

博 士 学 位 論 文

論文要旨
および
審査結果の要旨

博甲第 15 号

2019 年 3 月

目白大学大学院経営学研究科

はしがき

この冊子は、学位規則（昭和28年文部省令第9号）第8条による公表を目的として、平成31年3月に本学において授与した博士（経営学）の学位について、論文内容の要旨および論文審査結果の要旨を収録したものである。

学位記番号に付した甲は本学大学院学則第32条3項の要件を満たしたものであることを示す。

氏名	小川 昭
学位の名称	博士（経営学）
学位番号	博甲第15号
学位授与年月日	平成31年3月25日
授与機関	目白大学大学院
学位論文題目	統計的品質管理手法に基づく硬脆性材料の超音波援用回転研削穴加工の最適化
論文審査委員	主査 目白大学大学院経営学研究科教授 平林 隆一 副査 目白大学大学院経営学研究科教授 伊藤 利佳 副査 目白大学大学院経営学研究科教授 張 元宗

学位論文要旨

本論文は、汎用的な管理技術である統計的品質管理 (Statistical Quality Control: SQC) 手法に基づいて、硬脆性材料であるガラスの穴あけ加工を最適化する方法論を技術および経営の 2 つの視点から述べたものである。その目的は、本論文で提案する SQC に基づく加工のモデル化と最適化の方法論が、加工品質の改善だけでなく、加工コストや生産性に代表される経営指標の向上にも有用であることを示すことである。品質 (Quality)、コスト (Cost)、納期 (Delivery) のいわゆる QCD は SQC で最も基本的な特性である。SQC に基づき加工 (Machining) の QCD を最適化する技術 (Technology) が経営 (Management) にも役立つことを示すことは、Machining Technology の事例でもあり、Management of Technology (MoT) の事例でもある。

一般に硬脆性材料を加工することは難しい。そこで本論文で対象となる工程では超音波を援用した回転加工 (Rotary Ultrasonic Machining: RUM) を採用した。RUM で重要な因子は、加工ツールの送り速度、回転速度、超音波出力の 3 因子、さらに工法としての送りモードや工具としての加工ツールがある。これらの主効果や交互作用が加工形状や性状 (粗さ) に複雑に影響する。またクラックやチッピングが確率的に発生するため穴の形状や粗さが安定しない。形状不良が発生する度に根本原因の特定作業を進めるが、穴内部は測定が困難であるため定量的な評価ができない。このため本論文の対象工程では加工メカニズムが解明されず、工程改善が進まない状況にあった。経営判断としては、良品率が低下している状況や検査時間が増大することによるコスト増、さらにはライン停止による生産性の低下があることを承知のうえで、現状の製造を継続し、選別による製品品質の維持を行わざるを得ない状況であった。

その後、生産技術の進歩から形状を転写するレプリカを穴内部形状の間接測定に応用する技術が開発された。このレプリカ法は多くの穴形状を高精度で、安価に、短時間で測定できる特徴がある。このため、本論文では SQC 手法の 1 つである実験計画法を活用して様々な条件で多数の穴加工を行い、その形状をレプリカ法で測定した。そして測定結果を統計解析することで加工メカニズムを解明し、加工形状をモデル化し、そのモデルに基づいた最適化を行った。本論文はこれらの取組を以下の各章で述べる。

第 1 章 序論

第 1 節でまず研究背景を概観する。研究背景は SQC や RUM の歴史、硬脆性材料の現代社会での有用性とその加工の概要を示す。次に第 2 節で先行研究を紹介し、その後第 3 節で本論文の研究目的と意義を述べる。最後に第 4 節で論文の構成を述べる。論文は全 7 章で構成されており、4 つの事例を紹介する。

