研究

超音波機械加工論*

西村 源六郎** 久岡 基良***

Ultrasonic Mechanical Machining

Genrokuro NISHIMURA, Motoyoshi HISAOKA

Concerning the machining mechanism of ultrasonic mechanical machining, the theory of stationary vibration of an elastic bar is studied for the case when the bar is collided with a rigid body supported by the action of static pressure to obtain the displacement U of the tip of the bar facing the rigid body. The theory, moreover, gives the impulsive force $F_{t=t_1}$ induced at the instant when the bar collides with the rigid body. Investigating the characteristics of U and $F_{t=t_1}$, it is ascertained that the theoretical dispositions of these quantities are reasonable and well-founded by the experimental results obtained when the stationary ultrasonic vibration of collision between the tool of mild steel and the work of glass plate is performed by using an apparatus of ultrasonic mechanical machining of frequency of 21.5 kc/s.

Further, under the acceptable conception that the action of the displacement U is the root of the pumping action of the ultrasonic mechanical machining and that of the impulsive force $F_{t=t_1}$ causes the hammering action of it, the theoretical characteristic of the product of U and $F_{t=t_1}$ is studied to obtain the theoretical matters favourable for certain to explain the experimental fact concerning the characteristics of the machining rate of the ultrasonic mechanical machining which has a special response to the variation of the static pressure.

1. まえがき

ここに展開する超音波機械加工論はさきに神保博士と西村が求めた弾性棒の定常衝突弾性振動の理論¹⁾と柳島博士、志真博士と西村が実験的に求めた超音波機械加工の特性²⁾とにその基礎をおいている。すなわち実験的に得られる工具先端変位量と衝撃力の静圧力に対する応答特性と理論的に得られるこれらの静圧力応答特性との相関を論述し、加工速さの静圧力応答特性を支配する因子を確立して超音波機械加工の加工機構を究明することを目的としている。なお、液体中における超音波空洞現象の存在は振動加工³⁾の場合と同様に超音波機械加工の性能向上には役立たないものであることを申し添えておく。

2. 定常衝突弾性振動の静圧力応答特性

工具、ホーン、コーン全体を長さ l なる弾性棒と考へ、この弾性棒の振動変位 u について、 $t < t_1$ なる時間では工具の先端 ($x=0$) は弾性運動法則にしたがって $u_{x=0} = -a \cdot \sin(2\pi ft)$ なる振幅 a 、超音波振動数 f で振動をするが、 $t=t_1$ なる時に剛体と考えられる砥粒に衝突

し、 $t=t_2$ で衝突が完了し、これが定常衝突弾性振動として経続するためには、工具と被加工物との間に作用させる静圧力を P とすると、 $t=t_1$ から $t=t_2$ の間では縦弾性係数 E なる工具先端は $u_{(x=0, t=t_1-t_2)} = -2 \frac{Pl}{E} \cdot f t_1 - a \cdot \sin(2\pi f t_1)$ 、衝突終了後すなわち $t > t_2$ では $u_{(x=0, t > t_2)} = -\frac{Pl}{E} f \cdot (t_1 - t_2 + t) - a \cdot \{\sin(2\pi f t) + \sin(2\pi f t_1) - \sin(2\pi f t_2)\}$ なる変位振動することを必要とする。この衝突開始時間 t_1 、衝突終了時間 t_2 はそれぞれ

$$2 \frac{Pl}{aE} \cdot f t_1 + \sin(2\pi f t_1) = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\pi} \frac{Pl}{aE}\right)^2} - \frac{3}{2} \frac{Pl}{aE} + \frac{1}{\pi} \frac{Pl}{aE} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1}{\pi} \frac{Pl}{aE}\right), \quad (1)$$

$$f t_2 = \frac{1}{4} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1}{\pi} \frac{Pl}{aE}\right) \quad (2)$$

