

## 統計解析に基づく加工工程の総合的最適化

### Total Optimization of the Manufacturing Process Based on Statistical Analysis

小川 昭 高橋 武則

(Akira OGAWA Takenori TAKAHASHI)

#### 【要 約】

加工工程では常に、品質、コスト、生産性の要求を同時に満たす必要がある。例えば、品質向上を目指す加工工程が増え加工コストが増加し生産性が低下しやすい。その逆に、安易に工程を削減してコストダウンや生産性向上を目指す品質が低下しやすい。加工工程で品質を作り込みながらコストダウンや生産性向上を目指すには、技術的な視点から適切なデータ解析に基づく加工工程の最適化を行うと同時に、最適化の実行においては経営的な視点から、多くのステークホルダーとの合意を形成することが重要である。本研究の目的は、加工工程の中で技術的にも経営的にも重要な因子を戦略因子とし、実験データから統計モデルを構築するときこの戦略因子をモデルに取り込み、数理計画法による最適化を行うことである。そして、その最適解を探索する中で、この戦略因子を活用した複数のシナリオによる最適化のアプローチの有効性を示すことである。また、加工形状は接触式測定機で直接測定することの難しい微小穴内部の形状であるため、レプリカに転写して非接触式測定機で間接的に測定した。この方法は安価で高精度な測定が可能であり、レプリカによる間接測定法が経営的に優れたアプローチであることを示す目的もある。本研究では、ダイヤモンドの中空コアドリルを使用した超音波援用研削加工を取り上げ、ガラス板に微小な穴を形成しその内部形状と加工要因との関係を統計モデルで定式化し、多様な制約条件のもとで総合的最適化を行う。

**キーワード：**最適化、統計モデル、ステークホルダー、設計因子と戦略因子、超音波援用研削加工

#### 【Abstract】

We always need to satisfy the quality, cost and delivery in the manufacturing process. Therefore it is important to clear the relationship between cause and effect of the process using proper data analysis and make agreement between the stakeholders. In particular, we think strategic factors we defined in this research are important for both technical and management and these factors play an important role to get agreement with the stakeholder. One of our research features is the method using strategic factors effectively in the statistical data analysis and mathematical programming to get optimal solutions. In this research, we did designed experiment, analyzed the data of grinding with ultrasonic vibration, made the statistical model of the process and got the equation to optimize the system under the

consistent of many condition. The other feature is using replica method for small glass holes and non-contact measuring system to get precise data without direct measurement using sensing needle. Through this approach, we will discuss the total optimization of the system.

**Keywords** : optimization, statistical model, stakeholders, design factor and strategic factor, ultrasonic vibration assistant grinding.

## 1. はじめに

### 1.1 背景

加工工程 (manufacturing process) には、除去加工、成形加工、付加加工の3種がある。除去加工は対象物の一部を除去して目的形状や寸法を得る加工でマイナス加工とも呼ばれる。加工に使用されるエネルギーが機械的である場合を機械加工 (machining) と呼び、その他のエネルギーを使用する場合を特殊加工と呼ぶ。成形加工は鍛造や板金など対象物の形を変形、成形する加工であり、付加も除去もしないためゼロ加工とも呼ばれる。付加加工は溶接や接着など対象物が付加される加工でありプラス加工とも呼ばれる。

本研究は、回転するドリル (加工ツール) に超音波を援用した研削 (grinding) によるガラスの穴あけ除去加工を対象としている。加工に使用されるエネルギーは加工ツールを押し進める推進力、回転力、さらには加工ツールの刃先を超音波振動させる振動力でありいずれも機械的なものである。

このような機械加工は多くの産業分野で必要とされている。一例は、産業用計測機に使用されるガラス部品の穴開け加工、スマートフォン表面のガラス加工、航空機に使用されるグラファイトエポキシパネル (Graphite Epoxy Panel; GREP) や炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP) の穴あけ加工などがある。

### 1.2 先行研究

超音波援用研削加工を、硬脆材料であるガラスに適用し微小な穴や溝を作る事例が報告されている<sup>[9]</sup>。硬脆材料のガラス加工ではクラックやチッピングの発生を抑えることが難しいが、

超音波振動を援用することでそれらの発生を抑えた高品質の穴あけ加工が実現できることを示している。またGREPやCFRPの穴あけ加工にも超音波が援用された事例が報告されている<sup>[13]</sup>。CFRPはガラスほどの硬脆材料ではないが、炭素繊維が円滑な穴あけ加工の障害になり、また加工面に炭素繊維の切れ残りが発生して後工程の組み立てに悪影響を与えることがある。超音波振動を援用することで炭素繊維を効果的に切断し円滑な加工と加工面の品質向上を実現させることが可能であるとしている。

これらの研究は研削加工理論に基づき主に材料除去率等の加工専門特性を解析している。本研究では研削加工理論ではなく統計理論に基づいて穴半径などの形状や真円度などの工業規格を特性として取り上げ、この特性を統計モデルとして回帰式で表し、この回帰式を目的関数として数理計画法で最適化する方法を提案する<sup>[10]</sup>。統計モデル構築に必要なデータは実験計画法で取得する<sup>[7]</sup>。先行研究の中には実験計画法を使用した事例もある<sup>[12]</sup>。しかし統計モデルを作成し数理計画法で最適化したものはない。さらにトレードオフにある複数の特性をさまざまな条件を考慮した複数のシナリオのもとでそれぞれ最適化し、利害関係者 (ステークホルダー) との合意のもとに最適解を決定する方法を提案した報告はない。

微小な穴を評価する方法として、穴形状を直接観察するのではなく、穴形状を転写したレプリカを観察、計測する事例が報告されている<sup>[8]</sup><sup>[11]</sup>。その利点は穴の内側形状を外側形状に変換することで観察が容易になることである。またレプリカに十分な硬度があることを前提に接触式の表面粗さ計を使用して穴の内側の粗さや形状の測定を間接的に行うことが可能とな

る。穴形状の間接測定がレプリカ法の最大の特徴といえるが、レプリカが柔らかい場合には接触式の表面粗さ計が使用できない可能性がある。我々の研究では市販のレプリカキットを使用するが、このレプリカキットの使用説明書では接触式の表面粗さ計の使用を推奨していない。また本研究の対象となる微小穴のレプリカは接触式表面粗さ計の測定探子が正確にトレースできるほど大きくない。そこで我々の研究では非接触式のレーザー顕微鏡<sup>[3][5]</sup>またはレーザー式非接触外周測定機<sup>[4][6]</sup>を使用している。非接触であるためレプリカ表面の硬度は問題とならず、レーザー式であるため微小なレプリカを高精度に計測できる。特に外周測定機ではレプリカのシームレスな360度全周観察が可能であるため微小穴レプリカの測定には重要な測定機である。微小穴は直径が0.1~0.01mm程度までレプリカで転写可能であるが、柔軟なレプリカの剛性を考慮して本研究では直径1.0mmのレプリカを評価する。

実験計画法とレーザー顕微鏡または非接触外周測定機により計画的に取得したデータからは、複合的な3次元解析が可能である。測定探子を用いた接触式の表面粗さ計測は「線粗さ」の2次元計測であり、既にJISで詳細に規定されている。しかし、レーザー顕微鏡を使用した3次元計測としての「表面粗さ」ではISO25178で基本指針が示されているがまだJIS化されていない。線粗さ、面粗さはラフネスと呼ばれるが、その基準となる加工線や断面曲線、加工面はプロファイルと呼ばれる。統計的にはプロファイルが回帰式、ラフネスが残差に相当する。

さらに加工工程では技術的、工学的視点だけでなく経営的視点での解析が必要となる。多くの特性を同時に評価すると、特性間にトレードオフが発生し、利害関係者の間でさまざまな調整が必要となるため、実験を計画する段階で経営的視点を考慮した実験を計画する。我々の研究ではこの経営的視点を考慮した因子を戦略因子と定義し、その特徴を整理し、使い方を明らかにしている<sup>[1]</sup>。

