

高周波振動付加によるセラミックスの 高能率・高精度研削加工に関する研究 (第1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研削加工実験を行い、研削抵抗や穴入り口でのカケについて有効性を確認した。

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加工に関して多くの研究開発がなされている。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であるためである。

一方、被削材に振動を付加する場合は、要求に応じて被削材の大きさ・形状・材質が千差万別で振動発生が難しいが、振動の波長に対して被削材が十分に小さければ、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研削加工実験を行いその有効性を検証した。

Table 1 実験条件

加工機	三井精機工業（株）製 ジグ研削盤 3GCN 型
工具 被削材	電着ダイヤモンド軸付き砥石 （株）ニッカトー製アルミナ 2.5t （曲強さ 300MPa、密度 3.9g/cm ³ ）
加工液 超音波振動子	水溶性研削油剤 日本特殊陶業（株）製ボルト締め ランジュバン型超音波振動子 D4520
高周波発振器	日本エマソン（株）製 高周波電源 EGR-3200BAFL
研削抵抗測定	日本キスラー（株）製 加工動力計 9257B + アンプ 5011
研削抵抗記録	グラフテック（株）製 サーマルアレイコーダ WR8500
観察顕微鏡	オリンパス光学工業（株）製 実体顕微鏡 SZX12
振幅測定装置	（株）フォトニクス製 光ファイバー 方式非接触変位計 PM-3HF

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、3種類の実験を行った。

- ①被削材に高周波振動を付加した穴加工
- ②被削材に高周波振動を付加した輪郭（側面）加工
- ③加工液に高周波振動を付加した穴加工

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

切りくず排出等の問題を抱える穴加工については、工

具を振動させる従来の高周波振動加工では研削抵抗の飛躍的な低減（1/10 ~ 1/30 程度）が多く報告されている。

そこで、被削材に高周波振動を付加する方法と従来の方法と比較するための穴加工の実験を行った。加工性能は主に Z 軸（穴中心軸）方向研削抵抗と被削材の穴入り口部分でのカケ状態の確認により評価した。

実験方法を Fig.1 に示す。工具の Z 軸方向（上下方向）の運動は、切りくず除去促進のためドリルサイクルを模した上下運動の繰返しサイクルとした。また、回転（xy 平面）方向の運動は、切りくず除去を効果的に行

うために、主軸の工具回転に加えジグ研削盤の特性から工具回転軸をオフセットした遊星回転運動を付加した。

ジグ研削盤のテーブル上に加工動力計を設置し、超音波振動子を固定するために作製した円筒状の保持具を加工動力計上に固定した。被削材は、超音波振動子の端面に直接ボルト止めして、Z軸方向に振動を付加できるようにした。

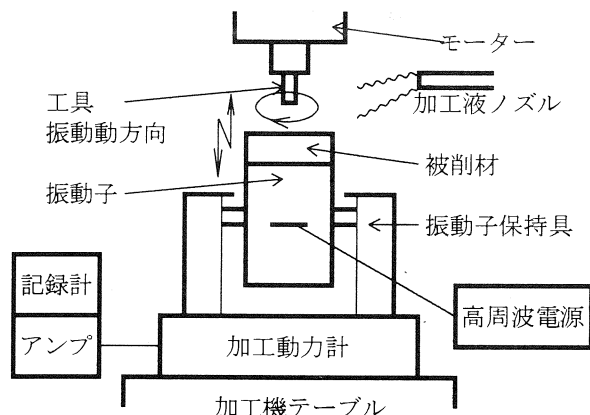


Fig.1 実験方法

加工条件を Table 2 に示す。直径 3.0mm の工具では乾式による浅穴加工実験を、直径 2.0mm の工具では湿式による L/D=1 程度の穴加工実験を行った。主軸回転数は振動効果が最も大きいと予想される低回転数を選択した。それぞれの条件で被削材の振動子への取り付け方法が異なったため、振動数も若干異なることとなった。

