

不飽和ポリエステル樹脂の超音波振動切削
(仕上げ面について)

中 津 正 志*・池 田 慎 一**・田 頭 孝 介***

Ultrasonic Vibration Cutting of Unsaturated Polyester Resin
— Finished Surface —

Masashi NAKATSU, Shin-ichi IKEDA and Kohsuke TAGASHIRA

要 旨

不飽和ポリエステル樹脂はFRP（繊維強化樹脂）のマトリクス材料として広く使われている。FRPの超音波振動切削の基礎研究として繊維を含まない樹脂について実験を行い、次の結果が得られた。(1)超音波振動切削において、送り、切り込みが増加すると、仕上げ面粗さは増加する。(2)超音波振動による切削仕上げ面は通常の切削仕上げ面よりも粗さが低い。(3)ローリング角、ピッチング角が増加すると、振動の方向が材料内部に向かうため仕上げ面粗さは増大する。

Abstract

Unsaturated polyester resin which composed of Fiber Reinforced Plastic (FRP) is widely-used matrix. In order to study FRP on cutting under ultrasonic vibration cutting, the authors investigated the cutting surface of the resin with the ultrasonic vibrating tool at the beginning. The results obtained are as follows. (1) In the case of Ultrasonic vibration cutting, increasing feed rate and depth of cut, the values of the surface roughness are increase. (2) The value of the roughnesses with the ultrasonic vibration are smaller than the value with the ordinary cutting. (3) When the rolling or the pitching angles are increase, surface roughness become worse.

Key Words: Unsaturated polyester resin, Ultrasonic Vibration Cutting, Surface finish, Rolling angle, Pitching angle

1. 緒 言

FRPは、物性の異なる素材からなるために、工具磨耗、バリ、ケバ立ち、層間剝離が発生しやすく、被削性が悪い¹⁾。そのため、成形加工のみで製品にし、極力切削加工を避ける傾向があった。しかし、近年、FRPの需要の高まり²⁾とともに、二次加工として切削加工を必要とすることが多くなってきた。筆者等は工具を超音波振動させることによって、被削材を衝撃微少破壊し、被削性を向上させられないか研究を進めている³⁾。

本研究では、FRP超音波振動切削の基礎研究として、繊維を含まない樹脂のみの振動切削⁴⁾を行

い、仕上げ面粗さ測定、および仕上げ面のSEM観察を行ったので報告する。

2. 実験方法

Table.1に加工条件を示す。被削材の樹脂はJIS K6919に示されるUP-G相当品（オルソフタル酸系）とUP-CE相当品（イソフタル酸系）である。実験用試料（50×50×15t）は硬化時、内部蓄熱によるクラックの発生を避けるため、3回にわけて積層して作成した。硬化剤はパーメック(N)日本油脂製を使用した。

臨界切削速度⁵⁾は、振動数19.5KHz、片振幅15μmであるので1.84m/s (110.2m/min) である。切削速度は0.565m/s (33.9m/min) に設定した。振動の効果が大きいのは、一般に臨界切削速度の1/3 (0.613m/s) 以下と言われており、本実験はこれを満足している。

* 助教授 機械工学科
** 助手 機械工学科
*** 教授 室蘭工業大学

実験装置をFig.1に示す。超音波振動切削装置（多賀電気製SB-150）は最大出力120W、発振周波数 $19.5\pm1.5\text{KHz}$ である。振動数は樹脂の加工面の振動痕から逆算して推定する予定であったが、振動痕が観測されなかったので、実際の振動数の測定は出来なかった。かわりに、アクリル樹脂を用い、振動痕から計算した結果、約 17.7KHz と言う数値が得られた。

ピッチング角（ θ_p ）は工具シャンク中心線の前後方向の傾きである。 $\theta_p=15^\circ$ の時、工具上すくい角は -4.5° 、 $\theta_p=0^\circ$ の時、同 10.5° である。ローリング角（ θ_r ）はシャンクの左右方向の傾きである。角度が大きく（プラスに）なると送り方向のすくい

