

統計解析に基づき経営視点を重視した機械加工工程の 総合的最適化

Total Optimization of the Machining Process Based on Statistical Analysis with Management Point of View

小川 昭 高橋 武則

(Akira OGAWA Takenori TAKAHASHI)

【要 約】

本論文では、統計解析に基づき経営視点を取り入れた製造工程の総合的最適化のアプローチを紹介する。取りあげた工程はガラスに微小穴をあける機械加工の工程である。その3次元の穴形状を測定し、穴形状の統計モデルを構築し、数理計画法を用いて加工工程の最適化を行った。硬脆性材料であるガラスの穴あけは超音波援用研削加工を使用し、効果的なデータ収集には実験計画法を用いた。これらはいわゆるプロダクトアウトの活動である。さらに、微小穴内側形状を外側形状に変換するためのレプリカ法を開発し、レプリカの外周形状は最新の非接触外形測定機を使用した。これらのエンジニアリングは測定に重点が置かれており、我々はリバースエンジニアリングと呼び市場からのデータ収集を重視するマーケットインの活動と同意とした。その後、加工ツールの送りモードを経営戦略的な因子と定義し、戦略因子を基にした最適化シナリオを作成し経営視点を重視した総合最適化を実現した。同時に現場の暗黙知を形式知に変換することも可能であり我々のアプローチの意義も示した。

キーワード：経営視点、統計モデル、エンジニアリング、研削加工、最適化

【Abstract】

In this paper, we introduced an approach for total optimization of production process based on statistical analysis with management point of view. The production process is machining of small glass holes. We measured 3D shapes of the hole, built a statistical model of hole shapes and optimized the machining process using mathematical programming method. We used rotary ultrasonic machining for making holes in hard and brittle material of the glass and the design of experiment for effective data acquisition. Those are, so to speak, product out activities. Furthermore, we developed a replica method of converting inner shape of small glass hole into outer shape of the replica and used new non-contact measuring instrument in order to measure outer shape of the replica. Those engineering activities focuses in measuring and so innovative that we would like to call them reverse engineering. Finally, in this activity, we defined machining mode as management and strategic factor, and achieved a total optimization using the strategic factor with a certain optimization scenario. We also

recognize that this approach makes it possible to translate tacit knowledge into explicit knowledge and shows the significance of our approach.

Keyword : management point of view, statistical model, engineering, abrasive grinding, optimization.

1. はじめに

1-1 背景

企業において、製品の製造方法は企画、設計、製造の順に行われ、その後製品は市場に出荷される。市場ではユーザーが製品を使用し、その優劣が企業の社会的価値の一部を決定する。このような従来からの工業的手法をここでは従来からのエンジニアリング (Traditional engineering : TE) と呼ぶ。この手法は企業の設計、製造が主体であり、製品を製造することに注力していることからプロダクトアウトと呼ばれ、その目的は充足や満足である。

一方、現代社会においてユーザーが製品を使用したときの感想、意見、要望、クレームは様々な方法で収集することが可能である。その代表的な方法がインターネットを使用して情報収集を行うことである。あらゆるものがインターネットに接続された状況はIoT (Internet of Things) と呼ばれ既に社会の至るところで実現されている。IoTを活用することが企業の存続に係るとされている。

IoTが実現した社会では、企業は積極的にユーザーの声を顧客情報として収集、計測し、計測した情報を企業内の様々な活動に活用し、その活動を最適化するよう努力している。TEにおける企画に対して、その情報は新しい魅力的な製品企画につながり、設計に対しては新しい規格を提案するものになる。TEに対してこのようなエンジニアリング手法を本研究ではリバースエンジニアリング (Reverse Engineering : RE) と呼ぶ^[4]。その特徴は、製品を製造することと同時に市場情報、顧客情報を得ることを重視しており、マーケットインと呼ばれるものである。この目的は新しい製品やサービスをつくること、イノベーションを起こすことである。

そのような状況の中で、多くの企業の製造現

場ではIoTを含めた新旧の技術を組合せた新しい取組みを始めている。しかしIoTを使用せずにリバースエンジニアリングの目的であるイノベーションを推進できる可能性もある。その1つとして、従来の製造工程で行われている改善活動に経営視点を加えた取組みを推進すれば、市場においてユーザーが提示する情報をIoTで収集する前に、創造的改善活動を行いイノベーションにつなげることができる。概要を図1に示す。

我々は今までに加工条件の中の加工モードが経営戦略に深く関係することを示し^{[6][7]}、これを戦略因子と呼びその水準に応じた最適化法を統計解析の立場から提案してきた^[5]。その中では加工を2次元的に解析して加工のメカニズムの解明や最適条件を提示してきた。これを3次元に拡張して経営視点を重視した最適化を行うことで3Dプリンターに代表される機械加工のリバースエンジニアリングが実現され、イノベーションにつながる可能性がある。

1-2 先行研究

本研究では加工の難しい硬脆材料であるガラスやセラミックスを取りあげる。加工困難な材料を扱うことが経営的な意味でイノベーションにつながる可能性があるためである。特に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^[13]。

また炭素繊維強化プラスチック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。炭素繊維は円滑な穴あけ加工の障害になり、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。

材料加工ではなく形状を解析したものとして円柱形状の外郭サイズを測定した研究が報告されている^[18]。ISO14405-1において、最小二乗直径、最小制限直径、最大制限直径などの外郭サイズが定義されている。この研究では、最小制限直径、最大制限直径に関する円柱の4軸パラメータに対して、シリンダー軸パラメータの探索を行い形状の最適測定を実現する方法論展開している。

これらの研究のうち前者は研削加工理論に基づいて材料除去率等の加工専門特性を解析している。また後者は形状測定における外郭（プロファイル）の決定方法について研究している。

本研究は研削加工の理論ではなく統計理論に基づいている^[14]。そして加工された穴の深さ方向の形状や粗さおよび真円度を位置の関数として評価している。使用する関数は2次関数とし、定数項、1次項、2次項の回帰係数に加工機の制御因子および加工ツールの送りモード（以後モードと略記）を導入し、制御因子とモードがどのように加工形状に影響を与えるかを解析する^[3]。特にモードは経営的にも重要な因子である。