から求めることができる。そこで図1には $\frac{Pl}{aE}$ を横軸として $f t_1, f t_2$ 、そして超音波振動周期 $T (=1/f)$ にたいする工具先端の被加工物に接触している時間の比、すなわち接触時間比 $\eta \{=f \cdot (t_2 - t_1)\}$ を示してあるが、静圧力が大きくなると接触時間は大きくなり、接触時間比も大きくなる。たとえば P が $0.4 \times \frac{a}{l} E$ のとき η は超音波振動周期の2割程度、 P が $1 \times \frac{a}{l} E$ のとき 3.4 割程度になるので、超音波機械加工ではこの接触している時間を、音波領域の衝突振動加工⁴⁾のように省略して加工理論を展開することは許されない。

*原稿受付 昭和44年3月10日。名古屋学術講演会(昭和42年6月)および昭和43年度関西学術講演会(昭和43年7月16日)にて発表。

**名誉会員 北都工業短期大学(新潟市上新米町5827番地)

***正会員 阿南工業高等専門学校

図 1 t_1 , t_2 , η の静圧力に対する応答特性

つぎに接触時間中の工具先端の振動変位はさきに示したが、この接触時間中の工具先端変位量を U とすると、 $U = (a - u(x=0, t=t_1 \sim t_2))$ であるが、(1) の関係を利用して

$$U = a \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{IP}{aE} \right)^2} + \frac{1}{\pi} \frac{IP}{aE} \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1}{\pi} \frac{IP}{aE} \right) - \frac{3}{2} \frac{IP}{aE} \right] \quad (3)$$

となる。静圧力が存在しないときは U は復振幅 $2a$ に等しいが、 P が大きくなるにしたがって図 2.1 に示すように直線的に減少して P がほぼ $1.35 \times \frac{a}{l} E$ になると零になることがわかる。

さて、衝突時に定常衝突弾性振動をする工具先端に誘起される衝撃力を $F_{(t=t_1)}$ とすると、 $F_{(t=t_1)}$ は工具先端の衝撃速度の大きさに比例し、次のようになることがわかる。

$$F_{(t=t_1)} = P + \pi \frac{a}{l} E \cdot \cos(2\pi f t_1) \quad (4)$$

衝突開始時間 t_1 は前述のように P の大きさで変化するので、 $F_{(t=t_1)}$ は図 2.2 でみえるように P の大きさで変化し、 $P = 0.96 \times \frac{a}{l} E$ のとき最大値 $3.95 \times \frac{a}{l} E$ になる。

3. 超音波機械加工における工具先端変位量、衝撃力および加工速さの静圧力応答特性

実験でもとめた静圧力 P に対する工具先端変位量 A と衝撃力 F の関係 (超音波振動数 = 21.5 kc/s, 工具 = 4 mmφ 軟鋼棒, 被衝撃体 = ソーダガラス板) を、超音波入力強さに比例すると考えられる陽極電流値がそれぞれ 250 mA, 180 mA, 100 mA, 50 mA の場合について

図 2.1 工具先端変位量 U の静圧力応答特性 図 2.2 衝撃力 $F_{t=t_1}$ の静圧力応答特性 図 3 静圧力 P に対する工具先端変位量 A と衝撃力 F との関係

図 3^{b)} に示す。 F は P と共に増大し、入力の大きさが相違しても A がほぼ半減する大きさの静圧力 P_M のと

表 1

陽極電流 値	無負荷時の工具先端の変位量 A	最大衝撃力 F_M を与える静圧力 P_M	最大衝撃力に 応ずる工具先端 の変位量 A_M	最大衝撃力 F_M	(F_M/P_M)	備 考
250 mA	40 μ	5.69 kg	20 μ	$35.0 \times \kappa$	6.10 κ	右個 4 の (F_M/P_M) の算術平均 値は 6.61 κ である。
180 mA	30 μ	4.65 kg	15 μ	$29.0 \times \kappa$	6.25 κ	
100 mA	20 μ	3.70 kg	10 μ	$26.5 \times \kappa$	7.16 κ	
50 mA	10 μ	3.20 kg	5 μ	$15.1 \times \kappa$	6.85 κ	

