

超音波援用加工と超音波加工ユニットの紹介

中村 弘満*

Hiromitsu Nakamura



超音波振動を各種の加工へ応用する技術の歴史は古く、超音波洗浄器や超音波プラスチック接合機が普及する以前の1954年に超音波砥粒加工機（砥粒を用いて工作物を所要の形状、寸法、表面粗さに仕上げる装置）の販売が始まり、硝子、水晶、陶磁器および硬質の工具鋼などの加工に用いられた。特に1955年代に入ってから半導体産業の立ち上がり期には、ゲルマニウムペレットの加工に多数の超音波加工機が活躍した。¹⁾その後、超音波の駆動元となる振動子の開発や高性能化に伴い、超音波振動を応用した加工技術も進化を続け、今日では半導体製造工程やセラミックス、硝子、宝石等の加工分野において広く用いられている。また、超音波援用加工の特徴から化学強化硝子やCFRP、チタン合金に代表される難削新素材の加工方法としても注目されている。

本稿では弊社で取り組んでいる超音波振動を付加した超音波援用加工とその効果、超音波援用加工を実現する弊社製品の超音波加工ユニットについて紹介する。

1. 緒言

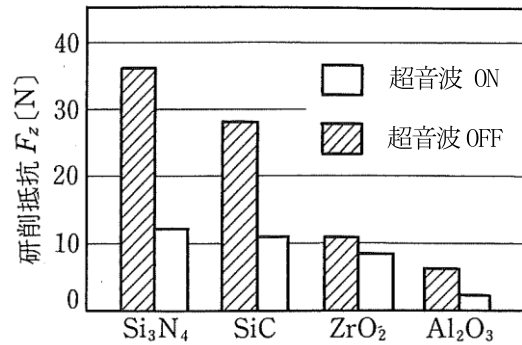
超音波を切削加工へ応用する超音波振動切削法は1954年頃に故隈部淳一郎博士により考案された切削法で、主な切削効果としては、低速切削において、切削抵抗の低減、切削面性状の向上（表面粗さ向上、表面結晶歪み低減）、構成刃先防止あるいは切削ばりの低減などの効果が得られることなどが挙げられる。欠点としては、原理的に切削速度の制限があること、切削工具が特殊なものとなり、汎用性に乏しいこと、断続切削機構になるため、切削条件によっては工具欠損が発生してしまうことなどが挙げられる。²⁾

一方近年の難削材加工では加工時間の短縮と共に加工品質の向上が求められており、例えば難削材の代表格である化学強化硝子の加工では加工後の製品強度の維持や加工面粗度の向上、チップングの低減等がテーマとされているが、既に慣用加工（超音波等を使わない通常の機械加工）では困難な高品質を要求されているため、切削面性状が向上する超音波振動切削法が再び注目を浴びている。

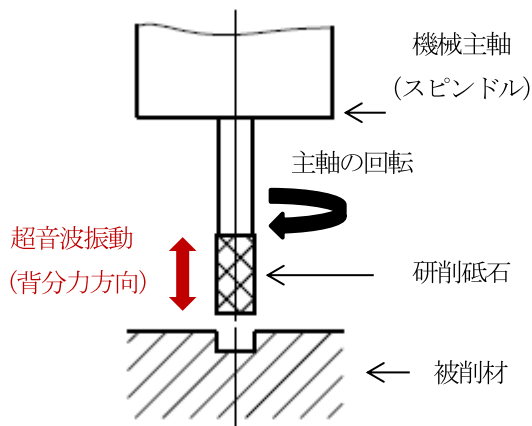
2. 超音波援用加工

超音波振動切削法は、工作機械における刃物を切削方向に超音波振動させ、刃先と工作物との瞬間的な衝突によって小刻みに切削する加工法である。すなわち、切削抵抗が低減するから、刃先の摩擦熱と加工面の熱ひずみが減少し、刃先の寿命が長くなる。また刃物の高い振動数により、工作物のばね定数（工作物に加えた力とたわみ量の変化の比で数値が大きいほど硬いばね）が見掛け上大きくなり、加工精度が向上する³⁾というものである。また、超音波振動切削法では超音波振動を付加する方向により特性が違ってくる。弊社ではドリル、エンドミル、小径砥石等、回転工具を使った切削加工および研削加工に超音波振動を援用しているが（本稿では総称して超音波援用加工とする）、小径回転工具に超音波振動を加える場合は、一般的に軸方向に振動を加える「背分力方向の振動」が有効とされている（第1図）。これは工具先端の切れ刃を上下動させることによって、上昇時は切削が切屑をすくい上げる方向になされ、下降時は工具の逃げ面で材料を削り込む加工が行われるから

である。これを小径砥石による研削加工で考えた場合、工具先端部は砥石の回転による除去加工（工作物を削り取る加工）を行いながら超音波振動により高速で伸縮を繰り返す動作となる。伸長時は被削材の表面を突くため加工力が増し、収縮時には切り屑を持ち上げ、被削材との間に隙間が生じるため、研削液の循環性や切り屑の排出効果が向上する。また、除去加工も断続的なものになるため、加工抵抗や工具摩耗の低減も図れる。このような理由から小径回転工具には背分力方向の振動が有効とされている。