Table 2 加工条件

工具	φ 3.0/#120	φ 2.0/#150
主軸回転数 (rpm)	9000	9000
Z 送り速度 (mm/min)	0.1 - 0.2	0.2 - 1.0
切込み (μ m/cycle)	2.0 - 10.0	20.0
遊星回転数 (rpm)	80	160
遊星回転 offset (mm)	0.5R	0.25R
加工穴深さ (mm)	0.1 - 0.5	2.0
加工液	dry	wet
振動数 (kHz)	20.0	18.1

2.2 被削材に高周波振動を付加した輪郭(側面)加工

ジグ研削盤の特性を生かしたC軸(xy平面上の切込み軸)制御による輪郭加工においては、一般に剛性の低い小径工具になると加工能率が大きく低下する。そこで、加工能率の向上を目的に被削材に高周波振動を付加した輪郭加工実験を行い研削抵抗、表面粗さにより評価した。

実験方法を Fig.2 に示す。振動方向がX軸方向を向くように超音波振動子保持具を加工動力計上で寝かせて固定し、工具側面(円筒形状の外周部)での輪郭加工時に

高周波振動が加工面に鉛直に生じるようにした。工具の動きは、切込み軸が常に加工面に対して鉛直方向を向くC軸制御加工を行い、加工中は工具のチョッピング運動(高速上下運動)を付加した。

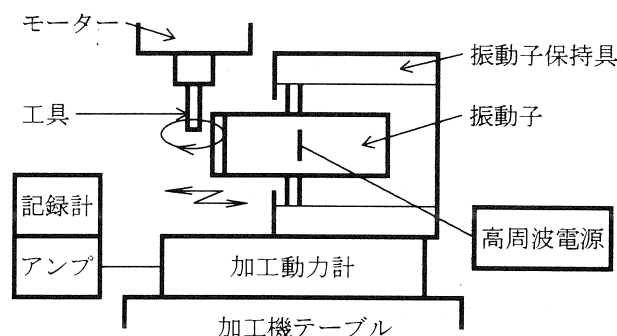
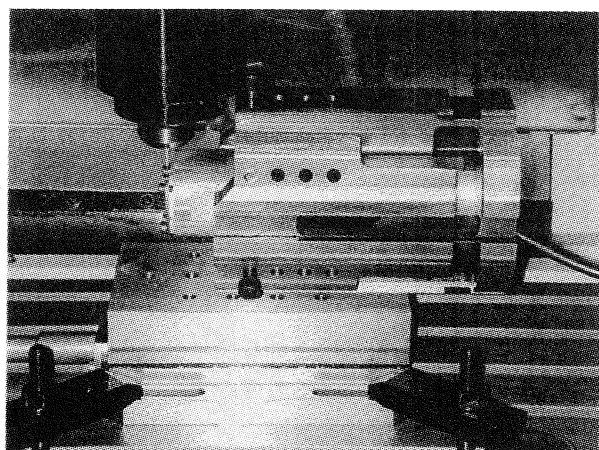


Fig.2 実験方法

加工条件を Table 3 に示す。加工送り速度と切込み量を変化させて、研削抵抗を測定した。送り速度と切込み量はC軸輪郭加工時の標準的条件としたが、主軸回転数は振動効果を高めるため穴加工同様低めに設定した。

Table 3 加工条件

工具	クリスタル・ダイヤモンド製 φ 2.0/#150
主軸回転数 (rpm)	9000
送り速度 (mm/min)	10 - 30
切込み量 (μ m)	40 - 80
チョッピングサイクル (min-1)	200
チョッピングストローク (mm)	3.0
加工液	dry
高周波振動数 (kHz)	18.1