きそれぞれ最大値 F_M に達し、 P_M より大きい P では F は減少する。表 1 には各陽極電流値の場合の無負荷時の A と F_M を与える P_M 、そして F_M およびこれに応ずる A_M を表示してあるが、 F_M 値の κ は力の単位に換算するための係数である。なお、表 1 には F_M/P_M をそれぞれの入力の場合について示してあるが、測定誤差を考えると、 F_M/P_M 値は入力の大きさには関係なく一定とみることができる。そしてその平均値は 6.61 κ である。さきに求めた図 2.2 を用いて、無負荷時の工具先端変位量の半分を与える静圧力にたいする衝撃力の大きさの比は 5.62 となり、最大衝撃力を与える静圧力に対する最大衝撃力の比は 4.11 となって、これらの値はもちろん工具先端の無負荷時の超音波振動振幅 a の大きさには無関係である。 F_M/P_M は前述のように陽極電流値すなわち工具無負荷時の振幅の大きさには無関係であると考え

図 4 加工速さと工具先端変位量の静圧力応答特性

てもよく、したがって理論的に求めた特性と定性的には合致しているとしても不都合はない (κ の値がただいまのところ明らかでない) で定量的ことはわからない。

次に (工具=4 mm ϕ 軟鋼棒、被加工場=ガラス板、砥粒=400 # SiC、砥粒混合比=1.0、超音波振動数=21.75

kc/s) の加工条件で超音波機械加工を行ない、陽極電流値が 250 mA, 180 mA, 100 mA, 50 mA の場合について静圧力と加工速さ⁶⁾ の関係を図 4⁷⁾ の折実線で示す。なお各入力値に対する工具先端変位量も破線で図示してある。それぞれの入力値の場合、加工速さを最大にする最適静圧力が存在し、入力を大きくして無負荷時の工具先端変位量が大きいほどこれに比例して最適静圧力も大きくなる。静圧力が零から大きくなるにしたがって加工速さは零から急激に大きくなるが、静圧力が小さくて無負荷の場合とあまり違わないくらい大きい工具先端変位量のときに加工速さは最大値に達す。この最大値を与える静圧力すなわち最適静圧力よりも静圧力が大きくなると割合に緩やかに加工速さは減少するという静圧力応答特性を示す。しかも加工速さの小さくなる割合は工具先端変位量の静圧力の増大と共に減少する割合と似たものである。

さて、加工速さと工具先端変位量の静圧力応答特性を示す図 4 を、工具先端変位量は静圧力と直線関係になるという理論 (図 2) を考慮した観点から考察するに、無負荷時の工具先端変位量の半分すなわち [21.5 μ , 17 μ , 11 μ , 6 μ になる静圧力すなわち 5.1 kg, 3.7 kg, 2.4 kg, 1.0 kg のときそれぞれ最大衝撃力を与えるであろうことがさきの論述から考えられる。そこで砥粒の槌打ち作用の原動力である衝撃力 (衝突速度) の大きさのみによって加工速さが決定されるという考えに立脚すれば、それぞれ前出の 5.1 kg, 3.7 kg, 2.4 kg, 1.0 kg なる静圧力の場合に加工速さがそれぞれ最大値になってよいはずである。しかし、実験結果では、図 4 あるいは表

表 2

陽 極 電 流	無負荷時の工具 先端変位量 A	最大加工速さの出現			最大衝撃力の誘起	
		最大加工速さ (mm/min)	最大加工速さを 与える最適静圧 力 P_M	最大加速さを与 える工具先端変 位量 A_M	無負荷時の工具先 端変位量の半分か 与える静圧力 P	無負荷時の工具先 端変位量の半分を与 える静圧力のときの加 工速さ (mm/min)
250 mA	43 μ	170	1.7 kg	36 μ	5.1 kg	110
180 mA	34 μ	155	1.2 kg	30 μ	3.7 kg	75
100 mA	22 μ	90	0.8 kg	20 μ	2.4 kg	13
50 mA	12 μ	12	0.5 kg	10 μ	1.0 kg	6.5

