研 究

超音波加工機の特性 (第1報)*

—— 接触時間比による加工力の測定 ——

正 会 員 谷 口 紀 男**

Some Characteristics of Ultrasonic Carving Machine (1st. Report)
—— Measurement of Machining Force by means of Contact Duration ——

Norio TANIGUCHI

The result of an indirect machining force measurement in ultrasonic machining is described. The mean machining force F_0 is able to be determined from the contact duration τ of tool with a test piece and the static feeding force P , namely by the momentum theory

$$\tau F_0 = P \cdot T \quad \text{so,} \quad F_0 = P \cdot T / \tau,$$

where T = ultrasonic oscillation period.

The duration of contact which is transformed to the electrical contact duration of tool with a test piece is measured by the cathode-ray oscilloscope.

The results obtained are as follows ;

- 1) when machining rate is max., the machining force is max.,
- 2) wearing rate of tool is approximately proportional to machining force,
- 3) larger feeding force will be better for tougher test pieces,
- 4) with brittler test pieces the ratio of machining rate to machining force is larger.

1. 緒 言

超音波加工における加工機構を解明する一助として行った工具と試料との接触時間よりする平均加工力の測定について述べる。

2. 装 置

実験に用いた加工機は24kc, 150Wの発振器をもつものでその構造は図1に示す。工具は厚5mm, 幅40mmのアルフェルの24kcの磁歪振動子に先端が $1 \times 5 \text{ mm}^2$ の二次元エキスポネンシャルホーンを附したものである。尚実際の振動子の入力は約50Wで発振器は充分余裕をもち加工条件の変化による入力変化は余りないことを確かめて行つたものである。

3. 加工速度, 磨耗速度, 送り力, 加工比

周知の如く本加工法は試料と工具との間に砥粒が存在

図 1

しそれによつて加工が行われるものであり, 試料及び工具共に加工が行われる。即ち試料は穿孔され工具は磨耗する。茲に報告するものはイグタロイ (GR3), 特殊工

* 精機学会昭和30年度春期講演会及同年甲府地方講演会にて発表

** 山梨大学工学部

具鋼 (SKS 7), 高速度鋼 (SKH 4) を試料とし軟鋼 ($1 \times 5 \text{ mm}^2$) を工具として送り力を変化した場合のもので加工砥粒はノルバイド 400# を水と 1:1 に混じたものを用いた。その結果は図 2 及び表 1 に示す如くである。即ち加工速度の最大値は GR 3, SKS 7, SKH 4 の順で小になり, 加工比 (試料被加工量/工具磨耗量) は GR 3,

SKH 4, SKS 7 の順で小になり, 夫々加工速度の最大のところで略々最小値を示す。磨耗速度は前二者の関係で示される訳であるが, その最大値は SKS 7, GR 3, SKH 4 の順で小になり, 夫々加工速度の最大のところで最大となる。又最大の加工速度を与える送り力は GR 3, SKS 7, SKH 4 の順で大となり, 一応押込硬度が小で街

