

# 高周波振動付加によるセラミックスの高能率・高精度加工に関する研究(第2報)

水江 宏  
機械電子部

## Study on Ultrasonic Machining of Ceramics for Jig Grinding Machine

Hiroshi MIZUE  
Mechanics & Electronics Division

### 要旨

耐摩耗性・耐熱性が要求される機械部品の材料として、セラミックス等の硬脆材料が注目されているが、その加工は能率・精度の面で多くの問題を抱えている。この問題を解決する一手法として、高周波(超音波)振動を付加した研削加工に関して多くの研究開発がなされている。本研究では、セラミックス等の被削材や加工液に高周波振動を付加した加工実験を行い、加工抵抗について有効性を検証した。

### 1. はじめに

セラミックス等の高能率加工法として、高周波(超音波)振動を付加した研削・切削加工に関して多くの研究開発がなされている<sup>(1)(2)</sup>。振動を付加する要素としては工具・被削材・加工液等が考えられるが、工具側に振動を付加する方法が多くを占めている。これは、工具やスピンドルは振動付加に適した設計が可能のためである。

一方、被削材に振動を付加する場合は、被削材の大きさ・形状・材質等の影響で振動させることは難しい。しかし、振動の波長に対して被削材が十分に小さいと限定すれば、形状・材質が多少変化しても振動を付加することは容易である。

そこで、本研究開発では、小型の加工部品を対象として被削材および加工液に高周波振動を付加した加工実験を行いその有効性を検証した。

### 2. 実験内容

微細加工分野では有効と予想される被削材や加工液に高周波振動を付加する方法について、以下に示す4種類の実験を行った。

被削材に高周波振動を付加した穴加工(研削)

被削材に高周波振動を付加した側面加工(研削)

加工液に高周波振動を付加した穴加工(研削)

加工液に高周波振動を付加した溝加工(切削)

これらの実験で使用した共通の条件を Table 1 に示す。

#### 2.1 被削材に高周波振動を付加した穴加工(研削)

Fig.1 に被削材に振動を付加する実験装置を示す。平成 11 年度の第 1 報では工具径 2.0-3.0mm の工具での実

験を行ったが、12 年度は工具径を 0.3mm まで微小化し研削穴加工実験を行った。加工条件を Table 2 に示す。工具の運動は 11 年度と同様に、スピンドル中心をオフセットさせた遊星回転運動と切りくず排出を考慮したドリルサイクルを組合わせた運動を設定した。

Table 1 実験条件

加工機	ジグ研削盤 3GCN 型 三井精機工業(株)製
加工液	水溶性研削油剤
加工抵抗測定	加工動力計 9256A1 日本キスラー(株)製



Fig.1 被削材に振動を付加する実験装置

Table 2 加工条件(被削材加振, 穴加工)

工具 / 直径(mm)	電着ダイヤモンド軸付砥石		
	1.0	0.5	0.3
被削材	アルミナ(株ニッカト製)		
主軸回転数(rpm)	9000		
Z 送り(mm/min)	0.25-0.75	0.25-0.4	0.2
切込み(μm/cycle)	10	10	5
遊星回転数(rpm)	160		
遊星回転 offset(mm)	0.1	0.05	0.03
加工穴深さ(mm)	2	2	1
振動数(kHz)	18		

2.2 被削材に高周波振動を付加した側面加工(研削)

11 年度は加工機テーブル上で振動子を水平に設置して X 軸方向(背分力方向)への振動を付加して実験を行い、研削抵抗の低減は確認されたが、表面粗さに悪影響を与えていた。12 年度は Fig.2 に示すとおり振動子を立たせた状態で Z 軸方向(工具軸方向)に振動を付加して側面加工の実験を行った。加工条件を Table 3 に示す。遊星回転 1 回転ごとに X 軸正方向に切込み(0.005-0.015mm)を行い、研削抵抗を測定した。