2 でみるように, 最大加工速さは最大衝撃力を与えるであろう静圧力よりもはるかに小さい静圧力である1.7kg, 1.2kg, 0.8kg, 0.5kg の場合にそれぞれ最大加工速さが得られることがわかり, さきの理論で明らかのように, 無負荷に近い工具先端変位量を与える静圧力下では衝撃力(衝突速度)はそれらの最大値にくらべて割合に小さいものである。

かくして, 工具先端変位量が無負荷のときとあまり変わらない程度に大きく, しかも最大衝撃力(最大衝突速度)よりも割合に小さい衝撃力(衝突速度)のときに加工速さが最大になること, そして最大加工速さを与える最適静圧力の存在が確かめられた。そこで, 以上の特性をもつ最適静圧力の存在を考究することにする。ここで思い起こすことは衝突振動加工の加工速さの説明⁹⁾に工具のもつ運動エネルギーを用いたことである。超音波機械加工においては工具のもつ運動エネルギーとひずみエネルギーを計算してみると, これでは最適静圧力の存在を説明できないことを証明することができる。そこで図3と図4を見直してみる。圧静力が小さいと, 衝撃力は小さいが工具先端変位量は大きい。このことは加工液の超音波振動の振幅効果を大きくすることになって, 加工液の循環が活発になり, 新しい砥粒の補給, 切りくずおよび切れ味の悪くなった砥粒の排除を十分に行なうことになる。すなわち衝突振動加工⁹⁾で究明された加工液に対するポンピング作用を大きくすることになる。次に静圧力が大きいと, 工具先端変位量は小さくなるが, 衝撃力は大きくなる。このことは砥粒の被加工物に対する槌打ち作用を大きくすることになり, したがって砥粒による被加工物の破砕がさかんに行なわれることになる。この槌打ち作用による砥粒の破砕効果については島川博士と西村の実験がある¹⁰⁾。被加工物(ガラス板)上に砥粒を多数のせ, この上に軟鋼板をおき, ある一定の高さから重量の相異した鋼球を板上に自由落下さすことによって軟鋼板が槌の作用をし, 砥粒をガラス板に打込んでガラスを砥粒で破砕する。かくして得た平均衝撃力とガラスの加工体積の関係を示す図5($v_1 \tau$ はそれぞれ鋼球の衝突速度, 衝突継続時間)をみると, 加工量と衝撃力との関係は衝撃力の増加と共に加工体積が増加することを示している。

以上のようにして, 砥粒の破砕能を支配すると考えられる工具の砥粒に対する槌打ち作用の根源である工具(先端)のもつ衝撃力の大きさと新砥粒の補給, チップおよび旧砥粒の排除能を支配すると考えられる工具のもつポンピング作用の根源である工具先端変位量の大きさの二つの因子によって加工速さは支配されると考えることができる。そして図4でみるように工具先端変位量が最

図5 平均衝撃力と加工体積

図6 P と $(E.W.)$, 陽極電流と最大 $(E.W.)$, 陽極電流と最大加工速さ

大であっても加工速さが零になるのは図3でみるように衝撃力が零であるためであり, また衝撃力が最大であっても加工速さが最大にならないで非常に小さくなるのは工具先端変位量が非常に小さくなるためである。かくして加工速さは仕事と同一な次元をもつ工具先端変位量と衝撃力の積で示めされる量(この量を $(E.W.)$ とする)に関係すると考えることが至当であると云える。

そこで, 図3に示される静圧力と最大衝撃力の特性と図4の示す静圧力と加工時の工具先端変位量の実験結果を用いて, $(E.W.)$ を求め静圧力との関係を求めると図6をうる。前述の思考よりすれば, 静圧力に対しては

表 3

陽極電流	(E.W.) の最大値	非加工時の工具 先端変位量 Δ	(E.W.) の最大 値を与える 静圧力 P	最大 (E.W.) を与える静圧力 P と非加工時の工具先端の変位量 の半分との比 $2P/\Delta$
250 mA	1280 $\mu\kappa$	42 μ	1.6 kg	0.076 kg/ μ
180 mA	1060 $\mu\kappa$	33 μ	1.2 kg	0.073 kg/ μ
100 mA	420 $\mu\kappa$	22 μ	0.8 kg	0.073 kg/ μ
50 mA	100 $\mu\kappa$	12 μ	0.5 kg	0.083 kg/ μ