我々の研究では、加工形状の統計モデル、レプリカ測定法、戦略因子の導入に独創性があるが、最終的にはこれらの多特性を複数同時に解

析し最適化する方法論を提案する<sup>[2]</sup>。従来研究ではガラス微小穴の形状に関する最適化の研究はなく、戦略因子による最適化もない。

### 1.3 研究目的

本研究の目的は以下の3点である。

1. 超音波援用研削加工で形成した微小ガラス穴の内部形状をレプリカに転写し、非接触測定機で測定してガラス穴内部形状を評価する統計モデルを作成すること。
2. 統計モデルには技術的、経営的に重要な戦略因子を導入し、戦略因子に焦点をあてた数理計画法による最適化を行うこと。
3. 最適化の結果を技術的、工学的、経営的に考察し、この方法の有効性を示すこと。

尚、本研究の過程を通じていくつかの課題点を抽出し今後の研究の参考とする。

## 2. 機械及び材料と評価方法

本研究で使用する加工機、加工ツール、ガラス材料、評価方法および測定機を以下に示す。

### 2.1 機械とツール送りモード

本研究で使用する超音波援用研削によるロータリー加工機の概要を図1に示す。ガラスに穴を開ける加工用ドリルは加工ツールと呼ばれるもので、ダイヤモンドの細かい砥粒が付着した中空円筒形の研削砥石で行う。加工ツールは回転しながら下方向に送られガラスを破碎しながらガラスを除去してゆく。また加工ツールの送りはStepモードとOne Wayモードがあり概要を図2に示す。超音波振動を援用することで援用しない場合と比べて回転数を1/10程度に小さくすることができ、加工機の寿命を延ばすとともに安定した加工が可能となる。

送りモードのうちStepモードは加工の途中で何度かツールを加工面から離し、研削粉であるガラススラッジを穴外部に放出させる動きを取り入れている。穴あけ加工におけるStepモードは典型的な工法で広く採用されている。ガラススラッジが効果的に除去されるため高速加工が可能である。しかし上昇したツールが下降して再び穴内部に入る時に穴側壁に接触しクラックやチッピングの発生確率が高くなる懸念があ

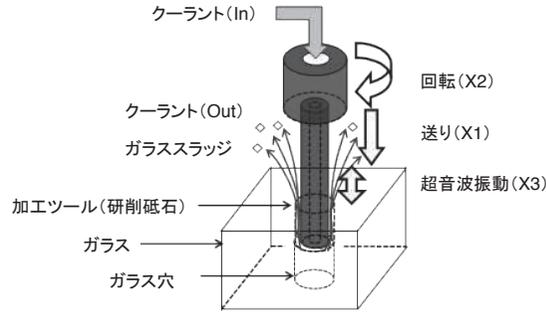


図1 ガラス穴研削加工の概要

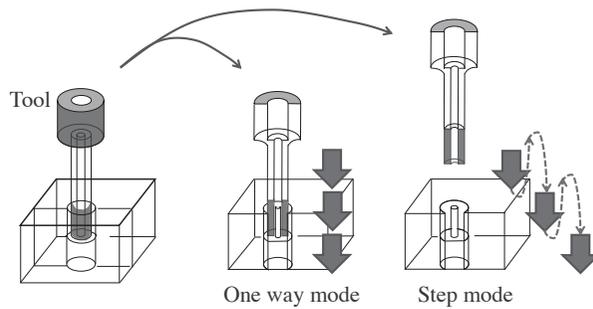


図2 ツールの送りモード

る。一方One-wayモードは一定の速度で一方方向に低速でツールを送るもので、Stepモードのようなツールと穴側壁との過度な接触はなく、加工品質は安定するが、加工速度はStepモードより小さい。今回我々が使用するツールは中空構造になっており、ツール内部からクーラント液が噴出するため、ツール上昇がなくともガラススラッジを有効に外部に排出できる。ツールの詳細は後述するが、ツールが送りモードに関係し、最終的には生産性にも関係するため、多くの利害関係者（ステークホルダー）との合意形成では忘れてはならないポイントである。

## 2.2 加工ツール

超音波援用研削による穴あけ加工では加工ツールと呼ばれるドリルを使用する。その拡大写真を図3に示す。内部が中空構造になっており、前述したように内部から冷却水が噴出して加工で発生するスラッジを排出する機能がある。

加工ツールは表面に微小な砥石すなわち砥粒

が付着しており、この砥粒がガラスを削る作用をもつ。砥粒の材質は加工する高脆材料に合わせて決定されるが、本研究ではガラスより硬いダイヤモンドを使用している。砥粒としてのダイヤモンドの重要な要素は、粒径、集中度、結合強度の3点がある。粒径は大きいものは研削能力が高いが加工面粗さは悪くなる。集中度は高すぎても低すぎても研削能力が低下するため最適値がある。結合強度が高いほどツールの寿命は長くなるが、加工面粗さが悪くなりチッピングやクラックの発生確率も高くなる。

ツール使用で重要な作業にツルーイングとドレッシングがある。前者は刃先を整えること、後者はツール表面に付着した切粉を除去することを意味する。本実験を通じてツルーイングとドレッシングは適宜実施されツール状況は一定に保たれていることを前提としている。

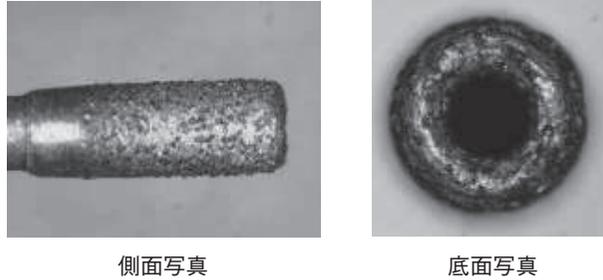


図3 加工ツールの写真

### 2.3 ガラス材料

本研究の対象は硬くて脆いガラスである。セラミックも同様の性質があり一般には硬脆材料と呼ばれている。これらの高脆材料の穴あけ加工を行う場合、超音波振動を援用しない場合は加工ツールは毎分2～40,000回転（rpm）の非常に高速な回転速度を必要とする。

加工途中で破碎したガラスはそれ自身が研削砥石の役目を持つため、高速回転で穴内部を2次的に研削し穴内部の形状品質を劣化させる。一方、超音波振動を援用した加工であれば、援用しないときと比べて回転速度は1/10程度まで下げられる。高脆材料の加工では回転速度を小さくして加工するメリットは非常に大きい。

ガラスに穴あけ加工を施した後の概要を図4に示す。ガラスにはチップング、クラックが発生し、穴形状も入り口が広がったテーパ形状になることが多い。前述したようにチップングやクラックは加工途中で発生したガラススラッジが2次的に加工面を研削することで発生することがある。超音波援用による回転数の低下はチップングやクラックの低減に一定の効果をもたらすが、その発生メカニズムは複雑である。

もう一つの重要な特性は穴径の広がりや穴の

歪みである。ツール先端がガラス表面に接触すると初期の段階ではツールの位置が定まらず、穴が広がる傾向がある。その後ガラス内部に侵入するに従って穴径はツール径とほぼ等しい大きくなる。しかし、ツールの送り速度や回転速度、超音波振動の影響などが複雑に関係すると、ガラス内部においてもツールの外周方向の振動が大きくなり穴径が広がる傾向がある。またこのような状態では真円度も低下する。穴入口から出口までが一定の円形状で一直線に加工された状態が望ましい。本研究ではこの穴直径と真円度の2特性を分析し、理想的な穴加工形状のための最適条件を探索する。