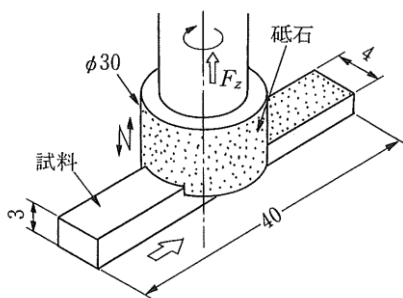
第3図 超音波研削時の研削抵抗⁴⁾



第1図 主軸の回転と超音波振動

2. 1 切削抵抗の低減

第2図に示すような4mm幅の各種セラミックスの試料をφ30mmの砥石で、切込み0.1mmで横送り加工した時の軸方向研削抵抗を第3図に示す。⁴⁾ 第3図においてSi₃N₄は窒化ケイ素、SiCは炭化ケイ素、ZrO₂はジルコニア、Al₂O₃は酸化アルミニウム（アルミナ）である。



第2図 研削砥石と試験片⁴⁾

以上のデータは文献からの引用であるが、実際に電着砥石で表面研削を行い、研削抵抗を測定した事例を紹介する。この実験ではφ4.0電着砥石（写真1）で超硬合金の表面研削加工を行い（写真2）加工中の研削抵抗を計測した。実験内容の概要を第1表に示す。加工には汎用マシニングセンタ（多数の工具を収納し、目的に合わせて異種の加工を1台で行う工作機械）と弊社製超音波ホルダを使用し、（写真1）同一条件で慣用加工と超音波援用加工の加工中の研削抵抗を比較した。加工時の主軸回転数は5,000rpm、超音波振動周波数（⇒共振状態となる周波数）は36.56KHzなので、主軸1回転、12mSあたりに電着砥石は約438回の伸縮、即ち断続加工を行っていることになる。研削抵抗の測定結果を第4図に示す。慣用加工に比べX、Y、Z、全方向で研削抵抗が減少した。従って工具の長寿命化につながる事が予測でき、また他の条件が許せば、研削抵抗の低減分を加工速度や加工深さの増量に転嫁することも考えられる。

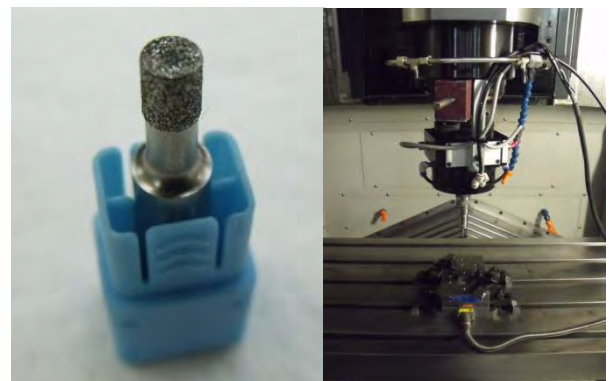


写真1 電着砥石及び加工装置

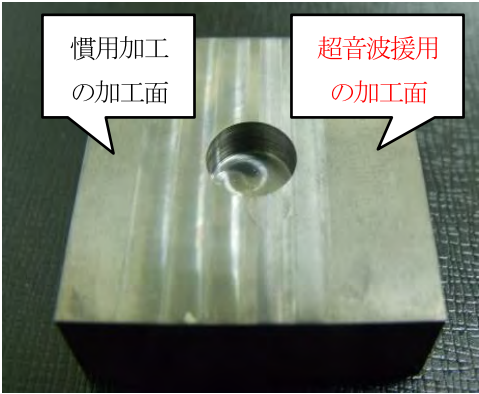
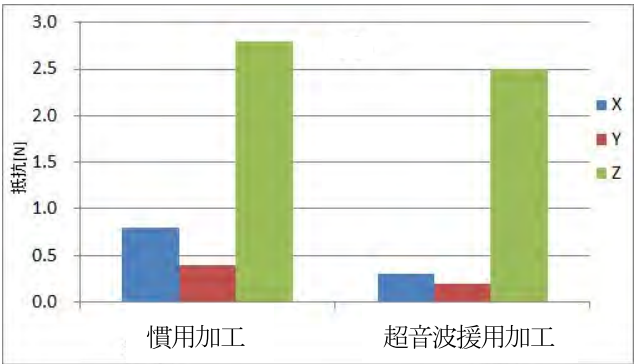


写真2 超硬合金の表面加工

第1表 研削抵抗測定概要

概 要	
加工機	縦型マシニングセンタ (BT40)
使用工具	φ4.0 電着砥石 (#120)
被削材	シルバーロイ製 G5 (JIS V40)
加工内容	表面研削加工 (加工深さ 0.01mm)
クーラント	水溶性切削油
超音波ユニット	JUS38-850C-BT40
超音波周波数	36.56kHz (超音波援用時)
超音波振幅量	約 5.0 μm (超音波援用時)
加工負荷測定器	切削動力計 (9257B)



