

情報の不確かさを伴う高脆性材料の回転研削穴加工工程に 対する統計的品質管理手法の研究

Statistical quality control for uncertainty information system of hole making process with hard and brittle material using rotary grinding

小川 昭・伊藤 利佳
(Akira OGAWA Rika ITO)

【要 約】

本論文は、加工システムの情報に不確かさが伴う場合の統計的品質管理（SQC）手法について述べる。対象とする加工システムは、超音波を援用した回転研削穴加工である。また対象とする材料は高脆性材料の1つであるガラス板である。このガラス板に開けた穴の半径と内面粗さが評価特性である、この特性に影響を与える加工条件は、研削加工ツールの送り速度、回転速度、超音波出力があり、さらにはツールの動作モードも関係する。これらの設定値に偏りやばらつきなどの不確かさがある場合、特性が設計規格を逸脱し、品質低下やコスト上昇などの経営問題につながる。そこで、この影響を、SQC手法により得られた統計モデル式にコンピュータシミュレーションデータを与え、加工条件の不確かさが特性の不確かさに伝播する様子を解析する。その結果を考察しSQC手法の有用性と問題点を考察する。

キーワード：不確かさ、統計的品質管理、コンピュータシミュレーション、
超音波援用回転研削穴加工、統計モデル

【Abstract】

This paper describes Statistical Quality Control (SQC) for a system which contains uncertainty information of a machining system. The system being evaluated is rotary ultrasonic machining, and the material being machined is glass, which is a hard and brittle material. The machining characteristics are the radius of the hole and the roughness of the inner surface. The machining factors are the speed of the tool feed and rotation, the ultrasonic power applied to the tool, and the two tool feed modes. If the values of the factors have uncertainty; that is, bias from the design or true values, or dispersion at the design or true values, the characteristics will not meet the product's standards. In this research, those problems are analyzed using SQC with computer simulation. The most important consideration is the propagation of uncertainty from the factors to the characteristics. Finally, the usefulness of, and issues related to the SQC method are evaluated.

Keyword : Uncertainty, Statistical Quality Control, Computer simulation, Rotary ultrasonic machining, Statistical model.

1. はじめに

1. 1 背景

さまざまな活動において情報は、対象となる人、物、事象などから収集され、分析された後、当初の目的に沿って利用される。企業の生産活動、特に製造業の生産活動においては、製品開発、工程改善あるいは品質管理 (Quality Control; QC)などを目的として、情報収集や情報分析が行われ、開発、改善、管理の結果は経営視点で判断される。

QCにおいて、情報の分析あるいは解析を、経験や勘、さらには指導者や意思決定者の「度胸」で行うことがあり、その頭文字をとってKKDと呼ばれることがあった。主観的なKKDに対し、科学的、客観的な方法論が提案され、特に統計的手法を品質管理に応用する取組みを統計的品質管理 (Statistical Quality Control; SQC)と呼び、その有効性が確認されてきた。

また業務を定常業務とプロジェクト業務に分けて分析するアプローチがある。定常業務では、情報は日常的に得られるものであり、そのような前提条件のもとで、定常業務が成り立つ。そこで使用される代表的なSQCツールは散布図、管理図、多変量連関図、手法は多変量データ解析 (Multivariate Data Analysis; MVA)^[8]がある。

一方プロジェクト業務における情報は、恣意的、計画的に収集されることが多く、代表的なSQC手法は実験計画法 (Design of Experiment; DOE)^{[3][4]}である。

生産業務において、QCあるいはSQCで定義された経営指標として、品質 (Quality)、コスト (Cost)、納期 (Delivery)の3点がある。これらはその頭文字をとってQCDと呼ばれ、工場の生産現場においてもその重要性が広く浸透している。現在は安全 (Safety)と環境 (Environment)を加えたQCDSEが用いられている。

これらを総合的に向上させるために、人 (Man)、機械 (Machine)、材料 (Material)、方法 (Method)、測定 (Measure)のいわゆる5Mを管理すること、正確には5Mに関連する情報が重要である。すなわち5Mに関連する情報を収集し、その最適値を求め、それを維持管理す

ればQCDも最適な状態が維持できる。SQCのアプローチでは、最適値の探索にはDOE、維持管理には管理図やMVAを適切に使用することが推奨されている。

しかし、さまざまな理由から5Mの最適値は確定することが困難であり、さらに安定状態を維持することも困難な場合がある。

例えば、加工の難しい硬くて脆い材料 (高脆性材料)に、特殊な機械と工具を用いて、微細な穴あけ加工を行う加工工程がある。穴の直径は小さく測定探子を内部に挿入することが不可能なため、特殊な形状転写樹脂を使用して穴内部の形状を転写し、この外形を測定する方法で穴の直径と内面粗さを測定する方法が採用されている。

このような工程では、機械の加工条件を最適値に設定した場合でも、実際の設定値はばらつくことがある。正確に述べれば、最適値から一定量の偏りがあり、その偏りのある状態でさらにばらつくことがある。数理統計学 (Mathematical Statics)においては、真の値が存在することを前提に、真の値と実際の値との差を誤差 (Error)と呼ぶ。これに対し、度量衡学 (Metrology)では真の値を求めることが困難であることを前提に、測定値に付随する不確かさ (Uncertainty)を定義して、計量学的な解析を行う取組^{[2][5]}みがある。前述の高脆性材料の加工工程では、設定値の真の値を定義するより、設定値とそれに付随する不確かさを定義することが現実的である。そこでこの加工工程では誤差ではなく、不確かさを用いることとする。

さらに、この加工工程には高脆性材料由来のクラックやチッピング、工具の経時変化、作業者が行う形状転写作業の不確かさ、転写物の測定の不確かさ、等が存在する。すなわち5Mに関連する情報には不確かさが存在するため、この不確かさを評価し管理することが課題となる。

この中で、ISOマネジメントシステムに準拠した測定器 (Gage)の繰返し性 (Repeatability)と再現性 (Reproducibility)を評価する方法論がGage R&Rとして知られている^[7]。本研究においても作業者と測定に係る不確かさは一定の管理状態に置かれているとしている。そこで本研究で取り上げる加工工程では、機械と材料お

よび加工方法の不確かさが伴うものとして、その加工工程におけるSQC手法の有用性と課題点を考察する。

1. 2 本研究の目的

本研究の目的は、さまざまな情報の不確かさが存在する工程の1つとして高脆性材料の穴あけ加工を取りあげ、SQC手法を実践し、その結果を評価し、SQC手法の有用性と問題点を評価することである。評価に使用する加工モデルは、SQC手法により既に解明されたモデルを採用し、そのモデルを基にシミュレーションによる評価を行う。

1. 3 本研究の特徴

本研究の対象は高脆性材料である。具体的には厚さ4mmのガラス板である。その穴あけ加工工程は、機械（加工機）、材料（ガラス）、方法（加工モード）に不確かさが伴う。不確かさの要素が複数存在する工程を対象としてSQC手法を適用したことが特徴の1つである。

さらには加工機械の設定値の不確かさをモンテカルロ法（Monte Carlo Method: MCM）^[9]によりシミュレーションデータとして与え、これが特性に伝播する状況を具体的にデータ化し、その結果を分布としてグラフ化することにより可視化し、これを考察することで、技術者だけでなく管理部門や経営者にも判断を可能としたことも特徴である。なお本研究ではグラフ化（可視化）ツールに統計解析ソフト（米国SAS社製の商品名”JMP”（ジャンプ））を使用した。

2. 理論と方法

2. 1 機械加工

本研究で対象とする工程は超音波を援用した回転研削穴加工（Rotary Ultrasonic Machining; RUM）である。加工の実際を図1に詳細を図2に示す。加工は半径0.5mmの中空加工ツールを回転させながら下方向に送ることで行われる。ツールは超音波が印加され、その先端は20KHzで振動している。また対象となる高脆性材料は厚さ4mmのガラス板である。この加工ガラスの代表的な応用製品としてスマートフォンの表面ガラスがある。

