

# 測定の不確かさが存在する計測システムを前提とした 統計的品質管理

## Statistical quality control considering measurement uncertainty

小川 昭・伊藤 利佳  
(Akira OGAWA Rika ITO)

### 【要 約】

本論文は、測定の不確かさが存在する測定システムを前提とした統計的品質管理の有効性を議論する。取り上げた測定システムは、測定対象を転写するレプリカシステムと、転写したレプリカの外周を非接触で測定するシステムである。標準偏差で示された測定の不確かさは、前者では $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 、後者では $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ である。対象工程はガラスの穴あけ加工工程で、管理特性は穴の半径と穴内部の粗さである。加工には超音波を援用した回転研削加工が採用され、その重要な因子は、研削ツールの送り速度、回転速度、超音波振動の3因子である。統計的品質管理では特性と要因との関係を実験データからモデル化し、モデル構造を推定して因果のメカニズムを把握し工程を管理する。本研究では因子の2次効果まで評価できる3因子の中心複合計画を採用した。推定精度を高めるため因子を5水準に変化させ全20回の実験を実施した。得られた実験データには測定の不確かさが含まれ、これがモデル構造の推定に影響を与える。この影響を評価するため、測定データに不確かさの標準偏差をランダムに加えたシミュレーションデータを30組生成した。測定データと合わせた全31組の評価データからモデル構造を推定し、得られた結果を考察した。その結果、本測定システムの不確かさは、モデル構造を推定するうえで問題がなく、統計的品質管理も有効であることを示した。

キーワード：測定の不確かさ、統計的品質管理、中心複合計画、シミュレーション

### 【Abstract】

This paper describes the effectiveness of Statistical Quality Control, SQC, based on measurement systems which have measurement uncertainty. In this research, one of the systems being investigated is the replica system, and the other is non-contact outer surface measuring system. Using standard deviation (sd.) for the uncertainty, sd. of the replica system is  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ , and sd. of non-contact measuring system is  $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ . The process being studied is glass holes making process, with the characteristics of the glass holes being defined as radius and roughness. The holes are made using a rotary ultrasonic machine and the three important factors are feed and rotation speed of the grinding tool, and ultrasonic vibration. In SQC, the relationship between characteristics and factors is represented by the statistical model which is constructed by the designed experiment. In this

research, Central Composite Design (CCD) was used for the factor's significance. They were set at 5 different levels and 20 runs of the experiment were executed. Using the original experimental data set, 30 sets of new simulation data were created. Estimation and discussion using those data sets proved the effectiveness of SQC.

**Keyword** : measurement uncertainty, statistical quality control, central composite design, simulation.

## 1. はじめに

### 1. 1 背景

あらゆる活動において、対象を測定する行為が存在する。そして測定的重要性はさまざまな形で提示されている。

製造業の品質管理においては、主要な管理要素として、人 (Man)、機械 (Machine)、材料 (Material)、方法 (Method)、測定 (Measure) があり総称して5Mと呼ばれることもある。

ソフトウェアの開発やプロジェクトの管理においても測定的重要性が認識されている。「測定できなければ管理できない」は多くの開発及び管理指導者が語る言葉である。

また、測定値には誤差が含まれることも周知の事実である。誤差とは真の値と測定値との差である。本研究における真の値とは、数理統計学 (mathematical statistics) における母集団の母平均や母標準偏差とする。母平均や母標準偏差は計画された実験の中で測定の繰返しから統計的に推定される。このような方法を誤差評価アプローチ (Error Approach: EA) [2] と呼ぶことがある。

これらの数理統計学を品質管理に適用して、製品設計や品質改善を行う方法論が統計的品質管理 (Statistical Quality Control: SQC) [9] である。SQCの方法論の1つとして、対象をモデル化し予測する方法論 [3] [4] がある。これは入力 (説明変数) と出力 (目的変数) との関係性を推定回帰式で表し、対象をモデル化するのである。さらにモデルの構造を対象が従う物理化学法則に即して解釈することで因果メカニズムを解明することも可能である。

日本の製造業においてモデル化の方法論は広

く普及し、自動車、家電、半導体などの分野における品質管理で活用されている。近年では製薬、医療、介護の分野から、アンケートを活用した市場調査やマーケティング [10] などにも応用されている。

一方で数理統計学とは別に、測定を専門に扱う学問分野として度量衡学 (metrology) がある。ここでは前述の数理統計学で使用される誤差とは別に、測定器が国際標準とどのように関連しているかを示す計量計測トレーサビリティ (metrological traceability) についての規定があり、その下で測定誤差を評価することもある。このような方法を不確かさアプローチ (Uncertainty Approach: UA) [5] と呼ぶことがある。

EAにおいてSQC手法のモデル化の方法論が活用されるとき、因果のメカニズム解明では特性に対する要因効果を解析する。このとき要因には誤差はないとしたうえで、特性には様々な原因の誤差が不随するものとしている。品質管理の5Mで測定を取上げている理由は、測定が重要な管理対象であることを明示することが目的である。そして管理された測定環境から得られたデータには一定の測定誤差は含まれるが、製造要因には誤差は含まれないとしている。

一方UAにおいては、トレーサビリティとも関連した誤差の伝播 (Propagation of Error: POE) を解析することがある。すなわち要因には誤差が含まれ、その誤差がいくつかのプロセスを経て特性に影響を与えるとする誤差の伝播である。

ここでEAにおいても誤差の伝播を考慮すべきプロセスとして、対象を間接測定した場合の

統計的品質管理がある。対象を直接測定せず間接測定することで誤差が伝播している状況を想定する必要がある。

このように、従来のEAにおいてもUAに近いアプローチを必要とする場合がある。先行研究を参考にUAを取り入れたSQCの取組みを検討する価値がある。

## 1. 2 先行研究

SQCにおいて測定誤差を考慮した研究は非常に多い。しかし間接測定による誤差の伝播を必要とする事例は限られている。その1つとして、微小ガラス穴内部の形状をレプリカに転写し、これを間接測定してガラス加工工程の改善を進めた研究 [1], [6], [7], [8] がある。

これらの研究では、ガラス穴の内径や粗さについての複数の特性に対して得られた実験データに誤差はないとしている。また加工機の設定値にも誤差はなく、同じ設定値が再現するとしており、その下で加工プロセスの最適化を研究している。測定の不確かさは考慮されておらずUAに近いアプローチもされていない。

## 1. 3 本研究の目的

本研究では、測定の不確かさが存在する具体的な計測システムを取上げ、UAを前提としたアプローチを行う。そしてSQCの方法論である対象のモデル化とその予測を行い、その結果を考察することで有益な情報や新たな知見を得ること、さらにモデルの妥当性も検証することでSQCの有効性を示すことが目的である。

具体的な計測システムとは、微小ガラス穴の形状をレプリカ測定法により測定するシステムである。そして測定の不確かさは、レプリカによる対象の転写率と、レプリカ外周を非接触で測定する測定誤差の2点である。

## 1. 4 本研究の特徴

本研究ではデータの解析にソフトウェアJMPを使用した。多数の実験データから対象のモデルを構築するとき、ソフトウェアの使用が前提となる。またシミュレーションの実施と結果の表示にもJMPを活用し効率化を計った。

今回の解析の元となるガラス穴の半径と粗さ

のデータは、過去に実施された実験の中で解析に使用されなかったものを使用している。

## 2. 材料と方法

### 2. 1 高脆性材料

本研究で使用した材料は硬くて脆い高脆性材料であるガラスである。ガラスは従来から生活に密着した材料であるが、近年はスマートフォン等に使用され高機能な材料として必要不可欠なものである。

しかしその加工ではクラックやチッピングが発生するため正確な加工が難しい。そのため次に述べる超音波を援用した加工方法が用いられることがある。

### 2. 2 超音波回転加工

本研究で使用した超音波を援用した回転加工 (Rotary Ultrasonic Machining: RUM) の概要を図1に示す。加工ツールとしてダイヤモンド砥粒が表面にコートされた外径1mmの中空研削ドリルが使用される。よって穴の半径は500 $\mu$ m程度となる。ダイヤモンド砥粒の粒度は44、集中度は100%のものを使用した。

ツールを回転させながら超音波振動を印加させその先端を20kHzで振動させる。この状態でツールを一定速度で穴内部に送る。ガラスからはスラッジ (研削加工のくず) が生成され、この排出と研削熱の冷却のためにクーラントが中空ドリルの内部を經由して穴内部に噴出される。ガラスの厚みは4.5mmあり、貫通時の加工壁およびツール保護のために当て板ガラスをワックスで取り付けている。

RUMの主要な加工因子はツールの送り速度 ( $x_1$ )、回転速度及 ( $x_2$ ) 及び超音波振動の振幅である。振幅は超音波発振機の出力割合 ( $x_3$ ) で設定する。一般に送り速度や回転速度を速めれば、生産性は向上するが加工品質は低下する。また超音波振動の振幅には最適値が存在する。

### 2. 3 レプリカ測定法

穴内部の形状を非破壊で正確に測定することは難しい。穴径が十分大きければ測定用のプローブを内部に挿入することも可能である。しかし本研究の対象である半径の穴内部に測定プロ