### 2.4 評価方法

#### 2.4.1 直接法

穴あけしたガラスの内部を直接評価する方法として、接触式の表面粗さ計の使用が考えられる。これは最も一般的な方法で、長い歴史があり信頼性も高いため、表面粗さに関するJIS規格も接触式測定機を前提にしている。この方法が使用可能であれば何ら問題はない。本研究では対象とする穴の直径が1 mm程度であり、その長さ（深さ）も4～5 mmであるため、接触

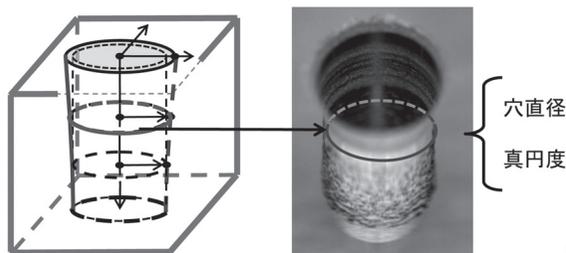


図4 ガラス穴形状の評価特性

式の表面粗さ計の測定端子が穴内部に入らない。測定探子が入るためには穴の直径は最低でも2mm程度は必要である。

このような内側形状を測定する場合は一般的に測定対象（ガラス）を切断してその断面を直接測定する方法がある。断面測定は接触式の測定機をそのまま使用できるメリットがあるが、測定サンプルを破壊するため破壊した領域は測定できない。さらにサンプル切断のための費用と時間が必要である。我々が提案する統計モデルによる方法はある程度のサンプル数が必要であり断面測定は事実上不可能である。また穴形状を全周にわたって解析する、すなわち3次元測定を行うとき断面測定ではサンプルが2分割されているため不可能である。そのため別の測定方法を検討する必要がある。

#### 2.4.2 間接法

本研究では直接法に替わる方法として穴形状をレプリカで転写し測定するレプリカ法を採用した。レプリカ法の利点は、安価で大量の測定サンプル（レプリカ）を容易に作成できること、穴の内側形状を外側形状に変換することで測定が容易になること、が挙げられる。欠点として、転写精度が悪い場合は測定誤差が大きくなり、最悪は評価そのものに意味がなくなること、収縮や膨張などの経時変化や、材料強度の不足による形状変化やハンドリング問題などがある。

今回使用したレプリカは、Struers社製レプリカRepliSet-F5である。カタログデータではレプリカの分解能は $0.1\ \mu\text{m}$ でレプリカ自身の縮小率は無視できるほど小さい。2液混合タイプで $25^{\circ}\text{C}$ における流動時間（working time）は混合後5分、硬化時間（cure time）は18分である。この時間はレプリカを作成するうえで非常に重要である。

レプリカ材料強度は定量評価していないが、ガラス穴から引き抜いてもレプリカの復元性がよいため形状変化することはない。ハンドリング性と、測定時のサポートを兼ね、レプリカ端面はプラスチックサポート用の円筒チューブで補強されている。本研究ではこのレプリカ法も研究対象の1つである。

## 2.5 測定機

ガラスは高脆材料であると同時に透明であることから非接触の光学式測定は困難とされてきた。また本研究ではガラス穴の内部を計測する必要がある。これらの制約を踏まえて使用する測定機を検討した。

### 2.5.1 接触式測定機

2.4.1で述べたようにガラス穴を直接計測する方法は最も一般的で信頼性が高い。特に接触式の表面粗さ計はJIS規格において粗さ測定に規定されており接触式測定を採用する有力な根拠となっている。

接触式の粗さ測定機では、例えばTAYLOR HOBSON社の“タリサーフ”シリーズが有名である（同社は非接触式の測定機も提供している）。測定端子が測定対象物表面を接触しながら測定しサブミクロン精度の測定が可能である。この方式は測定対象物の外側を計測することが大前提であり、本研究のような穴内部の内側形状を接触式で測定することは困難である。またレプリカのような柔らかい材料、さらには微小な対象の測定も困難である。

### 2.5.2 非接触式測定機

我々の研究ではレーザー式非接触測定機の使用が大前提となる。前述したように接触式測定は微小レプリカでは不可能である。今回我々が使用した測定機は三鷹光器製非接触形状測定機MLP-2である。この装置は対物レンズユニットにレーザオートフォーカス（AF）センサが組み込まれている。レプリカはX（分解能 $0.1\ \mu\text{m}$ ）、Y（同 $0.1\ \mu\text{m}$ ）、 $\theta$ （同 $0.001^{\circ}$ ）の3軸ステージ上にセットされ、対物レンズユニットがAF（ $0.01\ \mu\text{m}$ ）とZ（ $0.1\ \mu\text{m}$ ）の2軸上で動作してレプリカの外側形状を測定する。測定は自動で行われ、X、Y、ZのデータがCSVデータとして出力され、それを解析することになる。

## 3. 理論と実験

### 3.1 加工形状の統計モデル

研削加工で形成されたガラス穴の概要は図4のようであり、評価特性として直径と真円度がある。それらをレプリカ外周形状に変換し、非

接触形状測定機MLP-2で測定する。ガラス穴直径はレプリカ直径になるが、CSVデータから得られるのはレプリカ半径であるため、レプリカ半径を評価特性 $y_1$ とし、真円度を $y_2$ とする。基本的には使用するツールの外径でガラス穴直径が決定し、ツールの砥粒度や加工条件の良否が真円度を決定すると考えられる。加工条件である送り測定、回転速度、超音波振動エネルギー、加工ツールを送るときのモードの関係は図5のようになる。

半径 $y_1$ は加工条件によって決まる $r$ と加工条件に無関係な誤差 $\varepsilon_r$ から構成されているとする。真円度 $y_2$ は加工条件によって決まる $R$ と加工に無関係な誤差 $\varepsilon_R$ から構成されているとする。これが式(1)、式(2)であり、設計因子 $x$ と戦略因子 $S$ を式(3)、式(4)と表すと、 $r$ と $R$ は式(5)、式(6)となる。 $Z$ はダミー変数で、戦略因子 $S$ が水準1のときに1を、水準2のときに-1をとる。

式(5)は半径のモデル式であり、戦略因子を含まない平均パートAと戦略因子を含む乖離パートSから構成されている。式(6)は真円度のモデル式であり同様にAとSを含む。式(7)から(10)は設計因子によって構成される項である。設計因子の組合せで乖離パートを0にできれば平均パートで目標値への合わせ込みが可能となる。この形式でモデル化すること

は全データを使用して複数の戦略因子を含む1つのモデル式を作れるため、戦略因子ごとに個別にモデル式を作るより推定精度が向上する利点がある。

### 3.2 研削加工と評価の概念図

図5はガラス穴研削加工とその評価プロセスの概念図でもある。中央の研削加工プロセスの左側には加工の入力に当たるツール径や砥粒度が記載されている。ミクロの視点ではツールがガラス加工を行うが、マクロの視点ではツールは送り速度( $x_1$ )、回転数( $x_2$ )、超音波振動( $x_3$ )、さらには送りモード(S)の影響を受けている。因果を考えるとツール径でガラス穴直径が決まり、ツールの粒度や加工条件の良否で真円度が決まると考えられるため、この2つを入力(Input)と考えることになる。ツールは同じものを使用するためツール径も砥粒度も固定されている、すなわち固定出力である。プロセスの右側に出力(Output)としてのガラス穴と真円度がある。ガラス穴を直接評価することができないためレプリカに転写し、その半径と真円度を評価した。