第4図 研削抵抗の測定結果

2. 2 切削面性状の向上

ドリルやエンドミルに背分力方向の振動を加えることにより切削面性状の向上、即ち表面粗さが向上した事例を紹介する。この実験ではφ6.0 ボールエンドミル (写真3) にて炭素鋼 S45C の表面を湾曲状に切削加工を行い (写真4) 加工後の面粗度を測定した。実験内容の概要を第2表に示す。加工には汎用マシニングセンタと弊社製超音波ホルダを使用し、(写真3) 同一条件で慣用加工と超音波援用加工を行い、加工後の被削材面粗度を比較した。加工時の主軸回転数は8,000rpm、超音波振動周波数は40.22KHzなので、主軸1回転、7.5mSあたりにエンドミルは約301回の伸縮、即ち先端部での削り込みを行っていることになる。加工後の切削面の状態を観測すると(写真5、写真6)、慣用加工ではエンドミルの回転による横方向のカッターマークのみであるのに対し、超音波援用加工ではエンドミル先端の削り込みによる縦方向のカッターマークも刻まれていることが確認される。

面粗度は数か所を抽出して測定したが、ほぼ総ての位置で超音波援用加工の方が好結果となった。測定結果の一例を第5、第6図に示す。この部位では慣用加工での面粗度 Ra1.17 μm に対し超音波援用加工後の面粗度 Ra0.70 μm で面粗さが40%程度向上する結果となった。

第2表 面粗度測定概要

概 要	
加工機	縦型マシニングセンタ (BT30)
使用工具	ボールエンドミル φ6.0 (R3.0)
被削材	炭素鋼 S45C
加工内容	表面切削加工 (加工深さ 0.1mm)
クーラント	エアブロー
超音波ユニット	JUS41-BT30CC
超音波周波数	40.22kHz (超音波援用時)
超音波振幅量	約 2.0 μm (超音波援用時)
面粗度測定器	面粗さ測定器 (MFW-250)
観測機材	マイクロスコープ (VHX-5000)

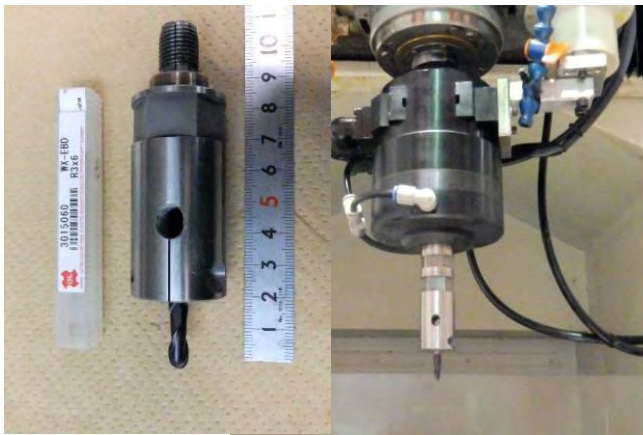


写真3 ボールエンドミルと加工装置

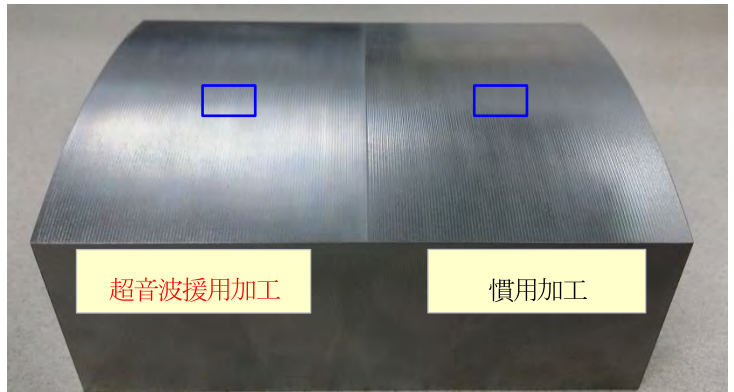
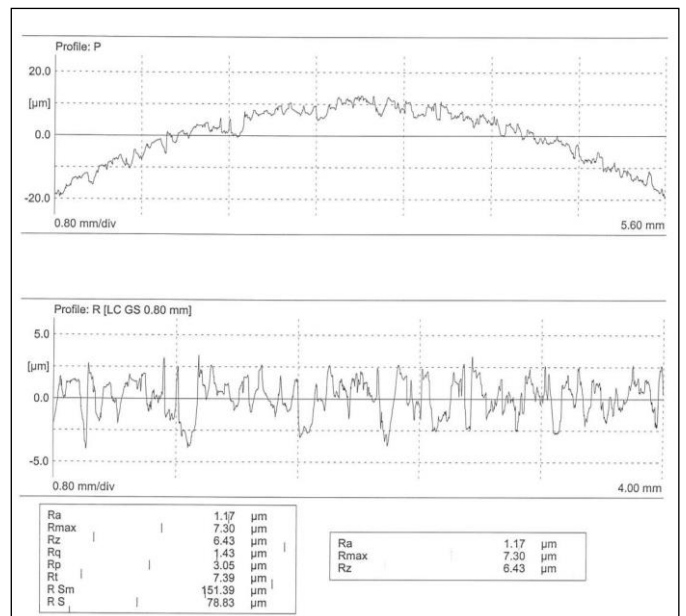


