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——

谷 口 紀 男**

Some Characteristics of Ultrasonic Carving Machine (2nd Report)
——Measurement of Machining Force by Using of Piezoelements——

Norio TANIGUCHI

The results of a direct measurement of machining force in ultrasonic machining are described. The behaviour of machining force is observed by using piezoelements which are cemented or tightened between work piece and work holder.

The results obtained are as follows :

1) The impact phenomena between tool system and work piece system in ultrasonic machining can be explained as vibration problems. And the result of this theoretical analysis matches pretty well to the obtained experimental data, referring to magnitude of impact force and its phase lag between driving current.

2) The maximum value of machining rate in ultrasonic machining occurs when the feeding force is a little less than that for maximum impact force. And using a little higher driving frequency than the tuning frequency for end free condition, the most effective machining rate can be obtained.

3) From above mentioned results the author insists that the ultrasonic machining depends greatly on the impact phenomena between tool and work piece.

1. 緒 言

本研究は超音波加工における加工機構を解明する一助として行つたものである。即ち工具と試料との間に働く加工力をピエゾエレメントを利用して直接的に測定し、加工力は工具系と試料系との力学的衝突にもとづくものであるという仮定のもとに解いた既報の結果と合せ考察したものである。

2. 装 置

実験に使用した加工機は、16kc, 150W の発振器をもつもので、その構造は既に度々示したものであるのこゝでは省略する。

工具としてはアルフェルの 40×10mm² の振動子に大端 50φ, 小端 3φ の複合エキスポネンシャルホーンを用いたもの ($Q \approx 150$) を使用した。

工具はすべて 1×5mm² の軟鋼材を用い、試料は厚さ 4~5mm の光学硝子 (BK 7) を使用した。加工力をピッ

クアップするために 5φ×2t のチタバリ 2 枚を張り合せ十分に強く試料に締付け送り台に固定した。チタバリを直接衝撃する場合は送り台に直接接着した。なお二現象オシロスコープを用いて加工力と同時に高周波励振電流 (磁歪振動子を励振する電流) を測定記録し両者の位相関係も観察しうる如くした。

図 1 チタバリ直接衝撃の場合の衝撃力と励振電流 $I = 0.62A$

3. チタバリを直接衝撃した場合の衝撃力の特性

加工力 (衝撃力) の オシロスコープ上の図形の一例

* 精機学会 昭33年秋期大会, 昭34年春期大会にて発表

**山梨大学工学部 正会員

は図1に示す如くである。説明のために模型的に示せば図2の如くに表わされる。(a)は送り力が適当で実際に衝撃が行われている時の形であり、(b)は送り力が過大

で工具尖端と試料が接触したままで振動している時の形である。ビエゾエレメントよりの電圧の増幅は入力グリッド抵抗の充分大きい(2MΩ)直流増幅器を用いたが圧電気のリーク現象のため勿論その静的な力は測定出来なく、力の変動のみを測定したのである。ビエゾエレメントの力の検定は別に54Aを用いた増幅器に

よつて行つた。ビエゾエレメントとしてのチタバリは圧電係数が大であるが、誘電率が大きいので電圧としての利得は少ないが、同じ力に対して発電量が多いので、リークの影響が少なく、この様な場合は使いやすい。いうまでもなく温度条件には充分注意すべきである。加工力の大きさの測定法としては、まず衝撃せぬ前のオッシロのO線を撮影し(図上のN-N線で示す)ついて衝撃力をそれに重ねて撮影する。実際に衝撃が行われている時は(a)の中に示される如く山形の裾の方で小さい波形の表われているところが工具と試料が離れているところである。これはビエゾエレメント等が自由振動している状態であることは直ちに推測出来るのでこの点が力のO線となるわけである。これはチタバリに働く加工力の平均力としての静圧力による発生電圧はリークにより消滅しているのでオッシロ図形としては加工力をN-N線を力の変化の平均値としてその上下に表わすのである。これより直ちにN-N線とO-O線間が送り力Pに相当することがわかる。Pの値は別に送り装置の油圧より検定して確めることも出来る。然し(b)図の如く拘束されたまま(接触したままの)場合には所謂衝撃力はない筈であるが当然超音波振動がビエゾエレメントを通過しているので、その圧力波の波形が図の如く美しい正弦波に近い形として観測されるのである。他の条件さえ変らな

