

# 一方向性 CFRP（炭素繊維強化プラスチック）切削 におよぼす繊維角および工具すくい角の影響

金 枝 敏 明\*・高 橋 正 行\*\*

\* 岡山理科大学工学部 機械工学科

\*\* 岡山理科大学大学院 理学研究科

（昭和61年9月30日）

## 1. 緒 言

繊維強化プラスチックにはGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）などがあり、それらは従来の金属材料と比し比剛性，比強度，耐摩耗性，耐疲労性，耐薬品性，振動減衰性が良いなど数多くの利点を有している．CFRPの開発はGFRPのそれよりも遅く，1960年前後に英国で炭素繊維が開発され，1970年頃よりGFRPとともに航空機，ロケットの主要強度部材として使われ始め，最新のジェット旅客機ボーイング767に至ってはGFRPよりもCFRPの使用量が上まわっている．

しかし随分利点の多いCFRPも今後用途がますます広がるにつれて，その製品や部品の精度向上の必要性が高くなり，それとともに加工能率や精度が高い切削加工の重要性が増すことは必至であろう．それにもかかわらずCFRPの切削に関する研究は，工具摩耗の観点から研究したものがあつたもの<sup>1)2)</sup>，切削機構自体扱つた研究になるとほとんどなく，取扱つた Koplev の研究<sup>3)</sup>も調査した範囲が，繊維と切削方向とのなす角度が直角と平行のみと狭い．またプラスチック切削では金属切削より切削機構に大きく左右する工具すくい角の影響<sup>4)5)6)</sup>についても触れていない．

そこで本報ではその切削機構を大きく支配すると考えられる炭素繊維配向方向と切削方向とのなす角および工具すくい角に主として着目し，それらが切削機構および加工面への影響について調査する．

## 2. 実験装置および方法

今回はCFRP切削の基本特性を明らかにすることが目的のため，切削方式は解析の行いやすい二次元切削とする．二次元切削を実施するため，また被削材の炭素繊維の配向を実験時には容易に変化させやすいように Fig. 1 に示すような旋盤の刃物台の前後送り機構を利用した装置を実験装置に採用する．実験では工具④，および被削材③を切削過程

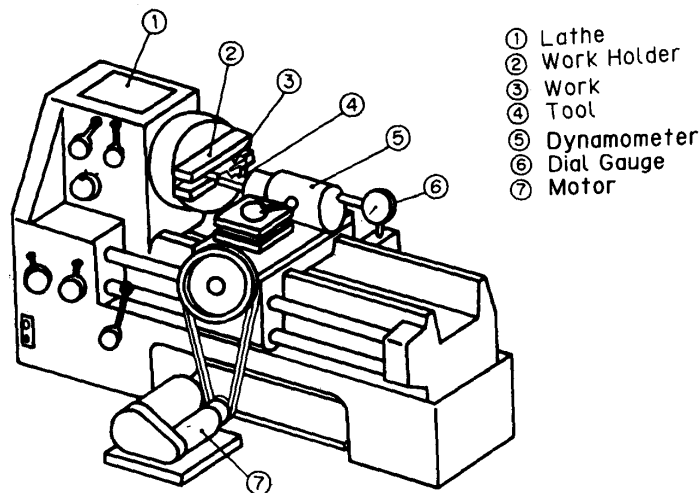


Fig. 1 Orthogonal Cutting Equipment

に外乱を与えないような高い剛性を有している刃物台および被削材保持台である四ツ爪チャック②に取り付ける。工具は刃物台によって正確で微小な位置決めが可能である。刃物台の駆動は旋盤内部のモーターからの振動や発熱の影響を避けるため、外部に設置したモーターにより行う。

被削材に用いたのはPAN系（ポリアクリロニトロ）の東レ株式会社製「トレカ」プリプレグ305である。今回は炭素繊維「トレカ」糸を一方向に引揃え、エポキシ樹脂を含浸し積層した一方向性の板材を用意する。

