

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560141

研究課題名(和文)超音波振動援用による高性能内面ホーニング加工法の開発

研究課題名(英文)Development of high performance internal honing with ultrasonic vibration

研究代表者

水谷 秀行(MIZUTANI, Hideyuki)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：10201790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、機械部品の小径内面仕上げ用の高性能ホーニング加工法を開発することである。これは振動子が発する軸方向の振動を砥石半径方向の振動に変換し、この半径方向振動を砥石の切込み運動として利用する新しいホーニング加工法である。焼入鋼およびセラミックスのホーニング加工において、砥石半径方向振動の振幅変化に対応した寸法生成量が確認された。さらに、このホーニング加工法は仕上げ面性状の向上の点でも有利であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop high performance honing for finishing the inner surface of machine parts holes. This is a new honing method that converts the emitted axial ultrasonic vibration of the transducer into radial vibration and uses this radial vibration for in-feed motion of the honing stone. The main results are in the honing of a hardened steel and various fine ceramics, it was confirmed that the size generation rate changed in response to changes in the radial vibration amplitude of the honing stone. In addition, the honing method advantage of improving the honed surface quality was also found.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・切削・研削加工

キーワード：内面ホーニング 超音波振動 半径方向振動 超砥粒電着砥石 寸法生成 仕上げ面性状

1. 研究開始当初の背景

超音波振動切削に関する研究は、慶応義塾大学、名古屋大学、神戸大学等を中心にこれまでも多くの研究が行われているが、内径面の仕上げ加工に超音波振動を援用した研究例は少なく、特許公報にその適用例を若干みることができる。これらの報告ではいずれも加工中の工具径は固定され、小径穴の超音波振動加工において μm オーダーの寸法調整をインプロセスで行った例は見あたらない。一方、小径穴の仕上げ加工では一般に細粒または微粒砥石が使用されるため、切削抵抗の増大とともに目詰まりや目つぶれなどの加工トラブルが生じやすい。このため、砥石寿命の延長と加工精度および加工能率向上のためには、油剤の切削点への供給および作用状態を改善し、切りくず排出性を良好にし、切削抵抗の低減を図る必要がある。さらに、数 mm の小径穴の仕上げ加工において砥石に μm オーダーの切込み調整機能を持たせることは機構上も困難をとまうため、この機能を砥石半径方向、すなわち切込み方向の超音波振動の振幅調整によって得ようとしている点は新しい試みといえる。

申請者は、これまでの基礎的研究によって砥石半径方向の超音波振動の発現とこれによる材料除去(寸法生成)を確認している。しかし、軸方向振動を効率的に半径方向の振動に変換するための工具形状や各種材料に対する超音波振動ホーニングの加工特性および効果の違いなどについてはほとんど明らかにされていない。そこで、砥石半径方向振動を活用した高性能ホーニング加工装置および方法の開発を推進することによって各種材料の小径内面の精密加工技術の向上を図ることが本研究の目標である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、**図1**に示すような砥石部分をパイプ・スリット構造としたホーニング工具を用いて、振動子が発する軸方向の超音波振動を砥石半径方向のたわみ振動に変換し、これを円筒内径面に対する切込み運動として活用した新しい高性能ホーニング加工装置および方法を開発し、実用化を目指すことである。本研究で開発する装置は、搭載する工作機械にそのための特別な切込み機構を設けることなく、超音波振動の振幅を制御することによって μm オーダーの内径寸法の調整を可能にするものである。これによって