加工後のガラス穴の形状を図3に示す。ここでは特性値として(a)最適形状、(b)通常の形状、(c)穴径が拡大した形状の3特性を示し、加工条件の詳細は不明である。

RUMを用いたガラス穴の加工メカニズムは既に解明され^[6]、研究成果も発表されているが、対象となる硬脆性材料自体が加工時のひび割れや欠けなど不確かな要素を含んでいる。また研削加工に使用する加工ツールにはダイヤモンド砥粒が付着しているが、時間の経過とともに摩耗し脱落するため研削力が不確かに変化する。このため結果として加工形状に不確かさが含まれる。

以上の前提条件のもとで、本研究で評価する加工特性はガラス穴の半径(L)と穴内部の粗さ(R)とする。加工特性に大きな影響を及ぼす加工因子として、加工ツールの送り速度(X_1 ; mm/min)と回転数(X_2 ; rpm)、及び超音波出力(X_3 :%)を取り上げる。これらはいずれも量的因子である。

高脆性材料の研削加工では研削後の屑（ガラススラッジ）の排出が重要であり、2つの加工モードが存在する。1つは加工ツールを一方方向に動かすOne wayモード、もう一つは加工ツールを上下させてガラススラッジをより積極的に排出するStepモードである。加工モードは質的因子である。

2. 2 加工モデル

過去の研究^[1]から加工特性 L, R は穴入口からの距離の関数としてモデル化されている。そこで穴入口からの距離を表す変数を Z_j ($j=1,2,3$)とし、 $z_1=1200 \mu m$, $z_2=2400 \mu m$, $z_3=3600 \mu m$ の3点における加工特性 L_j, R_j と加工因子との関係をそれぞれ式(1)および式(2)に示す。

式(1)および式(2)では加工因子 X_1, X_2, X_3 を規格化した変数 x_1, x_2, x_3 を用いている。 M は加工モードの水準を表すダミー変数であり、One wayモードでは-1、Stepモードでは+1とする。また、 k_0, r_0 は中心化切片と呼ばれる定数であり、 k_1, r_1 は変数 Z_j に関連した特性の変化を表す係数である。その概要を図4に示す。

$$\begin{aligned}
 L_j &= k_0 + k_1(z_j - z_2) \\
 &= 513.54 - 0.70x_1 + 0.94M + (-0.32 \\
 &\quad + 0.19x_1 + 0.05x_3 + 0.21x_3^2 - 0.29M) \\
 &\quad \times (z_j - z_2) \times 0.001 \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_j &= r_0 + r_1(z_j - z_2) \\
 &= 4.67 + 0.11x_1 - 0.83x_3 - 0.85x_1^2 \\
 &\quad + 0.47x_3^2 + 0.47M + (-3.26 + 7.30x_1 \\
 &\quad + 4.69x_2 + 5.50x_3 + 6.34x_2x_3 - 9.88x_3^2 \\
 &\quad + (-6.03 + 9.60x_3 - 7.11x_3^2)M) \times 0.001 \\
 &\quad j = 1, 2, 3 \quad (2)
 \end{aligned}$$

穴径 L は加工ツールの半径とそれに溶着されているダイヤモンドの粒径，さらには超音波振動やガラススラッジの排出等様々な不確かさが関係する特性値である．これらの不確かさが無い場合を想定して式 (1) を解釈すると次のようになる．

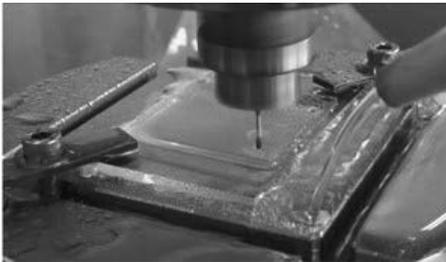


図 1 超音波援用研削加工の概要

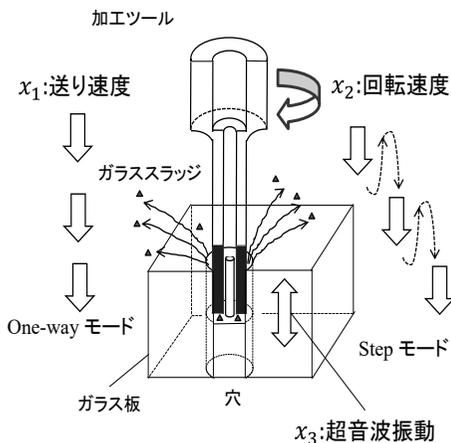
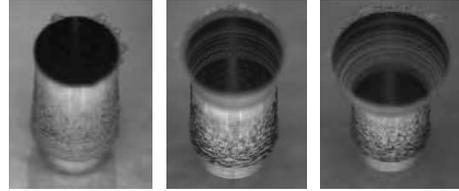


図 2 超音波援用研削加工の詳細



(a) 最適形状 (b) 通常の形状 (c) 穴径大の形状
図 3 ガラス穴加工形状

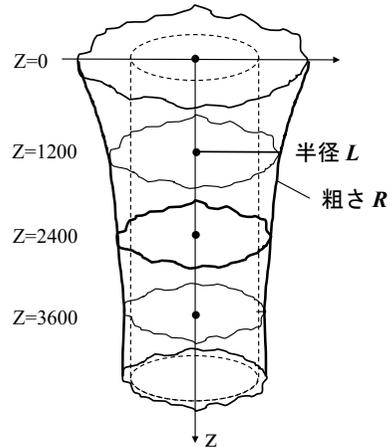


図 4 穴の半径 L と粗さ R

まず $x_j = z_2$ にて基準化した送り速度 $x_1 = 0$ ，すなわち加工仕様で指定された送り速度中心値の場合，穴径 $L = k_0 = 513.54 + 0.94M$ となる．

これより $M = -1$ (One way) では $L = 512.6 \mu\text{m}$ ， $M = +1$ (Step) では $L = 514.48 \mu\text{m}$ となる． $z_j = z_1$ または z_3 の場合， k_1 の要素が加わるため，加工要因の不確かさが特性に大きく影響する．これは粗さ R についても同様である．以上より本研究の目的から $z_j = z_1$ を評価対象とする．

2. 2 要因と特性の不確かさ

加工ツールの送り速度 (x_1) と回転数 (x_2)，及び超音波出力 (x_3) の現状における設定値は既知である．この設定値を真の値とするとき，現実の値は様々な理由から真の値からズレる．このズレの量を偏差 (bias) とする．またズレた値の周りで設定値がばらつく．この量をばらつき (diversion) とする．本研究ではこのばらつきは正規分布すると仮定し，その標準偏差を用いて解析する．すなわち要因の不確かさは偏差とばらつきから成る．

本研究では偏差は各要因の基準範囲の上限と下限に設定した。規格化した基準範囲を±1としたとき、偏差は規格中心値-1および規格中心値+1となる。一方ばらつきは規格範囲を±1として、標準偏差で0.1および0.3とした。

2. 3 モンテカルロ法

本研究では不確かさの伝播をMCMを用いて確率分布をシミュレートし、確率分布に対応するヒストグラムを生成した。このときMCMでは計算効率を研究対象とすることがある。すなわち、同一問題に対して2つのモンテカルロ・シミュレーションがあり、それぞれ t_1, t_2 の計算時間を消費し、得られる結果の分散を σ_1^2, σ_2^2 とする。このとき効率を $(t_1 \sigma_1^2)/(t_2 \sigma_2^2)$ と定義しこれを評価するものである。本研究では $t_1=t_2$ とし、特性ごとに分散を評するため、効率は考察しない。その前提のもとにMCMを以下のように実施する。