Material(JIS K 6919)	UP-G, UP-CE
TOOl material	Tungsten carbide K10
Cutting soeed(m/sec)	0.565
Depth of cut(mm)	d =0.1, 0.3, 0.5
Feed(mm/rev)	f =0.1, 0.2, 0.3
Coolant	Dry
Frequency(KHz)	19.5 ± 1.5
Pitching angle(deg)	$\theta_p=0, 8, 15$
Rolling angle(deg)	$\theta_r=-5, 0, 5, 10$
Amplitude(μm)	30^{p-p}

Table.1 Experimental Conditions

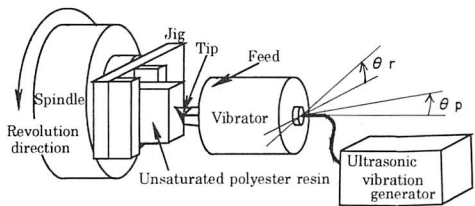


Fig.1 Set up for Cutting Test

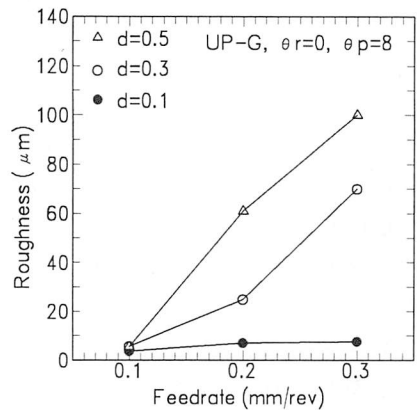


Fig.2 Effects of Feedrae and Depth-of-cut on the Surface finish

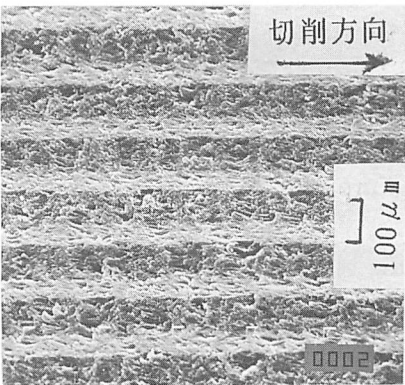
角は小さく（マイナスに）なる。切削工具はクランプ式、チップ材種は超硬K10三角チップ（ノーズ半径0.2）を使用した。

粗さは小坂製万能形状測定器により最大高さ（JIS B 0601 Ry）を測定した。仕上げ面は走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し写真撮影した。

3. 実験結果および考察

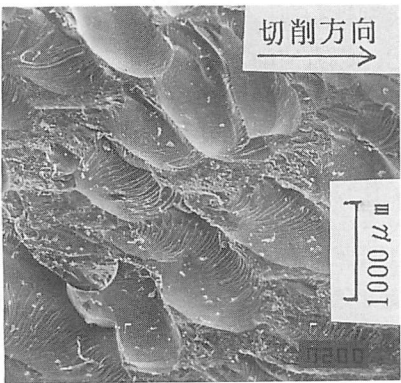
3. 1 送り，切込みと仕上げ面粗さ

Fig.2は工具に超音波振動をかけて切削した場合の、送り，切込みの変化による仕上げ面粗さを示す。切り込み0.1mmの場合は工具の樹脂への食い込みが少なく，工具先端で表面をバニッシングするため粗さは $3.6\mu\text{m}\sim7.5\mu\text{m}$ と送りが変化しても小さい。送り0.1mm固定の場合の切り込みによる変化も $3.6\mu\text{m}\sim5.7\mu\text{m}$ と小さい。送り0.1mm/rev切り込み0.1mmの場合（ $3.6\mu\text{m}$ ）の仕上げ面の



UP-G、f=0.1、d=0.1

Photo.1 SEM photographs(A) of the machined surface



UP-CE、f=0.3、d=0.3

Photo.2 SEM photographs(B) of the machined surface

S E M像をPhoto.1に示す。振動跡は観察されないが、フィードマークがはっきり出ている。ちなみにフィードマークによる粗さは $9.2\mu\text{m}$ であった。

切り込みが 0.3mm および 0.5mm の場合は急激に粗さが増大している。切削時、工具のくさび作用 (Wedge effect) によって、刃先前方に引っ張り応力が発生し、すくい面の前進による曲げモーメントによって、樹脂内部に向かって亀裂が発生し、工具が進行するに従って大きくむしり取られるため、仕上げ面に無数の貝殻状の跡 (羽毛状模様: ハックルマークhackle mark)⁶⁾が残り、これが粗さを悪化させている。切込み、送りがさらに大きくなると、ついにはこの貝殻状のむしれ跡のみで仕上げ面が構成され粗さは大きく増大する。