2.3 加工液に高周波振動を付加した穴加工

高周波振動による切りくずの効果的な排除を目的に、被削材及び工具の先端を加工液に浸漬した状態で、加工液に振動を付加する穴加工実験を行い、Z軸方向の研削

抵抗で加工性能を評価した。

Fig.3 に実験方法を示す。加工動力計上に加工液を満たした加工液槽を設置し、加工液中に被削材と超音波振動子を配置する。加工液の水位は被削材表面から約5mm 上方とした。工具の運動は Z 軸方向・回転方向ともに 2.1 穴加工実験と同様とした。

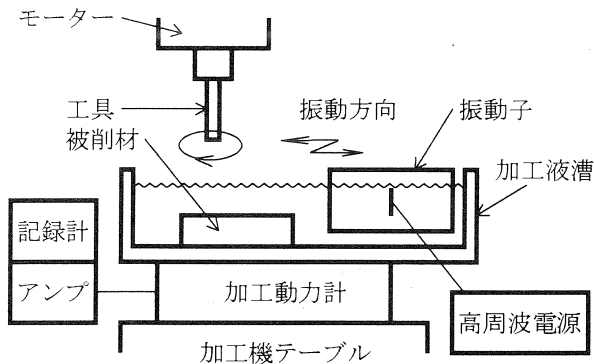


Fig. 3 実験方法

Table 4 に加工条件を示す。振動を付加する対象以外は 2.1 穴加工実験と同条件とした。

Table 4 加工条件

工具	クリスタル・ダイヤモンド製 φ 2.0/#150
主軸回転数 (rpm)	9000
加工送り速度 (mm/min)	0.4
切込み量 (μ m)	20.0
遊星回転数 (rpm)	160
遊星回転 offset 量 (mm)	0.25R
加工穴深さ (mm)	2.0
加工液	dipping
高周波振動数 (kHz)	18.1

3. 実験結果および考察

3.1 被削材に高周波振動を付加した穴加工

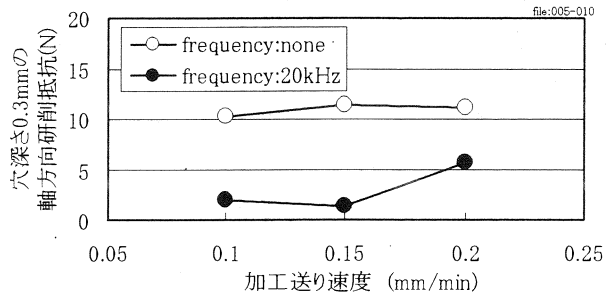
Fig.4 に直径 3.0mm の工具での浅穴加工時における、加工送り速度に対する軸方向研削抵抗を示す。慣用加工に比べて研削抵抗は約 1/8 ~ 1/2 に減少しており、十分な効果が得られた。特に送り速度 0.15mm/min の場合最も効果が大きかった。

Fig.5 に直径 2.0mm の工具での穴加工時における、加工送り速度に対する軸方向研削抵抗を示す。慣用加工に比べて研削抵抗は約 1/4 ~ 1/2 に減少しており、十分な効果が得られた。慣用加工の送り速度 1.0mm/min では研削抵抗の変動に異常が生じており、送り速度の限界付近であると思われる。

Fig.6 に工具径 3.0mm での穴入り口の状態を示す。加

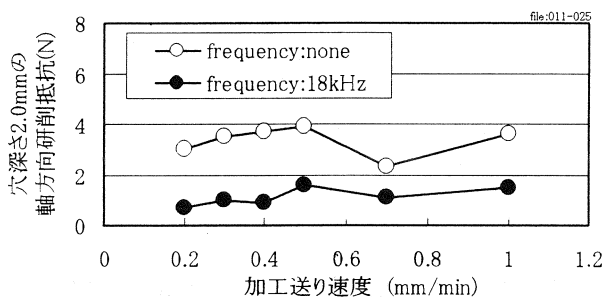
工穴の状態は、ほとんどの場合高周波振動加工の方が入り口のカケが少なかった。

工具摩耗の状態は、直径 3.0mm の工具での実験では



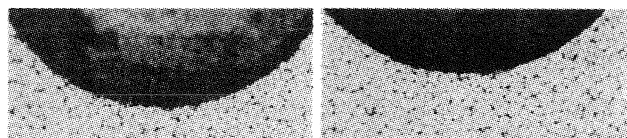
工具：電着ダイヤモンドφ 3.0/#120 被削材：アルミナ
 主軸回転数：9,000rpm 加工送り速度：0.1-0.2mm/min
 切込み量：10.0 μm/cycle 遊星回転数：80rpm
 遊星回転offset：R=0.5mm 加工液：dry

