

GFRPの超音波振動切削

池 田 慎 一*・中 津 正 志**・田 頭 孝 介***

Ultrasonic Vibration Cutting of GFRP

Shin-ichi IKEDA, Masashi NAKATSU and Kohsuke TAGASHIRA

Abstract

The effect of angle between cutting direction and unidirectional glass fiber on the roughness of cutting surface of GFRP by ultrasonic vibration cutting has been studied. The ultrasonic vibration of 19.5kHz in frequency and 15 μ m in amplitude are applied to the tip of cutting tool (the Tungsten Carbide K-10) at an angle of 4deg to the cutting direction. The results obtained are as follows: (1) For a fiber angle of 30-60deg, the surface roughness by vibrated cutting is worse than by conventional cutting. The increase in the roughness by ultrasonic vibration cutting depends on the depth of tear due to the separation between fiber and matrix resin. (2) The roughness is improved for a fiber angle of 90-150deg. It should be by influenced the decrease in surface roughness of matrix resin by vibration cutting. (3) The brittle fracture mode of a glass fiber has an effect on the roughness. (4) Increasing cutting speed, feed and depth of cut, the surface roughness increases. (5) For a fiber angle of 60 deg, the chip-breaker reduce the roughness.

Key Words : Ultrasonic Vibration Cutting, GFRP, E-glass, Unsaturated polyester resin, Fiber angle, Glass fiber, Surface roughness

1. 緒 言

F R P（繊維強化プラスチック）は従来の金属に比べ、比強度、比弾性率、耐疲労性、耐摩耗性、耐食性、振動減衰性などが高いといった数多くの特性を有する。その製品は、宇宙航空機用をはじめ車両、船舶等、建築用部材からスポーツ、レジャー用品に至るまで多くの分野で実用化が進んでいる。また、その特性の一つとして成形の容易性があげられ、成形品をそのまま部品として使用することが多いが、機械部品として使用する場合に関しては切断、穴あけ、旋削、フライス加工等の機械加工が必要となる。しかし、F R Pの加工性は極めて悪く、これらの切削加工を行う場合、金属切削とは異なり、急速な工具寿命の低下、繊維とマトリックスの剥離等による加工表面品位の劣化、クラック等による欠陥層の発生等が問題と

なっている。F R Pの機械加工に関しては、工具摩耗を中心として、加工表面生成機構、巨視的な切削機構の解析などが研究されており^{1)~3)}、最近ではF E MによるF R P切削のシミュレーションも行われている⁴⁾。それらの研究の中には、二次元切削におけるF R Pの切削機構を切削方向と繊維のなす角度の変化にともなう繊維の破壊形態などによって解析している場合が多い。しかし、実際のF R P加工では、繊維角度に応じた切削方向を選ぶことは不可能であるため、あらゆる繊維角度に対し安定した切削面を得ることは難しい。

そこで、本研究では、これらの問題を解決するための基礎研究としてG F R Pの切削加工に精密加工の一つである超音波振動切削を適用し、その効果を調べた。

2. 実験方法

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抜成形型材（板厚 5 mmの一方方向性G F R P型材）で、そのガラス

* 助 手 機械工学科

** 助教授 機械工学科

*** 教 授 室蘭工業大学

Table 1 Mechanical properties of GFRP

Fiber material	E-glass	
Matrix material	Unsaturated polyester resin	
Fiber content	wt%	50
Diameter of fiber	μm	20
Tensile strength	MPa	196~539
Tensile modulus	GPa	15~30
Bending strength	MPa	196~686
Compressive strength	MPa	147~490
Shearing strength	MPa	137~176

含有量は50wt%である。Table 1にこのGFRP型材の特性値を示す。この型材を切削方向に対する繊維の角度(以下、繊維角とする)が $0 \sim 150^\circ$ まで 30° おきに切断したものを切削用試料($50 \times 50 \times 5\text{t}$)とした。