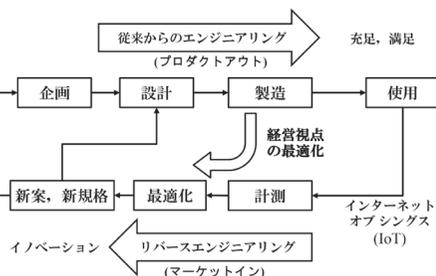


図1 エンジニアリングの概要

制御因子の選択は統計的な変数選択により行うことで関数は統計モデルとして構築される。この統計モデルを目的関数として数理計画法で最適化する。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^[10]。先行研究の中には実験計画法を使用した事例もある^{[16][17]}。我々の研究では質的因子であるモードを導入し、このモードにより経営的視点を導入している。実験では制御因子を内側に、モードを外側に配置

した直積実験を行っている。一般に直積実験は因子の効果を減少させる制御因子を明らかにさせることができるが、不要な交互作用まで評価することになるため効率が悪いとされている^{[1][11]}。

しかし超音波援用加工では多くの交互作用が存在するため不要な交互作用が少なく、効率の問題はない。また統計モデルと数理計画法による最適化は過去に報告がない。さらに形状や性状を3次元で解析し最適化した報告はない。

1-3 研究目的

本研究の目的は以下の3点である。

1. 直積実験（直交配置L8×一元配置）に基づく加工因子の条件で超音波を援用した研削加工でガラスに穴をあけ、穴形状をレプリカ法^[9]で3次元測定し、統計解析を行って加工因子を用いた統計モデルを作成すること。
2. 統計モデルを数理計画法で最適化するとき経営視点を取入れ、技術的かつ経営的な総合最適化を行うアプローチを提案すること。
3. 提案した総合的最適化アプローチの意義を示すこと。

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

本研究では、機械加工の条件を変えながら超音波を援用した研削加工でガラスに穴をあけ、穴形状をレプリカ法で3次元測定し、統計解析を行って加工因子を用いた統計モデルを作成する。穴形状の外形と粗さおよび真円度が特性となり、加工関連が要因となる。その特性と要因との関係を示したものが図2である。経営的には人の問題も重要ではある^[2]が本研究では取り上げない。

2-1 機械

本研究では超音波のエネルギーを回転エネルギーに援用した超音波援用研削加工機を使用する。Rotary Ultrasonic Machiningを略してRUMと呼ぶこともある。

回転研削加工は古くからある技術でRUMも

較的長い歴史がある。しかし、回転加工機に超音波のエネルギーを伝えるには技術的に難しい機械同士の接続があり、加工を専業とする企業であればRUM装置は専門会社から購入する必要がある。専門会社にRUMに対する十分な経験と知識がない場合、使用する企業は独自にノウハウを蓄積する必要がある。ノウハウを蓄積し新しい加工条件を見つける取り組みも図1に示した経営視点での最適化である。

超音波援用研削加工機の概要を図3に示す。重要な制御因子として送り速度、回転速度、超音波振動がある。一般的にガラスの研削加工は超音波を援用しない場合回転速度は2~30,000rpmが必要とされているが、超音波を援用することで3,000rpm前後の低速で穴あけ加工が可能となる。

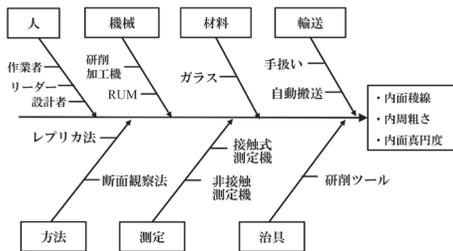


図2 特性要因図

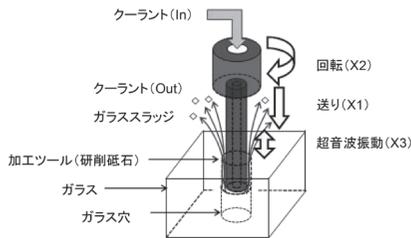


図3 超音波援用研削加工機



図4 加工ツールの側面図(上)と底面図(下)

2-2 治具(研削ツール)

研削加工に使用するツールの写真を図4に示す。中空円筒形で外径は1mm、内径は0.4mmである。表面に研削用微小ダイヤモンドが付着して、このダイヤモンドがガラスを研削する。重要な仕様として、ダイヤモンドの粒度(大きさ)、集中度(密度)、結合剤の硬度(硬さ)がある。粒度が大きいと研削力は高くなるが表面粗さは荒くなる。集中度はある適切な値があり、それ以上でも以下でも研削力は低下する。またその値は粒度とも関係がある。硬度は加工形状にも関係する。硬度が大きい(硬い)とツールの消耗が小さく長期間使用できるため治具コストを下げることが可能であるが、ダイヤモンド砥粒の脱落する頻度が少くなり加工品質は劣化する。硬度が小さい(柔らかい)と、ツールの消耗が早くなる。そのためダイヤモンドの脱落する頻度が多くなり、古いダイヤモンドが新しいダイヤモンドに交換される「自生発刃」効果が現れる。これらの効果が加工形状に大きく影響することになるが、本研究ではツールの仕様は1種類として評価しない。

またツール使用で重要な作業にツール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。本実験を通じてツール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。

2-3 方法

2-3-1 加工モード

加工方法の重要な要素として加工ツールの送りモードがある。その概要を図5に示す。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ャッピングの発生確率が高くなる懸念がある。一方One-wayモードは一定の速度で一方向に低速でツールを送るもので、Stepモードのような

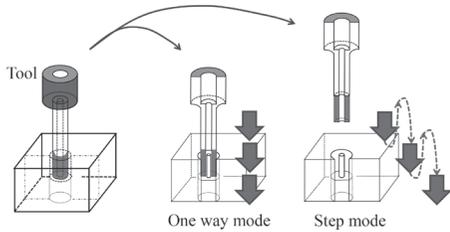


図5 ツールの送りモード

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。モードは製造において開発要素が強いだけでなく経営的に重要な要素である。本研究ではモードを最適化の重要な戦略因子として取りあげている。

2-3-2 レプリカ法

加工形状の評価では穴の内側形状を評価することになる。しかし後述する測定機の問題から、本研究では穴の内側形状を外側形状に変換したレプリカを作成し、このレプリカを間接的に測定する手法を開発した^{[8][9]}。レプリカ法自体は以前から使用されており^{[12][15]}、全く新しい手法ではないが、近年開発された非接触式測定機と組み合わせることにより、高精度で多量の計測データを短時間で採取することができるようになった。この方法は本研究の主要な手法である統計解析に特に有効である。

2-4 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、加工ツールは毎分2~30,000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ち、穴内部を2次的に研削し形状品質を劣化させる。一方、超音波振動の援用加工であれば、援用しないと比べて回転速度は約1/10となる。高脆性材料の加工では回

