

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3報)

水 江 宏 ・ 城 門 由 人
機械電子部

Study on Ultrasonic Machining of Ceramics for Jig Grinding Machine

Hiroshi MIZUE ・ Yukihiro KIDO
Mechanics & Electronics Division

要旨

セラミックス等の難削材を高能率に加工するために、被削材に高周波振動を付加するための超音波振動台を試作した。試作にあたり振動解析・構造解析・設計を行い、試作した超音波振動台の振幅や周波数などの振動特性や連続発振試験を行い性能を評価した。また、ダイヤモンド工具によるアルミナセラミックスの穴加工実験を行い、研削抵抗と工具磨耗の状態から加工能率を評価した。その結果、振動特性や加工能率など実用化が期待できる性能を確認できた。

1. はじめに

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。これに対して、高周波振動を複合した研削(研磨)・切削加工に関して多くの研究開発・実用化がなされている⁽¹⁾⁽²⁾。振動付加の対象は工具(主軸)が多くを占めている。しかし、回転工具を利用した場合、加工機がコスト高になり工具回転精度が低下する問題がある。また、加工液に振動を付加する方法は、簡便な方法だが振動の効果が薄く適用に制限がある⁽³⁾⁽⁴⁾。

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・材質等の影響で任意に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。さらに、主軸(工具)と被削材がそれぞれ回転運動と振動を分担できるので、工具の回転精度を向上させることが容易となる。また、既存の加工機を改造することなく超音波加工機の加工能率を得る事ができる。

そこで、本研究開発では既存の各種加工機上で、高周波振動を被削材に付加するための「超音波振動台」を試作し、その有効性を検証した。

2. 超音波振動台の設計と評価

超音波振動台を試作するための設計解析ならびに試作品の振動測定や連続発振試験等の各種評価を行った。(コ

ンピュータによる解析は別頁技術レポート「超音波振動台の開発に関する研究」参照。)

2.1 共振周波数(固有振動数)

過去に使用した市販の超音波振動子の共振周波数と前面板の寸法から、今年度試作した超音波振動台の共振周波数を求めた。

$$\begin{aligned} L_{SUS} &= \lambda_{SUS}/4 = C_{SUS}/f_{SUS}/4 \\ C &= \sqrt{E/\rho} \\ f_{SUS} &= 18.1 \times \sqrt{((E_{SUS}/\rho_{SUS})/(E_{AL}/\rho_{AL}))} \\ &= 17.5 \text{ kHz} \end{aligned}$$

ただし L: 振動伝達方向の前面板寸法

λ : 波長, C : 音速
 f : 周波数, E : 縦弾性係数
 ρ : 密度

SUS: 超音波振動台を示す添え字

AL: 市販の超音波振動子を示す添え字

音速の算出にはポアソン比を考慮しない簡易式を使用した。

2.2 圧電セラミックスの強度計算

これまでの加工実験から必要な振幅は $2.5 \mu\text{m}$ (片振幅)とすると、振動速度 V は

$$\begin{aligned} V &= 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f \\ &= 2 \times 3.14 \times 2.5 \times 10^{-6} \times 17.5 \times 10^3 = 0.275 \text{ m/s} \end{aligned}$$

振動応力 σ_v は

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \rho_{PZT} \cdot C_{PZT} \cdot V \\ &= 7.7 \times 10^3 \times 3.0 \times 10^3 \times 0.275 = 6.4 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

圧電セラミックスの最大安全振動応力 $19 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ よ

り小さく安全である。

2.3 連結ボルトの強度計算

圧電素子の断面積を S_{PZT} 、連結ボルトの断面積を S_{SUS} 、とすると、振動子全体の振動応力を連結ボルトで保持することから次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \sigma_{SUSmax} \cdot S_{SUS} &> \sigma_v (S_{SUS} + S_{PZT}) \\ S_{SUS} / S_{PZT} &> \sigma_v / (\sigma_{SUSmax} - \sigma_v) \\ &> 6.4 / (50 - 6.4) = 0.15 \end{aligned}$$

圧電素子の断面積は 1347mm^2 であり、ボルトの断面積は $1347 \times 0.15 = 202\text{mm}^2$ 、ボルト直径は 16mm 以上とする。