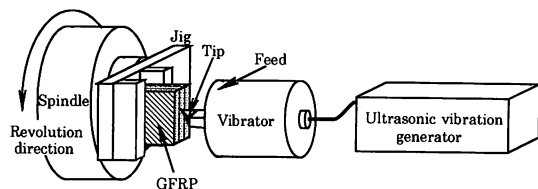


Fig. 1 Schematic drawing of experimental apparatus

Fig. 1に実験装置の概要を示す。切削は3枚の試料を治具で固定し、NC旋盤で断続的に行った。

チップは超硬三角チップ(K-10, ノーズ半径 0.2mm)を標準とし、チップブレーカ付きのチップ(チップのすくい角: 約 12°)も使用した。この標準チップを専用ホルダーに取付けた時、切削工具としてのすくい角は約 2.5° となる。

Table 2 Cutting conditions

Cutting speed	rpm	60, 120, 180, 240
	m/s	0.4, 0.8, 1.2, 1.6
Feed	mm/rev	0.1
Depth of cut	mm	0.1, 0.5, 1.0, 1.5
Cutting fluid		Dry
Tool material		K-10(WC)
Rake angle of tool	deg.	-10, -5, 0
Fiber angle of work	deg.	0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150

Table 2に切削条件を示す。前加工は振動切削を適用したため、主軸の回転数は装置の推奨切削速度以下の 60rpm (切削速度 $v = 0.4\text{m/s}$)とし、送り 0.1mm/rev 、切込み 0.5 及び 0.3mm で行った。

Fig. 2に振動切削の概要を示すが、出力 120W 、周波数 $f = 19.5\text{kHz}$ 、振幅 $a = 15\mu\text{m}$ でチップの先端を切削方向に対し 4° 傾けた方向に振動させた。このときの切削速度 $v = 0.4\text{m/s}$ は振動切削の効

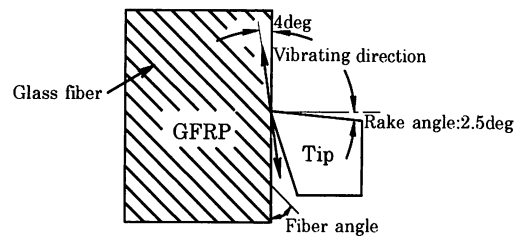


Fig. 2 Schematic drawing of ultrasonic vibration cutting system

果が得られる臨界切削速度 1.8m/min 以下($v < 2\pi af$)を満足している。

以上の条件で繊維角 $0 \sim 150^\circ$ のGFRP試料の超音波振動切削及び通常切削を行った。切削面の表面粗さ(JIS B 0601 最大高さ R_y)は触針式の万能表面形状器で測定し、切削表面の観察は走査型電子顕微鏡で行った。

3. 実験結果及び考察

3. 1 表面粗さ(R_y)に及ぼす繊維角度の影響、および超音波振動による効果

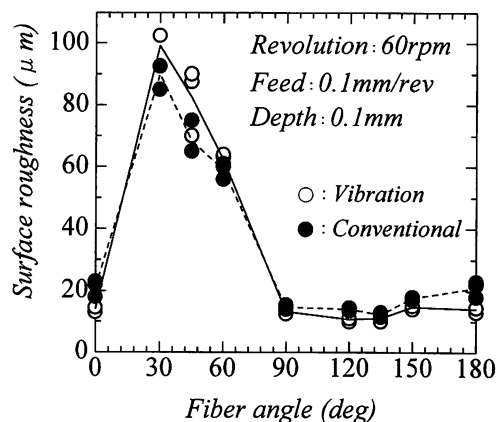
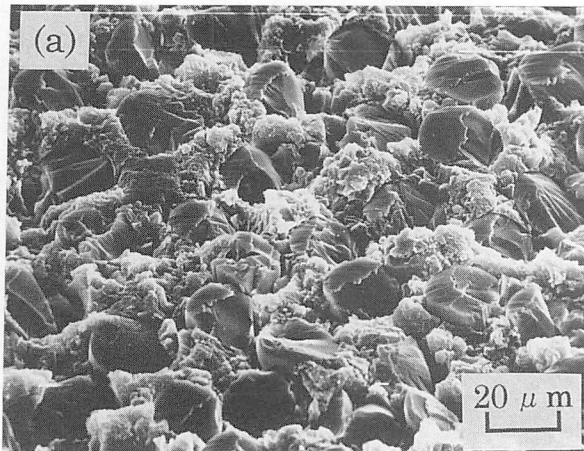