表 1

送り力	送り圧力	加工深	加工時間	加工速度	磨耗速度	加工比	平均加工力	加工速度加工力	磨耗速度加工力
SKS 7 特殊工具鋼第 4 種							$H_v=903$		
Pkg	$p \text{ kg/cm}^2$	$d \text{ mm}$	$t \text{ sec}$	$v \mu/\text{sec}$	$q \mu/\text{sec}$	v/g	$F_0 \text{ kg}$	v/F_0	q/F_0
0.56	11.2	0.235	583	0.50	0.35	1.42	2.11	0.237	0.167
0.85	17.0	0.290	255	0.90	1.06	0.85	3.80	0.236	0.278
1.16	23.2	0.170	125	1.40	2.60	0.58	5.30	0.264	0.490
1.48	29.6	0.175	103	1.54	3.32	0.47	5.75	0.267	0.578
1.59	31.8	0.160	108	1.43	3.21	0.45	5.30	0.270	0.605
1.82	36.4	0.230	266	0.90	0.98	0.92	3.62	0.248	0.270
GR 3 超硬合金キゲタロイ							$H_v=1900$		
P	p	d	t	v	q	v/g	F_0	v/F_0	q/F_0
0.56	11.2	0.360	164	2.15	0.90	2.39	2.24	0.960	0.400
0.85	17.0	0.355	91	3.90	1.60	2.43	2.98	1.310	0.538
1.16	23.2	0.327	56	5.80	3.13	1.85	3.75	1.540	0.830
1.48	29.6	0.334	114	2.90	1.91	1.52	3.70	0.790	0.516
1.59	31.8	0.354	127	2.75	1.18	2.32	3.60	0.770	0.326
1.82	36.4	0.499	327	1.53	0.01	153.	3.17	0.480	0.003
SKH 4 高速度第 4 種							$H_v=800$		
P	p	d	t	v	q	v/g	F_0	v/F_0	q/F_0
0.56	11.2						1.65		
0.85	17.0	0.272	796	0.35	0.28	1.25	2.68	0.130	0.104
1.16	23.2	0.196	243	0.80	1.25	0.64	2.85	0.280	0.438
1.48	29.6	0.120	180	1.05	1.72	0.61	2.81	0.374	0.610
1.59	31.8	0.220	184	1.15	1.56	0.78	3.00	0.330	0.400
1.82	36.4	0.208	247	0.80	1.14	0.71	3.56	0.213	0.320

総送り量 0.5mm 加工面積 $1 \times 5 \text{ mm}^2$ ノルバイド 400#
軟鋼工具

図 2

撃値の大きい試料の方が大きい送り力が良い様に思われる。以上の様なことが表われるのは主として試料の各種の物性によるものであるが唯単なる押込硬度とか衝撃値(シャルピー)等のみでは説明されえないことは加工速度、磨耗速度等との関係が一律でないことから推測されることである。之等については加工機構の研究を併せ進めねば結論は出せないものと思われるので次項以下についてまず加工力の測定を行つたものである。

4. 接触時間比, 送り力, 平均加工力

加工力を測定する方法としては直接的な方法もあるがまず最も簡単な方法として茲

では工具と試料との衝突時間を測定してそれと送り力より平均加工力を測定するという間接的方法を選んだ。即ち振動周期を T sec, 接触時間(衝撃時間)を τ sec とし

図 3

実際の衝撃力を $F(t)$ kg とし, 試料の送り力を P kg (実験中一定) とすれば力積の考え方よりして図 3 示す如く,

$$PT = \int_0^{\tau} F(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

が得られる。勿論試料の送り台の重心の振動は充分小さいものと考えている。

今接触時間中の平均加工を F_0 とすれば

$$F_0 = \left\{ \int_0^{\tau} F(t) dt \right\} / \tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。故に

$$F_0 = PT / \tau = P / \gamma \quad \dots\dots\dots (3)$$

がえられる。茲に $\gamma = \tau / T$ で接触時間比と名づける。これより γ を測定すれば平均加工力 F_0 を求めることが出来るのである。

接触時間を測定する方法は図 1 に示す如き装置によって工具と試料との間に乾電池 (1.5~3 V) を併列に入れ両者間の電圧変化をオシロスコープで撮影し, その結果えられる接触時間と分離時間との矩形の図形(図 4 及び図 5)より接触時間比 γ を測定するものである。実際には水中に置いては工具と試料との幾何学的な接触及び分離に相当する矩形波が表われるが, 空気中では分離の時に火花がとんで形がくずれ, 又実際に砥粒を入れて加

