重畳振動切削によるセラミックスの精密穴加工*

隈部 淳一郎** 神 雅 彦*** 西 尾 彰 文***

Precision Drilling of Ceramics by Ultrasonic
Superposition Vibration Cutting

Junichiro KUMABE, Masahiko JIN and Akifumi NISHIO

In this report, it is analyzed that the precision drilling of ceramics can be done by using a new ultrasonic superposition vibration cutting of ultrasonically vibrated ceramics (USVC). And this analytical results can be confirmed by the experiments using a new vibration cutting devices with the 50 Hz electro-hydraulic power device, ultrasonically vibrated core drill and ceramics. The main results are as follows: (1) It has been verified that precise holes of ceramics can be machined by a new ultrasonic superposition vibration drilling of ultrasonically vibrated ceramics in the lower cutting resistance and more efficient than the conventional drilling or the conventional vibration drilling. (2) It is considered that the torsional ultrasonic vibration core drill is suitable for high accuracy drilling of ceramics and the longitudinal ultrasonic vibration core drill is suitable for high efficient drilling of ceramics. (3) It is believed that this research will contribute to development of a quite new drilling machine for high accuracy and efficient drilling of ceramics.

Key words: superposition vibration cutting, vibration cutting, ultrasonic longitudinal vibration, ultrasonic torsional vibration, ultrasonically vibrated ceramics, pulsating cutting force

1. ま え が き

工具刃先前方に微小クラックを発生させ、工具刃先を押し進め、切りくずをせん断変形によって生成するか、あるいはより大きなクラックを発生させ、ばらばらな粉体状切りくずを生成して切削するのがセラミックスの切削機構の特徴であると考えられる。このクラックの発生間隔を短く、その深さを浅く規則的に発生させることによって、精密切削が可能となる。著者は、作用時間の短い連続パルス切削力波形あるいは断続パルス切削力波形によって、 $lt=v/f$ (v : 切削速度, f : 工具の振動数) ずつ小刻みにクラックを発生させ、精密切削する振動切削法を創始・創案した。また、このクラックの発生は、セラミックスを超音波振動させてセラミックス内に応力ひずみを発生させるか、あるいは、切削部付近のセラミックスの加熱、冷却を繰り返して熱応力ひずみを発生させることによって促進されるようになることを明らかにした¹⁾。そして、このように切削しやすくなっているセラミックスを振動切削

によるパルス切削力波形あるいは断続パルス切削力波形によって、能率よく精密切削できるようになることを明らかにしてきた²⁾。これを生産ラインに導入するには、今までにない全く新しい構造をした、精密重畳振動円筒研削盤、平面研削盤、内面研削盤、ボール盤などを必要とする。本研究は、精密重畳振動切削ボール盤の創作を最終目的として行うものである。すでに、コアドリルを縦超音波振動させ、これを高速回転させて、テーブル上に固定したセラミックス工作物に穴あけするボール盤は製作されている。本ボール盤は、その従来のボール盤よりも、さらに加工精度、能率に優れたボール盤となると考える。この新しいボール盤の創作に先立ち、本研究によって、縦あるいはねじり超音波振動するコアドリルに低周波振動を重畳させ、さらにセラミックス工作物を超音波振動させて穴あけすることによって、どの程度、従来の穴あけ方法に比べて切削抵抗が軽減でき、セラミックスの穴あけが高効率化、高精度化できるようになるかを明らかにした。

2. 重畳振動コアドリルによるセラミックスの精密穴あけ方法

パルス切削力波形あるいは断続パルス切削力波形を

* 原稿受付 昭和63年7月20日。昭和62年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月14日)にて発表

** 正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町2753)

*** 学生会員 宇都宮大学大学院

Fig. 1 Direction of vibration

作用させ、切削抵抗を軽減させて、しかも穴の加工精度に影響を与えないコアドリルの振動方向は、図1に示すような振動数 f 、振幅 a の縦およびねじり振動が考えられ、セラミックス工作物の振動方向は、振動数 f_w 、振幅 a_w の縦およびねじり振動が考えられる。工具あるいはセラミックスに重畳する低周波振動方向は、振動数 F 、振幅 A の軸および円周方向の振動方向が考えられる。これらの方向のなかで今までの解析および基礎実験結果から、面精度、形状精度を満足させて能率よく穴あけできる方法としては、セラミックスを縦超音波振動させ、コアドリルを縦あるいはねじり超音波振動させ、これに軸方向の低周波振動を重畳させて振動穴あけする2通りの方法が適切であると考えられる。

