

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05875

研究課題名(和文)複合振動を用いた新しい超音波加工の原理解明に関する研究

研究課題名(英文) Study of elucidation of principle of new ultrasonic machining using complex vibration

研究代表者

三浦 光 (MIURA, Hikaru)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50157434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超音波加工の高度化・高精度化を目的として、縦振動とねじり振動の複合振動を用いた超音波加工の原理について検討を行ったものである。検討はソーダライムガラスに対して超音波加工を行った際の加工痕、加工時間などの加工特性を求めることで行った。その結果、複合振動による超音波加工は、ねじり振動により砥粒が加工対象を削り取るように作用することによって加工されていることがわかった。これらより、複合振動の場合の砥粒一粒あたりの加工量は、縦振動のみの場合と比較して増加していることがわかった。したがって、加工速度の向上は、大きなねじり振動を用いて、砥粒の加工量を増加させることが効果的であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we studied the machining principle of ultrasonic machining using complex vibration of longitudinal and torsional vibration for the purpose of upgrading and high accuracy of ultrasonic machining. The examination of the machining principle was carried out by obtaining machining characteristics such as machining mark and machining time when ultrasonic machining was performed on soda-lime glass. As results, we found that ultrasonic machining by complex vibration works by abrasive grain scraping off the machining target surface by torsional vibration. In addition, we found that the machining amount per grain of abrasive grain increased in the case of complex vibration compared with only longitudinal vibration. In other words, we considered effective to increase the machining speed by using larger torsional vibration and increasing the machining amount of the abrasive grains.

研究分野：音響・超音波工学

キーワード：超音波加工 複合振動 振動源 たわみ振動 脆性材料 砥粒

1. 研究開始当初の背景

超音波振動を用いた脆性材料の加工法に超音波加工と呼ばれる超音波振動する工具ホーンと砥粒を用いた加工法がある。超音波加工は、脆性材料に対して、工具ホーンの形状を変化させることにより三次元形状の加工を行うことが出来る加工方法である。超音波加工の加工原理は、砥粒と水を混合した遊離砥粒を超音波振動により脆性材料等の加工対象に対して衝突させ、工具ホーン先端形状を転写するものである。これまで、超音波加工における高度化・高精度化の検討は、主に単一方向の縦振動のみを利用して来た。

そこで、申請者らは振動の方向に着目し、縦振動と工具の円周方向の振動であるねじり振動を組み合わせた複合振動を用いた超音波加工を提案している。また、申請者らは、複合振動を用いた超音波加工が縦振動を用いた超音波加工による加工と比較して、加工時間が約 2/3 に短縮できるなどの特性を明らかにしている。しかしながら、複合振動を用いた超音波加工の原理は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究は、複合振動を用いた超音波加工の加工原理を明らかにすることで、さらなる加工時間の短縮及び加工精度の向上を目指すことを目的としている。具体的には、ソーダライムガラスを加工対象として、縦振動を用いた場合と複合振動を用いた場合の種々の加工特性の比較により、加工原理を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) 複合振動を発生させる振動源

図 1 は、本研究で用いた複合振動を発生させる振動源の概略図である。振動源は、20 kHz 用のボルト締めランジュバン型振動子に、直径 56 mm のフランジ付き一様棒、振幅拡大用のエキスポネンシャルホーン、及び図 2 に示すような各工具ホーンをネジで結合したものである。図 2 (a) は、縦とねじりの複合振動を得るための斜めスリットを用いた工具ホーンである。この工具ホーンは斜めスリットの形状を変えることにより縦振動とねじり振動の割合を変化させることができる。一方、同図 (b) は縦振動する工具ホーンである。本研究では、工具ホーンを交換することにより、複合振動による加工と縦振動による