図2 衝撃力説明図

F_m : 最大衝撃力
 P : 送り力
 f : 工具尖端換算励振力
 F : 平均衝撃力

ければ(励振電流ホーン条件一定ならば)この波形の高さが工具尖端に換算したホーンの励振力 f に相当するのである。この場合力のO線は勿論オッシロ上には見られない。従つてその場合工具と試料との間の圧力の絶対値の最大値は別に求めた送り力 P とこの換算励振力 f との和に相当するものと考えられる。

図3 チタバリ直接衝撃時における最大衝撃力と送り力
 $0.62A \quad \omega_0 = 16.0kc \sim 16.1kc$

従つて拘束状態では $F_m = P + f$ で示してある。従つてこの場合送り力は送り装置より検定するより他ないのである。以上のことより衝撃力(加工力)の最大値 F_m は直ちに求められその衝撃時間も決定出来る。又どの位の送り力の時に拘束状態が起り衝撃が生じなくなるか等も非常にはつきり決定する事が出来るのである。この最大値 F_m と送り力との関係を励振周波数との関連において求めるため、励振周波数を電流を一定値0.62Aに常に保ちつつ16kcより16.8kcまで変化させ求めた結果を図3に示す。これによれば周知の如く最大衝撃力は送り力によつて変化し、その最大の最大衝撃力の位置が周波数によつて順次変化し、周波数を16kcより順次高めるとその最大衝撃力の最大値が漸次大となるが16.6kcを境として逆に下つてくる。又16.0kcより16.1kc, 16.2kcの辺は最大値が比較的送り力に対して幅広く存在するが周波数が高くなると送り力が最大値のところに達する。それより少し大にすると急激に下つて来る。そして直ちに工具尖端は拘束状態になる。即ち接触したままとなることがオッシロ図上でわかる。猶この場合工具尖端自由の場合の工具系の共振周波数は16.0~16.1kcであつた。

又前述の意味での励振力 f は図より求めてみて略々 3kg であった。又最適条件での最大衝撃力は 14kg 程度までになることもわかった。

送り力によつて平均衝撃力の最大値が変化することは既に第 1 報で述べたところであるが、直接測定による最大衝撃力も同様に变化することがわかるのである。又この実験によつて励振周波数によつて、その最大衝撃力の最大値が大きく変化することが示されているのである。

これらの現象は既に一部発表した工具系と試料系の衝突現象という理論的な取扱い方で比較的に容易に説明されるのである。即ち工具系を強制振動力をうけるばね質点(粘性抵抗を含む)系と考え、試料系を質点のないばね系(粘性抵抗を含む)と考えてその非線形衝突振動を接続解を作つて解析するものである。この結果を平均衝撃力について計算したものは既に発表したものであるが説明のために示せば図 4 に示す如くなり、最大衝撃力はこの衝突の方程式が衝突中線型であると考えて解いて、その基本波のみをもつてすれば当然この平均衝撃力に比例すると考えても大差ないので略々この図と同様なことが言いえられる筈である。これを見れば上の実験結果が極めて良くこの結果を説明することが出来ることになる。猶前記は工具系と試料系の衝突現象を質点系としてでなく連続物体としてホーンを取扱つて衝撃力をフーリエ級数に展開する方法によりその運動解析を行っている。この結果も図 4 と同じ傾向となり勿論良く本実験

図 4 励振周波数と固有振動数
平均加工力, 送り力, 励振周波数

F = 平均衝撃力, P = 送り力, f = 励振力, ω_0 = 自由共振振動数, ω = 励振円振動数, $K/k=1.0$, $Q=\frac{m\omega_0}{\gamma}$
 $=100$, $\frac{C\omega_0}{K}=0.5$, $\Omega=\omega/\omega_0$

結果と適合することはいうまでもない。

又この事実は送り力がますます工具尖端の拘束(接触)の割合が増して来て従つて工具系のばね常数が一時高くなつてくるので、その場合の共振周波数に応じた励振周波数のもとで共振状態となり衝撃力が最大となるものと考えればよい。勿論励振力は一定として考えてである。しかもそれに既報の一定周波数における送り力の変化による最大値条件が重なつてくるものと考えれば定性的には説明出来るのである。