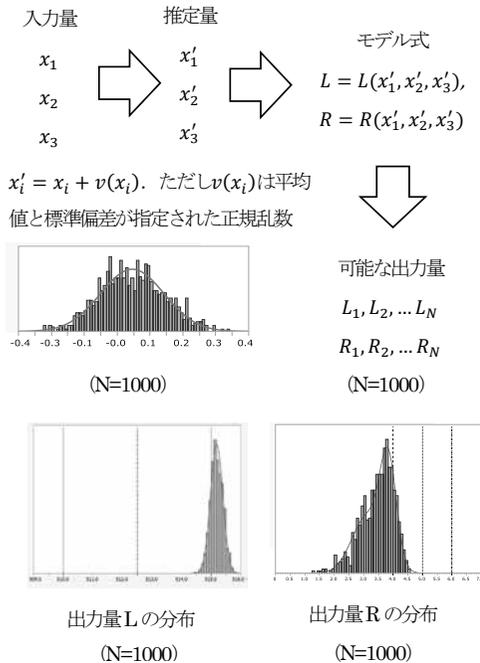


図 5 モンテカルロ法によるシミュレーション

まず特性 L と R のモデル式がそれぞれ式(1)と式(2)で与えられ、式を構成する変数は加工因子 X_1, X_2, X_3 を規格化した x_1, x_2, x_3 であるとする。この変数に平均値と標準偏差が指定された正規乱数 $v(x_i)$ を乗じて推定量 x'_1, x'_2, x'_3 を定めれば、これらは不確かさを含む入力量であり、その分布は正規分布する。この正規分布に従ってモンテカルロ・シミュレーションを実行し、ヒストグラムを生成する。得られたヒストグラムは特性の分布であり、入力量に対する出力量の分布が得られる。

シミュレーションの回数は $10^4 \sim 10^6$ 程度、またより少ない回数でも十分の場合があるとされている。本論文で扱う加工法は基本的なメカニズムが解明され、式(1)、式(2)で示されているため 10^3 とし、その様子を図5に示す。

仮に L と R のモデルが未定である場合、MCMの試行回数はより多くなり、試行回数と出力値の不確かさを確認し効率を含めた評価を行う必要がある。本研究ではSQC手法の有効性を評価することが目的であることから、効率の評価は行わない。

2. 4 経営視点からみたガラス加工工程

ガラスは陶器や磁器と同じ無機材料であり、硬くて脆い性質から高脆性材料とも呼ばれている。その硬さや電気絶縁性に優れた特性をもつことから工業では多数使用されている。ガラス材料自体はそれほど高価ではないが、その加工の難しさから加工費は高額となる。

また穴加工の場合、穴一つを空ける時間も0.5分から3分の時間を要する場合がある。すなわちQCDの点で非常に困難が伴う加工工程となる。

従来、工程要因として5Mを検討するとき、最も重要で困難とされていた要因は測定(Measure)であった。1~数ミリ程度の穴の内部を測定することは困難であった。しかし穴内部の形状をレプリカにより転写し、これを精密計測する技術が開発された後、測定の問題はほぼ解消された。しかしレプリカへの転写精度と測定精度も新たに考慮すべき課題となった。

最終的には穴の半径 L と粗さ R をモデル化に成功したことから、このモデルによる加工工程

へのQCD改善が可能となり、経営に寄与することが期待された。

しかし、対象工程のさまざまな不確かさが、モデルによる対象工程の品質管理に影響することが知られており、特にSQC手法において要因系の不確かさが特性系にどのように伝播するか、研究が待たれていた。この伝播の様子が明らかになれば、加工のメカニズムを調べることでなく、シミュレーションによって特性のばらつきや、その原因を特定することが可能となり、とるべき対策が明らかになる可能性がある。

3. 結果

3.1 要因の不確かさのシミュレーション結果

乱数を用いた推定式を基に、 x_1 ($i=1, 2, 3$) について1000回のシミュレーションを行い推定量 x'_i ($i=1, 2, 3$) を求めた。規格化された要因の設定範囲に対して、ばらつき $\sigma=0.1$ 、偏りが-1, 0, 1の場合の結果をそれぞれ図6から図8に示す。また、ばらつき $\sigma=0.3$ で偏りが-1, 0, 1の場合の結果をそれぞれ図9から図11に示す。

現状における設定値の不確かさは図7に示されている。また、ばらつきのみが増大した場合は図10となる。この状況は意図したものではなく、加工機械の3要因（ツールの送り速度、回転速度、超音波出力）が制御不良になった状況を想定している。設定値のほとんどは規格内にあるが、一部は規格外の状況である。偏りが規格の下限と上限に及んだ状況がそれぞれ図6と図8である。このような状況は現状を改善するために設定値を変える場合を想定している。

3.2 特性分布のシミュレーション結果

要因の不確かさが原因となって特性が不確かな状況となる様子を可視化する。特性は穴の半径 L と穴内部の粗さ R の2点である。また加工機に取り付けたツールは一方向に動くOne wayモードと、上下に動くStepモードの2種類がある。このため、 L のOne wayモードを図12から図17に示し、 L のStepモードを図18から図23に示す。また R のOne wayモードを図24から図29に、Stepモードを図30から図35に示す。

L については、規格中心と規格幅は 512.5 ± 2.5 であり、対応する位置に基準線を記載して

いる。そのうえで設定値の不確かさが特性に影響する結果は、One wayモードで偏差が-1の場合を除き、設定値の不確かさが0.3以下であればモードによらず特性はほぼ規格を満足することが確認できる。すなわち特性 L はツールの送り速度、回転数、および超音波出力の3要因に関してある程度の頑健性をもつことが示された。より詳細な解析は次章の考察で行うが、穴径の異常な拡大はこの3要因の不確かさが原因であるとは言えない可能性が高い。

また分布の形状は左右対称である。正規分布で近似した曲線も併記し、ほぼ適合していることから、その平均値と標準偏差も記載した。 L の標準偏差はMCMで設定した標準偏差とほぼ同じ値であるが、偏りと相関のある可能性がある。

R については、規格は $6 \mu\text{m}$ 以下であり、かつ負の値をとることはないため、0と6の位置に基準線を記載している。そのうえで設定値の不確かさが特性に影響する結果は、One wayモードとStepモードで大きく異なる。One wayモードにおいては偏りが ± 1 、ばらつきが0.3以下であれば規格を満足するのに対し、Stepモードでは偏りが+1のときのみ規格を満足する結果になっている。

また R の分布については左右非対称の分布となっている。このためJMPの機能を利用して二重正規混合分布をあてはめ、2つの正規分布の中心値と標準偏差、2つの分布が占めるデータの割合を示した。

3.3 L の規格外れの原因と R の分布について

現状の生産条件では、規格化された要因のばらつきは0.1に管理されている。これに対して、ばらつきが3倍となった場合、すなわち規格化されたばらつきが0.3となった場合、One wayモードにおける L の規格外れは図36となり、そのデータ数は40となる。このとき x_1, x_2, x_3 と L との関係を示す散布図はそれぞれ図37、図38、図39となる。

図40では L の規格外れに対応した40の要因における R の分布を示し、そのときの x_1, x_2, x_3 と R との散布図をそれぞれ図41、図42、図43に示す。これら x_1, x_2, x_3 が互いに独立、すなわち無相関であるか否かが重要であり、詳細は次章