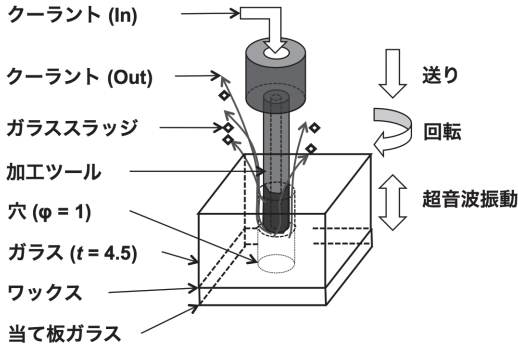


図1 超音波回転加工

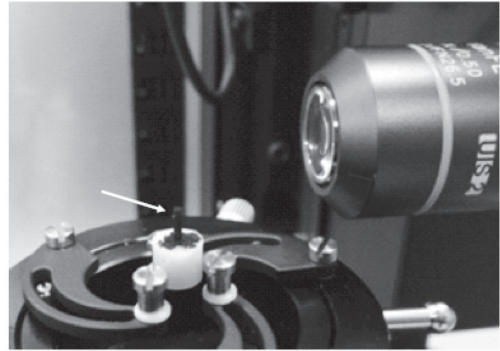


図2 レプリカ測定法

ーブを挿入することは不可能である。

そこで穴内部形状を転写したレプリカを測定することで間接測定するレプリカ測定法 [6] がある。これを図2に示す。

この方法の利点は、安価で比較的容易にレプリカを作成できる点である。このため多数のレプリカを作成可能である。欠点は測定の不確かさが存在する点である。本研究では不確かさを前提として解析を進める。

測定の不確かさには多数あるが、本論文では穴形状をレプリカに転写する時に発生する転写性の不確かさと、レプリカの外径を非接触で測定する時の測定誤差の2点を挙げる。詳細は2.5節で述べる。

2. 4 実験計画法

本研究の特性値Yはガラス表面の穴の半径L(μm)とその内側の粗さR(μm)である。その母回帰式は式(1)で表されるとする。これは先行研究[1]を参考にして定数項、1次項、積項、2次項及び誤差項から成る。誤差は平均0、標準偏差σの正規分布に従うとする。実験から求める推定回帰式は式(2)となる。

$$\begin{aligned}
 Y=f(x) &= \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \\
 &+ \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 \\
 &+ \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 \\
 &+ \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$x = (x_1, x_2, x_3) \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_2)$$

$$\begin{aligned}
 \hat{Y}=f(x) &= \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \\
 &+ \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 \\
 &+ \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

表1 3因子5水準

因子 (単位)	水準				
	-1.68	-1	0	1	1.68
$x_1$ (mm/min)	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
$x_2$ (rpm)	2.7	3.0	3.5	4.0	4.3
$x_3$ (%)	30	38	50	62	70

表2 CCD20の計画表

No	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1.68	0	0
2	-1	-1	-1
3	-1	-1	1
4	-1	1	-1
5	-1	1	1
6	0	-1.68	0
7	0	0	-1.68
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	1.68
15	0	1.68	0
16	1	-1	-1
17	1	-1	1
18	1	1	-1
19	1	1	1
20	1.68	0	0

式(2)の係数を推定するための実験計画として中心複合計画 (Central Composite Design: CCD) [4] を採用した。表1に示した3因子を5水準に変化させ、表2の組合せで全20回の実験 (CCD20) を実施した。水準0は現行条件



である。また水準 $\pm 1$ は安定操業で指定可能な条件の範囲とし、 $\pm 1.68$ は実験では一時的に設定可能であるが、安定操業の条件としては困難な条件である。また $\pm 1.68$ は数理統計的な効果(Rotatability) [11] を確保するためのものでもある。

## 2. 5 測定の不確かさ

CCD20によりLとRについて実験No.1～No.20についての測定データが得られる。測定データには誤差 $\varepsilon$ が含まれるが、式(2)には $\varepsilon$ は含まれない。そのため $\varepsilon$ に応じて式(2)の係数が変化する。本研究はシミュレーションによりこの変化を解析する。

Lではレプリカ法の転写とMLP-2の測定を総合した誤差を仮定する。先行研究[6][7]から誤差の標準偏差 $\sigma_L$ は $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ とする。この評価方法は前述のEAである。

Rでは表面粗さの微妙な転写誤差は無視できるとしてMLP-2の測定誤差のみを考慮した誤差 $R_L$ を仮定する。MLP-2の仕様から測定誤差 $\sigma_R$ は $0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ となる。この評価方法は前述のUAである。

その他測定の不確かさとして、レプリカ作成、MLP-2への固定、測定環境(温度、湿度、振動)等の影響があるが、本研究ではこれらは小さいとして無視する。

## 2. 6 シミュレーション

CCD20で得られた元データを $L_0$ 、 $R_0$ とする。このデータに $\sigma_L$ 及び $\sigma_R$ をランダムに加えたシミュレーションデータを生成した。

Lについては $\sigma_L=0.1 \mu\text{m}$ と $\sigma_L=0.2 \mu\text{m}$ について、それぞれ30セットのシミュレーションデータを生成し、前者は $L_{1-1}$ ～ $L_{1-30}$ 、後者は $L_{2-1}$ ～ $L_{2-30}$ とした。

Rについては $\sigma_R=0.05 \mu\text{m}$ と $\sigma_R=0.1 \mu\text{m}$ についてそれぞれ30セットのシミュレーションデータを生成し、前者は $R_{1-1}$ ～ $R_{1-30}$ 、後者は $R_{2-1}$ ～ $R_{2-30}$ とした。

## 3. 結果

CCD20より得られた $L_0$ とシミュレーションデータ $L_{1-1}$ から $L_{1-30}$ を表3に、 $L_{2-1}$ から $L_{2-30}$ を

表4に示す。 $L_{2-1}$ †及び $L_{2-2}$ †は分析対象であることから†を付けている。

同様に $R_0$ とシミュレーションデータ $R_{1-1}$ から $R_{1-30}$ を表5に、 $R_{2-1}$ †から $R_{2-30}$ を表6に示す。 $R_{2-1}$ †及び $R_{2-2}$ †は分析対象であることから†を付けている。

### 3. 1 加工条件と穴径Lとの関係

$\sigma_L=0.1$ におけるCCD20の実験No.ごとに $L_0$ から $L_{1-30}$ の31データをヒストグラムで示したものが図3である。また $\sigma_L=0.2$ におけるヒストグラムを図4に示す。

図の最上段にはNo.1, 6, 7, 最下段にはNo.14, 15, 20のデータが示されている。これらの実験点は軸上点と呼ばれ2次の効果 $\beta_{ii}$  ( $i=1,2,3$ )の推定が目的である。また第3, 4段にはNo.8～13の実験中心点6回の繰返しが表示されている。第2, 5段には3因子2水準の要因配置計画に相当する実験空間の格子点におけるデータが表示されている。

誤差の影響は分布の広がりによって確認できる。実験結果に影響を与えるほど誤差の影響(データの広がり)は大きくないことがわかる。詳細な考察は別途行う。

### 3. 2 加工条件と粗さRとの関係

穴径Lと同様に $\sigma_R=0.05$ におけるCCD20の実験No.ごとに粗さRの測定データとシミュレーションデータのヒストグラムを図5に示す。また $\sigma_R=0.1$ におけるヒストグラムを図6に示す。注意点として実験No.7の横軸Rの値は11から21とし、他の横軸は1から11とした。その理由はNo.7のヒストグラムの中心値が $20 \mu\text{m}$ と他より大きいためである。

No.7の加工条件は $x_3 = -1.68$ すなわち超音波出力が最低の条件である。このため粗さRの値が大きくなった可能性がある。No.7以外ではヒストグラムの中心値は全て $10 \mu\text{m}$ 以下である。しかし $x_3 = -1$ の条件であるNo.2, 4, 16, 18ではRの値が比較的大きく、No.7と同様の傾向がある。ヒストグラムによりデータを可視化することで特性と要因との関係を把握することはSQCの基本である。図5, 図6はその効果が顕著であるが、詳細な考察は別途行う。

表3 穴径 $L$ について CCD20の実験データ $L_0$ 及び $\sigma_L=0,1$ のシミュレーションデータ $L_{1-1} \sim L_{1-30}$ 