Fig.4 工具直径 3.0mm での加工送り速度と軸方向研削抵抗の関係



工具：電着ダイヤモンドφ 2.0/#120 被削材：アルミナ
 主軸回転数：9,000rpm 加工送り速度：0.2-1.0mm/min
 切込み量：20.0 μm/cycle 遊星回転数：160rpm
 遊星回転offset：R=0.25mm 加工液：wet

Fig.5 工具直径 2.0mm での加工送り速度と軸方向研削抵抗の関係



振動なし 高周波振動付加

Fig.6 穴入り口の状態

顕微鏡で観察する限り、高周波振動加工と慣用加工では違いは認められなかった。砥粒の脱落等の大きな工具損傷は発生しておらず、今回の加工条件はまだ余裕のある条件範囲と思われる。

以上のとおり、慣用加工と比べて、有効性が認められた一方、各種文献¹²⁾で報告されている工具に高周波振動

を付加した従来の振動加工に比べて若干劣る結果となった。この理由は二つ考えられる。第一に、従来の振動加工では工具の振幅が $20 \mu\text{m}$ 以上(20kHz 時)であるのに対して、本実験では被削材の振幅は $6.0 \mu\text{m}$ 弱であり振動による衝撃力は大きく異なっている。振動方向の衝突速度は約 $1/3 \sim 1/4$ と考えられるので、衝突速度が研削抵抗の低減に直接影響すると仮定すると、振幅を大きくすることにより、従来の振動加工と本方法との性能差はより小さくなると考えられる。第二に、工具砥粒のすき間(チップポケット)に詰まった切りくずは、従来の工具振動では、詰まった切りくずに直接加速度が与えられるが、本方法では与えられないため、工具と被削材の相対運動は同等でも詰まってしまった切りくず除去に与える影響は大きく異なる。しかしながら、本方法では加工直後の切りくずによる目詰まり状態は確認されておらず、本方法においても切りくず除去効果は十分であり二番目の影響は小さいものと考えられる。

また、微細加工の領域では大きすぎる振幅が工具寿命・加工精度に悪影響を与えることもあるので、振幅に制限を受ける微細加工領域では、従来の振動加工と本方法の加工性能の差がなくなり、装置の簡便さ等の本方法の有効性が発現するものと推測できる。

加工穴入り口のカケの状態は従来の振動加工とほぼ同様の結果となった。

3.2 被削材に高周波振動を付加した輪郭(側面)加工

Fig.7 に XY 方向研削抵抗の慣用加工時と高周波振動加工時の変化を示す。研削抵抗の大幅な低減と変動幅の縮小が認められる。

Fig.8 に輪郭加工における送り速度と研削抵抗の関係を示す。また、Fig.9 に輪郭加工における切込み量と研削抵抗の関係を示す。慣用加工に比べて研削抵抗は約 $1/4 \sim 1/2$ に減少しており、十分な効果が得られた。送り速度が増加するほど、また、切込み量が増加するほど高周波振動の効果が大きくなった。

Fig.10 に送り速度 $20\text{mm}/\text{min}$ 、切込み量 $80 \mu\text{m}$ での被削材の表面状態を示す。慣用加工では工具回転とともに切りくずが被削材に押しつけられ、いわゆる「こびりつき」状態となっていることがわかる。高周波振動加工では無理なく研削されている。

