さいままで、相対的にはまだ測定誤差が大きいグループ (G 2) である。以後の解析では、この2つのグループ (因子Gと表記する) に分けて誤差の傾向を検討した。

改めてグループ分けした測定者ごとの誤差の傾向を図 3.3.4 に示す。ここで測定者を表す番号を改めて付けなおしている。No.1～5はG1、No.6～10はG2に分類されている。各グループ内では、SN比誤差の平均が大きい順に、すなわち誤差が小さい順に並べて、番号をふった。こうすることによって、図 3.3.4 の中で、各測定者の点を結ぶ線は一方向に小さくなっていくことが期待される。

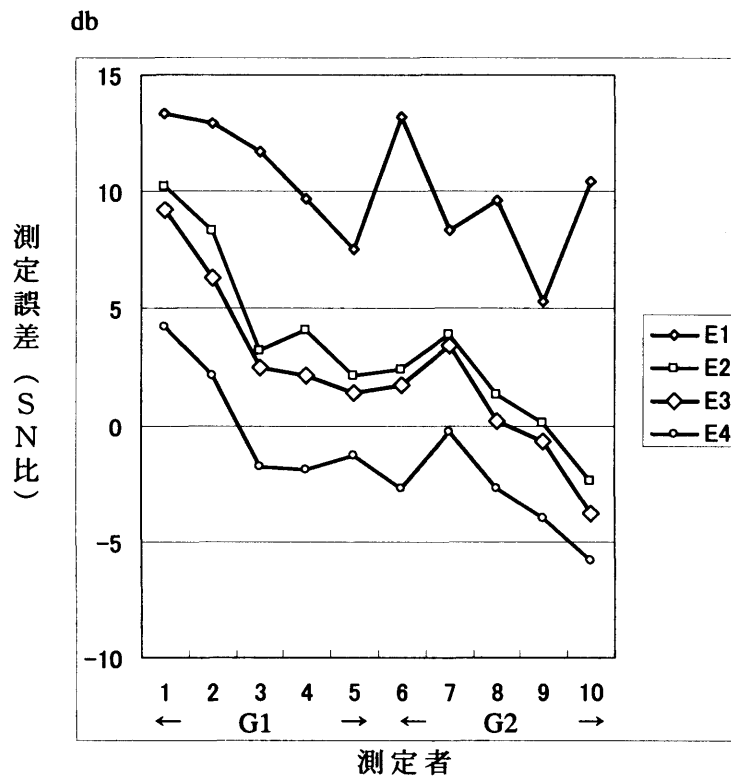


図 3.3.4 グループ分けされた測定者の誤差の傾向

図 3.3.4 で、測定のうち測定者 No.1 ~ No.5 だけについて注目すると、繰返し誤差、操作・反復誤差、総合誤差の大きさのグラフはほぼ平行に変化しており、かなり高い相関をもっている。しかし、それ以外の測定者では、繰返し誤差とその他の誤差には高い相関は見られない。このように、検討の基本となる集団をどのように取るかによって誤差の傾向が変化してしまうことが、マンマシンシステムにおける誤差評価の難しいところである。

表 3-3-4 グループ分けした SN 比の分散分析

要因	f	G 1		G 2	
		前半 D 1	後半 D 2	前半 D 1	後半 D 2
F	2	177	479*	142	233
K	2	749*	109	390*	443
H (F×K)	40	161*	53*	111*	143*
E	3	1078*	807*	1112*	1442*
E×F	6	92*	24	8	78*
E×K	6	19	92*	13	36
e 4	120	15	7	19	20

F : 判断情報のフィードバック、K : 被測定物の形状
H : 測定者、E : 誤差の種類

グループや大反復など基本となる集団によって誤差の傾向が異なるのではないかと、この予測から、改めて、上で求めたSN比について、グループG・大反復D毎に分散分析を行い、表3-3-4の結果を得た。表では、SN比のばらつきを表す分散のみを表記した。

グループ毎に大反復の前後でSN比の測定者間のばらつきがどのように変化するかについて、分散分析の結果から次の傾向が明らかになった。

- ①4次誤差 e_4 は、G1では後半の方が分散が小さくなり、SN比のばらつきは小さくなっているが、G2では分散に変化がなく、SN比のばらつきは変わらない。その傾向は、3次誤差[H(F×K)]でも同じである。
- ②形状の効果(K)も、G1では分散が小さくなり、測定者によらずSN比はそろってくるが、G2では分散は大きいままになっており、SN比はばらついたままである。
- ③フィードバックの効果(F)では、G1、G2いずれのグループも後半の分散が大きくなっている。

このことは、G1が測定に向いており、うまく測定できるグループと考え、G1では、グループ内の測定者間のばらつき、形状の変化に対するばらつきは小さくなり、測定能力が揃ってくるが、G2では、グループ内のばらつきはそのまま、測定能力はばらついたままである。しかし、いずれのグループでも、フィードバックの方法に対しては、測定者のパフォーマンスの違いが鮮明になっている。

測定条件の因子の効果を検討した。

(1) 被測定物の形状(K)の効果(図3-3-5)

図3-3-5は、交互作用G×K×D、すなわち、グループ(G)毎に、被測定物の形状(K)によって、大反復(D)の前後でSN比の平均がどのように変化しているかを表している。

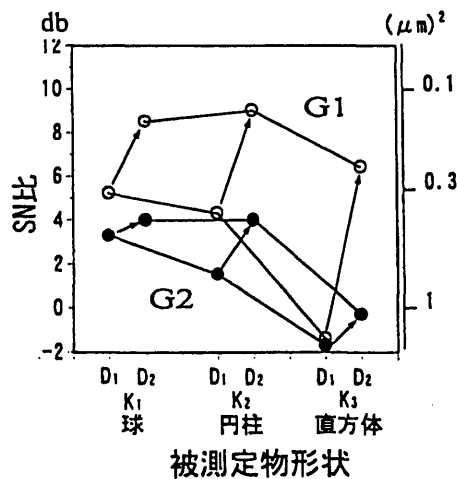


図3.3.5 交互作用G×K×D

被測定物の形状の効果は全体として、球、円柱ではSN比に差がなく、直方体ではSN比の平均が下がる。本来、球は1点接触、円柱は線接触、直方体は面接触であり、最小点の探索もこの順に難しくなると考えられるが、ほぼそれに対応している。