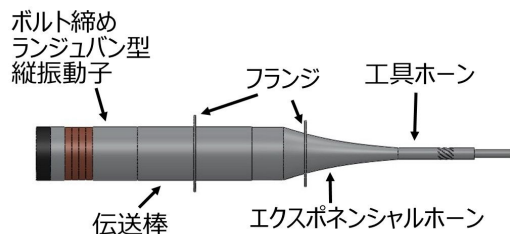


図 1 超音波振動源

加工を切り替えて検討を行った。

(2) 振動源の振動特性の測定

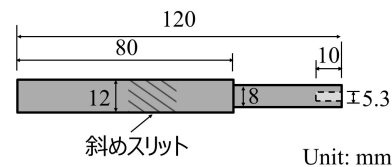
振動源の振動特性として、斜めスリットを用いた工具ホーン先端部において得られる複合振動の特性を明らかにするため、入力電力に対する各振動変位振幅の測定を行った。工具ホーン先端の各振動変位振幅の測定はレーザー Doppler 振動計を用いて行った。

(3) 超音波加工機

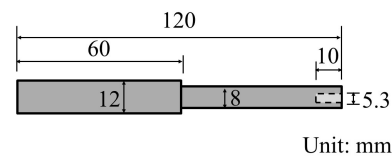
図 3 は、本研究に使用した超音波加工機である。振動源は 2ヶ所のフランジにてコラムに固定されている。加工機は加工対象であるソーダライムガラスを固定台に固定し、リニアガイドと錘を使用して下部から一定の加工圧を印加する構造である。また、遊離砥粒はポンプとフレキシブルホースを使用して加工面に供給している。

(4) 加工特性の検討

複合振動による超音波加工の原理を明らかにするため、種々の条件における加工特性の検討を行った。加工特性は、加工対象としてソーダライムガラスを用い、直径 8.0 mm、深さ 4.0 mm の丸穴加工を行い、加工時間、加工精度として真円度について評価を行った。なお、検討は 600 番のシリコンカーバイドと水を重量比 1 : 10 で混合した遊離砥粒を用いた。



(a) 複合振動する工具ホーン



(b) 縦振動する工具ホーン

図 2 工具ホーン

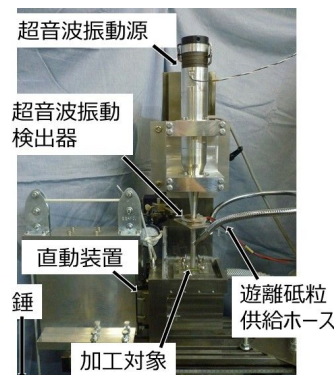


図 3 超音波加工機

(5) 加工痕の観察

加工時の砥粒の挙動を明らかにするために、加工痕の観察を行った。加工痕は、ソーダ石灰ガラス上に 600 番のシリコンカーバイドを散布し、600 波分の縦振動、または複合振動を加えることで生成した。

4. 研究成果

(1) 振動源の振動特性

図 4 は、振動源への入力電力に対する斜めスリットを用いた工具ホーンの先端部における各振動変位振幅の測定結果である。なお、用いた斜めスリットの条件は、深さ 3.5 mm、本数 8 本、及びホーンの長さ方向に対して角度 35 deg である。図は横軸に入力電力、縦軸に縦振動変位振幅とねじり振動変位振幅をとっている。図より、両振動は、工具ホーンの先端において、入力電力の増加に伴って増加していることがわかる。これより、斜めスリットを用いた工具ホーンは、先端において縦振動とねじり振動から構成される複合振動が得られることがわかった。また、縦振動に対するねじり振動の大きさは、いずれの入力電力においても約 2.3 倍となっている。なお、ねじり振動は斜めスリットの深さを 2.7 mm とすることで縦振動に対してほぼ同等の大きさを得ることができる。