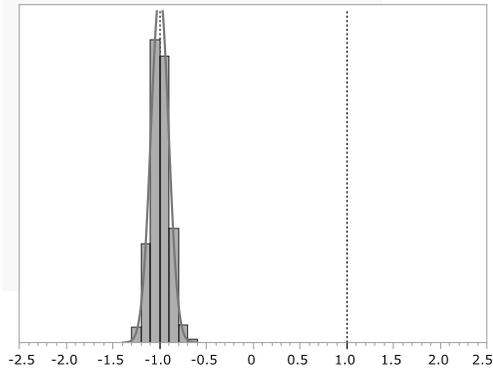


図 6 $x'_i = -1 \pm u(0.1); i = 1, 2, 3$

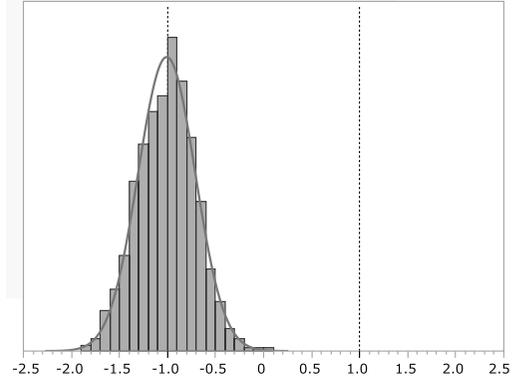


図 9 $x'_i = -1 \pm u(0.3); i = 1, 2, 3$

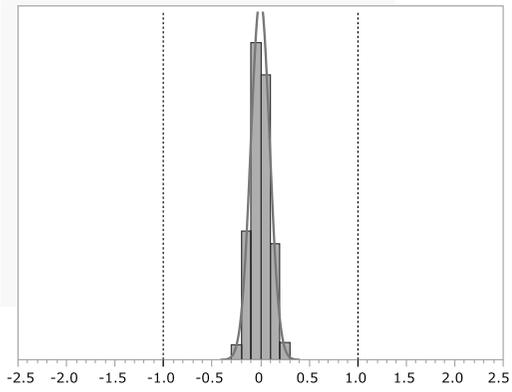


図 7 $x'_i = 0 \pm u(0.1); i = 1, 2, 3$

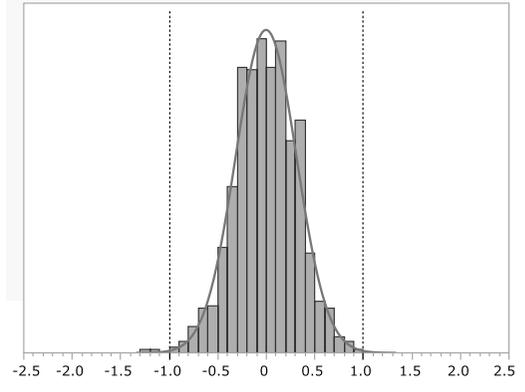


図 10 $x'_i = 0 \pm u(0.3); i = 1, 2, 3$

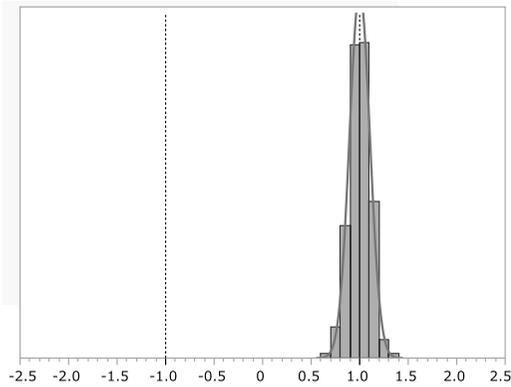


図 8 $x'_i = 1 \pm u(0.1); i = 1, 2, 3$

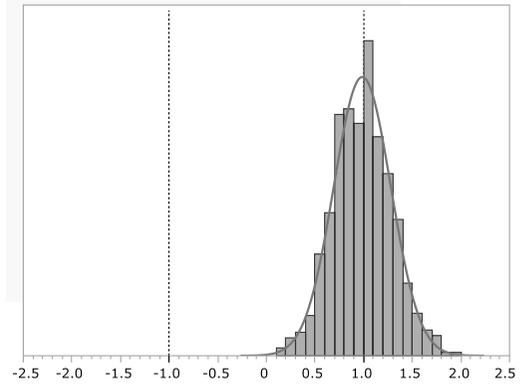


図 11 $x'_i = 1 \pm u(0.3); i = 1, 2, 3$

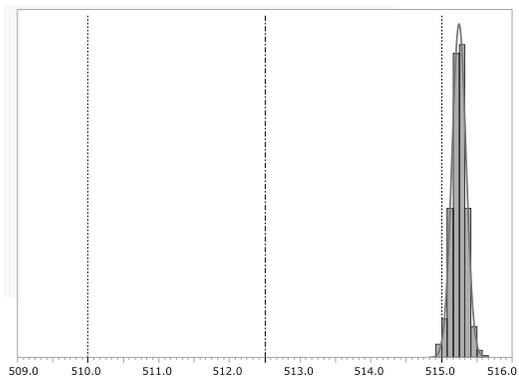


図 12 L (one way), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 515.2, 標準偏差 = 0.10

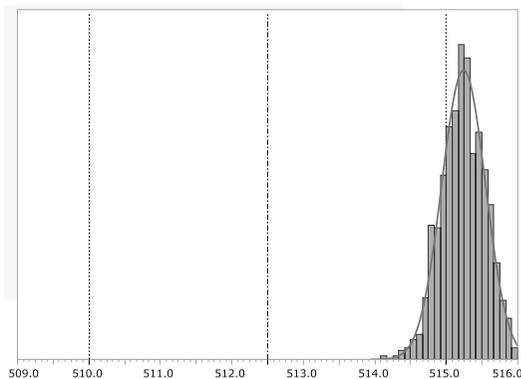


図 15 L (one way), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 515.2, 標準偏差 = 0.31

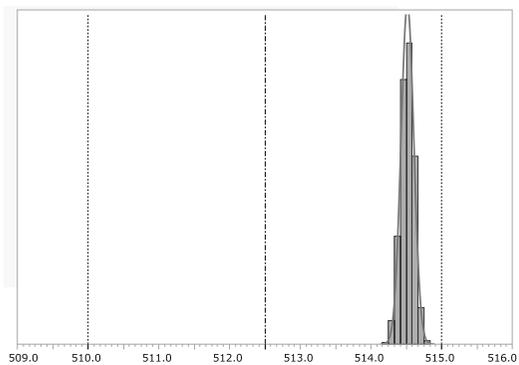


図 13 L (one way), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 514.5, 標準偏差 = 0.09

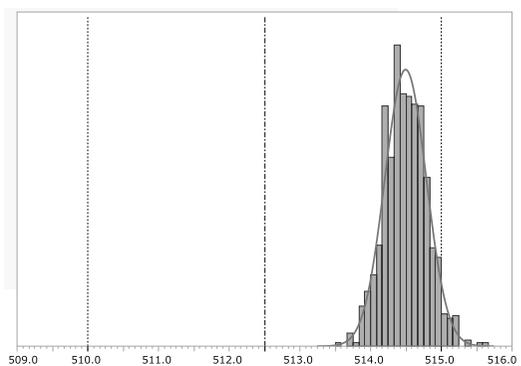


図 16 L (one way), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 515.2, 標準偏差 = 0.31

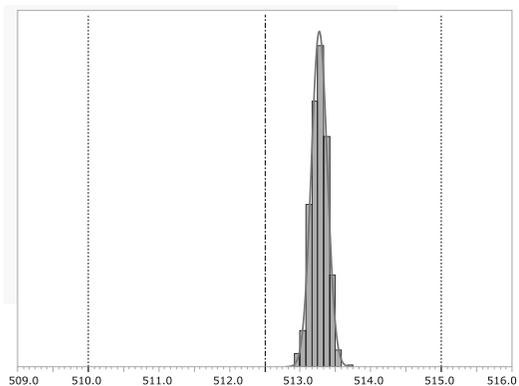


図 14 L (one way), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 513.3, 標準偏差 = 0.11

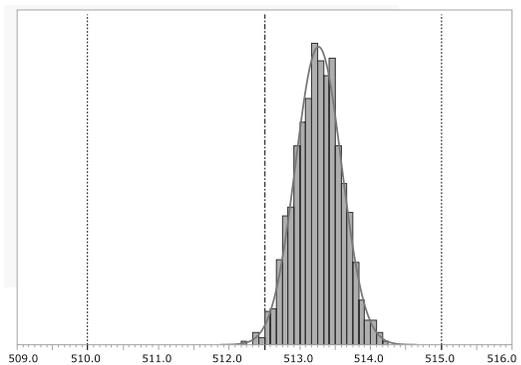


図 17 L (one way), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
中心値 = 513.3, 標準偏差 = 0.33