大反復の効果を訓練効果としてみると、測定の難しいものほどSN比の変化が大きく、大反復後半(D2)でのSN比の向上が顕著である。さらに、G1とG2とを比較すると、G2では3つの形状共、同じ程度の効果しかあげていないが、G1では何れの形状でも、G2に比べ大きな訓練効果をあげている。特に、直方体での訓練効果が著しい。

球、円柱について注目してみると、何れのグループも、前半では円柱より球の方がばらつきが大きいのにに対し、後半では、同じ程度のSN比になっている。G1とG2とで訓練効果の大きさが異なるのは、主として、より操作の複雑な直方体測定のSN比の向上の程度によっていることが分かる。

(2) 判断情報のフィードバック(F)の効果(図3.3.6)

図3-3-6は、交互作用G×F×D、すなわち、グループ毎(G)に、フィードバックの方法(F)によって、大反復(D)の前後でSN比の平均がどのように変化しているかを表している。

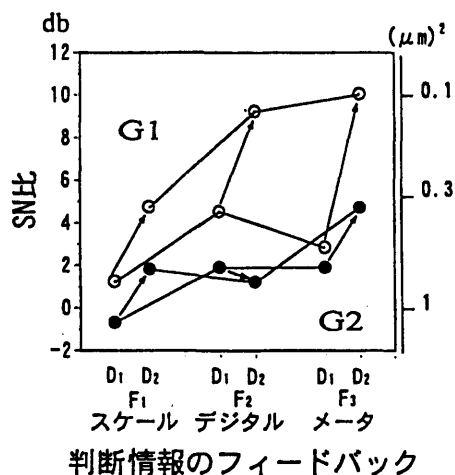


図 3.3.6 交互作用G×F×D

フィードバックの方法では、全体として、アナログ・スケール表示、デジタル・カウンター表示、アナログ・メータ表示の順にSN比が高くなり、本装置による測定ではこの順にパフォーマンスが高くなる。

大反復の効果を訓練効果としてみると、G1のグループでは、アナログ・スケール表示、デジタル・カウンター表示、アナログ・メータ表示の順にSN比が高くなり、アナログメータで訓練効果が一番大きいことが分かる。G2のグループでは、アナログ・スケール、アナログ・メータのようにアナログ表示のものは、訓練効果があるが、デジタル表示では、効果がなく、むしろ悪くなっている。

一般に、アナログ表示では、指針の位置をスピンドルの座標の大小に対応させることが容易であり、デジタル表示では、数字の変化で座標の大小を判定するため、最小位置の判定に困難があると予測される。G2グループでは、その予測に近い結果が得られたが、G1グループでは、デジタル表示でも大きな訓練効果が得られている。

(3) 測定者のグループ分けについて

G1グループは、全体としてSN比が高く、訓練効果が大きいグループとして特徴づけられた。さらに、表 3-3-4 から分かるように、グループ内のSN比のばらつき、測定者間を含めたSN比のばらつきが小さい。また、後半では、形状の効果が小さくなり、フィードバックの効果が顕著になっている。

一方、G2グループでは、SN比が全体に低く、訓練効果のないグループとして特徴づけられた。また、グループ内のばらつきも大きい。

この傾向から、G1では、安定した良い測定が行われ、G2では、不安定で、ばらつき自体が反復で大きく変化していることが明らかになった。

3. 3. 5 測定過程記録の解析

前項では、フィードバックの方法、被測定物の形状などの測定条件を要因として測定者毎に測定誤差を表すSN比を求め、誤差の大きさが測定条件によりどのように変化するかを明らかにした。この節では、測定のパフォーマンスの立場から、スピンドルの動きの解析から測定過程の解析を行い、その特徴を明らかにするとともに、測定誤差との関係を検討する。そのために、記録した測定過程のスピンドルの動きを表すデータをグラフ表示させ、動きのパターンの複雑さで分類した。各分類の出現率の変化の様子を定量的に見るために、累積法の分散分析を行った。

図 3-3-7 は、測定過程の記録の例である。最終的に読み取りを行った時点でのスピンドル位置を零として、各時間での零からの偏差が示されている。図では、横軸に時間軸をとり、最終的に測定値を読み取った時点为零とした。そのため、時間経過は右から左に向かうことになる。縦軸は、スピンドル位置の、最終読み取りの位置からの偏差である。スピンドル位置の記録は、端子を被測定物に当てた時点から開始した。測定操作の最終段階での判断に関心があるので、その部分を中心に図示したが、9 μm 以上の偏差をもちスケールアウトしたデータを結ぶ線は点線で示した。

この動きのデータを、表 3-3-5 に示すように、測定の初期(X)、中期(Y)、最終(Z)期の3つの部分にわけ、その中で動きのパターンの複雑さによって分類した。

表 3-3-4 パターン分類の指標

・ X : 初期特性 : スタート時点及びその直後
X 1 : 0 ~ 9 μm 以内でスタートした
X 2 : スタート直後 9 μm 以内へ移動した
X 3 : しばらく 9 μm 以上で操作している
・ Y : 中期特性 : スタートから終了 5 秒前まで
Y 1 : 幅 2 μm 以上の動きがない
Y 2 : 幅 9 μm 以上の動きがない
Y 3 : 9 μm 以上の動きが少しある
Y 4 : 0 ~ 9 μm で動きが多い
Y 5 : 9 μm 以上の動きが多い
Y 6 : 複雑な動きをしている
・ Z : 最終特性 : 終了 5 秒前から終了まで
Z 1 : 1 μm 以上の動きがない
Z 2 : 1 μm 以上の動きがある

分類の指標は、初期状態として、端子を測定物に当て、測定を開始した時点でのスピンドルの位置によって、3段階に分類した。また、最終期状態については、最終的な読み取りを行う直前5秒以内で、1 μm 以上の大きな動きがあるかないかで2段階に分類している。その間の中間状態については、時間的にもばらつきが多く、複雑であるため、6段階に分類した。分類したパターンの典型例を図3-3-7に示す。

