

マネジメントの視点に基づくガラス部品の回転穴加工最適化

Optimization of rotary machining to make holes in glass parts from a management point of view

小川 昭 高橋 武則

(Akira OGAWA Takenori TAKAHASHI)

【要 約】

本論文では、マネジメントの視点に基づきガラス部品の回転穴加工工程の最適化の方法論を述べる。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。この工程では加工ツールと加工モードの選定、ツール、モードおよび加工機因子との相互作用が重要であり、それらが穴の半径、穴の粗さ、さらに穴の歪みに影響を与える。しかしツール、モードおよび加工機因子の理想的な組合せを決定することは難しく、多くのツールやモードを使用することがある。経営的視点からは、適切な加工機因子に応じたツールとモードを選定し、多特性を最適化しなければならない。そこで本アプローチでは、計画された実験を行い、穴の3次元形状を測定してデータを解析し、統計モデルを作成し、数理計画法により最適解を探索することで加工条件を最適化する。最後に結果を考察し最適化に向けた本アプローチの有用性を示す。

キーワード：経マネジメント視点、統計モデル、研削加工、3次元構造、最適化

【Abstract】

In this paper, we describe an approach for the optimization of rotary machining of glass holes from a management perspective. The production process is the machining of small glass holes. The important considerations in the process are the selection of the tools and modes, and the interaction of the tools, modes and machining factors which can influence hole diameter, roughness, and distortion. However, it is difficult to determine the ideal combination of the above, so we use many kinds of tools and modes. From a management point of view, we must select the tools and modes with the appropriate machining factors and optimize multiple characteristics. Therefore, in this approach, we execute designed experiment, measure the 3D shapes of the holes, analyze the data, create a statistical model, and then optimize the machining conditions using mathematical programming to search optimal solutions. Finally, we discuss the result and show the usefulness of this approach to optimization.

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

1. はじめに

1.1 背景

企業において従来からの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満足度は様々な方法で収集することが可能である。企業は積極的にユーザーの声を収集し、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。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も重視しており、これは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^[9]。

そのような状況の中で、多くの企業の製造現場では多種多様な製品を品質、コスト、生産性をバランスさせて製造している。製造条件も複雑になり、加工に必要な 5M (Man, Machine, Material, Method, Measure)、さらには治具にも多種多様な条件が設定される。ここで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、より先進的な製造活動が実現できる。

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^[11]、モード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^{[10][14]}。その中では加工形状を 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。

本論文ではさらに加工ツールを加えて、ツールとモードの組み合わせが機械加工の因子との間でもつ交互作用を考察し、様々な主効果、交互作用が加工形状の 3 次元形状に影響している状況を把握し、経営視点を重視した加工条件の最適化を行う。

1.2 本研究の適用範囲と先行研究

本研究の適用範囲は、硬脆性材料に回転穴加

工で形成された穴の内側形状の最適化である。その測定方法と具体的な使用材料は後述するが、形状を測定したデータが得られれば、硬脆性材料の大きさや材質は問わない。

本研究はマネジメント視点での最適化を扱うため、硬脆性材料の中でも、クラックやチッピングの発生しやすいガラスを対象とした。クラックやチッピングが相乗することで形状が複雑になり、多くの特性を扱うことから最適化にはマネジメント視点が必要となる。

加工は超音波援用回転加工を採用している。この方法は高品質の穴あけ加工が実現できる^[1]。しかし超音波の効果は他の加工因子の効果と複雑に関連し、穴加工のメカニズムは複雑である。そのメカニズムを理解するための先行研究の 1 つに、材料を除去する特性に対して超音波の効果을明らかにしたものがある^[2]。

加工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な測定を実現する方法論を展開している。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、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。

本研究は得られたデータを統計理論に基づいて解析し^[17]、加工理論と照合している。そして穴の形状、粗さおよび歪みを楕円の扁平率で評価している。評価関数は 1 次関数とし、定数項、1 次項の回帰係数に加工 3 因子（ツールの送り速度、回転速度、超音波出力）およびツールとモードを導入し、それらの交互作用が加工形状与える影響を解析する^[8]。ツールは消耗品であるため、その費用は製造コストを押し上げる。またモードは加工の品質と生産性に大きく関係する。

以上の理由からツールとモードは経営的に重要な因子である。特に多数の製品を製造する工程では多数のツール、多数のモードが使用される。その全てに個別に対応することは技術的に

は有意義であるがマネジメント視点には望ましくない。ツールとモードが複数ある場合でも、加工3因子は可能な限り同じ条件で加工できることが望ましい。

加工3因子とツールおよびモードから構築される統計モデルの変数は統計的に選択し、これを目的関数として数理計画法で最適化する。モデル構築に必要なデータは実験計画法で取得する^[4]。我々の研究では質的因子であるツールとモードの2因子がマネジメント視点から導入されている点が先行研究とは異なる^[3]。実験では加工3因子を内側に、ツールとモードを外側に配置した直積実験を実施する。一般に直積実験は内側と外側に配置した因子の交互作用を評価することができるが、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^{[5][15]}。

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は少なく、効率の問題はない。さらに経営的視点を加味したツールとモードを含む最適化を行ううえで直積実験は適している。また加工穴形状の評価にはレプリカ法を採用している。この方法は非破壊で高精度な形状評価が安価に可能となる点で経営に貢献するものである。

1.3 研究目的と方法

本研究の目的は、マネジメント視点に基づくガラス部品の回転穴加工最適化の方法論を示し、それを実行してその有用性を示すことである。そのための具体的な方法は下記となる。

まず初めにツールとモードがマネジメント視点での加工最適化に重要な役割を果たすことを示し、加工3因子との間で作用する交互作用を評価する。具体的には直積実験を計画し、ガラスにあけた穴形状をレプリカ法で3次元測定する。その結果を統計解析して交互作用を評価する。

次に複数の特性に対して統計モデルを作成し数理計画法で最適化する。このときツールとモードを加味したマネジメント視点を取入れ、重要な特性に対して2つの最適化を行う。最後に2つの最適化の結果を考察する。技術的および経営的視点の両面からその有用性を示す。

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。経営的には人の問題も重要ではある^[7]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も比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、加工を専門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1に示す。重要な制御因子は、送り速度(x_1)、回転速度(x_2)、超音波振動の出力(x_3)の3つである。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2~3000rpmが必要とされているが、超音波を援用することで3000rpm前後の低速で穴あけ加工が可能となる。

2.2 工具(研削ツール)