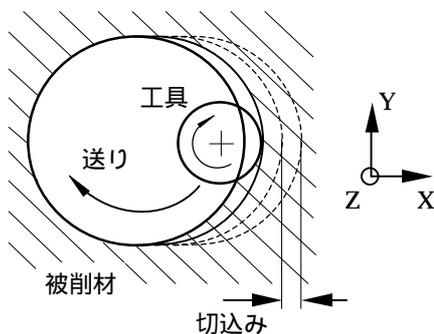


Fig.2 側面加工での工具の動き

Table 3 加工条件(被削材加振, 側面加工)

工具(直径 mm)	電着ダイヤモンド 2.0
被削材	アルミナ(株ニッカト製)
主軸回転数(rpm)	9000
X 送り(mm/cycle)	0.005-0.015
遊星回転数(rpm)	10
振動数(kHz)	18

2.3 加工液に高周波振動を付加した穴加工(研削)

Fig.3 に加工液に振動を付加する実験装置を示す。11 年度は直径 2mm の工具に対して、振動子単体を直接液中に設置し、液に振動を付加した場合の穴加工実験を行った。12 年度は工具径を 0.3-0.5mm に微小化すると

もに、より強力な振動を発生できるウェルダ用超音波振動機器を使用して実験を行った。工具端面の中心とホーン端面の距離は約 7mm とし、ホーンの取り付け角度はテーブル面に対して約 25 度と約 40 度の条件で穴加工中の研削抵抗を測定した。加工条件および工具の運動は Table 2 の被削材加振の穴加工条件での工具径 0.5mm と 0.3mm と同じ条件とした。

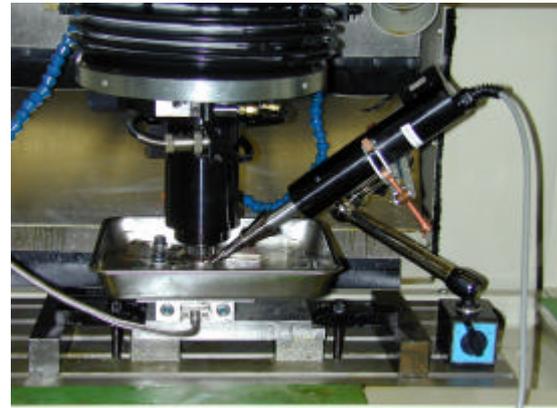


Fig.3 加工液に振動を付加する実験装置

2.4 加工液に高周波振動を付加した溝加工(切削)

マシナブルセラミックスに対する溝切削加工における液加振の効果を確認するため、スクエアエンドミルを用いて Table 4 に示す加工条件で切削加工実験を行った。セラミックスはホトベールを使用し、加工条件は県内企業で採用している条件とした。ホーンの取り付けは距離約 7mm、角度約 30 度とした。Fig.4 に示すとおり、工具送り方向に対して前後左右の 4 方向から加工液を加振し研削抵抗の変化を測定した。

Table 4 加工条件(液加振, 溝加工)

工具(直径 mm)	超硬エンドミル 2.0
被削材	ホトベール(住金製)
主軸回転数(rpm)	9000
送り(mm/min)	500
Z 切込み(mm/cycle)	0.05-0.15
振動数(kHz)	28

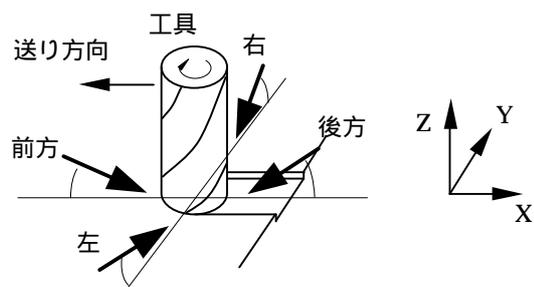


Fig.4 溝加工での工具の動きと振動付加方向

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 被削材に高周波振動を付加した穴加工(研削)

Fig.5に工具径1.0mm穴深さ2.0mmでの送りに対する研削抵抗(Y軸方向=工具半径方向,Z軸方向=穴加工方向)の変化を示す。Z軸方向の研削抵抗値で慣用加工の1/3~1/4程度の低減が確認され、昨年度の実験結果とほぼ同様の結果を得た。Y軸方向の研削抵抗値も1/3程度に低減された。これまでの実験結果と同様に、Z軸方向の研削抵抗は送り速度が大きいほど振動付加の効果が増大する傾向を示した。