写真4 S45Cの表面切削（加工後）



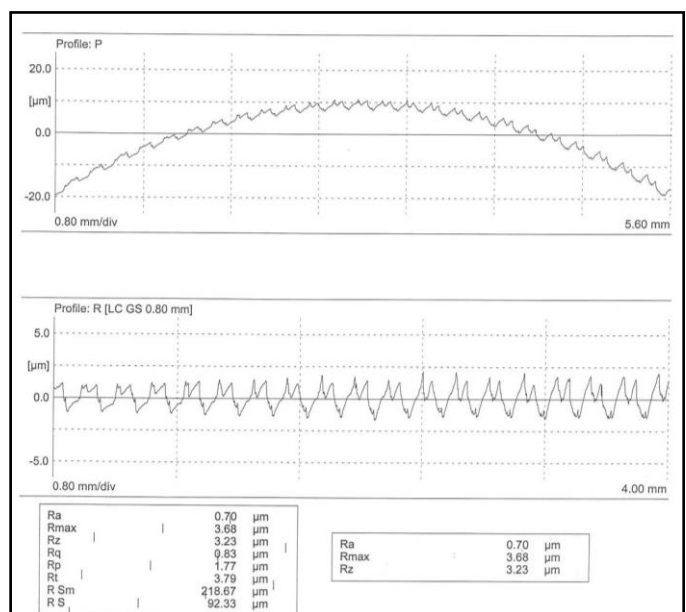
写真5 慣用加工後の表面（200倍）



第5図 面粗度測定結果（慣用加工）



写真6 超音波援用加工後の表面（200倍）



第6図 面粗度の測定結果（超音波援用）

2. 3 構成刃先と目詰まりの抑制

「構成刃先」とは切削加工中、工具刃先に発生した付着物が新たに出来た刃先のように振る舞うことを指す。つまり付着物で加工することになり、加工精度に著しい悪影響を与える。また、構成刃先は工具刃先に強く付着するため、刃先を欠損させる原因にもなる。構成刃先は工具刃先と被削材の親和性、刃先のすくい角、切削速度、切削温度等の条件で発生しやすくなるが、ある一定の速度で被削材と刃先との接触点が一定温度以下になると起こる現象とされている。また、研削加工でも似た現象があり、研削加工では構成刃先に相当する現象が砥粒の「目詰まり」ということになる。この現象も加工効率が著しく落ち、もしくは加工が進まなくなる。

この「構成刃先」や「目詰まり」を防ぐには様々な対応策を組み合わせるが、振動切削（研削）もこの現象の発生を抑える有効な方法とされている。これは（超音波）振動切削による断続加工の恩恵で、被削材と刃先との接触時間が短いことと切削速度や加工圧が一定でないため、刃先への付着がし難いためである。

実際にドリルに超音波振動を加えることにより構成刃先が低減された事例を紹介する。この実験ではφ0.5ドリル（写真7左上）にて厚さ10mmのチタン合金に貫通穴加工（写真8）を行い、加工後のドリル先端の状態を観察した。実験内容の概要を第3表に示す。加工には汎用マシニングセンタと弊社製超音波ホルダを使用し、（写真7）同一条件で慣用加工と超音波援用加工を行い、1,000穴加工後のドリル先端状態を比較した。加工時の主軸回転数は5,000rpm、超音波振動周波数は37.16KHzなので、主軸1回転、12mSあたりにドリルは約446回の伸縮、即ち断続加工を行っていることになる。1,000穴加工後のドリル先端の状態を観測すると（写真9、写真10）、慣用加工を行ったドリルでは先端部に付着物（溶着）が確認されるが、超音波援用加工では付着物は確認できない。

また、穴加工後の被削材を観測すると、表面（ドリルの入口側）ではさほど穴ピッチの乱れは見られないが、裏面から観察すると穴ピッチの乱れが見られ、特に慣用加工では、穴と穴が接触するほどの大きなズレ、即ち穴加工中の“曲がり”が発生していた。これはドリルが被削材に接触した時、あるいは穴加工中にドリルが歪み、垂直に加工出来なかった物と考えられる。裏面の穴ピッチを実測したピッチ寸法の分布を第7図に、標準偏差を第8図に示す。これらのデータでも超音波援用加工の方が穴ピッチが安定し

ていることが判るが、これは軸方向に振動を付加するメリットで、ドリル加工において軸方向に超音波振動を付加すると、軸方向の直進加工性が強くなり、加工穴位置精度が向上するというものである。

第3表 ドリル加工時の構成刃先測定の概要

概 要	
加工機	縦型マシニングセンタ (BT30)
使用工具	超硬ドリルφ0.5 (R3.0)
被削材	チタン合金 (64 チタン)
加工内容	貫通穴加工 (加工深さ 10mm / センタドリルなし)
クーラント	水溶性切削油
超音波ユニット	JUS41-BT30CC
超音波周波数	37.16kHz (超音波援用時)
超音波振幅量	約 1.5μm (超音波援用時)
観測機材	マイクロスコープ (VHX-5000)