Photo.2はUP-CE, $d=0.3$, $f=0.3$, の仕上げ面 ($120\mu\text{m}$) である。フィードマークが完全に消滅し亀裂跡だけで仕上げ面粗さを構成している。切り屑は不連続型で、塑性的には殆ど変形を受けず粉状に破断していた。送り、切り込みの増大によって貝殻状切り屑の大きさは大きくなり仕上げ面の变化と対をなしていることが切り屑のS E M観察によって確認された。

3. 2 超音波振動

Fig.3は超音波振動の有無による仕上げ面粗さを示す。全体として振動を加えた方が仕上げ面粗さは小さかった。後述するFig.7においても同様な結果が得られた。これは超音波振動の衝撃力が、脆性材料である樹脂を細かく破碎しながら切削する結果、仕上げ面は浅い亀裂跡となり、比較的小さい粗さとなったと思われる。

Fig.4に工具の超音波振動による、切削時間(t)に対する変位(Y)と速度(V)の変化を示す。振幅は $15\mu\text{m}$, 角速度 $\omega=0.1225\times 10^6\text{rad/s}$ である。変位がA点に来た時、工具速度が 0.565m/s となり被削材速度を越えるため、工具はいったん材料を離れる。工具がB点に来たとき再び材料を切削し始める。この時の工具速度は 1.75m/s である。工具速度は材料の速度と反対方向なので相対速度は $1.75+0.565=2.315\text{m/s}$ となり大きくなる。切削速度は 0.565m/s であるが、工具は超音波振動によって実際は切削速度の4.1倍の高速で材料にあたることからわかる。再切削時の衝撃力と $5.13\times 10^{-5}\text{sec}$ の短い周期で繰り返されるパルス状の振動で、脆性材料である樹脂表面は塑性降伏する前に、その弾性域内でクラックが発生し、細かく粉

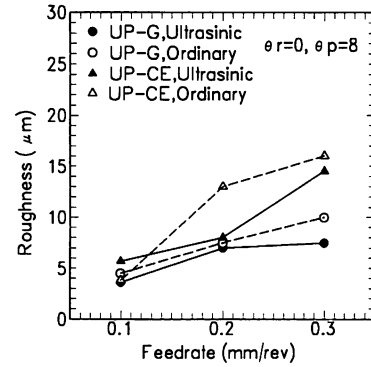
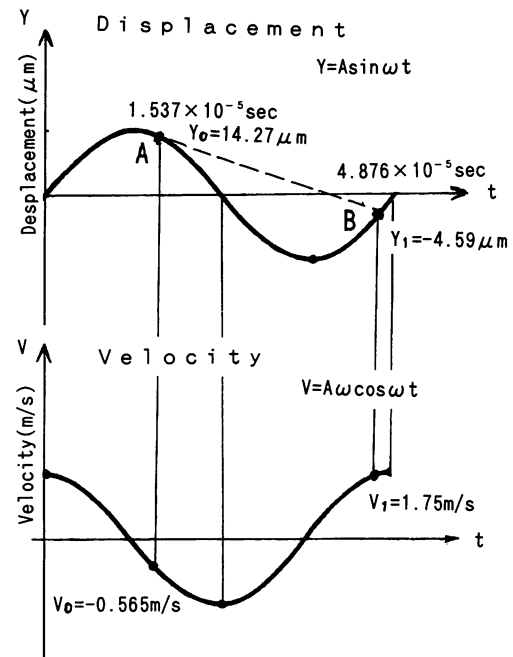


Fig.3 Effects of Ultrasonic vibration



Cutting Time = $1.79 \times 10^{-5}\text{sec}$ (34.9%)
Cutting Speed = $1.75+0.565 = 2.315\text{m/s}$ (138.9m/min)

