

# GFRPの超音波振動切削 (仕上げ面の生成)

中 津 正 志\*・池 田 慎 一\*\*・藤 川 昇\*\*\*  
田 頭 孝 介\*\*\*\*

## Ultrasonic Vibration Cutting of GFRP (Surface Generation Mechanism)

Masashi NAKATSU, Shin-ichi IKEDA, Noboru FUJIKAWA and Kohsuke TAGASHIRA

### 要 旨

超音波振動によりGFRPを切削し、仕上げ面生成についてSEM観察を行い、繊維角度による切削機構を考察した。その結果の主なもの、(1)繊維角の違いによる仕上げ面生成は、SEM観察の限りでは、振動無しの場合と同じく、a) 繊維座屈形、b) 層間剥離形、c) 繊維裁断形の3つの繊維破壊形式に集約された。(2)超音波振動切削の場合でも、繊維角 $\theta$ が小さいと繊維の剥離現象が顕著に発生するがその周期は大きく、切削系の振動周期で発生している。(3)繊維角 $\theta$ が大きくなり繊維裁断形になると、破断した繊維が、工具逃げ面により2次破壊され、工具の擦過により塑性変形した平滑な面が生成される。

### Abstracts

Surface generation of GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) under the Ultrasonic vibration cutting was observed with SEM-photograph and considered on the cutting mechanism at the various fiber angle. The summary of the results is shown as follows, (1)It is three types of surface generation same as ordinary cutting which are Fiber buckling type, Delamination type and Fiber cutting type at various fiber angle. (2)In the case of small fiber angle( $\theta < 90\text{deg}$ ), it occur repeatedly the tear of the fiber fracture. The period was longer time than the Ultrasonic. It may be cycle of cutting system. (3) At the larger angle ( $\theta \geq 90\text{deg}$ ), the initial fracture of fiber is cut-off with the bending and compression, named primary fracture. After, the machined faces of the fiber are rubbed over and deformed plastically by the relief face of the tool, named secondary fracture. It is generated flat face of the fiber.

Key words : Ultrasonic Vibration, Cutting, GFRP, Surface Roughness, Fiber Angle

### 1. はじめに

繊維強化プラスチックの切削加工はバリやけだち、層間剥離などの問題があり、敬遠されがちである。しかし、需要の広がりとともに切削加工は避けて通れなくなってきた。

F R P の切削については過去に多くの研究<sup>1)2)3)</sup>がなされている。仕上げ面の生成について

は、たとえば新井<sup>4)</sup>は繊維の変形を、a) すくい面・繊維平行接触型、b) すくい面・繊維端接触型(さか目切削)、c) 刃先・繊維接触型(ならい目切削)、の3つに分類し、金枝<sup>5)</sup>は切削形式をa) 繊維座屈形、b) 層間剥離形、c) 繊維裁断形に分けている。しかしこれらは、超低速であったり、通常切削についての実験結果である。超音波振動切削下における仕上げ面生成についても同じ生成形態になるかは明らかでない。筆者等は、一方向性材料の強い異方性が切削現象にどのように影響するか、繊維角を中心にした加工条件の変化による仕上げ面の生成について、電子顕微鏡による観察をまとめたので報告する。

\* 助教授 機械工学科

\*\* 助 手 機械工学科

\*\*\* 技 官 (機械実習工場)