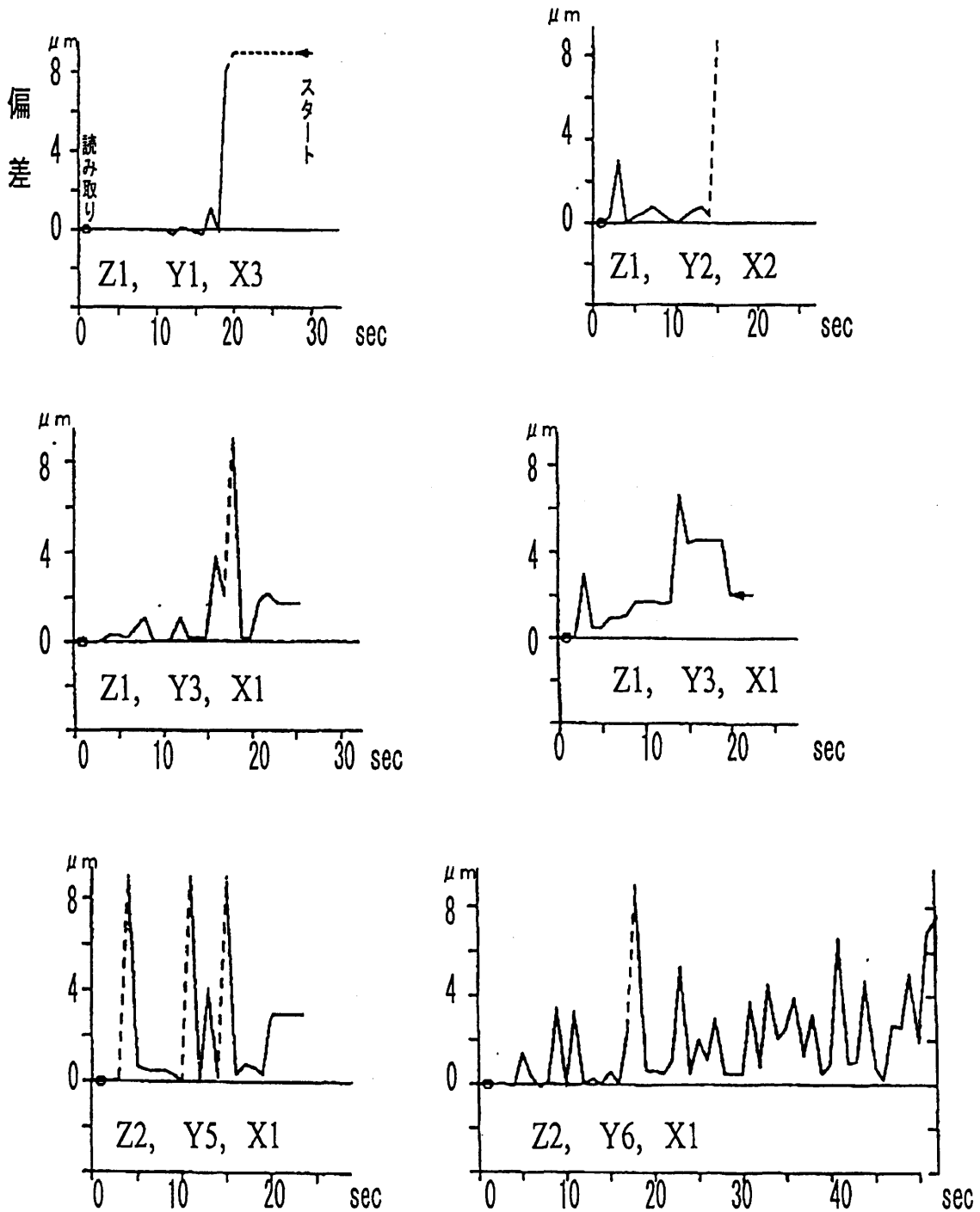


図 3.3.7 測定パターンの例

このような分類をもとに、全部の測定パターン1440の分類を行った。分類には単純なパターンから複雑なパターンへと序列があることから、因子によるパターンの分布状態の違いを定量的に扱うことのできる累積法の分散分析を行った。表 3-3-5 に、累積法の分散分析の結果を示す。

表 3.3.5 累積法によるSN比の分散分析

要因		分散		
		初期特性	中期特性	最終特性
G	1	41.63*	74.03*	--
e 1	5	6.93	3.42	8.00
F	2	9.34	4.48	1.56
F×G	2	7.64	2.82	92.62*
D	1	1.95	3.80	9.65
D×G	1	--	1.73	7.13
e 5		--	--	--
K	2	148.95*	72.16*	39.99*
K×G	2	2.73	16.10*	5.22
n	1	5.03	7.75	--
n×G	1	21.19*	2.91	--
e 8		0.68	0.72	0.66

G：グループ、F：フィードバックの表示方法、D：大反復
K：被測定物の形状、n：操作の繰返し

個々の因子の効果を検討のベースにして、測定者毎のパターン分布の平均的な傾向をみるために、図 3.3.8 を示す。No.1 から No.10 まで、図 3.3.4 に対応して、ほぼSN比の大きい順番に並んでいる。併せて、測定者毎の平均測定時間の違いを図 3.3.8(4)に示した。G1とG2では測定時間に顕著な違いがあることが分かる。

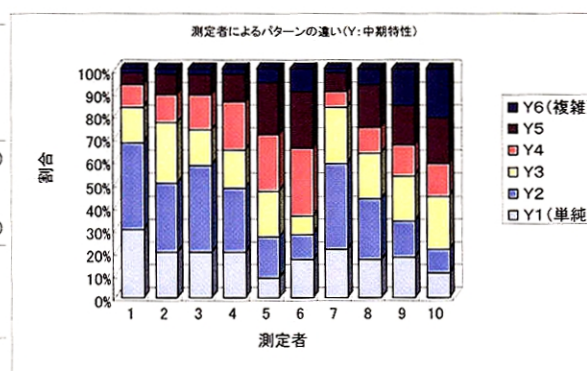
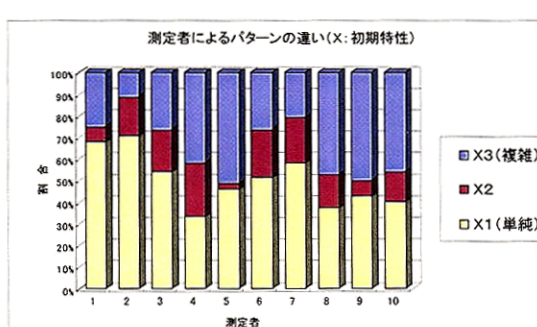