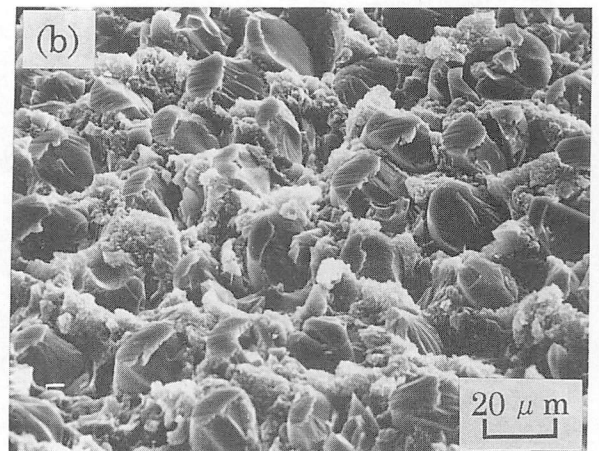
Fig. 3 Relation between surface roughness and fiber angle

Fig. 3はGFRPの超音波振動切削及び通常切削を行ったときの繊維角と切削面の表面粗さの関係を示す。振動の有無によらず、表面粗さは繊維角 $30 \sim 60^\circ$ では大きく、逆に繊維角 $90 \sim 150^\circ$ では小さい。これは繊維角 $30 \sim 60^\circ$ の場合、まず、切削工具の先端で繊維が起こされる。次に、切削工具の進行により繊維が曲げを受け、繊維とマトリックス樹脂の結合力の弱いところなどから繊維と樹

Cutting direction →



(a) Ultrasonic



(b) conventional

Photo. 1 SEM photographs of cutting surface(fiber angle : 90deg)

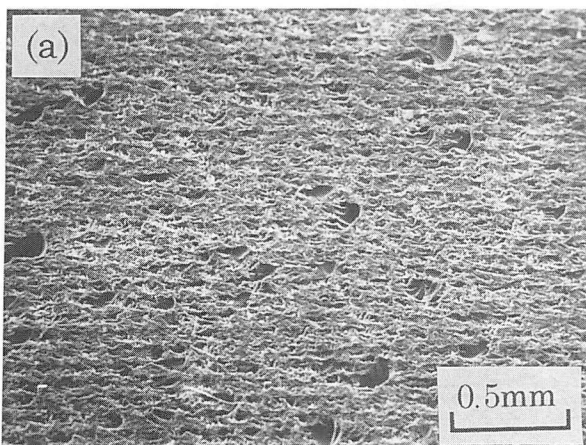
脂の剥離が起きる。そして、剥離が起きることにより切削面はむしり取られ、切削面粗さが悪化したものと思われる。繊維角90~150°場合の切削面粗さが比較的小さいのは、繊維と樹脂の剥離が起これないためであろう。また、繊維角0°の場合は繊維が樹脂からむしり取られることが多いが、繊維角30~60°のように切削面内部に剥離が進行せず、切削面粗さは最大でも繊維径の20μm程度となる。

ところで、繊維角が30~60°では通常切削に比べ振動切削の方が約10%表面粗さは大きい。これは上記のような剥離現象が起こった場合、振動の有無により剥離の進行過程が異なるものと考えられる。切削速度が一定の通常切削は起こされた繊維