3. 振動穴あけ機構の解析

コアドリル端面の砥粒群が穴あけに関与する。その振動穴あけ機構について考える。直径 d のコアドリル端面に n 個のダイヤモンド砥粒が一樣に分布していると仮定し、これを図2のように平面に展開し、そのダイヤモンド砥粒1刃による切りくず生成機構を考える。コアドリルを高速回転させただけの慣用切削、コアドリルを低周波振動または超音波振動のみさせた振動切削および低周波振動に超音波振動を重畳させた重畳振動切削の穴あけ機構とその切削力波形をモデル化して示し、それぞれの特徴を比較して解析する。図(a)の慣用切削では、一樣な砥粒1刃あたりの切込み深さ s/n (s : 主軸1回転あたりのコアドリルの送り量) を一樣に連続して切削する。図示のように常時砥粒と切りくずが接触して切りくずを生成して穴あけする機構による。従って、ほぼ一定の切削力が作用する。これに対し、図(b)のコアドリルに軸方向の低周波振動を与えた場合は、砥粒は、振動しながら切削方向に進み、全切削長さを振動半周期 $T/2$ ごとに寸

断して切削し、切削力をパルス状に作用させる。その切削力は、軽減する。これに、さらに小刻みに切削するのが、図(c)のコアドリルを超音波振動させた場合である。図(c-1)は、コアドリルをねじり超音波振動させた場合で、ほぼ切削方向と同方向の振動切削機構となり、図に示すように砥粒と切りくずとが規則的に離れる。全切削長さを $lt (=v/f)$ ずつ小刻みに寸断して、微小クラックを発生させて切削する。その切削力波形は、周期の短いパルス波形となり、平均切削力が激減する。図(c-2)は、コアドリルを縦超音波振動させた場合で、セラミックス表面に微細凹凸面を生成し、その片斜面を振動半周期の短い時間で小刻みに切削する機構による。さらに、この切削力は、図(d)の低周波振動に図(c)の超音波振動を重畳させた重畳振動切削機構によって激減すると考えられる。すなわち、図(b)の低周波振動の1サイクルの切削長さを一度に切削するのではなく、これを超音波振動によって微小間隔に寸断して小刻みに切削する。縦超音波振動を重畳した場合は、図(d-1)に示すように2点鎖線で示すような刃先の運動軌跡を重畳して、背分力方向振動切削機構によって小刻みにパルス切削力を作用させて切りくずを掘り起こすようにして生成する。ねじり超音波振動を重畳させた場合は、図(d-2)に示すように切削方向に、小刻みにパルス切削力波形を作用させながら切りくずを生成する。その結果、超音波振動のみによるときの連続パルス切削力波形が、間引きされた断続パルス切削力波形となって、セラミックス工作物に作用する切削力をさらに激減できて、他の方法に比べ、最も能率よく精密穴あけできるようになると考えられる。ねじり超音波振動コアドリルは、細かくクラックを発生させて高精度穴あけに適し、縦超音波振動コアドリルは、大きくクラックを発生させて高能率穴あけに適するものと考えられる。このとき、セラミックスを超音波振動させることによって、セラミックス内に発生する振動応力がクラックの発生を助成して、見掛け上セラミックスを軟質化させ、さらに穴あけしやすくなると考えられる。

4. 実験装置および方法

以上の解析結果を実験によって確かめる。試作した実験装置を図3に示す。新潟鉄工所製ベッド型万能フライス盤2UMBのテーブル⑧上に電気-油圧装置⑦を固定し、テーブル長手方向のみに振動台を低周波振動させた。この振動台の上に、20 kHz 電歪縦あるいはねじり振動子⑨により、振動数 f 、振幅 a で縦超音波振動あるいはねじり超音波振動するコアドリ

Fig. 2 Vibration drilling mechanism

1;ceramics,2;core drill,3;induction motor,4;slider,5;air cylinder
6;universal-vice,7;electro-hydraulic power device,8;milling table
9;transducer,10;transducer