Tab. 1 に炭素繊維の物性値および機械的性質<sup>7)</sup>を、Tab. 2 にCFRPの機械的性質を示す。繊維の直径は8  $\mu\text{m}$  である。さらに Tab. 3 にマトリックスであるエポキシ樹脂の機械的性質<sup>7)</sup>を示す。

工具には、CFRPに対し耐摩耗性が優れているとされている超硬工具K10<sup>8)</sup>を採用する。工具すくい角は一般のプラスチック材料では切削現象に大きく影響をおよぼす<sup>9)</sup>ので  $\alpha = -10^\circ \sim 30^\circ$  の  $10^\circ$  おきとする。逃げ角もすくい角と同様に金属切削の場合より大きく影響をおよぼすとされており、大きな値が適切<sup>10)</sup>とされているので  $10^\circ$  とする。工具は、ダイヤモンド砥石 #800 で研磨仕上げをし、その後ノマルスキー型微分干渉顕微鏡を用いて、刃先の鋭利なものを選び、使用する。また、1回の実験ごとに研磨し直し、本質的な切削現象が得られるように心掛けた。

切削抵抗の測定はAST式の切削動力計を使用した。

切削速度は、ひずみ速度や発熱の影響が少なく、切削の基本特性が得られる極低速の20 mm/min である。

切込みは精密切削を考慮して0.1mm とする。

Tab. 4 に切削条件を示す。

なお繊維角とは Fig. 2 に示すように切削方向と繊維の配向方向とのなす角で、被削

Tab. 1 Material Properties of Carbon Fiber<sup>7)</sup>

Diameter of Carbon Fiber	8 $\mu$ m
Specific Weight	1.74
Tensile Strength	2800 MPa
Young's Modulus of Elasticity	240 GPa
Elongation on Fracture	0.5~1.8 %

Tab.2 Mechanical Properties of CFRP<sup>7)</sup>

0° Tensile Strength	1617 MPa
Young's Modulus of Elasticity in Tension	132.3 GPa
Elongation on Fracture	1.2 %
90° Tensile Strength	49 MPa
Young's Modulus of Elasticity in Tension	9.8 GPa
Elongation on Fracture	0.5 %
0° Bending Strength	1764 MPa
Young's Modulus of Elasticity in Bending	117.6 GPa
90° Bending Strength	88.2 MPa
Young's Modulus of Elasticity in Bending	9.8 GPa
Interlaminar Shear Strength	93.1 MPa
Percentage of Fiber Contents	60 wt %

All value measured at 296 K

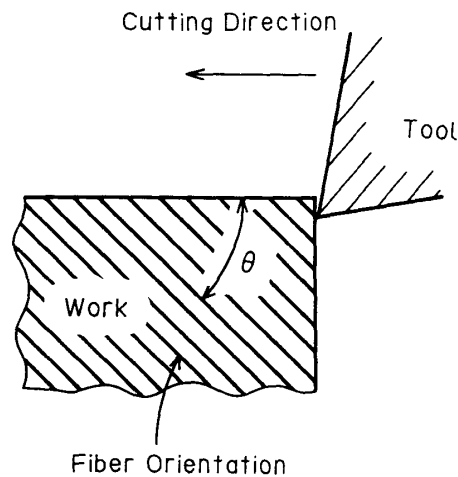


Fig. 2 Definition of Fiber Angle  $\theta$

Tab. 3 Properties of Epoxy Matrix<sup>7)</sup>

Epoxy Resin	# 2500
Specific Weight (298 K)	1.24
Tensile Strength	78.4 MPa
Modulus of Elasticity in Tension	4.0 GPa
Strain on Fracture	2 %
Bending Strength	98 MPa
Modulus of Elasticity in Bending	3.6 MPa
Glass Transition Point	413 K
Coefficient of Thermal Expansion (298~393K)	$7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

Tab. 4 Cutting Condition

Work Material	Unidirectional CFRP (Torayca 305 Prepreg with Epoxy)
Dimension of Work	15×12×2.28 t
Tool Material	Tungsten Carbide K10
Rake Angle ( ° )	-10, 0, 10, 20, 30
Clearance Angle ( ° )	10
Cutting Form	Orthogonal
Cutting Speed (m/min)	0.02
Depth of Cut (mm)	0.1
Cutting Oil	Dry
Fiber Angle between Cutting Direction and Fiber Orientation ( ° )	Unidirectional-0, 30, 45, 60 & 90