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形状評価の概要を図6に示す。穴の直径を評価するとき左から最小二乗法、最小外接円、最大内接円の3つの方法を示している。またこの評価座標系として図7の円筒座標を定義することもある。

我々の研究では、ガラスの穴あけはチップング、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を前提としている。図8の左に穴形状写真、右に評価座標系を示す。我々はこの座標系を使用して解析および最適化を進めた。

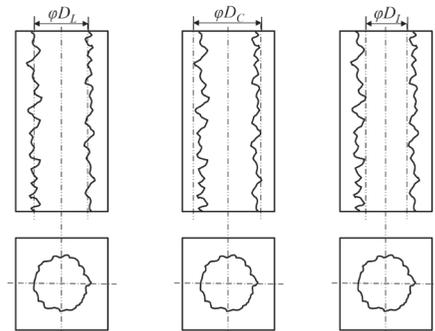


図6 ガラス穴形状の直径の評価^[18]

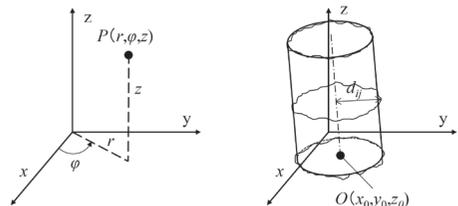


図7 円筒座標系と中心軸^[18]

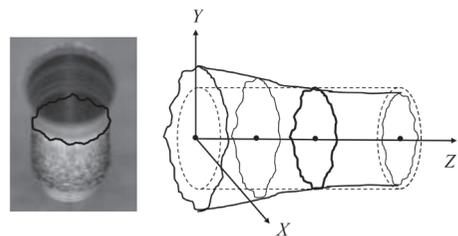


図8 テーパーのあるガラス穴形状の評価座標系

2-5 測定

ガラス穴形状の評価特性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

本研究で対象とするガラス穴の内側形状において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規格の粗さ測定で標準として規定されている。しかし本研究のような微小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。さらにレプリカのような柔らかい材料の測定には不適である。

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 $0.1\mu\text{m}$)、 θ (同 0.001°)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 加工形状の評価理論

ガラス穴研削加工とレプリカを用いた評価プロセスの概要は以下のとおりである。ガラス穴内側形状をレプリカの外側形状に変換し、評価特性としてレプリカの稜線形状を y_1 、外周方向の粗さを y_2 、外周形状の真円度を y_3 とする。

制御因子である送り速度、回転速度、超音波振動エネルギーに加え、モードが相互に複雑に影響して特性 y_1, y_2, y_3 決定する。

ここで外形稜線 y_1 は加工条件によって決まる L と加工条件に無関係な誤差 ε_1 によって決まるとする。粗さ y_2 と真円度 y_3 も同様に加工

条件によって決まる U 、 R と誤差 ε_2 、 ε_3 から構成されているとして式(1)から式(3)で表す。

設計因子 x と経営的な戦略因子であるモード M を式(4)、式(5)で表すと、 L 、 U 、 R はモードを含まない平均パート A とモードを含む乖離パート S を用いてそれぞれ式(6)から式(8)で表すことができる。ここで m はダミー変数でモード M が水準1のときに1を、水準2のときに-1をとるものとする。

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 評価特性と評価要因

ガラス穴加工は前述したように機械とツールの送りモード、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を等間隔に6点評価した。穴の内側形状は穴の稜線 y_1 、粗さ y_2 および真円度 y_3 を評価した。穴内部は直接評価できないためレプリカにより間接的に評価した。ここでは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。レプリカの分解能は $0.1\mu\text{m}$ である。

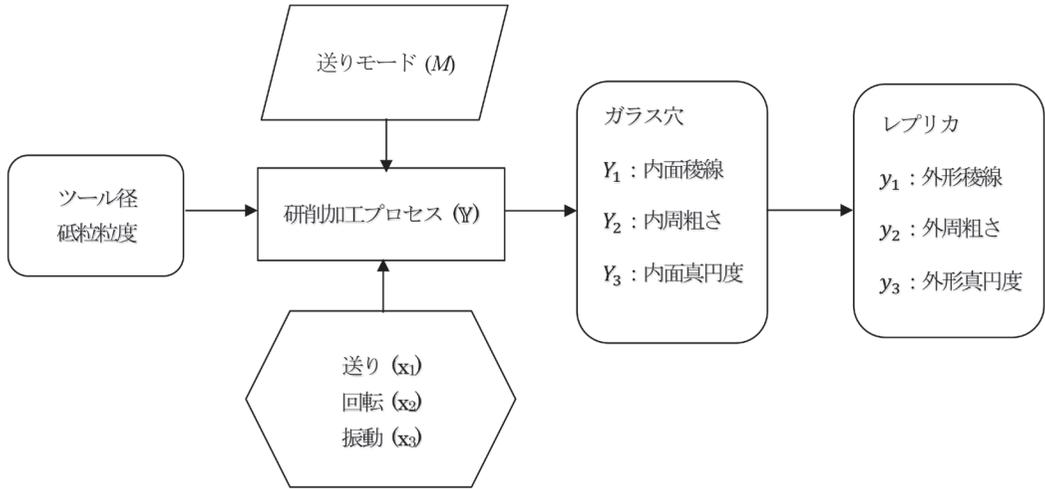


図9 ガラス穴研削加工と評価プロセスの概念図

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1(z - z_0) + \beta_2(z - z_0)^2 + \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$y_2 = U_0 + U_1(z - z_0) + U_2(z - z_0)^2 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

$$y_3 = R_0 + R_1(z - z_0) + R_2(z - z_0)^2 + \varepsilon_3 \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \quad (4)$$

$$M = (m) \quad (5)$$

$$\beta_i(\mathbf{x}; M) = A_{\beta_i}(\mathbf{x}) + S_{\beta_i}(\mathbf{x})m \quad (i=0,1,2) \quad (6)$$

$$U_i(\mathbf{x}; M) = A_{U_i}(\mathbf{x}) + S_{U_i}(\mathbf{x})m \quad (i=0,1,2) \quad (7)$$

$$R_i(\mathbf{x}; M) = A_{R_i}(\mathbf{x}) + S_{R_i}(\mathbf{x})m \quad (i=0,1,2) \quad (8)$$

$$A_{\beta_i}(\mathbf{x}) = A_{\beta_i}(x_1, x_2, x_3) = C_{\beta_{i0}} + \sum_{j=1}^3 C_{\beta_{ij}} x_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=j+1}^3 C_{\beta_{ijk}} x_j x_k \quad (9)$$

$$S_{\beta_i}(\mathbf{x}) = S_{\beta_i}(x_1, x_2, x_3) = D_{\beta_{i0}} + \sum_{j=1}^3 D_{\beta_{ij}} x_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=j+1}^3 D_{\beta_{ijk}} x_j x_k \quad (10)$$