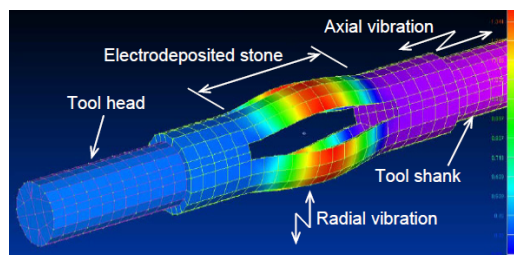


図1 パイプ・スリット型砥石ツールの振動イメージ

機械要素に多数存在する円筒穴の高精度、高能率加工を実現する。

3. 研究の方法

(1) 砥石半径方向の超音波振動を発生する小径ホーニング砥石ツールの基本構造は、**図2**に示す通りであるが、本研究で開発する $\phi 4\text{mm}$ 程度の工具形状および各部寸法の詳細についてはさらに検討・改良する必要がある。小径の高性能砥石ツール開発のための振動解析実験ならびに新たな砥石ツールの設計、製作は振動装置メーカーおよびホーニング盤メーカーと協力して行う。

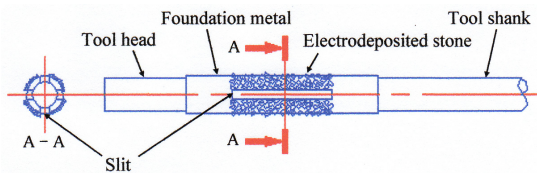


図2 振動ホーニング用砥石ツールの構造

- (2) 第1号試作機は、砥石ツールの回転を固定し、工作物側に回転を与える方式のホーニング装置としたが、実用化の可能性を高めるため、工作物の大きさや加工条件の制約が少ない工具回転型の超音波振動ホーニング装置をホーニング盤メーカーおよび振動装置メーカーとの共同で改良設計し、製作する。
- (3) 超音波振動付与による寸法生成過程を測定するとともに、工作物材種による表面性状、仕上げ面粗さの変化をSEMおよび表面形状測定器によって調べる。
- (4) 焼入鋼および構造用セラミックス材料の超音波振動ホーニングの切削抵抗を測定し、超音波振動付与による切削抵抗低減効果を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 砥石半径方向振動による寸法生成過程

本研究で開発した砥石半径方向振動を切込み運動として利用した超音波振動ホーニング装置が切削能力を有するかどうかの確認実験を行った。実験は、砥石半径方向の振動振幅を変化させ、ホーニング回数と寸法生

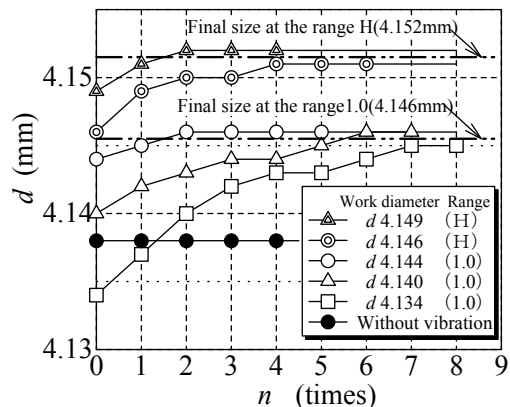


図3 振動ホーニングの寸法生成過程(焼入鋼)

成量との関係を調べた。図3の●印で示す振動を付与しない場合は、ホーニング回数 n の増加によって内径 d に変化がみられないことから切削による材料除去が行われていないことがわかる。一方、●印以外の超音波振動を付与した場合は、いずれもホーニング回数 n の増加によって工作物内径 d の拡大がみられ、切削による材料除去の進行が確認できる。また、振幅レンジ1.0およびHそれぞれにおいて加工限界寸法があり、仕上がり寸法がある値に収束する。これは振幅調整による加工寸法制御の可能性を示すものといえる。

(2) ロータリ超音波振動装置の製作

従来の工作物回転型超音波振動ホーニング装置は、工作物の大きさの制限や工作物回転用駆動装置を必要とするなど問題点が多く、これを改良するため、砥石側の振動子に回転運動を与えるスリップリングを用いたロータリ型超音波振動装置(図4)を設計・製作した。これは、ユニットとして各種工作機械に搭載可能な仕様にする事で実用化に近づけることができる。装置の振動特性は図中に示す通りである。