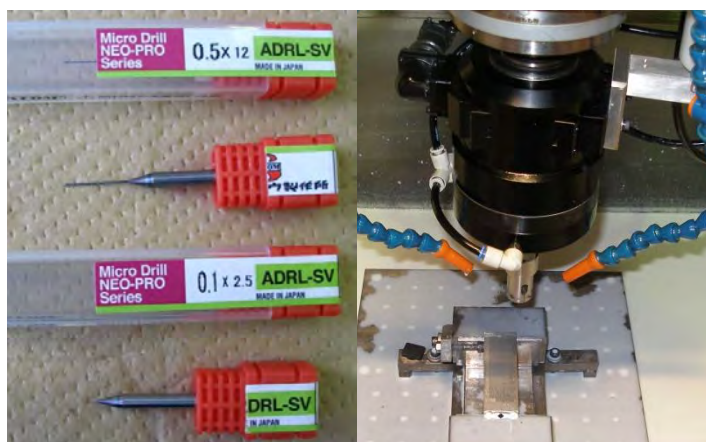


写真7 ドリルと加工装置

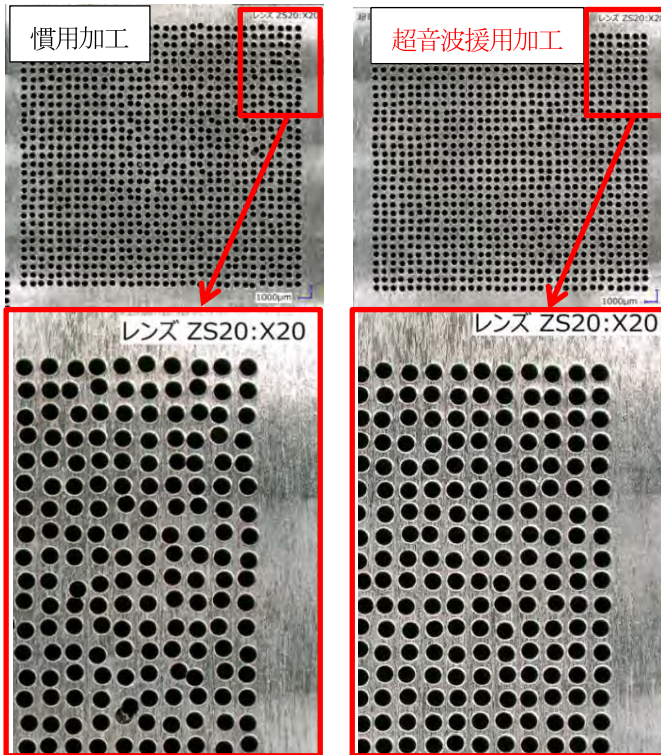


写真8 $\phi 0.5$ 穴加工後の64チタン合金（裏面）

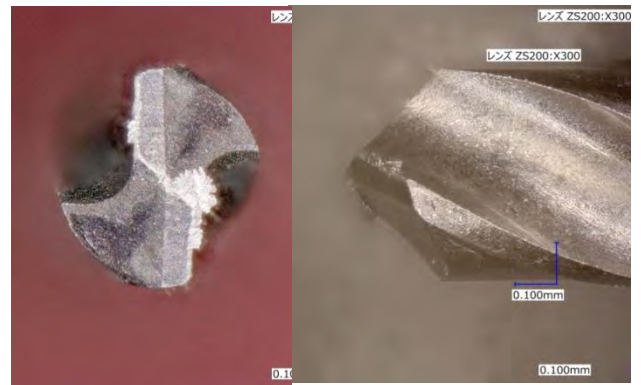
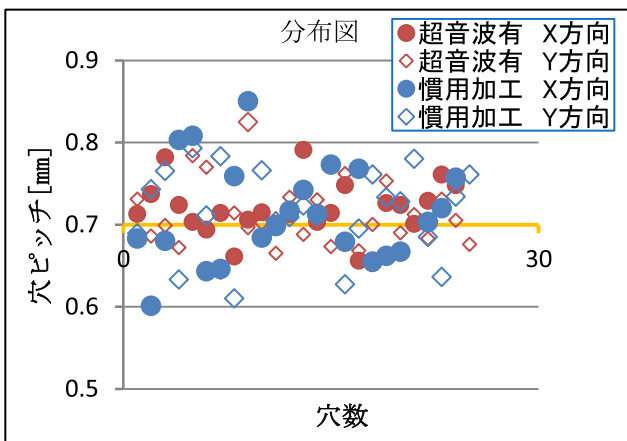


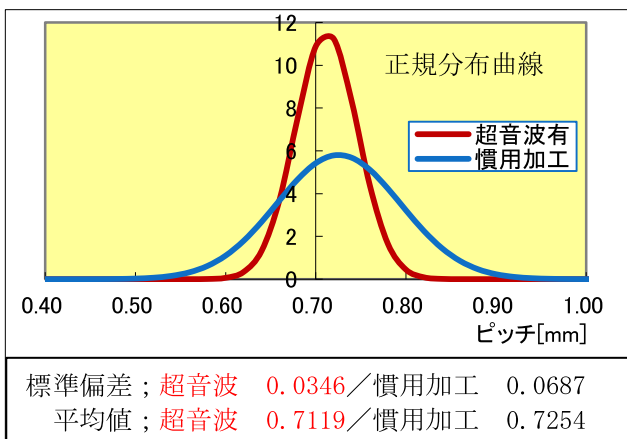
写真9 慣用加工 1000 穴加工後のドリル ($\phi 0.5$)