Fig.6に工具径0.5mm穴深さ2mmでの送りに対するX,Y軸方向の研削抵抗の変化を示す。工具径を0.5mmまで小径化すると、Z軸方向の研削抵抗値は、1/3~1/4程度軽減されたが、Y軸方向の研削抵抗値は大きく軽減されなかった。

Fig.7に工具径0.3mmでの穴深さに対するZ軸,Y軸方向の研削抵抗の変化を示す。Z軸方向とY軸方向の研削抵抗はほぼ同等の値を示した。また、穴深さにかかわらず、Z軸方向,Y軸方向とも研削抵抗の値は安定した結果となった。

Fig.8,9に高周波振動付加工での工具(0.3mm)端面の状態を示す。深さ1mmの穴を1個加工した後の状態は、

砥粒が大きく摩耗し、2つ目の穴加工はほぼ不可能と予想される状態であった。

Fig.10に慣用加工での工具端面の状態を示す。同加工条件では、工具径0.3mmで振動を付加しない穴加工は不可能であった。深さ約40 $\mu$ m程度進行したところで、急激にZ方向の研削抵抗が増大し、工具端面の砥粒が完全にはがれ落ち、工具軸母材が露出する結果となった。

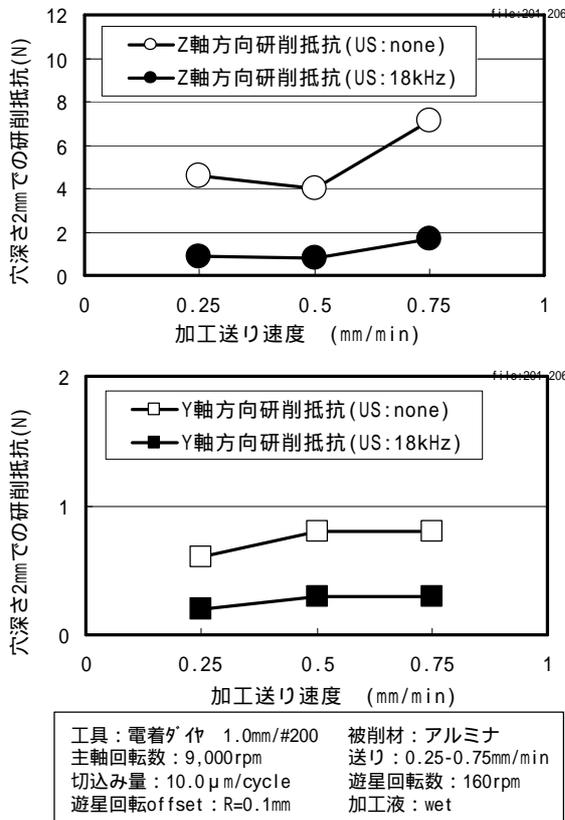


Fig.5 送りと研削抵抗の関係(工具径 1.0mm)