\*\*\*\* 教 授 室蘭工業大学

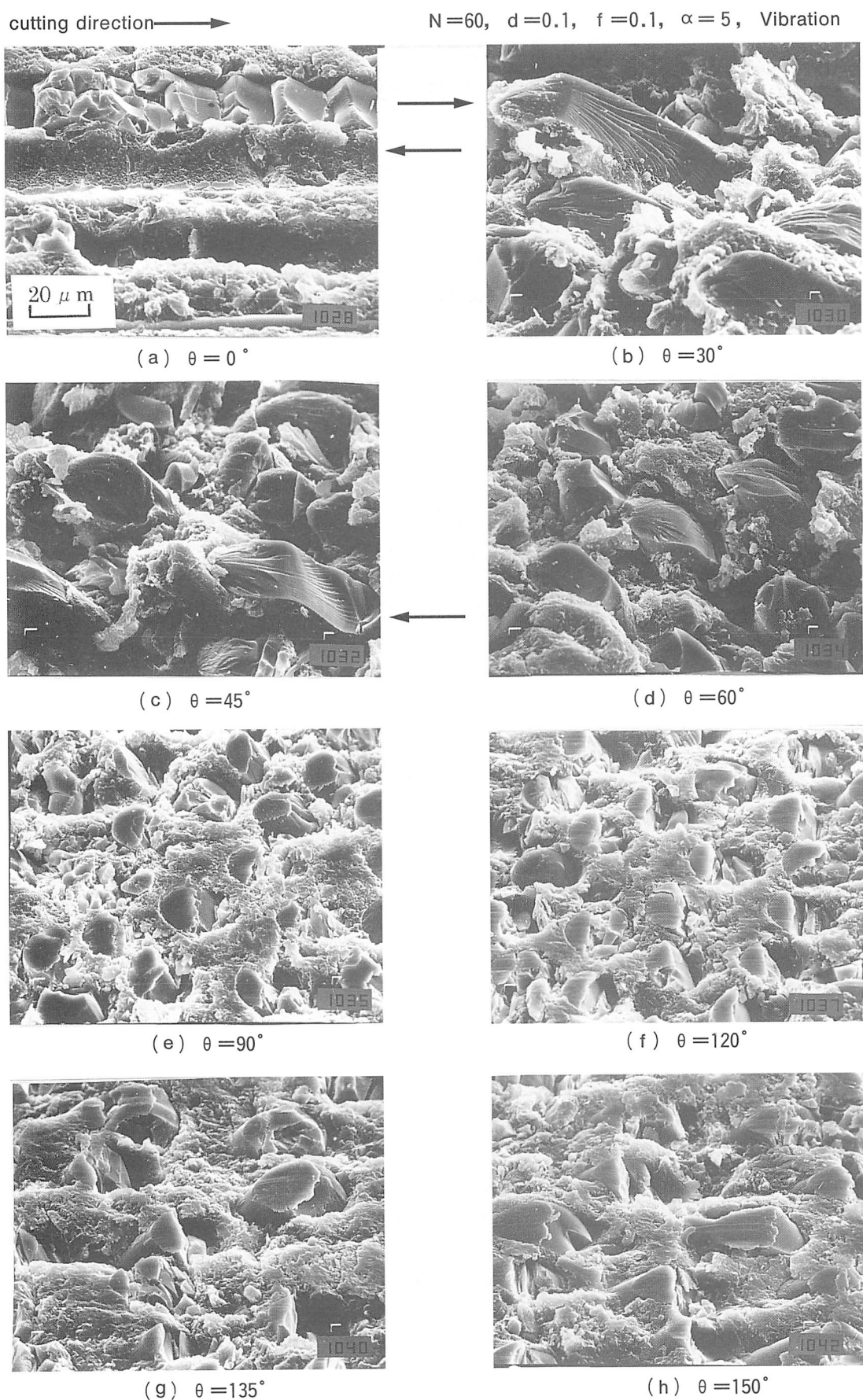


Photo. 1 SEM photograph of surface finish at the Fider angle

Table 1 Condition of the Cutting

|               |        |                                  |
|---------------|--------|----------------------------------|
| Cutting speed | rpm    | 60, 120, 180, 240                |
|               | m/s    | 0.42, 0.85, 1.27, 1.70           |
| Feedrate      | mm/rev | 0.1                              |
| Depth of cut  |        | 0.1, 0.5, 1.0, 1.5               |
| Cutting fluid |        | dry                              |
| Tool material |        | K-10(WC)                         |
| Rake angle    | deg    | -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20        |
| Fiber angle   | deg    | 0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150 |

Table 2 Condition of the Ultrasonic Vibration

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| Frequency              | 19.5±1.5 (KHz)         |
| Amplitude              | 30 <sup>P-P</sup> (μm) |
| Pitching angle         | 0 (deg)                |
| Critical cutting speed | 1840 (mm/s)            |
| High-frequency output  | 120 (W)                |

2. 実験方法

Table 1に切削条件を、Table 2に超音波振動の条件を示す。被削材はガラス繊維（E－ガラス）で強化された不飽和ポリエステル樹脂の連続引き抜き成型材（板厚 5 mmの一方方向性 GFRP 型材）でガラス含有量は50wt%である。繊維の方向を 0～150° になるように試験片を切り出した。実験装置装置は別報<sup>6)</sup>に詳しいので割愛する。