図 3.3.8(1) 初期特性 X

図 3.3.8(2) 中期特性 Y

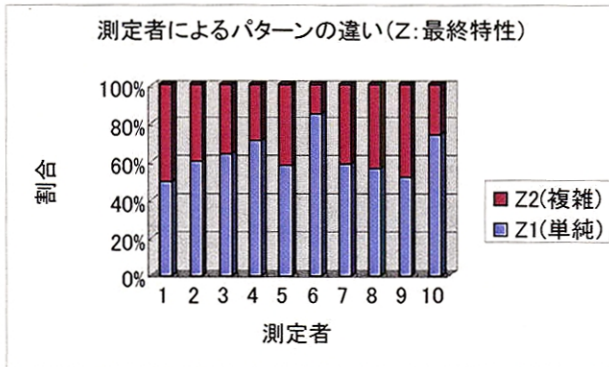


図 3.3.8(3) 最終特性 Z

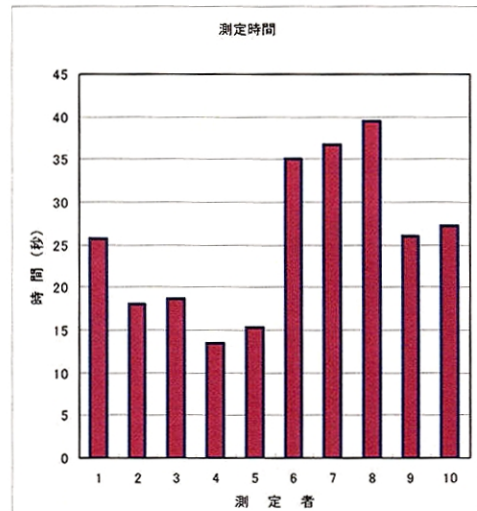


図 3.3.8(4) 測定時間

図 3.3.8 測定者によるパターン分布、測定時間の違い

個々の測定者毎のパターン分布では特徴抽出は難しい。そこに、累積法などの分散分析手法を活用する理由が存在する。中間特性のパターン分布をみると、N0.7 の測定者の分布がその前後の測定者に比べ単純なパターンが多いのが特徴的である。もし、パターン分布から測定者を分類したら、G 1 に分類しただろうと考えられる。実際には G 2 に分類されており、パターン分布から測定者をグループ分けできない場合もあることが分かる。分類するための指標と、分類された後の特徴とを区別しながら解析することが必要である。

表 3.3.5 の累積法の結果から、全体として、グループ (G) と形状 (K) との主効果、また、グループ (G) と、表示方法 (F)、大反復 (D)、形状 (K) の因子との交互作用が大きく、グループによってそれらの因子の水準でのパターンの現れ方が異なることを示している。

個々の因子について、そのパターン分布について検討を進める。

(1) グループ (G) について

表 3.3.5 において分かるように、グループの主効果が大きく、初期、中期特性において測定過程のパターンがグループにより異なる。

図 3.3.9 に、大反復毎の各グループの平均的なパターン分布と測定誤差の違いを示す。

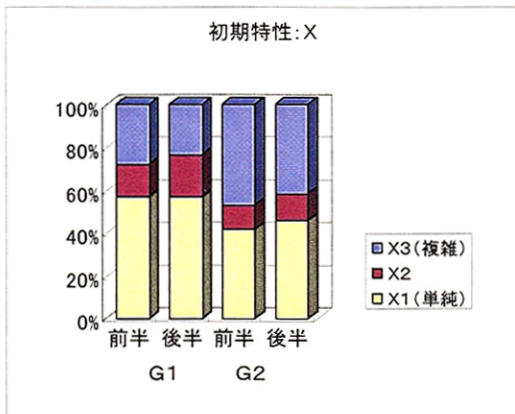


図 3.3.9(1) 初期特性 X

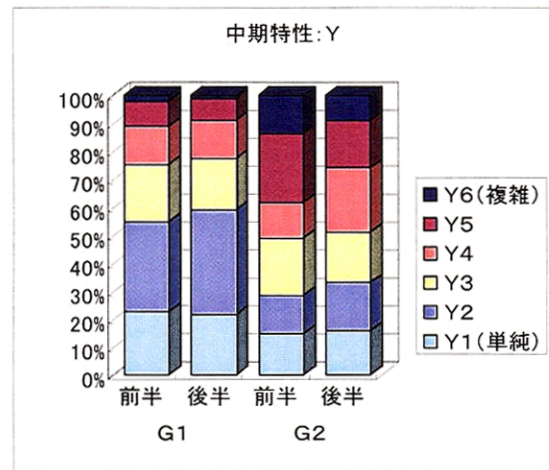


図 3.3.9(2) 中期特性 Y

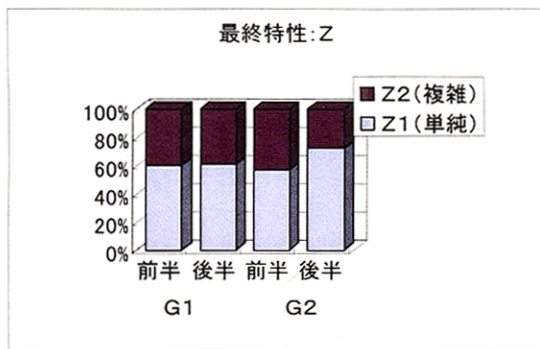


図 3.3.9(3) 最終特性 Z

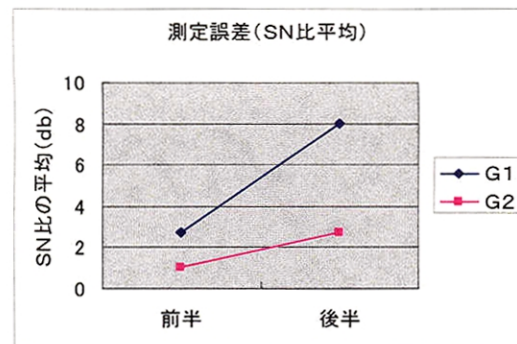


図 3.3.9(4) 測定誤差

図 3.3.9 G (グループ) × D (大反復) ごとのパターンの違いと測定誤差

グループ間のパターンの差に着目すると、初期特性X、中期特性Yにおいては、G2に比べ、G1に単純パターンが多い。このことは、最初の操作を開始する時点で最適測定点に近いところでスタートしており、中間の操作においても、動きが小さい単純な操作を行っていることを示している。測定がうまいグループで単純なパターンが多いことは、操作を繰り返すことが良い測定に必ずしも繋がらないことを示している。

一方、大反復の主効果は小さいことから、大反復の前後のパターンを比較しても大きな違いはみられない。G1、G2のグループ分けに大反復の前後のSN比の向上が一つの要因になっていたが、G1のパターン分布をみて分かるように、分布の変化はみられない。すなわち、このパターン分布は、測定者によって決まるものであり、訓練などによっては変化しないものであると考えられる。

