CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の切削 機構に関する研究 (第1報)*

——極低速切削速度下における加工面生成機構——

金 枝 敏 明** 高 橋 正 行***

CFRP Cutting Mechanism (1st Report)
- Surface Generation Mechanism at Very Low Cutting Speeds -

Toshiaki Kaneeda and Masayuki Takahashi

Cutting mechanism of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) have been studied. Unidirectional prepreg were adopted to investigate effects of fiber orientation (fiber angles) and tool rake angles on the chip formation. Direct SEM observation of cutting experiments revealed that CFRP cutting had three types of chip formation: delamination, fiber buckling and fiber cutting type, which were determined by the fiber angles and the tool rake angles. Delamination and fiber buckling type appeared on fiber angle 0 deg. cutting. The other cutting conditions offered fiber cutting type, which had continuous and discontinuous chip formation. Fiber cutting type provided the machined surface with different appearance from the others. A number of the fiber ends appeared on the machined surface. The rugged fiber ends allowed irregularities on the machined surface. Most of the fibers on the machined surface had a few cracks in close vicinity to the ends. Cutting forces were significantly affected by the fiber angles. The fiber angle effects on the tangential force were greater than those on normal force. Fiber angle 15-45° cuttings offered the minimum cutting force on every rake angle in fiber cutting type. In case of chip elimination space angle $\gamma < 30^\circ$, difficulties in chip elimination produced extensive irregular morphology surface.

Key words: CFRP cutting, carbon fiber, fiber angle, fiber orientation, delamination type, fiber buckling type, fiber cutting type, machined surface, chip elimination, chip elimination space angle

1. 緒 言

CFRPは従来の金属に比し、比剛性、比強度、耐疲労性、耐摩耗性、耐薬品性、振動減衰性などが高いといった数多くの長所を有する。その製品は、スポーツ、レジャー用品から航空宇宙機器に至り、日増しに素材としてのニーズが高まっている。その用途も2次構造部材→1次構造部材へ、そして小形単純形状部材→大型単純形状部材→小型複雑形状部材→大型複雑形状部材へと拡大しつつある。それに伴い能率ならびに精度の高い切削加工法の重要性がますます増すことは必至であろう。しかし難削材であるCFRPの切削を

工具摩耗の観点から研究したものはあるものの^{1) 2)}、切削機構自体を扱った研究となるとほとんどない。取り扱ったKoplevの研究³⁾も一定の切削速度下で繊維配向方向と平行ならびに直角方向に切削を実施したのみであり、しかもCFRPのマトリクスであるプラスチック切削において影響の大きい工具すくい角^{4) 5)}についてはまったく触れてはいないというように内容が十分とは言えない。まして加工面生成機構を研究したものはほとんどないのが現状である。

そこで本研究は、CFRP固有の切削現象を加工面生成の観点から明らかにし、切削機構を考察しようとするものである。本報では被削材が繊維強化形複合材料であるので、一方向性材料を選び、強い異方性が切削現象にどのように影響するのか、すなわち繊維角ならびに工具すくい角の切削抵抗や加工面に及ぼす影響について調べ、動的観察より得られた切削形式等から加工面生成機構を明らかにしようとする。

* 原稿受付 昭和63年11月28日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月27日)ならびに昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月14日)にて発表

** 正会員 岡山理科大学工学部(岡山市理大町1-1)

*** 正会員 松下電器産業(株)(門真市松葉町2-7)

Table 1 Mechanical properties of CFRP⁷⁾

0° tensile strength	1950 MPa
Young's modulus of elasticity in tension	130 GPa
Elongation on fracture	1.3 %
90° tensile strength	50 MPa
Young's modulus of elasticity in tension	10 GPa
Elongation on fracture	0.5 %
0° bending strength	1800 MPa
Young's modulus of elasticity in bending	120 GPa
90° bending strength	88 MPa
Young's modulus of elasticity in bending	10 GPa
Interlaminar shear strength	100 MPa
Percentage of fiber contents	60 vol%

All value are measured at 296 K

2. 実験装置および方法

2.1 被削材

被削材はPAN（ポリアクリロニトリル）系の東レ株式会社製CFRP™トレカ プリプレグ305™板である。これは炭素繊維トレカT300（直径 8μm、引張強さ 3530MPa、弾性率230GPa、破断伸び1.5%）にエポキシ樹脂（引張強さ80MPa、引張弾性率4GPa、破断伸び2.0%）を含浸させ温度 293～403Kで積層硬化させた8プライの一方方向性材で、その厚さは2.28mmである。繊維含有率は60 vol%である。被削材自体の機械的性質⁷⁾は表1のように0°方向の引張強さ1950MPa、弾性率130GPa、破断伸び1.3%、90°方向の引張強さ50MPa、弾性率10GPa、破断伸び0.5%、層間せん断強さ100MPaである。