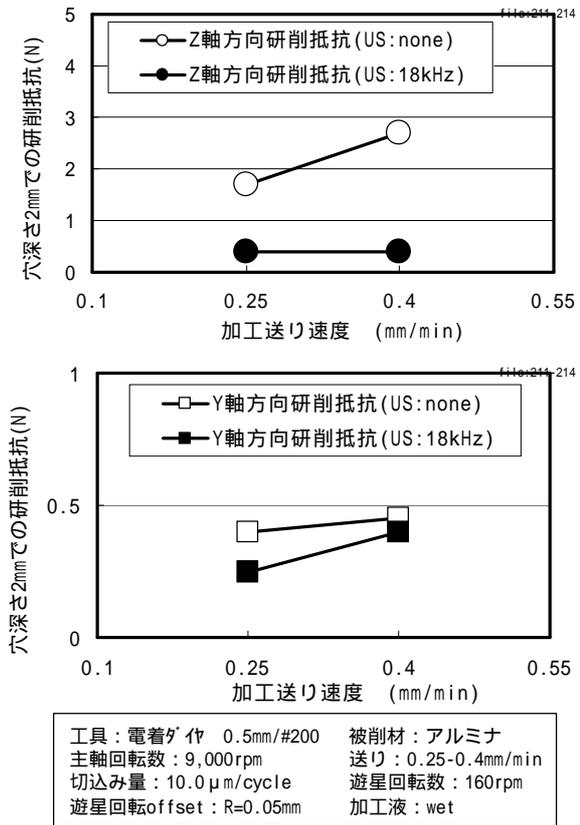


Fig.6 送りと研削抵抗の関係(工具径 0.5mm)

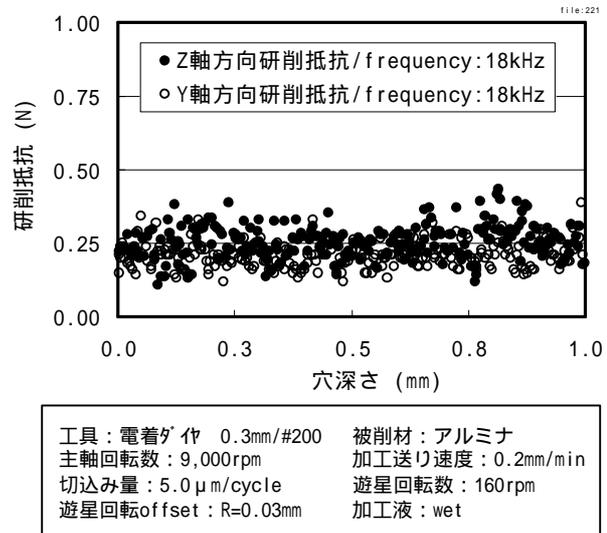


Fig.7 穴深さに対する研削抵抗の変化(工具径 0.3mm)