Fig.4 Displacement and Velocity on the Ultrasonic Vibration cutting

砕される。従って仕上げ面は比較的小さい亀裂跡となり粗さが向上したと考えられる。

3. 3 樹脂材料

樹脂材質ではオルソ系 (UP-G) の方がイソ系 (UP-CE) よりも粗さが低い (Fig.3, Fig.7)。UP-Gの組成はグリコール, 無水フタル酸, 無水マレイン酸, スチレンからなり, UP-CEは無水フタル酸のかわりに, イソフタル酸, が入っている。両樹脂の機械的性質や物性値は, ロックウェル硬さ, バーコル硬さ, 曲げ強さ, 引っ張り強さ, 圧縮強さ, 衝撃強さ, 熱伝導率, 熱膨張係数とも,

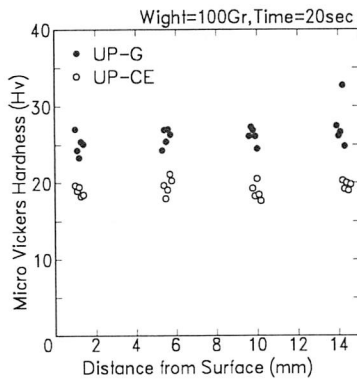


Fig.5 Hardness of the Resins

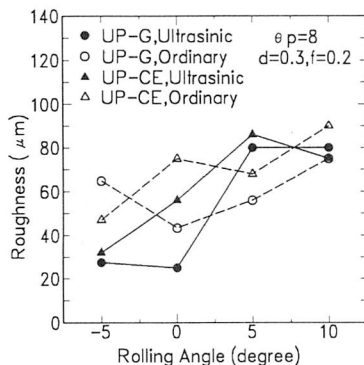


Fig.6 Effects of Rolling angle on the Surface finish

オルソ系の値に幅がある程度で、大きな違いはなく、文献⁷⁾による比較からは明瞭な違いはなかった。実験で使用した樹脂について硬度を測定した結果をFig.5に示す。試料は厚さの関係で一回で硬化させられず、三回（三層）に分けて作成したが、測定結果からは表面と内部での硬度に違いはなかった。2樹脂間ではUP-Gの硬度が高かった（UP-G：平均 H_v 26.2, UP-CE：平均 H_v 19.3）また硬度のバラツキもUP-Gの方が大きかった。この結果から考察すると、UP-Gの場合切削抵抗により、亀裂が発生しやすいが内部に進行する前に脆いために粉碎し、結果的に仕上げ面の粗さが低くなったものと思われる。

3.4 ローリング角

ローリング角による仕上げ面粗さの関係をFig.6に示す。多少ばらついているが角度の増加によって粗さは増加している。ローリング角は工具の振動方向に直接関係する。角度の増加によって工具刃先の振動が切削方向からずれて、材料内部に向かうため、クラックが材料内部の方向に進行し仕上げ面粗さを悪化させている。

Photo.3はUP-CEのローリング角 -5° (32μ

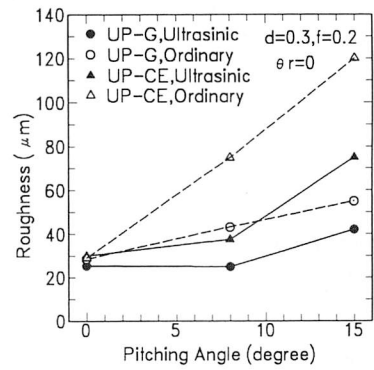


Fig.7 Effects of Pitching angle on the Surface finish

$\theta p=8$ $d=0.3$ $f=0.2$ $N=90$

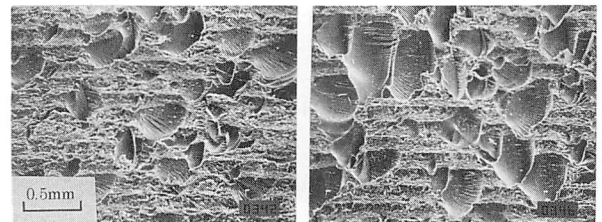


Photo.3 Effects of Rolling angle by SEM photograph

m)と 5° (80μ m) の場合の仕上げ面のSEM写真である。 -5° の場合はハックルマーク（亀裂跡）は小さく深さは浅いが、 5° の場合は大きく深いことがわかる。振動無しの場合も、角度の増加によって粗さは増加している。送り方向すくい角が減少し、切削力が材料内部に大きく働くため亀裂が材料内部へ進行し粗さを大きくしていると思われる。

