超音波加工に関する研究*

— 試料厚さが加工速度におよぼす影響について —

田 中 義 信** 矢 野 章 成**

Studies on Ultrasonic Machining

—The Influence of the Workpiece Thickness upon the Machining Speed—

Yoshinobu TANAKA, Akishige YANO

In this report, the influence of the workpiece thickness upon the machining speed in ultrasonic machining was studied experimentally by measuring vibratory displacement of tool, machining speed, impulsive force and theoretically by using the theory of reflection and transmission of ultrasonic wave through a different solid medium. In consequence following results were obtained.

(1) When the workpiece thickness is large, machining speed decreases and becomes minimum when the thickness is equal to $\lambda/4$ (λ : wave length in the workpiece).

(2) It seems that the decrease in machining speed is due to the decrease in impulsive force.

(3) The rates of the decrease in machining speed and impulsive force are approximate to those of the theory of reflection and transmission of ultrasonic wave through a different solid medium.

1. 緒 論

最近の工業の発展によつて硬質金属材料、宝石、セラミックスなどの精密加工が重要視され、これら材料の加工法の一つとして超音波加工が広く利用されていることは周知の通りである。

この超音波加工法の諸特性に関しては、すでに多くの^{1)~5)}によつて研究されているが、試料の厚さが変化した場合の加工量については、ただ単に試料の厚さがその試料中の音波の波長の $1/4$ になると共振状態となるため超音波エネルギーが十分加工面で消費されずに工具と試料が同じ姿勢で振動し、加工能率は低下するであろうといわれているだけで、これに関しての詳しい報告はない。

そこで、本研究では主として試料の厚さを変化した場合、加工量がどのようになるかを調べ、その場合の工具の振巾、加工台の振動状況および衝撃力を測定するとともに、超音波の異媒質層への法線入射の反射および透過の理論を用いて検討をおこなつた。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した超音波加工機を図1に示す。この加工機の発振器出力は約 150 W で陽極電流を 200 mA、励

図1 超音波加工機

1. ボール盤本体	5. 加工台
2. 超音波振動子	6. 油圧装置
3. エクスパンションホルン	7. 重錘
4. 加工量測定用ダイヤルゲージ	8. 給水パイプ

* 昭和36年4月9日精機学会春期大会にて講演。

** 大阪大学工学部 正会員

振電流を 3 A, 振動数を 21.5 kc とし, 加工中はいずれも一定に保った。

工具の全振巾は無負荷時で約 25μ を有し, 工具としては直径 2.2 mm (断面積約 4 mm^2) の軟鋼丸材を用い, 試料としては直径 25 mm の硬質ガラスを厚さ 5 mm~65 mm を 10 mm ステップおよび 70 mm の 8 種類についておこなった。

砥粒としてはボロンカーバイド 600 番を用い, 砥粒と水との混合比を容積比で 1 : 2 として常に一定量を加工面に供給 (無循環) せしめた。また, 送り力は簡単な油圧方式によつて与え, 加工量の測定は加工台の変位をダイヤルゲージを用いておこなった。このような測定方法では工具の摩耗量も加算されていることになるが, 加工比がほぼ 100 程度であることから, 工具の摩耗量は無視して差支えない。しかし, 多くの試料を加工していくと工具は次第に短くなるのでときどき取り換えた。

工具振巾および加工台の振動状況の測定方法としては図 2 に示すような電気容量変化方式によつておこない,

図 2 工具振巾測定回路

その出力変化をカソードフォロア回路で増巾する方法を採用した。この場合, まず無負荷時における工具先端の振巾を顕微鏡で測定し, 一方図 2 による方法でホーン先端の振巾をシンクロスコープによつて測定する。この両者の振巾の大きさは等しいと置けるから, 加工中の工具振巾はシンクロスコープで測定したそれぞれの振巾と無負荷時の振巾との比によつて求められる。なお, 加工台の振動状況の測定には対向電極としては加工台を用いた。

次に衝撃力の測定方法としては, チタン酸バリウムによるピエゾエレメントを利用する方式を採用した。使用したチタン酸バリウムの寸法は $20\text{ mm}\phi \times 2.5\text{ mm}$ で, 図 3 にその概略を示す。この場合, ボルトで試料, チタン酸バリウムを加工台に十分強く締め付け, そのときのシンクロスコープ上の零線を記録しておき, この零線と衝撃波形のピークまでの出力電圧をもつて衝撃力とした。