研削加工に使用するツール(T)の写真を図2に示す。外径は1mm、内径は0.4mmの中空円筒構造で、表面に研削用微小ダイヤモンドが付着し、工具としては高価である。またこのダイヤモンドがガラスを研削するためツールが加工品質と生産性を左右する。以上の理由から、ツールは他の加工因子とは異なり、品質、コスト、生産性の全てに影響する因子、すなわち経営視点で重要な因子である。

重要な仕様として、ダイヤモンドの粒度(大きさ)、

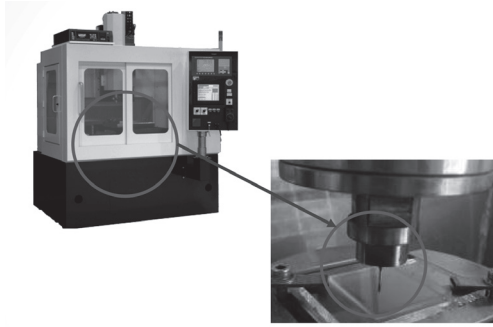


図1 加工機外形とガラス加工部

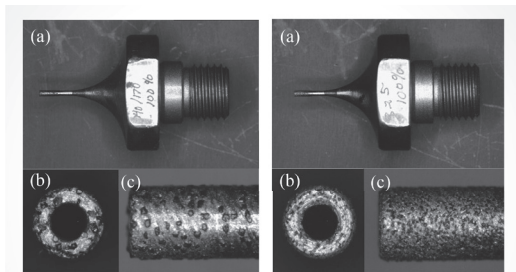


図2 加工ツール全景と底面図(左) および側面図(右)

集中度(密度), 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粗くなる。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事が可能であるが, ダイヤモンド砥粒も脱落することなく長期間使用することに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が自動的に脱落することになり, 古いダイヤモンドが脱落し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。本研究では2種類のツールを評価する。

また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。

2.3 ガラス材料

本研究で使用したガラスは硬くて脆いホウ珪酸ガラス(商標名はテンパックスガラス)である。セラミクスも同様の性質があり一般には硬脆性材料と呼ばれている。これらの硬脆性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2~40,000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, 援用しないとき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。

2.4 方法

2.4.1 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(M)がある。その概要を図3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。

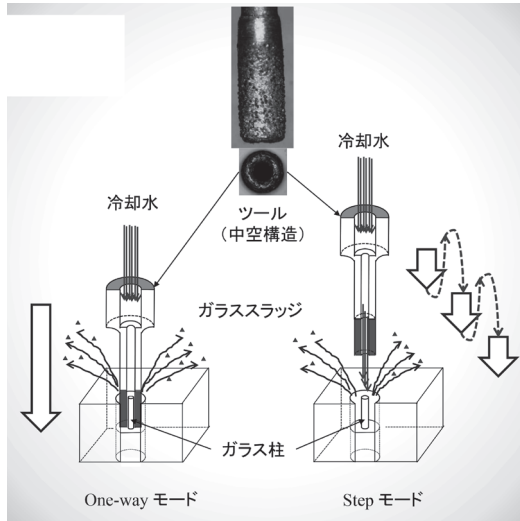


図3 ツールの送りモード

2.4.2 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^{[12][13]}。その概要を図4に示す。

レプリカ法自体は以前から使用されており^{[6][16]}、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。

2.5 測定

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

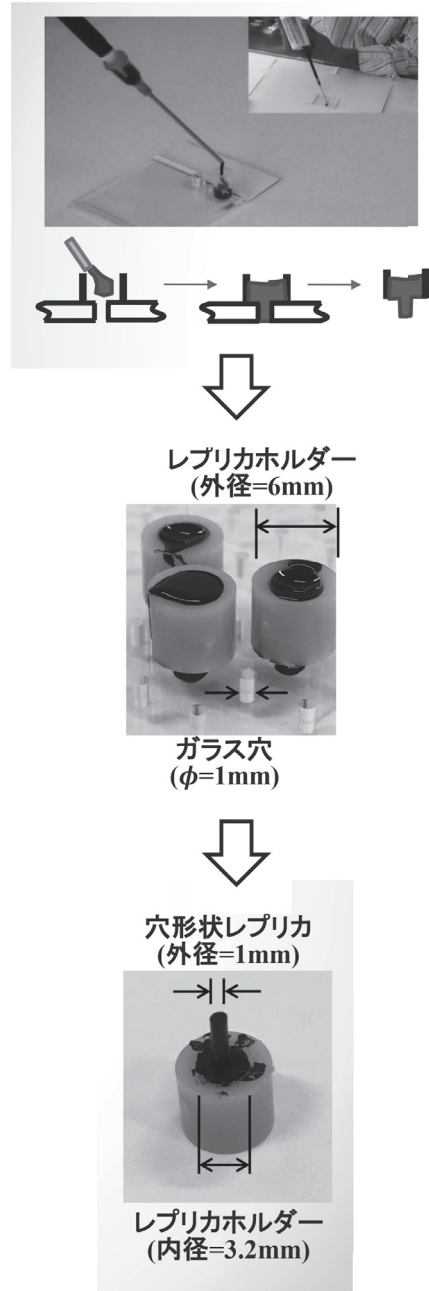


図4 レプリカ法の概要

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ーオートフォーカス (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

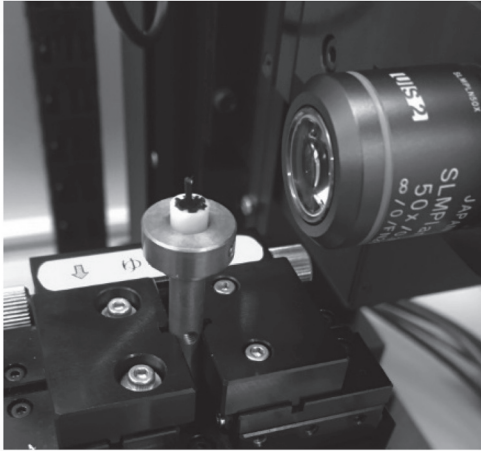


図5 非接触外周測定機による測定

作してレプリカの外形形状を測定する。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。概要を図5に示す。

3. 理論

3.1 加工形状の評価理論

図6はガラス穴断面形状が楕円であることを前提にした測定座標と解析座標との関係である。図7はガラス穴を転写したレプリカの座標と、3点の測定箇所の概念図である。ガラス穴の拡大量を L 、ガラス穴内部の周方向の粗さを R 、穴の歪みとしての楕円の扁平率を F とする。扁平率は楕円の長半径 a 、短半径 b として $F = (1 - b/a) \times 100$ (%) である。