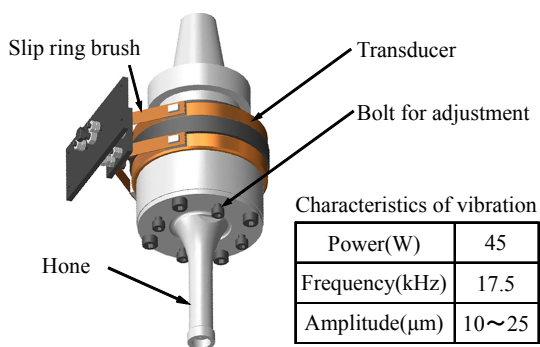


図4 ロータリ超音波振動子の概観

(3) ホーニング砥石ツールの改良

従来の装置では、砥石部とホーンとが一体化構造となったホーニングツールを使用していたが、振動子への取付け精度の確保が難しいことや砥石の摩耗、損傷の際の交換コストが大きいことなどから改良の余地があった。そこで、砥石部とホーンを分割し、コレットによる砥石ツール着脱型に変更・改良を行った。砥石ツール、コレットおよび超音波振動子の組立図と装置の振動振幅曲線を図5に示す。この装置の改良により、砥石ツールの製

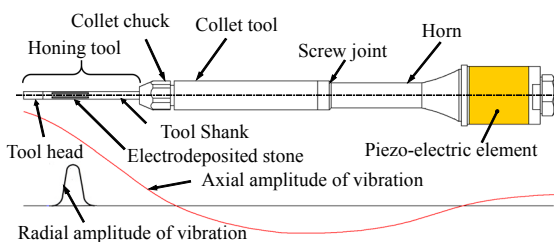


図5 ホーニング砥石ツールと振動子の構造

作が容易になり、またツール交換時の取付け精度が向上した。図5の振動振幅曲線に着目すると、超音波振動装置は、砥石軸方向と半径方向に振動するが、ここで必要となる半径方向振動はパイプ・スリット構造の電着砥石部のみ大きな振幅が得られる。この砥石半径方向の振動振幅の調整によって円筒内面の表面生成および所定の寸法生成が行われる。

(4) 装置の超音波振動特性

製作した超音波振動装置によって得られる砥石半径方向の振動振幅の側定例を図6に示す。砥石作用面の振動振幅は、砥石軸方向中央部(横軸の測定点が0mmの位置)で最も大きく、そこから遠ざかるにつれて小さくなる傾向にあり、両端固定のたわみ振動モードに近いことがわかる。また、コンローラーの振幅レンジをLからMに切替えることによって振幅を大きく変化させることができる。

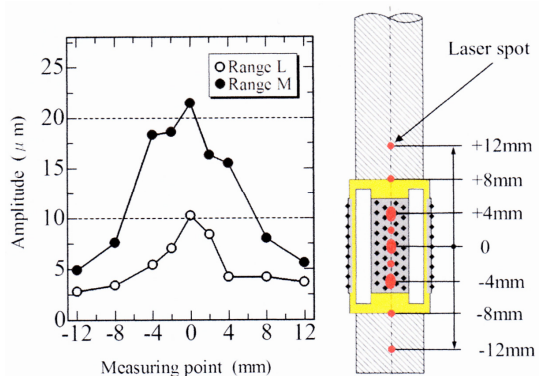


図6 砥石各部の振動振幅の側定例

(5) 超音波振動ホーニング装置と加工性能

本研究で製作した超音波振動ホーニング加工装置の全体構成を図7に示す。工作物取付台下部にはトルク検出型工具動力計を取付けホーニング抵抗の測定を可能にした。本装置によりホーニング加工実験を行い、加工性能の評価を行った。