図 3 衝撃力測定方法

3. 実験結果とその考察

3.1 加工時間の決定

本研究は試料の厚さが加工量におよぼす影響を求めるのが目的であることから, 加工深さが増すことによる加工量の減少——超音波加工においては加工深さが増してくると工具の側面と試料側面の摩擦の増大や, 砥粒の供給・排除の困難性による加工量の減少が生じる——の影響を最少限度に止めなければならないこと, および試料の厚さが 10 mm ステップのものを用いていることから加工深さを余り大きくしえないことなどの点を考慮して加工時間と加工深さの関係を種々求めた結果, 加工の初期の段階においては砥粒の加工面への供給が安定しないためか, その加工量の変動が比較的大きく, 加工開始後数秒経過すると加工の進行もスムーズになり, 加工量も大きくなる。そして, その後徐々に加工の進行は遅くなり明らかに加工深さの増大による加工量の減少がみられた。この現象については西村⁹⁾も指摘されている。

これらのことから, 加工時間としては直線性があり, しかも比較的安定な加工量を示す範囲, すなわち加工開始後 5 秒より 30 秒間を採用した。

3.2 試料厚さと加工量の関係

図 4 試料厚さと加工量の関係

送り力をパラメータにして試料厚さと加工量の関係求めたのが図4で、それぞれの送り力に対してほぼ同じ傾向を示し、試料厚さの増加と共に加工量は減少し、試料厚さ t が 65 mm 付近で加工量は最小となつてゐる。しかも、送り力が大きい程その傾向は顕著に現れてゐることがわかる。

このように、加工量が最小になる場合の試料厚さ $t = 65$ mm という値は丁度硬質ガラス中の音波の波長の $1/4$ に等しい。

すなわち、硬質ガラス中の音速を計算すれば次のようになる。

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \div 5600 \text{ m/sec}$$

但し、 C : 音速

E : 弾性係数 (8×10^{11} dyne/cm²)

ρ : 密度 (2.6)

従つて、硬質ガラス中の音波の波長 λ は

$$\lambda = \frac{C}{f} \div 260 \text{ mm}$$

$$\therefore \frac{\lambda}{4} \div 65 \text{ mm}$$

但し、 f : 音波の周波数 (21.5 kc)

となる。

以上のように、試料厚さがその試料中の音波の波長の $1/4$ になると加工量は最小になることが実験的に得られたが、その原因を探究するには超音波加工の諸特性のうち、特に工具振巾・衝撃力がどのように変化しているかを調べる必要がある。

なお、図4でわかるように、試料厚さが一定の場合には送り力が約 75 gr/mm² で最大の加工量を示しており試料厚さが変わつてもこの最大加工量をうる送り力は変わらない。

3.3 工具振巾および衝撃力

工具振巾の測定は図2に示したように、工具先端から 10 mm のところでおこなつてゐるので厳密には工具先端の振巾ではないが、加工中の工具先端の振巾測定は不可能なために、前述の如く工具先端の振巾と本測定位置における振巾は比例するとおけるから差し支えない。

図5に工具振巾の変化を示す。この場合には、試料厚さが波長の $1/4$ である 65 mm よりもやや低い 45~55 mm 付近で工具振巾が最小となつており、加工量および後述の衝撃力の場合とは若干の差を生じてゐる。

ここで、緒論で記した如く、試料厚さがその試料中の音波の波長の $1/4$ になると工具と試料が共振状態になるならば、試料厚さが 65 mm 付近で工具振巾は最大にならねばならない。ところが、実験の結果では 65 mm よりもやや低い値で工具振巾は最小になり、65 mm 付近

図5 試料厚さと工具振巾の関係

になると幾分工具振巾は増加しているが、共振という立場から考えると若干疑問があつて、この点については検討の余地がある。

なお、図6に工具振巾の波形の測定例を示す。

次に、衝撃力を測定した結果が図7である。ここで、試料厚さが0というのはチタン酸バリウムを直接衝撃した場合の値である。

図からわかるように、工具振巾・加工量の場合よりもバラツキが大きい、試料厚さが波長の $1/4$ である 65 mm 付近で衝撃力はいずれも最小となつており、しかも送り力が大きい程顕著で、加工量の場合と似てゐる。従つて、加工量が波長の $1/4$ の試料厚さにおいて最小になるのは衝撃力が最小になるということが大きく影響しているものと考えられる。

図6 工具振巾の振動波形 (試料厚さ 25 mm)

図7 試料厚さと衝撃力の関係
(実験条件は図4と同じ)

