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2報）*

——切削残留量ならびに加工変質深さの解析——

金 枝 敏 明** 高 橋 正 行***

CFRP Cutting Mechanism(2nd Report)
-Analysis of Depth of Reluctant Uncut and Deformed Part-

Toshiaki KANEEDA and Masayuki TAKAHASHI

Depth of reluctant uncut and deformed part have been measured by original methods in unidirectional prepreg cutting. Depth of reluctant uncut that significantly controls accuracy of dimension were attributed to elastic recovery of the machined surface layer. Depth of reluctant uncut could be determined by measuring a step between pre-cut surface and newly generated surface using an electric micrometer. Deformed part that corresponds damaged layer of metal machined surface could be observed by an optical microscope with Nomarski differential interference contrasts. Measurement results indicated that both values were markedly affected by rake angles, fiber angles, and depth of cut. Tangential and normal cutting forces were remarkably dependent on depth of deformed part and reluctant uncut respectively.

Key words: CFRP cutting, unidirectional prepreg, depth of reluctant uncut, depth of deformed part, tangential force, normal force, fiber cutting type, split point, deflection, cutting into fiber, elastic recovery, brushing, chip elimination space angle

1. 緒 言

繊維強化複合材料であるCFRPの切削加工ではその材料構成ゆえに金属切削と異なる点が多く観察される。前報¹⁾においては被削材に一方向性材料を選び、その強い異方性が切削現象にどのように影響するのか検討するため、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、さらに動的観察より得られた三つの切削形式等から加工面生成機構を明らかにしようと試みた。

また著者はCFRP切削における特徴ある現象の存在をすでに報告^{2) 3)}しており、その中でも特に重要なのが切削残留量ならびに加工変質深さである。前者は切削時に再三経験される切残し量のことであり、通常の金属切削でも極く微量存在すると言われているがそれに比べ規模が大きいこと、発生機構も金属のそれとは根本的に異なる等、相違する点が多い。後者は金

属の加工変質層に相当するもので、繊維強化複合材料がより一般的に構造部材として使用されるに従い、それが破断強さや疲労強度等に大きく影響すると考えられるので注目されるべきものである。しかし今のところ両者とも取り上げた研究はない。

そこで本報ではCFRP切削の特徴的な現象である切削残留量ならびに加工変質深さに着目し、測定するとともに発生機構について考察ならびに検討する。

2. 実験装置および方法

2.1 被削材

被削材は前報と同じ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。

なお切込みを変化させて行うすべての実験では被削材は11プライとなる。11プライと8プライの被削材とでは前者の方が強度が大きく、弾性率が低い

* 原稿受付 平成元年10月18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 Cutting conditions

Work material	Unidirectional prepreg
Dimensions of work	15×12×2.28 t
Tool material	Tungsten carbide K10
Rake angles °	-10, 0, 10, 20, 30
Relief angles °	10
Cutting form	Orthogonal
Cutting speeds m/min	0.02
Depth of cuts mm	0.03 - 0.25
Cutting oil	Dry
Fiber angles °	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90

Fig. 1 Measurement for depth of reluctant uncut

で、切削抵抗、切削残留量および加工変質深さは後者より大きな値となるが、本質的な傾向に差異はない。

2.2 実験装置および方法

切削実験装置および方法も基本的には前報と同様である。すなわち切削装置である旋盤の四つづめチャックに被削材のCFRP板をホルダを介して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二次元切削する。

工具にはCFRP切削で耐磨耗性が良好とされている超硬工具 K10⁴⁾を採用する。CFRP切削ではすくい角の切削現象に及ぼす影響が大きい¹⁾ので、すくい角は $\alpha = -10 \sim 30^\circ$ の 10° おきとする（以後すくい角を単に α と表す）。逃げ角もCFRP切削では切削抵抗等に影響を及ぼすとされており、大きな値が適切⁵⁾とされているので 10° とする。工具も前報で述べたように刃先の鋭利なものを選び使用するとともに、刃先の微少な摩耗や欠けに充分注意し、工具は1回の実験ごとに再研磨し直し、刃先の状態が切削現象に影響することを避ける。

