

超音波振動による樹脂の切削 (衝撃力について)

中 津 正 志* 池 田 慎 一**
田 頭 孝 介***

Cutting of the Resin using Ultrasonic Vibrating Tool — Magnitude of Impact force —

Masashi NAKATSU, Shin-ichi IKEDA, and Kohsuke TAGASHIRA

要 旨

樹脂の超音波振動切削において、振動時の工作物の受ける衝撃力について考察し、次の結果を得た。1) 衝撃大きさを表す係数(K_r)として、相対速度(V_r)と実切削時間(t_r)の比を用いるのが適当である。2) 超音波振動切削時の工具の衝撃力による切削力減少効果を確認した。3) 切削速度の変化による抵抗値の変化について係数 K_r によって説明した。4) 超音波振動切削の場合、ピッチング角、切削幅による抵抗値の変化は少ない。

Abstract

The authors investigated the cutting resistance of the unsaturated polyester resin with the ultrasonic vibrating tool. The results obtained are as follows. (1) It is effective to use the coefficient K_r of the impact magnitude which is the ratio of the relational cutting speed V_r to the real cutting time t_r . (2) With regard to ultrasonic vibration cutting, it was recognized that there are the reducing effect of the cutting resistance. (3) Using the coefficient K_r , it was explained that the relation of the cutting speed to the cutting resistance. (4) There are not large differences of the cutting forces when the Pitching angle and the cutting width are changed under the ultrasonic vibration cutting.

Key Words : Ultrasonic Vibration, Cutting resistance, Unsaturated polyester resin
Impact, Vibration Cutting

1. はじめに

超音波振動切削は、振動による衝撃力で材料を微少破壊して切削するもので、樹脂のような脆性材料の円滑な切削が期待される加工法である。筆者達は難削材であるFRP¹⁾²⁾³⁾およびFRPマトリクスとして広く利用されている不飽和ポリエステル樹脂について超音波振動切削実験をおこなっている⁴⁾⁵⁾本報では、切削時の衝撃の大きさについて検討を加えたので報告する。また実験に際し、工具及びジグの改善をおこなったことにより、別

報⁶⁾と異なる結果が得られたので合わせて報告する。

2. 実験方法

実験条件は別報⁶⁾と同様であるが、工具を新しく研磨し、切刃稜の丸みをほとんど無くした。これは別報の実験結果に刃先稜の丸みの影響が認められたからである。また切刃の長さを切削幅と同様にし切削済みの面からの影響を受けないよう注意した。被削材はJIS K6919 UP-G、UP-CE相当品である。切削速度は8.33~66.7mm/sであり振動切削の臨界切削速度(V_c)1840mm/sよりも小さい。また振動切削効果を満足する切削速度⁷⁾($V_c/3$)613mm/sよりも小さく、振動切削効果を満足でき

* 助教授 機械工学科

** 助 手 機械工学科

*** 教 授 室蘭工業大学

る実験条件となっている。

振動子取り付けジグはFig.1に示すとうりで、軽量化するとともに、過負荷がかかった時、切込みが小さい方へ逃げられる構造にした。

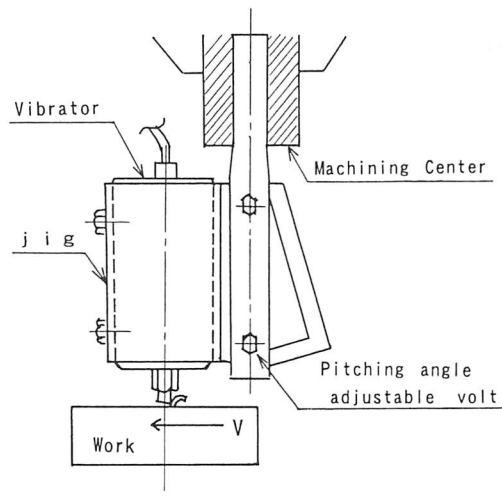


Fig. 1 Jig for the vibrator

また、アジャストボルトによってピッチング角を設定できる構造となっている。振動条件はTable.1に示す。

Table. 1 Condition of the Vibrating

Frequency	19.5 ± 1.5 (KHz)
Amplitude	30 ^{pp} (μ m)
Pitching angle	-16, -12, -8, -4, 0 (deg)
Rolling angle	0 (deg)
Critical cutting speed	1840 (mm/s)
High-frequency output	120 (W)