図8 衝撃力波形

図9 加工台振動波形

図8に衝撃波形の例を示す。

なお、加工台の振動状況を工具振巾の測定と同じ方法で測定したが、その振動波形は図9の如くで、振巾は小さく不規則であつて、試料厚さの如何にかかわらずほとんど変化は認められなかつた。従つて、加工台は試料厚さが波長の $1/4$ になつても共振していないことがうかがわれる。しかし、若し試料の加工面の振動状況が観測できれば工具と試料間との振動状況が判明し、前述の試料厚さが45~55 mmで工具振巾が最小になつたことに對する説明、ひいては試料厚さが波長の $1/4$ になると加工量が最小になるという結果を衝撃力のみからではなく、工具振巾からも十分に説明しうるものと考えられる。

以上の実験結果を試料厚さをパラメータにして、送り力に対する工具振巾・加工量・衝撃力の値をとつて整理

してみると西村,⁹⁾谷口¹⁰⁾らの結果とよく一致する。

3.4 超音波の反射と透過の理論による考察

以上の如く、試料厚さが波長の $1/4$ になると加工量が最小になることが実験的に確かめられたが、これを理論的に考察してみる。

現在までのところ、超音波加工の諸特性、特に加工の機構については E. A. Neppiras,⁶⁾ M. C. Shaw,⁷⁾ 谷口,⁸⁾ 大平⁹⁾などによつて力学的に解析されているが、筆者らは立場を変えて超音波エネルギーの異質媒質への法線入射の反射および透過の理論を用いて検討する。

すなわち、超音波加工の加工機構としては現在主としてハンマリング作用によるもので、工具が砥粒を介して加工物と接触する時間のみ加工していると考えられている。従つて、この接触による超音波エネルギーが十分加工面で消費されているかどうかが問題となつてくる。

図10 異媒質への平面入射

このような観点から、工具—砥粒—水—試料—加工台という一連の関係を今図10に示す如く考え、簡単のために砥粒・水の層は無いものとする。

すなわち、媒質(1)〔工具および加工台〕の中に異なる物質でできた媒質(2)〔試料〕があると、この媒質(2)に平面波が法線入射する場合の超音波エネルギーの反射率は媒質(2)の厚さ t の影響があらわれることは音響学ではよく知られている。

従つて、定常状態の粒子の速度反射率 r は次式で示される。¹¹⁾

$$r = \frac{V_r}{V_1} = \frac{\frac{r_2}{r_1} - \frac{r_1}{r_2}}{\sqrt{4 \cot^2 \alpha + \left(\frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2}\right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 V_1 : 入射波の粒子振動速度

V_r : 反射波の粒子振動速度

$$\begin{aligned} r_1 &= c_1 \rho_1 \\ r_2 &= c_2 \rho_2 \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} r_1, r_2 \text{ は夫々の媒質中の音響抵抗密度} \\ c_1, c_2 \text{ は夫々の媒質中の音速} \\ \rho_1, \rho_2 \text{ は夫々の媒質の密度} \end{array} \right)$$

$$\alpha = 2\pi \frac{t}{\lambda} \quad \lambda: \text{異質媒質中での音波の波長}$$

入射勢力 P_1 に対する反射勢力 P_r の比は r^2 で与えられるから、法線入射の勢力反射率 R_0 は

$$R_0 = \frac{P_r}{P_1} = r^2 = \frac{\left(\frac{r_2}{r_1} - \frac{r_1}{r_2}\right)^2}{4 \cot^2 \alpha + \left(\frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (2)$$

となる。異質媒質を通して先に進む音波の勢力 P_2 は $P_1 - P_r$ であるから勢力透過率 T_0 は

$$T_0 = 1 - R_0 = \frac{1}{\cos^2 \alpha + \frac{1}{4} \left(\frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \sin^2 \alpha} \quad (3)$$

で示される。

この T_0 の値を r_1/r_2 について示したのが図11の実線で、試料厚さが波長の $1/4$ ($\alpha = 0.5\pi$ の時である。何故ならば、 $\alpha = 2\pi t/\lambda$ で $t = \lambda/4$ であるから) の場合に T_0 が最小 (R_0 が最大) となり、超音波エネルギーが十分加工面で消費されないことがわかる。

図 11 異媒質へ垂直入射するときの反射と透過
試料：硬質ガラス，工具：軟鋼
 $r_1/r_2=3$ ，○加工量，●衝撃力

以上の理論式を用いて、実験結果の加工量および衝撃力の値をプロットしたのが図中の○印および●印である。なお、試料として硬質ガラス、工具および加工台として軟鋼を用いている（但し、衝撃力測定の場合には試料とチタン酸バリウムの間に厚さ約1mmの軟鋼板を挿入）ため、 $\rho_1=7.8$ ， $c_1 \div 5000$ m/sec； $\rho_2=2.6$ ， $c_2 \div 5600$ m/sec であるから r_1/r_2 は約3となる。