(2) 測定物の形状 (K) の効果

被測定物の形状によるパターン分布の違いを図 3-3-10 に示す。中期特性 Y については、交互作用 K×G が大きいので、交互作用のグラフを示した。

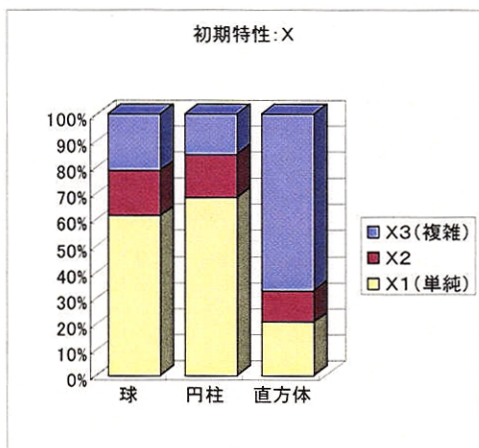


図 3.3.10 (1) 初期特性 X

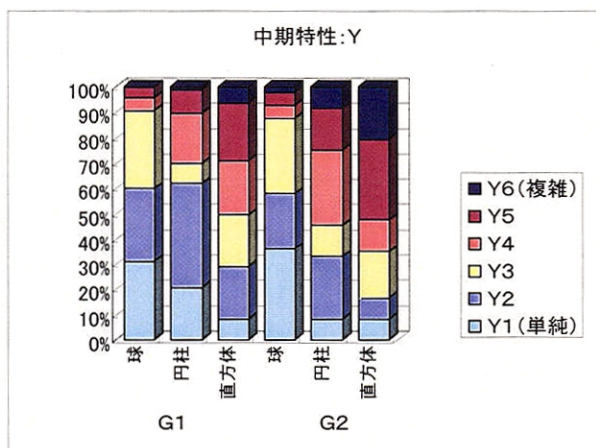


図 3.3.10 (2) 中期特性 Y

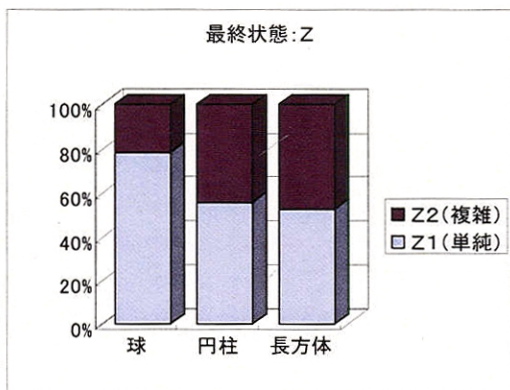


図 3.3.10 (3) 最終特性 Z

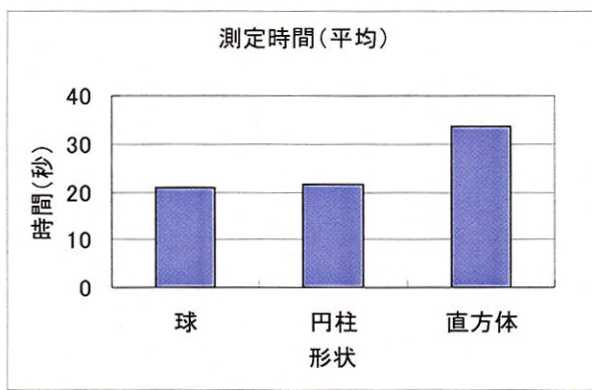


図 3.3.10 (4) 測定時間

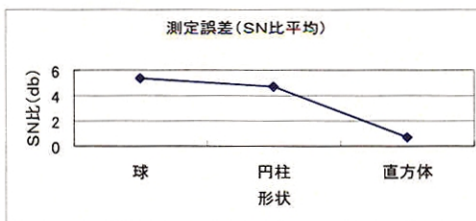


図 3.3.10 (5) 測定誤差

図 3.3.10 G (グループ) × K (形状) による違い

特性 X, Y, Z ともに、球、円柱、直方体と対象が複雑になるにつれて、パターンも複

雑なもの割合が大きくなり、測定の操作が複雑になっていることが分かる。

測定誤差の解析においても、図 3.3.10(5)に示すように、SN比は、球、円柱では余り差異はなく、直方体で小さくなっていたが、その関係は初期特性X，中期特性Yにおけるパターンの複雑さに対応している。また、図 3.3.10(4)に示すように、測定時間も操作の複雑さに応じて長くなっている。測定時間の点でも、球、円柱の測定時間はほぼ同じであるが、直方体の測定時間は長くなっている。最終特性Zにおいて、球で単純なパターンの比率が多いが、これには、測定者が操作を行ったとしても球に接触した端子が動かない場合も含まれている。

前節でみたように、SN比という観点からは、大反復の前後で形状によっては大きな訓練効果がみられたが、その事実を反映するパターン分布の変化はみられない。パターン分布は、やはり、測定者、形状によって決まるものであり、習熟などその他の要因によって決まるわけではない。

(3)情報のフィードバック（F）の効果

情報のフィードバックによるパターンの分布の違いを図 3-3-11 に示す。フィードバックの主効果はそれほど大きな効果ではないが、グループとの交互作用が大きく、グループによって因子の効果異なるため、グループ別に分布図を示した。