3-3 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。特に交互作用は固有技術の知見からその存在が明らかで重要である。 $x_1 \sim x_3$ 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、その意味で制御因子である。

制御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。

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	1	x_1	x_2	x_3
x_1	送り速度	low	high	◎	—	—
x_2	回転速度	low	high	○	◎	—
x_3	超音波強度	low	high	○	○	◎

◎: 主効果, ○: 交互作用, —: 対象外

表 2 戦略因子としてのMode

因子	名称	水準		主効果
		-1	1	
M	Mode	Step	One-way	○

3-4 経営視点を含んだ因子

次に加工要因の中でモードを検討する。本研究では、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

るが、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を検討する。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。

その他のシナリオとして、戦略因子の水準ごとに最適解を求めるもの、個別に対応するものなどもある。

3-5 実験計画

設計因子は 3 因子について 2 因子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モードは 2 水準であるが、各水準における稜線形状、粗さ、真円度を 3 次元的に評価する。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。これらが同じ制御因子で実現できれば経営視点での最適化が実現できたことになる。

4. 実験結果と最適化

4-1 結果

設計因子が 3 因子 2 水準で戦略因子が 1 因子 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入口から 6 点 ($z=1-6$) 測定した。

結果は外形稜線 y_1 を例に示した。表中の y_1 は制御因子、モード、位置の順に $y_1 = (x_1, x_2, x_3, M, z)$ として記述している。外周粗さ y_2 , 外形真円度 y_3 も同様である。詳細な解析は

表 3 直積実験の実験計画表と y_1 のデータ

No	制御因子			モード							
	x_1	x_2	x_3	$M = 1$				$M = 2$			
				z_1	z_2	...	z_6	z_1	z_2	...	z_6
1	1	1	1	$y_1(1,1,1,1)$	$y_1(1,1,1,2)$	...	$y_1(1,1,1,6)$	$y_1(1,1,2,1)$	$y_1(1,1,2,2)$	...	$y_1(1,1,2,6)$
2	1	1	2	$y_1(1,1,2,1)$	$y_1(1,1,2,2)$	...	$y_1(1,1,2,6)$	$y_1(1,1,2,2,1)$	$y_1(1,1,2,2,2)$	...	$y_1(1,1,2,2,6)$
3	1	2	1	$y_1(1,2,1,1)$	$y_1(1,2,1,2)$	...	$y_1(1,2,1,6)$	$y_1(1,2,1,2,1)$	$y_1(1,2,1,2,2)$	...	$y_1(1,2,1,2,6)$
4	1	2	2	$y_1(1,2,2,1)$	$y_1(1,2,2,2)$	...	$y_1(1,2,2,6)$	$y_1(1,2,2,2,1)$	$y_1(1,2,2,2,2)$	...	$y_1(1,2,2,2,6)$
5	2	1	1	$y_1(2,1,1,1)$	$y_1(2,1,1,2)$	...	$y_1(2,1,1,6)$	$y_1(2,1,1,2,1)$	$y_1(2,1,1,2,2)$	...	$y_1(2,1,1,2,6)$
6	2	1	2	$y_1(2,1,2,1)$	$y_1(2,1,2,2)$	...	$y_1(2,1,2,6)$	$y_1(2,1,2,2,1)$	$y_1(2,1,2,2,2)$	...	$y_1(2,1,2,2,6)$
7	2	2	1	$y_1(2,2,1,1)$	$y_1(2,2,1,2)$	...	$y_1(2,2,1,6)$	$y_1(2,2,1,2,1)$	$y_1(2,2,1,2,2)$	...	$y_1(2,2,1,2,6)$
8	2	2	2	$y_1(2,2,2,1)$	$y_1(2,2,2,2)$	...	$y_1(2,2,2,6)$	$y_1(2,2,2,2,1)$	$y_1(2,2,2,2,2)$	...	$y_1(2,2,2,2,6)$

次節で行う。

4-2 結果の解析

統計モデルとして2次式を仮定し、外形稜線は式(1)、粗さは式(2)、真円度は式(3)で表す。 z_0 は変域 z の midpointである。 y_1 を例にすると、偏回帰係数の推定式(6)は戦略因子を含まない平均パートの式(9)と、戦略因子を含む乖離パートの式(10)で構成されている。戦略因子 M はダミー変数 m で表わされ、 M の水準1で $m=1$ 、水準2で $m=-1$ とする。

穴加工形状を統計モデルで表すこと、すなわち具体的には稜線形状が式(1)、粗さが式(2)、真円度が式(3)となる。その推定式を実験データから求める。各推定式はそれぞれ式(6)、式(7)、式(8)となる。さらに展開した式は稜線形状を例示すると式(9)式(10)となる。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た。具体的な解析を以下に示す。

4-2-1 外形稜線の中心位置

中心位置($z=2.1$)における稜線形状に影響を与える要因は表4に示す4つの主効果(x_1, x_2, x_3 および M)と8つの交互作用である。このうち x_3 は交互作用が有意であることからEOPの原則に従って選択されている。

寄与率の最も大きいものは Mx_1 、すなわちモードと送り速度との交互作用(寄与率28.65%)であり、次に $x_1 x_2$ (同16.42%)、 $Mx_1 x_2$ (同11.43%)、 x_2 (同10.88%)である。回転速度 x_2 は主効果と交互作用の両方が大きく影響しており、また送り速度 x_1 およびモード M との交互作用の影響もある。一方超音波 x_3 は主効果と交互作用の影響がほとんどない。超音