Fig.11 に送り速度 $20\text{mm}/\text{min}$ 、切込み量 $80 \mu\text{m}$ での被削材の表面粗さを示す。慣用加工では切りくずによる自己研磨作用により、良好な表面粗さを示した。高周波振動加工では、従来の振動加工同様慣用加工に比べて劣る結果となった。

輪郭加工において工具半径方向に高周波振動を付加す

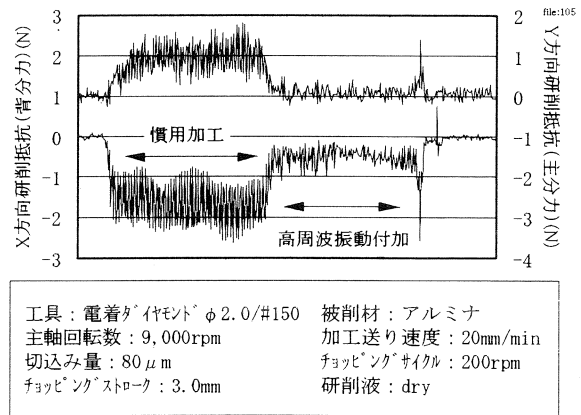


Fig.7 XY 方向の研削抵抗の変化

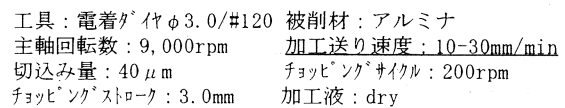
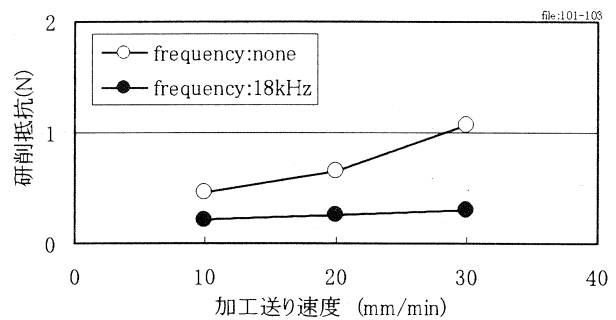
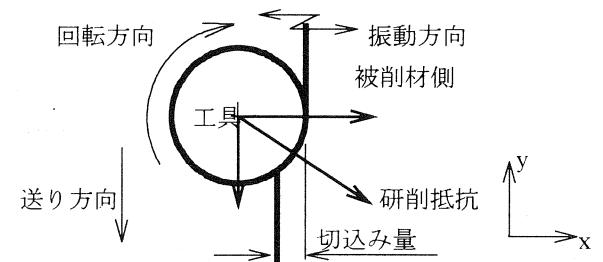


Fig.8 輪郭加工における送り速度と研削抵抗の関係

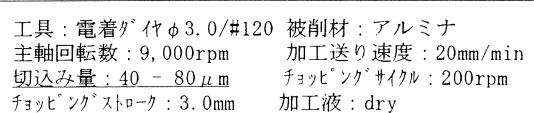
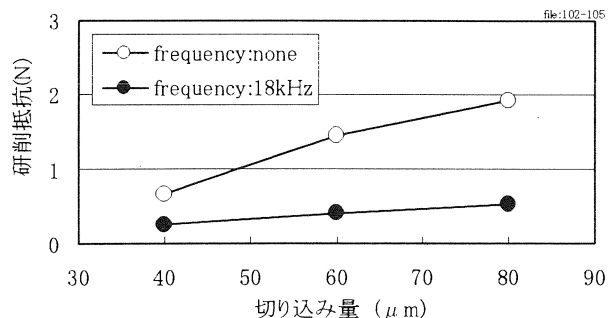
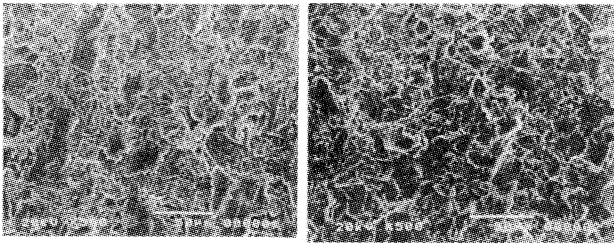