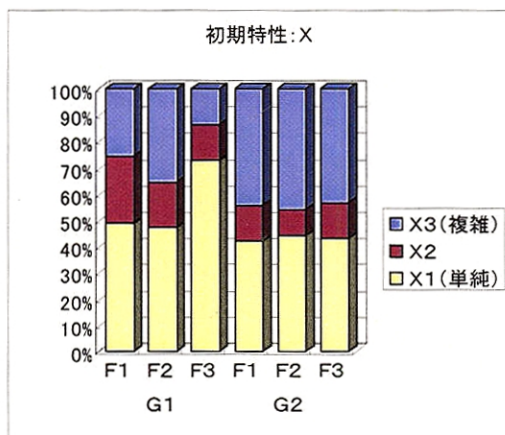


図 3.3.11 (1) 初期特性

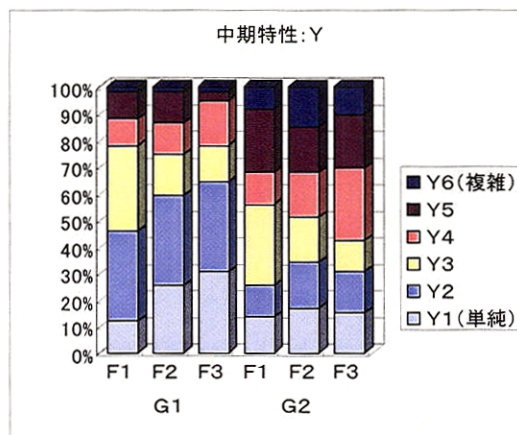


図 3.3.11 (2) 中期特性

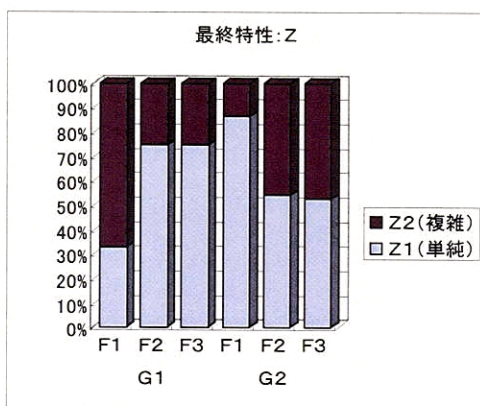


図 3.3.11 (3) 最終特性

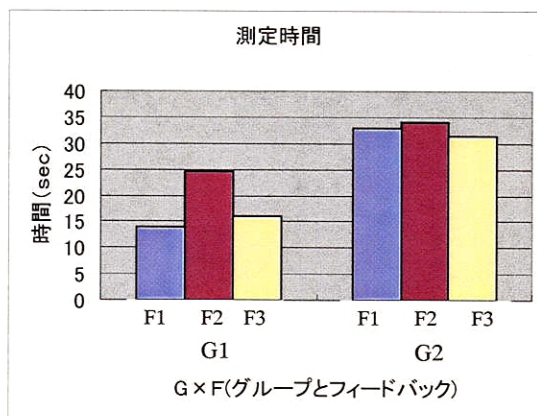


図 3.3.11 (4) 測定時間

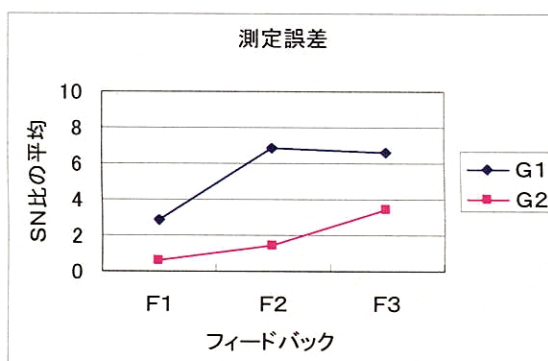


図 3.3.11 (5) 測定誤差 (SN比)

図 3.3.11 G (グループ) × F (フィードバック) による違い

初期特性Xでは、G1では、F1、F2に比べF3において単純なパターンの割合が大きくなっているが、G2では、フィードバック(F)の水準によらず、パターンの分布は同じである。G1でF3に単純なパターンの割合が大きくなっている理由は不明である。

中期特性Yでは、G1では、誤差が小さくなるF1、F2、F3の順にパターンが単純なものが増しているが、G2では、Y3、Y4の割合が変化する程度で、フィードバック(F)によるパターンの割合には大きな変化はない。

最終特性Zでは、F1(アナログ・スケール表示)にG1とG2との違いが現れ、大きな交互作用となっている。G1では、動きを停めた直後に素早く判定を下しているが、G2では、動きが止まってからの時間が長く、動きがないまま迷いながら判定している部分が大きくなっている。

判断情報のフィードバックの表示方法は、最適位置の判定に数字あるいはメータの位置が一番小さいところにあるかどうかを判定する方法に関連しており、判断が分かりにくければ操作が少し増える程度で、あまり効果は大きくないであろうと予測されたが、ほぼ、

そのような結果が得られた。

全体としてみたときに、測定時間、測定誤差の傾向とパターンの複雑さとの明確な対応は見られない。しかし、グループ別に見たとき、G1はG2に比べ測定時間は短く、単純なパターンの割合が大きい。また、G1では、デジタル表示(F2)の場合アナログ表示(F1, F3)より測定時間が長く、デジタルカウンターで数字を見ながらの判定の難しさが明確に現れた、ということができる。それに比べ、G2では、フィードバックの種類の違いによっては測定時間が変化せず、同じように長い時間をかけており、そのために中期特性には複雑なパターンの割合が大きくなっていることが分かる。

(4) 議論

今まで説明に使用したパターンの単純、複雑という軸は、測定対象の複雑さ、要因効果によるSN比の大小の変化、測定時間の長短などと対応がみられ、特に最終結果の評価を表すSN比との対応もみられることから、測定過程におけるパフォーマンスの違いが、測定値に影響を及ぼしていることを示している。

良い測定が、単純なパターンを持つ測定過程によっていることは、ただ単に時間をかけたり、操作を何度も繰り返せば、良い測定ができるということではないことを示している。パターンの単純さは、動きが小さいこと、動きが少ないことに対応しており、微少な操作の必要性、あるいは、短い時間で決断よく測定することが良い結果を生むかもしれないと言う意味で、単純なパターンでの測定がパフォーマンスに必要であることを示唆している。

また、このような傾向は、比較的SN比がよく、安定した測定を行うG1に顕著に現れ、ばらつきの大きいG2では、そのような傾向が明確ではない。測定過程のパフォーマンスを検討する上では、対象の測定者をどのように選択するかが重要である。

今回の解析では、測定者をSN比の傾向によって二つのグループに分けて、パターン分布の特徴を明らかにしたが、グループ内の個人差があることから、パターン分布の特徴による分類は必ずしも成功しないと考えられる。個人差を対象にした実験の解析において、どのような指標で人間をグループ分けするか、また、その前に、どのような集団の代表として被験者が集められているかが重要であるが、その集団の特徴付けとの因果関係を明らかにするのは難しい。

以上のことから、測定系の信頼性を評価する際、測定者の要素を抜きにすることができないことが明らかとなった。測定に個人差が生じることは一般に知られていることであり、目視の判断とか測定経験の差として考えられてきたが、測定過程の操作や判断によって測定者により10 db(誤差分散で1桁)の差が生じることは、個人差の問題の重要性を示している。また、人間の測定操作、判断が結果に現れると言うことは、単に測定を自動化すればすまされる問題ではない。人間の要素の絡む場合として、工程や装置の調整、計測器の校正などの場面での問題として依然残されるであろう。