第 2 章 硬脆性材料の超音波回転加工における最適化の課題点とその対応

第 1 節で本章の目的を述べる。それは経営的な課題点として、加工メカニズムの解明、加工形状のモデル化、モデル化された形状の最適化が存在することである。さらに技術的な課題点として、微小穴内部の形状測定がある。次に第 2 節では、本論文で扱う経営的な課題点、第 3 節でその対応を述べる。経営的課題は SQC 手法を活用し、加工メカニズムを解明したうえで、加工形状をモデル化すること、さらにモデルをもとに加工条件を最適化する方法で達成できることを述べる。第 4 節では技術的な課題点を述べ、第 5 節でその対応、すなわちレプリカ法による穴内部形状測定の開発と実用化を述べる。そして非接触測定機を使用したレプリカ法が開発、実用化され、本研究が開始された時点で穴内部形状の測定が可能になり、技術的課題は達成されたことを述べる。

第 3 章 統計モデルによる回転研削穴加工の最適化

第 1 節で本章の目的、すなわち SQC 手法に基づく超音波を援用した回転研削穴加工最適化の典型的な事例を述べる。第 2 節では、加工の 6 特性、すなわちガラス穴の直径、チップング、クラック、生産性、工具消耗、工程管理コストと、加工機の 3 因子および加工ツールの送りモードの 4 因子との関係を示す。第 3 節では、工法を含む統計モデルとモデル構築のための実験の計画、およびその結果を示す。そして第 4 節でツールの送りモードが経営視点で重要であることを示したうえで、モードごとに最適解を求めるシナリオとモードに共通した最適解を求めるシナリオを示し、両者の特徴を述べる。そしてシナリオの選択は経営視点で重要となることを示す。最後に第 5 節で本章のまとめを述べる。

第 4 章 経営視点を加えた回転研削穴加工の楕円に基づく断面形状評価

第 1 節で本章の目的、すなわち穴加工形状を真円ではなく楕円を前提として解析する方法を提案する。これは生産工程が準備期にあるとき、加工メカニズムの解明を目的として、楕円形状を新たな加工の技術特性として定義することが、工程の早期立ち上げに有効であ

ることを述べる。第 2 節では楕円に基づく評価特性として、穴内部の加工点と楕円の 2 焦点からの距離の和の半分である半距離和、断面曲線を楕円としたときの粗さを取りあげる。第 3 節ではツールの送り速度、回転速度、超音波出力、加工モードの 4 因子の 2 水準完全実施要因計画を示す。そして第 4 節で実験結果から超音波援用回転研削穴加工のメカニズムを考察する。最後に第 5 節で本章のまとめを述べる。

第 5 章 工法と工具を含めた回転研削穴加工の楕円に基づく 3 次元形状評価

第 1 節で本章の目的、すなわち 3 次元形状評価の概要を述べる。続いて第 2 節で穴入口から出口にかけて、内部の複数点において楕円に基づく穴加工形状の 3 次元形状評価の統計モデルを示す。評価特性は、半距離和の平均値と変化率、楕円を断面曲線として求めた表面粗さの平均値と変化率、楕円の扁平率の平均値と変化率、および加工軸の振れの平均値と変化率である。そして第 3 節では、工法と工具の 2 因子および加工 3 因子の直積実験計画を示す。第 4 節で結果と考察を述べる。ここでは半距離和はツールと加工 3 因子との交互作用の影響を強く受けること、さらには表面の粗さや扁平率との相関があることを示す。最後に第 5 節で本章のまとめを述べる。

第 6 章 加工メカニズムの解明と優先度を考慮した 3 次元加工形状の最適化

第 1 節で本章の目的、すなわち 3 次元加工形状の最適化の概要を述べる。続いて第 2 節では、加工に最適なツールを選定するために 4 本のツールで全 12 回の実験を行う。これは Plackett and Burman Design と呼ばれ加工要因をスクリーニングするための代表的な実験計画であることを述べる。その後第 3 節では、最適なツールを使用して穴加工形状および粗さの最適化を行うための実験計画を検討する。このとき加工因子が形状に与える影響を 2 次の効果まで評価するため Central Composite Design と呼ばれる計画を立案する。そして実験結果から加工形状および粗さのモデルを構築する。モデルは半距離和の平均値と変化率、粗さの平均値と変化率である。そして第 4 節でこれら 4 つの特性を同時に最適化する方法と、特性に優先度をつけて多段階最適化する方法とを比較する。その結果、超音波出力は形状特性に対して 1 次の効果と 2 次の効果があること、同時最適化と多段階最適化では超音波出力の最適解が異なることを示す。そして最適化プロセスを明示し利害関係者との合意を図るためには多段階最適化が有用であることを示す。最後に第 5 節で本章のまとめを述べる。