図 5 (a) 位相差説明図

図 5 (b) 位相差説明図

なお前述のオシロ写真に示される如く励振電流と衝撃力との間の位相差も測定できるのである。この場合励振力は一応励振電流と同一位相で且つ比例する量と仮定し、それがホーンの上端に働くものとする。これらの関係を図 5 に示す。即ち励振電流の図上に示す+の方向が静的にはホーン大端を圧縮する方向の励振力が働く方向と定めて置けば(磁歪振動子についていえば静的の場合伸びる方向を電流の+の方向に定めて置けば)それと衝撃力のピーク値との間の位相差を求めて置いて論

ずることになる。

この考えのもとに実験値を整理すれば図6に示す如くなる。即ち送り力の小さい時励振周波数が16kc~16.1kcの辺では殆んど $\frac{3}{2}\pi$ のおくれ、(工具系の自由共振周波数に近い時)、又励振周波数がより高くなると 2π に近づいている。次に送り力が大となるとすべてのものの位相おくれは減少し、拘束状態になるとついに π のおくれになる。

励振周波数が高いほど同じ送り力に対する位相おくれは多い。そして図5の衝撃力の大ききとの関連において観察すれば最大衝撃力の最大値は略々 $\frac{3}{2}\pi$ の位相おくれに近いところに生じている。

図6 チタバリ直接衝撃時の位相遅れと送り力
 $I=0.62A$ $\omega_0=16.0\sim 16.1kc$

図7 送り力一位相遅れ角 (前沢)
 $S_1/S_2=40$ $K/k=1.0$ $C\omega_0/k=0.5$ $R=50$

この結果の説明は同様に前述の力学的取扱より比較的容易に行われうる。即ちこの厳密解の一例を示せば図7の如くになり、実験結果を定性的に十分に説明出来る。又このことは一般の簡単な振動問題と考えて取扱つても容易に考えられるのである。即ちホーン系が励振力

と共振状態にあれば励振電流の附号を前の如くに定めたのであるから図5(b)に示す如く今励振力が大端を圧縮する如く働く場合とすれば、大端の変位はそれより $\pi/2$ だけおくれるのである。即ち伸びる方向にある。(この関係は一般の質点系の強制振動の場合と全く同じでありそれとの連想で了解されうる)。

従つて共振状態であるから小端の方も同様に伸びる状態にあるが、固定座標系からみれば、Zの一の方向に尖端が動き大端より π だけおくれた形で試料と衝突する。

従つて工具系(ホーン系)の励振力からみれば $\frac{3}{2}\pi$ だけおくれた形となる。励振周波数の方が共振周波数より充分小で(即ち送り力が大となつてホーン系の方の拘束が大となり、ホーン系の共振周波数が大となると)共振状態より全くはずれた状態では励振力と大端の変位とは同位相となるので大端と小端との位相差即ち π のみおくれた型となつているものと思われる。又励振周波数の方がホーン系の共振周波数より充分高い時は励振力に対し大端の変位は π だけおくれるので、大端と小端とは更に π だけおくれるので、 2π だけの位相差が出来る。以上の取扱いによりこれらは割合たやすく理解出来る。又位相差が $\frac{3}{2}\pi$ の近くで衝撃力が最大となることもその辺で系が共振状態にあることから推測に難くないのである。

図8 非加工時のガラスにおける最大衝撃力
 $I=1.2A$ $\omega_0=16.2kc$ BK7 (Glass)

4. 非加工時のガラスに対する衝撃力の特性

チタバリ直接衝撃の場合と異りガラス試料と試料保持具との間にチタバリを接着して衝撃力を測定した。試料

は厚さ約 4.7mm の光学硝子を用いた。従つて力の絶対値についてはある程度の誤差が生じているものと思われる。実験上の他の条件は前者と全く同じ方法で行い、同様な考え方で実験値を整理した。その結果の一例を図 8, 図 9 に示す。

図 9 非加工時のガラスにおける位相遅れ
I=1.2A $\omega_0=16.2$ kc BK7 (Glass)

図 10 加工時の最大衝撃力
I=1.2A $\omega_0=16.4$ kc BK7 4.7mm 厚
工具断面 10.6mm²

この場合衝撃力の大きさ及び送り力、励振周波数との相関関係は殆んど前項に平行に論じられる。又位相差については共振附近が伸々安定してとれなかつたが傾向としては変らない。

