

	しまだ けいた	
氏 名	嶋田 慶太	
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成24年 3月27日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械システムデザイン工学専攻	
学位論文題目	振動研削に関する研究	
指 導 教 員	東北大学教授 厨川 常元	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 厨川 常元 東北大学教授 祖山 均 東北大学教授 横堀 壽光 東北大学准教授 閻 紀旺	

## 論 文 内 容 要 旨

現在、小径軸付き砥石を用いた研削加工（以下、マイクロ研削）は燃料噴射弁の内面研削や歯科用フレームの創成などに対して用いられている。これらの加工においてマイクロ研削に対して要求される研削面粗さや形状精度は厳しくなっており、より高品質な加工を達成する加工法が求められている。振動研削は研削面粗さを改善する方法の1種であり、その効果について既に報告されている。また振動研削の1形態である超音波研削は研削抵抗低減の効果を有しており、研削抵抗による砥石変形を抑制し形状精度改善の効果が期待される。しかし、これらの効果を定量的に推定する解析法は報告されておらず、加工条件選定は経験を要するものであった。そこで本論文では統計的手法による振動研削の研削面性状および研削抵抗の理論解析法を提案し、実験的検証を行った。本論文の提案する解析法を用いることで、通常研削を含むすべての振動研削における加工面性状と研削抵抗について解析が可能となり、これにより最適な加工条件を選定することができる。さらに本論文では振動研削の応用として、低周波数振動と超音波振動を組み合わせた振動重畳研削による表面微細構造創成について検討している。表面微細構造は材料表面にマイクロ・ナノメートルオーダーの規則的な構造により光学特性、電磁気特性、濡れ性などの新たな機能を発現させる技術であり、これまでに MEMS 技術による加工が提案されている。本方法では機械加工によりさまざまな材料に対して高速に表面微細構造が創成できることが期待される。

本論文は全6章からなる。

第1章では本研究の背景と目的を明確化している。

第2章において振動研削における研削面性状の解析モデルを提案した。まず従来の研究における研削モデルについて特徴を示し、従来のモデルにおいては切削切れ刃と切削痕が1対1対応とする点において振動研削の解析に問題であることを明らかにした。そこで振動研削のための新たな解析モデルとして有効切削痕候補という概念を導入し、同一切れ刃による基準研削断面の複数回切削の効果を考慮可能とした。これにより通常研削と振動研

削が理論上シームレスに接続し、振動研削の加工面性状改善の効果を考慮することが可能となった。また砥粒密度をもとに計算することで原理的に砥石の3次元方向で異なる砥粒分布を有する砥石についても考慮することが可能となった。

第3章では第2章で提案した解析モデルの整合性について実験的に検証した。まず超音波研削、オシレーション研削の実現可能な加工機を開発した。開発した装置において超音波振動はボルト締めランジュバン型振動子によって発生させ、オシレーション振動はNC制御により実現した。また実験には電着ダイヤモンド砥石を用いることで砥粒の摩滅・破碎・脱離を無視できる状態とし、砥石のツルーイング・ドレッシングを不要とした状態で実験することにより振動研削法のみ効果を考慮できる状態とした。この砥石は振れを持った状態であったが極限粗さを実験値から求めており、砥粒の分布が一様であることを仮定することで求めている。図1-図3にスラント研削、超音波研削、オシレーション研削の実験結果と理論解析の結果を示す。いずれの場合においても理論解析による曲線に実験結果がよく一致しており、本研究の提案する理論解析を実験的に証明している。