図 4

工中では接触する時も砥粒及び加工屑等のため形がくずれる。又そのために接触している時間が充分大となると形のくづれのために (D) の如く電圧波高が低くなつてしまつて観測が困難となる。従つて接触時間を求めるには之等を考えに入れて接触及び分離の起点を基準にして求めたのである。猶この実験は工具の側面の試料との接触の影響を避けるため加工深さは約 0.1 mm 程度を限度としたので前項の実験とは独立して行つた。この結果は図 6 及び表 2 に示す如くである。これより (3) 式によつて平均加工力を求めれば図 7 の如き値を得前の独立した

図 5

図 6

図 7

実験において 最高加工速度を与える送り力のところで 夫々最大の P/r が即ち最大の F_0 がえられる。即ち図 6 で云えば夫々の曲線の原点からの 接線との接点に相当する送り力, 接触時間比がそれに相当するのである。

5. 平均加工力, 加工速度, 磨耗速度

以上の結果を観察すれば その最大加工速度点において

表 2
SKS7

送り力 P kg	送り圧 p kg/cm ²	接触時間比 $r = \tau/T$	平均加工力 $F_0 = P/r$ kg
0.130	2.60	0.205	0.634
0.143	2.86	0.184	0.779
0.331	6.62	0.169	1.96
0.560	11.2	0.266	2.11
0.850	17.0	0.224	3.80
1.140	22.8	0.285	4.00
1.160	23.2	0.215	5.30
1.480	29.6	0.253	5.75
1.820	37.4	0.504	3.62
2.130	42.6	0.519	4.11
2.360	47.2	0.715	3.30
3.08	61.6	0.866	3.56

GR3

送り力 P kg	送り圧 p kg/cm ²	接触時間比 $r = \tau/T$	平均加工力 $F_0 = P/r$ kg
0.133	2.66	0.187	0.712
0.143	2.86	0.184	0.778
0.331	6.62	0.192	1.72
0.560	11.2	0.250	2.24
0.850	17.0	0.285	2.98
1.160	23.2	0.310	3.75
1.480	29.6	0.400	3.70
1.820	36.4	0.575	3.17
1.870	37.4	0.595	3.14

SKH4

送り力 P kg	送り圧 p kg/cm ²	接触時間比 $r = \tau/T$	平均加工力 $F_0 = P/r$ kg
0.143	2.86	0.232	0.605
0.331	6.61	0.255	1.299
0.560	11.2	0.339	1.65
0.850	17.0	0.317	2.68
1.160	23.2	0.408	2.85
1.480	29.6	0.527	2.81
1.820	36.4	0.506	3.57
2.130	42.6	0.704	3.03

総送り量 0.1mm 加工面積 $1 \times 5 \text{ mm}^2$
ノルバイド 400 # 軟鋼工具

各試料ともその平均加工力は夫々最大となる。又その大きさは SKS7, GR3, SKH4 の順で小になり工具磨耗速度と関連のあることがわかる。即ち前者からは本超音波加工が主として 加工面に垂直な衝撃力がその加工にたいして主な役割りを果していることを 推測せしめるものであり, 後者からも同一軟鋼工具にたいしてであるので

やはりこの力が主なる磨耗の原因になっていることを暗示するものと思われる。尙この実験よりして前の実験にたいして平均加工力を間挿して求めそれと加工速度との比を求めればこれがいい試料の超音波加工性ともいえるものを示すのではないかと考えられる。これは表1に一応示されているが最大加工速度においてのものを取り出せば表3に示す如くなりGR3が非常に大きくSKH4

表 3

	最大平均加工力 F_0 kg	加工速度 v mm/sec	加工速度加工力	磨耗速度 q mm/sec	磨耗速度加工力
			v/F_0		q/F_0
SKS 7	5.75	1.54×10^{-3}	2.67×10^{-4}	3.32×10^{-4}	5.78×10^{-4}
GR 3	3.75	5.80	15.40	3.13	8.30
SKH 4	2.80	1.15	3.30	1.72	6.10