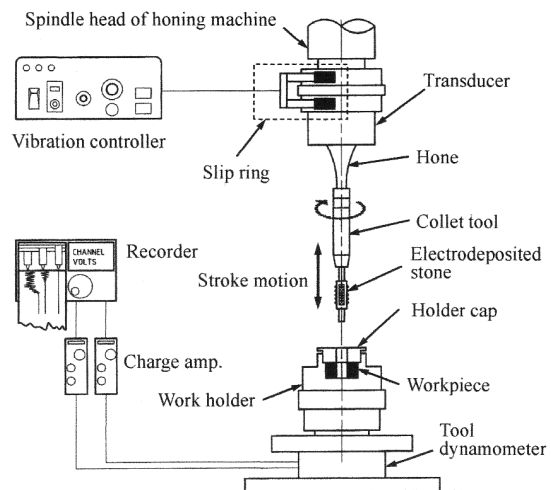
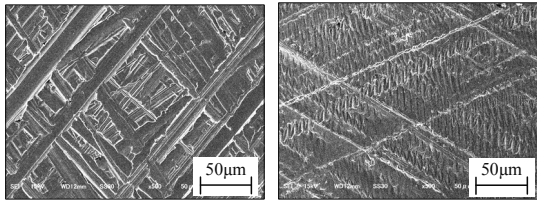


図7 超音波振動ホーニング加工装置の構成



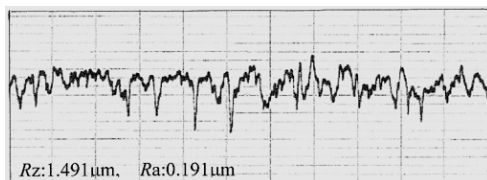
(a) 通常ホーニング面 (b) 超音波振動ホーニング面

図8 焼入鋼のホーニング仕上げ面性状の比較

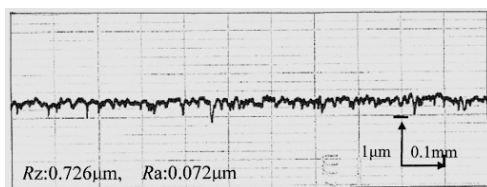
図8は、通常ホーニングと超音波振動ホーニングによるSK3焼入鋼の仕上げ面をSEM観察によって比較したものである。図中(a)の通常ホーニング面は、はっきりとした切削条痕とともに条痕周辺にはバリや比較的大きな盛り上がりが見られる。これに対して(b)の超音波振動ホーニング面は、クロスハッチを描く条痕に沿って一定間隔の規則正しい模様が刻まれ、なめらかな表面となった。これは明らかに超音波振動付与の効果であり、本ホーニング装置および方法の有用性を示す結果の一つといえる。

図9は、窒化けい素セラミックスのホーニング仕上げ面の断面プロフィールを示す。図中(a)の通常ホーニング面に比べて、(b)の超音波振動ホーニング面の粗さは大きく改善した。この両者の違いは、通常のホーニングでは砥石と工作物が面接触しており、加工点に油剤が進入しにくく、切りくずの排出も困難な状況にある。しかし、超音波振動ホーニングでは砥石と工作物が大きな加速度で接触、離脱を繰り返し、さらにパイプ・スリット構造の砥石部の振動によるポンプ作用によって切削点への油剤の進入と切りくずの排出洗浄作用が促進され、切削状態が改善されたために生じた結果と考えられる。以上のようにホーニング加工における超音波振動の付与は、焼入鋼、セラミックスいずれの材料に対しても仕上げ面性状の向上に大きな効果が認められた。