No	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$L_0$	$\sigma_L=0.1$									
					$L_{1-1}$	$L_{1-2}$	$L_{1-3}$	$L_{1-4}$	$L_{1-5}$	...	$L_{1-27}$	$L_{1-28}$	$L_{1-29}$	$L_{1-30}$
1	-1.68	0	0	518.30	518.27	518.32	518.32	518.24	518.29	...	518.38	518.07	518.30	518.13
2	-1	-1	-1	516.28	516.12	516.20	516.21	516.30	516.49	...	516.18	516.21	516.14	516.4
3	-1	-1	1	516.19	516.09	516.16	516.29	516.11	516.34	...	516.23	516.13	516.22	516.06
4	-1	1	-1	515.19	515.33	515.09	515.35	515.24	515.34	...	515.18	515.30	515.23	515.21
5	-1	1	1	514.52	514.25	514.37	514.63	514.63	514.57	...	514.57	514.57	514.38	514.4
6	0	-1.68	0	513.97	513.88	514.06	513.98	513.85	513.80	...	514.07	513.96	513.83	513.96
7	0	0	-1.68	513.94	514.01	513.79	514.03	513.84	513.99	...	513.78	513.96	513.93	513.97
8	0	0	0	516.27	516.29	516.21	516.28	516.08	516.35	...	516.19	516.46	516.12	516.15
9	0	0	0	516.72	516.73	516.71	516.75	516.72	516.81	...	516.65	516.73	516.56	516.70
10	0	0	0	516.85	517.00	516.86	516.78	516.81	517.00	...	516.80	516.94	516.79	516.84
11	0	0	0	516.11	515.95	516.30	516.10	516.04	515.96	...	516.21	516.37	516.17	516.05
12	0	0	0	514.39	514.40	514.32	514.38	514.38	514.38	...	514.49	514.33	514.31	514.32
13	0	0	0	515.31	515.33	515.20	515.29	515.26	515.40	...	515.33	515.43	515.28	515.25
14	0	0	1.68	512.76	512.49	512.74	512.93	512.85	512.76	...	512.72	512.76	512.71	512.72
15	0	1.68	0	517.46	517.47	517.67	517.40	517.59	517.42	...	517.34	517.45	517.49	517.22
16	1	-1	-1	513.52	513.64	513.73	513.57	513.51	513.47	...	513.47	513.71	513.52	513.48
17	1	-1	1	513.24	513.30	513.23	513.22	513.23	513.28	...	513.06	513.30	513.24	513.11
18	1	1	-1	514.21	514.35	514.16	514.10	514.30	514.05	...	514.31	514.23	514.19	514.12
19	1	1	1	515.8	515.91	515.77	515.78	515.84	515.70	...	515.74	515.80	515.95	515.88
20	1.68	0	0	514.47	514.43	514.33	514.26	514.49	514.38	...	514.42	514.35	514.37	514.28

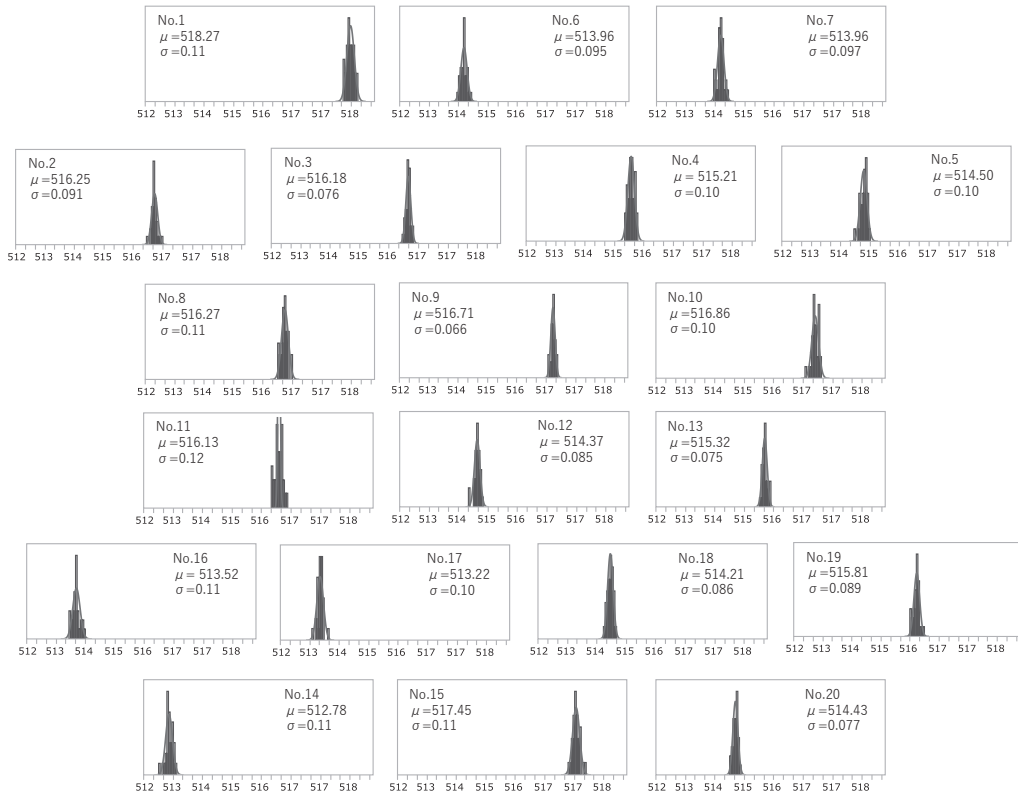
図3 穴径 $L$ について $\sigma_L=0,1$ における CCD20の各実験No.のデータの散布図

表 4 穴径 $L$ について CCD20 の実験データ $L_0$ 及び $\sigma_L=0.2$ のシミュレーションデータ $L_{2.1} \sim L_{2.30}$

No	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$L_0$	$\sigma_L=0.2$									
					$L_{2.1} \dagger$	$L_{2.2} \dagger$	$L_{2.3}$	$L_{2.4}$	$L_{2.5}$	...	$L_{2.27}$	$L_{2.28}$	$L_{2.29}$	$L_{2.30}$
1	-1.68	0	0	518.30	518.45	518.23	518.57	518.60	518.18	...	517.93	518.58	518.23	518.64
2	-1	-1	-1	516.28	516.34	516.02	516.29	516.50	516.24	...	516.39	515.96	516.66	516.47
3	-1	-1	1	516.19	516.37	516.03	516.30	516.03	516.46	...	516.18	516.65	516.24	516.54
4	-1	1	-1	515.19	515.13	515.11	515.39	514.91	515.00	...	514.85	515.13	515.54	515.38
5	-1	1	1	514.52	514.77	514.66	514.48	514.51	514.49	...	514.26	514.79	514.26	514.43
6	0	-1.68	0	513.97	513.78	514.18	513.55	513.93	514.19	...	514.08	513.99	514.13	514.04
7	0	0	-1.68	513.94	513.90	514.16	514.21	513.90	513.71	...	513.91	513.90	513.76	513.88
8	0	0	0	516.27	516.05	516.31	516.30	516.27	516.25	...	516.32	515.87	516.16	516.43
9	0	0	0	516.72	516.86	516.56	517.32	516.67	516.82	...	516.57	516.46	516.79	516.54
10	0	0	0	516.85	516.78	516.76	516.68	517.01	516.58	...	516.60	516.64	516.73	516.77
11	0	0	0	516.11	516.15	516.39	516.28	516.08	516.37	...	516.36	515.84	515.90	516.01
12	0	0	0	514.39	514.66	514.71	514.52	514.12	514.42	...	514.25	514.45	514.45	514.65
13	0	0	0	515.31	515.36	515.02	515.21	515.57	515.23	...	515.27	515.70	515.13	515.37
14	0	0	1.68	512.76	512.58	512.58	512.96	512.75	512.74	...	512.30	512.57	512.85	512.32
15	0	1.68	0	517.46	517.37	517.47	517.47	517.48	517.50	...	517.95	517.45	517.66	517.79
16	1	-1	-1	513.52	513.46	513.58	513.74	513.56	513.82	...	513.25	513.98	513.48	513.66
17	1	-1	1	513.24	512.90	512.94	513.60	513.15	513.31	...	513.00	513.30	513.27	513.28
18	1	1	-1	514.21	514.04	514.12	514.35	514.08	514.74	...	514.19	514.22	514.44	514.34
19	1	1	1	515.8	516.12	515.95	515.89	515.95	516.24	...	515.76	515.48	515.93	516.11
20	1.68	0	0	514.47	514.36	514.39	514.36	514.30	514.41	...	514.62	514.56	514.20	514.44