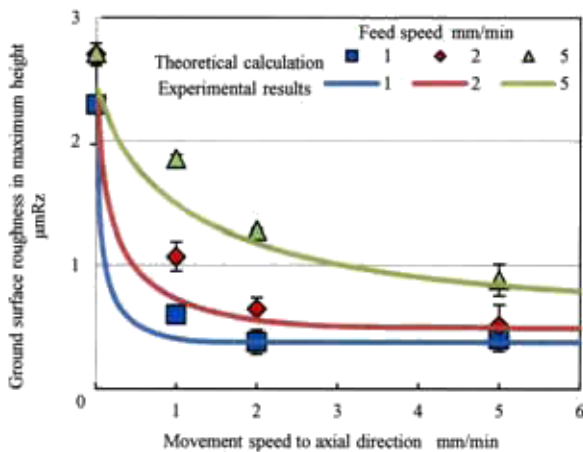


Figure 1 Results of slant feed grinding

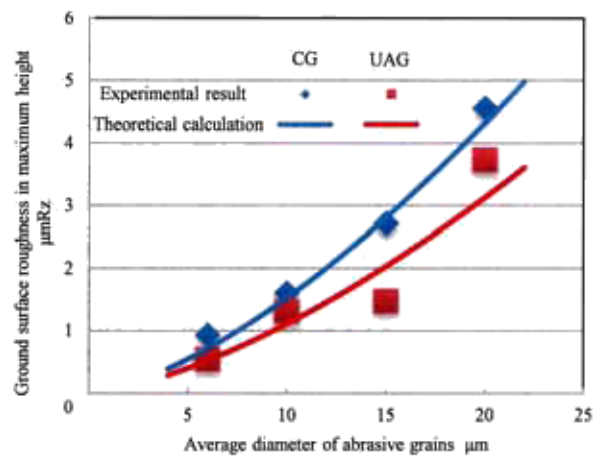
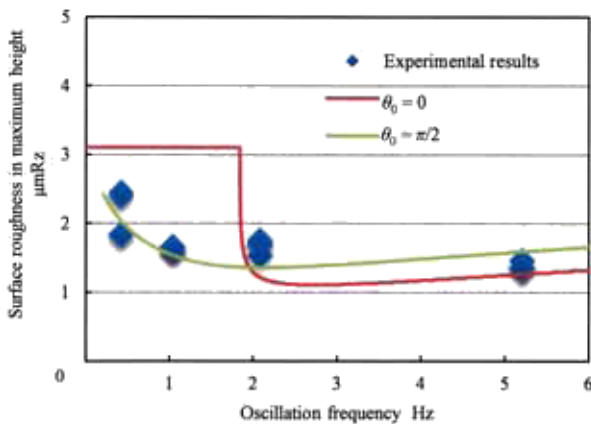
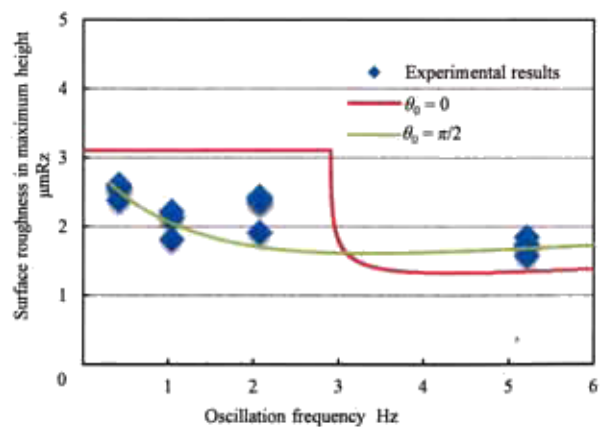


Figure 2 Results of Ultrasonic-assisted grinding: CG: Conventional grinding; UAG: Ultrasonic-assisted grinding



(a) Oscillation amplitude: 16 µm



(a) Oscillation amplitude: 40 µm

Figure 3 Results of Oscillating grinding

第4章では超音波援用時の研削抵抗低減の効果に関する理論解析を導出した。従来は統計的手法を適用する座標を変えることで砥粒切れ刃の最大砥粒切込み深さを求め、これに研削抵抗が比例することで研削抵抗を理論的に求めることができる。研削抵抗低減の効果については切削軌跡がオーバーラップすることによる切削断面減少から導出可能であることを示した。本章と第2章により統計的手法による研削面性状と研削抵抗の理論解析を同時に行うことが可能となった。

第5章では振動重畳研削における研削面性状の解析法と表面微細テクスチャ創成への応用を試みている。本研究において振動重畳研削とは周波数の小さい振動と超音波振動を組み合わせた振動研削として定義しており、研削面に与える影響がそれぞれ異なるため、両者の相乗効果によりさらなる加工面改善が期待される。研削面性状の解析により本研究が提案する解析法を複合して使用した場合においても解析が可能であることを示した。また実験条件を選定し、振動重畳研削による表面微細テクスチャ創成について実験を行った。実験結果を図4に示す。同図に示すように表面微細テクスチャ創成について超音波振動による切削痕の重畳という単純な操作により、サブマイクロメートルピッチの構造を創成することを実現した。

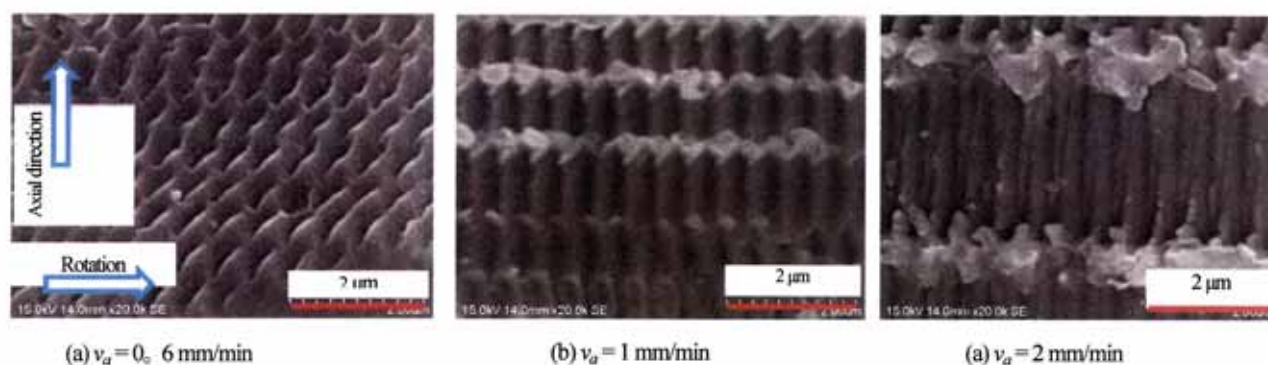


Figure 4 submicrostructures created with superimposed vibration grinding,  $v_a$ : movement speed to axial direction.