超音波振動付与によるホーニング抵抗(軸方向抵抗)の変化を図10に示す。図中左半



(a) 通常ホーニング面



(b) 超音波振動ホーニング面

図9 窒化けい素の仕上げ面粗さの比較

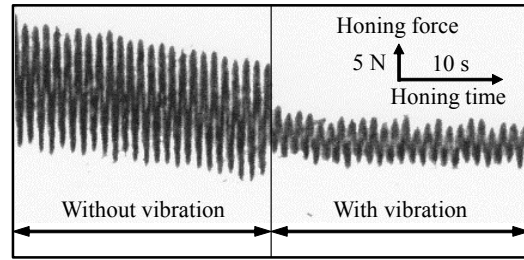


図10 焼入鋼のホーニング抵抗の変化

分の振動を付与しない領域では寸法生成は行われませんが、砥石と工作物が接触状態にあるため、砥石(主軸)の上下ストローク運動に対応して軸方向抵抗が+と-方向に周期的に変動する。この状態の途中で砥石に超音波振動を与えると、同図右半分の振動付与区間に示すように軸方向抵抗の著しい減少がみられた。これは、超音波振動付与による砥石-工作物間の摩擦低減効果と寸法生成(材料除去)開始による干渉量の減少によって生じた結果と考えられる。

機械部品に多数存在する小径内面の高精度加工技術の向上を目的とした本研究の成果は、大手自動車部品メーカーからもその応用が注目され、今後の進展と実用化に期待が寄せられている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① 水谷秀行, 浜岡亨, 浜田晴司, 稲崎一郎: 超音波振動援用による高性能ホーニング加工法の開発-半径方向振動発生装置の開発と評価, 砥粒加工学会誌, 57, 6(2013), 395-400. 【査読有】
- ② 水谷秀行: 超音波振動援用による高性能ホーニング加工, 機械技術, 61, 3(2013), 38-41. 【査読無】
- ③ 水谷秀行: 表面特性の向上を実現する超音波振動切削法の開発, 超音波 TECHNO, 25, 5(2013), 72-77. 【査読無】
- ④ 稲崎一郎: 超音波振動付与による切削加工高性能化の可能性, 機械技術, 61, 3(2013), 18-20. 【査読無】
- ⑤ ICHIRO INASAKI: Process Machine Interaction, Journal of SME Japan, 2(2013), 1-6. 【査読有】
- ⑥ 山本修太郎, 榎本俊之, 水谷秀行, 浜岡亨, 向恭平: ミセルとポリマーを用いた水溶性ホーニング油剤の開発, 日本機械学会論文集(C編), 77, 776(2011), 1535-1543. 【査読有】
- ⑦ 稲崎一郎: 競争力のある工作機械の開発に向けて, 機械技術, 59, 12(2011), 4-10. 【査読無】
- ⑧ A. BEAUCAMP, Y. NAMBA, I. INASAKI, H. COMBRINCK and R. FREEMAN: Finishing of Optical Moulds to $\lambda/20$ by

Automated Corrective Polishing ,
Annals of the CIRP, 60, 1(2011),
375-378. 【査読有】

〔学会発表〕(計 16 件)