2.2 実験装置および方法

今回の実験の目的はCFRP切削の基本特性を明らかにすることであるので、切削方式は解析の行いやすい二次元切削とする。切削速度の極く低い場合には旋盤を、通常速度の場合には形削り盤を使用する。

旋盤の場合、四つづめチャックに被削材をホルダを介して長手側の側面を水平になるように取り付け、工具を保持した刃物台を前後送りさせて切削する。刃物台の駆動は、旋盤内部のモータ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により行う。

さらに切りくず生成の状況を動的かつ詳細に観察するため、走査電子顕微鏡内加工実験装置（以後SEM内実験装置と呼ぶ）による実験も実施する。この場合の切削速度は0.005m/minとなる。

工具にはCFRP切削で耐摩耗性が良好とされている超硬工具K10⁸⁾を採用する。FRPのマトリクスであるエポキシ樹脂等のプラスチック材料の切削ではすくい角の切削現象に及ぼす影響が大きい⁹⁾ので、すくい角は $\alpha = -10 \sim 30^\circ$ の 10° おきとする（以後すく

Table 2 Cutting condition

Work material	Unidirectional prepreg
Dimension of work	15×12×2.28 t
Tool material	Tungsten carbide K10
Rake angle °	-10, 0, 10, 20, 30
Relief angle °	10
Cutting form	Orthogonal
Cutting speed m/min	0.005, 0.02, 21.5
Depth of cut mm	0.03 - 0.25
Cutting oil	Dry
Fiber angle °	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165

Fig. 1 Definition of θ and γ

い角を単に α と表す）。逃げ角もCFRP切削では切削抵抗などに大きく影響を及ぼすとされており、大きな値が適切⁹⁾とされているので 10° とする。

工具はその刃先をダイヤモンド砥石#800で仕上研磨し、その後ノマルスキー型微分干渉顕微鏡を用い、刃先の鋭利なものを選び使用する。CFRP切削では短い切削距離でさえ、刃先の微小な摩耗や欠けが多いことを実験時に経験している。そこで工具は1回の実験ごとに再研磨し直し、より本質的な実験を行うことに心掛ける。

切削速度はひずみ速度や発熱の影響が少ない極低速0.02, 0.005m/minと通常速度の21.5m/minである。

切込み t_1 は30～250 μmの範囲内で、主として100 μmとする。

表2に切削条件を示す。

なお繊維角とは切削方向と繊維の配向方向とのなす角で、図1に示すように二次元切削で切削方向を右から左にとった場合、加工面から繊維配向方向を時計方向に測った角度とし、以後単に θ と表す。

3. 実験結果および考察

3.1 切削形式

切りくずならびに加工面の観察およびSEM内切削実験の動的観察結果より得られた三つの切削形式について述べる。図2に各々の場合の加工面、切りくずお

Fig. 2 Three types of cutting form

よび切削モデルを示す。図中のC.D.ならびにF.D.は切削方向、切りくず流出方向を示す。

図2(a)は層間剥離形(Delamination type)の場合である。繊維角と工具刃先角の関係から刃先が繊維層に食込みやすい $\theta = 0^\circ$, $\alpha = 10, 20, 30^\circ$ のときに生ずる。すなわち図に示すように工具刃先が繊維層に食込み、それを曲げ変形させて折るというものである。それに従い切削抵抗は上昇→下降という過程を繰り返すので変動が大きい。切りくずは母材から剥ぎ取られるように生成される。

加工面は同図に見られるようにところどころ繊維が表面上に露出し、それを埋めるかのようにマトリクスであるエポキシ樹脂が存在している。含有率から言ってエポキシ樹脂の存在は少量と思われるが、比較的多