### 3.3 研削加工と因子の役割図

図5は加工の概念図であるが因子役割図として再確認する。すなわち、加工機の送り速度

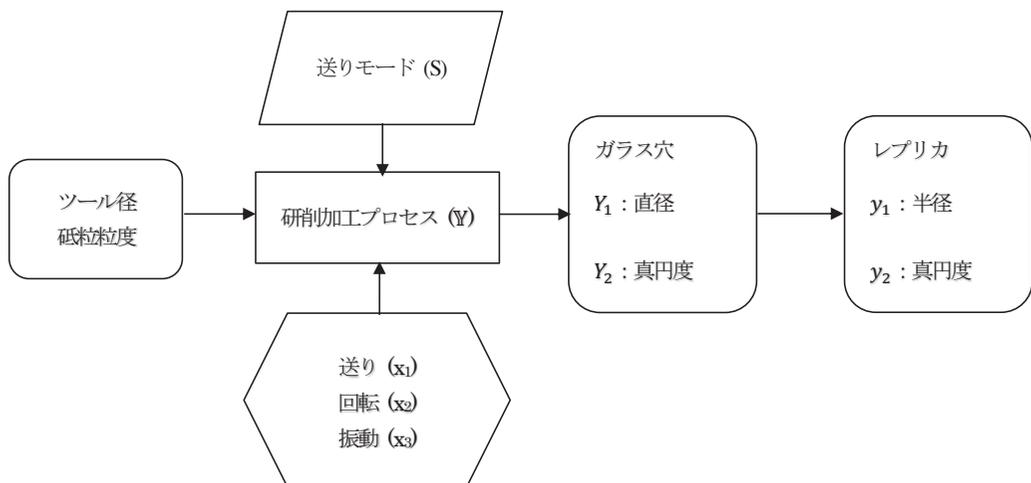


図5 ガラス穴研削加工と評価プロセスの概念図

( $x_1$ )、回転数 ( $x_2$ )、超音波振動 ( $x_3$ ) は最適水準を設定することが重要であり、設計因子である。因子役割図では設計因子は研削加工の下側に六角形の箱の中に記述されている。一方ツールの送りモード (S) は様々な制約の中で、多くのステークホルダーとの合意をもとにその水準を決める必要がある。その意味で戦略因子と定義されている。戦略因子は研削加工の上側に菱形の箱の中に記述されている。

ツール径と砥粒粒度はガラスの直径と真円度に関係する因子である。すなわちツール径とガラス直径は比例関係にあり、適切な粒度が真円度の向上に寄与する。

### 3.4 最適化のための実験

ガラス穴加工は前述したように機械とツール送りモード、加工ツール、ガラス材料、評価方法が重要である。加工機は超音波振動を援用した研削加工機で難削材のガラス穴加工を、様々

な制約を考慮して最適化させる。

加工ツールも非常に重要である。ツールのダイヤモンドがガラスを研削するためこの研削メカニズムが加工品質を左右する。今回の実験では加工ツールは生産に使用している最も信頼のあるものを1種類に固定し、そのもとで最適化を行った。

材料のガラスは硬くて脆い硬脆材料であり典型的な難削材であるため、加工面にチッピングやクラックが発生しやすい。また穴入口部分の穴径は広がりやすくまた歪みやすい。生産性を上げるための加工条件が穴の広がりや歪みの発生原因となる場合もある。

今回は特にガラス穴入口から一定量内側の穴内部の外周形状を評価した。外周形状はガラス穴直径  $Y_1$  および穴の真円度  $Y_2$  を評価する。それらは直接評価できないためレプリカにより間接的に評価する。すなわちレプリカの半径  $y_1$  およびレプリカの真円度  $y_2$  を評価する。ここでは

$$y_1 = r + \varepsilon_r \quad (1)$$

$$y_2 = R + \varepsilon_R \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \quad (3)$$

$$S = \{Z; -1, 1\} \quad (4)$$

$$r(\mathbf{x}; S) = A_r(\mathbf{x}) + S_r(\mathbf{x})Z \quad (5)$$

$$R(\mathbf{x}; S) = A_R(\mathbf{x}) + S_R(\mathbf{x})Z \quad (6)$$

$$A_r(\mathbf{x}) = A_r(x_1, x_2, x_3) = C_r + \sum_{i=1}^3 C_{ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 C_{rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (7)$$

$$S_r(\mathbf{x}) = S_r(x_1, x_2, x_3) = D_r + \sum_{i=1}^3 D_{ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 D_{rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (8)$$

$$A_R(\mathbf{x}) = A_R(x_1, x_2, x_3) = C_R + \sum_{i=1}^3 C_{Ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 C_{Rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (9)$$

$$S_R(\mathbf{x}) = S_R(x_1, x_2, x_3) = D_R + \sum_{i=1}^3 D_{Ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 D_{Rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (10)$$

穴からレプリカへの転写は理想的に行われていると仮定する。前述するようにレプリカの分解能は $0.1 \mu\text{m}$ である。

### 3.4.1 設計因子

研削加工機械の加工因子である送り速度 ( $x_1$ )、回転速度 ( $x_2$ )、超音波振動を与える発振機の出力 ( $x_3$ ) をそれぞれ2水準で評価する。概要を表1に示す。 $x_1 \sim x_3$ とも穴加工形状に主効果として効果があり、さらに組合せ効果としての交互作用も大きいと考えられる。特に $x_1$ と $x_3$ の交互作用は固有技術の知見からその存在が明らかでかつ重要である。またそれ以外の交互作用の存在も確認できれば固有技術の視点からも大きな成果となる。

これらの2因子交互作用を独立に評価するために $x_1 \sim x_3$ に対しては直交表計画L8のResolution Vの実験を計画する。 $x_1 \sim x_3$ の3因子はガラス穴加工形状に対して最適水準を設定することが重要であり、その意味で設計因子である。

因子の水準は現在の生産条件を基準に設定した。ただし送り速度については加工の品質を高めること、ツールの破損を防ぐことを目的として生産条件と同等以下とした。

設計因子は最適水準を選択するための因子である。通常最適水準は水準間に存在するものだが、水準の外に存在する場合もある。統計モデルを用いるとこのような場合にも外挿解を探索することで最適水準の選択が可能であるが、本研究の目的ではないため外挿解の検討はしない。

### 3.4.2 戦略因子

次に加工要因の中で送りモードを検討する。本研究では、送りモードは2水準として表2に示す。これらは前述の機械条件と異なり単純に最適水準を設定（設計）することはせず、最適化の中でロバスト（頑健）性や個別特性を評価する指標として検討する。経営的にもステークホルダーとの合意形成に重要であり戦略因子と定義する。

戦略因子の水準選択には多くのシナリオがある。第1のシナリオは、戦略因子の水準全てを選択し、その全てが望ましい結果となるよう設計因子の統一解を求める対応である。この対応を統一対応とよぶ。このときの戦略因子は攪乱因子であり最適化は頑健設計となる。

第2のシナリオは、戦略因子の水準ごとに最適解を求めることであり、その対応を個別対応とよぶ。このとき戦略因子は標示因子となる。

第3のシナリオは、個別対応の結果戦略因子の優劣が決まりその水準を一つに限定することであり、その対応を限定対応とよぶ。本研究では穴加工を例にとり、戦略因子とシナリオの関係を具体的に考察した。

### 3.4.3 実験計画

設計因子は3因子でそれぞれの交互作用まで評価するために直交表計画L8のResolution Vの実験を計画した。 $x_1 \sim x_3$ の3因子はガラス穴加工形状に対して最適水準を設定することが重要である。

一方戦略因子である送りモードは2水準であるが、各水準における半径や真円度の値、それらの平均や範囲が重要である。理想的には半径の平均が小さく、かつ範囲が小さく、さらには

表1 設計因子として機械条件の3因子

因子	名称	水準		主効果/交互作用		
		1	2	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$x_1$	送り (mm/m)	0.5	1.5	◎	—	—
$x_2$	回転 (×krpm)	2.5	3.5	○	◎	—
$x_3$	振動 (%)	40	70	○	○	◎