写真10 超音波援用加工 1000 穴加工後のドリル ($\phi 0.5$)



第7図 穴ピッチの分布図



第8図 穴ピッチの正規分布

次に研削加工において砥石に超音波振動を加えることにより目詰まりが低減された事例を紹介する。この実験では $\phi 0.6$ ダイヤモンド電着砥石(写真11)を使用し、厚さ10mmの石英ガラスに深さ8mmの止まり穴加工を行い加工後の工具先端、即ち砥石の目詰まり状態を観察した。実験内容の概要を第4表に示す。加工には弊社製超音波スピンドルを搭載した小型マシニングセンタを使用し、(写真17)同一条件で慣用加工と超音波援用加工を行い、5穴、50穴、200穴加工後の工具先端(砥石)状態を比較した。加工時の主軸回転数は12,000rpm、超音波振動周波数は40.45KHzなので、主軸1回転、5mSあたりに砥石は約202回の伸縮、即ち断続加工を行っていることになる。5穴、50穴加工後の砥石先端の状態を観測すると(写真12、写真13)、慣用加工を行った砥石と超音波援用加工を行った砥石では目詰まりの状態が一目瞭然であった。200穴加工後の状態では、超音波援用加工でも目詰まりが進行し、あまり差が見られないが、これは目詰まりや構成刃先が、発生→成長→脱落を繰り返すためである。慣用加工の砥石底面の写真(写真12左)で200穴加工後の写真が50穴加工後の写真に比べ中心部の目詰まりの量が減少していることから、脱落があ

ったことが推測できる。前記の通り目詰まりが発生し成長すると、加工品質が著しく低下し、このガラス加工の場合ではチッピング（円周部の欠け）や仕上がり穴径に悪影響をもたらす。また目詰まりが脱落する時、砥石を一緒に脱落させるため、砥石の寿命にも影響してくる。無論、超音波援用加工に於いても目詰まりの脱落は発生するが、慣用加工に比べ進行は遅い。



写真11 ダイヤモンド電着砥石と加工装置

第4表 研削砥石目詰まり測定の概要

概 要	
加工機	超音波加工用小型マシニングセンタ (BM-532T-OM)
使用工具	ダイヤモンド電着工具 φ0.6(＃400)
被削材	石英ガラス (厚さ 10mm)
加工内容	止まり穴加工(加工深さ 8mm)
クーラント	水
超音波ユニット	JUS41-050A
超音波周波数	40.45kHz (超音波援用時)
超音波振幅量	約 0.8μm (超音波援用時)
観測機材	マイクロスコープ (VHX-5000)