Fig.9 輪郭加工における切込み量と研削抵抗の関係



慣用加工（高周波振動無し） 高周波振動付加
Fig.10 輪郭加工における被削材表面状態

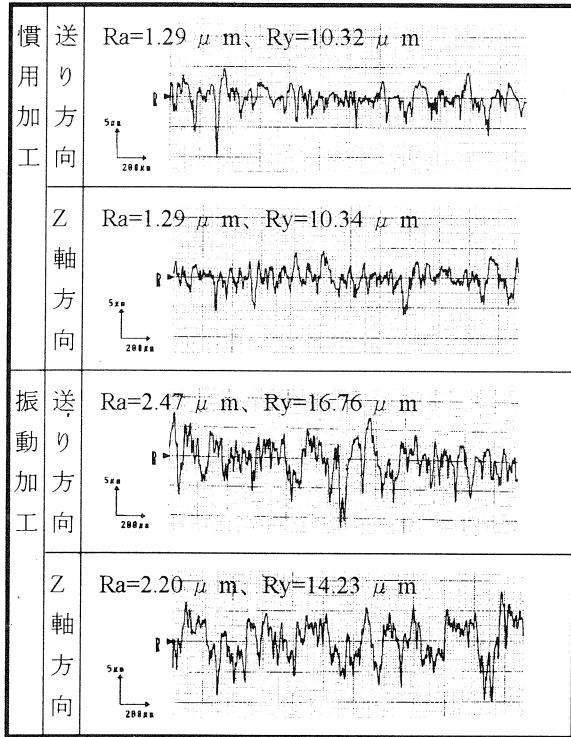


Fig.11 輪郭加工における表面粗さ

る研究はこれまで行われておらず、本結果により慣用加工に比べて加工能率の向上が確認できた。微細加工（小径工具の加工）では工具横方向の剛性が極めて小さくなるため、本方法による研削抵抗低減が一層有利になると考えられる。

本実験では一軸（X軸）方向の振動で一軸（Y軸）方向の加工を行った。通常の加工ではXY軸方向の同時加工が行われるので、今後実用化のためには、被削材をXY軸の振動（円形振動）を付加しその効果を確認する必要がある。

また、表面粗さの問題については、輪郭加工においても被削材のZ軸方向の振動付加による好影響も考えられるので実験で確認するとともに、粗加工と仕上げ加工での振動条件の検討も必要となる。

3.3 加工液に高周波振動を付加した穴加工

Fig.12 に穴深さに対する研削抵抗の変化を示す。慣用加工に普通給油を行った加工と比較して、穴深さ0.5mm以下では加工液に高周波振動を与えた効果が若干認められるが、穴深さ0.5mm以上では慣用加工とほぼ同等の結果となり高周波振動を加工液に付加した有効性は認められなかった。

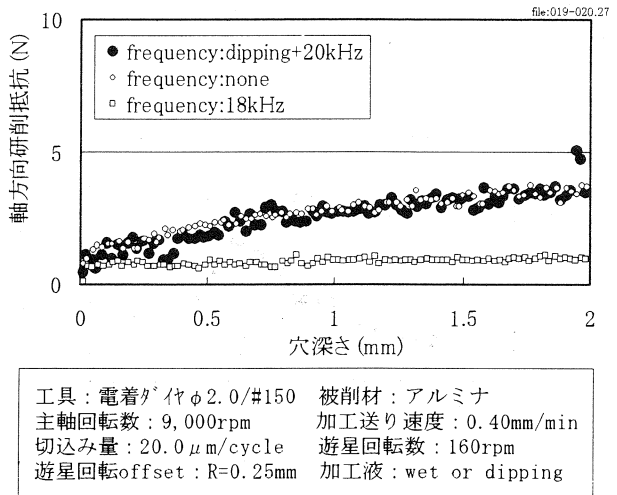


Fig.12 浸漬液に高周波振動を付加した場合の穴深さに対する研削抵抗の変化

今回の条件では、高周波振動の効果はないという結果となった。振動による衝撃破砕効果は当初から期待できなかったが、切りくず除去効果も研削抵抗の変化から確認されなかった。