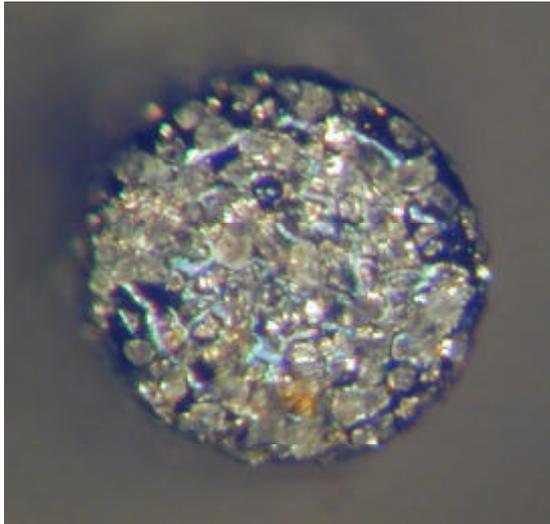


Fig.8 工具端面(0.3mm)・新品工具

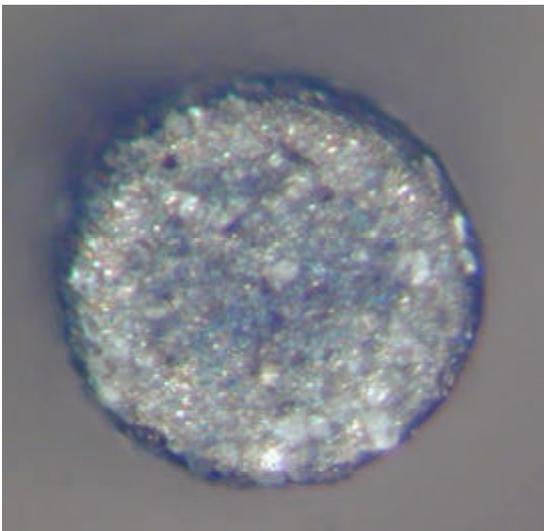


Fig.9 工具端面(0.3mm)・振動付加工後

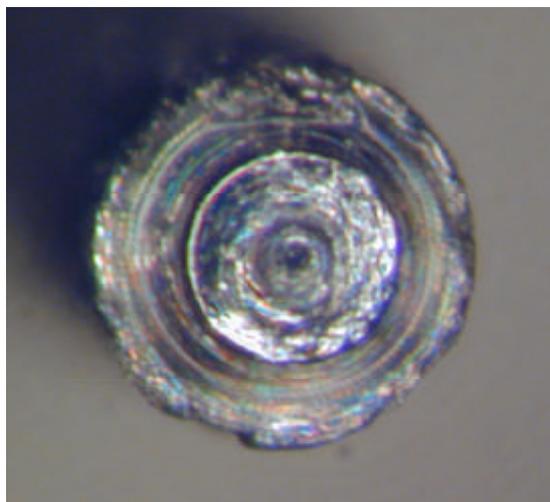


Fig.10 工具端面(0.3mm)・慣用加工後

Fig.11 に振動付加工(工具径 0.3mm)による穴入り口の状態を示す．大きなカケもなく良好な状態を示している．

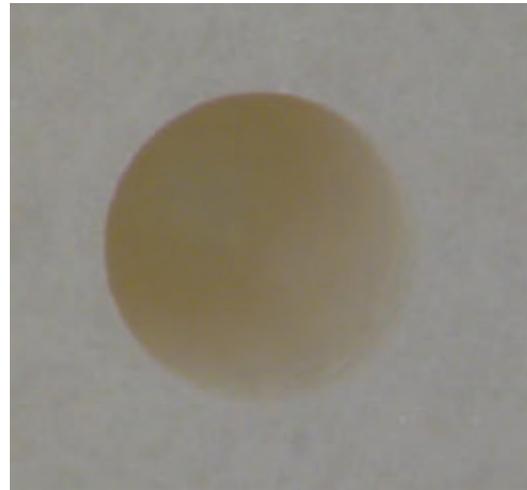


Fig.11 直径 0.3mm の穴入り口の状態

### 3.2 被削材に高周波振動を付加した側面加工(研削)

被削材に高周波振動を付加した側面加工における，切込みに対する X 軸方向研削抵抗と Y 軸方向研削抵抗をそれぞれ Fig.12, Fig.13 に示す．また，側面の表面粗さの比較を Table 5 に示す．

X 軸方向 Y 軸方向共に研削抵抗の低減に大きな効果が得られた．切込みが増加するにしたがって振動による研削抵抗軽減の効果も増大した．高周波振動による表面粗さの悪化は認められなかった．

11 年度の結果と合わせて考えると，研削加工における振動効果は，振動方向が被削材表面を垂直に叩く方向の場合、加工抵抗が大幅に低減され 表面粗さが悪化する。また、振動方向が被削材表面と平行の場合、加工抵抗が低減され、表面粗さは変化なし、となった。加工抵抗の低減の程度は、振動方向が垂直の場合の方が大きかった