◎：主効果，○：交互作用，—：対象外

表2 戦略因子としてのMode

		水準		主効果
因子	名称	1	2	
S	Mode	One way	Step	○

表3 直積実験の実験計画表

No	設計因子			戦略因子			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Mode: S=1		Mode: S=2	
				$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$
1	1	1	1	$y_1(1, 1, 1; 1)$	$y_2(1, 1, 1; 1)$	$y_1(1, 1, 1; 2)$	$y_2(1, 1, 1; 2)$
2	1	1	2	$y_1(1, 1, 2; 1)$	$y_2(1, 1, 2; 1)$	$y_1(1, 1, 2; 2)$	$y_2(1, 1, 2; 2)$
3	1	2	1	$y_1(1, 2, 1; 1)$	$y_2(1, 2, 1; 1)$	$y_1(1, 2, 1; 2)$	$y_2(1, 2, 1; 2)$
4	1	2	2	$y_1(1, 2, 2; 1)$	$y_2(1, 2, 2; 1)$	$y_1(1, 2, 2; 2)$	$y_2(1, 2, 2; 2)$
5	2	1	1	$y_1(2, 1, 1; 1)$	$y_2(2, 1, 1; 1)$	$y_1(2, 1, 1; 2)$	$y_2(2, 1, 1; 2)$
6	2	1	2	$y_1(2, 1, 2; 1)$	$y_2(2, 1, 2; 1)$	$y_1(2, 1, 2; 2)$	$y_2(2, 1, 2; 2)$
7	2	2	1	$y_1(2, 2, 1; 1)$	$y_2(2, 2, 1; 1)$	$y_1(2, 2, 1; 2)$	$y_2(2, 2, 1; 2)$
8	2	2	2	$y_1(2, 2, 2; 1)$	$y_2(2, 2, 2; 1)$	$y_1(2, 2, 2; 2)$	$y_2(2, 2, 2; 2)$

真円度の平均が小さく、かつ範囲が小さくなるような設計因子の組合せを求めることが重要である。この実現を目指すものが頑健設計であり戦略因子の統一対応である。さらには戦略因子の個別対応、限定対応も検討する。これらの対応のために、設計因子は内側に、戦略因子は外側に配置した直積実験を計画した。計画した直積実験を表3に示す。

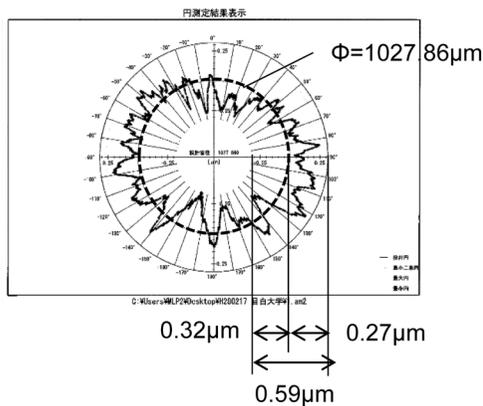
2水準であることから全16種類の穴加工を行った。形成した16個の穴にそれぞれレプリカ樹脂を流し、硬化後に引抜き、非接触測定機で穴径を測定した。測定結果の一例を図6 (a), (b)に示す。測定機の標準出力は直径であるが、3.1で示したようにCSVデータによる数値解析は半径で行う。

図6 (a) は実験No1, モードを水準1としたときの結果であり穴径が小さい例である。図6 (b) は実験No2, モードを水準1としたときの結果であり穴径が大きい例である。詳細な解析は次節で行う。

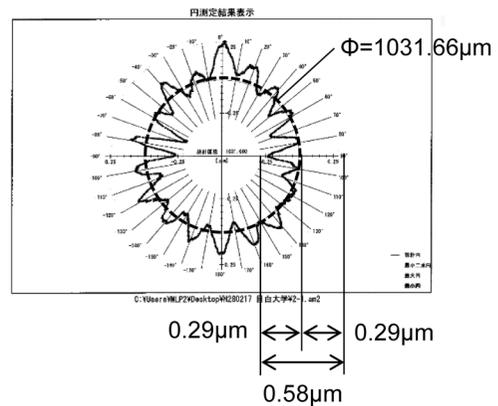
4. 結果と考察

4.1 実験結果

設計因子が3因子2水準で戦略因子が1因子



(a) 実験No1, モード=水準1



(b) 実験No2, モード=水準1

図6 レプリカ測定結果の一例

## 4.2 実験結果の解析

穴加工形状を統計モデルで表すこと、すなわちモデリングでは、推定される半径は式(1)、真円度は式(2)で表され、その推定式は式(5)、式(6)の形式で求める。この式は戦略因子を含まない平均パートと、戦略因子を含む乖離パートで構成されている。戦略因子Sは式(5)式(6)の中でダミー変数Zで表わされ、Sの水準1でZ=1、水準2でZ=-1とする。具体的には半径が式(7)式(8)、真円度が式(9)式(10)となる。

実験データは表3の $y_1(1, 1, 1; 1)$ から $y_2(2, 2, 2; 2)$ であり、変数選択後の半径の分散分析表を表4に、真円度の分散分析表を表5に示す。高次の要因が有意である場合はEffect Ordering Principle (EOP)に基づき低次の要因も有意とみなして選択している。

この結果、半径に影響を与える要因は表4に示す5因子であることが判明した。これら5因

子を式(7)式(8)にあてはめ、具体的に書き出して表示したものが式(12)式(13)である。

特徴的なことは、主効果のうち $x_1$ と $x_3$ は有意であるが $x_2$ は有意でなく、その結果 $x_2$ である回転数は半径に影響を与えず、式の中にも入らないことである。さらに $x_1$ は平均パートの $A_r$ および乖離パートの $S_r$ に出現するが、 $x_3, x_1x_3$ は平均パートの $A_r$ のみに出現する。ここで式(12)式(13)の偏回帰係数(パラメータ)は、別に求めた数値を代入している。

同じく戦略因子S、 $Sx_1$ は式(8)の構成要素であり、それを書き出すと式(13)になる。それぞれに関係しているパラメータは、別に求めた数値を代入している。

半径の平均パートは2つの主効果と1つの2因子交互作用から構成されているが、乖離パートは主効果1つだけで構成されている。半径の統計モデルは比較的単純な構造であることがわ

$$r(\mathbf{x}; S) = A_r(\mathbf{x}) + S_r(\mathbf{x})Z \quad (11)$$

$$A_r(\mathbf{x}) = A_r(x_1, x_2, x_3) = C_r + \sum_{i=1}^3 C_{ri}(x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 C_{rij}(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (11)$$

$$= 514.6162 - 0.2336(x_1 - \bar{x}_1) + 0.6646(x_3 - \bar{x}_3) - 1.3988(x_1 - \bar{x}_1)(x_3 - \bar{x}_3)$$

$$S_r(\mathbf{x}) = S_r(x_1, x_2, x_3) = D_r + \sum_{i=1}^3 D_{ri}(x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 D_{rij}(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (12)$$

$$= 0.3562 + 0.3419(x_1 - \bar{x}_1)$$

(13)

表4 半径の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	P値
$x_1$	0.2183	1	0.2183	0.983	0.3448
$x_2$	1.7669	1	1.7669	7.955	0.0181
$x_1x_3$	1.9565	1	1.9565	8.809	0.0141
S	2.0299	1	2.0299	9.140	0.0128
$Sx_1$	0.4675	1	0.4675	2.105	0.1775
モデル	6.4392	5	1.2878	5.798	0.0091
誤差	2.2210	10	0.2221		
全体	8.6602	15			