従つて、図中の各点は加工量の場合については試料厚さ5mmの時の加工量が $r_1/r_2=3$ という理論値に乗るとして、他の試料厚さの時の加工量をそれに対する比で示し、衝撃力の場合についてはチタン酸バリウムを直接衝撃した時の値を試料厚さ0とし、その時の衝撃力の値が $T_0=1$ であるとおいて、他の試料厚さの時の衝撃力の値をそれに対する比で示したものである。

このようにして整理すると衝撃力の変化は理論値 $r_1/r_2=3$ の線に比較的よく一致し、しかも送り力が大きい程その傾向は顕著である。このことは上述の理論がそれぞれの境界面で音圧と速度が連続であるという仮定で成立しているものであつて、この仮定を満足するような状態

になるためと思われる。何故ならば、送り力が大きくなれば工具と試料の接触時間が長くなり（このことは谷口⁴⁾も述べており、筆者らの衝撃力の波形の変化状況からも推定できた）、従つて工具と試料の境界面での音圧と速度が連続状態になつていものと考えられる。

一方、加工量については $r_1/r_2=3$ よりむしろ $r_1/r_2=2$ に近似しているようで、衝撃力・工具振巾その他多くの因子に左右されるために、超音波エネルギーの反射および透過の理論に一致しないが、ある程度の傾向は認められる。

以上は試料の厚さの変化のみについて実験考察したが試料の厚さがその断面に比して非常に大きくなる、すなわち、細長い試料になると試料中の音波の進行方向が縦方向のみでなく横方向の成分が生じ、試料中の運動エネルギーが増して音波の周期が遅くなると考えられるので、前述の結果とは若干変わつてくるものと思われる。

4. 総 括

以上、超音波加工における試料の厚さが加工量および衝撃力についての実験および考察を要約すると次のようである。

(1) 試料の厚さが増大すると加工量は次第に減少しその厚さが試料中の音波の波長の $1/4$ になると加工量は最小になる。

(2) 加工量が(1)のように最小になるのは工具振巾よりも衝撃力の減少が大きく関係し、衝撃力は試料厚さが $\lambda/4$ 付近で最小になつている。また加工量・衝撃力ともに送り力が大きい程その減少量は大きい。

(3) 衝撃力の変化は超音波エネルギーの異質媒質への法線入射の反射および透過の理論値によく一致し、加工面でのエネルギーの消費が加工量を左右する。

終わりに、本研究を実施するに当たつて種々有益な御助言をいただいた本学津和秀夫助教授をはじめ研究室の諸兄ならびに実験に協力された工学士高田十三二氏に厚く御礼申し上げる次第である。(1961, 11月13日受付)

文 献

- 1) E. A. Neppiras : Reports on Ultrasonic Machining, Metal Working production, Aug. 31, 1956, p.1377 ; Sep. 7, 1956, p. 1420.
- 2) D. Goetze : Effect of Vibration Amplitude, Frequency and Composition of the Abrasive Slurry on the Rate of Ultrasonic Machining in Ketos Tool Steel, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.28 No.6 (1956) p.1033.

- 3) G. Nishimura, K. Yanagishima & T. Shima : Ultrasonic Mechanical Machining (Part VII), Journal of the Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Vol.26, No.1 (1959) p.53, etc.
 - 4) 谷口 : 超音波加工機の特性 (第2報) — ピエゾエレメントによる加工力の測定 —, 精密機械, 26巻2号 (1960) p.94.
 - 5) 森 : 超音波加工における機械的負荷の研究, 日本音響学会誌, 11巻4号 (1955) p.238.
 - 6) E. A. Neppiras : Report on Ultrasonic Machining, Metal Working Production, Aug.24 (1956) p.1333.
 - 7) M.C. Shaw : Ultrasonic Grinding, Microtecnic, Vol.10 No.6 (1956) p.257.
 - 8) N. Taniguchi : Analysis of Machining Force of Ultrasonic Machining, Reports of the Faculty of Engineering, Yamanashi Univ., No.9 (1958) p.131.
 - 9) 大平 : 超音波加工の力学的研究, 精密機械, 27巻3号 (1961) p.168.
 - 10) 大平, 影山, 阿久津 : 超音波加工機構に関する一考察, 精密機械, 27巻9号 (1961) p.625.
 - 11) 菊地 : 磁歪振動と超音波, コロナ社, 昭34, p.328.
-