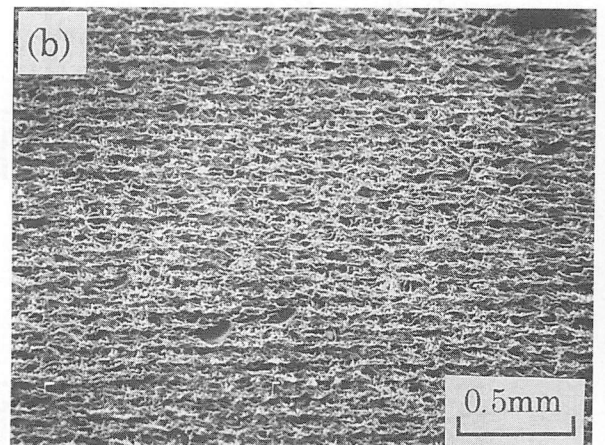
に対し、連続した力を作用させ剥離を進行させる。一方、切削速度が周期的に変化する振動切削は起こされた繊維に対し、断続的な力を作用させるため、繊維と樹脂の剥離が徐々に進行する。このとき振動切削による衝撃力は繊維が樹脂に固定されていないため、繊維を破壊するまでには至らない。以上のように考えると、繊維角30~60°の切削面粗さは振動切削により繊維と樹脂の剥離が促進し、さらに悪化したと説明できる。

また、繊維角90~150°のときは通常切削に比べ振動切削の方が約15%表面粗さが小さい。振動切削による切削面粗さの減少は以前に報告⁵⁾されていたが、具体的な要因は記述されていなかった。Photo. 1に繊維角90°の振動切削及び通常切削に

Cutting direction →



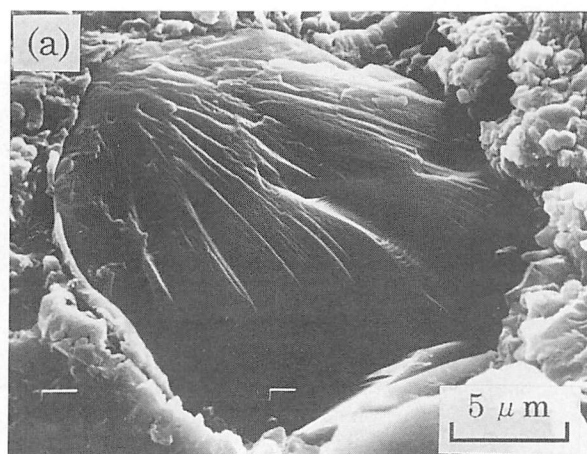
(a) Ultrasonic



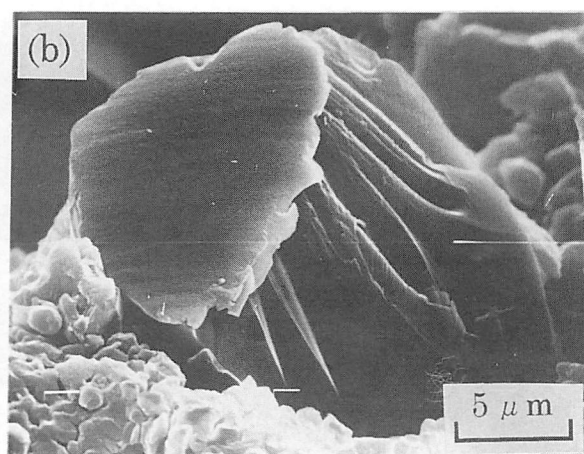
(b) conventional

Photo. 2 SEM photographs of cutting surface(matrix resin)

Cutting direction →



(a) Type I



(b) Type II

Photo. 3 SEM photographs of brittle fracture surface of a glass fiber

よる切削面のSEM像を示すが、振動の有無による大きな違いは観察されなかった。そこで、繊維の周りの樹脂の状態に着目し、繊維を含まないマトリックス樹脂の振動切削および通常切削を行った。Photo. 2 にマトリックス樹脂切削面のSEM像を示す。樹脂の切削においては、通常切削に比べ振動切削の方が切削面に貝殻状のむしれが多く観察される。しかし、むしれを除く切削面は滑らかで表面粗さ(振動切削： $3.2\mu\text{m}$ ，通常切削： $4.2\mu\text{m}$)も小さい。通常、マトリックスの不飽和ポリエステル樹脂を切削した場合、切削工具刃先より発生したクラックにより切屑がむしり取られる亀裂型となる⁶⁾ため、切削面粗さに悪影響を与える。しかし、この亀裂型切屑は切削速度の増加により小さくなる⁷⁾ことから振動切削のような衝撃力を