表5 真円度の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	P値
$x_1$	0.0345	1	0.0345	0.224	0.6528
$x_2$	1.1144	1	1.1144	7.238	0.0360
$x_3$	2.6509	1	2.6509	17.218	0.0060
$x_1x_2$	0.0144	1	0.0144	0.094	0.7698
$x_1x_3$	1.0969	1	1.0969	7.124	0.0371
S	0.0196	1	0.0196	0.127	0.7338
$Sx_1$	0.0435	1	0.0435	0.283	0.6140
$Sx_2$	0.6189	1	0.6189	4.019	0.0918
$Sx_1x_2$	1.3521	1	1.3521	8.782	0.0252
モデル	6.9453	9	0.7717	5.012	0.0315
誤差	0.9238	6	0.1540		
全体	7.8691	15			

かる。

次に、真円度に影響を与える因子は表5に示す9因子であることが判明した。このうち平均パートの $A_R$ には3つの主効果と2つの交互作用が関係しており、乖離パートの $S_R$ は2つの主効果と1つの交互作用が関係している。

これら全てに関係している因子は $x_2$ の回転速度である。前述した半径に影響を与える因子に回転速度は含まれていない。このことから半径と真円度を同時に最適化する因子として回転速度はその役目をもっていないことがわかる。

以上より、半径と真円度の2特性を同時に最適化するための最も重要な因子は $x_1$ の送り速度である。送り速度は半径においても真円度においても戦略因子と交互作用をもつ。このことから戦略因子による総合的最適化の重要な因子は送り速度であることが理解できる。

真円度の統計モデルは半径と比較して有意な

要因の数が多い。さらに真円度では送り速度と回転速度に送りモードを加えた3因子交互作用が存在する。3因子交互作用は半径の統計モデルには存在しない。これらを総合すると、真円度は半径と比較してやや複雑なモデルであることが理解できる。

#### 4.3 最適化のための要約関数

半径および真円度をモデル化する設計因子と戦略因子の関数が得られた。この2つの関数を目的関数とした最適化のシナリオはいくつかある。その1つが、戦略因子によらず望ましい半径と真円度が得られる設計因子を探索することである。戦略因子の水準によらず穴径がツール径に近いものが理想であるが、砥粒加工であるため、多数の砥粒の研削痕がガラス穴内側に形成され、穴径はツール径に完全に等しくなることはない。ツール径と穴径との差、すなわち加

$$R(\mathbf{x}; \mathbf{Z}) = A_R(\mathbf{x}) + S_R(\mathbf{x})Z \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A_R(\mathbf{x}) &= A_R(x_1, x_2, x_3) = C_R + \sum_{i=1}^3 C_{Ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 C_{Rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \\ &= 1.1682 - 0.0928(x_1 - \bar{x}_1) + 0.5278(x_2 - \bar{x}_2) - 0.8141(x_3 - \bar{x}_3) \\ &\quad + 0.1202(x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2) - 1.0473(x_1 - \bar{x}_1)(x_3 - \bar{x}_3) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} S_R(\mathbf{x}) &= S_R(x_1, x_2, x_3) = D_R + \sum_{i=1}^3 D_{Ri} (x_i - \bar{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 D_{Rij} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \\ &= 0.0349 - 0.1044(x_1 - \bar{x}_1) + 0.3934(x_2 - \bar{x}_2) - 1.1628(x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2) \end{aligned} \quad (16)$$

工による穴の広がりはある程度許容される。

重要なことは、加工条件により穴がどの程度広がるか把握することである。さらに穴の広がりを出来るだけ小さくしたとき、真円度がどの程度変化するかを把握することも重要である。真円度と直径はトレードオフの関係にあるのか、同じ傾向にあるのか、そのとき送りモードはどのように影響するのか、新たな固有技術情報を得ることができる。

このような最適化を実行するために半径は式(17)、真円度は式(18)の要約関数を定義する。これらの関数を目的関数として使うことで戦略因子によらない最適化を実行できる。

$$\begin{aligned} G_{r\_Ave}(\mathbf{x}) &= \{r_0(\mathbf{x}; 1) + r_0(\mathbf{x}; 2)\}/2 \\ G_{r\_Max}(\mathbf{x}) &= \text{Max}\{r_0(\mathbf{x}; 1), r_0(\mathbf{x}; 2)\} \\ G_{r\_Min}(\mathbf{x}) &= \text{Min}\{r_0(\mathbf{x}; 1), r_0(\mathbf{x}; 2)\} \\ G_{r\_Ran}(\mathbf{x}) &= G_{r\_Max}(\mathbf{x}) - G_{r\_Min}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} G_{R\_Ave}(\mathbf{x}) &= \{R_0(\mathbf{x}; 1) + R_0(\mathbf{x}; 2)\}/2 \\ G_{R\_Max}(\mathbf{x}) &= \text{Max}\{R_0(\mathbf{x}; 1), R_0(\mathbf{x}; 2)\} \\ G_{R\_Min}(\mathbf{x}) &= \text{Min}\{R_0(\mathbf{x}; 1), R_0(\mathbf{x}; 2)\} \\ G_{R\_Ran}(\mathbf{x}) &= G_{R\_Max}(\mathbf{x}) - G_{R\_Min}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (18)$$

#### 4.4 最適化

レプリカの直径がツール経の値に近く、真円度0が理想である。本事例ではツール経は未知のためレプリカの直径は最小値が理想と考える。さらに、直径と真円度はトレードオフの関係にあるのか、同じ傾向にあるのかを経営的な視点から、加工モードとの関係で調査することも重要である。すなわち、異なるモードでも穴径と真円度を同時に最小化する共通の最適条件

が存在すれば、品質、コスト、生産性に大きく寄与する。

まず半径の範囲、半径の平均、真円度の範囲、真円度の平均の4特性についてそれぞれ最適解を求めた。その過程で有益な情報を得た後、総合最適化として4特性から複数の特性を選び最適化した。使用した最適化ソフトはHope add-in for JMP Ver.20161003Alphaである。

##### 4.4.1 半径の範囲を最小化

モード1とモード2における半径の差、すなわち半径 $r$ の範囲(Range)を最小にすれば、モードに依存しない穴径が得られる。この最適化は式(19)のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & G_{r\_Ran}(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x} \in DV \end{aligned} \quad (19)$$

結果を表6の「範囲を最小」に示す。式(13)から範囲は送り速度 $x_1$ だけで決まるため $x_1$ に\*を付けている。最適解は $x_1 = 1$ でこのときモード1とモード2における半径の差は最小値0.371となる。 $x_2$ と $x_3$ はこの最適化に関係しないため、その値を水準平均の1.5としてカッコ付きで示した。特性値はすべてこれらの数値から計算し、最適化の対象外で参考値とすべきものにはカッコを付けてある。

##### 4.4.2 半径の平均を最小化

モード1とモード2における半径 $r$ の平均(Average)を最小にする最適化は式(20)のようになる。式(12)から平均は送り速度 $x_1$ と超音波振動 $x_3$ で決まるため両者に\*を付けた。

表6 半径についての最適化

項目	半径範囲を最小	半径平均を最小
$x_1$	1.0*	1.0*
$x_2$	(1.5)	(1.5)
$x_3$	(1.5)	1.0*
$G_{r\_Ran}(x^*)$	0.371	(0.371)
$G_{r\_Ave}(x^*)$	(514.7)	514.1
$G_{R\_Ran}(x^*)$	(0.174)	(0.174)
$G_{R\_Ave}(x^*)$	(1.215)	(1.622)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & G_{r\_Ave}(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x} \in DV \end{aligned} \quad (20)$$

結果を表6の「平均を最小」に示す。最適解は $x^* = (x_1, x_2, x_3) = (1, 1.5, 1)$ で最適値は $G_{r\_Ave}(x^*) = 514.1$ である。 $x_1 = 1$ は範囲を最小化する最適値でもある。また $x_3$ は範囲には関係しないため $x_3 = 1$ としても範囲の最適化に支障はない。戦略因子に焦点をあてた半径の最適化では送り速度 $x_1$ が重要であることが判明した。