3.3.6 まとめ

第3.3節では、測定の信頼性と測定過程との関連を明らかにするため、測定のマンマシンシステムの問題として、接触式寸法測定器を用いた測定システムにおいて、測定者による測定誤差の特徴、及び、測定者の操作による測定過程と測定誤差の対応について実験

的に検討し、次のことが明らかになった。

- 1) 測定個人の差は目視の判断とか測定経験の差として考えられてきたが、測定過程の操作や判断によっても、測定者により 10 db (誤差分散で1桁) の差が生じることから、測定系の信頼性を評価する際、測定者の要素を抜きにすることができない。
- 2) 被測定物の形状、判断情報のフィードバック方法の要因により、測定者の能力の差が現れる。
- 3) 繰返し誤差による測定者の評価は、総合誤差との対応は見られず、測定者の能力の差の評価にはならない。

さらに、種々の要因による測定過程のパターンの変化の様子を、初期、中期、最終期の3つの特性の特徴により解析したところ、次のことが明らかになった。

- 4) 誤差が小さくSN比の高い測定者グループでは、共通的に同じ様なパターンが現れるが、他方のグループでは、共通性は明確ではなく、ばらつきが大きいままであるという傾向がある。
- 5) 測定過程のパターンは測定者、被測定物の形状によりほぼ定まり、SN比の向上に対応したパターンの変化はみられない。
- 6) 全体として、誤差が小さくSN比の高い測定者グループには単純なパターンが多く、比較的単純な操作による測定を行っており、測定時間は短い。
- 7) 誤差が小さくSN比の高い測定者グループは、最終判断を行うときには、動きを停めた直後に判断を行っているパターンが多く、スピンドルの動きをもとに判断を下している。

3. 4 マンマシンシステムとしての測定システムの評価と改善の可能性

第3. 1節の検討の中で、測定システムの中で測定者の判断は測定システムのパフォーマンスにとって大きな意味を持っていることが明らかにされた。過ちは測定者個人に依存するパラメータであるが、大きな過ちでない限り、もとの測定値の集団としての評価であるばらつきの大きさを、分散で2倍程度に変化させるという意味で致命的ではなく、過ちのある定常状態として評価していくことが現実的である。ここで、2倍というのは、自由度が大きい場合、分散比が2倍以上であれば要因効果を有意にするという統計的な検定の考え方を採用している。損失関数で考えると、損失が2倍になる境界である。

一方、第2. 2, 第3. 3節の実験の中で、測定の種類によっては誤差の大きさは測定者に依存しており、かたより、ばらつき両面で、個人差がいろいろな形で表れている。全体としては、個人差によって分散で1桁程度の差が生じる可能性があることが明らかとされた。

従って、このような測定や操作を行う人間に依存する部分を持つ測定システムにおいては、個人差を考慮した評価システムを取ることが必須である。そのために必要な評価・表現の留意点をまとめると次のようになる。

- 1) 測定システムの不確かさ評価を行う場合、その測定システムにおいて人間の要素の影響が大きいかどうかにより、評価・表現の方法を区別をする必要がある。
- 2) 人間の要素の影響が小さい場合には、その旨を述べておき、その成分は検討の対象から外すことが可能である。
- 3) 人間の要素の影響が大きい測定の場合には、誤差評価において、個人差に依存する誤差の成分を加えることが必要である。
- 4) 個人差に依存する誤差成分が大きい場合の誤差（不確かさ）の表記においては、個人差が大きい旨を付記した上で、最高精度として誤差の小さい測定者の値を使って総合誤差（合成標準不確かさ）を表記する。さらに、誤差成分（不確かさ成分）が測定者によってどの程度変化し得るかを述べる。

測定の信頼性の表記においては、測定者によって変化する部分を明確にし、別記しておくことが必要である。個人差の評価においては、その表れ方を意識した評価方法が必要である。

個人差の表れ方には、個人によってかたよりが異なっている場合だけでなく、ばらつきが異なる場合もある。個人差が最終的にどのような形で不確かさ評価に関わってくるかは、どのような集団の中での不確かさを評価しようとしているかに依存する。

- 1) 測定者個人の測定結果の不確かさを評価する場合には、個人個人のばらつきが対象になる。測定者集団全体からみると、測定者によってばらつきが異なる。
- 2) 測定者集団の不確かさを評価する場合には、測定者集団全体のばらつきが対象になる。測定者集団のばらつきは、測定者ごとのかたよりに見積もられる測定者間のばらつきと測定者内のばらつきの平均との合成で評価される。。

常に、不確かさ評価あるいは誤差評価には、そのような限定条件を付記することが必要である。

一方、個人差をなくす、という改善の観点では、個人差の成分であるかたより及びばら

つきの両面からのアプローチが必要である。最終的には、個人差に対してどのような対策を採るかである。個人差の補正には、校正によって補正するというソフト面からのアプローチと、測定者間の差をなくすための教育・訓練を行うというアプローチの二つがある。

校正は、その時点でのかたよりを検出して、その原因を追及せずに修正し、できるだけ正確度を上げるという方法である。校正を行えば、その時点での測定者ごとのかたより成分は補正できるが、ばらつき成分の補正はできない。従って、測定者ごとのばらつきが評価される。また、測定者ごとのかたより成分が時間によって変化する場合には、測定者のばらつきが時間に依存して変化することになる。多くの場合、短時間ばらつきとか長時間ばらつきという形で、繰返し誤差、反復誤差が評価される。複数の測定値をとって平均化効果でばらつきを減らそうとする場合には、元データがどのような状況で取られたかに依存するため、どのような成分が平均化されるかに留意する必要がある。

測定の個人差をなくすのはより根本的な改善策である。多くの場合、測定者の教育・訓練が行われる。測定者の個人差としてわかりやすいのは、測定者ごとのかたよりである。かたよりをなくすには、測定者間での差異をなくすことである。そのためには、かたよりがゼロの基準となる状態を示し、それに近づくように訓練することである。どのようにゼロ基準を定めるかを決めることは難しいが、まずは、一つの基準にそろえさせることである。ばらつきを減らすことも、基準にそろえさせることで実現するはずである。すなわち、かたよりのない基準に近づける訓練により、個人差のない、安定した測定結果に近づけることができる。そこでは、かたよりをなくすことと、ばらつきを減らすこととの二つの対策のうち、校正によるかたよりの修正の可能性を考慮すれば、安定性を優先的に追求すべきである。