3. 仕上げ面の生成

仕上げ面の生成形態について、金枝の 3 つの分類<sup>5)</sup>を軸に比較検討を試みる。

3. 1 繊維角の変化と仕上げ面

Photo.1は繊維角を 0～150° に変化させた場合のSEM写真である。切削方向は左から右の方向で、加工条件は写真上部に示している。

(a) の矢印で示した凹んだ部分は、繊維の剥離痕である。繊維角 0° の場合、繊維方向と切削方向は平行になる。工具刃先前方の繊維は切削の力に抗し切れず樹脂から座屈と剥離を同時に起こしながら切屑となり（繊維座屈形）切削が進行している。写真上部に周期的な凹凸の痕が見られる。この周期を計測すると約20 μmであった。切削速度から逆算した、超音波振動の 1 サイクル間の材料の移動距離は21.5 μmであり、凹凸は振動による切削痕と認められる。工具振動の痕跡が見られるのはこの繊維角の場合だけであった。

(b) の矢印で示した繊維の突端が、曲げにより

繊維が引張り破壊し始めた部分で、いわゆるハックルマーク（Hakle Mark）が見られる。その後亀裂は放射状に繊維全体に広がるとともに、繊維に沿って割裂し、根元の樹脂付近で繊維表面に達している。従って繊維の破断面は切刃の下側にある。破壊された繊維の断面積が大きく、繊維間の樹脂は脆性破壊し切削面から後退している。Photo.2は倍率を低くして繊維全体を見たものである。逆目状態の切削のため繊維が周期的に大きく剥離している。これは超音波の振動によるものとは異なり、層間剥離をした典型的な形状（層間剥離形）を示している。王<sup>7)</sup>、佐久間<sup>8)</sup>の切削機構の模型で示されたものと全く同一である。剥離の周期は超音波振動の周期（5×10<sup>-5</sup>sec）よりはるかに大きく（10<sup>-3</sup>sec）、切削系の振動周期で発生していると思われる。仕上げ面の凹凸は大きく、切削面も後退しており、計測によっても、粗さ、過切削深さ（depth of over cut）<sup>9)</sup>が大きいことが確かめられ（Fig.1）ている。photo.3は切屑の断面を示す。破壊の起点、進行状況がよ

N=240, f=0.1, d=0.1, α=2.5°, θ=30°

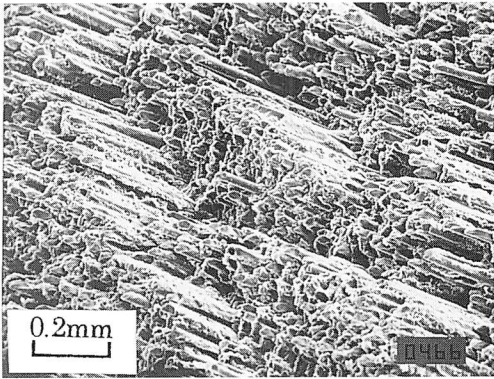


Photo. 2 Phenomenon of the tear in the fiber

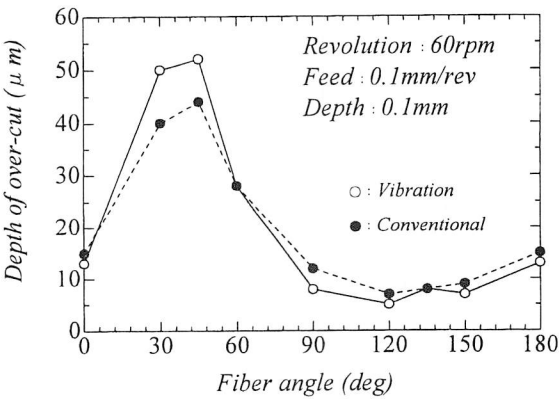
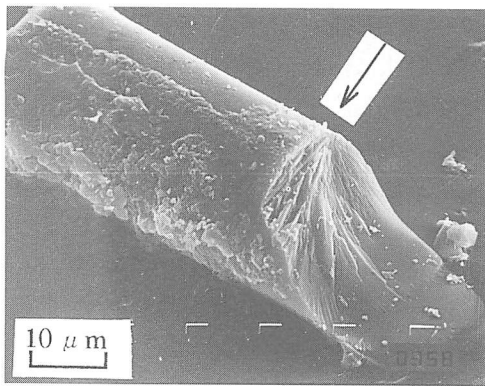