Fig. 3 Ultrasonic superposition vibration cutting drilling machine

ル主軸台を固定し、超音波振動するコアドリルに低周波振動を重畳できるようにした。このコアドリル②をインダクションモータ③によって、平ベルトを介して高速回転させた。セラミックスを28 kHz フェライト磁歪振動子⑩の振幅拡大用ホーンの先端に接着、固定して、振動数 f_w 、振幅 a_w で縦超音波振動させ、これをユニバーサルバイス⑥を用いて、コアドリル②と同軸でスライドできるように微調整して、エアシリンダ⑤とスライダ④によって、コアドリル端面に一定荷重 P で加圧して穴あけ実験した。主軸台を取り替えて、縦超音波振動系コアドリル、ねじり超音波振動系コアドリルの2通りについて実験した。実験は、コアドリルに、高速回転のみを与え、セラミックスを超音波振動させて穴あけする方法 (UCC)、セラミックスを超音波振動させ、コアドリルを低周波振動させて穴あけする方法 (UVC)、セラミックスを超音波振動させ、コアドリルを縦あるいはねじり超音波振動させて穴あけする方法 (UUC)、セラミックスを超音波振動させ、コアドリルを縦あるいはねじり超音波振動させ、さらに低周波振動を重畳させて穴あけする方法 (USVC) の各方法について、セラミックス工作物の振幅を $0 \sim 6 \mu\text{m}$ と変化させて、5 s 間の加工量、切りくず生成状態、その切りくず形状、工具への切りくず付着の程度によって、切削性を比較、検討した。工作物材質は、光学ガラス、WA 砥石、ジルコニア、アルミナを選び、表1の実験条件によって乾式で実験した。使用したジルコ

Table 1 Experimental conditions

Work material	Glass, WA wheel (# 800), Zirconia Alumina	
Load p	9.8 N	
Cutting time t	5 s	
Rotational frequency N	1 000 rpm	
Core drill	Grain size	diamond # 80
	Profile	$D = \phi 4.0 \text{ mm}$, $d = \phi 2.6 \text{ mm}$
Ultrasonic vibration of work	Frequency f_w	28 kHz
	Amplitude a_w	0, 3, 6 μm
Vibration of tool	Frequency F	50 Hz
	Amplitude A	0.17 mm
Ultrasonic vibration of tool	Longitudinal vibration	Frequency f 20.6 kHz
		Amplitude a 20 μm
	Torsional vibration	Frequency f 19.7 kHz
		Amplitude a 6 μm
Cutting fluid	dry cutting	

Table 2 Characteristic of ceramics

Composition	Zirconia	Alumina
Preparation method	sintered	sintered
Density g/cm^3	5.2	3.6
Bending strength kgf/cm^2	2.0×10^3	2.5×10^3
Moh's hardness scale	8	9

ニア、アルミナの特性を表2に示す。ドリルは、すでに説明したようにコアドリルを用い、その形状寸法を図4に示す。加工量は、コアドリル断面積一定であるため、図5に示すように加工深さ h をもって表し、

Fig. 4 Core drill

Fig. 5 Cutting amount h

この加工量 h の大小で切削力の大小を吟味・検討した。切りくずは、SEM により観察した。

5. 実験結果および考察

5.1 SEM による切りくずの観察

慣用切削 (CC), 工具を低周波振動させただけの VC では, 切りくずの排出は, ほとんど見られず, コアドリルに付着する程度である。これが, 工具に超音波振動を与えた, UC によると, 切りくずが四散し, 目視できるようになる。これに, 低周波振動を重ねさせた, SVC によると, 多量の切りくずが, 噴煙のようにして四散する。このとき, セラミックス工作物に超音波振動を与えると, さらに多量の切りくずを四散して加工できるようになる。これらの切りくずを SEM 写真によって観察した結果, 切りくず平均直径が, CC → VC → UC → SVC の順に, また, 工作物の振幅に比例して大きくなっている。低周波振動の重畳と工作物の超音波振動により, 大きな切りくずを生

成できることを確かめた。このことから USVC により, 能率よく穴あけできるようになることが推測される。以上の実験によって, 縦超音波振動コアドリルでは, セラミックス素材を大きく破碎しながら平均粒径の大きい切りくずを生成して穴あけし, ねじり超音波振動コアドリルは, 小刻みに破碎しながら平均粒径の小さい切りくずを生成して穴あけする機構となっていることが裏付けられる。