平均値:
76 kg/mm

(E.W.) は加工速さと同一な静圧力応答特性を示すべきであるが、図 6 の (E.W.) の静圧力応答特性をさきに求めた図 4 に示される加工速さの静圧力応答特性と比較すると、この両者は定性的にはまず一致しており、実験精度を考えに入れると定量的にも大体において両者は比例関係にあることも許される。これについては、図 6 に示す陽極電流値と (E.W.) の最大値の関係と図 6 に示す陽極電流値と加工速さの最大値の関係を比較すると、図 7 で見るように両者はまず比例関係にあるとしても不都合でないからである。なお陽極電流値と最大加工速さの関係は表 2 に、そして陽極電流値と最大 (E.W.) 値との関係は表 3 にそれぞれ示してある。

かくして、超音波機械加工の加工機構に関してある程度満足すべき基本的なことがらを論述することができたが、図 6 に示すそれぞれの陽極電流値に対する静圧力と (E.W.) との関係から表 3 に示すように (E.W.) 値の最大値を与える静圧力と無負荷時の工具先端変位量の半分に対する比を求めると、まず一定値 76 kg/mm になることは図 6 に示す四つの曲線で示されるものを適当な量、たとえば入力、振動数、工具径、工具材質、静圧力を導入して無次元化すると一つの曲線で示すことができる可能性を示している。

そこで、これに関連して想起すべきことは、すでに簡単な模型について解析的に求めた静圧力に対する工具先端変位量の関係と静圧力に対する工具先端の衝突時における衝撃力の関係である。すなわち前者については (3)、後者については (4) を用いて工具断面積を A として (T.W.) なる記号で $(T.W.) = A \cdot U \cdot F_{t1}$ を示すと次のようになる。

$$(T.W.) = \frac{a^2 AE}{l} \cdot \left\{ \left(\frac{IP}{aE} \right) + \pi \cdot \cos(2\pi f t_1) \right\} \cdot \left\{ 1 + 2 \left(\frac{IP}{aE} \right) \cdot f t_1 + \sin(2\pi f t_1) \right\} \quad (5)$$

もちろん (5) の右辺は $\frac{IP}{aE}$ の関数になるから (T.W.) の $\frac{IP}{aE}$ についての応答特性を求めると図 8 となる。 $\frac{IP}{aE}$ が零から増すにしたがって (T.W.) は急激に増加し、 $\frac{IP}{aE} \approx 0.4$ で

最大値 $4.6 \times \frac{a^2 AE}{l}$ に達し、 $\frac{IP}{aE}$ が最適値 0.4 より大きくなると次第に (T.W.) は減少ししまいに $\frac{IP}{aE} \approx 1.35$ のとき零となる。すなわち $\frac{IP}{aE}$ が 0 ~ 0.4 の間では、さきに論述したように、工具先端変位量が大きく工具のポンピング作用が効果をあらわす

図 7

図 8 (T.W.) 値の静圧力応答特性

ことになり、 $\frac{IP}{aE}$ が 0.4 なる最適値になると、ポンピング作用と衝撃力による槌打ち作用の効果が一つになって最大の効果を示して (T.W.) 値は最大値になり、 $\frac{IP}{aE}$ がこの最適値より大きくなると工具先端の衝撃力は大きくなり、槌打ち作用の効果のみは大きくなるが工具先端変位量は減少しポンピング作用の効果が非常に少なくなってくるため (T.W.) の値は減少してくる。そして $\frac{IP}{aE} \approx 0.96$ で槌打ち作用は最大になるがポンピング作用の非常な減少のため、結果としては (T.W.) 値は減少の一途をたどり、しまいに $\frac{IP}{aE} \approx 1.35$ で零になる。