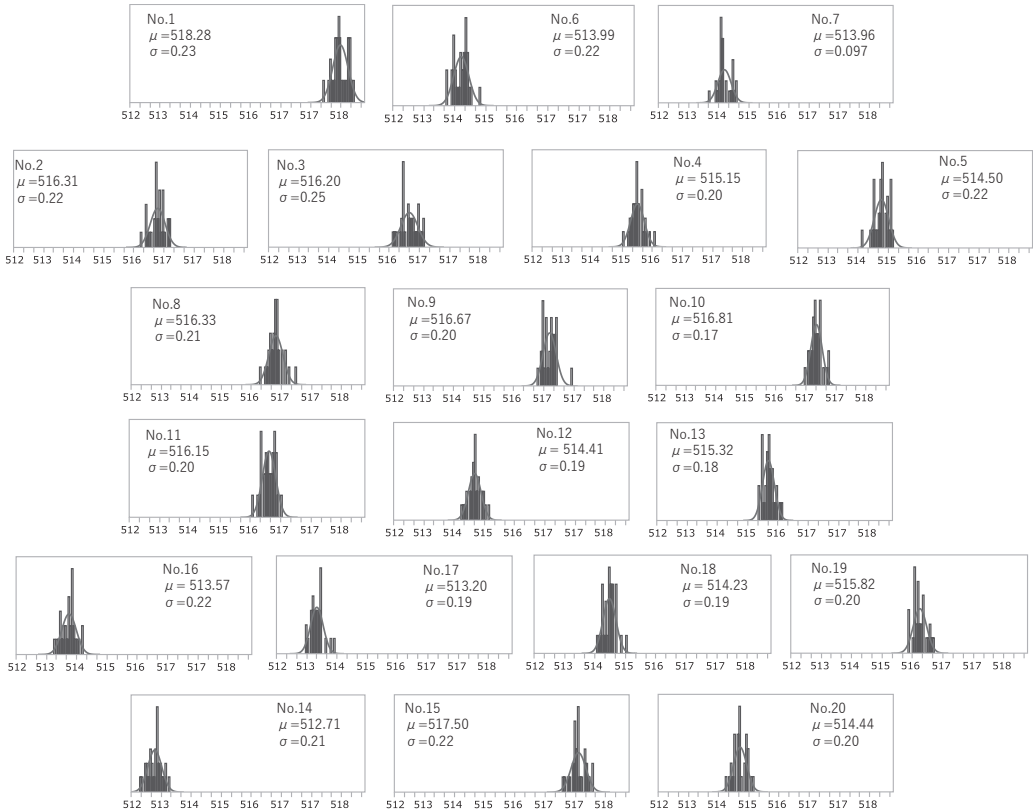


図 4 穴径 $L$ について  $\sigma_L=0.2$ における CCD20 の各実験 No. のデータの散布図

表5 粗さRについてCCD20の実験データ $R_0$ 及び $\sigma_R=0.05$ のシミュレーションデータ $R_{1-1} \sim R_{1-30}$ 

No	$x_1$	$x_2$	$x_3$	R0	$\sigma_R=0.05$									
					$R_{1-1}$	$R_{1-2}$	$R_{1-3}$	$R_{1-4}$	$R_{1-5}$	...	$R_{1-27}$	$R_{1-28}$	$R_{1-29}$	$R_{1-30}$
1	-1.68	0	0	5.01	4.93	5.04	5.10	5.05	5.05	...	4.97	5.00	4.93	4.94
2	-1	-1	-1	10.73	10.69	10.79	10.72	10.76	10.78	...	10.74	10.78	10.74	10.64
3	-1	-1	1	4.82	4.86	4.83	4.89	4.81	4.80	...	4.79	4.69	4.85	4.82
4	-1	1	-1	9.01	8.96	9.03	9.02	9.04	9.00	...	9.02	9.05	9.02	9.09
5	-1	1	1	2.09	2.07	2.05	2.01	2.10	2.10	...	2.04	2.10	2.03	2.04
6	0	-1.68	0	5.71	5.65	5.63	5.66	5.74	5.74	...	5.74	5.76	5.65	5.72
7	0	0	-1.68	20.3	20.26	20.31	20.40	20.39	20.34	...	20.29	20.23	20.33	20.24
8	0	0	0	4.27	4.32	4.3	4.29	4.21	4.35	...	4.27	4.26	4.31	4.19
9	0	0	0	5.71	5.73	5.69	5.73	5.64	5.59	...	5.79	5.63	5.74	5.74
10	0	0	0	3.72	3.63	3.8	3.73	3.69	3.71	...	3.67	3.63	3.76	3.75
11	0	0	0	3.56	3.56	3.59	3.55	3.54	3.52	...	3.43	3.52	3.5	3.55
12	0	0	0	3.26	3.19	3.28	3.17	3.29	3.19	...	3.29	3.23	3.17	3.27
13	0	0	0	7.56	7.53	7.5	7.56	7.51	7.58	...	7.53	7.52	7.6	7.6
14	0	0	1.68	9.95	9.89	9.92	10.09	9.92	9.95	...	9.96	9.95	9.92	9.93
15	0	1.68	0	2.51	2.54	2.4	2.57	2.54	2.58	...	2.52	2.59	2.54	2.49
16	1	-1	-1	10.3	10.23	10.28	10.25	10.35	10.20	...	10.29	10.29	10.32	10.32
17	1	-1	1	5.48	5.41	5.47	5.46	5.48	5.48	...	5.54	5.55	5.44	5.38
18	1	1	-1	7.39	7.42	7.43	7.34	7.36	7.46	...	7.35	7.49	7.31	7.33
19	1	1	1	2.85	2.84	2.9	2.82	2.92	2.76	...	2.86	2.91	2.85	2.88
20	1.68	0	0	1.28	1.22	1.32	1.26	1.29	1.38	...	1.27	1.23	1.33	1.35

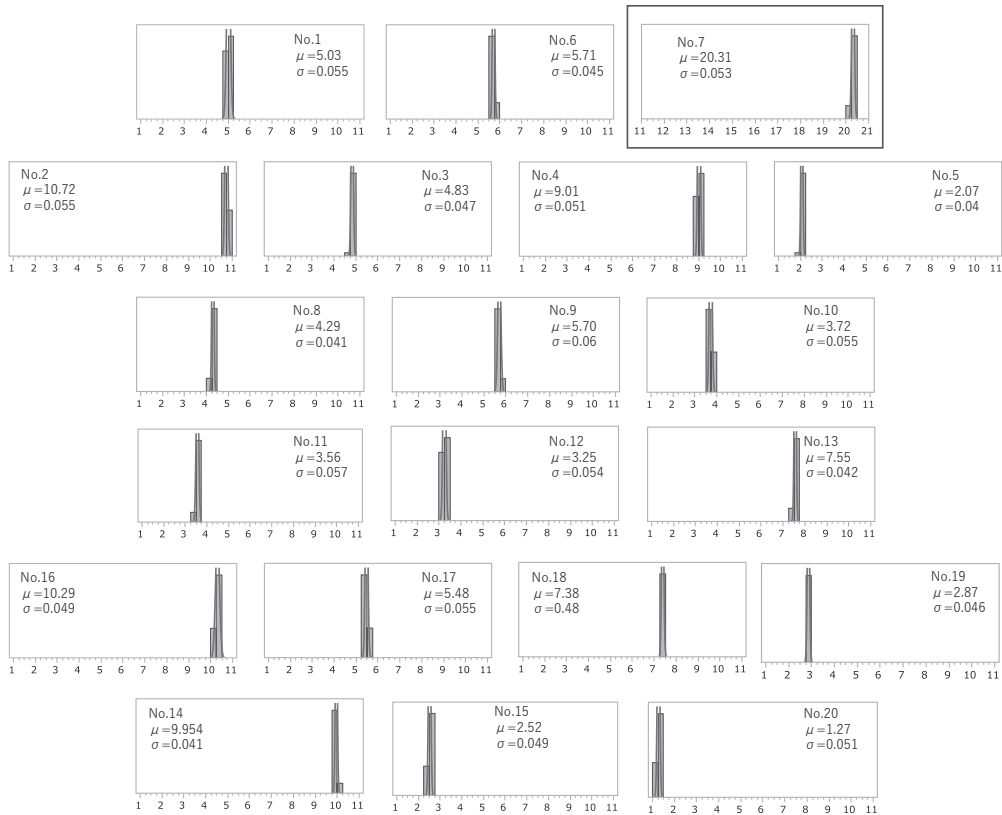
図5 粗さRについて $\sigma_R=0.05$ におけるCCD20の各実験Noのデータの散布図



表6 粗さRについてCCD20の実験データR<sub>0</sub>及びσ<sub>R</sub>=0.1のシミュレーションデータR<sub>2-1</sub>~R<sub>2-30</sub>