表4 稜線方向(β_0): 中心化切片の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値	寄与率
x_1	12.668	1	12.668	6.602	0.062	4.78
x_2	26.3864	1	26.3864	13.752	0.0207	10.88
x_3	1.1867	1	1.1867	0.618	0.4756	0
$x_1 x_2$	38.8281	1	38.8281	20.236	0.0108	16.42
$x_2 x_3$	2.6432	1	2.6432	1.378	0.3056	0.32
M	6.4554	1	6.4554	3.364	0.1405	2.02
Mx_1	66.3184	1	66.3184	34.563	0.0042	28.65
Mx_2	24.2356	1	24.2356	12.631	0.0237	9.93
Mx_3	0.3822	1	0.3822	0.199	0.6785	0
$Mx_1 x_2$	27.6234	1	27.6234	14.397	0.0192	11.43
$Mx_2 x_3$	10.3876	1	10.3876	5.414	0.0805	3.77
モデル	217.115	11	19.7377	10.287	0.0188	88.21
誤差	7.675	4	1.9188			11.79
全体	224.79	15				

$$\beta_0(x; M) = A_{\beta_0}(x) + S_{\beta_0}(x)m \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A_{\beta_0}(x) &= A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = C_{\beta_0} + \sum_{i=1}^3 C_{\beta_{0i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 C_{\beta_{0ij}} x_i x_j \\ &= 517.0137 + 0.8898x_1 + 1.2842x_2 - 0.2723x_3 + 1.5578x_1x_2 - 0.4064x_2x_3 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_{\beta_0}(x) &= S_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = D_{\beta_0} + \sum_{i=1}^3 D_{\beta_{0i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i < j}^3 D_{\beta_{0ij}} x_i x_j \\ &= -0.6352 - 2.0359x_1 - 1.2307x_2 + 0.1546x_3 - 1.3139x_1x_2 + 0.8057x_2x_3 \end{aligned} \quad (13)$$

波を援用した加工でありながら超音波の影響が少ないことは重要な技術情報である。制御因子 x_1, x_2, x_3 およびモード M との組合せで中心位置がどのように変化するかは構造式 (11) を具体的に展開した平均パートの式 (12) と乖離パートの式 (13) で計算する。

4-2-2 外形稜線の傾き

稜線形状の傾きに影響を与える要因は表 5 に示す全 9 要因であるが、主効果 x_2 と M は EOP の原則から選択されており寄与率 0.00% であることから実質的に主効果ではない。また主効果 x_1 の寄与率は 1.44% と小さい。全体のモデル寄与率 47.13% から x_1 の寄与率 1.44% を引くと 45.69% であるが、この内容は全て超音波出力 x_3 に関係した効果である。すなわち稜線形状の傾きは超音波出力 x_3 の影響が非常に大きい。

一方モデルの寄与率が 47.13% と 50% に満たないことから外線形状の傾きは、誤差も含めて

取りあげた要因以外の影響が大きいことが考えられる。

このような状況を前提に解析を行うと以下のメカニズムが理解できる。まず寄与率の最も大きい x_2, x_3 、すなわち回転速度と超音波出力との交互作用 (寄与率 14.33%) は、ガラスを研削する加工ツール先端の 3 次元的な挙動を表すもので稜線の傾きに関係する。 Mx_1, x_3 (同 14.21%) は超音波に関係はないが、送り速度と回転速度とモードの 3 因子交互作用であり同じく 3 次元的な加工メカニズムに関連する。 x_3 (同 10.07%), Mx_3 (同 7.08%) は超音波の主効果と交互作用でありスカラー的な量であるが、穴内部のツールの位置に応じてツールの挙動に影響を与えていると考えられる。以上から外形稜線の傾きは超音波出力 x_3 が最も重要な要因である。

表 5 稜線方向 (β_1): 傾きの分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値	寄与率
x_1	0.4912	1	0.4912	1.308	0.2963	1.44
x_2	0.0074	1	0.0074	0.02	0.8927	0
x_3	1.1857	1	1.1857	3.159	0.1259	10.07
x_1x_3	0.0443	1	0.0443	0.118	0.7428	0
x_2x_3	1.5281	1	1.5281	4.071	0.0902	14.33
M	0.0293	1	0.0293	0.078	0.7894	0
Mx_1	0.0428	1	0.0428	0.114	0.7472	0
Mx_3	0.9449	1	0.9449	2.517	0.1637	7.08
Mx_1x_3	1.5185	1	1.5185	4.045	0.091	14.21
モデル	5.7922	9	0.6436	1.714	0.2634	47.13
誤差	2.2523	6	0.3754			52.87
全体	8.0444	15				

$$\beta_1(\mathbf{x}; M) = A_{\beta_1}(\mathbf{x}) + S_{\beta_1}(\mathbf{x})m \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A_{\beta_1}(\mathbf{x}) &= A_{\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = C_{\beta_1} + \sum_{i=1}^3 C_{\beta_{1i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 C_{\beta_{1ij}} x_i x_j \\ &= -2.1810 + 0.1752x_1 + 0.0216x_2 - 0.2722x_3 + 0.0526x_1x_3 - 0.3090x_2x_3 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} S_{\beta_1}(\mathbf{x}) &= S_{\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = D_{\beta_1} + \sum_{i=1}^3 D_{\beta_{1i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 D_{\beta_{1ij}} x_i x_j \\ &= 0.0428 + 0.0517x_1 - 0.2430x_3 - 0.3081x_1x_3 \end{aligned} \quad (16)$$

4-2-3 外形稜線の非線型効果

稜線形状の非線形効果とは、穴の側面形状が入口から出口に向かって直線的に加工されているのではなく、曲線的に加工されていることを表すものである。この非線形な傾きに影響を与える要因を表4に示す。これは2次関数の2事項の係数で評価するもので、3つの主効果と2つの交互作用が選択されている。3つの主効果はすべてEOPから選択されたもので、効果の主体は交互作用である。寄与率の最も大きいものが Mx_3 で寄与率は41.95%である。次に大きいものが $x_2 x_3$ で寄与率は8.05%ある。すなわち超音波出力がモードおよび回転速度と交互作用をもつことを示している。両者を合わせた全体の寄与率は50.00%である。2次項は超音波出力とモードの交互作用の効果が非常に大き

い。

外形稜線の非線形効果は、加工が困難な高脆性材料を加工することによって生じる理想的な直線円筒形状からのずれの程度を表している。このため前述した外形稜線の中心位置および傾きと総合して考察することが重要である。中心位置の形状は加工ツールの外径と同じ大きさになること、傾きが小さいことが直線円筒形状であり理想的である。

最適化において、そのような理想形状を実現する条件が非線形効果も小さくする条件であることを確認するために最適化を行うことになる。外形稜線の中心位置および傾きが小さくなる条件が自動的に稜線形状の非線形効果を小さくする要因でもある。