第7章 結論

第7章では、SQCに基づいた4つの事例をまとめ、総括する。第3章と第6章は加工形状のモデル化および最適化の事例を紹介したものであり、第4章と第5章は加工形状のモデル化の事例である。そして本論文が技術と経営の両面で企業や社会の価値創造に貢献することを述べる。特に多段階最適化のアプローチは、特性の優先度を明確にし、モデルの構造を特定した後、利害関係者の同意を得ることを重視する点で技術に偏らない経営に貢献する最適化法であると結論する。

本論文では超音波を援用した研削穴加工を取りあげたが、実験計画法により得られた測定データを統計解析し、メカニズムを解明したうえでモデル化することが可能であれば、本論文の最適化の方法論は製造業のさまざまな加工（除去加工、付加加工、成形加工）にも適用が可能である。

審査結果の要旨

1. 論文の批評

本研究は統計的品質管理手法に基づき、硬脆性材料に対して超音波援用回転研削穴加工を行う際の加工最適化の方法論の確立を目的としている。さらにその方法論は、加工品質の技術的な改善だけでなく、加工コストや生産性に代表される経営指標の向上にも有用であることを目標としている。そのため加工形状モデルの構築には統計的品質管理手法の中でも代表的な実験計画法や多変量解析法が適用され、正確で客観的な統計モデルが構築されている。そして得られたモデルに対しては固有技術に基づく加工メカニズムの裏付けもなされており、モデルの妥当性も確認されている。さらに、形状モデルに対して本研究で新たに提案した最適化法を適用し、従来の最適化法より優れた最適解が得られたことを示している。その結果、企業において最適化を進めるうえで重要な利害関係者との合意形成も円滑に進めることができる点は、本研究の経営学的な意義を認めることができる。また本研究で採用された加工形状の測定評価技術も、今後同様の研究に役立つものである。加工最適化の方法論として、技術と経営に寄与することが示されている。

2. 審査結果

従来は測定困難であった硬脆性材料の微小穴内部を測定し、統計的品質管理手法により加工のメカニズムを科学的に解明したうえで、加工形状を3次元でモデル化している。さらに数理計画法に基づいた新しい最適化法を示し、従来方法より優れた最適解を得ている。これらは全て企業の生産実務のみならず学術研究の領域においても寄与できる汎用的な方法論である。さらに加えて、企業内の生産実務における最適化において重要な利害関係者との円滑な合意形成を可能にしたことも、統計的品質管理手法に基づいた最適化の方法論の経営学的な研究成果であると判断できる。

以上より、本研究は博士論文として極めて高い価値を有するものであると評価する。

最終試験の要旨

1. 試験結果

経営学分野の研究においては、この学問分野の性質から広範な知識が要求される。このため研究の基礎を構築するためには幅広い書籍および論文の読破が不可欠である。特に先行研究に関する論文精査および課題点の明確化は重要である。これらの点については多角的な観点から口頭試問を行い、質疑応答を通して当人の有する知識の基礎について問題がないことを確認することができた。外国語に関しては、参考文献に多くの英語文献があげられていることと、国際会議に5つの査読論文が掲載されていることから外国語に関する十分な素養を有するものと判断した。

以上より、基礎的な知識および外国語に関しては十分なレベルにあるものと判断した。

2. 最終結論

博士号取得者にとって重要なことは、学位取得後のさらなる研究であるとともに、現代では研究成果を国際的に発信することである。この点において、基盤的に十分な知識があり、今後の幅広い研究の継続が可能であるとともに、引き続き英語による論文の投稿および国際会議での発表が可能であると判断した。

以上のことから、当該学生を博士後期課程最終試験に合格したものと認定する。