#### 4.4.3 真円度の範囲を最小化

真円度の範囲を最小にすれば、歪みがモードに依存しない加工が可能となる。この最適化は式(21)のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & G_{R\_Ran}(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x} \in DV \end{aligned} \quad (21)$$

結果は表7の「範囲を最小」に示す。この条件は半径の最適化とは異なり、送り速度、回転速度をいずれも大きくする条件である。このとき送りモードの水準によらず真円度の範囲を0とすることができ、そのときの真円度の平均は $G_{R\_Ave}(x^*) = 1.068 \mu\text{m}$ となる。

#### 4.4.4 真円度の平均を最小化

真円度の平均を最小にすることは2つのモードを併用するときには重要である。この最適化は式(22)のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & G_{R\_Ave}(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x} \in DV \end{aligned} \quad (22)$$

結果は表7の「平均を最小」に示す。この条件は真円度の範囲を最小化したときと $x_2$ の値が異なる。 $x_2$ は半径に対する影響はないが、真円度に対する影響が大きい。このように解析結果から加工のメカニズムについての知見を得ることも可能である。

#### 4.4.5 半径の平均を制約にして半径の範囲を最小化

2つのモードを併用する加工ラインでは、モード1とモード2の半径の平均をある程度小さくしたうえで範囲を最小化することが現実的である。ここでは4.4.1の結果を参考に半径の平均を $514.4 \mu\text{m}$ 以下として範囲を最小化する。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & G_{r\_Ran}(\mathbf{x}) \\ \text{Subject to} \quad & G_{r\_Ave}(\mathbf{x}) \leq 514.4 \\ & \mathbf{x} \in DV \end{aligned} \quad (23)$$

結果を表8の「平均を制約、範囲を最小」に示す。これは4.4.2「平均を最小化」の最適解と同じである。また平均の値も制約条件である $514.4$ より小さい $514.1$ が得られている。この値は平均の最小値であり、平均と範囲を同時に最適化できる可能性がある。

表7 真円度についての最適化

項目	真円度範囲を最小	真円度平均を最小
$x_1$	2.0*	2.0*
$x_2$	1.4*	1.0*
$x_3$	(1.5)	2.0*
$G_{r\_Ran}(x^*)$	(1.054)	(1.054)
$G_{r\_Ave}(x^*)$	(514.5)	(514.5)
$G_{R\_Ran}(x^*)$	0.000	0.154
$G_{R\_Ave}(x^*)$	(1.068)	0.683

表8 範囲または平均を制約とした半径の最適化

項目	半径平均を制約 範囲を最小	半径範囲を制約 平均を最小
$x_1$	1.0*	1.0*
$x_2$	(1.5)	(1.5)
$x_3$	1.0*	1.0*
$G_{r,Ran}(x^*)$	0.371	0.371
$G_{r,Ave}(x^*)$	514.1	514.1
$G_{R,Ran}(x^*)$	(0.174)	(0.174)
$G_{R,Ave}(x^*)$	(1.622)	(1.622)

#### 4.4.6 半径の範囲を制約して半径の平均を最小化

2つのモードを併用する加工ラインで、半径についてモード1とモード2の範囲を小さくしたうえで平均を最小化することも重要である。ここでは半径の範囲を0.5  $\mu\text{m}$ 以下として最適化を行う。

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && G_{r,Ave}(\mathbf{x}) \\
 &\text{Subject to} && G_{r,Ran}(\mathbf{x}) \leq 0.5 \\
 &&& \mathbf{x} \in DV
 \end{aligned} \tag{24}$$

結果を表8の「範囲を制約、平均を最小」の列に示す。これは4.4.2と同じである。半径の最適化については、範囲を制約条件として平均を最小化しても、平均を単独で最小化したときと同じである。

平均を制約にした場合、範囲を制約にした場合、いずれの場合でも半径の範囲と平均の最適化は、送り速度 $x_1$ と超音波振動 $x_3$ を最低の水準値にセットすることで同時に実現できることが示された。

#### 4.4.7 真円度の平均を制約して真円度の範囲を最小化

真円度の範囲は最小値0をとることができるがその時の平均は0.839である。一方真円度の平均は0.683が最小である。そこで真円度の平均を0.7以下に制約したうえで範囲を最小化する最適化は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && G_{R,Ran}(\mathbf{x}) \\
 &\text{Subject to} && G_{R,Ave}(\mathbf{x}) \leq 0.7 \\
 &&& \mathbf{x} \in DV
 \end{aligned} \tag{25}$$

結果は表9の「平均を制約、範囲を最小」の列に示す。送り速度は1.89、回転速度は1、超音波出力は2が最適解である。これは真円度の平均と範囲とのバランスを考えたとえでの範囲を最小化する最適化である。その時の最適解は、送り速度を大きく、回転速度を小さく、超音波出力を大きくする条件である。

#### 4.4.8 真円度の範囲を制約して真円度の平均を最小化

2つの加工モードを存続させて加工ラインを構築するとき、真円度の範囲を0.15に緩和して制約条件を設定すれば、平均値をより最小化させることができる。その最適化は下記のようになる。

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && G_{R,Ave}(\mathbf{x}) \\
 &\text{Subject to} && G_{R,Ran}(\mathbf{x}) \leq 0.15 \\
 &&& \mathbf{x} \in DV
 \end{aligned} \tag{26}$$

結果を表9の「範囲を制約、平均を最小」の列に示す。真円度の範囲を0.15とすることは制約条件を緩和することになり、それに応じて真円度の平均値も小さくすることができることを確認した。真円度についてはは範囲、平均がトレードオフの関係にあることが表9から理解で

表9 範囲または平均を制約とした真円度の最適化

項目	真円度平均を制約 範囲を最小	真円度範囲を制約 平均を最小
$x_1$	1.89*	2.00*
$x_2$	1.00*	1.00*
$x_3$	2.00*	2.00*
$G_{r,Ran}(x^*)$	0.976	1.052
$G_{r,Ave}(x^*)$	514.6	514.5
$G_{R,Ran}(x^*)$	0.044	0.150
$G_{R,Ave}(x^*)$	0.700	0.683

きる。真円度の要因解析は考察で述べる。

#### 4.4.9 半径を最小にする

戦略因子Sの水準1と水準2それぞれに対して半径を最小にする条件を探索し、どちらの戦略因子が優れているかを評価する。そのための最適化の条件は下記となる。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && r(x; S) \\ & \text{Subject to} && \mathbf{x}, S \in DV \end{aligned} \quad (27)$$

結果は表10に戦略因子の水準ごとに示す。またカッコで囲まれていない数値が最適化の対象であり、半径の最小値が示されている。カッコで囲まれている数値は最適化の結果として得られた数値である。表10から明らかのように、戦略因子によらず半径が最小となる最適解は  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 1.5, 1)$  である。また戦略因子の水準2の半径が水準1より小さいことから水準2が優れている。

表10 S=1およびS=2のときの半径の最小化

項目	S=1	S=2
$x_1$	1.0*	1.0*
$x_2$	(1.5)	(1.5)
$x_3$	1.0*	1.0*
$r(x; 1)$	514.24	(514.24)
$r(x; 2)$	(513.87)	513.87
$R(x; 1)$	(1.709)	(1.709)
$R(x; 2)$	(1.535)	(1.535)

#### 4.4.10 真円度を最小にする

戦略因子Sの水準1と水準2それぞれに対して真円度を最小にする条件を探索し、どちらの戦略因子が優れているかを評価する。そのための最適化の条件は下記となる。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && R(x; S) \\ & \text{Subject to} && \mathbf{x}, S \in DV \end{aligned} \quad (28)$$