No	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	R <sub>0</sub>	σ <sub>R</sub> =0.1									
					R <sub>2-1</sub> †	R <sub>2-2</sub> †	R <sub>2-3</sub>	R <sub>2-5</sub>	R <sub>2-</sub>	...	R <sub>2-27</sub>	R <sub>2-28</sub>	R <sub>2-29</sub>	R <sub>2-30</sub>
1	-1.68	0	0	5.01	4.94	4.97	5.03	4.86	4.83	...	4.89	5.01	5.01	5.00
2	-1	-1	-1	10.73	10.73	10.83	10.65	10.63	10.69	...	10.56	10.77	10.77	10.78
3	-1	-1	1	4.82	4.77	4.76	4.82	4.89	4.83	...	4.95	4.87	4.87	4.94
4	-1	1	-1	9.01	9.27	9.04	9.03	8.97	9.03	...	9.13	8.90	8.9	8.84
5	-1	1	1	2.09	2.05	1.96	1.92	2.09	2.03	...	2.05	1.87	1.87	2.22
6	0	-1.68	0	5.71	5.86	5.7	5.70	5.56	5.79	...	5.65	5.76	5.76	5.66
7	0	0	-1.68	20.3	20.29	20.33	20.18	20.23	20.20	...	20.16	20.26	20.26	20.27
8	0	0	0	4.27	4.40	4.25	4.35	4.20	4.33	...	4.24	3.99	3.99	4.32
9	0	0	0	5.71	5.81	5.48	5.65	5.77	5.69	...	5.72	5.76	5.76	5.65
10	0	0	0	3.72	3.62	3.76	3.62	3.71	3.72	...	3.64	3.82	3.82	3.72
11	0	0	0	3.56	3.69	3.49	3.67	3.51	3.64	...	3.37	3.66	3.66	3.63
12	0	0	0	3.26	3.32	3.46	3.21	3.22	3.43	...	3.43	3.38	3.38	3.25
13	0	0	0	7.56	7.47	7.35	7.53	7.56	7.54	...	7.59	7.62	7.62	7.62
14	0	0	1.68	9.95	9.96	10.12	10.01	9.97	9.98	...	9.85	9.78	9.78	10.02
15	0	1.68	0	2.51	2.42	2.4	2.47	2.56	2.46	...	2.63	2.49	2.49	2.41
16	1	-1	-1	10.3	10.25	10.42	10.14	10.25	10.28	...	10.14	10.33	10.33	10.32
17	1	-1	1	5.48	5.44	5.52	5.40	5.55	5.37	...	5.39	5.57	5.57	5.59
18	1	1	-1	7.39	7.36	7.38	7.38	7.38	7.26	...	7.36	7.24	7.24	7.32
19	1	1	1	2.85	2.96	2.76	2.81	2.86	3.00	...	2.72	3.00	3.00	2.70
20	1.68	0	0	1.28	1.15	1.23	1.25	1.42	1.39	...	1.22	1.24	1.24	1.25

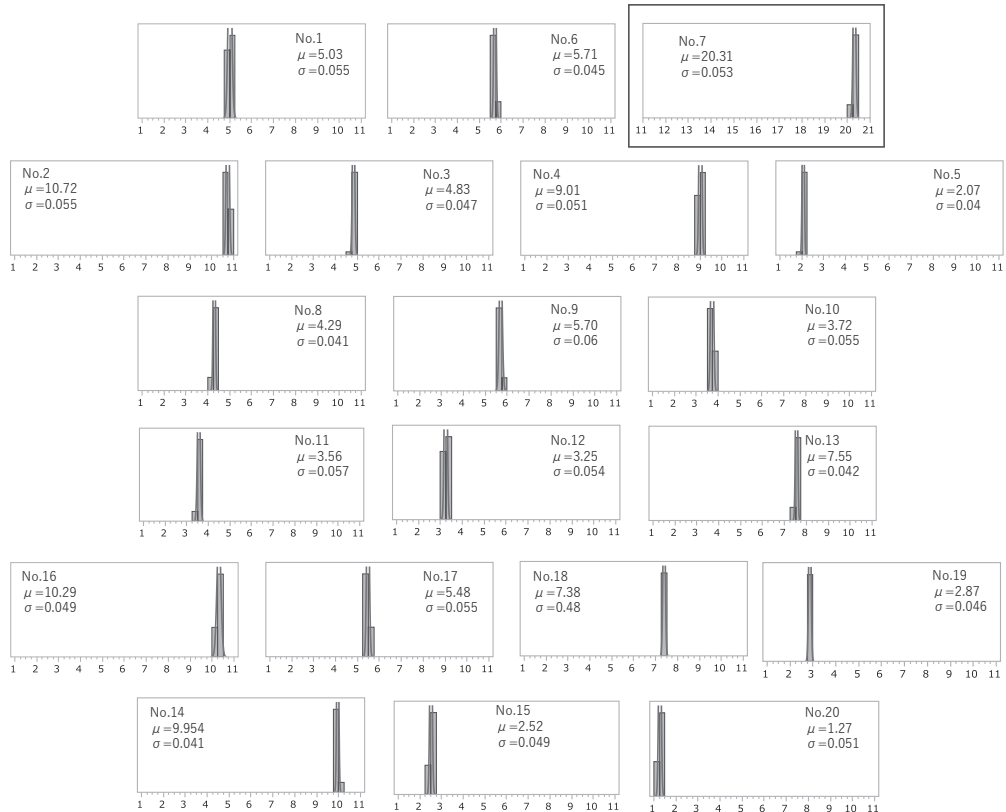


図6 粗さRについてσ<sub>R</sub>=0.1におけるCCD20の各実験No.のデータの散布図

## 4 解析

### 4. 1 穴径L

本研究で使用した加工ツールの外径が1mmであること、表面の砥粒の粒度が $44\ \mu\text{m}$ であることから、穴径 $L$ の中心値は $520\ \mu\text{m}$ 前後と予想される。ツールは揺れながらガラス内部に侵入すること、ガラスのスラッジによる副次的な研削もあることからCCD20の結果得られる穴径 $L$ は、さまざまな値をとる。それを解析することで加工メカニズムの知見を得ることができる。

#### 4. 1. 1 変数選択

表3に示された $L_0$ のデータを使用して式(2)の9変数の係数(パラメータ)を選択した。変数選択の方法は最小二乗法を基にした変数増減法で、その選択基準は変数増加、減少ともp値が0.25以下とした。結果を表7に示す。p値が0.25以下と判定されたものには\*が記されている。

次に、 $\sigma_L=0.1\ \mu\text{m}$ におけるシミュレーションデータ $L_{1-1} \sim L_{1-30}$ に対して $L_0$ と同様に変数選択した。得られたp値をパラメータ毎に示したものが図7である。表7の判定で\*が記された5パラメータについては測定誤差の影響を受けることなく常にp値が0.25以下である。他の4パラメータについてp値は常に0.25より大きい。

以上より $\sigma_L=0.1\ \mu\text{m}$ については、測定の不確かさの影響を受けることなく安定したモデルが得られている。

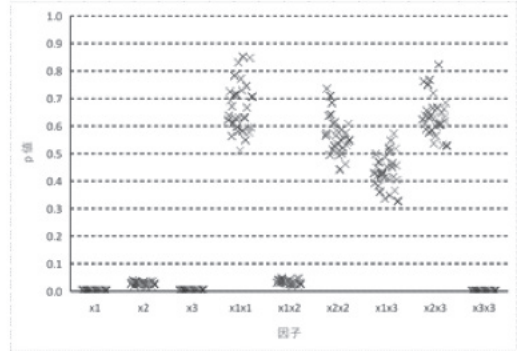


図7 L ( $\sigma_L=0.1$ ) の各係数のp値

同様に、 $\sigma_L=0.2\ \mu\text{m}$ におけるシミュレーションデータ $L_{2-1} \sim L_{2-30}$ に対しても変数選択を実施した。 $L_{2-1}$ の結果を表8に、 $L_{2-2}$ の結果を表9に示す。

$L_{2-1}$ のデータを分析した結果、表7に\*で示された $L_0$ の5パラメータ以外に $x_2x_2$ のp値が0.218となり、その効果が有意になっている。これに伴って、 $x_2$ の自由度が2から3に増えている。

$L_{2-2}$ のデータを分析した結果、 $L_0$ の5パラメータ以外に $x_1x_3$ のp値が0.215となり、その効果が有意になっている。これに伴って $x_1$ と $x_3$ との自由度が2から3に増えている。これらはいずれも測定の不確かさ $\sigma_L=0.2\ \mu\text{m}$ の影響である。

得られたp値を示したものが図8である。図7と比較して $x_1x_1$ ,  $x_2x_2$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$ のp値のばらつきが大きく、これらの推定に対して、測定の不確かさが影響していることが確認できた。

表7 穴径 $L_0$ の変数選択結果

パラメータ	平方和	自由度	F値	p値	判定
$x_1$	14.80	2	9.47	0.003	*
$x_2$	7.47	2	4.78	0.026	*
$x_3$	13.77	2	8.81	0.003	*
$x_1x_1$	0.21	1	0.26	0.621	
$x_1x_2$	4.52	1	5.78	0.031	*
$x_2x_2$	0.29	1	0.35	0.565	
$x_1x_3$	0.54	1	0.67	0.428	
$x_2x_3$	0.21	1	0.25	0.624	
$x_3x_3$	13.62	1	17.43	0.001	*

表8 穴径 $L_{2-1}$ の変数選択結果

パラメータ	平方和	自由度	F値	p値	判定
$x_1$	14.22	2	12.04	0.001	*
$x_2$	9.02	3	5.09	0.015	*
$x_3$	12.18	2	10.31	0.002	*
$x_1x_1$	0.03	1	0.05	0.834	
$x_1x_2$	4.96	1	8.39	0.012	*
$x_2x_2$	0.99	1	1.67	0.218	*
$x_1x_3$	0.57	1	0.97	0.344	
$x_2x_3$	0.22	1	0.35	0.567	
$x_3x_3$	11.86	1	20.08	0.001	*