材を側面から見て工具刃先を中心にし切削方向から時計方向に測った角度とする。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1. 切削抵抗

Fig. 3 にすくい角  $\alpha = -10^\circ, 10^\circ, 30^\circ$  の工具を使い, 繊維角  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  の試料を切削した場合の切削抵抗を示す. 実験は Tab. 4 で示した条件で行ったが, すくい角  $\alpha = -10^\circ, 10^\circ, 30^\circ$  のみを Fig. 3 に載せたのは, すくい角  $\alpha = -10^\circ \sim 30^\circ$  の傾向を代表しているからである.

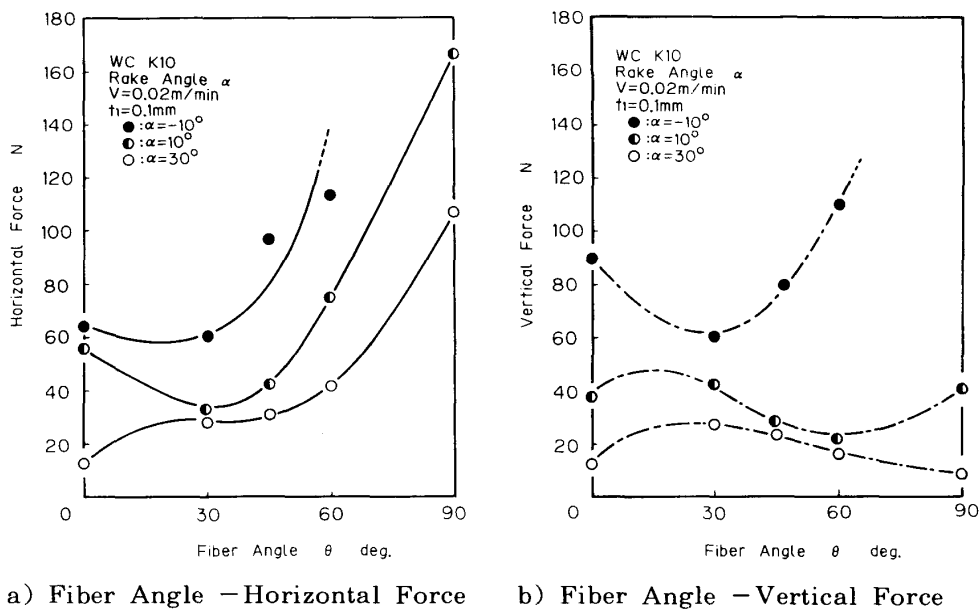


Fig. 3 Effect of Fiber Angle on Cutting Force

図から明らかなように主分力，背分力ともに，繊維角に非常に大きく影響され，一言で切削抵抗の傾向を述べるのは，難しい様相を呈している。

主分力は同図 a) からわかるように繊維角  $\theta = 30^\circ$  より大きくなると，一様に高くなっており，すくい角の小さい工具ほど主分力はより高くなる．すくい角  $\alpha = -10^\circ$  は繊維角  $\theta = 60^\circ$  以上になると試料が切削開始時に大きな割れが生じ切削不能となる．繊維角  $\theta = 90^\circ$  では  $\alpha = 10^\circ$  が切削可能な最も小さなすくい角である．また，すくい角  $\alpha = -10^\circ$ ， $10^\circ$  の場合繊維角  $\theta = 30^\circ$  付近で最小の値を示しているが，すくい角  $\alpha = 30^\circ$  では繊維角  $\theta = 0^\circ$  のとき最小となっている．