図7において穴入口からの距離は z で示されている。本研究では穴形状をモデル化するため L, R, F を z の1次式で記述する。モデル化では2次式や漸近する多項式を使用することも可能である。しかし評価パラメータが増加し実験回数も増加する欠点がある。1次式でも加工最適化は可能でありその式を式(1)から式(3)に示す。また x_1, x_2, x_3 の加工3因子をベクトル表記したものを式(4)に示す。

ここで、式(1)から式(3)の切片 β_0, r_0, f_0 および傾き β_1, r_1, f_1 は、加工3因子 x 、ツール T 、モード M の影響を受けている。そのため、これら6つのパラメータを式(5)から式(7)に (x, T, M) の関数として示す。

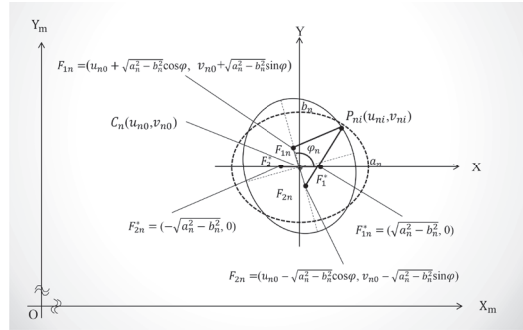


図6 測定座標系と解析座標系および楕円の焦点と偏角

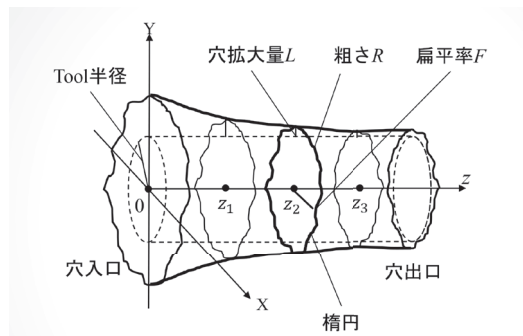


図7 テーパーのあるガラス穴を転写したレプリカの概要

3.2 評価特性と評価要因

前節に示した1次式の切片 β_0, r_0, f_0 は評価特性の平均値、傾き β_1, r_1, f_1 が評価特性の変化率を表す。また加工因子 x 、ツール T およびモード M が評価要因である。

特性と要因との関係を定式化するため式(5)を例に説明する。式(5)において $i=0$ は切片、 $i=1$ は傾きを表す。本研究では T と M を重要な因子と考え x と分離して評価する。そのため式(5)では、 T と M が関与せず x だけから構成される $A_{\beta_i}(x)$ 、 x と T が関与する $D_{1\beta_i}(x)T$ 、 x と M が関与する $D_{2\beta_i}(x)M$ 、 x と T および M が関与する $D_{3\beta_i}(x)TM$ から構成されるものとし、これを式(8)、式(9)に示す。これらの数値は x 、 T および M が特性(穴の拡大量)に与える主効果および交互作用の大きさを表す

$$L = \beta_0 + \beta_1(z - z_2) \tag{1}$$

$$R = r_0 + r_1(z - z_2) \tag{2}$$

$$F = f_0 + f_1(z - z_2) \tag{3}$$

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

$$\beta_i(\mathbf{x}, T, M) = A_{\beta_i}(\mathbf{x}) + D_{1\beta_i}(\mathbf{x})T + D_{2\beta_i}(\mathbf{x})M + D_{3\beta_i}(\mathbf{x})TM \quad (i=0,1) \tag{5}$$

$$r_i(\mathbf{x}, T, M) = A_{r_i}(\mathbf{x}) + D_{1r_i}(\mathbf{x})T + D_{2r_i}(\mathbf{x})M + D_{3r_i}(\mathbf{x})TM \quad (i=0,1) \tag{6}$$

$$f_i(\mathbf{x}, T, M) = A_{f_i}(\mathbf{x}) + D_{1f_i}(\mathbf{x})T + D_{2f_i}(\mathbf{x})M + D_{3f_i}(\mathbf{x})TM \quad (i=0,1) \tag{7}$$

$$A_{\beta_i}(\mathbf{x}) = C_{\beta_i0} + \sum_{j=1}^3 C_{\beta_{ij}} x_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{j < k}^3 C_{\beta_{ijk}} x_j x_k \quad (i=0,1) \tag{8}$$

$$D_{p\beta_i}(\mathbf{x}) = D_{p\beta_i0} + \sum_{j=1}^3 D_{p\beta_{ij}} x_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{j < k}^3 D_{p\beta_{ijk}} x_j x_k \quad (i=0,1 \quad p=1,2,3) \tag{9}$$

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。その概要を表 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あり、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工学的観点から重要であり、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であるが、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。

経営的に重要な因子であるツールとモードの

表 1 加工 3 因子とその条件

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	低	高	◎	—	—
x_2	回転速度	低	高	○	◎	—
x_3	超音波振動	低	高	○	○	◎

◎：主効果，○：交互作用，—：対象外

表 2 Too と Mode の条件

因子	名称	水準		主効果	
		-1	1	T	M
T	Tool	#325	#140	◎	—
M	Mode	One-way	Step	○	◎

◎：主効果，○：交互作用，—：対象外

水準を表 2 に示す。両者の主効果と交互作用、さらには加工 3 因子との交互作用も評価する。詳細は前述しているので省略する。

3.4 マネジメント視点

加工技術の視点では、工程で要求される加工仕様に応じてツールを選択し、そのツールに適合した加工モードと加工 3 因子を選定することが重要である。しかし実際の工程ではさまざまな要因で加工穴の直径が拡大し、粗さが粗くなり、形状が歪むことがある。これはツールおよびモードが複合的に関係している。

そこでツールとモードを変えても特性がある規格を満たし、加工が実現されている状況が望ましい。マネジメント視点ではツール個別にモードを最適化するのではなく、その組合せに依存しない汎用的な条件が必要となる。

このため本研究では対象とする最適化はツールとモードに依存しない加工3因子の最適化の実現となる。そしてこのような最適解から加工メカニズムを把握することで製造技術情報を得ることで経営的にも頑健な加工工程が構築できる。

3.5 実験計画

加工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 (2因子交互作用どうしが交絡しない)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。

一方ツールとモードは2水準である。そして各水準における穴の拡大量、粗さ、扁平率を3次元的に評価する。理想は穴の拡大量が小さく、粗さも小さく、さらには扁平率が小さいことである。かつその特性値が穴入り口から出口にまで悪化しないことも重要である。