伴う切削方法の適用により、微細な亀裂が発生し切屑が小さくなり、切削面粗さが減少したのと思われる。また、Photo. 2 に示されるようなむしれはどのGFRP試料の切削面においても観察されていない。つまり、繊維角 $90\sim 150^\circ$ の範囲における振動切削による切削面粗さの減少は、マトリックス樹脂そのものの粗さが減少したことに大きく影響されている。

3. 2 切削面における繊維破断面の生成過程

Photo. 3 に繊維角 90° の試料を振動切削したときの切削面における2種類の繊維破断面を示す。Photo. 3 (a) は繊維破断面の先端に脆性破壊の起点があり、この起点から切削方向に放射状の模様が観察された。同様に(b)は繊維先端に切削方向

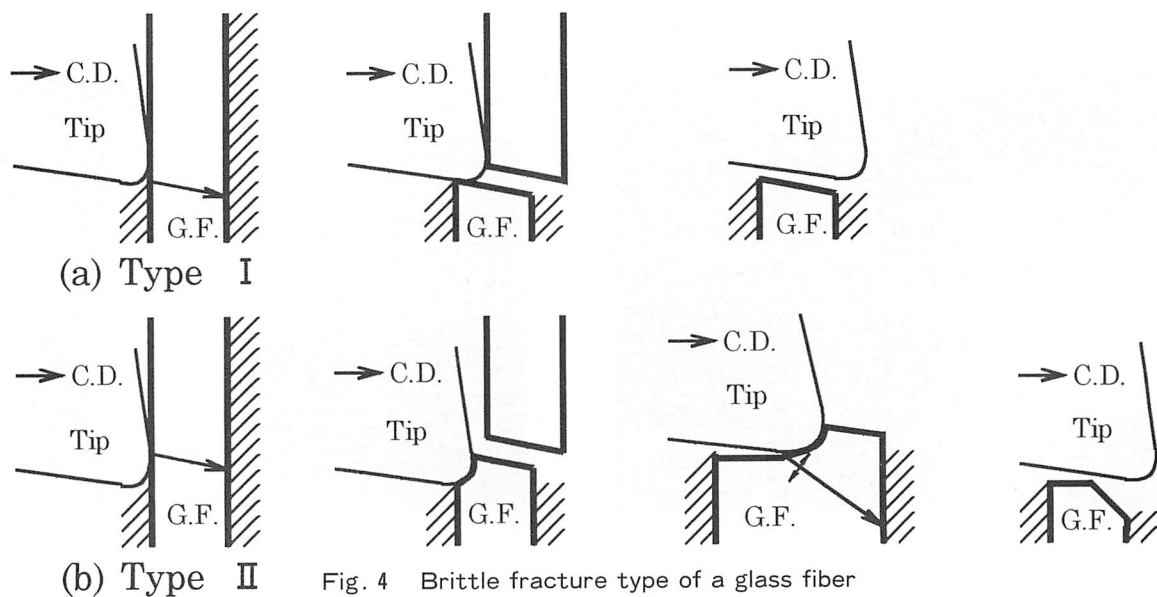


Fig. 4 Brittle fracture type of a glass fiber

に対し平行で平らな部分があり、繊維断面途中から斜め下方に模様が観察された。(a), (b)の繊維破断面より観察された模様はハックルマークと呼ばれ、クラックの進行方向や進行速度などを示す⁸⁾。