また同図 b) に示した背分力にも興味深い傾向が見られる．すくい角  $\alpha = -10^\circ$  の工具では，繊維角  $\theta = 30^\circ$  で最小値を示す．またすくい角  $\alpha = 10^\circ$ ， $30^\circ$  の工具では繊維角  $\theta = 30^\circ$  で反対に最大値を示す．繊維角  $\theta = 30^\circ$  より大きくなるとすくい角  $\alpha = -10^\circ$  では主分力と同様背分力も急激に高くなる．一方すくい角  $\alpha = 10^\circ$ ， $30^\circ$  の工具では繊維角  $\theta = 30^\circ$  以上で次第に低くなり，すくい角  $\alpha = 10^\circ$  については繊維角  $\theta = 90^\circ$  付近でわずかに高くなる．Fig. 3-b) には示さなかったがすくい角  $\alpha = 0^\circ$  の工具の場合，背分力は繊維角によってあまり変化せず，正のすくい角と負のすくい角の工具の中間的挙動を示した．背分力の場合も主分力と同様に繊維角  $\theta = 30^\circ$  付近で小さくなっている．また，すくい角  $\alpha = 30^\circ$  については繊維角  $\theta = 0^\circ$  のとき，主分力同様低い値となっている．

従来の研究では背分力が主分力より高いのが，CFRP切削の特徴とされている.<sup>8)</sup> しかし著者の実験ではすくい角  $\alpha = -10^\circ$  もしくは繊維角  $\theta = 30^\circ$  のとき，主分力と背分力

の値がほぼ等しくなった他、繊維角  $\theta=30^\circ$  以上のときには、主分力の方が必ず背分力より高いことが確かめられた。これは Koplev ら<sup>10)</sup>や佐久間ら<sup>8)</sup>の実験においては市販の超硬工具を使用したり、精密切削を対象とせず、それゆえ刃先の鋭利さに特別留意しなかったため背分力の逆転現象が生じたと判断される。

以上の切削抵抗を総合的に考えると繊維角  $\theta=0^\circ$  ですくい角が大きい場合は、刃先の被削材への食込みが良好で繊維間での剥離が容易に生じ、いわゆる層間剥離を発生するため低い。

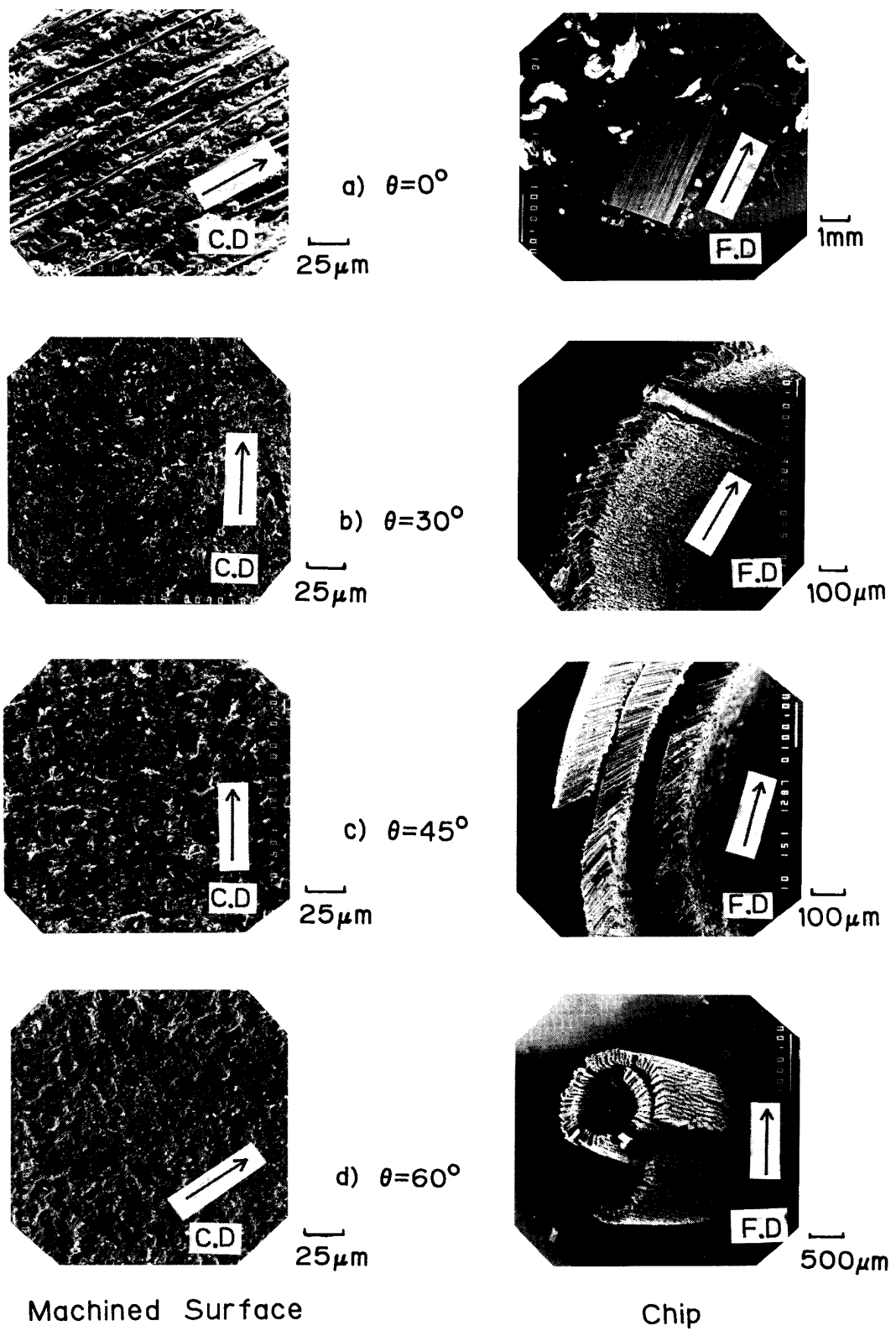
すくい角が小さい場合は、すくい面が繊維を座屈させるように働くために、切削抵抗は高くなる。いずれにしても繊維角  $\theta=0^\circ$  の場合、刃先が直接繊維を截断することがないので、切削抵抗は層間の接着強さに依存することになる。