このような目的のための実験として表3に示す直積実験がある。 z_1, z_2, z_3 は図7に示した穴入り口から出口に向かって一定間隔で設定した座標である。この3点を測定することで3次元的な評価が可能となる。

4. 実験結果と最適化

4.1 結果

加工3因子を2水準で8通り、ツールとモードの2因子を2水準で4通りに組み合わせる。よって全32通りの穴加工を行った。形成した32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3点 ($z=1 \sim 3$) 測定した。

結果は、穴の拡大量を表3、穴内面粗さを表6、扁平率を表9にそれぞれ示す。内(左)側

には加工3因子、外(上)側にはツールとモードが配置されている。

4.2 穴の拡大量Lの解析

統計モデルとして穴の拡大量を式(1)に示す。 z_2 は変域 z の midpoint であり、このときの特性値を中心値とする。

Lの場合、偏回帰係数の推定式(5)はツールおよびモードに関係しない平均パートの式(8)と、ツールおよびモードに関する乖離パートの式(9)で構成されている。ツールを表すダミー変数 T およびモードを表すダミー変数 M は、水準1のとき1、水準2のとき-1の値をとるものとする。他の特性についても同様である。

4.2.1 Lの中心値 β_0 の分散分析

Lをツールとモードで層別したグラフを図8から図11に示す。横軸は穴入り口からの距離 z 、縦軸は穴の拡大量 L である。各グラフには8本の回帰直線があり、 $z=2400$ がその中心値である。また各直線の傾きがLの変化率である。

中心値を測定値とみなして直積実験データを分散分析した結果が表4である。要因(変数)の選択基準はp値が0.05以下とし、交互作用が有意な場合、主効果のp値が0.05より大きければ主効果は採用していない。この基準は本研究で一貫して採用している。

式(5)を β_0 について示したものが式(10)である。さらに式(8)と式(9)において、選択された変数を用いて具体的に示したものが式(11)から式(14)である。以下に詳細を述べる。

表3 直積実験の結果；穴の拡大量Lのデータ

No	制御因子			T_1						T_2					
				M_1			M_2			M_1			M_2		
	x_1	x_2	x_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3
1	1	1	1	20.9	20.4	15.0	18.1	14.4	12	14.8	13.2	13.4	13.9	11.9	11.5
2	1	1	2	20.0	17.7	13.6	18.5	17.2	12	14.7	13.6	12.9	12.5	12.5	12.9
3	1	2	1	18.4	17.5	15.3	17.2	13.9	10	13.7	13.4	12.8	15	14.5	13.9
4	1	2	2	23.5	17.9	13.4	16.9	14.0	11.1	13.0	12	10.9	10.6	11.2	12
5	2	1	1	17.1	15.6	11.8	17.9	15.5	11.8	12.0	13	10.8	10.2	10.7	10.7
6	2	1	2	17.4	15.6	12.4	17.4	14.9	11.1	11.7	10.8	11.2	10.8	10.7	11
7	2	2	1	17.8	15.9	12.1	30.6	28.7	25.9	12.7	12	12.7	11.1	11.2	11
8	2	2	2	18.5	15.4	12.4	26	23.8	23.5	14.3	12.6	13.3	10	10.3	10.3

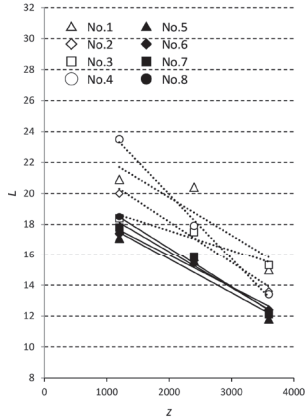


図8 T_1, M_1 における実験No.1からNo.8までのグラフ

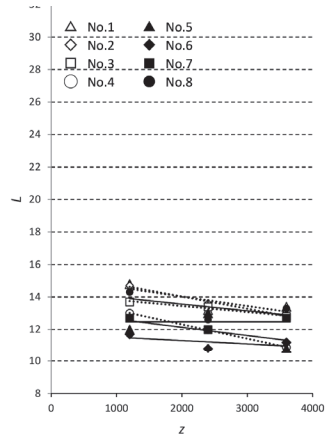


図10 T_2, M_1 における実験No.1からNo.8までのグラフ

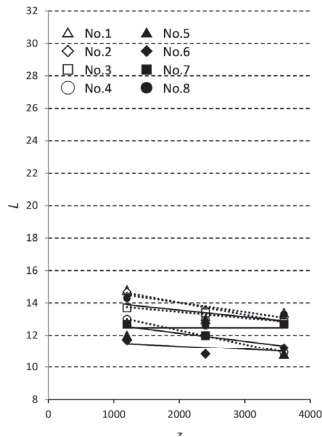


図9 T_1, M_2 における実験No.1からNo.8までのグラフ

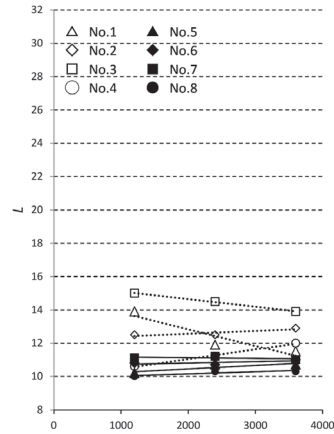


図11 T_2, M_2 における実験No.1からNo.8までのグラフ

表4 穴の拡大量Lの中心値 β_0 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	14.4	1	14.4	18	0.001	3.0
x_1x_2	31.7	1	31.7	39	<0001	6.8
T	187.1	1	187.1	232	<0001	41.3
Tx_1	20.0	1	20.0	25	0.000	4.3
Tx_2	11.8	1	11.8	15	0.001	2.4
Tx_1x_2	17.1	1	17.1	21	0.000	3.6
Mx_1	28.3	1	28.3	35	<0001	6.1
Mx_2	12.8	1	12.8	16	0.001	2.7
Mx_1x_2	11.7	1	11.7	15	0.001	2.4
Mx_2x_3	4.4	1	4.4	5	0.032	0.8
TM	9.4	1	9.4	12	0.003	1.9
TMx_1	47.1	1	47.1	58	<0001	10.3
TMx_2	12.4	1	12.4	15	0.001	2.6
TMx_1x_2	29.6	1	29.6	37	<0001	6.4
モデル	437.7	14	31.3	39	<0001	94.5
誤差	13.7	17	0.8	—	—	5.5
全体	451.4	31	—	—	—	100

$$\beta_0(\mathbf{x}, T, M) = A_{\beta_0}(\mathbf{x}) + D_{1\beta_0}(\mathbf{x})T + D_{2\beta_0}(\mathbf{x})M + D_{3\beta_0}(\mathbf{x})TM \quad (10)$$

$$A_{\beta_0}(\mathbf{x}) = A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 14.62 + 0.67x_2 + 1.00x_1x_2 \quad (11)$$

$$D_{1\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 2.42 + 0.79x_1 + 0.61x_2 + 0.73x_1x_2 \quad (12)$$

$$D_{2\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{2\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.94x_1 - 0.63x_2 - 0.61x_1x_2 + 0.37x_2x_3 \quad (13)$$

$$D_{3\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.54 - 1.21x_1 - 0.62x_2 - 0.96x_1x_2 \quad (14)$$