Fig. 4にPhoto. 3 (a), (b)の繊維破断面の生成過程を模式的に検討した結果を示す。Fig. 4 (a)は切削工具の進行に伴い切削工具位置より下方の繊維側面に存在する欠陥などを破壊の起点とし、クラックが発生し、切削工具による力の作用する方向へ進行し脆性破壊が起こった繊維破断面である。このとき繊維先端の破面にはハックルマークが明確に存在する。次に、Fig. 4 (b)は切削工具先端と繊維側面の接触点を破壊の起点とし、その起点からクラックが進行し(a)のような脆性破壊が起こる。さらに、この繊維破断面は工具先端丸み部分の下部により圧縮され塑性変形を受け、繊維断面に平らな面を形成する⁹⁾。そして、平らな面の形成途中、切削工具丸みの下部による圧縮力は繊維を引張りで破壊させる力となり下方へ破壊が進行する。

繊維角90°の切削面にFig. 4 (a)と(b)の繊維破断面は存在するが、実際はPhoto. 1に示すように、ほとんどの繊維が(b)の破壊形式である。しかし、振動の有無により繊維破断面の形状が多少異なる。通常切削では繊維先端の平らな部分の形状が比較的同一であるが、振動切削ではその形状は同一ではない。これは工具先端による臨界速度の衝撃力がガラス繊維側面に必ず作用しているとは限らないためであり、繊維によっては通常切削程度、あるいはそれ以下の衝撃力しか作用していない場合も存在する。しかし、振動切削による臨界速度の衝撃力が繊維に作用した場合は、切削工具

先端の丸みにより平らな部分が形成された後、切削方向成分の力が通常切削に比べ大きいために引張りによるクラックの進行方向は切削方向に傾くものと思われる。このように切削面粗さに大きな影響を与える繊維の破壊形式は振動切削、通常切削共に(b)の破壊形式の脆性破壊であるが、切削面粗さの悪化を抑制する方法としては振動切削が効果的であると思われる。

Photo. 4に繊維角が45°の試料を振動切削したときの剥離開始付近における繊維破断面のSEM像を示す。この繊維破断面の形状はPhoto. 3に比べ複雑な形状であるが、最初に工具が接触する繊維の先端はPhoto. 3 (a)の破壊の起点が観察された。この起点から進行したハックルマークは繊維中心付近で消滅し、再度ハックルマークは現れ軸方向に進行した後、繊維は破壊した。最初の切削方向に平行な破面は工具の力の作用する方向に破壊が進行したためで、軸方向にハックルマークが進行したのは繊維が切削工具すくい面で曲げを受けていたためであると思われる。

3. 3 表面粗さに及ぼす切削速度の影響

Fig. 5に繊維角30°の試料の振動切削および通常切削したときの切削速度と切削面の表面粗さの関係を示す。振動の有無に関係なく、切削速度の増加に伴い切削面粗さは増加した。また、通常切削に比べ振動切削の方が切削速度の増加に伴う切削面粗さの増加率は大きい。繊維角30°の試料における切削速度の増加は繊維を起こす力を増大させ、繊維と樹脂の剥離を促進させる。その結果、切削面に発生するむしれにより切削面粗さが増加するものと思われる。さらに、振動切削は剥離現

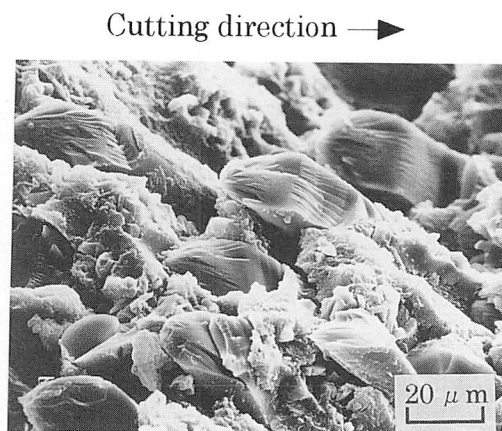


Photo. 4 SEM photograph of ultrasonic vibration cutting surface (fiber angle: 45deg)