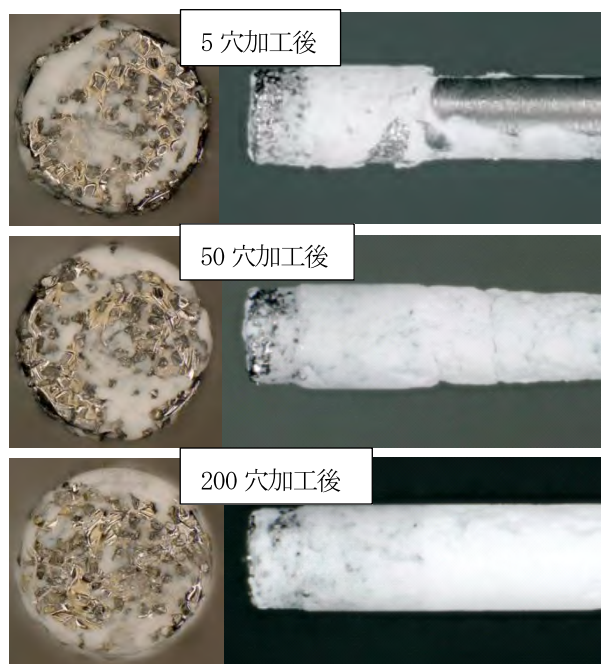


写真12 慣用加工 砥石目詰まりの進行

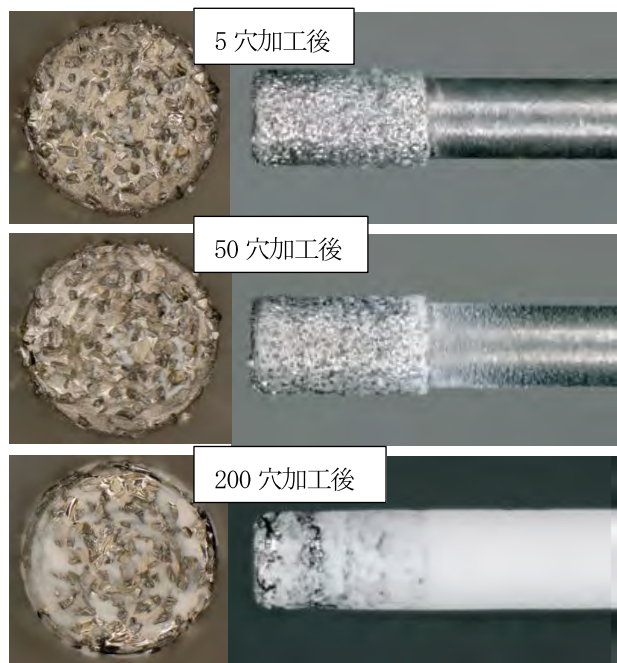


写真13 超音波援用加工 砥石目詰まりの進行

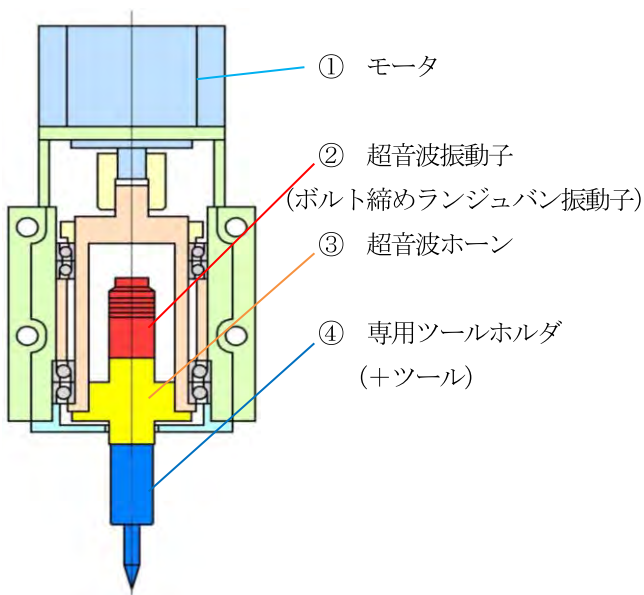
3. 超音波加工システム

弊社の超音波加工ユニットは超音波スピンドルと超音波ホルダの2種類をラインナップしているが、この超音波加工ユニット及びこれを用いた超音波加工システムについて紹介する。

3. 1 超音波スピンドル

スピンドルとは回転軸のことで、一般的に工作機械のスピンドルとは主軸モータ部を指す。主軸モータ部は末端に取り付ける加工用ツールを高速回転させるため、工作機械の主要部品の中でも特に精度が要求される部分である。従って今日では多数のメーカより様々な工作機搭載用スピンドルが発売されている。弊社ではこれら一般のスピンドルとは一線を画す超音波加工機専用の主軸モータとして、超音波スピンドルを製造・販売している。(写真 14)

超音波スピンドルの内部構造を第 9 図に示す。①のモータは前記の通り、取付ける工作機の主軸モータとなるため、高回転と高耐久性、静粛性が求められる。②は加工機用超音波振動子として一般的にボルト締めランジュバン型振動子が用いられる。③の超音波ホーンは超音波振動子からツール迄の超音波の伝達を行うもので、同時に機械インピーダンス整合器としての働きをする。④の専用ツールホルダはドリル、エンドミル、電着工具等、市販の加工用ツールでも共振できるように専用設計された物で、ツールホルダに装着するツールの突出量で共振周波数の微調整を行う。(写真 15) 共振周波数は前記②③④の組み合わせで算出され、②の超音波振動子に共振周波数の交流電圧を加えることにより、超音波振動子、超音波ホーン、専用ツールホルダ+ツールが一体となって超音波振動を発生する。逆に加える交流電圧の周波数が共振周波数と大きく違うと満足な超音波振動は得られない。



第 9 図 超音波スピンドルの内部構造



写真 14 超音波スピンドル JUS41-050A



写真 15 専用ツールホルダとツール(φ0.3 エンドミル)

3. 2 超音波ホルダ

超音波加工機専用の主軸モータとして販売された超音波スピンドルに対し、汎用のマシニングセンタ装着用に販売された物が超音波ホルダ(写真 16)である。前記の超音波スピンドルは超音波加工機の主軸として開発されたため、一般の汎用マシニングセンタへの流用が難しいが、この超音波ホルダは BT30 または BT40 サイズのツーリングシステムと同様に一般のマシニングセンタへの取付けを可能としている。

超音波ホルダの内部構造は超音波スピンドル(第 9 図)からモータをなくし、代わりにマシニングセンタ主軸接続用テーパシャフトを設けた構造となる。



写真 16 超音波ホルダ JUS41-BT30C

3. 3 超音波加工機

写真 17 は超音波スピンドルを搭載した超音波加工機 BM532T-OM である。加工機及び搭載した超音波スピンドルの緒元を第 5 表に示す。

この超音波加工システムは、汎用機に比べて高価な超音波加工機を安価に提供するため、小型マシニングセンタの主軸部に超音波スピンドルを搭載し、更に専用の ATC (Auto tool changer) を搭載した超音波加工機である。主軸に超音波スピンドルを搭載しているため、装着する工具類には専用のツールホルダが必要だが、専用 ATC の搭載により超音波加工でも自動工具交換が可能な加工機となっている。