表9 穴径 $L_{2-2}$ の変数選択結果

パラメータ	平方和	自由度	F値	p値	判定
$x_1$	16.32	3	8.02	0.003	*
$x_2$	7.58	2	5.59	0.018	*
$x_3$	18.48	3	9.08	0.002	*
$x_1x_1$	0.02	1	0.03	0.867	
$x_1x_2$	3.25	1	4.78	0.048	*
$x_2x_2$	0.15	1	0.20	0.661	
$x_1x_3$	1.15	1	1.70	0.215	*
$x_2x_3$	0.285	1	0.40	0.538	
$x_3x_3$	16.89	1	24.90	0.000	*

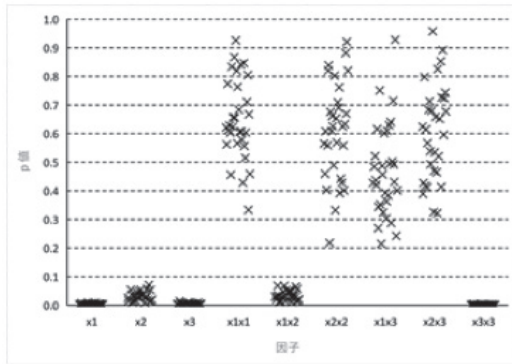


図8 L ( $\sigma_L=0.2$ ) の各係数のp値

4. 1. 2 推定回帰式

変数選択の結果から得られた推定回帰式を式(3), (4), (5)に示す.  $x_1, x_2, x_3$ はコード化された変数であるため, 各係数の絶対値の大きさをそのまま効果の大きさとして比較することができる. 3式に共通していることは,  $x_3^2, x_1, x_1x_2, x_2, x_3$ , の順で効果が大きいことである.

式(4)では $x_2^2$ の効果が $x_2$ より小さく $x_3$ より大きい. 式(5)では $x_1x_3$ の効果が $x_2$ より小さく $x_3$ より大きい.  $x_3$ は $x_3^2$ が選択されたことで付随的に選択された因子であるため, その効果は小さい.  $x_2^2$ 及び $x_1x_3$ はp値が0.25前後と選択基準の境界にあったもので, 誤差の影響を受けている. 詳しくは考察で述べる.

$$L_0(x) = 515.93 - 0.87x_1 + 0.47x_2 - 0.11x_3 + 0.75x_1x_2 - 0.96x_3^2 \quad (3)$$

$$L_{2-1}(x) = 516.05 - 0.82x_1 + 0.47x_2 - 0.15x_3 + 0.79x_1x_2 - 0.26x_2^2 - 0.90x_3^2 \quad (4)$$

$$L_{2-2}(x) = 516.01 - 0.93x_1 + 0.56x_2 - 0.18x_3 + 0.64x_1x_2 + 0.38x_1x_3 - 1.07x_3^2 \quad (5)$$

4. 1. 3 穴径Lのシミュレーション

式(3), (4), (5)をグラフ化したものが図9の予測プロファイルである.  $x_1$ については2次項を含む式はないため $L_0, L_{2-1}, L_{2-2}$ のプロファイルは全て直線となる.  $x_2$ は式(4)に2次項が含まれているため $L_{2-1}$ は放物線プロファイルとなっている.  $x_3$ は全ての式に2次項が含まれるため,  $L_0, L_{2-1}, L_{2-2}$ のプロファイルは全て放物線となっている.

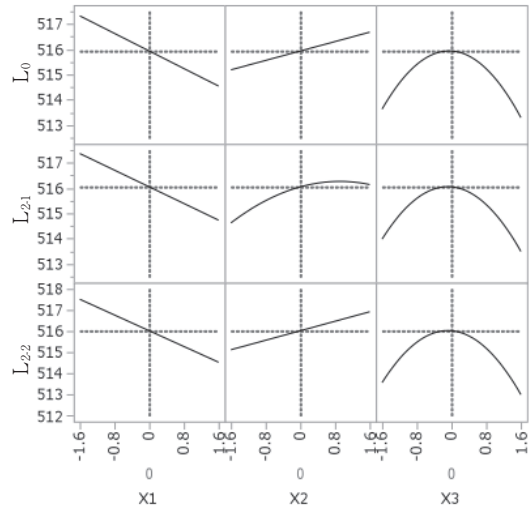


図9 穴径Lの予測プロファイル

予測プロファイルから,  $x_1$  (送り速度) が大きいほど穴径は小さくなり,  $x_2$  (回転速度) が大きいほど穴径が大きくなる, または飽和する. 超音波出力は実験条件の中心で穴径が最大となり, 2次の効果を持っている. これは粗さとの関係も含めて考察する.

4. 1. 4 穴加工の工程能力シミュレーション

加工工程の穴径規格は $516.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$ とした. そして式(3), (4), (5)を基に $(x_1, x_2, x_3)$  = の(0, 0, 0) 現行加工条件に標準偏差 $\sigma = 0.1$ の「工程ばらつき」を与えた. これらは工程管理の状況を考慮したもので, 具体的にはツールの送り速度 $x_1$ のばらつき $\sigma_{x_1} = 0.03 \text{mm/min}$ , 回転速度 $x_2$ のばらつき $\sigma_{x_2} = 0.05 \times 10^3 \text{rpm}$ , 超音波出力のばらつき $\sigma_{x_3} = 1.2\%$ である.

得られたデータには測定誤差として $\sigma_L = 0.2 \mu\text{m}$ を加えている. その結果を図10から図12

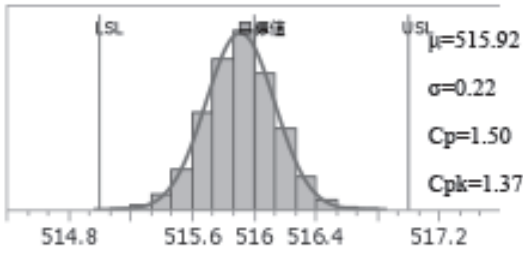


図10 L<sub>0</sub>による穴径加工の工程能力の予測

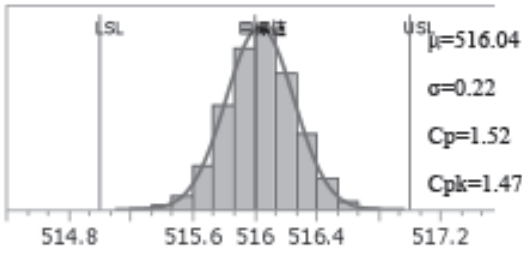


図11 L<sub>2.1</sub>による穴径加工の工程能力の予測

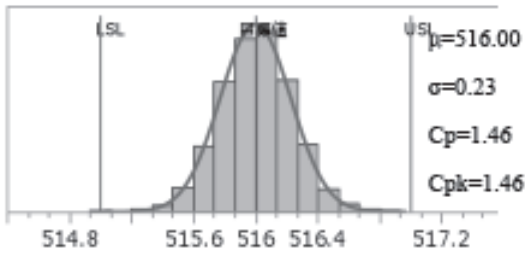


図12 L<sub>2.2</sub>による穴径加工の工程能力の予測

に示す。3式の違いによる分布の違いはない。また分布の標準偏差は0.22～0.23であり、測定の不確かさがそのまま分布の標準偏差となっている。すなわち測定の不確かさを前提としても、それは加工工程のばらつきに影響しないことが判明した。

#### 4. 2 粗さR

粗さRに影響を与える加工ツールの要素はダイヤモンド砥粒の粒度(44 μm)と集中度(100%)である。粒度も集中度も比較的平滑な加工面が得られる仕様となっている。ここで、ガラスのスラッジによる副次的な研削も考慮すると、粗さRは加工ツールの要素だけでなく、CCD20における加工因子 $x_1, x_2, x_3$ の条件に左右される可能性がある。

加工3因子の中で $x_1$ と $x_3$ は加工表面に垂直な軸方向の力を持ち、 $x_2$ は加工表面と同一面内の

回転方向を持っている。そのため固有技術に基づく事前の予想では、 $x_1$ と $x_3$ は粗さRに対する影響が小さく、 $x_2$ は大きいことが予想される。

またCCD20は3因子の1次効果だけでなく2次効果も評価できるように計画されている。加工穴内部の粗さRに対する超音波 $x_3$ の2次効果は存在する可能性はあるが、 $x_1$ と $x_2$ の2次効果は不明である。測定に不確かさが存在する場合でもこれらの効果を持定できれば有益な知見となる。

#### 4. 2. 1 変数選択

L<sub>0</sub>と同様に表5に示されたR<sub>0</sub>のデータを使用して式(2)の9変数のパラメータを最小二乗法で変数選択した。選択方法、選択基準も穴径Lと同様である。結果を表10に示す。p値が0.25以下と判定されたものには\*が記されている。

次に $\sigma_R=0.05 \mu m$ におけるシミュレーションデータR<sub>1.1</sub>～R<sub>1.30</sub>に対してR<sub>0</sub>と同様に変数選択した。得られたp値をパラメータ毎に示したものが図13である。表10の判定で\*が記された