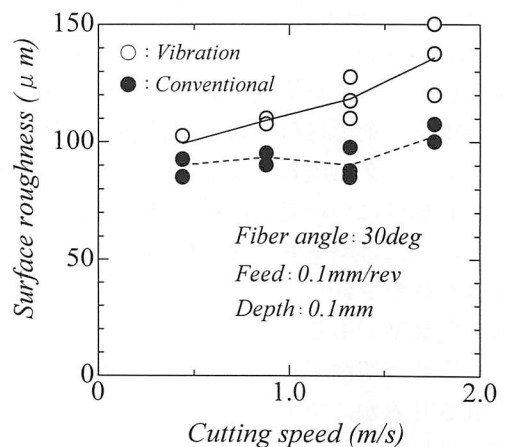


Fig. 5 Relation between surface roughness and cutting speed

象を促進させる効果があるため、切削速度の増加による切削面粗さの増加の割合が大きくなったものと思われる。

3. 4 表面粗さに及ぼす切込みの影響

Fig. 6 に繊維角 90° の試料の振動切削および通常切削したときの切込みと切削面粗さの関係を示す。振動の有無に関係なく、切込みの増加に伴い切削面粗さは増加した。その増加率は通常切削の方が大きい。これはマトリックス樹脂を切削したときの切屑が亀裂型であるため、切込みの増加により樹脂のみが切削予定面よりも下方にむしり取られることに起因すると思われる。しかし、振動切削の場合はむしれ現象を抑制する作用があるために、切込みの増加に伴う切削面粗さの増加率が通常切削よりも小さくなったものと思われる。

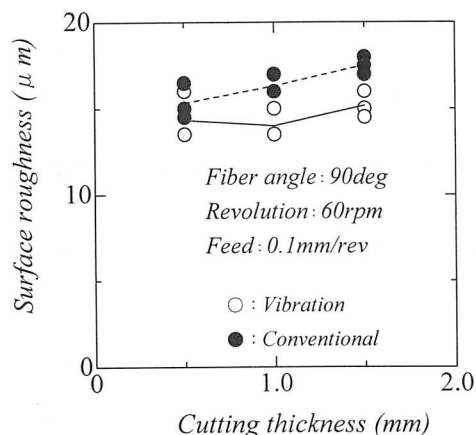


Fig. 6 Relation between surface roughness and cutting thickness

3. 5 切削面に及ぼす送りの影響

Photo. 5 に繊維角 90° の試料を送りを 0.3mm/rev で振動切削したときの切削表面のSEM像を示す。通常、送りが切削工具のノーズ半径よりも大きい場合、金属材料の切削では切削工具によるフィードマーク（山および谷）が明確に現れる。GFRP試料についても同様であるが、フィードマークの山にはマトリックス樹脂を伴わないガラス繊維が観察された。これも樹脂を切削したとき切屑が亀裂型であることが影響していると思われる。つまり、切削工具によりガラス繊維は断続的に切削させるが、マトリックス樹脂は連続的に切削される。そのため、切削工具の進行により、フィードマークの山を形成するマトリックス樹脂には亀裂が伝播し、むしり取られるが、ガラス繊維には伝播せずに、ガラス繊維のみが残存したものと思われる。

Cutting direction →

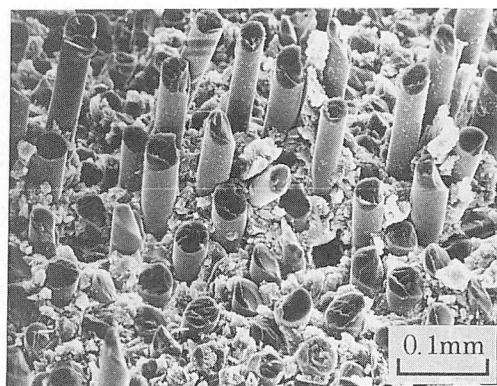


Photo. 5 SEM photograph of ultrasonic vibration cutting surface (fiber angle: 90°)