表6 稜線方向 (β_2): 2次項の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値	寄与率
x_2	0.0069	1	0.0069	0.045	0.837	0
x_3	0.0198	1	0.0198	0.127	0.7287	0
x_2x_3	0.4639	1	0.4639	2.976	0.1152	8.05
M	0.017	1	0.017	0.109	0.7481	0
Mx_3	1.7619	1	1.7619	11.304	0.0072	41.95
モデル	2.2695	5	0.4539	2.912	0.0707	50.00
誤差	1.5587	10	0.1559			50.00
全体	3.8282	15				

$$\beta_2(\mathbf{x}; M) = A_{\beta_2}(\mathbf{x}) + S_{\beta_2}(\mathbf{x})m \quad (17)$$

$$\begin{aligned} A_{\beta_2}(\mathbf{x}) &= A_{\beta_2}(x_1, x_2, x_3) = C_{\beta_2} + \sum_{i=1}^3 C_{\beta_{2i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 C_{\beta_{2ij}} x_i x_j \\ &= -0.5144 + 0.0208x_2 - 0.0352x_3 + 0.1703x_2x_3 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} S_{\beta_1}(\mathbf{x}) &= S_{\beta_2}(x_1, x_2, x_3) = D_{\beta_2} + \sum_{i=1}^3 D_{\beta_{2i}} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 D_{\beta_{2ij}} x_i x_j \\ &= -0.0326 + 0.3318x_3 \end{aligned} \quad (19)$$

4-2-4 外周粗さ

レプリカの外周粗さを評価するとき、穴入口から出口まで均一な粗さであることが理想であるが、現実には穴内部の位置によって粗さも変化する。この変化を稜線形状と同様に位置 z の2次関数で評価する。そのとき穴の中心位置($z=2.1\text{mm}$)の粗さの値を中心化切片として解析する。粗さの中心化切片の分散分析表を表7に示す。

粗さの中心化切片の値は3つの主効果(x_1, x_2, M)の影響を受けるが x_3 (超音波出力)の影響を受けていない。これは外形稜線の中心位置の解析結果と同様である。超音波出力 x_3 を使用した加工であるが穴の中心位置では超音

波の影響がない。この技術情報も重要である。

外周粗さの中心化切片はモードMおよび送り速度 x_1 の主効果がそれぞれ36.49%, 18.84%であり両者合計で55%である。ツールを送る速度とモードが粗さに大きく関係することも重要な技術情報である。

外形稜線の解析と同様に外周粗さの1次項を式(23)式(24)に示す。 x_1, x_2 および $x_1 x_2$ の効果が大きい。2次項は式(25)式(26)で x_2 および $x_1 x_2$ 分の効果がある。2次の効果は回転速度 x_2 の主効果が非常に大きく結果表示は省略し、統計モデルの回帰式を式(23)から式(26)までに示す。

表7 粗さ (U_0): 中心化切片の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値	寄与率
x_1	0.0647	1	0.0647	20.514	0.0019	18.84
x_2	0.0402	1	0.0402	12.766	0.0073	11.36
$x_1 x_2$	0.0181	1	0.0181	5.745	0.0434	4.58
M	0.1223	1	0.1223	38.797	0.0003	36.49
Mx_1	0.0004	1	0.0004	0.139	0.7189	0
Mx_2	0.0256	1	0.0256	8.121	0.0215	6.87
$Mx_1 x_2$	0.0299	1	0.0299	9.498	0.0151	8.20
モデル	0.3013	7	0.043	13.654	0.0007	86.35
誤差	0.0252	8	0.0032			13.65
全体	0.3265	15				

$$U_0(\mathbf{x}; M) = A_{U0}(\mathbf{x}) + S_{U0}(\mathbf{x})m \quad (20)$$

$$\begin{aligned} A_{U0}(\mathbf{x}) &= A_{U0}(x_1, x_2, x_3) = C_{U0} + \sum_{i=1}^3 C_{U0i} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 C_{U0ij} x_i x_j \\ &= 0.3019 - 0.0636x_1 - 0.0502x_2 - 0.0336x_1 x_2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} S_{U0}(\mathbf{x}) &= S_{U0}(x_1, x_2, x_3) = D_{U0} + \sum_{i=1}^3 D_{U0i} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 D_{U0ij} x_i x_j \\ &= -0.0874 - 0.0052x_1 + 0.0400x_2 + 0.0433x_1 x_2 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} A_{U1}(\mathbf{x}) &= 0.0154 - 0.0158x_1 + 0.0104x_2 - 0.0108x_3 - 0.0029x_1 x_2 + 0.0026x_1 x_3 \\ &\quad + 0.0151x_1 x_3 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} S_{U1}(\mathbf{x}) &= 0.0109 - 0.0070x_1 + 0.0118x_2 - 0.0089x_3 - 0.0185x_1 x_2 + 0.0231x_1 x_3 \\ &\quad - 0.0153x_2 x_3 \end{aligned} \quad (24)$$

$$A_{U2}(\mathbf{x}) = 0.0112 + 0.0261x_2 + 0.0103x_1 x_2 \quad (25)$$

$$S_{U2}(\mathbf{x}) = 0.0030 - 0.0125x_2 - 0.0263x_1 x_2 \quad (26)$$

4-2-5 外形真円度

レプリカ外形の真円度とは、レプリカの外形に接する同心の最大内接円と最小外接円を定義し、両差の差が最小となるときの値を真円度と定義する。本研究で使用した非接触形状測定機は自動でレプリカの外形真円度を出力する。この値を特性値として2次関数の統計モデルで表したときの中心化切片を分散分析した結果を表8に示す。

レプリカの真円度は、穴入口から出口まで0であることが理想であるが、現実には穴内部の位置によって真円度も変化する。外形真円度の中心化切片はモード*M*および送り速度*x*₁、回転速度*x*₂の主効果がそれぞれ38.22%、15.59%、

18.68%であり3者合計で72.5%である。ツールを送る速度とモードの主効果が真円度の中心化切片に大きく関係することは外周粗さと同様に重要な技術情報である。

交互作用としてモード*M*と回転速度*x*₂の2因子交互作用、さらに送り速度*x*₁を加えた3因子交互作用の寄与率がある。これらのことからモード*M*と回転速度*x*₂は外形真円度にとって重要な要因である。偏回帰係数は式(28)と式(29)に示され、各要因の水準に応じてその値が決定される。その他関連する回帰式を式(30)から式(33)に示す。これらを使用して最適化を行うことになる。