く存在する理由は以下のように考えられる。(1)被削材中の炭素繊維群は基盤格子状に配列されているが、工具刃先が食込む際刃先稜がその基盤格子に対して正確に垂直な位置にある可能性が少ないこと、また繊維の配列がいたるところで正確に規則正しい基盤格子状でない可能性があること、(2)繊維とエポキシ樹脂の界面の接合強さを層間せん断強さ100MPaと見なし⁽¹⁰⁾て、それとエポキシ樹脂の引張強さ80MPaとを比較するとエポキシ樹脂の方が低く、したがって切削時にはその部分で分離破壊しやすいこと、(3)エポキシ樹脂の弾性率が炭素繊維のそれに比し小さいため弾性回復量がより大きい、などである。

切りくずは刃先近傍で一旦強く曲げられて折られた後、弾性回復するため板状になっている。

図2(b)は $\theta=0^\circ$ 、 $\alpha=-10.0^\circ$ のとき生じる繊維座屈屈(Fiber buckling type)である。図に示すように繊維角と工具の幾何学的関係から刃先の食込みが悪い場合に生じる。工具で圧縮された繊維が刃先前方で座屈し、その結果切りくずが生成され、不連続に排出される。繊維が折れる部分は層間剥離形より刃先から遠くなく、切りくずが短いピッチで排出されるため、切削抵抗の変動は層間剥離形ほど大きくはない。

加工面は層間剥離形と似ているが、切りくずは層間剥離形と異なり、粉碎されて非常に小さな束状になっている。

以上の2形式は $\theta=0^\circ$ の場合に生じ、図2(c)は $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の場合にすくい角に関係なく生じる繊維切断形(Fiber cutting type)である。この形式は工具刃先による繊維層の切断ならびに排出とからなる。すなわち同図の切削モデルに示すように、工具刃先が繊維に接触すると、刃先周辺のエポキシ樹脂は大きく曲げ変形してたわみ、一方ぜい性材料である繊維はエポキシ樹脂の変形に十分追従できなく界面でのすべりにより変形に対応していく。さらに切削過程が進行すると刃先先端で繊維が圧壊され、被削材は加工面側と切りくず側に分断される。このように被削材を十分変形させた後切る、言い換えれば繊維層をたちきるようにして切りくずを生成するのでこの切削形式を繊維切断形と称する。切断の機構を微視的に考えた場合、繊維の延性破壊ではなくぜい性破壊による分断であるので正確には“繊維切断”とは言い難いかもしれないが、主として母材であるエポキシ樹脂が大きくたわんだ後繊維が分断される。巨視的には繊維層を切断するように分離作用が行われるので繊維切断形と呼ぶ。分断された繊維は工具すくい面による繊維層間ですべりを発生した後切りくずとして排出される。

加工面は図の $\theta=45^\circ$ の加工面のように、大部分の繊維の端面が露出するものとなる。繊維の切断後、加工面側の繊維層はエポキシ樹脂の部分が主として働いて大きく弾性回復し加工面となる。その際工具逃げ面を大きくブラッシング⁹⁾する。繊維の分断は刃先先端近辺で行われるのでその端面が露出する。もし分断が刃先先端より下方で起これば、分断点より上方の繊維は切りくずとして工具によって持ち去られ、残ったエポキシ樹脂部分は弾性回復量が大きいので繊維端面が露出しない加工面となる。

繊維端面の近傍では最低でも1か所の割れが存在する。さらに加工面の一部には繊維とその周囲のエポキシ樹脂とが工具によって持ち去られた結果凹部となった領域が存在する。このような加工面の様子は繊維截

Fig. 3 Classification of cutting form

断形であれば基本的には同じ傾向を示す。ただ繊維角によって決まる幾何学的な関係から加工面上に露出される繊維の形態が異なる。

切りくずは θ によって連続形もしくは不連続形の2形式になる。図に示す $\theta=45^\circ$ の場合は前者の典型的な例である。カールしている切りくずの側面は、繊維配向方向がよく表れており、金属のそのように二次変形が見られない。繊維切断形は幅広い切削条件で存在するが、図中の $\theta=60^\circ$ の切りくずからもわかるように θ が大きくなるとカール半径は小さくなる。一般的には後述する $\gamma < 30^\circ$ 近辺から1個1個が束状の切りくずとなり不連続となる。

図3に切削形式とすくい角、繊維角の関係を整理して示す。繊維切断形には連続形と不連続形が存在するので分けて表示した。なお $\alpha=-10, 10^\circ$ の $\theta=90^\circ$ ならびにすべてのすくい角の $\theta > 90^\circ$ では、被削材に大きな割れが発生するため通常の切削は不可能である。