5. ガラス加工時の衝撃力(加工力)の特性

実際にガラスを加工している場合の衝撃力の測定は試料交換のたびに締付条件が多少とも変化するのでやや安

定性を欠いた。そのため一部不規則のところがあるが、その実験の一例を図 10, 図 11, 図 12 に示す。

図 11 ガラス加工時の加工速度
I=1.2A $\omega_0=16.4$ kc BK7 4.7mm 厚
工具断面 10.6mm²

図 12 加工時の位相遅れ
I=1.2A $\omega_0=16.4$ kc BK7 4.7mm 厚
工具断面 10.6mm²

この場合も大体の傾向としては前項に述べたと全く同様な関係が成立する。唯送り力の変化に対する衝撃力や位相差の変化がやや緩慢で、その最大値や変化点が皆送り力の高い方に移動している。

唯特に注意を要することは衝撃力の最大値が加工速度の最大値と一致せず、加工速度の最大値は同じ励振周波数の場合には加工力の最大値のところより常にやや小さい送り力のところで生ずることである。又周波数を変更した場合でも衝撃力絶対値の一番高いところで加工速度が最大でなく少しそれより低い値を発生する送り力のところで加工速度が大となつていことである。このことは第 1 報で略々最大衝撃力のところで最大加工速度がえ

られるということを述べた事と矛盾するが、しかし良く観察すれば、この実験の場合でも自由共振周波数と略々一致する励振周波数の場合は略々両者が一致している。そしてそれより高い励振周波数になるとその差が甚しくなっているのである。著者の前報は共振ホーンで共振の励振周波数で行ったものでその点で誤りではなかったと思われる。

なおこの加工速度の最大値が加工力（衝撃力）の最大値より送り力がやや少ないところで起ることについてはこの超音波加工の機構を一部暗示しているものの如くである。

即ち本加工はキャビテーションが加工液中で激しくおこっている状態で甚だ能率がよいのであるが、キャビテーションは当然工具の尖端の振幅が大きい程大である筈である。然しキャビテーション現象のみでは加工が行われないことも多く実証済である。この意味からいつてキャビテーションは加工砥粒の供給、加工屑の排出等に大きい役割を演ずるものであろうとの提議が多くなされたのである。実際試料を破碎するには加工力の大的方が能率がよい筈である。これはこれら材料の破碎の機構から考えて議論の余地はないと思う。勿論ある限度があるがその加工力が最大の場合には工具振幅は既発表の著書の解析²⁾や前沢の解析³⁾に示される如く工具振幅は最大でなく、加工力最大の点よりやや送り力の小さいところに工具振幅の最大点がある。このことは容易に推測する事が出来る。従つてキャビテーションはそのところの方が大である筈である。従つて加工速度の最大はこの両者のかね合いで最適位置が定まるものと考えられる。

又このことより自由共振周波数よりやや高い励振周波数を用い、自由共振周波数に対するそれよりやや高い送り力のところで加工速度の最大値が得られ、それが最適送り力となることがわかる。

6. 結 語

以上の結果次の如き事が述べられる。

- 1) 超音波加工に於ける工具系と試料系との間の衝突現象は両系を機械的振動系として取扱つて比較的適確に解析され、その衝撃力の大きさ、又励振力との間の位相差等に至るまで、実験とかなり良く合致する。
- 2) 超音波加工に於ける工具と試料との間の衝撃力を測定した結果、加工速度の最大値は最大の衝撃力を与える送り力よりやや少ないところがよい。又自由共振周波数よりやや高い励振周波数を用いて、前者の場合の最適送り力よりやや大きい送り力のところで最大加工速度が得られる。
- 3) 以上の事実は超音波加工の機構が工具系と試料系の力学的な衝突現象を主体として行われていることの傍証となる。

本研究は文部省総合研究費及び試験研究によつて行つたもので、東京大学 大越 諄先生、西村源六郎先生、理化学研究所 海老原敬吉先生、東工大実吉純一先生の御援助を得ました事を記し、感謝の意を表します。猶本学 杉長介教授、織岡貞次郎教授、又実験に携つた金沢正義君に感謝致します。

(1959, 9月4日受付)

文 献

- 1) 谷口：精機学会誌, XXII.6.
- 2) 谷口：山梨大学工学部研究報告, No.9, 1958.
- 3) 谷口：硬脆材料の衝撃破碎加工法, 誠文堂新光社, 1959.
- 4) 前沢：機械学会講演前刷, No.5, 1959—4.
- 5) 谷口, 前沢：精機学会, 機械学会, 山梨講演会, 1959—11.