繊維角が大きくなると刃先が繊維の側面にぶつかり切断しようとする。よく研磨された超硬工具でも、刃先の丸味半径は  $2\sim 3\ \mu\text{m}$  である<sup>11)</sup>と言われている。そのため直径  $8\ \mu\text{m}$  の炭素繊維に刃先を食い込ませることは困難である。よって繊維は刃先の進行方向に押し曲げられながら截断に至る。繊維角  $\theta=0^\circ$  以外の時は必ずその過程を踏むことになる。

### 3. 2 加工面および切りくずについて

Fig. 4 は、すくい角  $\alpha=20^\circ$  の工具による繊維角  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  のときの加工面、切りくずを示す。図中の C. D および F. D はそれぞれ切削方向、切りくず流出方向を示す。

Fig. 4-a) は、曲型的な層間剥離によって生成された、加工面である。そのため、所々に繊維の一本一本が、はっきりと見える。マトリックスであるエポキシ樹脂の方も熱硬化性樹脂によく見られる荒れた加工面となった。刃先により押しならされたために、表面に出ている炭素繊維とマトリックスは、お互いに強い拘束力を失っているように思われる。切りくずは原形をとどめたまま、はぎ取られたように見える(繊維の層間剥離による切りくず生成を以後層間剥離型と呼ぶ)。Fig. 4-b), c), d) は、繊維角が順に、 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  のときの加工面と切りくずである。これらには、切りくずがカールしているという共通点がある。しかし、c)  $\theta=45^\circ$  の切りくずは、b)  $\theta=30^\circ$ , d)  $\theta=60^\circ$  に比べてひずみが小さいようである。おそらくこれは截断された繊維が切りくずとなって流出する方向(金属切削でいうところのせん断面にする相当する)と繊維角がほぼ等しかったためではないかと考えられる。繊維角  $\theta=60^\circ$  の時のカールした切りくずは、小さな切りくずが不連続につながっているように見え、切りくずに与えられたひずみの大きさが一見してわかる。繊維角  $\theta$  が  $60^\circ$  以上になれば、切りくずは連ならなくなる。異方向性が極端に強い一方向性CFRPの切りくず形態は繊維方向に強く支配される。金属切削でのせん断域に相当する領域での最大せん断ひずみ速度方向と繊維角とが一致もしくは、ズレが少ない場