かくして、さきに実験値を用いて求めた図 6 に示す静圧力に対する (E.W.) 値の特性はまったく (T.W.) の $\frac{IP}{aE}$ 変化に対する特性と一致することがみられる。図 8 において P と a との値が変化しても最大の (T.W.) を与える P と a との比 P/a は l/E なる比の値がかわらないときは、一定値になることがわかる。そこで、最大加工速さは (E.W.) に比例すると考えてよいことは図 6 か

表 4

陽極電流	非加工時の工具 先端変位量 A	最大加工速さ を与える静圧 力 P_M	最大加工速 さを与える 静圧力 P_M	非加工時の 工具先端の 変位量の半 分 $A/2$	$\left(\frac{P_M}{A/2} \right) = 2P_M/A$
250 mA	42 μ	1.65 kg	0.079 kg/ μ		
180 mA	33 μ	1.20 kg	0.073 kg/ μ		
100 mA	22 μ	0.75 kg	0.068 kg/ μ		
50 mA	12 μ	0.45 kg	0.075 kg/ μ		

平均値: 73.6 kg/mm

ら求めた図 7 について述べたが, $(E.W.)$ の理論値である $(T.W.)$ の最大値を与える P/a は一定になるという理論特性が実験上成立するかどうかをみるため, 実験結果である図 4 を用いて各陽極電流値について無負荷工具先端変位量 A , 最大加工速さを与える最適静圧力 P_M およびこれから計算される $2P_M/A$ の値を示すと表 4 をうる. この表 4 をみると, 実験から得た $2P_M/A$ の値は 4 種の相違した陽極電流の場合についてまず一定になると考えてよく, これらの平均値は 73.6 kg/mm となる. したがって, 本加工論としては, ある静圧力のもとでは工具の衝突時におけるその先端変位量と衝撃力との積である $(T.W.)$ の値に比例して加工速さは決定されると考えてよいことになる. なおここで, 表 4 の $2P_M/A$ の値と表

3 の $2P/A$ の値が実験精度内ではまず一致していることは意味のあることであり, 本加工理論の正しさを示していることになる.

以上のようにして, 加工論では実験から求めた $(E.W.)$ 値と理論値である $(T.W.)$ の両者がその静圧力応

答特性について一致することを思考実験を取入れて明らかにすることができた. そこでこれを進めて加工速さあるいは $(E.W.)$ 値の超音波周波数応答特性と超音波振幅応答特性の研究に大切な $(T.W.)$ 値の周波数および振幅に対する応答についての理論特性を論ずることとする.

4. $t_1, t_2, \eta, U, F_{t=t_1}$ および $(T.W.)$ 値の超音波周波数と超音波振幅に対する応答特性

さきに誘導し $t_1, t_2, \eta, U, F_{t=t_1}$ および $(T.W.)$ 値の超音波周波数に対する応答特性すなわち $\frac{a\sqrt{E\rho}f}{P}$ に対する $t_1/\{a\sqrt{E\rho}/P\}$, $t_2/\{a\sqrt{E\rho}/P\}$, $\eta, U/a, F_{t=t_1}/P$, $(T.W.)/(PaA)$ の応答特性式を示すことは省略してこれらの応答特性を図 9, 図 10 に示す. 図 9 は超音波周波数が小さい間はその変化は t_1, t_2 および η に影響を及ぼすが, 周波数が大きいところでの変化はあまり影響を及ぼすことがないことを示している. 図 10 からわかるように, 工具先端変位量 U は有限な振動数 $f \approx 0.37 \times P/\{a\sqrt{E\rho}\}$ より大きい振動数になると有限値をもつことになるが, このことはさきに静圧力応答特性を検討した場合, $1P/(aE) \approx 1.35$ で U が零になったことと等しい性質を示しているものである. $f > 0.37 \times P/\{a\sqrt{E\rho}\}$ すなわち $a\sqrt{E\rho}/P \cdot f > 0.37$ では U は零以外の有限値になる

図 9 t_1, t_2, η の周波数応答特性 図 10 $U, F_{t=t_1}, (T.W.)$ 値の周波数応答特性 図 11 t_1, t_2, η の振幅応答特性