3. 2 切削抵抗

図4に $\theta=0 \sim 90^\circ$ の 15° おきの被削材を $\alpha=-10, 10, 30^\circ$ の工具で切削した場合の切削抵抗を示す。 $\alpha=0, 20^\circ$ のデータは上記のデータの中間の傾向を呈したので記載していない。図4より主分力、背分力ともに繊維角に大きく影響されていることがわかる。主分力は $\theta > 30^\circ$ になると一部を除くすべてのすくい角で θ の増加とともに大きくなる。 $\theta=90^\circ$ では最小値を示す $\theta=30^\circ$ の3～4倍ほど大きな値となる。たとえば $\alpha=10^\circ$ では35MPa → 177MPaといった具合である。一方 $\theta < 30^\circ$ ではすくい角によって傾向が異なり $\alpha=-10, 10^\circ$ では θ が小さくなるほど増加し、 $\alpha=30^\circ$ では $\theta=15.0^\circ$ でそれぞれ極大値、最小値となる。全体の傾向としてはすくい角の大きい工具ほど繊維角の影

響を受けなく、 $\theta = 15^\circ$ ですくい角の差が最も小さく現れる。

また同図(b)の背分力は主分力以上に複雑な傾向を示している。 $\alpha = -10^\circ$ では $\theta = 30^\circ$ で最小値を示す凹の曲線となるが、 $\alpha = 30^\circ$ の工具では反対に $\theta = 30^\circ$ で最大値を示し凸の曲線となる。 $\alpha = 10^\circ$ ではそれらの中間の傾向を示す。ここで注目されるのは $\alpha = 30^\circ$ では $\theta = 90^\circ$ で背分力が0になることである。背分力の場合、すくい角の影響が最も小さいのは $\theta = 30^\circ$ と言える。

従来の研究によれば背分力が主分力より常に大きいのがC F R P切削の特徴^{3) 8)}としてゐる。しかし著者の実験によれば $\alpha = -10^\circ$ 、 $\theta = 0, 15^\circ$ 、 $\alpha = 10^\circ$ 、 $\theta = 15, 30^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 30, 45^\circ$ で背分力と主分力の値がほぼ等しいかもしくは背分力の方が大きく、それ以外では主分力の方が、必ず大きいことが明らかとなった。これは、Koplev³⁾や佐久間⁸⁾の実験においては市販の超硬工具を使用したり、刃先の鋭利さに特別留意しなかったため、主分力と背分力の逆転現象が生じたと判断される。著者の実験においても刃先の状態、特に刃先丸味がある場合には逆転現象を確認している。

繊維截断形の切削抵抗を以下で考察する。主分力は図5に示すように繊維に刃先が食込んで截断(Fiber cutting)する力とそれらを切りくずとして排出(Chip elimination)する力からなると考えられる。当然截断や切りくず排出は背分力に関係するが、その程度が小さいと考えられるので、ここでは除外する。截断する力は刃先の繊維への食込み(Cutting into fiber)やすさと截断しやすさで決定される。両者とも繊維角およびすくい角に大きく左右され、食込みやすさは変形領域の大小となって表れ、截断しやすさは基本的には繊維の分断(Fiber split)の規模である。分断の規模は上記2要因によって工具刃先の応力集中が異なると、分断の際発生する割れの数や位置が変化し、截断に要する力が変わる。ただこの截断に要する力は他の力に比べれば小さいと考えられる。

一方切りくず排出は連続形切りくずなら繊維層間の繊維配向方向のすべりでなされ、それに要する力は金属切削でのせん断角と切削抵抗の關係に類似すると考えられる。つまり繊維角がせん断角に、切りくず排出力が切削抵抗に対応し、よって $\theta = 45^\circ$ で排出力は最小になると思われる。ここで工具すくい面と繊維配向方向がなす角度を図1に示すように切りくず排出空間角 γ (Chip elimination space angle, 以後 γ と略す)

Fig. 4 Fiber angle effect on cutting force

Fig. 5 Tangential force component

と定義すると、 $\gamma < 30^\circ$ では一般に幾何学的関係から各繊維層間でのすべりが発生しにくく、発生しても切りくず排出に要する空間が小さいので排出時に切りくずが一部粉碎され不連続になり、排出に要する力は大きくなる。

さて主分力は $\theta = 15 \sim 45^\circ$ では刃先が食込む際の変形領域が小さく、截断も比較的しやすく、切りくず排出も容易となるため小さい。またその条件ではすくい角の差による影響も少なくおおむね低い値を示す。なお $\theta = 45^\circ$ の $\alpha = -10^\circ$ では γ が 35° となり排出が他のすくい角ほど容易でなく、また刃先の食込みも悪くなるため上述の傾向から外れる。