$V=0.02\text{m/min}$   $t_1=0.1\text{mm}$  WC K10  $\alpha=20^\circ$

Fig. 4 Machined Surface and Chip of Unidirectional CFRP

合は連続した切りくずとなるようである。b), c), d) の加工面の方は，截断された繊維が見られるが，大部分はエポキシ樹脂の荒れた梨地面が広がる。工具刃先の転写された跡も見うけられず，特に優劣がつけがたい。

次にすくい角と繊維角が切りくず形状に大きな影響をおよぼすので，それらの関係を Fig. 5 に示す。CFRPの切削は，すでに述べたように刃先が繊維を截断する場合（繊維角  $\theta \neq 0^\circ$ ），しない場合（ $\theta = 0^\circ$ ）に大別できる。一般に多く見られる前者は今後“繊維截断型”の切りくず生成と呼ぶ。この切りくず生成では繊維角とすくい角によって切りくずは連続型にも不連続型にもなる。同図の中央部には連続した切りくずの領域が広がる。

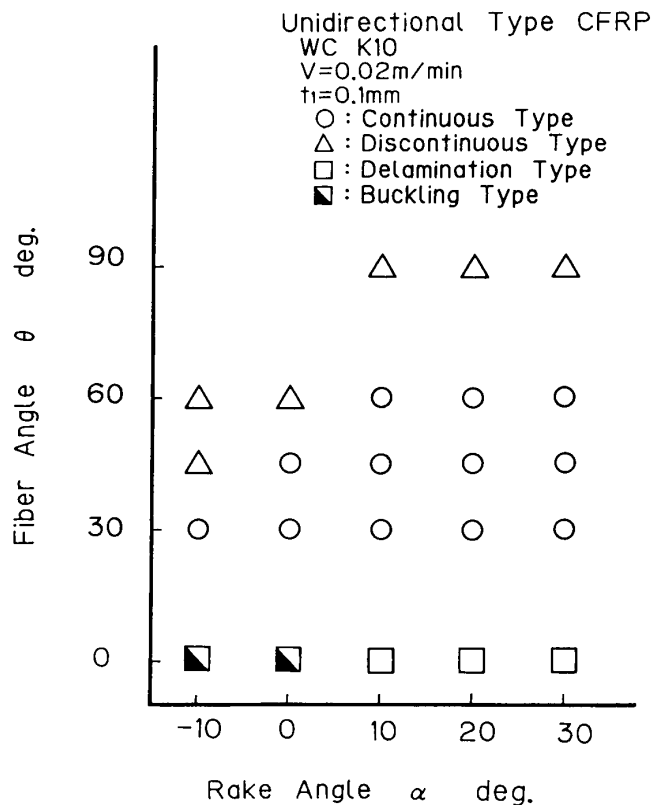


Fig. 5 Classification of CFRP Chip Formation

CFRPの切削における連続した切りくずとは，本来バラバラであるはずの截断された繊維をエポキシ樹脂が，かろうじて繋ぎとめているにすぎない。エポキシ樹脂自体も脆性材料であるため，特にその傾向が強くなる。同図の左中から右上に広がる不連続な切りくずが排出される領域は，Fig. 4 の説明で述べた理由が大きくかかわっている。

繊維角  $\theta = 0^\circ$  の場合に排出される，座屈型（繊維の座屈による切りくず生成を以後このように呼ぶ），層間剥離型の切りくずは，この繊維角でしか起こりえないものである。