結果は表11に戦略因子の水準ごとに示す。カッコで囲まれていない数値が最適化の対象であり、真円度の最小値が示されている。カッコで囲まれている数値は最適化の結果として得られた数値である。表11では、戦略因子Sが水準1のとき、真円度が最小となる最適解は  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 1, 2)$  であり真円度は0.435である。一方、戦略因子Sが水準2のとき、真円度が最小となる最適解は  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 2, 2)$  であり真円度は0.205である。両者を比較すると戦略因子の水準2のときに真円度は最小となり最適化される。

表11 S=1およびS=2のときの真円度の最小化

項目	S=1	S=2
$x_1$	1.0*	1.0*
$x_2$	1.0*	2.0*
$x_3$	2.0*	2.0*
$r(x; 1)$	(515.60)	(515.60)
$r(x; 2)$	(515.23)	(515.23)
$R(x; 1)$	0.435	(1.354)
$R(x; 2)$	(1.236)	0.205

#### 4.5 考察

半径と真円度の2つの特性についての統計モデルを構築した。このモデル式の中に、戦略因子であるツールの送りモードを入れ、複数のシナリオを用意して最適化を行った。

最適化として一般的に次の2つの対応がある。1つは、異なる戦略因子の水準に対して最適な設計因子を1つに決めることである。One-wayモードであってもStepモードであっても、同じ送り速度、同じ回転速度、同じ振動として統一した設計因子の値、すなわち最適解を求める。このような対応は統一対応である。統一対応であれば管理すべき加工条件が1つであるから加工ラインを維持管理しやすい。

もう1つは、戦略因子の水準ごとに最適な設計因子の値を個別に求めるものである。このような対応は個別対応である。個別に求めることでOne-wayモードおよびStepモードそれぞれに最も優れた加工特性が得られる。しかし個別に求めることで加工条件が複数存在することになり工程管理は複雑になる。本研究では戦略因子は2水準であったが、水準が増えれば水準の数だけ最適解が存在し、最適解の数だけ管理項目は増えるためコストアップになりやすい。

本研究では、まず初めに半径および真円度の範囲および平均を最小化する最適化を実施した。半径は基本的にツールの外径で決まるためモデルも単純な構造となった。また、回転速度が半径に影響していない理由はその水準範囲が狭かった可能性があると推測できる。一方、真円度は半径よりもパラメータ数が多く加工メカニズムは複雑である。平均パートは主効果である送り速度、回転速度、超音波出力の3つ全てが関与している。さらに送り速度と回転速度、回転速度と超音波出力の2因子交互作用も有意である。乖離パートは、送り速度と回転速度の2つの主効果が戦略因子と交互作用をもつこと、さらには送り速度、回転速度と戦略因子である送りモードの3因子交互作用が存在することも明らかになった。これらの交互作用の影響で真円度の良否が決まることは固有技術の視点からも理解できる。

微小ガラス穴の内部形状は一般的には測定が困難であるが、本研究ではレプリカを使用し穴

の内側形状を外側形状に転写することで、内部形状の測定と解析を安価で容易に実行可能であることを示した。ガラス穴の直接測定ではなくレプリカによる間接測定で多数の測定を安価で短時間に実行可能である点は、多数の測定データが必要な統計モデルに基づく本研究にとって、レプリカ法が技術的に有効であるだけでなく、経営的にも有効であることを示すものである。

レプリカ法を使用するうえでの課題の1つとして転写性の把握がある。今回使用したレプリカのカatalog仕様では十分な転写性があるとされているが、対象となるガラス穴形状に転写性も依存する可能性がある。実際のガラス穴の断面とレプリカとの照合を行い転写性の定量的把握を行うことが今後の課題である。

ガラス穴レプリカの外周方向の測定については、レプリカを切断することなく、非接触で外周点を測定した。これにより、レプリカの直径と真円度の把握ができるとともに、同一レプリカの複数断面を計測し、総合することでさらに詳細な分析が可能となる。以前は不可能であったレプリカ断面の非切断測定が可能となったことは、ガラス穴内部の非破壊計測と同様、統計解析に基づく加工工程の総合最適化に大きな効果がある。

外周測定は、その精度やコストが飛躍的に向上している。非破壊で外周測定が可能となる測定機はまだ一般に広く使用されていないが、精密測定分野ではリバースエンジニアリングの用途でその普及が進んでおり、今後の進展が期待されている。

以上より、複雑な研削加工の最適化の研究に、統計モデルを導入することで設計因子や戦略因子の効果を統計的に判定し、得られた統計モデルから数理計画法による最適解の探索を行う本アプローチの有効性を示した。最適解の算出にはPCベースのソフトウェアが必要であり、今回はSAS社のJMP及びそのアドインツールHOPEを使用した。これらのソフトウェアの有効性についても今後研究を進めていく。

#### 5. おわりに

実験計画法により加工条件を変え、超音波援

用研削加工で微小ガラス穴を形成し、その内部形状をレプリカに転写した。このレプリカを非接触測定機で測定し、得られたデータを統計解析して、直径と真円度の統計モデルを作成した。そのとき加工条件の1つであるツールの送りモードを戦略因子として特別に考慮し、統計モデルに反映させた。この統計モデルを目的関数として、戦略因子に焦点をあてた加工工程の総合的最適化を実施した。最適化の結果を技術と経営の視点から考察し、本アプローチの有効性を示した。

### 【主要参考文献】

- [1] Akira Ogawa, Takenori Takahashi (2015) : “Design for multi characteristics using multi input and hierarchical structure model; total optimization of glass parts manufacturing”, Proceeding of the 13th ANQ Congress, JP-33.
- [2] Akira Ogawa, Takenori Takahashi (2016) : “Optimum design for reverse engineering”, Proceeding of the 14th ANQ Congress, D6, JP-33.
- [3] 小川昭, 高橋武則 (2015) : “ガラス穴加工形状の解析と設計”, JSQC第107回研究発表会発表要旨集, pp163-166.
- [4] 小川昭, 高橋武則 (2016) : “機械加工で形成した微小穴形状の統計解析と設計”, JSQC第112回研究発表会発表要旨集, pp33-36.
- [5] 小川昭, 高橋武則, 平林隆一 (2015) : “超音波研削加工で形成したガラス穴の評価”, ABTEC2015, 砥粒加工学会学術講演会論文集, pp3-4.
- [6] 小川昭, 高橋武則, 平林隆一 (2016) : “レプリカ転写法による微小穴の円筒形状評価”, ABTEC2016, 砥粒加工学会学術講演会論文集, pp152-156.
- [7] Montgomery, D.C. (2005) : Design and Analysis of Experiments (6th ed.), Wiley, New York.
- [8] 澤近洋史 (2002) : “レプリカ法による微小穴等の形状測定”, 材料試験技術, Vol.47, No2, pp33-38.
- [9] Shigeomi Koshimizu and Shigeo Aoki (2013) : “Micro-Grooving of Glass Using Small-Diameter Diamond Grindstone with Ultrasonic Vibration”, Advanced Material Research, Vol.797, pp363-373.
- [10] 高橋武則 (2015) : “解析および設計のための形状や状態の時空間を用いた描写”, JSQC第107回研究発表会発表要旨集, pp87-90.
- [11] 松岡芳彦, 河野正道, 高瀬修 (2004) : “レーザーマイクロドリル穴形状のレプリカを用いた評価”, レーザー研究, 第32巻, 第8号, pp535-537.
- [12] Z.C.Li, Y.Jiao, T.W.Deines, Z.J.Pei and C. Treadwell (2005) : “Rotary Ultrasonic Machining of Ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments”, International of Machine Tools & Manufacture, Vol.45, pp1402-1411.
- [13] Z.C.Li, Z.J.Pei, T.Sisco, A.C.Micale and C. Treadwell (2007) : “Experimental Study on Rotary Ultrasonic Machining of Graphite/Epoxy Panel”, Proceedings of ASPE Spring Topical Meeting, Vol.40, pp52-57.