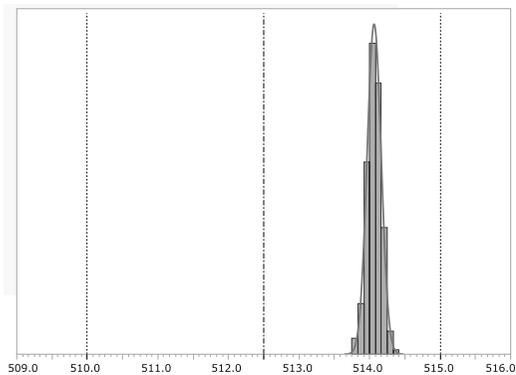


図 18 $L(\text{step}), \mu_i = -1, \sigma_i = 0.1 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 514.1, 標準偏差 = 0.10

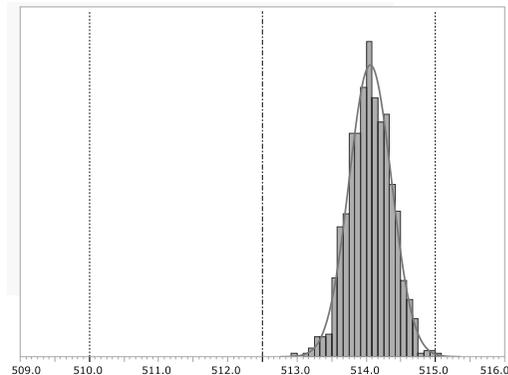


図 21 $L(\text{step}), \mu_i = -1, \sigma_i = 0.3 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 514.1, 標準偏差 = 0.31

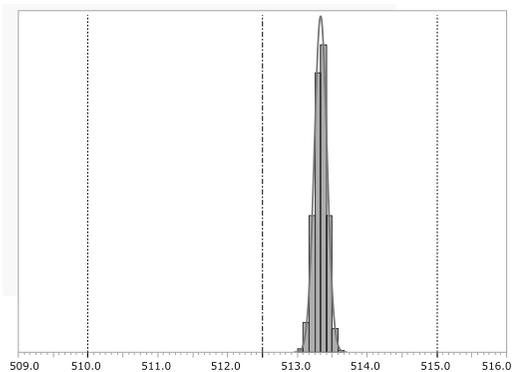


図 19 $L(\text{step}), \mu_i = 0, \sigma_i = 0.1 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 513.3, 標準偏差 = 0.09

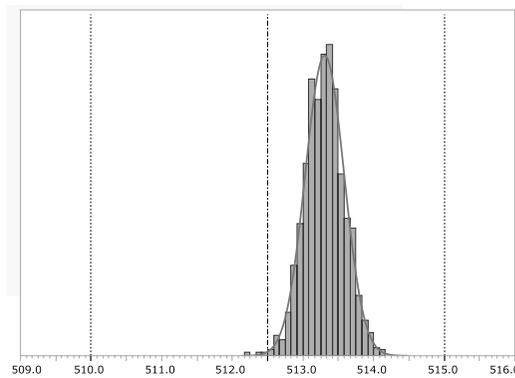


図 22 $L(\text{step}), \mu_i = 0, \sigma_i = 0.3 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 513.3, 標準偏差 = 0.27

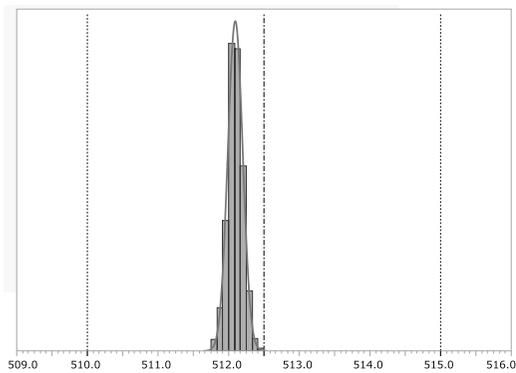


図 20 $L(\text{step}), \mu_i = 1, \sigma_i = 0.1 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 512.1, 標準偏差 = 0.11

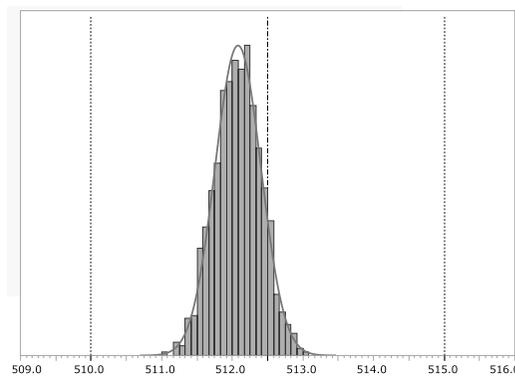


図 23 $L(\text{step}), \mu_i = 1, \sigma_i = 0.3 (i = 1, 2, 3)$
中心値 = 512.1, 標準偏差 = 0.33

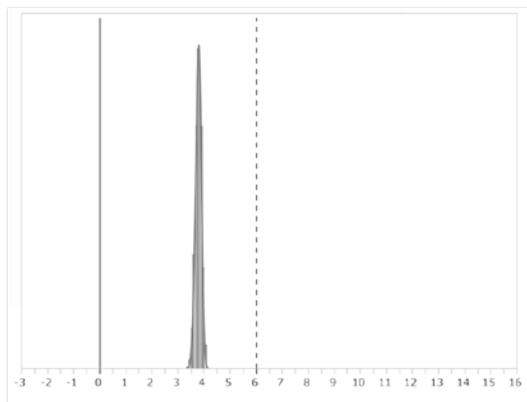


図 24 R (one way), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (3.69, 3.82), 標準偏差 = (0.097, 0.092)
 割合 = (0.30, 0.70).

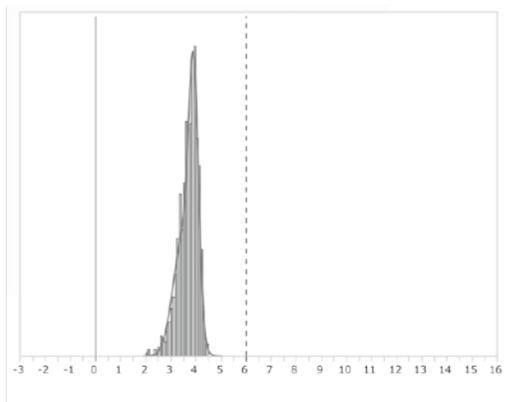


図 27 R (one way), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (3.46, 3.91), 標準偏差 = (0.384, 0.199)
 割合 = (0.48, 0.52).

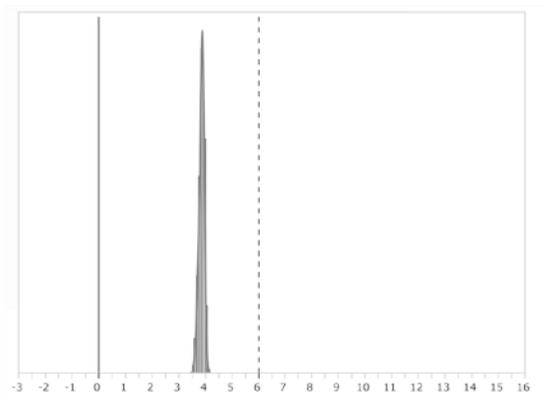


図 25 R (one way), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (3.75, 3.90), 標準偏差 = (0.084, 0.074)
 割合 = (0.26, 0.74)

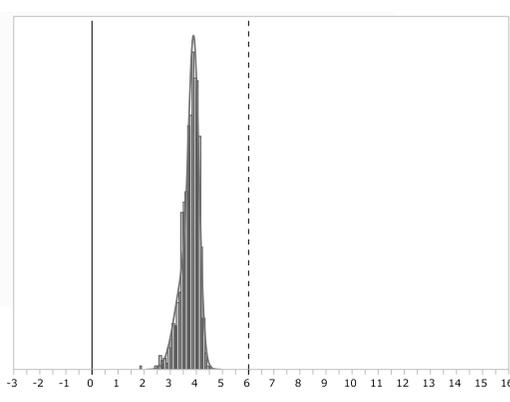


図 28 R (one way), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (3.53, 3.92), 標準偏差 = (0.357, 0.196)
 割合 = (0.37, 0.63)