振動数の特定は樹脂表面からが難しかったので、アルミで行った。Photo.1は、アルミを16.67mm/sで切削した時のSEM写真である。切削方向にlrマーク⁷⁾が観察される。Fig.2は同アルミを377mm/sで切削し、このlrマークを粗さ測定器で記録したものである。振動数を逆算した結果、18.9KHzとなり、正常発信範囲内(19.5 ± 1.5KHz)にあることがわかった。

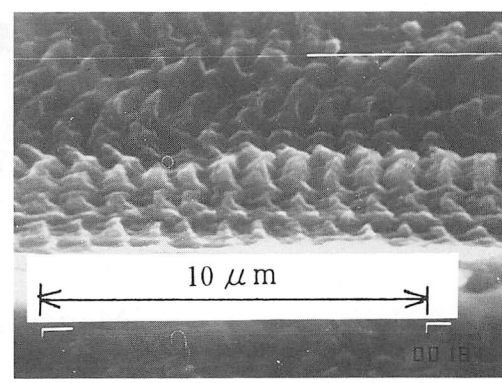


Photo. 1 Lr-mark

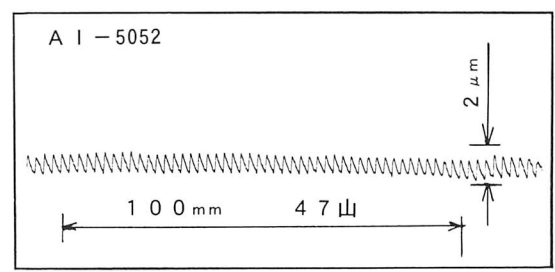


Fig. 2 Record of Lr-mark on the Surface

3. 実切削時間について

Fig.3は振動切削時の工具刃先の変位と速度の変化を示したものである。工具は点P以降で切削速度が工作物速度V₀以上となり、一旦工作物か

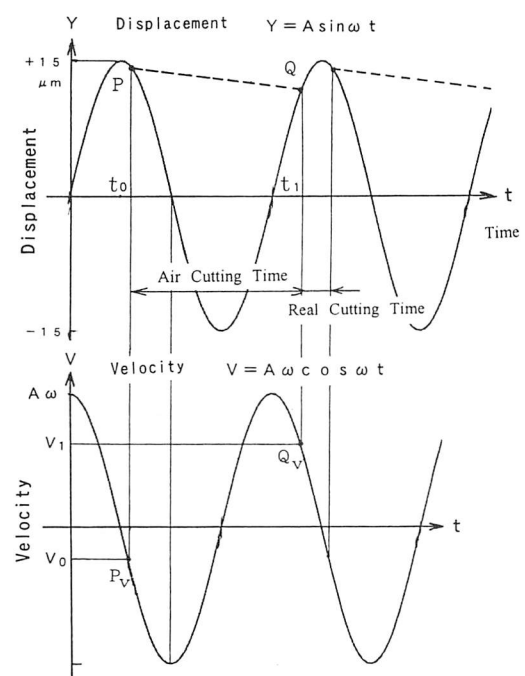


Fig. 3 Displacement and Velocity of the tool

ら離脱する。速度線図の点Pvの速度は V_0 となる。この時の時間を t_0 とする。工作物は点線に従って速度 V_0 で降下し、次に点Qにおいて再び工具と接触する。Qでの工具の速度は点Qvで大きさ V_1 である。この時の時間を t_1 とすると時間 t_0 から t_1 までが空切削時間となり、再び工作物から離脱するまでの図示した部分が1サイクル内での振動切削における実切削時間 (Real cutting time) となる。なお点Qでの再切削時速度は工具と工作物の相対速度となる。

4. 衝撃の大きさについて

m なる質量の物体に力 F が働いて Δt 秒間に速度が V_1 から V_2 に変化したとすると、

$$mV_1 - mV_2 = F\Delta t \quad (1)$$

振動切削において、工具が工作物から離脱する時、速度 V_2 は0と考えられるから

$$mV_1 = F\Delta t \quad (2)$$

従って、切削時の平均衝撃力 F は

$$F = mV_1 / \Delta t \quad (3)$$

工具の位置 Y 、片振幅を A 、角振動数 ω とすると

$$Y = A \sin \omega t \quad (4)$$

(但し振動数 f として $\omega = 2\pi f$)