図 12 $U, F_{t=t_1}, (T.W.)$ 値の振幅応答特性

が、 f の変化に対する応答はあまり敏感ではなく、 $U \approx 2.0 \times a$ 程度の値をとって実際的にはまず一定であると考えてよい。 $F_{t=t_1}/P$ なる衝撃力の周波数応答は図示されているように、周波数の増加につれて増大することになり、したがって $(T.W.)$ 値の周波数応答も周波数の増加とともに増大する特性をもっていることがわかる。

次に t_1, t_2, η の超音波振幅 a に対する応答特性は図 11, $U, F_{t=t_1}, (T.W.)$ の a の変化に対する応答特性は図 12 にそれぞれ示してある。図 11 をみると、さきの周波数応答特性と同じように、振幅 a とともに t_1 は増大し、 t_2 は減少し、したがって η は増大する。振幅の小さい間は t_1, t_2, η は振幅に対する応答は敏感であるが、振幅が大きくなると非常に敏感でなくなることが見られる。また図 12 の振幅 a に対する応答曲線を見ると、前出の周波数応答曲線の場合と同様に、工具先端変位量 U は振幅が $a \approx 0.037 \times P / \{f \sqrt{E \rho}\}$ のとき零になることがわかる。この値より大きい振幅に対してはその増加とともに急激に大きくなるが、振幅の増大に対し次第に直線的増加の関係になるようになることが見られる。衝撃力 $F_{t=t_1}$ は振幅が $a \approx 0.37 \times P / \{f \sqrt{E \rho}\}$ のとき有限値をもつことはさきに取扱った周波数応答特性の場合にも $f \approx 0.37 \times P / \{a \sqrt{E \rho}\}$ のとき有限値になることと同様であ

るが、振幅が大きくなるにしたがって衝撃力は急激に大きくなるが、やがて振幅の増加とともに直線的に増大する傾向をもつものである。 U と $F_{t=t_1}$ の積である $(T.W.)$ 値の振幅に対する応答特性は振幅の非常に大きい場合には 2 次曲線特性を示すことになるものであって、これに関連しては実験的に求めた陽極電流に対する最大 $(E.W.)$ 値、あるいは図 7 でみるように、これと正比例関係を示す最大加工速さが図 6 でみるように大略陽極電流値の増加と 2 次曲線特性の関係で増加するように見えることに一致するものであって、理論解析から得た特性が割合に正しいものであることを示している。

5. む す び

超音波機械加工の加工速さは工具先端のもつ槌打ち作用の根源である衝撃力と工具のもつポンピング作用の根源である工具先端変位量の積で決定されるものであって、理論と実験結果を用いてこの関係を明らかにすることができた。

最後に本論文に含まれる図面の作成に御協力をおしななかつた工学修士 石坂昭夫氏に心から御礼を申し述べて筆をおく。

参 考 文 献

- 2) G. Nishimura, Y. Jimbo: Ultrasonic Mechanical Machining, Part VI, Proc., Fac., of Eng., Tokyo Univ., **26**, 2 (1959).
- 1) G. Nishimura, Y. Yanagishima, T. Shima: Ultrasonic Mechanical Machining, Part V, Proc., Fac., of Eng., Tokyo Univ., **26**, 1 (1959).
- 3) 西村源六郎, 横山恭男: 振動加工の研究, 精密機械, **30**, 2, 4, 6 (1964).
- 4) 西村源六郎, 横山恭男: 前出.
- 5) G. Nishimura, Y. Yanagishima, T. Shima: loc. cit.
- 6) 加工速さ (machining rate) の求め方については 1) の論文に示してある.
- 7) G. Nishimura, Y. Yanagishima, T. Shima: loc. cit.
- 8) 西村源六郎, 横山恭男: 前出.
- 9) 西村源六郎, 横山恭男: 前出.
- 10) G. Nishimura, S. Shimakawa: Ultrasonic Mechanical Machining, Part VII, Proc. Fac. Eng., Tokyo Univ., **25**, 1 (1958).

正 誤 表

35 卷 5 号「切削初期現象の観察」

頁	誤	正
30 頁 図 9, 10 のスケール	50 μ	150 μ