しかし、共同研究者である徳島県の加工液に振動を与える放電加工の実験では、十分な効果を上げている。徳島県の加工は、工具直径が非常に小さく、超音波発生源にウェルダ用振動子とホーンを用いて加工局部にホーン先端を接近させており、加工の規模に対して、超音波エネルギーが非常に大きい条件で実験を行っていると考えられる。

そこで、今後本実験においても工具直径をより小さいものとし、ウェルダ用振動子セットを徳島県から借用して研削加工に応用する予定である。研削加工と放電加工では加工方式が全く異なっているが、加工規模に対して超音波エネルギーが十分大きくなれば、切りくず除去の効果が得られると期待できる。

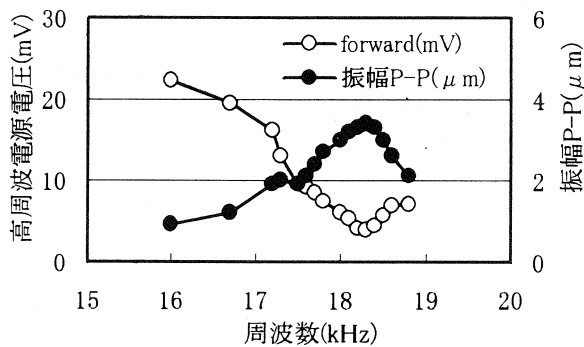
本方法はもっとも簡便に高周波振動を付加できる方法であり、工具、被削材に振動を付加する方法ほど大きな効果が得られなくても、効果の程度によっては十分有用であるといえる。

3.4 振幅・周波数の関係

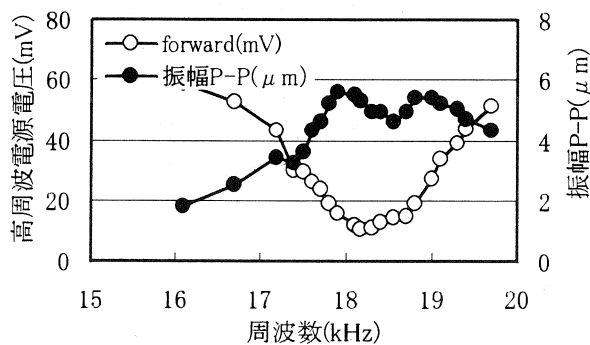
振動子に直接被削材を取り付ける方法は、一般的ではなく周波数・振幅に与える影響は明らかではない。そこで、高周波電源の出力と振動子端面に取り付けた被削材表面の振幅・周波数について測定した。Fig. 13に電源出力・振幅・周波数の関係を示す。公称20kHzの振動子であるが、被削材及び取り付け具の影響により共振周波数は18.1kHzに下がっている。また、高周波電源の出力を最小に保てば出力レベル5の時約5.4 μ m程度の振幅を生じていることがわかる。

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



高周波電源出力レベル：1



高周波電源出力レベル：5

Fig.13 電源出力・振幅・周波数の関係

4. おわりに

- ① 被削材に高周波振動を付加した穴加工では、慣用加工に比べて研削抵抗は約 1/8 ~ 1/2 に減少しており、十分な効果が得られた。
また、穴入り口のカケでも有効性が確認された。
- ② 被削材に高周波振動を付加した輪郭（側面）加工では、慣用加工に比べて研削抵抗は約 1/4 ~ 1/2 に減少しており、十分な効果が得られた。
また、表面粗さは慣用加工の方が良かった。
- ③ 加工液に高周波振動を付加した穴加工では、有効性は認められなかった。