2.4 試作した超音波振動台

Fig.1 に試作した超音波振動台を示す。主材料は SUS304 を用いた。被削材を着脱する時の表面損傷の低減と、接着力の向上を目的に、振動放射面は TiN 放電表面処理を施した。部品結合部やコネクタ部は防水・防油性に配慮した。また圧電セラミックス冷却用のエア取入れ口も設定した。



Fig.1 試作した超音波振動台

2.5 周波数と振幅の関係

Fig.2 に周波数と振幅・入力電流の関係を示す。振幅測定はレーザードップラー振動計(ピーアイ・ポリテック(株)製 OFV-303.8)を使用した。印加電圧 34V の時、平均電

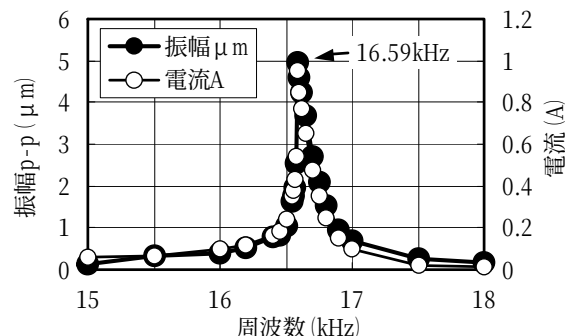


Fig.2 周波数と振幅・電流の関係

流値は 0.98A、共振周波数は 16.59kHz、振幅は $5.0\mu\text{m}$ (両振幅) となりほぼ設計値どおりとなった。

2.6 電圧と振幅の関係

Fig.3 に圧電セラミックスへの印加電圧と発生振幅(両振幅)の関係を示す。単位電圧あたりの振幅の増大率は、0~12V では約 $0.3\mu\text{m/V}$ 、12V 以上では約 $0.04\mu\text{m/V}$ であった。

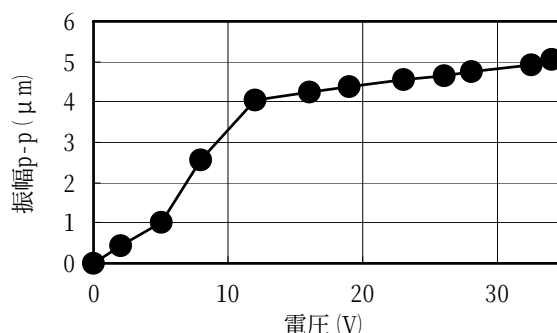


Fig.3 電圧と振幅の関係

2.7 発振時間と表面温度・共振周波数・振幅の関係

Fig.4 に 6 時間の連続発振における各部表面温度と共振周波数・振幅の変化を示す。表面温度の測定は赤外線放射温度計を使用した。発振開始後約 2.5 時間で表面温度・共振周波数共に一定となり、表面温度は圧電素子の側面部分で約 54°C 、共振周波数は約 16.4kHz となった。振幅は 6 時間を通して約 $5.4\mu\text{m}$ であった。温度・周波数はともに非常に高い相関性を示した。

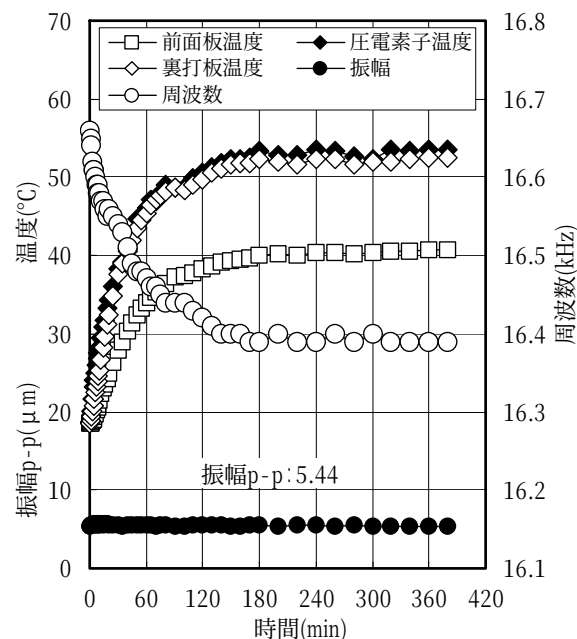


Fig.4 連続運転時間と表面温度・共振周波数・振幅の関係

2.8 被削材搭載試験

Fig.5 に振動放射面に被削材を取り付けた場合の共振周波数と振幅の変化を示す。また、Fig.6 に被削材搭載試験を示す。直径 30mm、厚さ 3mm のステンレス板を振動放射面に瞬間接着剤で重ねて固定し、振幅と共振周波数を測定した。厚さが 3mm 増すごとに共振周波数は約 0.11kHz 減少し、振幅は 0.2 μm 増大した。