表4よりモデル全体の寄与率は94.5%であり寄与率としては十分高い。変数選択により構築されるモデルは表4に示された14の要因を含む。最も効果（寄与率）の大きいものは T であり寄与率41.3%である。これは図8から図11のグラフからも明らかで、ツールの影響により中心値が大きく変わる。すなわち粒径の大きい#140のツールでは穴は大きく拡大し、粒径の小さい#325のツールでは穴の拡大は小さい。

次に大きな効果は TMx_1 の3因子交互作用である。研削加工理論では、送り速度と砥粒の粒径は大きな効果があることは既知である。本研究ではさらにモードを評価しているため、モードが加わり3因子交互作用の影響が顕著となった。重要なポイントは主効果 x_1 や主効果 M が有意でないことである。図8から図11のグラフからも理解できるように、 L の中心値は実験条件ごとに変化しており、主効果だけでは説明できない。

4.2.2 L の変化率 β_1 の分散分析

L の変化率を分散分析した結果が表5である。モデルの要因数は6であり中心値を分散分析したときよりも少ない。

最大の効果はツール T であり、寄与率78.2%である。本研究の条件では変化率 β_1 は T のみでほぼ決定され、その構造を具体的に示したものが式(15)から式(19)である。

4.3 穴内面の粗さ R の解析

R についての直積実験の結果を表6に示す。紙面の都合でデータの一部を示す。この結果をグラフ化すれば図8から図11と同様のグラフが得られる。

そのグラフから得られた粗さの中心値 r_0 と傾き r_1 を分散分析すれば粗さについての3次元の要因効果が解析できる。グラフは割愛する。

表5 穴の拡大量 L の変化率 β_0 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	1.30E-06	1	1.30E-06	7.5	0.011	2.4
T	3.75E-05	1	3.75E-05	215.9	<0001	78.2
Tx_1x_3	8.21E-07	1	8.21E-07	4.7	0.039	1.4
Mx_3	1.74E-06	1	1.74E-06	10.0	0.004	3.3
Mx_1x_3	9.03E-07	1	9.03E-07	5.2	0.031	1.5
Mx_2x_3	1.11E-06	1	1.11E-06	6.4	0.018	2.0
モデル	4.33E-05	6	7.22E-06	41.6	<0001	88.7
誤差	4.34E-06	25	1.74E-07			11.3
全体	4.77E-05	31				

$$\beta_1(\mathbf{x}, T, M) = A_{\beta_1}(\mathbf{x}) + D_{1\beta_1}(\mathbf{x})T + D_{2\beta_1}(\mathbf{x})M + D_{3\beta_1}(\mathbf{x})TM \tag{15}$$

$$A_{\beta_1}(\mathbf{x}) = A_{\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = (-13.35 + 2.02x_1) \times 0.0001 \tag{16}$$

$$D_{1\beta_1}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = (-10.82 + 1.60x_1x_3) \times 0.0001 \tag{17}$$

$$D_{2\beta_1}(\mathbf{x}) = D_{2\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = (-2.33x_3 + 1.70x_1x_3 - 1.86x_2x_3) \times 0.0001 \tag{18}$$

$$D_{3\beta_1}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_1}(x_1, x_2, x_3) = 0 \tag{19}$$

表6 直積実験の結果；粗さRのデータ

No	制御因子			T_1						T_2					
				M_1			M_2			M_1			M_2		
	x_1	x_2	x_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3
1	1	1	1	0.134	0.245	0.346	0.314	0.514	0.428	0.177	0.135	0.134	0.196	0.277	0.163
2	1	1	2	0.200	0.200	0.220	0.600	0.500	0.389	0.132	0.295	0.088	0.387	0.177	0.143
7	2	2	1	0.148	0.156	0.173	0.093	0.150	0.211	0.500	0.254	0.238	0.154	0.189	0.010
8	2	2	2	0.138	0.141	0.145	0.233	0.212	0.330	0.336	0.447	0.311	0.090	0.108	0.203

4.3.1 Rの中心値 r_0 の分散分析

粗さの中心値を分散分析した結果が表7である。モデル全体の寄与率は83.3%であり、寄与率としては十分である。変数選択により構築されるモデルは7要因を含んでいる。

最も効果（寄与率）の大きいものはTMであり寄与率36.5%である。次に大きな効果のあるものは Tx_1 である。回転研削加工の理論では

ツールの送り速度とツール砥粒の粒径は大きな効果があることは前述しており、粗さの平均値も同様のメカニズムが働いている。さらに Mx_1 も寄与率が高い。ツールとモードは技術と経営の両方に大きく関与することが明らかになった。 β_0 および β_1 と同様に r_0 の構造を具体的に示したものが式(20)から式(24)である。

表7 粗さRの中心値 r_0 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	0.0232	1	0.0232	12	0.002	5.8
T	0.0243	1	0.0243	12	0.002	6.1
Tx_1	0.0632	1	0.0632	32	<.0001	16.8
M	0.0108	1	0.0108	5	0.028	2.4
Mx_1	0.0496	1	0.0496	25	<.0001	13.1
Mx_1	0.0112	1	0.0112	6	0.026	2.5
TM	0.1352	1	0.1352	69	<.0001	36.5
モデル	0.3175	7	0.0454	23	<.0001	83.3
誤差	0.0472	24	0.0020			16.7
全体	0.3647	31				

$$r_0(\mathbf{x}, T, M) = A_{r_0}(\mathbf{x}) + D_{1r_0}(\mathbf{x})T + D_{2r_0}(\mathbf{x})M + D_{3r_0}(\mathbf{x})TM \quad (20)$$

$$A_{\beta_0}(\mathbf{x}) = A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 0.241 - 0.027x_1 \quad (21)$$

$$D_{1\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 0.028 - 0.044x_1 \quad (22)$$

$$D_{2\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{2\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.018 + 0.039x_1 + 0.019x_2 \quad (23)$$

$$D_{3\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.065 \quad (24)$$

4.3.2 Rの変化率 r_1 の分散分析

Rの変化率 r_1 を分散分析した結果が表8である。モデルの寄与率は25.2%であることからRの変化率をモデル化することよりも、有意な効果を持定することが重要となる。最も効果の大きい要因はツールTであり、続いて x_2 x_3 の交互作用である。ツールについてはLでも最大の効果があり、 r_1 でも重要であることが判明した。

x_2 x_3 は特性 r_1 に固有の効果である。超音波 x_3 の効果は入り口から出口にかけての特性変化に関与する。さらに周方向の粗さは周方向の回転と関係があることは当然である。回転速度と超音波出力の交互作用が粗さの変化率に影響することを示したことで、加工メカニズム理解の端緒を得たことになる。得られた統計モデルは式(25)から式(28)に示した。