被削材の繊維角 θ も前報と同様にとる。

切削速度は 0.02m/min とする。切込み t_1 は $0.03 \sim 0.25\text{mm}$ の範囲とする。表1に切削条件を示す。

3. 切削残留量ならびに加工変質深さの測定方法

切削残留量の測定の概要は、切削実験途中で切削停止を行い、加工面を痛めないように工具を後退させ、その後図1に示すように被削材の左側の前加工面と右側の加工面との段差を電気マイクロメータで測定するものである。具体的にはまず前加工を実施するが、図に示すように前加工面の切削時にもそれに伴う切削残留量 Δt_0 が生成されるので、実験時の設定の切込みの真の値は $t_1 + \Delta t_0$ となる。しかし最終前加工時に切込みを与えず数回切削すれば Δt_0 は可能な限り小さくできる。次に切削を開始し、工具が被削材の中央

部Cまで来た時切削を停止し、電気マイクロメータのピックアップをB-A間移動させ段差を測定する。この時本来ならば電気マイクロメータは設定の真の切込み $t_1 + \Delta t_0$ を示すことになるが、切削残留量 Δt_1 があるためそれより小さい値を示すことになる。そこで切削残留量 Δt_1 は以下のように表される。

$$\Delta t_1 = t_1 + \Delta t_0 - t_m \quad (1)$$

ここで、 t_m ：電気マイクロメータの読みの値

一方加工変質深さを求める切削実験では被削材とは同じ大きさに切り出したアルミニウムの板材2枚で被削材を挟み、それらをワークホルダに取り付け、一緒に切削する。こうすれば被削材の側面が拘束され、平面ひずみ状態が実現される。被削材とアルミニウム板とをワークホルダに締め付ける際、常に被削材側面が同じ拘束力を得るため、トルクレンチで値を確認しながら締め付ける。切削後、被削材の側面をノマルスキー式微分干渉顕微鏡で観察し、母材と異なる干渉色を呈す加工変質部の厚さを接眼マイクロメータにより測定する。干渉色の違いは光の波長 $0.38 \sim 0.78\mu\text{m}$ 以下の段差がある場合に現れる。今回干渉色の違いとなって現れる部分は、被削材中の繊維とマトリクスとの接合部が切削時の変形のために弱くなり、部分的に接合が破壊され、その結果微小な凹凸となって被削材側面に現れたと判断される。なお前加工時には拘束しているアルミニウムの低速切削速度域でのむしれ形切りくず生成を回避するため、 $\alpha = 30^\circ$ の工具を用いて前加工を行う。

4. 実験結果

4.1 切削残留量

図2に繊維角（以後 θ と略す） $\theta = 0 \sim 90^\circ$ の 15° おき、 $\alpha = -10, 10, 30^\circ$ の場合の切削残留量の測定結果を示す。切込みは $t_1 = 0.1\text{mm}$ と一定である。切削条件 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ では大きな層間剥離を伴うこと、 $\alpha = -10^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ では切削中被削材に繊維配向方向に

Fig. 2 Depth of reluctant uncut

割れが生じたので測定していない。図からわかるようにすくい角によって傾向はすべて異なるものとなる。 $\alpha = -10^\circ$ の場合 $\theta = 0^\circ$ で繊維屈形切りくずとなり比較的大きい $15\mu\text{m}$ となるが、他の繊維角では繊維截断形となり $\theta = 30^\circ$ で最小の $12\mu\text{m}$ となった後、 $\theta > 45^\circ$ で増大し、 60° および 75° で最大値の $20\mu\text{m}$ となる。また $\alpha = 10^\circ$ では $\theta = 0^\circ$ で層間剥離形となるため切削残留量は $2\mu\text{m}$ と小さく、繊維截断形の $\theta = 15^\circ$ で最大値の $10\mu\text{m}$ 、 $\theta > 30^\circ$ では比較の変動少なく $4 \sim 7\mu\text{m}$ の値をとる。 $\alpha = 30^\circ$ では $\theta = 30, 45^\circ$ で最大値 $6\mu\text{m}$ となる凸の曲線となる。さらにここで記載していない $\alpha = 0, 20^\circ$ の切削残留量は図2に示した三者の中間的傾向を示した。

さて今回の測定方法では前報で報告した大きい最大粗さの $\alpha = -10, 10^\circ$ の $\theta = 60$ ならびに 75° の加工面の場合、粗さの影響が切削残留量に大きく現れるの