表10 粗さR<sub>0</sub>の変数選択結果

パラメータ	平方和	自由度	F値	p値	判定
$x_1$	11.06	2	3.00	0.082	*
$x_2$	17.30	1	9.38	0.008	*
$x_3$	294.56	2	79.88	0.000	*
$x_1x_1$	7.57	1	4.11	0.062	*
$x_1x_2$	0.15	1	0.08	0.788	
$x_2x_2$	2.57	1	1.44	0.252	
$x_1x_3$	1.51	1	0.81	0.386	
$x_2x_3$	0.07	1	0.03	0.857	
$x_3x_3$	179.75	1	97.49	0.000	*

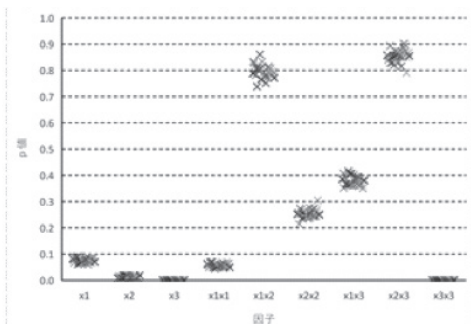


図13 R ( $\sigma_R=0.05$ ) の各係数のp値

5パラメータについては測定誤差の影響を受けることなく常にp値が0.25以下である。しかし $x_2x_2$ についてp値は0.2から0.3の間で変動している。選択基準がp値0.25以下であることを考慮すると、測定の不確かさがモデル構築に影響を与えている。

さらに、 $\sigma_R=0.1 \mu m$ におけるシミュレーションデータ $R_{2.1} \sim R_{2.30}$ に対しても同様に変数選択を実施した。 $R_{2.1}$ の選択結果は $R_0$ と同様であったため割愛する。 $R_{2.2}$ の結果を表11に示す。 $x_2x_2$ の効果が有意となっている。全データについてp値を示したものが図14である。 $x_2x_2$ についてp値は0.2から0.3の間で変動しているため、 $R_{2.2}$ では $x_2x_2$ が選択された。

粗さRについては $x_1x_2, x_2x_2, x_1x_3, x_2x_3$ のp値にばらつきがある。しかしその選択基準である0.25に近い値をとるものは $x_2x_2$ のみである。よって求めるモデルは $x_2x_2$ を含むものと、含まないものの2つとなる。

変数選択結果から、粗さRに対しては $x_1$ と $x_3$ の有意な2次効果があるが、 $x_2$ の2次効果は常に有意とは言えないレベルであることが判明した。

表11 粗さ 粗さ $R_{2.2}$  †の変数選択結果

パラメータ	平方和	自由度	F値	p値	判定
$x_1$	11.74	2	3.57	0.058	*
$x_2$	21.22	2	6.45	0.011	*
$x_3$	295.32	2	89.75	0.000	*
$x_1x_1$	8.36	1	5.08	0.042	*
$x_1x_2$	0.18	1	0.10	0.754	
$x_2x_2$	2.63	1	1.60	0.228	*
$x_1x_3$	1.64	1	1.00	0.337	
$x_2x_3$	0.07	1	0.04	0.851	
$x_3x_3$	179.11	1	108.86	0.000	*

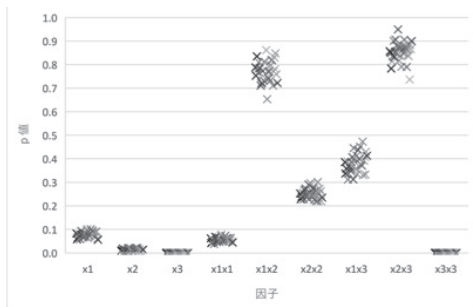


図14 R ( $\sigma_R=0.1$ ) の各係数のp値

#### 4. 2. 2 推定回帰式

変数選択の結果から得られた推定回帰式を式(6), (7)に示す。係数の絶対値の大きさは両者に共通して、 $x_3^2, x_3, x_2, x_1^2, x_1$ の順に大きい。式(7)においては $x_2^2$ が加わるため $x_2$ の2次の効果が表れる。

穴径Lと比較して、 $x_2$ の2次の効果が希薄であること、 $x_3$ の2次効果は顕著であることは共通している。各効果の様子は次項のプロファイルによりさらに確認する。

$$R_0(x) = 4.37 - 0.51x_1 - 1.13x_2 - 2.90x_3 - 0.72x_1^2 + 3.51x_3^2 \quad (6)$$

$$R_{2.2}(x) = 4.67 - 0.50x_1 - 1.17x_2 - 2.92x_3 - 0.76x_1^2 - 0.43x_2^2 + 3.53x_3^2 \quad (7)$$

#### 4. 2. 3 粗さRのシミュレーション

推定回帰式(6), (7)をグラフ化したものが図15の予測プロファイルである。 $x_1$ と $x_3$ の2次効果があり、特に $x_3$ の効果は大きい。また $x_3=0$ ではなく $x_3=0.4$ で $R_0$ は極小値をとることから、 $x_3$ の1次効果も大きいことがわかる。

$x_2$ に関して $R_0$ における2次効果は存在しないが、 $R_{2.2}$ については2次効果も存在する。 $x_2$ の2次効果が加工工程にどの程度影響するかは次項のシミュレーションにて確認する。

#### 4. 2. 4 粗さの工程能力シミュレーション

加工工程の粗さ規格は目標値 $1.0 \mu m$ 、上限規格 $6.0 \mu m$ 、下限規格 $0.1 \mu m$ とした。そして式(6), (7)を基にしてLと同様に $(x_1, x_2, x_3) = (0, 0, 0)$ の現行加工条件に標準偏差 $\sigma=0.1$ の「工程ばらつき」を与えて5,000回の加工シミュレーションを実施した。

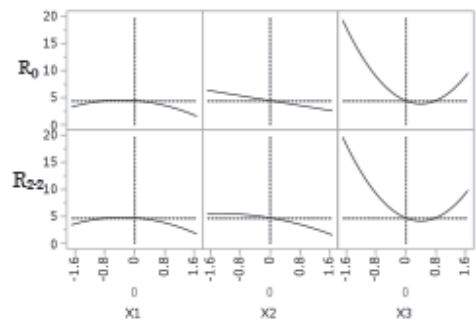


図15 粗さRの予測プロファイル



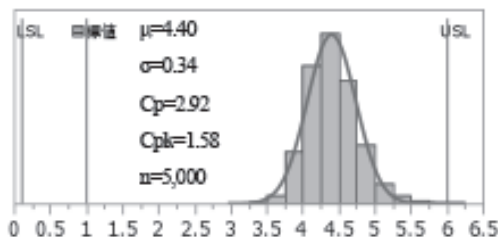


図16 R0による粗さの工程能力の予測

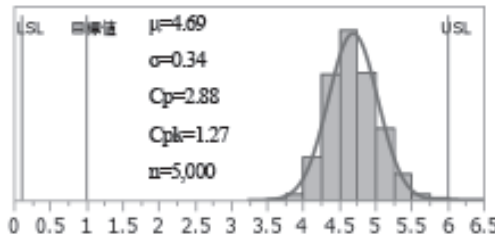


図17 R2-2による粗さの工程能力の予測

得られたデータには測定誤差として $\sigma_R=0.1 \mu\text{m}$ を加えている。その結果を図16, 図17に示す。平均値 $\mu$ はそれぞれ4.40と4.69であり、標準偏差 $\sigma$ は両者とも0.34である。

中心値は規格内にあり、 $R_0$ と $R_{2.2}$ のいずれの推定式から得られたヒストグラムからも規格外の値はほぼ発生しない。その意味で現行条件はすぐに改善が必要とはならない。

しかし図15のプロファイル曲線から、粗さを低下させる優れた条件がある。それは $x_1$ を+1または-1とし、 $x_2$ を+1、 $x_3$ を0.4とするものである。

本研究では、その目的に具体的な改善の取り組みを含んでいないが、このようなシミュレーションにより改善の方向を示すことができることは有益である。

穴径 $L$ の工程能力の予測を示すグラフである図10から図12と比較し、粗さ $R$ のグラフである図16及び図17は標準偏差の値が大きい。穴径 $L$ では測定誤差 $\sigma_L=0.2 \mu\text{m}$ がそのまま穴径のばらつきに現れたが、粗さ $R$ では測定誤差 $\sigma_R=0.1 \mu\text{m}$ に対してヒストグラムの $\sigma=0.34$ である。これは加工条件の設定値 $(x_1, x_2, x_3) = (0,0,0)$ に対して標準偏差 $\sigma=0.1$ の「工程ばらつき」を与えた影響が表れている。すなわち誤差の伝播が穴径 $L$ とは異なることを示している。

以上より、もし工程能力 $C_{pk}$ を改善する場合には測定システムの改善ではなく、RUM加工の工程ばらつき、あるいは式(6)、(7)で示されたRUMのメカニズムを改善することになる。これらの情報も本研究の成果であり、考察で詳細を述べる。

## 5. 考察

### 5.1 ヒストグラム

CCD20のデータをヒストグラムで表示する時、No.8～No.13の実験条件は全て $(x_1, x_2, x_3) = (0,0,0)$ である。これらを並べて表示することで、中心点における繰返し実験の精度を容易に把握できる。