SKS7が順次小になつていく。又表1より夫々の材質についていけば平均加工力が大となるとこの値も大となりその変化もGR3は相当大であり衝撃力の大きい場合と小さい場合とでは加工状態が変化していることを考えさせる。このことは脆性物質の衝撃による破砕(割れ)が衝撃力が大きくなると急激に大きくなること即ち割れの伝播速度等の問題と一連の関係を思わせこの加工が所謂衝撃破砕加工を脆性物質にたいしては行っているのではあるまいかと思わせる。これは別な面から硝子等の加工面の状態等よりも云われることである²³⁾。SKS7, SKH4の如く脆性と思われる特性の比較的少ないものは従つて加工速度が遅いのは当然であり、焼結合金が加工速度の早いのも又当然と思われる。従つて靱性の高い材料は寧ろ垂直方向よりの衝撃でなく剪断加工を与える様な工夫をすればもつと加工速度は向上するものと考えられる。

図 8

6. 平均加工力, 接触時間比

以上の実験の平均加工力と接触時間比との関係を別に図8の如く示す。これは同じ平均加工力で働らく場合衝撃加工している時間は二通りあることをいみし、工具系を一つの電磁力による強制振動系と考えれば試料よりくる反撥力、作用時間が送り力によって変化した振動状況が異なりその時のエネルギー吸収の状態が異なることをいみしている。即ち工具の先端の振動振幅(工具と試料との隙間に相当する)が相手(試料面)によつて制限されている所謂限定振幅振動の特性をもつものである。送り方を大にしすぎると隙間が小になり接触時間も大となるので却つて反撥力(衝撃力)が減り、送り方を小にしすぎると隙間は一応大となる如く思われるが反撥

力が小さいので逆に工具の振幅が小となり却つて実際に働らく隙間は小となり従つて衝撃力も減る。そのいみで中間の送り力のところに最大の反撥力(衝撃力)のところがあるものの如くである。之についての解析は別報に譲る。

尙試料の破砕までの弾性抵抗力(応力)が大のものが衝撃力が高くなることは同じ状態での衝突の場合の反撥力が大であるので工具の方の振動系が大きく振動することと相俟つておこることでSKS7が最大衝撃力が最大でGR3, SKH4がそれにつぐこと及び接触時間比がその点で逆になつていくこと等でも推測される。又加工砥粒当りについての試料の破砕抵抗力は統計的にいつて各試料とも等しいであろうが勿論その値は小さいので茲にいう平均加工力は砥粒がどの位破砕仕事に携るかで定まることである。而し試料毎の特性差は砥粒当りでも全体の平均値でもほぼ同様に考えて良いものと思われる。

7. 加工深さによる接触時間比, 平均加工力の変化

前項までは加工深さの極く浅い場合のみを考えたが加工がやや進んだ場合の影響を求めたのが図9及び表4である。その結果は接触時間比 r は同じ送り力にたいして加工深さが大となると減少してくる。従つて $F_0 = P/r$ よりして一応加工力が大となるものと考えねばならない。而し実際には加工速度は減少しているのだから之は工具の先端が孔の中の液を加速するのに多くの力をとられそれが送り力 P の多くの部分をしめ、上の P に相当する実際の衝撃力に釣合う送り力は相当減少しているのではないかとと思われる。従つて之は直接衝撃力を測定せ

図 9 (1)

図 9 (2)

図 9 (3)

表 4
SKS7

送り力 P kg	接触時間比 $r = \tau/T$	総送り量 D mm	計算加工力 F_0 kg
0.560	0.292	0	1.94
	0.264	0.25	2.12
	0.215	0.50	2.60
0.850	0.255	0	3.34
	0.289	0.25	2.94
	0.269	0.50	3.16
1.160	0.354	0.47	3.28
	0.299	0.50	3.33
1.480	0.653	0.10	2.28
	0.352	0.46	4.20
	0.300	0.50	4.93
1.590	0.459	0.23	3.47
	0.533	0.50	2.98
1.820	0.502	0	3.69
	0.433	0.25	4.20
	0.493	0.50	3.70