Fig. 1 Relation between depth of over-cut and fiber angle

$N=60, f=0.1, d=0.1, \alpha=2.5^\circ$



(a)  $\theta=30^\circ$

Photo. 3 SEM photograph of the chip

く観察される。

(c) 繊維傾き角が大きくなるにつれて破面の面積は小さくなってきている。樹脂と繊維の剥離部分も小さくなってきている。破面が逆S字の形になり、引っ張りによる亀裂破壊の後の圧縮破壊に転じた部分(矢印部)がコンプレッションリップ(compression lip)として表れている。

(d) 繊維角 $60^\circ$ の場合も破壊形態は基本的に同じで、瞬間的に引っ張り破壊したハックルマークが見られる。

(e) 繊維角が $90^\circ$ の場合、工具は繊維をせん断するように動くが、工具のGFRPへ加えられる力は刃先前方斜め下方である。従って破壊は繊維に垂直な面では無く、破壊面は破壊の起点から斜め下方に向かっている。繊維は曲げによる引っ張り破壊をおこす。これを1次破壊とすると、次に繊維破壊の起点となった部分の工具背面による2次破壊が発生している。半月状の黒く見える部分は平滑で、コンプレッションリップに似ているが、これは突き出た繊維部分が工具背面の擦過によって破壊されるとともに工具との摩擦によって塑性変形し生成されたもので、(c)におけるリップとは異なる。この面の端部には延性材料の切削時にみられるようなかえり現象がみられ、ガラスの延性モード切削<sup>10)</sup>に似た状態が観測される。繊維間の樹脂は破壊除去されずに残っており、仕上げ面粗さは急に良くなる。

(f) 繊維角 $\theta$ が大きくなり切削方向と同一方向(順目)になるといわれる繊維裁断型になっているが、その生成過程は幾分異なる。工具の進行により刃先前方の繊維が裁断されるが、破壊は工具側から一気に発生し、破面は切削方向に直角になっている。繊維は樹脂とともに刃先前方に圧縮

されるが、繊維は全体が引っ張りを受け破断している。次に樹脂面から飛び出たエッジ部分が、2次破壊し、平滑な部分が樹脂と同一の平面にあることが観察できる。過切削深さは逆目切削の場合に比べ非常に少なくなっている。

王<sup>7)</sup>は繊維角 $\theta$ が大きくなると繊維の破断開始点は切刃の反対側になりハックルとコンプレッションリップの位置が反対側になると述べているが、破壊は刃先側から一気に発生し、その後の工具背面の干渉によってコンプレッションリップに似た摩擦痕が出来ると考えられる。ガラスは脆性材料であるが、亀裂破壊のみで仕上げ面が生成されるのではなく、塑性変形も関係していると思われる。

(g) 繊維角が大きくなるにつれ2次破壊部の面積も増大している。また面の端部のかえりも顕著になっている。

(h) 繊維角 $150^\circ$ の場合は繊維が大きく傾いており、繊維断面の水平方向長さも増大するので振動による切削回数が増え<sup>11)</sup>、2次破壊部の面積がさらに増している。

### 3. 2 振動の有無

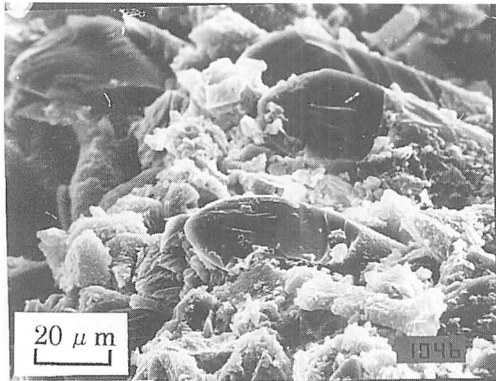
Photo.4は振動なしの場合の仕上げ面の状態を示している。繊維角の変化による仕上げ面は振動ありの場合と基本的に同じであった。(a)は繊維角 $30^\circ$ の場合である。破面は振動ありの場合と比べ小さい。これは切削時の衝撃力の違いによるものと思われる。(b)は繊維角 $150^\circ$ の場合である。繊維の2次破壊面が振動ありに比べ小さい。振動なしは繊維を1回擦過するだけであるのに対し、超音波振動の場合工具が複数回繊維上を擦過するためが大きくなったと考えられる。