V_1 は工具の速度であるから

$$V_1 = A \omega \cos \omega t \quad (5)$$

と表せる。従って式(3)は

$$F = mA \omega \cos \omega t / \Delta t \quad (6)$$

飯島、竹山の研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾によれば、 Δt を1回の衝突に要する時間 ($= 1/f$)、速度を振動時の最大速度 $A\omega$ をとり、衝撃力を簡易に比較するための数値 K を定義している。

$$K = A \omega / \Delta t \quad (7)$$

しかし(7)式は、工作物の速度が含まれていない。振動切削時の切削速度は工具と工作物の相対速度とすべきであるから、振動切削時ではFig.2の点Qvの再切削速度と切削速度とを加算した値である。また時間 Δt は1回の衝撃に要する時間であるから、工具が工作物と接している (実切削時間) 時間とし、空切削時間を除くのが適当であろう。

工具が工作物から離脱する時間 t_0 は

$$t_0 = (1/\omega) \cos^{-1}(V/A\omega) \quad (8)$$

その時の工具の位置 Y_0 は

$$Y_0 = A \sin \omega t_0 \quad (9)$$

ここで V_0 は工作物の速度である。再び工作物

と工具が接触する時間 (再切削時間) を t_1 とすると、この時の工作物と工具の位置は同一 (Y_1) であるから、

$$Y_1 = Y_0 - V_0(t_1 - t_0) \quad (10)$$

$$Y_1 = A \sin \omega t_1 \quad (11)$$

(10)、(11)式を使って収束計算して t_1 を求める。この時の工具の速度 V_1 は

$$V_1 = A \omega \cos \omega t_1 \quad (12)$$

よって、相対速度 V_r および実切削時間 t_r は

$$V_r = V_1 - V_0 \quad (13)$$

$$t_r = (1/f) - (t_1 - t_0) \quad (14)$$

(3)式から衝撃の大きさをあらわす係数として K_r を定義する。

$$K_r = V_r / t_r \quad (15)$$

5. 実験結果および考察

5. 1 衝撃の大きさ K と K_r の比較

Table.2は飯島、竹山の実験結果 K と(15)式による K_r を示したものである。 K に比べ K_r は5.95倍から7.28倍の値を示している。また、最低の K または K_r に対する最高値の割合はそれぞれ4.22倍、5.16倍であり K_r の方が衝撃の変化に対し敏感であることがわかる。この係数を計算することは、再切削の速度、実切削時間が明瞭になるので切削機構の考察にも好適である。

Table.3は本実験の結果である。 K 値は振動数、振幅が変わらないので同じであるが K_r 値は工作物速度が含まれているので変化している。Table.2とTable.3では質量が異なるので単純には比較できないが、 K 値のオーダーが大きな変わりが無いのに対し、 K_r 値は大きく異なる。これは超音波の特性が良く表れており、衝撃の大きさを比較する尺度として K_r が適当であると思われる。

実験条件の切削速度は最低値に対し8倍に設定されているが、相対切削速度は2.69倍にしかない。結果、衝撃の大きさを示す K_r 値は余り変化せず、むしろ減少気味である。

1サイクル中の実切削時間の割合は3.4%～10.9%でありいわゆるパルス切削力波形が成立している。

Table. 2 Calculation of the impact value (1)

Frequency f (Hz)	Amplitude A (μ m)	K (= A ω/Δ t) × 10 ⁴	Cutting speed V (mm/sec)	Relational cutting speed Vr (mm/sec)	Real cutting time t r (μ sec)	K r (=Vr / t r) × 10 ⁴
100	380	2.388	0.5333	40.145	231.2	17.377
150	100	1.414	0.5333	24.400	277.8	8.975
300	10	0.566	0.5333	8.389	320.1	3.370

Table. 3 Caluculation of the impact value (2)