5.2 加工量

5.2.1 ねじり超音波振動コアドリルによる穴あけ

加工量がどの程度増加するか, すなわち, 切削力が, どの程度激減するか, 工作物の振幅 a_w と 5 s 間の加工量 h との関係を図 6, 図 7 に示して説明する。 $a_w=0$ は, 工作物に超音波振動を付加しない場合である。図 6 のジルコニアに対する, 縦軸上の $a_w=0$ の各点で説明する。慣用切削では, $h \approx 0$ でほとんど加工できていない。これに工具の超音波振動を付加すると, UUC が示す点まで加工量が増加する。これに低周波振動を重ねさせると, USVC が示す点まで増加し, UUC より, その加工量が 2 倍以上増大する。このことは, 低周波振動の付加効果が大きいことを示す。そして, 工作物を超音波振動させることによって, 加工量 h は振幅 a_w に比例して直線的に増加していき, USVC の $a_w=6 \mu\text{m}$ では, 従来の加工法 (UUC の $a_w=0$ の点) より, 5 倍以上, アルミナにおいても 3 倍以上の加工量となり, 穴あけしやすくなることを示す。さらに a_w を大きくすれば, 加工量 h は比例して増大するものと考えられる。一定荷重方式の加工において, このように加工量が激増するということは, 工具の切れ味を向上させて切削抵抗が激減することを示し, セラミックスが, 能率よく穴あけできることを証明する。

[Experimental conditions]

F; 50Hz, A; 0.17mm, f; 19.7kHz, a ; $6 \mu\text{m}$, f_w ; 28kHz, a_w ; 0- $6 \mu\text{m}$, P; 9.8N, N; 1000rpm
Diamond tool; #80, t; 5s, Vibration of tool; Torsional vibration

Fig. 6 Work amplitude and cutting amount (Torsional vibration tool)

Fig. 7 Work amplitude and cutting amount (Longitudinal vibration tool)

5.2.2 縦超音波振動コアドリルによる穴あけ

図7からわかるように、ねじり超音波振動させた場合と同様に、低周波振動の付加効果と工作物を超音波振動させることによる加工量の増大効果が現れている。ねじり振動よりも、さらに加工量が増大しており、特に、USVCの $a_w=6\mu\text{m}$ では、従来の加工法より、ジルコニアでは8倍以上、アルミナにおいても6倍以上もの加工量となっている。このことは、切削抵抗が激減することを示すものである。以上のことは、USVCによりセラミックスの穴あけがコアドリルを超音波振動させただけの従来の穴あけ方法に比べて、より高能率化できることを証明する。

工具摩耗については、本実験の範囲内では、慣用切削CC、従来の方法であるUCに比べ、ねじり超音波振動、縦超音波振動コアドリルの両方ともに、USVCにより、工具摩耗が少なくなることを確認している。縦超音波振動とねじり超音波振動では、切削抵抗のより小さい縦超音波振動の方が摩耗は小さい傾向が見られる。なお、詳細については今後、究明していく予定である。

6. む す び

以上の研究成果をまとめると、

- (1) セラミックスを精密加工するためには、切削抵抗を少しでも軽減することが必要である。そのために、コアドリルに超音波振動と低周波振動を重ねさせ、セラミックスを超音波振動させて穴あ

けする方法を創案した。そして、その切削機構の特徴を明らかにした。実験して、従来の方法に比べて切削抵抗を激減させて穴あけできることを確かめた。

- (2) 縦超音波振動コアドリルは、粗加工に適し、ねじり超音波振動コアドリルは、仕上加工に適する。
- (3) 本研究で明らかにした、セラミックスを超音波振動させ、断続パルス切削力波形を作用させて小刻みに穴あけする方法は、セラミックスの精密穴加工において必要不可欠な方法の1つであると考える。
- (4) 次報では、この本研究成果をもとにして、セラミックス専用の精密重畳振動切削ボール盤を設計、試作し、加工精度について明らかにする予定である。

卒業研究として本研究に協力した仙波芳明氏、ならびにセラミックス工作物の試料等を提供して頂いた日本ガイシ(株)、三菱鉱業セメント(株)に対して深甚なる謝意を述べて厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 限部淳一郎：セラミックスの精密切削に関する基礎的研究，昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1981) 34.
- (2) 限部淳一郎，早乙女辰男，西本雄二：セラミックスの重畳振動切削，精密工学会誌，52，11(1986) 1851.