### 3. 3. すくい角

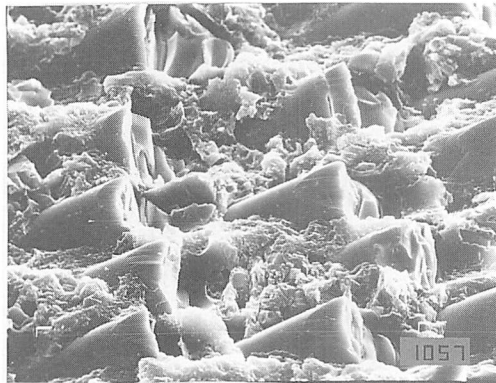
Photo.5はすくい角 $-10^\circ$ と $+20^\circ$ の場合のSEM写真である。繊維角はいずれも $60^\circ$ の逆目である。 $-10^\circ$ の場合、繊維間の樹脂が脆性破壊して除去され面が後退し、繊維が突き出た状態となっている。工具の切削力が斜め下方に向き、樹脂を脆性破壊したため繊維のみが残ったと思われる。 $+20^\circ$ の場合、工具の切れ味がよく、切削力も切削方向に近い方向に向き、工具の食い込みがよいので繊維の破断がスムーズに進行し、繊維間の樹脂の影響が少なかったものと思われる。