穴径 $L$ についてはNo.8, 9, 10, 11の4実験の $L$ の平均は517とほぼ同じ結果が得られている。しかしNo.13では516、No.12では515となっている。これらが測定誤差の一部となり要因効果の有意判定に影響を与えている。 $x_2$ 及び $x_1x_3$ は $p$ 値が0.25前後であるがNo.12, 13の実験結果がNo.8, 9, 10, 11の結果に近い値をとった場合、 $p$ 値が下がり効果が有意となる可能性もある。

穴径 $R$ について、No.7の実験でその平均は20と他より大きく、No.2, 4, 16, 18についても大きい傾向にある。これは $x_3$ すなわち超音波出力が低水準であることが原因であると推測した。そして4.2.3での解析結果から $x_3$ には2次の効果があり超音波出力が低水準の場合には $R$ は非常に大きくなることが明らかになった。

このようにSQCで基本となるヒストグラムを作成し検討することは、その後の解析の精度や方向を知るうえで重要である。

### 5.2 $L$ の各因子の効果

穴径 $L$ の測定ではレプリカ法の転写とMLP-2の測定を総合した誤差を仮定し、その標準偏差 $\sigma_L$ を $0.1 \mu\text{m}$ 及び $0.2 \mu\text{m}$ とした。そして穴径 $L$ の元データ $L_0$ にそれぞれの $\sigma_L$ を乱数として加えたデータセットを30セット用意し、 $p$ 値=0.25を基準とした変数増減法で変数



選択を行った。

その結果 $L$ に有意な影響を与える効果はその大きさ順に $x_3^2, x_1, x_1x_2, x_2, x_3$ であることが判明した。ここでは高次の $x_3^2$ が選択されたことで低次の $x_3$ を自動的に選択するEffect Ordering Principle (EOP)を採用している。図9においては $x_3$ と $L$ とのプロファイルグラフでは $L$ の放物線の頂点がほぼ中心点 $x_3=0$ の位置にある。すなわち $x_3$ の1次の効果は無視できるほど小さいものであった。

以上から $L$ に影響を与える因子は $x_1$ と $x_2$ の主効果及び2因子交互作用及び $x_3$ の2次効果となり、 $x_1x_3$ と $x_2^2$ の効果は小さいとして無視した。穴径は加工ツールの進行方向に対して直角の平面に形成され、その平面上でツールに付着した砥粒が回転する。よって回転速度 $x_2$ が $L$ に影響すること、さらにはツールの送り速度 $x_1$ とも交互作用を持つことは研削加工の理論からも妥当なものである。

仮に $L$ の大きさを現在より小さくするためには、図9の予測プロファイルから $x_2$ を小さく、 $x_1$ を大きくすることが考えられる。このとき推定回帰式(3)~(5)の $x_1x_2$ はマイナスの値となることから $L$ は減少方向に向かう。これは低速回転でガラスを研削し、研削されたガラススラッジはツールを高速で送ることで排出するメカニズムである。

このとき超音波によるツールの振動は加工面に対して直角に振動している。超音波の出力は現状値( $x_3=0$ )より大きいまたは小さいほうが穴径を小さくするうえで有効である。しかしその超音波の2次効果が穴径に与える加工のメカニズムは十分に解析されておらず今後の課題である。

$x_1, x_2, x_3$ の設定値を変えて $L$ を変化させることは可能であるが、同時に $R$ も変化する。本研究の目的は $L$ と $R$ の最適化ではなく、現行条件における特性が測定の不確かさと工程変動でどの程度変化するかをシミュレーションにより確認し、工程管理に役立てることである。

そこで、測定の不確かさが $0.2 \mu m$ ある状況で穴径 $L$ をモデル化し、工程要因の変動を $\pm 1$ の水準幅に対して $\sigma=0.1$ で設定し、500回のシミュレーションを実施してCp及びCpkを求め

た。その結果、工程要因の変動は特性に伝播せず、測定の不確かさが特性変動に影響する結果となった。

### 5.3 Rの各因子の効果

粗さ $R$ の測定ではMLP-2の測定誤差のみを仮定し、その標準偏差 $\sigma_R$ を $0.05 \mu m$ 及び $0.1 \mu m$ とした。それぞれの場合で穴径 $L$ と同様に $p$ 値=0.25を基準とした変数増減法で変数選択を行った。

前述のようにCCD20の実験No.7のヒストグラムから $x_3$ の効果が予測され、変数選択においても $x_3$ の1次と2次の効果が有意となり、効果の大きさ順に $x_3^2, x_3, x_2, x_1^2, x_1$ であることが判明した。 $x_2^2$ については $\sigma_R$ を0.05から0.1に変えても変数選択時の $p$ 値は0.2から0.3の範囲で変わらずに変動している。これは $x_2^2$ の効果は $\sigma_R$ に依存するものではなく、RUMのメカニズムに依存することを示している。

以上を総合すると、粗さ $R$ に影響する効果は $x_1, x_2, x_3$ の1次効果と2次効果であり、 $x_2$ の2次効果は希薄で、交互作用は無視できる。これは穴径 $L$ とは異なり、3因子がそれぞれ独立に粗さに影響していることを示している。

また穴径 $L$ と同様に500回のシミュレーションからCp及びCpkを求めた。その結果、工程要因の変動が特性に伝播し、工程能力を低下させることが明らかになった。これは工程能力の改善に結び付く貴重な情報である。

### 5.4 LとRの相互関係

穴径 $L$ を現在より小さくするために $x_2$ を小さくする時、推定回帰式(6)及び(7)から粗さ $R$ は大きくなる方向である。これは穴径が小さくなることでダイヤモンド砥粒がガラス壁面をより強く研削するためである。

$x_1$ を大きくすると穴径が小さくなるが、このとき粗さは小さくなる方向である。これはガラススラッジが高速で排出されるため、ダイヤモンド砥粒ではなくスラッジによる副次的な研削が抑制されているためである。

$x_3$ については、穴径 $L$ が増加する方向と粗さ $R$ が減少する方向が一致している。これは径が大きくなることで加工ツールとガラス壁面との

間に空間が発生し、ダイヤモンド砥粒がガラス壁面を穏やかに研削するためである。また両特性に対して $x_3$ は1次及び2次の効果を持ち、しかも3因子の中で最も寄与率が高い。

一方RUMにおける超音波の役割は限定的であるとの報告もある[8]。すなわち回転研削加工は、研削加工ツールを回転させながら送ることで材料を削り除去しているのであり、超音波振動はあくまでも援用効果にとどまるとするものである。しかし本研究の解析と考察では、穴径と粗さには超音波出力が大きな効果を与えている可能性を示した。これらの統一的な解釈は今後の課題である。

以上の考察から、測定の不確かさが存在する計測システムにおいてSQC手法を活用して有益な情報や新たな知見を得た。これは本研究の目的であるSQCの有効性を示すものである。

## 6. おわりに

超音波を援用したガラス穴の研削加工工程において、測定の不確かさが存在するレプリカ測定システムを取上げ、実験により得られたデータとシミュレーションデータを総合したSQC手法により、研削加工工程に関する有益な情報や新たな知見を得た。その結果本研究の有効性を示した。

### 【引用文献】

- [1] Akira OGAWA, Takenori TAKAHASHI and Eiichi HIGUCHI (2019), "Three-dimensional small glass hole evaluation using replica method and multiple characteristics optimization by stepwise procedure", 精密工学会誌, Vol. 85, No. 10, pp919-926.
- [2] Joint Committee for Guide in Metrology (JCGM) (2008), ISO/IEC Guide 98-3 : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM).
- [3] Montgomery, D.C. (2005), Design and Analysis of Experiments (6th ed.), Wiley.
- [4] Myers, R. H., Montgomery, D.C., Anderson-Cool, C. M. (2009), Response Surface Methodology (3rd ed.), Wiley, New York.
- [5] 今井秀孝 編著 (2013), 測定不確かさ評価の最前線—計測計測トレーサビリティと測定結果の信頼性, 日本規格協会.
- [6] 小川昭, 高橋武則, 樋口英一 (2017), "レプリカ法によるガラス微小穴内部形状の間接測定—第1報, 研磨断面直接測定との比較", 砥粒加工学会誌, Vol.61, No.12, pp659-665.
- [7] 小川昭, 高橋武則, 樋口英一 (2019), "レプリカ法によるガラス微小穴内部形状の間接測定—第2報, 縦軸断面直接測定との比較", 砥粒加工学会誌, Vol.63, No.5, pp245-251.
- [8] 小川昭, 高橋武則 (2019), "実験計画法に基づく超音波回転穴加工の3次元加工形状評価モデル構築と加工メカニズムの解明", 精密工学会誌, Vol. 85, No. 16, pp455-462.
- [9] 奥野忠一, 片山善三郎, 上郡長昭, 伊東哲二, 入倉則夫, 藤原信夫 (1986), 工業における多変量データの解析, 日科技連.
- [10] 高橋武則, 川崎昌 (2019), アンケートによる調査と仮想実験, 日科技連.
- [11] 山田秀 (2007), 実験計画法, 日科技連.