### 3.3 切削機構

Fig. 6 に、一方向性CFRPの切削モデルを示す。同図 a) は層間剥離型、b) は繊維座屈型、c) CFRP特有の繊維截断型による切削モデルを示した。まず、層間剥離型は、刃先がくさびの役割をし、切込み量分の繊維を含む層を上方へ持ち上げる時に起こる。このため切削抵抗は層間の接着強さに大きく依存することになるため、主分力、背分力ともに低い値になった。また切削抵抗は刃先が繊維とぶつかった時高くなり、繊維の端面が工具すくい面にそって持ち上がろうとすると、図に示すように刃先の前の繊維間で剥離が起こり、工具の進行に伴う曲げ変形により破断に至り、切削抵抗は低くなるという過程を繰り返すことになる。層間剥離による切削は Fig. 5 に示したように、すくい角が大きく、すくい面が滑らかな場合起こりやすい。

Fig. 6-b) は繊維角  $\theta = 0^\circ$ 、すくい角  $\alpha = -10^\circ$ 、 $0^\circ$  の場合に起こる座屈型による切削である。すくい面にぶつかった繊維が、すくい面にそって上方へ持ち上げられることなく、繊維の座屈により破壊され、なおかつ切りくずはスムーズに排出されないので粉々に粉碎される。また、刃先下にもぐり込むような繊維もあるため、主分力、背分力ともに比較的高くなっている。

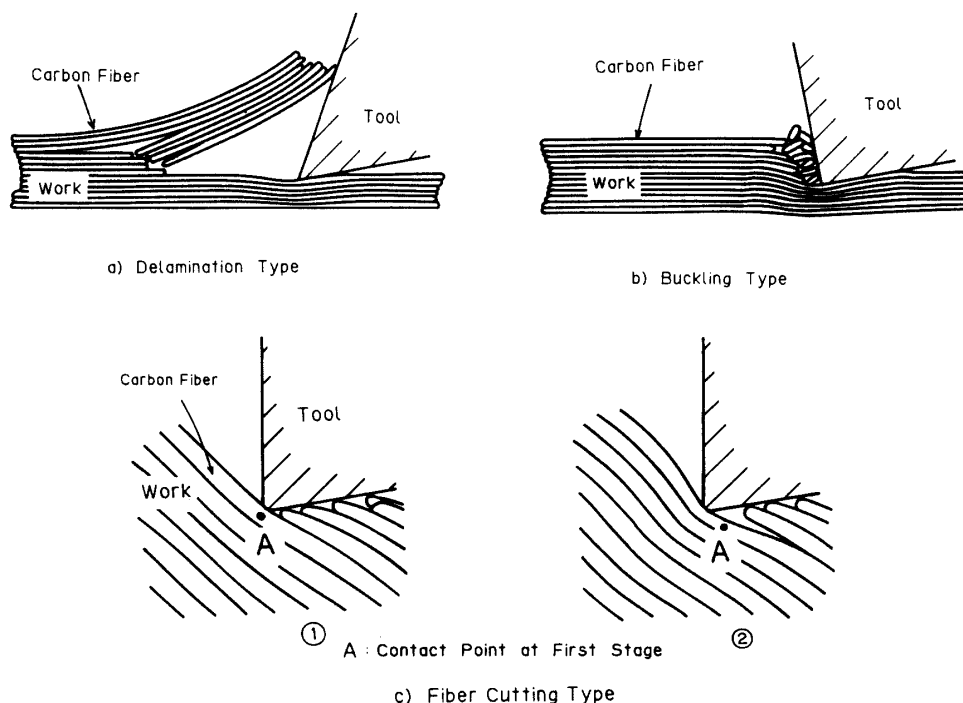


Fig. 6 Three Types of Cutting Form of CFRP

Fig. 6-c) は、切削の際に切込み量分切削されないで切残される量すなわち切削残留量の原因をも考慮してモデル化している。図にそって説明すると、まず、c)①で、刃先が

繊維の側面にぶつかる。その点を図中のAとした。c)②になると工具進行に伴ない、刃先によって繊維が押し曲げられる。そのため、最初に刃先が繊維と接触したA点は、c)②で示すように、刃先より下方に移動することになる。そして、繊維が耐えきれなくなり、A点より上方の刃先付近で截断されると、A点と截断した点との切込み方向の垂直距離が切削残留量になると考えられる。言い替えれば、刃先を、繊維に食込ませられないので、切削残留ができる。また、すくい角と繊維角の幾何的關係から、繊維の截断しやすさにより切削残留量が決まる。