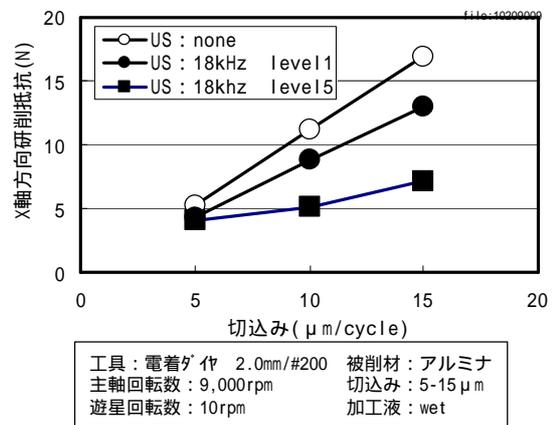


Fig.12 切込みと X 軸方向研削抵抗の関係

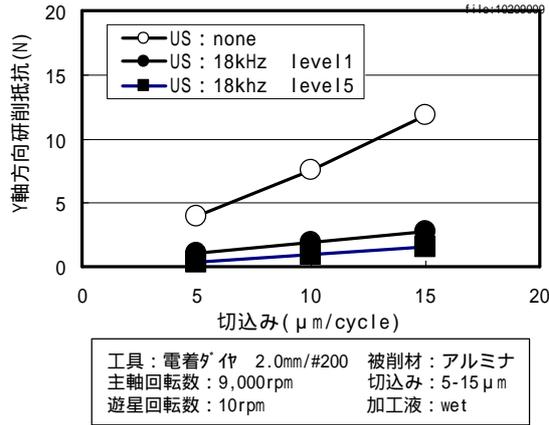


Fig.13 切込みと Y 軸方向研削抵抗の関係

が、表面粗さや加工方法の汎用性を考えると、振動方向を平行に設定する方法がより有効であると考えられる。

一般に、振動方向が平行の場合、研削加工では加工抵抗の低減に効果なく、切削加工では、切りくずと刃先の密着が断続的となり振動効果が大きく現れるといわれている。しかし、本研究では、振動方向が平行の場合でも、切削加工と同様に加工抵抗低減の効果が現れることが明らかとなった。

table 5 加工側面の表面粗さ Ra(μm)

	振動(kHz) 出力レベル		
	無	18	18
チョッピング有	4.4	3.9	4.1
チョッピング無	3.0	3.2	3.0

### 3.3 加工液に高周波振動を付加した穴加工(研削)

加工液に高周波振動を付加した穴加工における、穴深さに対する Z 軸方向研削抵抗の変化を Fig.14 と Fig.15 に示す。Fig.14 は超音波ホーンを水平から 25 度に設定し、Fig.15 は 40 度に設定したときの研削抵抗の変化である。加工抵抗上は有効性が若干認められたが、被削材加振ほどの効果は得られなかった。ホーンの設定角度の違いによる振動効果の変化は確認できなかった。

研削加工において、振動を付加する影響は、被削材と工具が小さく衝突し合う効果と、切りくずの排出を促進する効果が考えられるが、液に加振する場合、後者の効果が大きいと考えられる。慣用穴加工の場合、工具径が大きければ工具端面での切りくずが溜まりやすくこの排出が加工抵抗に大きく影響し、径が小さければ、切りくずの影響は少ないと考えられることから、振動付加加工の場合、工具径の大きい 11 年度の結果は、工具径が大きいため、振動の効果が工具端面の中心部まで到達でき

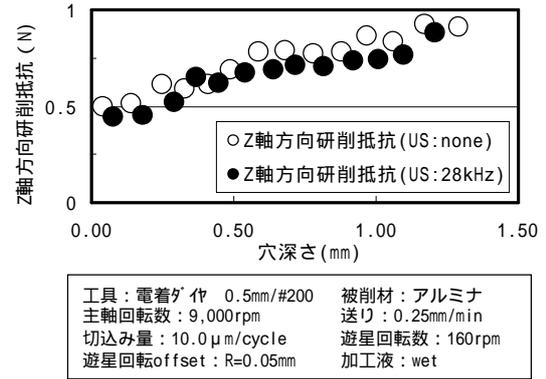


Fig.14 穴深さと Z 軸方向研削抵抗の関係(25度)

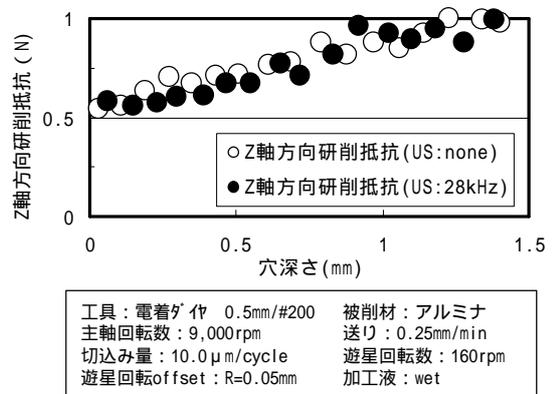


Fig.15 穴深さと Z 軸方向研削抵抗の関係(40度)