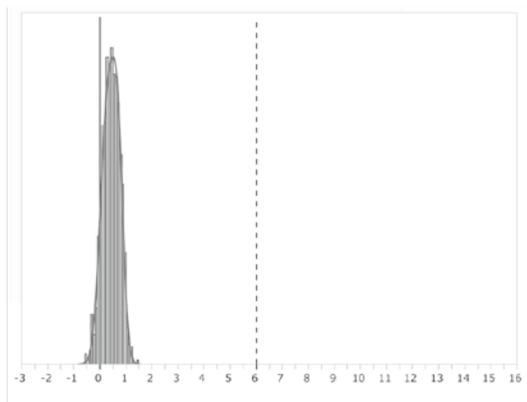


図 26 R (one way), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (0.29, 0.70), 標準偏差 = (0.27, 0.21)
 割合 = (0.65, 0.35)

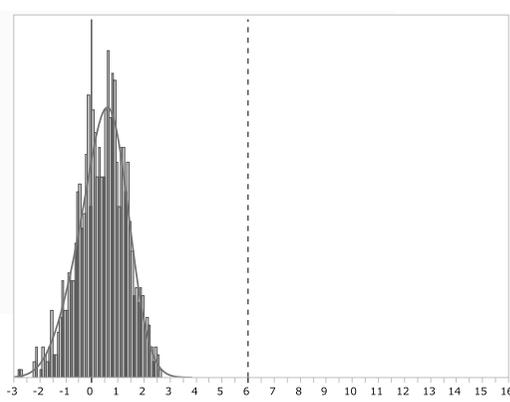


図 29 R (one way), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (-0.44, 0.74), 標準偏差 = (0.80, 0.74)
 割合 = (0.29, 0.71)

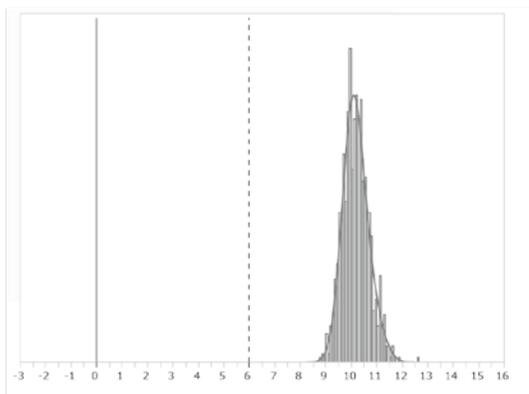


図30 R (step), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (10.1, 10.8), 標準偏差 = (0.43, 0.43)
 割合 = (0.85, 0.15)

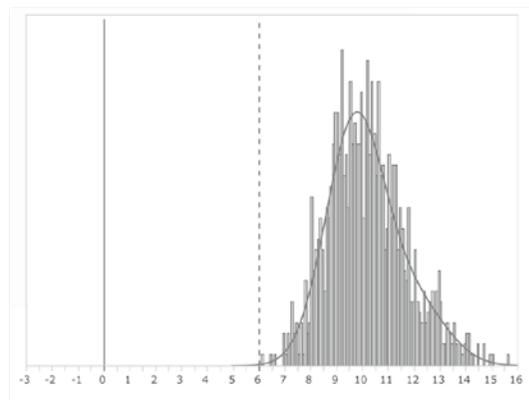


図33 R (step), $\mu_i = -1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (9.70, 12.04), 標準偏差 = (1.14, 1.24)
 割合 = (0.79, 0.21)

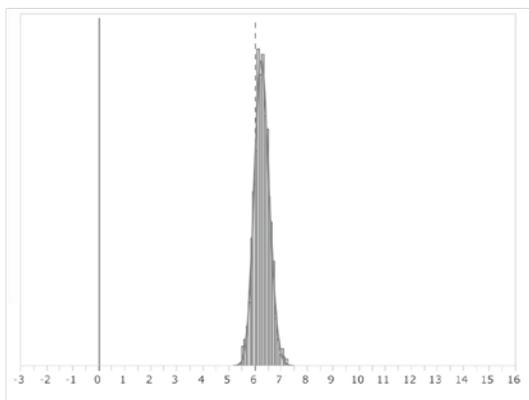


図31 R (step), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (6.17, 6.47), 標準偏差 = (0.24, 0.26)
 割合 = (0.69, 0.31)

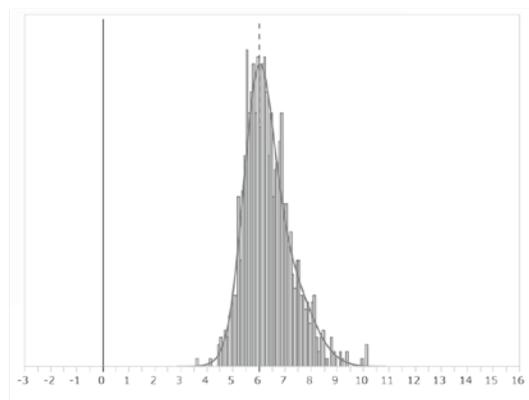


図34 R (step), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (5.95, 6.86), 標準偏差 = (0.57, 0.98)
 割合 = (0.56, 0.44)

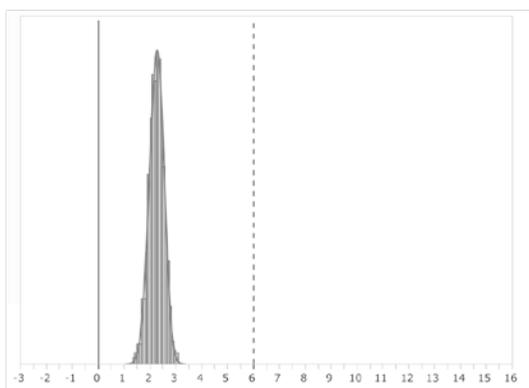


図32 R (step), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.1$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (2.08, 2.37), 標準偏差 = (0.25, 0.24)
 割合 = (0.39, 0.61)

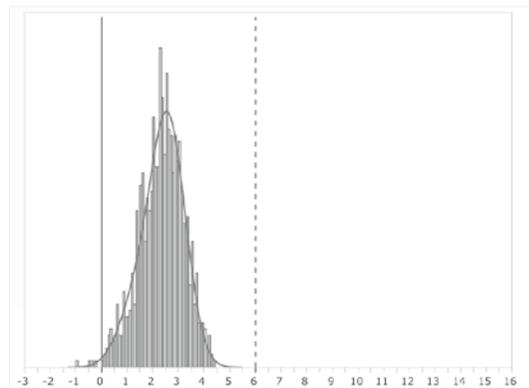


図35 R (step), $\mu_i = 1, \sigma_i = 0.3$ ($i = 1, 2, 3$)
 中心値 = (1.32, 2.59), 標準偏差 = (0.69, 0.69)
 割合 = (0.19, 0.81)

で考察する。

3. 4 R の規格外れの原因と L の分布について

L の場合と同様に、現状の生産条件に対して、規格化された要因のばらつきが0.3となった場合のStepモードにおける R の規格外れの分布を図48に示す。規格外れのデータ数は606である。このとき x_1, x_2, x_3 と R との散布図をそれぞれ図49, 図50, 図51に示す。

図44では R の規格外れに対応した606の要因における L の分布を示し、そのときの x_1, x_2, x_3 と L との散布図をそれぞれ図44, 図45, 図46に示す。このときも x_1, x_2, x_3 が互いに独立し、相関がない状態を確認したうえで考察することになる。

4. 考察

4. 1 要因の不確かさについて

ツールの送り速度(x_1)および回転速度(x_2)、超音波出力(x_3)のそれぞれについて、規格上限と下限の位置を偏りとし、規格化された設定範囲の10%と30%をばらつきとした設定を固有技術視点から個別に評価した場合、次のようになる。

まず初めに、不確かさの影響がもっとも大きいと考えられるのは超音波出力である。超音波発振器は研削加工とは別に取り付けられており、その精度もそれほど高くない。また超音波発振器の振動子が持つエネルギーを研削工具に伝達し、そのエネルギーがダイヤモンドの研削砥粒からガラスに伝達され研削が行われる。この間のエネルギーの伝達は不確かさが大きいと考えられるため、30%程度のばらつきは発生する。