表8 粗さRの変化率 r_1 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_2x_3	1.57E-08	1	1.57E-08	5.6	0.025	11.2
T	1.89E-08	1	1.89E-08	6.8	0.014	14.0
モデル	3.46E-08	2	1.73E-08	6.2	0.006	25.2
誤差	8.08E-08	29	2.79E-09			74.9
全体	1.15E-07	31				

$$r_1(\mathbf{x}, T, M) = A_{r_1}(\mathbf{x}) + D_{1r_1}(\mathbf{x})T + D_{2r_1}(\mathbf{x})M + D_{3r_1}(\mathbf{x})TM \quad (25)$$

$$A_{\beta_0}(\mathbf{x}) = A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = (-1.03 + 2.21x_2x_3) \times 0.00001 \quad (26)$$

$$D_{1\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 2.43 \quad (27)$$

$$D_{2\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_0}(\mathbf{x}) = 0 \quad (28)$$

4.4 穴の扁平率Fの解析

Fについての直積実験の結果を表9に示す。紙面の都合でデータは一部のみ表示している。扁平率は0.2%を超えるものはなく、本研究では穴の歪みは少なく、真円に近い。

他特性と同様に、この結果から中心値 f_0 と傾き f_1 を求め、その値を測定値として分散分析すれば、扁平率についての3次元のな要因効果が解析できる。グラフは割愛する。

4.4.1 Fの中心値 f_0 の分散分析

f_0 の分散分析結果を表10に示す。モデルの寄与率は47.2%であり十分とはいえないが、要因効果の特定は可能である。

最も効果の大きい要因はツールと送り速度の交互作用 Tx_1 である。さらに TM および TMx_1 が有意である。これらの効果は研削加工理論と適合している。統計モデルは式(29)から式(33)となる。

4.4.2 Fの変化率 f_1 の分散分析

分散分析結果を表11に示す。モデルの寄与率は66.6%である。 $Mx_1, TM, Mx_1 x_3$ の交互作用が大きい。これらの効果は研削加工理論と合致する。また x_3 が入り口から出口にかけての特性変化に関与することは r_1 と同様である。統計モデルは式(34)から式(38)となる。

表9 直積実験の結果；扁平率Fのデータ

No	制御因子			T_1						T_2					
				M_1			M_2			M_1			M_2		
	x_1	x_2	x_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3
1	1	1	1	0.064	0.091	0.084	0.143	0.029	0.008	0.062	0.052	0.06	0.033	0.058	0.035
2	1	1	2	0.154	0.081	0.074	0.025	0.076	0.117	0.083	0.087	0.016	0.047	0.119	0.064
7	2	2	1	0.058	0.051	0.072	0.03	0.032	0.082	0.266	0.055	0.053	0.02	0.029	0.018
8	2	2	2	0.046	0.014	0.02	0.072	0.021	0.063	0.302	0.023	0.118	0.039	0.016	0.018

表10 扁平率Fの中心値 f_0 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
Tx_1	0.0124	1	0.0124	13.947	0.0009*	22.05
TM	0.0069	1	0.0069	7.771	0.0094*	11.53
TMx_1	0.0080	1	0.0080	9.004	0.0056*	13.63
モデル	0.0274	3	0.0091	10.240	0.0001*	47.21
誤差	0.0250	28	0.0009			52.79
全体	0.0524	31				100.00

$$f_0(\mathbf{x}, T, M) = A_{f_0}(\mathbf{x}) + D_{1f_0}(\mathbf{x})T + D_{2f_0}(\mathbf{x})M + D_{3f_0}(\mathbf{x})TM \tag{29}$$

$$A_{\beta_0}(\mathbf{x}) = A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 0.074 \tag{30}$$

$$D_{1\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.020x_1 \tag{31}$$

$$D_{2\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{2\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 0 \tag{32}$$

$$D_{3\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = -0.015 - 0.016x_1 \tag{33}$$

表 11 扁平率 F の変化率 r_1 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
T	3.53.E-09	1	3.53E-09	5.2	0.032	4.5
M	4.27.E-09	1	4.27E-09	6.2	0.020	5.6
Mx_1	1.20.E-08	1	1.20E-08	17.5	0.000	17.8
Mx_2	3.80.E-09	1	3.80E-09	5.5	0.027	4.9
Mx_1x_3	8.33.E-09	1	8.33E-09	12.2	0.002	12.0
TM	8.79.E-09	1	8.79E-09	12.8	0.002	12.8
TMx_3	6.41.E-09	1	6.41E-09	9.357	0.0054	9.0
モデル	4.71.E-08	7	6.73E-09	9.821	<.0001	66.57
誤差	1.64.E-08	24	6.85E-10			33.43
全体	6.35.E-08	31				

$$f_1(\mathbf{x}, T, M) = A_{r_1}(\mathbf{x}) + D_{1r_1}(\mathbf{x})T + D_{2r_1}(\mathbf{x})M + D_{3r_1}(\mathbf{x})TM \quad (34)$$

$$A_{\beta_0}(\mathbf{x}) = A_{\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 0.74E - 5 \quad (35)$$

$$D_{1\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{1\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = 1.05E - 5 \quad (36)$$

$$D_{2\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{2\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = (-1.16 - 1.93x_1 + 1.09x_2 + 1.61x_1x_3)E - 5 \quad (37)$$

$$D_{3\beta_0}(\mathbf{x}) = D_{3\beta_0}(x_1, x_2, x_3) = (1.66 - 1.42x_3)E - 5 \quad (38)$$