(2) 最適加工圧と加工時間の測定

図 5 は、ねじり振動の大きさを変化させた

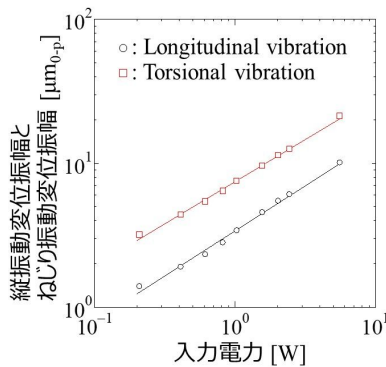


図 4 入力電力に対する各振動変位振幅の特性

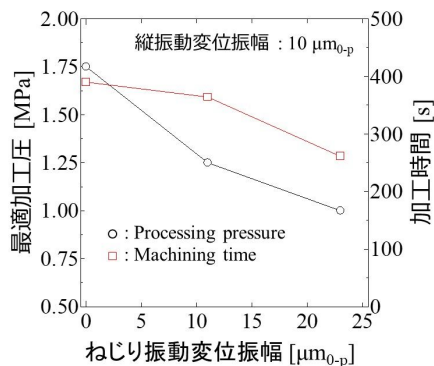


図 5 ねじり振動に対する最適加工圧と加工時間の特性

場合の加工時間が最も短くなる加工圧である最適加工圧とその際の加工時間の結果である。測定は縦振動を 10 μm_{0-p} 一定とし、ねじり振動の大きさを変化させて行った。図は横軸にねじり振動の変位振幅、縦軸に最適加工圧とその際の加工時間の 2 軸をとっている。図より、最適加工圧はねじり振動の増加に伴い低下していることがわかる。これは、ねじり振動の増加に伴って加工面に対する砥粒の供給が良好になっているためと考えられる。次に、最適加工圧における加工時間は、最適加工圧と同様にねじり振動の増加に伴って低下していることがわかる。これは、ねじり振動により、加工面における砥粒 1 粒当りの加工対象除去量が増加しているためと考えられる。

以上の結果より、更なる加工時間の短縮のためには、縦振動に対してねじり振動を大きくすることが効果的であることがわかった。

(3) 真円度の測定

図 6 は加工深さ 2.0 mm の位置における真円度の結果である。真円度の測定はミットヨ製の真円度測定器 RA-H5100AH を用い、ガウシアンフィルタ (50 UPR) で最小二乗中心法 (LSC) にて行った。図は横軸にサンプル数、縦軸に真円度、そしてパラメータとして縦振動とねじり振動の振幅をとっている。図より、真円度は複合振動にすることによって縦振動のみの場合と比較して小さい値になることがわかる。これは、砥粒の循環が良好に行われているためと考えられる。しかしながら、ねじり振動の大きさを変化させた場合の真円度はほぼ同じ結果となった。これは、ねじり振動が大きくなることで工具ホーンの摩耗が大きくなり、真円度が向上しなかったのではないかと考えている。

以上の結果より、さらなる加工精度の向上のためには、工具ホーンの摩耗を考え、工具ホーンの材質も含めた検討、また他の加工精度の評価が必要であることがわかった。

シンボル	縦振動 [μm_{0-p}]	ねじり振動 [μm_{0-p}]
○	10	0
□	10	11
△	10	23

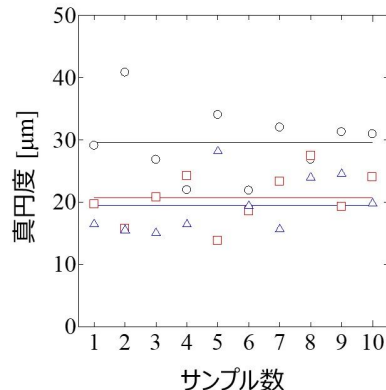
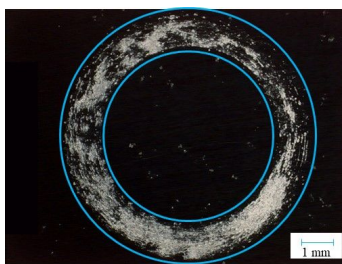