3.5 ピッチング角

ピッチング角による仕上げ面粗さの関係をFig.7に示す。角度が増加すると粗さは増大している。振動切削の場合、ピッチング角が増加すると工具上すくい角が小さくなり、工具の振動方向は材料内部に向かう。ピッチング角 8° のとき、振動方向は樹脂表面から内部へ 4° の方向、同 15° のとき、 11° の方向となる。従って工具前方の亀裂も材料内部に向かって発生し、大きな亀裂跡の残った仕上げ面となり、粗さが大きくなる。SEMによって、Photo.3と同様なハックルマークの変化が観察された。振動無しの場合、材料内部に向かう切削力は一定な上に切削力が高いため、切り屑が途中で破碎されず大きなモーメントが加わるため、

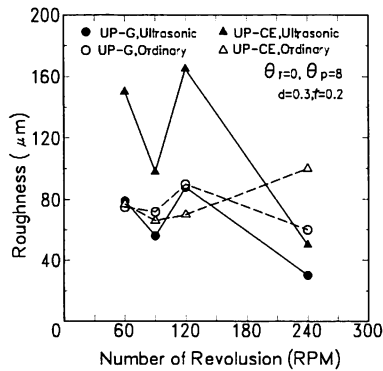


Fig. 8 Effects of Cutting speed

刃先前方内部へ大きな亀裂を発生させ、仕上げ面粗さを大きくしていると考えられる。

3. 6 そ の 他

Fig. 8は切削速度による粗さのグラフである。切削速度の増加（回転数の増加）によって仕上げ面粗さは良くなっているが、90rpm（切削速度0.565m/s）近辺で大きく上下している。振動切削における切削し始めの相対切削速度は、60rpm：2.21m/s, 90rpm：2.32m/s, 120rpm：2.27m/sであり、あまり変わらない。Fig. 8の送り、切り込みは表面にハックルマークができるので、測定時の位置、大きさによって粗さが大きく左右された結果と思われる。240rpmの時、相対速度0.9095m/sと大きく減少し振動による衝撃効果は低下しているが、相対最高切削速度が4.106m/sであり、速度効果が仕上げ面を向上させたと思われる。速度変化と粗さについては不明な点が多く、さらに調べる必要がある。

4. 結 言

不飽和ポリエステル樹脂を超音波振動切削し次の結果が得られた。

- (1) 送り、切り込みの増加は貝殻状の亀裂跡が仕上げ面を乱し、粗さが粗くなる。
- (2) 通常切削より超音波振動切削の方が仕上げ面

が良い。

- (3) オルソ系（UP-G）はイソ系（UP-CE）よりも粗さは低い
- (4) ローリング角やピッチング角が増加すれば仕上げ面粗さは増大する

樹脂材料の超音波振動切削については研究文献も少なく、不明な点が多い。今後は、超音波振動切削における切削機構や切り屑生成機構の解明、湿式における仕上げ面生成機構、樹脂の場合の最適加工条件の選定、などについて研究を進める予定である。

謝辞

本研究にあたり試料を提供して頂いた興和工業株式会社の関係各位に感謝申し上げます。

本報は日本機械学会北海道支部第35回講演会で発表したものを、加筆訂正し同名の論文にまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) 飯島昇, FRPの振動切削加工, 機械と工具, VOL39, NO1, P26(1988)
- 2) 福田博, 複合材料の開発動向と課題, J S M E, Vol. 96, NO.893
- 3) 池田慎一, 中津正志, 田頭孝介, 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, No952-1 P87
- 4) 中津正志, 池田慎一, 田頭孝介, 不飽和ポリエステル樹脂の超音波振動切削, 日本機械学会北海道支部講演概要集, No952-1 P89
- 5) 隈部淳一郎, 精密加工振動切削 -基礎と応用-, 実教出版, 1979
- 6) 橋本宇一他, 非金属材料の精密加工法 (上) 他人書館
- 7) 植村益次, FRP構造設計便覧, 強化プラスチック協会編, 技法堂(1994)

(平成7年11月30日受理)