4.5 最適化

経営的視点に基づいた加工最適化の方法論として、ツールおよびモードを様々な条件で使用しても、ある特性が規格範囲を逸脱しない条件を探索することがある。そのとき他の特性も一定の制約条件を満たすことが必要となる。

ツールの粒径ばらつきはユーザーでは管理できないため、これに対応することは頑健設計となる。一方、モードはユーザーが管理できるため設計対象となる。このとき最適化の結果を参考にして加工メカニズムを理解すれば設計の負荷が軽減され経営的に望ましい。本研究では、最適化 1 として L の最小化を、最適化 2 として F の最小化を取り上げた。

4.6 最適化 1

まず初めにツールおよびモードに依存せず穴の拡大量 L を最小化する条件を求める。これを最適化 1 とする。穴径は製造規格で規定されることが多く経営的にも重要である。穴の拡大量の平均値は β_0 であるが、ツール (T_1, T_2) とモード (M_1, M_2) により 4 つの値をとる。その平均値 $\beta_0 A$ が最小となる加工 3 因子の条件を探索する。

制約条件は粗さの平均値 r_0 の範囲 $r_0 R$ 、また、その変化率 r_1 の平均値 $r_1 A$ を制約とすれば、加工粗さについての問題を低減できる。さらに楕円の扁平率が変化する割合 f_1 の範囲 $f_1 R$ が一定範囲以下が望ましい。定式化は式 (39) である。

$$\begin{aligned} \text{目的関数: } & \beta_{0A}(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最小} \\ \text{制約条件: } & 0 \leq r_{0R}(\mathbf{x}) \leq 0.3 \\ & -0.01 \leq r_{1A}(\mathbf{x}) \leq 0.01 \\ & -0.0001 \leq f_{1R}(\mathbf{x}) \leq 0.0001 \end{aligned} \quad (39)$$

式 (39) の最適解を式 (40) に示す。また L, R, F の最適値を図 12 から図 14 に示す。送り速度と超音波出力を最大に、回転速度を最小にすることが、ツールとモードに依存せず穴の拡大量を最小にする条件である。これは加工理論とも整合する。詳細は別途考察する。

$$\begin{aligned} (x_1, x_2, x_3) &= (1, -1, 0.99) \\ \beta_{0A}(\mathbf{x}) &= 12.96 \\ f_{1R}(\mathbf{x}) &= 7.27E - 5 \end{aligned} \quad (40)$$

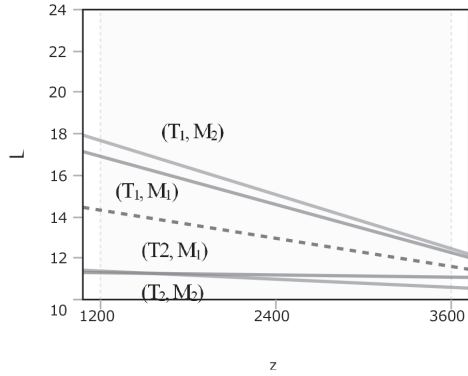


図12 Lの最適化1の結果

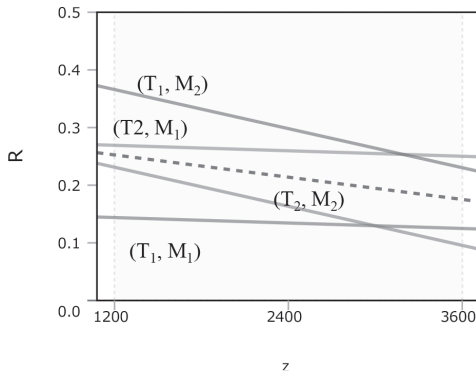


図13 Rの最適化1の結果

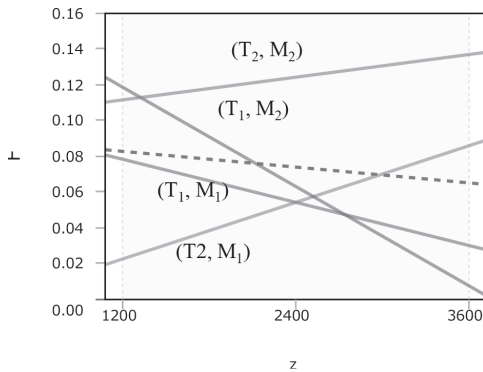


図14 Fの最適化1の結果

4.7 最適化 2

扁平率 F はツールの機械振れなどの影響で増大する。この値を一定以下に抑えることは装置管理の点で重要であり、経営的にも重要な特性である。

最適化 2 では変化率 f_1 がツールとモードでさまざまな値をとるが、その値の範囲 f_{1R} が最小となる条件を探索する。制約条件として、 β_0 の平均値 β_{0A} および r_0 の範囲 r_{0R} 、また r_{1A} も最適化 1 と同じ制約条件を設定した。

扁平率の範囲 f_{1R} の最小化を定式化したものが式 (41) である。 $\beta_{0A}(x)$ の制約は最適化 1 の結果を反映して設定している。

目的関数： $f_{1R}(x) \rightarrow$ 最小

制約条件： $0 \leq \beta_{0A}(x) \leq 15$

(41)

$0 \leq r_{0R}(x) \leq 0.3$

$-0.01 \leq r_{1A}(x) \leq 0.01$

式 (41) の最適解を式 (42) に示す。また L, R, F の最適値を図15から図17に示す。送り速度を最小に、回転速度はやや速め、超音波は最大とすることが、ツールとモードを変えた場合の扁平率の範囲を最小にする条件である。扁平率についての先行研究は少なく情報も得られていないが、ツールを低速で送りやや速い回転速度で超音波を最大にすることは、「穏やかな加工」であり研削理論には矛盾しない。詳細な考察は次節で行う。

$(x_1, x_2, x_3) = (-1, 0.64, 1)$

$f_{1R}(x) = 2.59E - 5$

(42)