図 6 真円度の測定結果

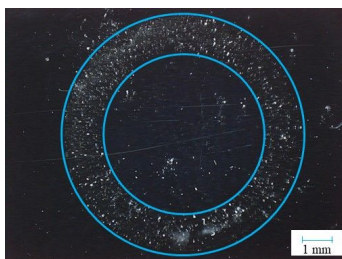
(4) 加工痕の観察

図7は両振動を用いた場合のソーダライムガラスへの加工痕の写真である。同図(a)は複合振動を用いた場合の加工痕であり、同図(b)は縦振動のみを用いた場合である。図中に描いた同心円は、ホーン先端部の外径と内径を示している。また、図の白い部分は、砥粒によりガラスが除去された部分である。図より、複合振動を用いた場合の加工痕は縦振動を用いた場合と比較して、広い面積となっていることがわかる。これより、複合振動を用いることで効率的に加工対象を加工できていることがわかる。また、複合振動を用いた場合は線状の加工痕が数多く見られる。これは、ねじり振動により、砥粒が加工対象を削り取るように動いたためと考えられる。また、この結果はねじり振動により砥粒1粒当たりの加工対象の加工量が増加していることを示している。

以上の研究成果より、複合振動を用いた場合の超音波加工の原理は、加工面において、砥粒がねじり振動により加工対象を削り取るように作用するためであり、これによって縦振動と比較して加工量が多くなることがわかった。すなわち、更なる加工速度の向上には、ねじり振動を大きくすることが効果的であることがわかった。また、加工精度を評価する一つである真円度に関しては、ねじり振動の効果は認められるが、その大きさの影響を明らかにすることは出来なかった。この点は今後の研究課題である。



(a) 複合振動による加工痕



(b) 縦振動による加工痕

図7 両振動による加工痕の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Ryo Sato, Takuya Asami, Hikaru Miura, Ultrasound source using a rectangular vibrating plate combined with rigid walls, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 56, 2017, 07JE05

DOI: 10.7567/JJAP.56.07JE05

Tomoki Nakai, Takuya Asami, Hikaru Miura, Convergence of intense aerial acoustic waves radiated by a rectangular transverse vibrating plate, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 55, 2016, 07KE09

DOI: 10.7567/JJAP.55.07KE09

〔学会発表〕(計30件)

中山 怜, 淺見拓哉, 三浦 光, 集束空中超音波による砥粒を混ぜた液滴の非接触含浸, 日本音響学会春季研究発表会, 2018

Takuya Asami, Hikaru Miura, Hole Machining of Glass by Using Ultrasonic Longitudinal-Torsional Vibration and Abrasive Grains, The International Conference on Engineering and Applied Sciences (国際会議), 2017

Ren Nakayama, Takuya Asami, Hikaru Miura, Impregnation of liquid droplet in non-contact by aerial ultrasonic waves, International Congress on Ultrasonics (ICU) 2017 (国際会議), 2017

Haruki Yoshino, Takuya Asami, Hikaru Miura, Directivity of a circular transverse vibrating plate type aerial ultrasonic source with a truncated cone shaped reflective plate, International Congress on Ultrasonics (ICU) 2017 (国際会議), 2017

淺見拓哉, 増田直希, 三浦 光, 円板付中空型ステップホーンを用いた小型空中超音波音源の基礎検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 2017

中山 怜, 淺見拓哉, 三浦 光, 空中超音波による非接触での砥粒を混ぜた液滴の含浸, 日本音響学会春季研究発表会, 2017

Ryo Sato, Takuya Asami, Hikaru Miura, Study of rectangular vibrating plate size of aerial ultrasonic source combined with rigid wall, USE2016 - Symposium on UltraSonic Electronics (国際会議), 2016

Takuya Asami, Hikaru Miura, Study of Ultrasonic Machining by Longitudinal-Torsional Vibration for Processing Brittle Materials -Observation of Machining Mark-, 2015 ICU International Congress on Ultrasonics (国際会議), 2015

淺見拓哉, 三浦 光, 超音波複合振動による脆性素材の穴あけ加工の検討 - 縦振動とねじり振動の割合を変化させた場合 -, 日本音響学会秋季研究発表会, 2015

Takuya Asami, Hikaru Miura, Study of Ultrasonic Machining Using Longitudinal and Torsional Vibration, IEEE International Ultrasonic Symposium 2015 (国際会議), 2015

〔その他〕

<https://www.ele.cst.nihon-u.ac.jp/miuralab/>

6．研究組織

(1)研究代表者

三浦 光 (MIURA, Hikaru)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50157434

(2)研究分担者

浅見 拓哉 (ASAMI, Takuya)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：60706571