維には伝播せずに、ガラス繊維のみが残存したものと思われる。

3. 6 表面粗さに及ぼすチップブレイカの効果

Fig. 7 はGFRP試料の振動切削を行ったとき、チップブレイカ（すくい角：約 12° ）の有無による繊維角と切削面粗さの関係を示す。切削面粗さはチップブレイカにより、繊維角 30° では25%増加し、 45° で10%減少、 60° では50%減少した。また、繊維角 $90^\circ \sim 150^\circ$ では約30%増加した。繊維角 30° の場合は振動切削によって増加した切削面粗さがさらに増加した。これはチップブレイカにより切削工具のすくい角が大きくなったため、切削工具先端がくい込むことによるくさび作用が大きく作用し、繊維と樹脂の剝離を促進させたために切削面粗さが増加したものと思われる。また、繊維角 60° においてはチップブレイカにより切削面に対する

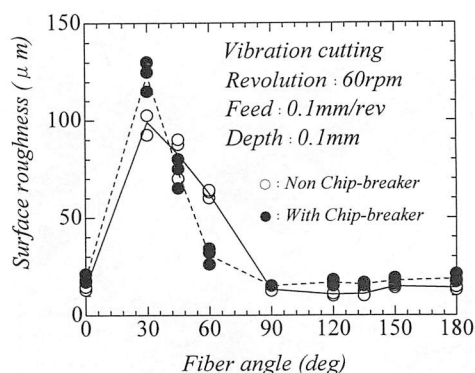


Fig. 7 Effect of chip-breaker on surface roughness by ultrasonic vibration cutting

切削工具のすくい角が 18.5° （チップの傾き： 2.5° ＋振動の方向： 4° ＋チップブレイカの傾き： 12° ）となり、繊維に与える曲げの影響が緩和されたため切削面粗さが減少したと思われる。繊維角 $90\sim 150^{\circ}$ においては切削工具先端によるくさび作用で繊維の周りのマトリックス樹脂がむしり取られたために切削面粗さが増加したと思われる。

通常切削の場合も同様の結果が得られたが、繊維角 60° におけるチップブレイカによる切削表面粗さの減少量は振動切削の場合よりも小さく、繊維角 $30, 45^{\circ}$ においては振動切削の場合よりもチップブレイカにより切削面粗さは増大した。

4. 結 言

- 1) 繊維角 $30\sim 60^{\circ}$ のGFRP切削では超音波振動切削により切削面粗さが悪化した。これは振動切削により剥離現象が促進したことに起因する。
- 2) 繊維角 $90\sim 150^{\circ}$ のGFRP切削では超音波振動切削により切削面粗さが向上した。これはマトリックス樹脂そのものの粗さの向上が影響している。
- 3) 繊維角 90° の試料の繊維破断面より超音波振動切削は切削面粗さの向上に効果的である。
- 4) 切削速度、切込み、送りの増加により切削面粗さは悪化した。しかし、超音波振動切削を適用

することにより切削面粗さの悪化は緩和された。

- 5) すくい角 12° のチップにより繊維角 60° の試料の切削面粗さが大幅に向上した。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、試料を提供して頂いた興和工業株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げます。また、本研究を遂行するに当たり終始御協力を頂いた室蘭工業大学技官の山森英明氏、研究生の三浦健一氏、大学院生の長谷地明博氏に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐久間敬三他：日本機械学会論文集 44巻 381号 P.1752
- 2) 王曉渡他：精密工学会誌, vol.55, No4, 709
- 3) 金枝敏明他：精密工学会誌, vol.55, No8, 1456
- 4) 帯川利之他：精密工学会誌, vol.57, No6, 1029
- 5) 飯島昇他：S61精密工学会秋季大会学術講演論文集 P.599
- 6) 橋本宇一他：非金属材料の精密加工法(上), 他人書館 P.16
- 7) 井上久弘他：精密機械, 39巻, 3号 P.41
- 8) 橋本宇一他：非金属材料の特殊加工法, 他人書館 P.4
- 9) 中島利勝他：精密工学会誌, vol.57, No7, 1253
(平成7年11月29日受理)