$\beta_{0A}(x) = 14.42$

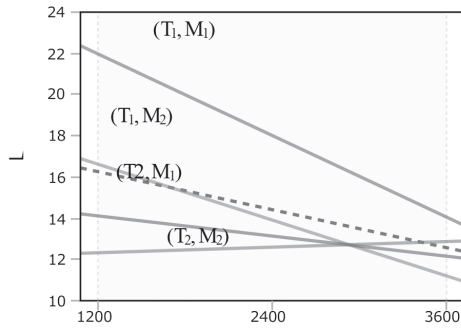


図 15 Lの最適化2の結果

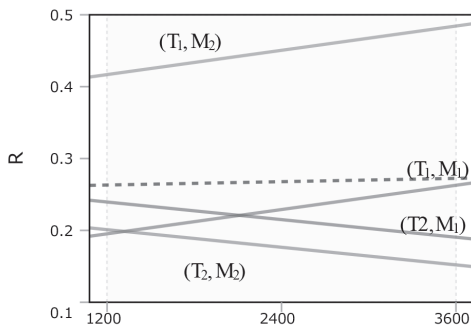


図 16 Rの最適化2の結果

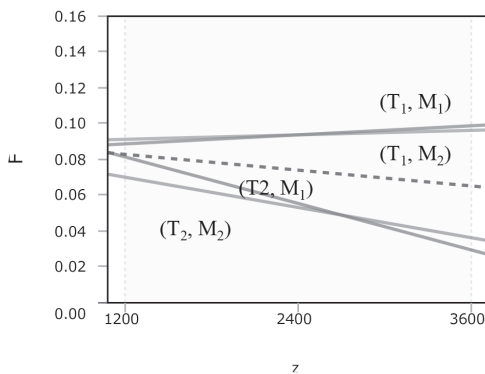


図 17 Fの最適化2の結果

5. 考察

5.1 分散分析と統計モデル

L, R, F の3特性についてそれぞれ中心値と変化率を求めた。 L については、中心値と変化率のモデルの寄与率は80%以上と大きく、穴の拡大量はツールの影響を強く受けることが判明した。送り速度 x_1 の影響も大きく、これらは研削

加工理論と合致するものであり、本研究のデータ解析は信頼できることが裏付けられた。

R については、中心値がツールとモードの交互作用の影響が大きく、変化率はツールと x_2 x_3 の交互作用の影響が大きいことも判明した。超音波 x_3 の効果は中心値では現れず変化率に影響することも判明した。

F については、中心値が TMx_1 の交互作用が大きく、変化率はこれらに加えて x_3 の効果も有意であることも判明した。超音波 x_3 の効果は R と同様に変化率に影響することが明らかになった。

超音波 x_3 は材料除去率を10%程度改善することが既知であり、技術的にも経営的にも重要な加工因子である。この効果が最適化にどのような影響があるかを次節で述べる。

5.2 最適化

ツールおよびモードに依存しない最適化が経営視点では重要である。そのため穴の拡大量を最小化することを最適化1とし、扁平率を最小化することを最適化2とした。

まず最適化1について考察する。最適解は $(x_1, x_2, x_3) = (1, -1, 0.99)$ である。これは高速送り、低速回転、超音波が高出力であり、穴拡大量はツールおよびモードに依存せず小さい値となる。特に、 T_2 において拡大量は12以下となり最適化の効果が示されている。

最適化2の最適解は $(x_1, x_2, x_3) = (-1, 0.64, 1)$ であり、低速送り、中速回転、超音波高出力が条件である。送りと回転は最適化1とは逆の設定となる。超音波出力は最適化1,2とも高出力が優れている。加工技術の視点からも超音波は材料除去を援用するため高出力が優れていることは明らかである。また超音波は穴の軸方向（加工の進行方向）に寄与すること、分散分析においても変化率に影響があること、なども今回の研究で明確になった。いずれの最適化においても加工理論と大きく矛盾しない結果が得られており、マネジメント視点での最適化の実用性が高く、本研究の有用性が示された。

6. おわりに

本研究では、ツールとモードが加工 3 因子との間で作用する交互作用を評価しマネジメント視点での加工最適化に重要な役割を果たすことを示した。そのための直積実験を計画し、研削穴加工を実施して、穴形状をレプリカ法で 3 次元測定した。測定データから穴の拡大量、粗さ、歪みの 3 特性についての統計モデルを作成し、数値計画法で最適化した。このときツールとモードの組合せに依存しない加工方法がマネジメント視点で重要であり 2 つの最適化を実施した。結果を考察し、技術的および経営的視点の両面からその有用性を示した。

【引用文献】

- [1] Koshimizu, S. and Aoki, S. (2013), "Micro-Grooving of Glass Using Small-Diameter Diamond Grindstone with Ultrasonic Vibration", *Advanced Material Research*, Vol.797, pp363-373.
- [2] Li, Z. C., Jiao, Y., Deines, T. W., Pei, Z. J., and Treadwell, C. (2005), "Rotary Ultrasonic Machining of Ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments", *International of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp1402-1411.
- [3] Li, Z. C., Pei, Z. J., Sisco, T., Micale, A. C. and Treadwell, C. (2007), "Experimental Study on Rotary Ultrasonic Machining of Graphite/Epoxy Panel", *Proceedings of ASPE Spring Topical Meeting*, Vol.40, pp52-57.
- [4] Montgomery, D.C. (2005), *Design and Analysis of Experiments* (6th ed.), Wiley, New York.
- [5] Moorhead, P. R., and Wu, C. F. J. (1998), "Cost-Driven Parameter Design", *Technometrics*, Vol.40, Iss.2, pp111-119.
- [6] 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.
- [7] Ogawa, A. and Takahashi, T.(2014),"Activity to Improve and Promote TQM Systems", *Proceeding of the ICQ14 Tokyo*, JP-21.
- [8] Ogawa, A. and Takahashi, T.(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.
- [9] Ogawa, A. and Takahashi, T.(2016),"Optimum design for reverse engineering", *Proceeding of the 14th ANQ Congress*, D6, JP-33.
- [10] Ogawa, A. and Takahashi, T.(2017), "Optimization of processing from Quality Management point of view", *Proceeding of the 15th ANQ Congress*, QMS-04/JP-05.
- [11] 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.
- [12] 小川昭, 高橋武則, 樋口英一 (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*, 第61巻, 第3号, pp151-153.
- [13] 小川昭, 高橋武則, 樋口英一 (2017) : "レプリカ法によるガラス微小穴内部形状の間接測定, 第1報: 研磨断面直接測定との比較", *砥粒加工学会誌*, 第61巻, 第12号, pp659-665.
- [14] 小川昭, 高橋武則 (2016) : "統計モデルによる機械加工の最適化", *品質*, 第47巻, 第3号, pp55-60.
- [15] Shoemaker, A. C., Tsui, K., and C. F. J. Wu, C. F. J. (1991), "Economical Experimentation Methods for Robust Design", *Technometrics*, Vol. 33, No. 4, pp415-427
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Zhao, Z., Li, B., Zhang, G., Yu, H., Wang, W., He, X., Hou, X., Cheng, X., and Yao, B. (2017), "Study on the evaluation of cylinder's global sizes", *Precision Engineering*, Vol. 49, pp189-199.