ず、また、工具径の小さい 12 年度の結果は、たとえ工具端面の中心に振動が伝播したとしても、切りくずはそれほど溜まっていなかったと推察できる。

### 3.4 加工液に高周波振動を付加した溝加工(切削)

加工液に高周波振動を付加した溝加工における、Z 方向の切込みに対する研削抵抗の変化を Fig.16-1,2,3,4 に

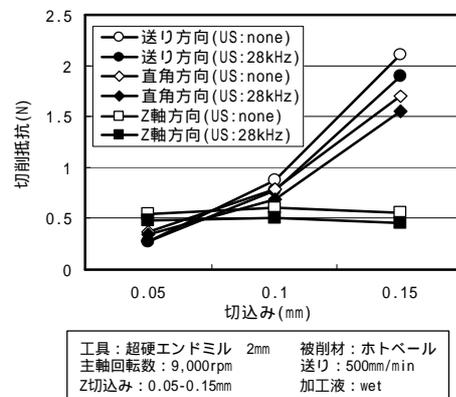


Fig.16-1 切込みと切削抵抗の関係  
送り方向に対して前方からの加振

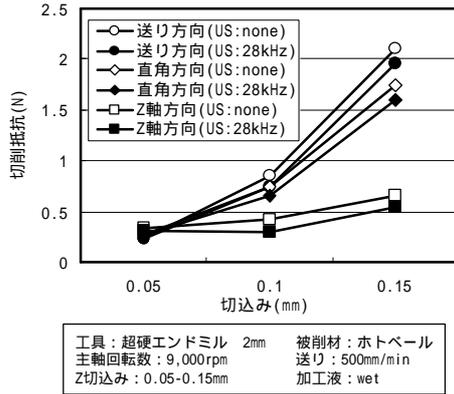


Fig.16-2 切込みと切削抵抗の関係  
送り方向に対して後方からの加振

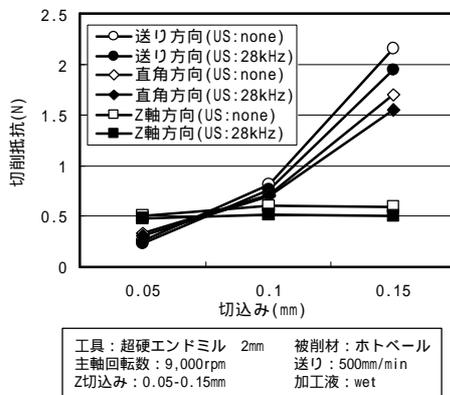


Fig.12-3 切込みと切削抵抗の関係  
送り方向に対して左からの加振(逃げ面)

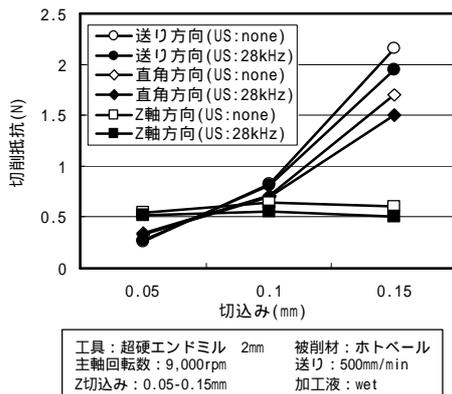


Fig.12-4 切込みと切削抵抗の関係  
送り方向に対して右からの加振(すくい面)

示す．送り方向に対して前後左右からの液加振を試みた結果、切込みが 0.1mm の場合、左右からの加振より前後からの加振の方が効果がわずかに大きかった。また、

切込みが増大すると振動の効果も大きくなるが、被削材加振ほどの効果は得られなかった。

後方からの液加振では、逃げ面・すくい面へ振動が加工液を經由して伝播しているとは考えにくいので、液加振により工具自体もわずかに振動し加工抵抗に影響を与えているものと考えられる。

#### 4. まとめ

被削材に高周波振動を付加した加工では、工具を小径化した条件でも、加工能率の向上が十分に期待できる。

加工液に高周波振動を付加した加工では、ウェルダール用超音波機器により高周波振動のエネルギーを増大させても、加工抵抗上その効果はわずかである。

#### 参考文献

- (1) (社)日本電子機械工業会, 超音波工学, コロナ社
- (2) 道津ら, 精密工学会春季大会講演論文 p184D75 等