次に、ツールの送り速度と回転速度は精密工作機械が30%のばらつきをもつことは考えにくい。機械自体のばらつきは10%程度と想定される。そのうえで偏りは少なく、規格中心の位置でばらつきがあると考えられることになる。

本研究で規格上限と下限にMCMを設定した背景は、今後の改善の方向を探るためであり、 L と R のシミュレーション結果を経営視点で評価するときに重要である。

以上より、ツールの送り速度(x_1)および回

転速度(x_2)については図7を、超音波出力(x_3)については図10を想定することとなる。

4. 2 穴径 L の不確かさについて

図3に示した穴径 L の不確かさについて、ツールの送り速度(x_1)および回転速度(x_2)、超音波出力(x_3)の3つの設定値の不確かさがどの程度影響しているか、すなわちどの程度伝播しているか、前節の考察も踏まえて考察する。

まず初めに、One wayモードとStepモードのどちらが、穴径大となる可能性が高くなるか考察する。One wayモードについては図15から図17, Stepモードについては図21から図23を比較することになる。その結果、現状の設定値の不確かさが伝播して穴径大となる可能性が高いのはOne wayモードである。そこで偏り $\mu_i=0$ とした状態でばらつき $\sigma_i=0.1$ ($i=1,2,3$)が $\sigma_i=0.3$ となった状態を考察する。

このため図16において、 $L>515$ となった規格外れのデータを識別したものを図36に示した。このデータ数 $n=40$ である。この40データについて L と x_1, x_2, x_3 のそれぞれの分布を散布図で示したものがそれぞれ図37, 図38, 図39である。さらにこの40データの R の分布を図40に、 R と x_1, x_2, x_3 の散布図を図41, 図42, 図43に示す。

まず初めに、図37において $L>515$ となる x_1 の範囲は $x_1 < -0.6$ である。これは偏差 -0.4 、すなわち40%の偏差となるため、5.1の考察から考えてもその可能性はほとんどない。すなわちシミュレーション結果は現実と矛盾する。

一方、図38から x_2 の範囲は $-0.6 < x_2 < 0.6$ 、図39から x_3 の範囲は $-0.5 < x_3 < 0.5$ である。このことから、偏差 $=0$ の近傍で設定値が不確かな状況があれば $L>515$ となり、シミュレーション結果は現実と矛盾しないことになる。

R について考察すると、 $L>515$ となった穴径大のデータの粗さ R の値は全て $R < 6$ と規格内である。すなわちシミュレーションの結果は、穴径大の状況でも粗さ R は良好な状態であることを示している。しかし図3に示されたガラス穴加工形状の粗さは、最適形状の粗さは良好(R が小さい)であるのに対し、穴径大の粗さは不良(R が大きい)ことがわかる。すなわち R に

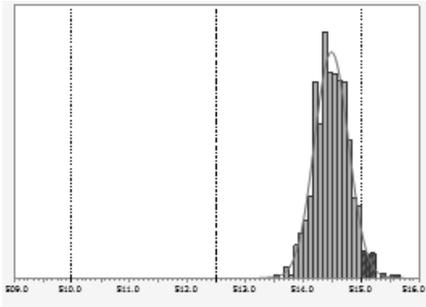


図 36 L (one way), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.3 (i = 1, 2, 3)$ の規格外れ ($L > 515$) の分布 ($n=40$)

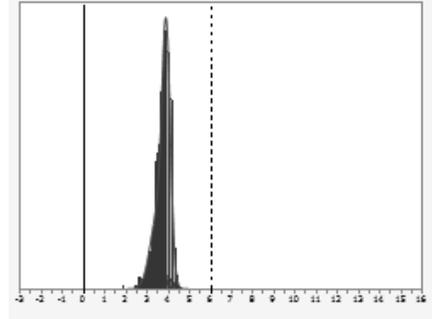


図 40 L (one way) の規格外れに対応した R の分布 ($n=40$)

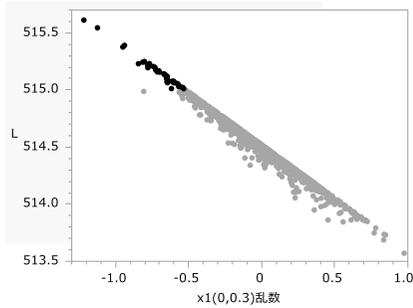


図 37 $L > 515$ のときの x_1 の分布

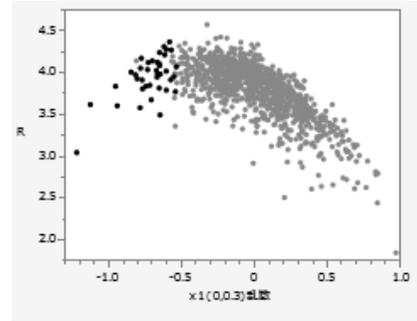


図 41 R が規格外れとなる x_1 と、そのときの L の散布図 ($n=606$)

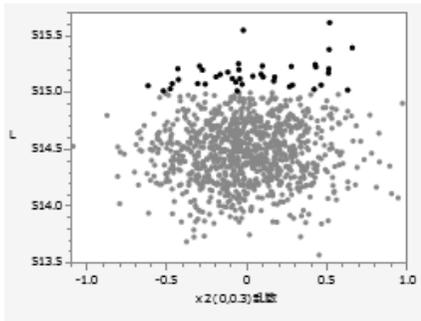


図 38 $L > 515$ のときの x_2 の分布

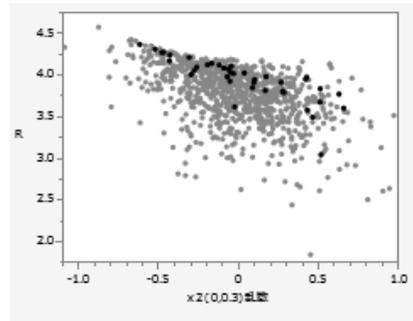


図 42 R が規格外れとなる x_2 と、そのときの L の散布図 ($n=606$)

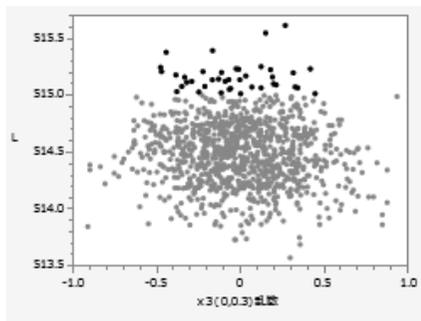


図 39 $L > 515$ のときの x_3 の分布

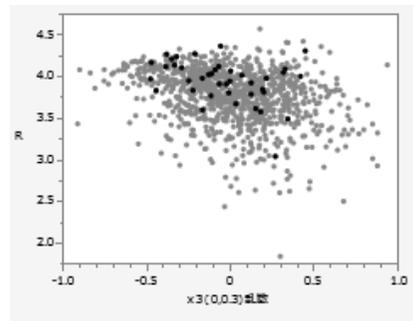


図 43 R が規格外れとなる x_3 と、そのときの L の散布図 ($n=606$)

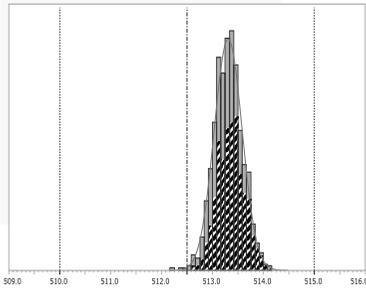


図 44 R (Step) の規格外れに対応した L の分布 (n=606)

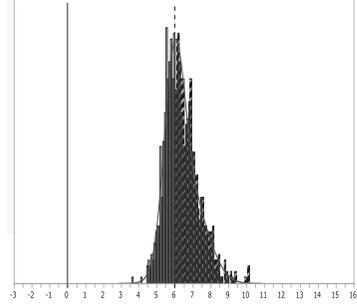


図 48 R (step), $\mu_i = 0, \sigma_i = 0.3 (i = 1, 2, 3)$ における規格外れ ($R > 6$) の分布 (n=606)