Frequency f (Hz)	Amplitude A (μ m)	K (= A ω/Δ t) × 10 ⁴	Cutting speed V (mm/sec)	Relational cutting speed Vr (mm/sec)	Real cutting time t r (μ sec)	K r (=Vr / t r) × 10 ⁴
19500	15	3.583	8.333	435.3	1.953	22290
19500	15	3.583	16.67	611.5	2.765	22120
19500	15	3.583	33.33	852.8	3.921	21750
19500	15	3.583	50.00	1033.4	4.816	21460
19500	15	3.583	66.67	1171.7	5.564	21060

5. 2 切削速度と切削抵抗

Fig.4は切削速度の変化による切削抵抗の変化を示したものである。通常切削の場合、切削速度の上昇とともに切削抵抗は主分力、背分力とも減少している。樹脂は脆性材料でありその切削形態は亀裂型であり仕上げ面に無数の亀裂後が残る。従って切削中に発生する亀裂が速度効果によって、より衝撃力の増加につながり切削抵抗の低下になったものと考えられる。

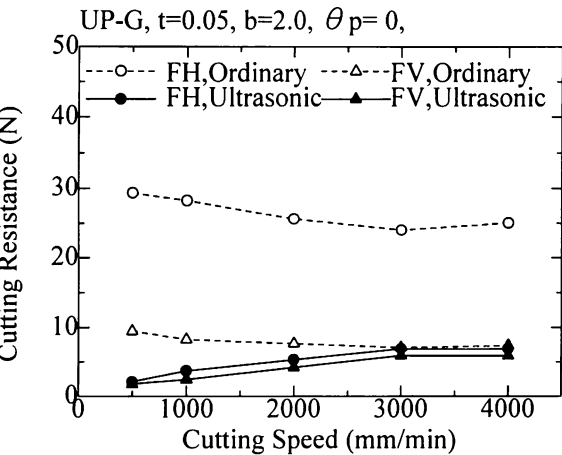


Fig. 4 Effect of Cutting speed

反対に超音波振動による切削では、速度の増加とともに抵抗値は上昇している。これはTable.3にも示すように、切削時の衝撃が速度の増加に関わらず実切削時間が増加するためにKrが一定かむしろ低下していることが原因と思われる。

振動切削の抵抗値は通常切削の27%～6%(主分

力)、66%～19%(背分力)にまで減少しており、いわゆる切削力減少効果を確認できた。振動による衝撃破壊により抵抗値が激減しておりそれは振動方向である主分力に著しい。これは他の研究報告⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾とも一致する。

一般に切削はCutting+ Rubbing+ Ploughingが同時に発生するが振動切削の場合Cuttingのみの切削機構となるため抵抗値が低下する⁷⁾。本実験においても、超音波振動による衝撃力による亀裂形切削により抵抗値が減少した。超音波振動切削は非常に周期の短いパルス状の切削であるので、いわゆる不感性振動切削機構の状態になり抵抗値が低くなったと考察できる。

通常切削において主分力に対する背分力の割合が約30%なのに対し、振動切削の場合は40%から100%となることも珍しくなかった。しかし、別報⁶⁾では振動切削で背分力が主分力を大きく上回っていた。原因を調べた結果、工具切刃の丸みが大きかったため、所定の切り込みに比較して丸み半径が大きく、工作を押しつぶすように切削するため背分力が大きくなったことがわかった。

5. 3 切削幅と切削抵抗

Fig.5に切削幅に対する切削抵抗の変化を示す。通常切削の場合は切削幅にほぼ比例して切削抵抗を増加させているが振動切削の場合はあまり大きくは増加しない。これは振動による衝撃力が材料の強度を大きく上回っているので、切削幅の増加がそのまま抵抗値の増加に繋がらなかったためと思われる。