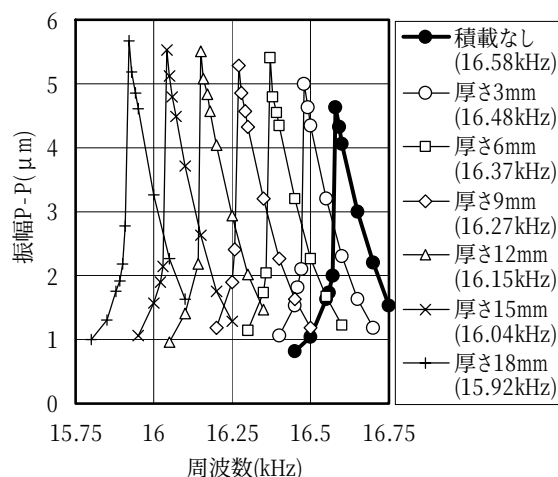


Fig.5 被削材搭載時の周波数と振幅の関係

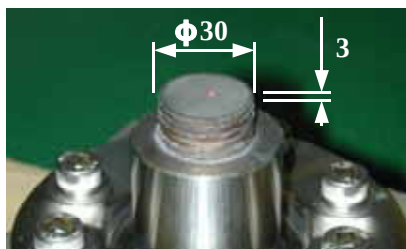


Fig.6 被削材搭載試験

3. ダイヤモンド工具によるアルミナセラミックスの穴加工実験

3.1 加工条件

Fig.7 に加工実験の構成、Table1 に加工条件を示す。工具径 0.3mm の電着ダイヤモンド軸付砥石を用いて、焼

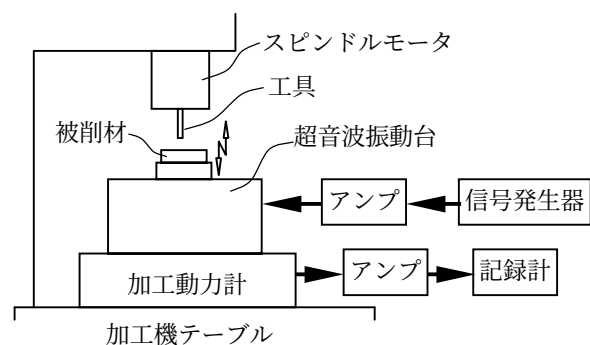


Fig.7 穴加工実験

結後のアルミナセラミックスを被削材として穴加工実験を行った。被削材は瞬間接着剤で振動放射面に取付けた。超音波振動台は加工動力計上に固定し研削抵抗を測定し、加工能率を評価した。工具の運動は 12 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とした。加工条件は送りを 0.2mm/min から 0.5mm/min、穴深さは 1.0mm から 1.25mm に変更した。

Table1 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	水溶性研削油剤ダフニアクアクール	
加工抵抗測定	加工動力計 9256A1 日本キスラー(株)製	
工具	電着ダイヤモンド軸付砥石φ0.3#200 クリストンダイヤモンド工業(株)製	
被削材	Al ₂ O ₃ (株)ニッカト製	
振動台	試作した超音波振動台	市販の超音波振動子を利用※1
主軸回転数	9000 rpm	←
Z 送り	0.5 mm/min	0.2 mm/min
切込み	5.0 $\mu\text{m}/\text{cycle}$	←
遊星回転数	160 rpm	←
偏心量	0.03 mm	←
加工穴深さ	1.25 mm	1.0 mm
振動数	16.6 kHz	18.1 kHz
両振幅	5.2 μm	3.4 μm

※1 の実験は平成 12 年度実施分

3.2 実験結果

Fig.8 に加工穴深さに対する Z 軸方向(穴加工方向)の研削抵抗の変化を示す。市販の超音波振動子を利用した場合と比べて、送りを増大したにもかかわらず、研削抵抗の値はほぼ同等の値を示した。