表8 真円度 (*R*₀) : 中心化切片の分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F値	p値	寄与率
<i>x</i> ₁	1.3424	1	1.3424	32.331	0.0007	15.59
<i>x</i> ₂	1.6	1	1.6	38.535	0.0004	18.68
<i>x</i> ₃	0.1872	1	0.1872	4.508	0.0714	1.75
<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	0.1491	1	0.1491	3.591	0.0999	1.29
<i>M</i>	3.23	1	3.23	77.79	<0.001	38.22
<i>Mx</i> ₁	0.007	1	0.007	0.168	0.6941	0
<i>Mx</i> ₂	0.7843	1	0.7843	18.89	0.0034	8.900
<i>Mx</i> ₁ <i>x</i> ₂	0.7517	1	0.7517	18.105	0.0038	8.51
モデル	8.0518	8	1.0065	24.24	0.0002	92.95
誤差	0.2907	7	0.0415			7.05
全体	8.3424	15				

$$R_0(\mathbf{x}; \mathbf{Z}) = A_{R_0}(\mathbf{x}) + S_{R_0}(\mathbf{x})Z \quad (27)$$

$$\begin{aligned} A_{R_0}(\mathbf{x}) &= A_{R_0}(x_1, x_2, x_3) = C_{R_0} + \sum_{i=1}^3 C_{R_0i} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 C_{R_0ij} x_i x_j \\ &= 1.6272 - 0.2897x_1 - 0.3162x_2 + 0.1082x_3 - 0.0965x_1x_2 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} S_{R_0}(\mathbf{x}) &= S_{R_0}(x_1, x_2, x_3) = D_{R_0} + \sum_{i=1}^3 D_{R_0i} x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{i<j}^3 D_{R_0ij} x_i x_j \\ &= -0.4493 + 0.0209x_1 + 0.2214x_2 + 0.2168x_1x_2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} A_{R_1}(\mathbf{x}) &= 0.1809 + 0.0038x_1 - 0.0306x_2 - 0.1011x_3 - 0.0501x_1x_2 + 0.0381x_1x_3 \\ &\quad + 0.0488x_1x_3 \end{aligned} \quad (30)$$

$$S_{R_1}(\mathbf{x}) = -0.0736 - 0.0450x_1 + 0.0387x_2 + 0.0427x_3 \quad (31)$$

$$A_{R_2}(\mathbf{x}) = 0.0011 + 0.0048x_1 + 0.0956x_2 - 0.0015x_3 - 0.0395x_1x_3 - 0.0154x_2x_3 \quad (32)$$

$$S_{R_2}(\mathbf{x}) = 0.0124 - 0.0330x_1 - 0.0401x_2 - 0.0230x_3 + 0.0648x_1x_3 - 0.0837x_1x_2 \quad (33)$$

4-3 最適化

経営的視点から、戦略因子であるモードに依存せず同じ穴形状で、穴径が加工ツールの外形にできるだけ近いもの、すなわちできるだけ小さいものを求める条件を探索する。その場合 y_1 の外形稜線の中心化切片の範囲に一定の制約をかけたうえで中心化切片の平均値を最小化する加工条件を求める。さらに粗さと真円度にも一定の制約をかける。粗さについては、モードによる粗さの違いを小さくすることを重視し、粗さの範囲について制約条件を設定した。また真円度については範囲についてのみ制約条件を設定した。

定式化は式(34)となる。すなわち中心化切片の平均値 $A_{L0}(x)$ を最小化すること、制約条件として各特性のモードによる違い(範囲)を一定の値以下にすることとした。この最適解と最適値を式(35)に、制約条件の値を式(36)に示す。

目的関数： $A_{L0}(x) \rightarrow$ 最小

制約条件： $-0.1 \leq S_{L0}(x) \leq 0.1$

$$0 \leq S_{U0}(x) \leq 0.15$$

$$-0.03 \leq S_{U1}(x) \leq 0.03$$

$$0 \leq S_{U2}(x) \leq 0.04$$

$$0 \leq S_{R0}(x) \leq 0.7$$

$$-1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1$$

(34)

式(20)の最適解と最適値を式(21)に示す。コストの最小値は0.45となり基準値1の半分以下となった。詳細な考察は次節で行う。

$$\begin{aligned} \text{最適解: } \mathbf{x}^* &= (x_1^*, x_2^*, x_3^*) \\ &= (-0.3755, 0.7653, 0.5098) \end{aligned}$$

$$\text{最適値: } A_{L0}(\mathbf{x}^*) = 516.917$$

(35)

制約条件： $-0.1 \leq S_{L0}(x) = 0.0834 \leq 0.1$

$$0 \leq S_{U0}(x) = 0.1346 \leq 0.15$$

$$-0.03 \leq S_{U1}(x) = 0.0260 \leq 0.03$$

$$0 \leq S_{U2}(x) = 0.0399 \leq 0.04$$

$$0 \leq S_{R0}(x) = 0.7 \leq 0.7$$

(36)

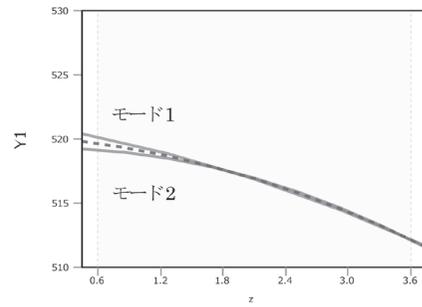


図10 外形稜線の最適化結果

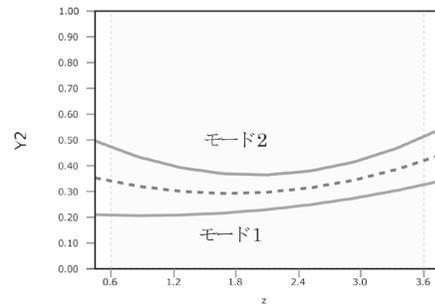


図11 粗さの最適化結果

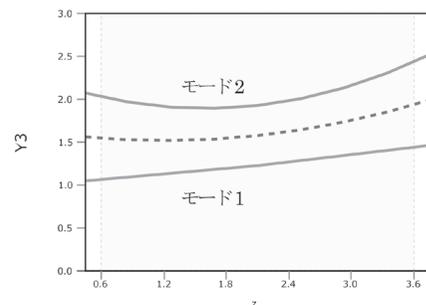


図12 真円度の最適化結果

4-5 考察

異なる戦略因子、すなわち加工モードでも同じ形状、同じ品質が得られることは、品質およ

び技術の視点ではなく、コストや納期に代表される経営的視点で加工モードを選択できる可能性を示したことになる。そのためのアプローチとして、まず初めにガラス穴内部形状を転写したレプリカの外形稜線と外周粗さおよび外形真円度の3特性について統計モデルを構築した。このモデルの中に、経営戦略的要素のあるツールの送りモードを入れ最適化を行った。ツールの送りモードが異なる場合でも、穴の稜線形状は極端に傾斜湾曲することなく、その内面は平滑で、穴入口から出口付近まで真円に近い加工が実現できるかを確認した。