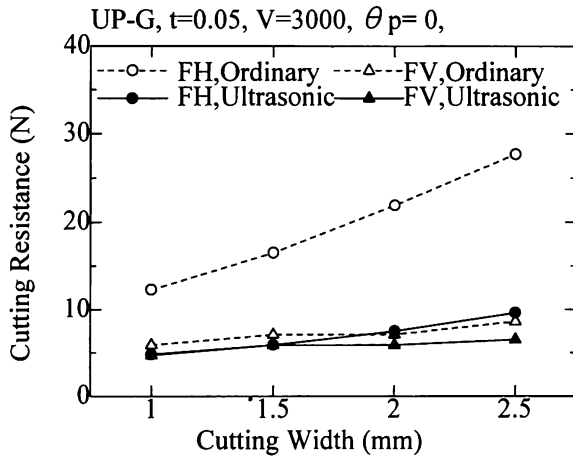


Fig. 5 Effect of Cutting width

5. 4 ピッチング角と切削抵抗

ピッチング角は振動の方向を変化させるので衝撃の方向も変化する。切削抵抗値にも影響がでるものと予想された。しかしFig.6に示すように明瞭な違いは計測されなかった。振動の方向は切削方向に対し $+4^\circ \sim +8^\circ$ の方向と言われており、図中わずかに -8° 付近（振動方向が水平になる）の抵抗値が低めに計測される程度であった。設定した実験条件での振動方向の変化は少なく、衝撃の方向が切削方向成分の大きさに及ぼす変化が少ないのが原因と思われる。

振動なし切削の場合は、ピッチング角 -16° はすくい角 -16° を、同 0° は 0° と同義であるので、単純にすくい角の変化であり、抵抗値はピッチング角の増加にしたがって減少している。

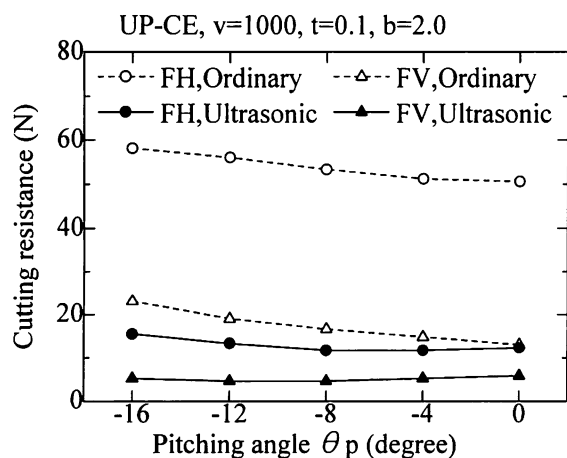


Fig. 6 Effect of Pitching angle

6. おわりに

以上をまとめると、

- (1) 振動切削時の速度は再切削時の相対速度が適当である。また1サイクル間の切削時間は実際に工具と工作物が接触している時間と考えられるから、空切削時間を除いた時間とすべきである。
- (2) 衝撃の大きさを表わす数値として $K_r = V_r / t_r$ を提唱した。
- (3) 超音波振動による切削力減少効果を確認した。
- (4) 本実験における K_r を算出し、通常切削と振動切削では切削抵抗の変化傾向が異なることを衝撃の大きさによって説明した。
- (5) ピッチング角の変化は切削抵抗に余り影響しない。
- (6) 振動切削の場合、切削幅が変化しても抵抗値の変化は少ない。

参考文献

- 1) 池田慎一、中津正志、他1、超音波振動切削によるGFRPの切削、精密工学会北海道支部学術後援会論文集、P62(1997)
- 2) 池田慎一、中津正志、他1、GFRPの超音波振動切削、苫小牧高専紀要、第31号、P31(1996)
- 3) 池田慎一、中津正志、他1、難削材の超音波振動切削、日本機械学会北海道支部講演概要集、No.952-1、P87(1995)
- 4) 中津正志、池田慎一、他1、不飽和ポリエステル樹脂の超音波振動切削、苫小牧高専紀要、第32号、P25(1996)
- 5) 中津正志、池田慎一、他1、超音波振動による樹脂の切削、日本機械学会北海道支部講演概要集、No.972-1、P73(1997)
- 6) 中津正志、池田慎一、他1、超音波振動によるFRP切削の基礎研究、苫小牧高専紀要、第32号、P19(1997)
- 7) 表面加工上、隈部淳一郎著、実教出版、p244(1973)
- 8) 飯島、竹山、GFRPの振動切削加工、合成樹脂、Vol.37、No.10(1991)
- 9) 飯島昇、FRPの振動切削加工、機械と工具、Vol.39、No.1、P26(1988)
- 10) 竹山、飯島他、FRPの超音波振動切削機構に

関する研究、精密工学会秋季大会学術講演会論
文集、P599(1987)

11) FRP構造設計便覧、強化プラスチック協会
(植村益次)、技法堂(1994)

12) 精密工作便覧、精密工学会編、コロナ社
(1992)

(平成9年11月28日受理)