$N=60, d=0.1, f=0.1, \alpha=5^\circ$



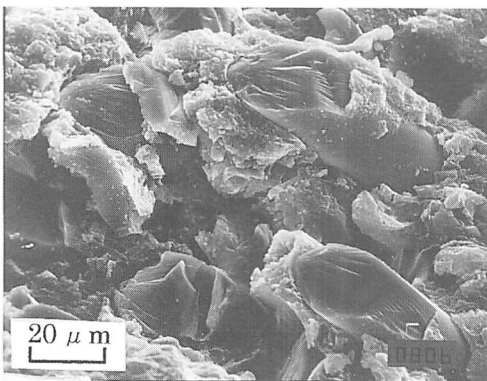
(a)  $\theta=30^\circ$



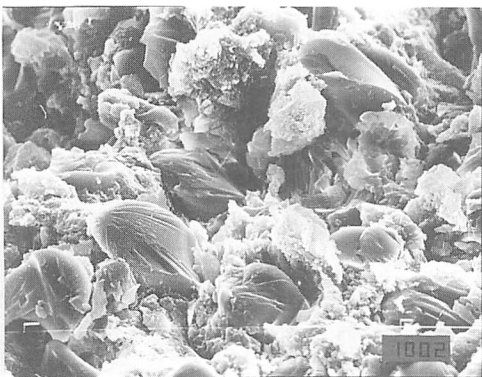
(b)  $\theta=150^\circ$

Photo. 4 SEM photograph without vibration

$N=60, d=0.1, f=0.1, \theta=60^\circ$



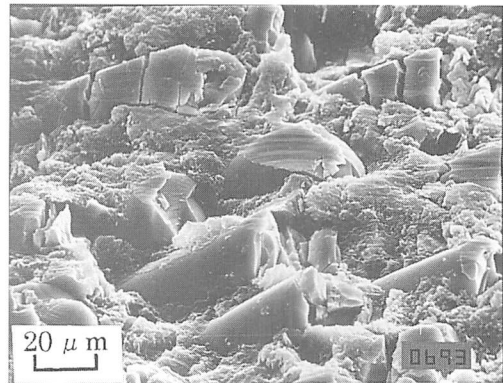
(a)  $\alpha=-10^\circ$



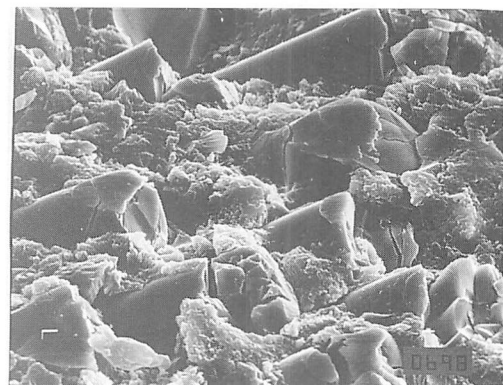
(b)  $\alpha=20^\circ$

Photo. 5 Effect of rake angle

$N=60, f=0.1, \alpha=2.5^\circ, \theta=150^\circ$



(a)  $d=0.5$



(b)  $d=1.5$

Photo. 6 Effect of depth of cut

### 3. 4 切り込み

Photo. 6 は切り込み0.5と1.5の場合を示している。切り込みが小さい場合、繊維と樹脂の面は比較的そろっており、樹脂、繊維双方に工具による擦過痕が見られる。切り込みが大きい場合、切削力によって繊維間の樹脂を亀裂破壊し、繊維が樹脂面より出ており、仕上げ面の悪化が見られる。

### 3. 5 切削速度

切削速度についてはSEM写真上での変化は観測されなかった。これは切削速度が増加しても、相対切削速度や平均衝撃力があまり変化しないため切削現象の変化につながらなかったものと思われる。しかし、繊維角によっては仕上げ面粗さは増加<sup>6)</sup>していた。

## 4. おわりに

超音波振動によりGFRPを切削し、仕上げ面をSEMにより観察し次の結果を得た。

(1) 繊維角の違いによる仕上げ面生成は、SEM

観察の限りでは、a) 繊維座屈形 (Fiber buckling type), b) 層間剥離形 (delamination type), c) 繊維裁断形 (Fiber cutting type) の3つの繊維破壊形式に集約された。これは振動無しでの切削の場合と同様である。

(2) 超音波振動切削の場合でも、繊維角  $\theta$  が小さいと繊維の剥離現象が顕著に発生するがその周期は大きく、切削系の振動周期で発生している。

(3) 繊維角  $\theta$  が大きくなり繊維裁断形になると、破断した繊維が、工具逃げ面により2次破壊され、擦過により塑性変形した平滑な面が生成される。

(4) 切削速度による仕上げ面生成はSEM上では変化が認められない。

複合材料の超音波振動切削加工の機構は非常に複雑で、切削抵抗や仕上げ面粗さ結果のみでは十分とは言えない。本報では、仕上げ面のSEM観察を中心に考察したが、切り屑や三次元粗さ測定、FEM解析など多角的総合的検討が必要と思われる。

### 参考文献

- 1) 花崎伸作, 他1名, FEMによるCFRPの切削機構の解析, 日本機械学会論文集, 61巻583号, P427 (1995)
- 2) 佐久間敬三, FRPの切削における工具材種と摩耗特性, 機械と工具第29巻8号, P105 (1985)
- 3) 金枝敏明, 他1名, CFRPの切削機構に関する研究, 精密工学会誌, JSPE-56-06, P1058 (1990)
- 4) 新井実, 短繊維強化アルミニウムの切削仕上げ面品位, 精密工学会誌, JSPE-57-01, P172 (1991)
- 5) 金枝敏明, 他1名, CFRPの切削機構に関する研究, 精密工学会誌, JSPE-55-08, P1456 (1989)
- 6) 池田慎一, 中津正志他1名, GFRPの超音波振動切削, 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第31号, P31 (1996)
- 7) 王 曉渡, 他2名, 繊維強化複合材料の切削加工に関する研究, 精密工学会, JSPE-57-08, P1437 (1991)
- 8) 佐久間敬三, 他1名, 強化プラスチック (GFRP) 切削における工具摩耗, 日本機械学会論文集 (C編) 48巻436号, P1938 (1982)
- 9) 池田慎一, 中津正志他1名, 難削材の超音波振動切削, 日本機械学会北海道支部第35回講演会, P87 (1995)
- 10) 森脇 俊道, 他2名, ガラス延性モード超音波振動切削加工の研究, 精密工学会春季学術講演会講演論文集, P249 (1991)
- 11) 池田慎一, 中津正志他1名, 超音波振動切削によるGFRPの切削, 1997年度精密工学会北海道支部講演会論文集, P62 (1997)

(平成10年11月30日受理)