- ① 安ノ井智昭, 藤澤勇太, 渕之上諒, 水谷秀行: 超音波振動援用による高性能ホーニング加工の研究(装置の改良と特性の評価), 日本機械学会東海学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 大同大学, 名古屋(2014. 3. 17), 288-289.
- ② 加納輝一, 阿竹洋祐, 伊藤雅人, 長谷川貴哉, 水谷秀行: 表面特性の向上を実現する高性能切削法の開発(超音波振動切削の適用), 日本機械学会東海学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 大同大学, 名古屋(2014. 3. 17), 280-281.
- ③ 広瀬翔太, 小島清一郎, 松原健太, 水谷秀行: フライス加工による高圧縮残留応力の生成と疲労特性の評価, 日本機械学会東海学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 大同大学, 名古屋(2014. 3. 17), 290-291. 【第 35 次工作機械技術振興賞(奨励賞)受賞】
- ④ 浜田晴司, 水谷秀行, 稲崎一郎: 超音波援用ホーニング加工, 中部大学生産技術開発センター研究発表会, 中部大学, 春日井(2014. 2. 20). 【招待講演】
- ⑤ 水谷秀行: 超音波振動援用による高性能ホーニング加工法の開発, 砥粒加工学会関西地区部会平成 25 年度第 3 回研究・見学会, (株)日進製作所, 京都(2013. 12. 11). 【招待講演】
- ⑥ 伊藤雅人, 水谷秀行: 切削残留応力に及ぼす切れ刃形状および超音波振動の影響 ABTEC2013 (2013 年度砥粒加工学会学術講演会), 日本大学理工学部, 東京(2013. 8. 27-29). 【平成 25 年度砥粒加工学会優秀講演賞受賞】
- ⑦ 水谷秀行: 切削残留応力に及ぼす超音波振動および切削条件の影響, ABTEC2012 (2012 年度砥粒加工学会学術講演会), 同志社大学, 京都(2012. 8. 29-30).
- ⑧ 水谷秀行: 超音波振動援用によるホーニング加工, 砥粒加工学会次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会第 44 回研究会, 埼玉大学東京ステーションカレッジ, 東京(2012. 8. 24). 【招待講演】
- ⑨ 水谷秀行: 小径内面の高精度・高能率加工(高性能内面ホーニング加工法の開発), 中部大学テクノモール in 中濃, シティホテル美濃加茂, 美濃加茂(2012. 7. 12).
- ⑩ 水谷秀行: 超音波振動援用による高性能ホーニング加工, 振動切削フォーラム 2012, 慶應義塾大学, 東京(2012. 4. 20). 【招待講演】
- ⑪ 稲崎一郎: 高性能研削加工に向けて一研削加工における相互作用一, 砥粒加工学会 CBN & ダイヤモンド先端加工研究専門委員会, 東京都立産業貿易センター, 東京(2012. 3. 28). 【招待講演】
- ⑫ 水谷秀行: 切削・研削加工面の残留応力, 金

型・精密加工技術研究会, 山形県工業技術センター, 山形(2011. 11. 15). 【招待講演】

- ⑬ 稲崎一郎: 高速切削の得失, Tech Biz EXPO, ポートメッセなごや, 名古屋(2011. 10. 21). 【招待講演】
- ⑭ ICHIRO INASAKI: Toward Symbiotic Machining Processes, International Symposium on Green Manufacturing and Applications, (2011. 10. 6-7), Seoul, KOREA. 【Keynote Paper】
- ⑮ 水谷秀行: 超音波振動援用による表面特性向上型切削法の開発, ABTEC2011 (2011 年度砥粒加工学会学術講演会). 中部大学, 春日井(2011. 9. 7-9).
- ⑯ 稲崎一郎: 工作機械の機能と性能の向上に向けて, 砥粒加工学会シンポジウム, ヤマザキマザック(株), 犬山(2011. 9. 6). 【招待講演】

〔図書〕(計 1 件)

- ① 稲崎一郎 他: 機械工学ハンドブック, (2011. 11), 全 1120, 朝倉書店.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 内径面加工方法, 内径面加工用ツールおよび内径面加工装置

発明者: 水谷秀行, 稲崎一郎, 浜岡亨, 浜田晴司

権利者: 株式会社日進製作所, 多賀電気株式会社

種類: 特許 出願種別(通常)

番号: 特開 2012-045642

出願年月日: 平 22. 8. 24

国内外の別: 国内

〔その他〕

○新聞記事

- ① 水谷秀行: 高精度・高能率切削加工のための残留応力制御と活用, 日刊工業新聞「JIMTOF2012」特集, 12 面(2012. 11. 1).

○展示

- ② 水谷秀行: 超音波振動を援用した機械加工技術, 中部大学フェア, 中部大学, 春日井(2013. 8. 23).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷 秀行 (MIZUTANI, Hideyuki)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 10201790

(2) 研究分担者

稲崎 一郎 (INASAKI, Ichiro)

中部大学・中部高等学術研究所・教授

研究者番号: 30051650

(3) 連携研究者

該当なし