$\theta = 0^\circ$ では層間剥離形や繊維座屈形となり、切削抵抗の変動が大きく、その平均値を図4に載せた。さらに θ が 60° 以上では $\alpha = 30^\circ$ の $\theta = 60^\circ$ を除き繊維の食込みの悪さが変形領域を大きくし、 γ も小さく切りくず排出が困難になり主分力が過大になる。

他方背分力の大きさは、截断された繊維層の弾性回復による工具逃げ面のブラッシング作用⁹⁾で大部分決定され、ブラッシング作用の大小は繊維層のたわみや繊維の分断点の位置によって決まるものである。

以上はすべて切削速度 $V=0.02$ m/min以下の結果であるが、 $V=21.5$ m/minでも同様の結果を得ている。

3. 3 加工面の粗さ

Fig. 6 Fiber angle effect on surface roughness

図6に加工面の最大粗さ R_{max} に及ぼす繊維角およびすくい角の影響を示す。加工面の粗さは一見切削抵抗に対応すると考えられるが、図からわかるように $\theta \leq 60^\circ$ では繊維角の値にかかわらずいずれのすくい角においても $R_{max} = 4 \sim 6 \mu m$ と大差が無く、変動も少ない。常に $\alpha = 30^\circ$ の場合が一番小さく、 $\alpha = -10^\circ$ と 10° の場合の両者の差はほとんどない。一方 $\theta > 60^\circ$ になるとすくい角の影響が顕著に出始め、 γ が 30° 以下になれば極端に R_{max} が増加し始める。

この原因は γ が小さいと工具刃先の繊維層への食込みの悪化とともに繊維層のたわみの増大をきたすこと、切りくず排出が困難になること、そしてそれらが切削抵抗を増大させることが重なって繊維切断時の繊維の分断する位置を不安定にすることに起因する。

4. 結 論

CFRP 切削の加工面生成機構を明らかにするため二次元切削を実施し、それ固有の切削現象を求めた。さらに切削現象の観察結果より加工面生成機構を検討した結果以下のことが明らかになった。

- (1) 繊維角ならびにすくい角は切りくず生成を支配し、切削形式、加工面、切削抵抗に多大な影響を及ぼす。
- (2) 切削形式には、層間剥離形、繊維座屈形および繊維切断形（連続形および不連続形）の3形

式があり、それによって加工面は左右される。

- (3) 繊維切断形の加工面は、大部分の繊維の端面が露出し、その端面付近には最低でも1か所の割れが見い出される。
- (4) 切削抵抗に及ぼす繊維角ならびにすくい角の影響は主分力と背分力とでは傾向が異なり、主分力は背分力以上にその影響を受け、変動も大きい。
- (5) 繊維切断形の主分力は繊維層を変形させ切断する力と切断した切りくずを排除する力とからなる。したがって両者の小さい $\theta = 15 \sim 45^\circ$ でおおむね最小の値を取る。
- (6) 加工面の最大粗さはすくい面と繊維配向方向とのなす角度、切りくず排出空間角が 30° 以下になれば切りくず排出の悪化や繊維層のたわみ等により急激に大きくなる。

謝 辞

本研究の実施に当たり、貴重なデータならびに試料を提供して下さいた東レ株式会社ACM技術部の方に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐久間敏三, 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), 日本機械学会論文集 (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) A. Koplev: 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, 日本機械学会論文集, 30, 2 (1964) 1467.
- 5) 斎藤勝政: プラスチックの削りくず生成機構, 日本機械学会論文集, 31, 224 (1965) 6.
- 6) 金枝敏明: 硬質塩化ビニル切削の特異性に関する研究 (第1報) - 切りくず生成の特異性が切削現象ならびに加工面に及ぼす影響, 精密工学会誌, 54, 9 (1988) 1679.
- 7) 東レ技術資料.
- 8) 佐久間敏三: FRP (GFRP, CFRP) の切削における工具材種と摩耗特性, 機械と工具, 29, 8 (1985) 105.
- 9) A. Koplev, Aa. Lystrup and T. Vorm: The Cutting Process, Chip, and Cutting Forces in Machining CFRP, Composites, 14, 4 (1983) 374.
- 10) 材料技術協会編: 複合材料と界面, 総合技術出版 (1987) 254.