SKH 4

0.560	0.231	0.10	2.53
	0.205	0.45	2.73
0.850	0.256	0.45	3.32
	0.263	0.50	3.23
1.160	0.330	0	3.51
	0.307	0.25	3.78
1.480	0.340	0.25	4.35
1.820	0.381	0.10	4.17

GR3

送り力 P kg	接触時間比 $r = \tau/T$	総送り量 D mm	計算加工力 F_0 kg
0.560	0.249	0	2.25
0.850	0.282	0.03	3.01
	0.229	0.50	3.71
1.160	0.328	0	3.53
1.590	0.355	0	4.48
	0.290	0.05	5.49
	0.257	0.50	6.18
1.820	0.457	0	3.98
	0.272	0.25	6.70

加工面積 $1 \times 5 \text{ mm}^2$
軟鋼工具
ノルバイド 400#

ねば判然としたことはいえないので 現在その実験を行っているので次報にゆずる。

8. 空気吹込による加工速度、磨耗速度、加工比、接触時間比、平均加工力の変化

図 10

空気を吹込んだ場合の種々の加工特性の変化について測定した結果を図 10 及び表 5 に示す。送り力は $P =$

れうることであろうという推測しかたてられない。

表 5

SKS 7

空気量速	加工時間	加工深	加工速度	加工比
Q cc/sec	t sec	d mm	v mm/sec	v/d
0.	390	0.194	4.99×10^{-4}	0.634
1.135	192	0.156	8.13	0.453
2.33	236	0.179	7.66	0.557
2.50	310	0.206	6.64	0.701
3.70	180	0.168	9.35	0.508
5.00	232	0.172	7.45	0.525

SKH 4

0.	551	0.198	3.60×10^{-4}	0.653
0.625	284	0.183	6.68	0.577
1.150	266	0.190	7.13	0.629
2.50	145	0.156	10.75	0.454
3.67	213	0.165	7.75	0.493
4.50	110	0.139	12.60	0.383
6.06	112	0.161	14.3	0.473

GR 3

0.	356	0.401	1.14×10^{-3}	4.03
0.233	169	0.381	2.26	3.23
0.633	82	0.314	3.83	1.68
1.380	91	0.351	3.86	3.36
2.60	150	0.339	3.13	2.20
3.33	75	0.266	3.59	1.18
5.00	110	0.344	3.13	2.20

総送り量 0.5mm²

表 6

SKS 7

空気量速	接触時間比	平均加工力
Q cc/sec	$r = \tau/T$	F_0 kg
0.25	0.245	4.70
1.14	0.224	5.18
2.33	0.234	4.97
3.50	0.268	4.33
3.70	0.213	5.35
5.00	0.228	5.08

GR 3

0.	0.339	3.42
0.24	0.319	3.64
1.01	0.341	3.43
1.66	0.282	4.15
2.40	0.329	3.54
3.03	0.286	4.19
3.33	0.341	3.42
3.51	0.298	3.90
6.66	0.327	3.55

SKH 4

0.	0.327	3.55
0.620	0.359	3.23
0.772	0.363	3.19
1.15	0.367	3.16
2.70	0.322	3.62
5.25	0.326	3.43

1.16kg として行つたが比較的値かの空気 (1~2 cc/sec) で加工速度の上昇は飽和する。而し空気吹込による加工速度の上昇の原因については判然としたことは出来ないが粒子のマクロ的な入れ替り促進及び連続キヤビテーションによる脱空気作用によるキヤビテーション持続のための空気補給等が一応考えられる。この場合の接触時間比の測定よりする平均加工力は表 6 に示す如くであり空気吹込による加工力の差は加工速度の差の如く顕著ではない。この原因は加工速度は粒子の入れ替り、加工屑の排出によつて著しく変化するが加工力は同じ程度で余り差がなくて行わ