第6章は結論である。

以上、本論文では振動研削に関する研削面性状と研削抵抗の理論解析法と、振動重畳研削による表面微細構造の創成について提案した。理論解析法は加工時の抵抗と加工後の面粗さを定量的に求めることを可能としており工学的に高い意義を有する。またこれらの手法により理論解析法により振動研削における加工最適条件選定を可能となり、また表面微細構造創成では機械加工による安価で高速な創成法を示しており、工業的貢献が期待される。

# 論文審査結果の要旨

現在、小径軸付き砥石を用いた研削加工（以下、マイクロ研削という）は、燃料噴射弁の内面加工や歯科用フレームの創成加工等に必要不可欠なプロセスとしてその需要が高まっている。今後、このマイクロ研削の研削面粗さや形状精度への要求はますます厳しくなることが予想され、より高品質な加工面を得るための新しい加工法が求められている。スラント研削、オシレーション研削、超音波研削等の、いわゆる砥石を軸方向に揺動、あるいは振動させて研削する振動研削法は研削面粗さを改善する方法として知られている。また超音波研削は研削抵抗低減の効果を有しており、研削抵抗による砥石変形を抑制し形状精度改善の効果が期待される。しかしこれらの効果を定量的に推定する解析法は報告されておらず、加工条件選定は経験を要するものであった。そこで本論文では統計的手法による振動研削の仕上げ面粗さおよび研削抵抗の理論解析法を提案し、実験的検証を行っている。本論文で提案する解析法を用いることで、通常研削およびすべての振動研削における仕上げ面粗さと研削抵抗について解析が可能となり、最適な加工条件を選定することができる。さらに本論文では振動研削の応用として、低周波数振動と超音波振動を組み合わせた振動重畳研削を提案し、表面微細構造創成の可能性について検討している。表面微細構造は材料表面にマイクロ・ナノメートルオーダーの規則的な構造により光学特性、摩擦特性、濡れ性などの新たな機能性を発現させる技術であり、これまでに MEMS 技術による加工が提案されている。本方法では機械加工によりさまざまな材料に対して高速に表面微細構造が創成できることを見いだしている。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、統計的手法を用いた研削面性状の解析モデルを提案している。この解析モデルの特徴は有効切削痕候補という新しい概念を導入することにより、同一切れ刃による基準研削断面の複数回切削の効果を考慮できるようにした点である。これにより通常研削と振動研削が理論上、シームレスに記述することが可能となり、振動研削の仕上げ面粗さ改善の効果を定量的に考察することが可能となった。また砥粒密度をもとに計算することで、原理的に砥石の 3 次元方向で異なる砥粒分布を有する砥石についても考慮することが可能であることを見いだしている。これは有益な成果である。

第 3 章では、第 2 章で提案した解析モデルの整合性について実験的に検証している。まず超音波研削、オシレーション研削の実現可能な加工機を開発している。この装置において超音波振動はボルト締めランジュバン型振動子によって発生させ、オシレーション振動は NC 制御により実現している。また砥粒の摩擦・破碎・脱落が無視できる電着ダイヤモンド砥石を用いることで、振動研削法による効果のみを評価している。また一般に、砥石には僅かな振れが残留するが、極限粗さを実験値から得て、砥粒分布が一様であることを仮定し理論解析値を求めている。この振動研削の実験結果と、本研究の提案する理論解析結果とはよく一致しており、理論解析モデルが妥当であることを見いだしたもので、重要な成果である。

第 4 章では超音波援用時の研削抵抗低減の効果に関する理論式を導出している。統計的手法により砥粒切れ刃の最大砥粒切込み深さを導出可能とし、これに研削抵抗が比例することで研削抵抗を理論的に求めている。さらに研削抵抗低減の効果については切削軌跡のオーバーラップによる切削断面減少から導出可能であることを示している。本章と第 2 章により統計的手法による仕上げ面粗さと研削抵抗の理論解析を同時に行うことが可能となり、実際の研削条件の最適化を行う上で重要な成果である。

第 5 章では振動重畳研削における仕上げ面粗さの解析法と表面微細構造創成への応用を示している。仕上げ面粗さの解析により本研究が提案する解析法を複合して使用した場合においても解析が可能であることを示している。また表面微細構造創成について超音波振動による切削痕の重畳という単純な操作により、サブマイクロメートルピッチの構造を創成することを実現している。これは機能性インターフェース創成の実用化に向けた重要な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、振動研削に関する仕上げ面粗さと研削抵抗の理論解析法と、振動重畳研削による表面微細構造の創成について提案するものである。理論解析法は加工時の抵抗と加工後の仕上げ面粗さを定量的に求めることを可能としており工学的に高い意義を有する。またこれらの手法により理論解析法により振動研削における加工最適条件選定を可能となり、また表面微細構造創成では機械加工による安価で高速な創成法を示しており、機械システムデザイン工学およびナノ精度加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。