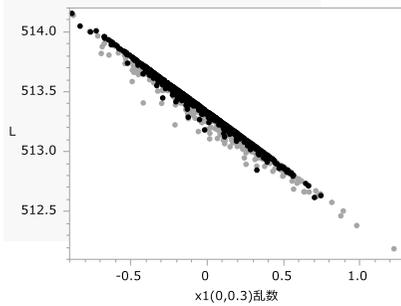


図 45 R が規格外れとなる x_1 と、そのときの L の散布図 (n=606)

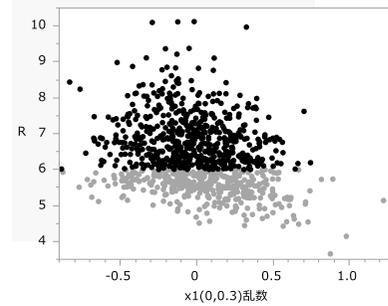


図 49 $R > 6$ のときの x_1 の分布

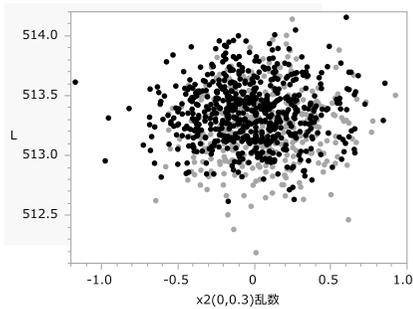


図 46 R が規格外れとなる x_2 と、そのときの L の散布図 (n=606)

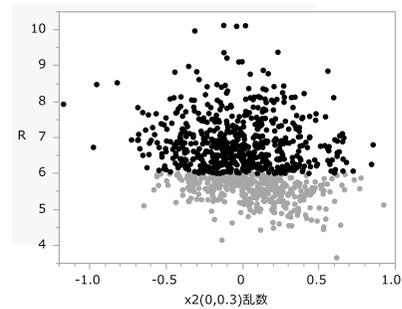


図 50 $R > 6$ のときの x_2 の分布

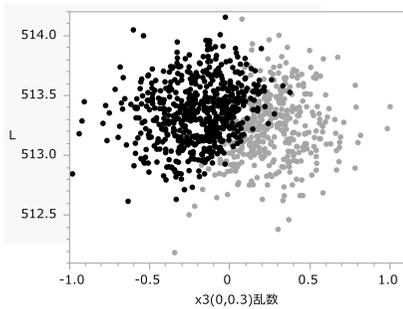


図 47 R が規格外れとなる x_3 と、そのときの L の散布図 (n=606)

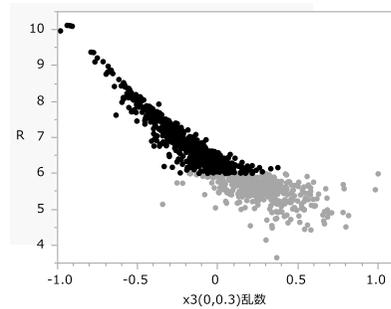


図 51 $R > 6$ のときの x_3 の分布

ついてシミュレーション結果は現実と矛盾する。以上より、One wayモードにおいて、要因の不確かさが孔径の拡大につながる可能性は低いと考えられる。Stepモードとの関連は粗さRの不確かさの考察と併行して行う。

4. 3 粗さRの不確かさについて

粗さRが不良になる場合、One wayモードとStepモードのどちらの可能性が高いか、シミュレーション結果から判断する。前者は図27から図29、後者は図33から図35の分布を考察する。その結果、Stepモードにおいて粗さRが不良になる可能性が高いことは明らかである。そこで、前節と同様に、3要因の偏り $\mu_i=0$ とした状態で、ばらつきが $\sigma_i=0.3$ ($i=1,2,3$)となった状態を考察する。

このため図34において、 $R>6$ となった規格外れのデータを識別したものを図48に示した。このデータ数 $n=606$ である。この606データについてRと x_1, x_2, x_3 のそれぞれの分布を散布図で示したものがそれぞれ図49、図50、図51である。これらの散布図から $R>6$ となる可能性があるのは $x_1<0.5, -0.6<x_2<0.6, x_3<0.3$ の値をとるときである。そしてこの不確かさをとる可能性があることは5.1の考察で述べている。すなわちシミュレーション結果は現実と矛盾しない。

さらにこの606データのLの分布を図44に、Lと x_1, x_2, x_3 の散布図を図45、図46、図47に示す。これらを基にLについて考察する。 $R>6$ となった粗さ不良のデータは、孔径Lを拡大する方向に分布していることがわかる。すなわち図3で示された孔径Lが拡大し、粗さRも大きくなる状況はStepモードで発生する可能性がある。ただし図44において孔径Lが規格外れとなるほど拡大する可能性は示されていない。

4. 4 加工モードを考慮したLとRの総合評価

ツール送りはOne wayモードとStepモードの2つのモードがあり、いずれも質的因子である。質的因子であるため、モード自体に不確かさの概念はあてはまらない。しかし各モードの内容は複数の量的因子から構成されており、1つのモードを選択しても、その中で不確かさが

存在する。

そのような前提条件のもと、どちらかのモードを選択し、その後、機械加工の3因子(量的因子)を設定した。この設定値に不確かさが存在する状況をシミュレーションにより再現し、LとRの2特性値の不確かさを総合評価した。

その結果、Stepモードにおいてはシミュレーション結果と現実の結果が凡そ一致した。One wayモードにおいては、シミュレーション結果は現実のLとRを同時に説明することが困難であった。その理由として、Stepモードはツールの上下動を多数回繰返すため、ツール送り x_1 の影響がOne wayモードより強く影響し、特性に影響した可能性がある。しかし本研究ではモードの影響はシミュレーションに考慮していない。

4. 5 SQC手法の経営視点からの評価

LとRの加工特性を経営視点で総合評価をするとき、加工製品の使用目的が重要である。2.1節ではスマートフォンの表面ガラスを挙げた。その他にも、精密計測機のセンサー部品(孔径精度が重要)や光ファイバー材料(内面の加工粗さが重要)があるが、本研究は前者の加工工程をSQCにより改善することから始まった。このためLを重視し、Rの評価は遅れていた。その後、穴内部の形状を転写し測定する方法が開発され、高精度の粗さ評価が可能となり、SQCの取組みが進んだ。すなわち経営視点からSQCを評価する場合、その前提となる高精度測定の可能性が重要となる。高精度測定が可能で、製品特性が目的とする機能に適合していれば、不確かさが存在する工程においてもSQC手法は有効である。

このとき、統計解析ソフトを活用することで、より正確に統計量を算出できる。このため、経営視点からも統計解析ソフトは重要である。

4. 6 今後の課題

LとRを総合的に評価するためにはモードの影響をシミュレーション条件に加える必要があることを述べた。本研究ではその対応をしていないため、今後の課題である。これはMCMを適用するうえで十分対応可能であると考えられる。

5. おわりに

さまざまな情報の不確かさが存在するガラスの穴あけ加工工程を取りあげ、SQC手法により得られたモデル式を基にコンピュータシミュレーションを実施し、その結果を評価し、SQC手法の有用性と問題点を経営視点で評価した。その結果、SQC手法により不確かさの伝播を可視化し、実際の工程との整合性を技術的に評価したうえで、経営視点からも評価した。その結果SQC手法の有用性を確認した。

【引用文献】

- [1] Akira OGAWA and Takenori TAKAHASHI (2019), Three-dimensional small glass hole evaluation using replica method and multiple characteristics optimization by stepwise procedure, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol. 85, No. 10, pp. 919-926.
- [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—計量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 (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.
- [7] 小川昭, 伊藤利佳 (2022), “経営視点に基づくISOマネジメントシステム規格に準拠した統計的品質管理手法の研究”, *目白大学経営学研究*, 第20号, pp. 17-32.
- [8] 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.
- [9] 津田孝夫 (1977), モンテカルロ法とシミュレーション—電子計算機の確率論的応用—, 培風館.