田中等は、顕微鏡の下での図形合わせの操作において、基準パターンを提示することによって、測定者の教育訓練効果を上げている³⁻⁷⁾。図形合わせ操作の場合には、基準となる図形合致の状態を図示して測定者に呈示することが可能であった。

第3.3節では、寸法測定における操作過程が測定結果と関連しているのではないかとの想定のもと、操作過程解析装置を用いて操作における個人差の実験を行った。その中で明らかになったことは、測定誤差が小さい測定者の操作は比較的単純なものが多かったが、操作パターンは測定者によってほぼ決まっており、測定誤差が小さくなくてもそれほど変化していないことである。すなわち、個人差と操作パターンは対応するが、測定誤差と操作パターンの対応は必ずしも確定的ではない、というのが実験の結論であった。実験自体は、測定者の操作過程の現象の表れ方を観測するためのものであり、教育訓練の方法を探すためのものではなかった。しかし、この実験結果から予想されるのは操作パターンが揃えば、結果が揃うというのではなく、基準となる操作パターンを手がかりに訓練することには困難があるということである。

教育訓練の中では、標準状態を提示するとともに、どれだけ標準から離れているかの結果をフィードバックすることが必要である。このとき、どのような標準状態を提示するか、また、結果のフィードバックがあったときに測定者がどのような点に留意して操作過程や判断を変えていくのか、という点でのさらなる研究が必要である。

3. 5 第3章のまとめ

第3章では、測定を行うシステムとしてのマンマシンシステムを取り上げ、人間が大きく関与する測定システムのパフォーマンス評価について、実験例を中心に検討を進めた。

第3. 1節では、測定のマンシステムの問題として、測定システムの異常とは何かを考察するとともに、異常を測定者が的確に判断できない状態を「過ち」と規定し、測定の過ちがデータの変動に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 測定系の非定常な状態を異常と呼び、測定者がそれを見逃した場合を測定の過ちと考える。
- 2) 現実の測定の中にも数%の過ちがみられる。
- 3) 測定数 n が大きい場合 ($n \sim 100$)、極端でない過ち ($d < 2, r < 2$) があっても4%以内の過ち率であれば、平均値、誤差の大きさ(分散)に大きな変動を生じないことがある。
- 4) 個々のデータが重要な意味を持つ場合には、過ちをなくすための対策が必要である。

第3. 2節では、測定のマンマシンシステムの問題として、測定者の判断が大きな役割を果たす接触式変位測定器を用いた測定における誤差のモデルを考察し、実験的にその有効性を確認した。接触式変位測定器による寸法測定の手順及び操作を検討し、計測器及び測定者の系から発生する誤差のモデルを定式化し、それを確認するための実験を行った結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 寸法値は本質的に二つの座標値の差として表されること、及び、この座標値に入る誤差をかたよりとばらつきに分離して表すことによって、誤差のモデルを得た。それによると、測定誤差は、目盛付けの誤差、最適値を捜す操作によって生ずる誤差、測定の機構により生ずる誤差の成分に分けることができる。
- 2) 誤差のモデルに、有効操作回数概念を導入することによって、最適値を捜す操作による誤差の一部だけが小さくなることを明らかにした。測定値のフィードバックによって誤差分散の一部は小さくなるが、小さくならない部分が残る、測定のパフォーマンスにとってフィードバックはあまり意味がない。
- 3) 座標値の分布が測定機構上の制約によって打切り点をもてば、寸法値の分布は正規分布からずれ、とがりをもち、右 ($\delta > 0$ の方向) にすそをひく形となる。
- 4) 以上の考察の結果は、接触式変位測定機による、フィードバックの有無によるパフォーマンスの違いをみるための実験結果とよく一致した。

第3. 3節では、測定の信頼性と測定過程との関連を明らかにするため、測定のマンマシンシステムの問題として、接触式寸法測定器を用いた測定システムにおいて、測定者による測定誤差の特徴、及び、測定者の操作による測定過程と測定誤差の対応について実験的に検討し、次のことが明らかになった。

- 1) 測定の個人差は目視の判断とか測定経験の差として考えられてきたが、測定過程の操作や判断によっても、測定者により 10 db (誤差分散で1桁) の差が生じることから、測定系の信頼性を評価する際、測定者の要素を抜きにすることができない。
- 2) 被測定物の形状、判断情報のフィードバック方法の要因により、測定者の能力の差が現れる。

3) 繰返し誤差による測定者の評価は、総合誤差との対応は見られず、測定者の能力の差の評価にはならない。

さらに、種々の要因による測定過程のパターンの変化の様子を、初期、中期、最終期の3つの特性の特徴により解析したところ、次のことが明らかになった。

4) 誤差が小さくSN比の高い測定者グループでは、共通的に同じ様なパターンが現れるが、他方のグループでは、共通性は明確ではなく、ばらつきが大きいままであるという傾向がある。

5) 測定過程のパターンは測定者、被測定物の形状によりほぼ定まり、SN比の向上に対応したパターンの変化はみられない。

6) 全体として、誤差が小さくSN比の高い測定者グループには単純なパターンが多く、比較的単純な操作による測定を行っており、測定時間は短い。

7) 誤差が小さくSN比の高い測定者グループは、最終判断を行うときには、動きを停めた直後に判断を行っているパターンが多く、スピンドルの動きをもとに判断を下している。

第3.4節では、マンマシンシステムとしての測定システムの誤差評価とその改善の対策について検討を加えた。誤差評価においては、個人差の関与に関する情報を正しく与え、状況に合わせた計算ができるようにしておくことが必要である。改善のための対策としては、個人差を補正するための校正は有効である。しかし、かたよりの補正はできるが、ばらつきの補正はできない。そのため、測定者の教育・訓練では、まず測定の安定性を追求することが優先される。また、教育・訓練については、3.3節の実験では必ずしも操作過程と測定誤差との対応が明らかにならず、操作過程の面からの対策を考えるにはさらなる研究が必要である。

これらの測定のマンマシンシステムの一連の実験の中で、測定システムの中で測定者が果たす役割が大きい場合、測定システムのパフォーマンス評価が測定者に関わる要因により大きく変化することを明らかにした。人間の測定操作、判断が結果に現れると言うことは、単に測定を自動化すればすまされる問題ではなく、調整、校正の問題として依然残されるであろう。