表 7

特 性	試 料	GR 3	SKS 7	SKH 4	備 考
押 込 硬 度		大 $Hv=1900$	中 $Hv=800$	小 $Hv=800$	
衝 撃 値		小 $1.2 \frac{m \cdot kg}{cm^2}$	中 2.0	大 2.5	
最大加工速度		大	中	小	最大加工速度点
最大磨耗速度		中	大	小	
最大平均加工力		中	大	小	〃
接 触 時 間		中	小	大	〃
送 り 力		小	中	大	〃
最 小 加 工 比		大	小	中	〃
加工速度		大	小	中	〃
加工力		大	小	中	〃

9. 結 語

超音波加工の際の加工力の平均値を接触時間と送り力より推定する方法を用いて試料による加工力の変化、送り力による加工力の変化、加工深さ及び空気吹込等による加工力の変化を測定し、その結果を考察したもので試料の特性と各加工特性との定性的な比較を行った。その結果を纏めれば表 7 に示す如くである。又この結果を利用して簡単に最適加工条件を監視する方法は特許を申請中である。

本研究は文部省科学試験研究補助金、総合研究費によ

つて行つたもので東京大学 大越諄先生、西村源六郎先生、東工大海老原敬吉先生、実吉純一先生の御激励を得たことを厚く感謝致します。又種々助言を与えられました当大学杉長介先生、織岡貞次郎先生又実験に当つた村田誠、金沢正義両君に深甚の謝意を表します。

(1956, 1月17日受付)

文 献

- 1) 谷口：山梨大学研究報告，昭和30年，第6号
- 2) 例えば Stanworth：Physical Properties of Glass.
- 3) 谷口：精機学会誌，XIX.2.

金属の放電切断に関する研究* (その1)

正会員 篠原 茂之** 向山 芳世**

Study on Electric-discharge Cutting of Metals (I)

Shigeyuki SHINOHARA, Yoshitsugu MUKOYAMA

We think electric-discharge cutting of metals to be as follows; The conditions of electric currency, contact pressure of the pole on the work, surface speed of the pole, and machining fluids working together, change the frequency of arc discharge or the electric energy for each arc. Then the frequency of arc discharge or the electric energy for the arc influence over the cutting speed or machining efficiency.

We got many electromagnetic oscillograms of voltage waves in electric-discharge cutting for each value of surface speed and contact pressure. And by comparing these with the practical cutting results, we found not only the fact above-mentioned but also a fact that the eccentricity of electrode takes an important part, and others.

I 緒 言

放電切断に於ける切断速度、加工効率等に影響を与えるものとして、接触力、周速、円板巾、円板横振れ、加工液の条件、加工電流等が従来挙げられている。之等の内円板の横振れは別として、外の項は結局総合されて断続電弧の数又は一回の放電エネルギーの大きさを变化させるのではないかと考え実験を行った。

ここでは、接触力、周速、電流等により、放電の様子かどの様に变化するかを電磁オツシログラムに電圧波形を撮影した結果について述べ、それと実際切断に於ける切断速度又は加工効率との関連について報告する。

II 実験装置及び実験条件

実験装置及び実験条件は表 1 に示す。加工液ポンプ駆動電動機と切断円板軸駆動電動機とは、実験条件に影響するのを防ぐため別にしてある。

旋盤の刃物台から腕を出しこの腕の廻りを加工物支持具が回転出来る様になっている。支持具の一端に取付けられた加工物は支持具の回転により切断送りが与えられる。支持具の他端に発条及び重量を取付け、発条で支点の廻りの不釣合重量を消し、重量を变化させることにより接触力を変える様にしてある。

III 放電波形

放電切断中の電圧変化の様子を電磁オツシログラムに

* 昭30, 11月5日山梨地方講演会にて発表

** 山梨大学工学部