その結果稜線形状は、2つのモードともに入口半径が $520\mu\text{m}$ で入口から 3600mm 奥の穴の内部半径が $512\mu\text{m}$ となり、その差が $8\mu\text{m}$ 、入口半径に対する変化の割合は $8/520=1.5\%$ となり多少の傾斜があることが判明した。湾曲を表す2次項の係数はモード1および2においてそれぞれ -0.31 と -0.59 であり加工形状としては十分許容できるものである。さらに入口から 2.1mm の穴中央部におけるモード1の穴半径が $516.88\mu\text{m}$ 、モード2の穴半径が $516.96\mu\text{m}$ となった。両者の差は $0.8\mu\text{m}$ でありほぼ同等の加工形状が得られたことになる。

このとき加工面の粗さは、モード1で 0.2 から $0.3\mu\text{m}$ 、モード2で 0.4 から $0.5\mu\text{m}$ である。モード1がモード2よりも平滑な加工ができる。また図11から明らかなように、モード1では入口から出口にかけて粗さが大きくなっているのに対し、モード2では中央部の粗さが小さく、入口部と出口部で粗さが大きくなっている。

また真円度は、モード1で 1.0 から $1.3\mu\text{m}$ 、モード2で 1.8 から $2.5\mu\text{m}$ である。最適化の制約条件として $z=2.1\text{mm}$ における両者の差を $0.7\mu\text{m}$ 以下とし、この制約の下で最適化されている。

以上を総合的に考察するとモードごとに次のようなガラスの研削加工メカニズムがある。まずモード1、Stepモードの場合、外形稜線形状は入口部が広がり、その広がりがあるためガラススラッジが効果的に排出されて2次的な研磨がなくなり粗さが小さく（平滑に）なり、真円度も小さく（真円に近く）なる。奥に進むにつれて穴径が狭まりスラッジが排出され難くなり粗さと真円度が大きくなる。

モード2の場合も同様のメカニズムが働くが、One-wayモードであるため加工ツールが常に穴内部にあり、穴入口部と出口部でツールの振動が増幅されるため粗さと真円度が悪化する。このためStepモードよりも平均的に粗さと真円度が悪くなる。

本研究で採用した加工条件の範囲では、モード1とモード2では、加工後の外形稜線が同じでも粗さと真円度はモード1が優れていた。顧客視点から粗さと真円度が重要と判断される場合にはモード1を採用することが経営的にも重要となる。

このような技術情報は現場の経験的なノウハウとして人に蓄積されることが多く暗黙知となっていた。市場における顧客の声も暗黙知である。暗黙知は経営的に活用することが難しく、可視化し形式知に変換して初めて利用可能となる。本研究のアプローチは暗黙知を形式知に変換すること、市場からのデータを収集するマーケットインの活動と同意であること、その結果企業の経営に貢献できることを示した。

微小ガラス穴の内部形状は測定が困難であるが、レプリカ法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比較的容易に実行できることを示した。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、多数の測定データを活用する統計モデルに基づく本研究にとって有効であり、さらに経営的にも有効である。

同一レプリカの複数断面を計測し、総合することで穴形状の3次元的分析が可能となることも示した。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く寄与することも示した。

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いる。レプリカ法との組合せで今後その使用がさらに進み産業の振興に貢献することが期待されている。

5. おわりに

統計解析に基づき経営視点を重視したガラス穴加工工程を最適化する取組みを行った。最適化は穴の稜線形状、粗さ、真円度の3点について行い、経営的な因子として加工ツールの送りモード取入れた。目的とした3項目は以下のよう

1. 実験計画法により加工因子の条件を変え、超音波を援用した研削加工でガラスに微小穴をあけ、穴形状をレプリカ法で3次元測定し、統計解析を行って加工因子を用いた統計モデルを作成した。
2. 統計モデルを数理計画法で最適化するとき、品質、コスト、生産性の技術視点に、経営戦略的要素のある送りモードを導入して総合的なアプローチを行った。
3. その結果、本アプローチはQCDの具体的な最適化だけでなく多くの暗黙知を可視化して有益な形式知を得るマーケットインの取組みが可能であり経営視点から有効であることを示した。

今回使用したレプリカはカタログ仕様では十分な転写性を持つが、実際のガラス穴形状とレプリカ形状との比較測定が必要である。転写性の定量的把握が今後の課題である。

【主要参考文献】

- [1] A. C. Schoemaker, K. Tsui and C. F. J. Wu (1991): "Economical Experimentation Methods for Robust Design", *Tecnometrics*, Vol.33, Iss.4, pp415-427.
- [2] Akira Ogawa, Takenori Takahashi (2014): "Activity to Improve and Promote TQM Systems", *Proceeding of the ICQ14 Tokyo*, JP-21.
- [3] 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.
- [4] Akira Ogawa, Takenori Takahashi (2016): "Optimum design for reverse engineering", *Proceeding of the 14th ANQ Congress*, D6, JP-33.
- [5] Akira Ogawa, Takenori Takahashi (2017): "Optimization of processing from Quality Management point of view", *Proceeding of the 15th ANQ Congress*, QMS-04/JP-05.
- [6] 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.
- [7] 小川昭, 高橋武則 (2017): "統計モデルによる機械加工の最適化", *品質*, Vol.47, No. 3, pp55-60.
- [8] 小川昭, 高橋武則, 樋口栄一 (2017): "レプリカ法による微小穴形状の解析, 研削加工で形成したガラス穴の測定と解析", *砥粒加工学会誌*, Vol.61, No. 3, pp36-38.
- [9] 小川昭, 高橋武則, 樋口栄一 (2017): "レプリカ法によるガラス微小穴形状の間接測定, 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. 21, pp24-30.
- [10] Montgomery, D.C. (2005): *Design and Analysis of Experiments* (6th ed.), Wiley, New York.
- [11] P. R. Moorhead and C. F. J. Wu (1998): "Cost-Driven Parameter Design", *Technometrics*, Vol.40, Iss.2, pp111-119.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.