Fig.9 に穴 1 個加工後の工具端面の状態を示す。ダイヤモンド砥粒の磨耗・脱落状態から穴深さ 1mm までの比較では超音波振動台を使用した結果の方が良好であった。穴深さ 1.25mm では砥粒がほぼ磨耗・脱落していた。

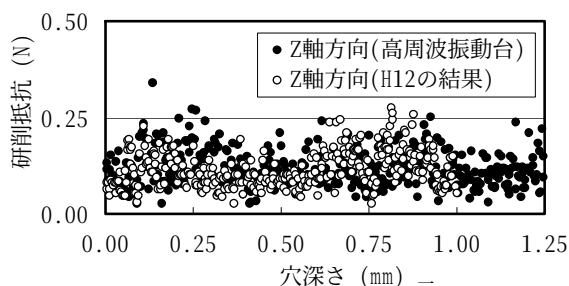


Fig.8 Z 軸方向の穴深さと研削抵抗の関係



超音波振動台使用
穴深さ：1.0mm



市販振動子使用(H12)
穴深さ：1.0mm



超音波振動台使用
穴深さ：1.25mm

Fig.9 加工後の工具端面

4. 考 察

4.1 超音波振動台の設計と評価について

- (1) 微細加工を想定して加工能率を高めるには周波数を高くするのが効果的であるが、被削材を取付けた場合の影響が大きくなり、振動の節の部分での損失も大きくなることから、更なる検討が必要である。
- (2) 加工時に生じる力と振動特性の折衷からフランジ部の厚さを設計したが、より微細加工を想定し、振動への悪影響を少なくするために、薄くした方が良いと思われる。
- (3) 連続発振時の表面温度の上昇は、振動子としては問題ないが、精密加工のための台としては、精度上なるべく低い方が良い。今後は冷却法についてもコンピュータ解析を含めて検討する必要がある。
- (4) 被削材の搭載や温度変化による共振周波数の変化に対して自動的に周波数追従する機能が必要である。
- (5) 超音波振動台とほぼ同仕様の超音波振動子の消費電力は 700W 前後であり、超音波振動台で消費するエネルギーの数倍の能力を有すると思われる。

つまり、被削材を取付けた状態でも超音波振動子としては「無負荷状態」に近いと考えられるので、過励振による振動子の破壊に注意しなければならない。

逆にこのことは、前面板を工夫することで、振動の均一性を維持し、より大面積の振動放射面が確保できれば、被削材のサイズに対する汎用性が向上する可能性を示している。

- (6) 被削材取付けた高さは 151mm であるが、取扱い上より低くした方が良いと思われる。

4.1 穴加工実験について

- (1) 接着剤による被削材の着脱は非効率的なので、前面板に電磁チャックの機能を持たせるなど、被削材の着脱に考慮した構造とすることがある。
- (2) 使用したスクエアタイプの電着軸付砥石は、通常側面加工や穴拡大加工に用いられるもので、穴加工には適していないと思われる。微細穴加工に特化する場合は、専用形状の工具を検討する必要がある。
- (3) 微細切削加工・放電加工・遊離砥粒を用いた研削加工などへの応用を検討する必要がある。

5. まとめ

- (1) コンピュータ解析及び設計計算に基づいて、振動台を試作し、目標とした共振周波数・振幅が得られた。
- (2) 連続発振時の振動台の表面温度は 55℃以下であり十分実用に耐えるものであった。
- (3) 高さ 18mm の被削材が搭載可能であることがわかった。
- (4) 直径 0.3mm 工具での穴あけ加工実験では、超音波振動を付加しなければ、加工不可能な条件で穴加工が可能となり、前回の加工実験より良好な結果が得られた。

本研究開発の遂行にあたり多大なご指導を賜りました九州大学鬼鞍宏猷教授及び推進委員の皆様に対し深謝します。

本研究開発は経済産業省が実施している中小企業技術開発産学官連携促進事業の補助を受けて実施しました。

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
- (3) 胡ら, 1999 砥粒加工学会講演論文集 P155
- (4) 鈴木ら, 1999 精密工学会春季講演論文集 P233