#### 4. 結 論

CFRP切削の基本特性を調べるため、二次元切削を実施し、主として繊維角および工具すくい角の切削抵抗、切りくずおよび加工面への影響について求め、考察した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) CFRPの切削においては、加工面、切りくずおよび切削抵抗は繊維方向の影響を非常に大きく受ける。
- (2) 主分力は繊維角によって複雑に変化し、繊維角  $\theta$  が  $30^\circ$  より大きくなると角度とともに高くなるが、すくい角  $\alpha$  が  $20^\circ$  および  $30^\circ$  では繊維角  $\theta$  が  $0^\circ$  の時が最低となる。全体にはすくい角が大きくなれば値が低くなる。
- (3) 背分力も主分力同様繊維角によって複雑に変化し、すくい角が負であれば  $\theta = 30^\circ$  で最低となるが、正であれば最大値となる。またすくい角の影響は主分力と同様に大きくなれば値は低くなる。
- (4) 繊維角  $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$  のとき、切削抵抗におよぼす、すくい角の影響が最も小さい。
- (5) 切りくず生成は繊維角  $\theta = 0^\circ$  ではすくい角によって層間剥離型、座屈型になり、それ以外の角度では繊維截断型となり、切りくずは連続型にも不連続型にもなる。

#### 参考文献

- 1) 佐久間敬三, 瀬戸雅文, 谷口正紀, 横尾嘉道, 炭素繊維強化プラスチックの切削における工具摩耗 (工具材種の影響), 機械学会論文集 (C編), 51, 463 (1985) 656.
- 2) 鳴滝則彦, チタン合金, CFRPの切削加工, 機械技術, 30, 13 (1982) 44.
- 3) Koplev, A., Cutting of CFRP with Single Edge Tools, Advanced Composite Materials, 2 (1980) 1597.
- 4) 小林 昭, プラスチック切削における切りくず生成機構, 機械学会論文集, 30, 220 (1964) 1467 .
- 5) 斎藤勝政, プラスチックの削りくず生成機構, 機械学会論文集, 31, 224 (1965) 657.
- 6) 金枝敏明, 津和秀夫, 井川直哉, プラスチックの切削機構に関する研究 (第1報) 一走査電

子顕微鏡加工実験装置による分離作用の観察, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演論文集 (1981), 260.

- 7) 東レ技術資料
- 8) 佐久間敬三, FRP (GFRP, CFRP) の切削における工具材種と摩耗特性 (2), 機械と工具, 29, 8 (1985) 105.
- 9) 4), 5), 6) と同じ.
- 10) Koplev, A., Lystrup, Aa. and Vorm, T., The Cutting Process, Chip, and Cutting Forces in Machining CFRP, Composites, 14 4 (1983) 374.
- 11) 金枝敏明, 大阪大学学位論文, (1982) 10.

## The Effects of Fiber Angle and Tool Rake Angle on Unidirectional CFRP Cutting Mechanism

Toshiaki KANEEDA\* and Masayuki TAKAHASHI\*\*

\* *Department of Mechanical Engineering,*

\*\* *Department of Mechanical Science,*

*Okayama University of Science, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1986)

### [Abstracts]

Cutting mechanism of Unidirectional CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) has been experimentally investigated. The fiber angle deeply affects cutting force, machined surface, and chip formation. The cutting force increases as rake angle becomes bigger. The smallest effect of rake angle on cutting forces could be found at fiber angle  $\theta=30\sim 45^\circ$ . Three chip formation types are revealed. At  $\theta=0^\circ$ , delamination and buckling of fiber type exist. Rake angle rules the chip formation types. Except  $\theta=0^\circ$ , fiber cutting type appears. The quality of machined surface depends upon the fiber angle. At  $\theta=0^\circ$ , fibers could clearly be found on the machined surface. Except  $\theta=0^\circ$ , epoxy resin matrix would be smeared on the machined surface. Large depth of reluctant uncut exists on every cutting condition.