写真 17 超音波加工機 BM532T-OM

第 5 表 超音波加工機緒元

各軸ストローク		350mm(X) 300mm(Y) 200mm(Z)
テーブルサイズ		550mm(X) × 600mm(Y)
送り速度		15m/min MAX
積載ワーク重量		1, 000kg MAX
外形寸法		1, 030mm(W) × 600mm(D) × 1, 200mm(H)
自動工具交換		専用 ATC 最大 6 本
超音波スピンドル	型式	JUS41-050A
	モータ容量	0. 5KW
	軸トルク	0. 32Nm
	最高回転速度	15, 000rpm
	超音波周波数	41. 0KH z (振動子周波数)
	超音波振幅量	4. 0 μ m (スピンドル単体)
	冷却方式	冷凍式ドライエア

3. 4 汎用マシニングセンタへの装着

写真 18 は超音波ホルダを装着した HELOSTEC 社製縦型マシニングセンタ F-6 である。マシニングセンタ及び搭載した超音波ホルダの緒元を第 6 表に示す。

この超音波加工システムでは、超音波加工を行う時のみマシニングセンタに超音波ホルダを装着するため、通常の慣用加工を行う際は汎用工具をそのまま使用できる。また、超音波ホルダは超音波スピンドルに比べ、構造が簡単なので超音波加工ユニットを安価に提供できるメリットがある。但し、超音波加工を行う際は、手動操作で超音波ホルダを着脱しなければならないため、超音波援用加工に関しては段取り作業が多少煩雑になる。従って超音波加工システムの選択としては、超音波援用加工の頻度の高い場合は超音波スピンドル搭載機（超音波加工機）を推奨し、超音波援用加工の頻度が少ない場合、或いは既存のマシニングセンタを利用して超音波援用加工を行う必要がある場合は超音波ホルダを使ったシステムを推奨することとなる。



写真 18 超音波ホルダを装着したマシニングセンタ

第 6 表 マシニングセンタ緒元

各軸ストローク		600mm(X) 600mm(Y) 350mm(Z)
テーブルサイズ		600mm(X) × 600mm(Y)
送り速度		12m/min MAX
主軸回転数		30,000rpm MAX
積載ワーク重量		500kg MAX
外形寸法		2,020mm(W) × 2,400mm(D) × 2,490mm(H)
自動工具交換		BT30 用 ATC 最大 16 本
超音波ホルダ	型式	JUS41-BT30C
	テーパ部	BT30
	許容回転速度	8,000rpm
	超音波周波数	41.0KH z (振動子周波数)
	超音波振幅量	4.0 μ m (ホルダ単体)
	冷却方式	冷凍式ドライエア

4. 今後の課題

弊社では超音波スピンドルと超音波ホルダを超音波加工ユニットとして、既に販売しているが、この商品は「特定の条件下で加工性能を改善する」導入効果が判り難い製品であるため、未だ課題も残っている。その問題となる「特定の条件下」が次の 3 点である。

1) 超音波振動が可能な工具の使用

超音波援用加工を行うには使用する工具を含めて共振状態にする必要がある。この共振状態を作るため、装着する工具はある程度の制限を受けることになる。使用する工具が超音波援用加工に適応するか否か利用者には判り難く、場合によっては工具の改造が必要となる。これを避けるため、超音波加工専用工具を販売しているメーカーもあるが、量産している一般の工具に比べ非常に高価な物となってしまうため、利用者から受け入れられているとは言い難い。

2) 振動モードが純粋な縦振動

超音波振動が発生しても、その振動モードが重要である。目的は装着した回転工具に背分力方向の振動を加えることなので、純粋な縦振動以外は加工に悪影響を及ぼすことになる。弊社では 3D-CAD による事前評価とマイクロ스코プによる工具振動の観測により振動モードを確認しているが、この点でも利用者には扱い難い。

3) 適切な加工条件

前記の通り超音波援用加工は、断続除去加工となる。従って慣用加工と同じ加工条件（加工量、主軸回転速度、送り速度等）が最適とは限らない、加えて超音波振幅量という新たな要素も加わるため、改めて加工条件を検討する必要がある。また、超音波援用加工では切削速度の上限、即ち臨界切削速度という制限があるため、注意が必要である。

以上の「特定の条件下」という前提を払拭することが出来れば、超音波加工機は万人に受け入れられる加工装置として急速に広まるものと想像できる。従ってこの「特定の条件」に左右されない超音波加工システムの開発が一番の課題ではあるが、現実的には様々な制限があり、近々の実現は難しい。現状では「特定の条件」が利用者に理解され、超音波加工ユニットさえあれば誰でも応用可能な超音波援用加工方法の開発と導入効果の明確化が弊社の課題となっている。

参考文献

- 1) 電子情報技術産業協会：超音波工学初版 コロナ社 1993 年 pp. 6
- 2) 日本塑性加工学会：超音波応用加工第 1 版 森北出版 2004 年 pp. 84
- 3) 電子情報技術産業協会：超音波工学初版 コロナ社 1993 年 pp. 209
- 4) 日本塑性加工学会：超音波応用加工第 1 版 森北出版 2004 年 pp. 116-117