Fig. 3 Machined surface with a large $R_{\max}$ value

(a) Fiber angle - Tangential force (b) Fiber angle - Normal force

Fig. 4 Cutting force¹⁾

ではないかの疑念が生じるかもしれないが、それらの加工面の詳細な観察状況からしてその影響は軽微と判断された。すなわち最大粗さ $R_{\max} = 11 \sim 12\mu\text{m}$ とやや大きな値であるが、実際の加工面の状況は図3に示すように多くの繊維端が表面上に現れるのではなくエポキシ樹脂が加工面に広がるならかな丘状の部分に所々にやや大きな凹部があるものであり、今回の測定方法による値が適切と判断できる。また前報で示したように粗さが小さい加工面では微小なピッチの凹凸が連続する加工面となり、上述の場合も考慮すると粗さの値を一樣に切削残留量に加味することは困難でもあり、また実際の切削加工時には実用的な意味からも粗さを加味しないほうが有用であると考えられる。

図4(b)に図2を求めた実験条件での背分力 F_N を示す。すでに前報で報告したようにすくい角によって異なる傾向を示し、繊維角によって大きく変化する。そこで図2の切削残留量と比較すると、背分力のすくい角ならび繊維角によって変化する様子が切削残留量のそれと定性的によく対応していることがわかる。

図5は切込みを変化させた場合の切削残留量を示す。繊維角 $\theta = 45^\circ$ と一定である。図からわかるようにすくい角が大きいほど切削残留量は小さく、また $\alpha = -10^\circ$ と $\alpha = 10, 30^\circ$ とは大幅に傾向が異なる。前者が切込みに比例して増加していくにもかかわらず、後者の場合切込みに比例してわずかに増加するにとどまり、実質はほとんど一定に近い $\Delta t_1 = 10\mu\text{m}$ 内外となる。

次に図6は図5の切削残留量を求めた条件での切削

Fig. 5 Depth of cut effects on depth of reluctant uncut

Fig. 7 Depth of deformed part

Fig. 6 Depth of cut effects on cutting force

抵抗を示す。図中の背分力 F_N は $\alpha = -10^\circ$ と $\alpha = 10, 30^\circ$ の場合とは傾向が大幅に異なり、前者では切込みに

ほぼ正比例し増大するが、後者では切込み $t_1 \geq 0.05\text{mm}$ で t_1 の増加に対しわずかに増加するにとどまる。この結果は繊維角 $\theta = 45^\circ$ 一定の条件下では切込みの大小にかかわらず、切削残留量の変化傾向と背分力のそれとが定性的によく対応することを意味する。なお切込み $t_1 \leq 0.05\text{mm}$ では切削残留量の測定は実施していない。

4.2 加工変質深さ

図7に $\theta = 0 \sim 90^\circ$ の 15° おきの $\alpha = -10, 10, 30^\circ$ の場合の加工変質深さの測定結果を示す。切込みは $t_1 = 0.1\text{mm}$ と一定である。図から判断されるようにすくい角が小さいほど加工変質深さが大きく、いずれのすくい角でも繊維截断形となる $15^\circ \leq \theta < 90^\circ$ では $\theta = 30^\circ$ もしくは 45° で最小の値となり、 $\theta \geq 60^\circ$ もしくは 75° で急激に値が増加するU字状の曲線となっている。またその増加割合はすくい角が小さいほど大きくなっている。 $\theta = 0^\circ$ では繊維座屈形もしくは層間剥離形の切削形式となるが、一応求めている。

図4(a)に図7を求めた実験条件での主分力 F_T を示

 (1) $\alpha = 30^\circ, \theta = 30^\circ$

 (2) $\alpha = 30^\circ, \theta = 75^\circ$

Fig. 8 Typical micrographs of Nomarski differential interference contrasts

Fig. 9 Depth of cut effects on deformed part

す。いずれのすくい角においても $\theta=30^\circ$ もしくは 45° で最小値となり、それらより小さい $\theta=15^\circ$ ではやや大きくなり、 $\theta \geq 60^\circ$ もしくは 75° では急激に増大すること。またすくい角が小さいほど値が大きい。等の繊維截断形での主分力の傾向は図7の加工変質深さの変化傾向と定性的によく対応することがわかる。

図8は加工変質深さ測定中のノマルスキー式微分干涉顕微鏡像の例である。切削条件は $\alpha=30^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ ならびに 75° の場合である。写真の右側の加工面下の加工変質部がマトリクスと異なる干渉色を呈し、写真の左側の前加工面下には加工変質深さがほとんどない。また繊維角によつての差異等がよく把握できる。

図9は切込みを変化させて得られた場合の加工変質深さである。繊維角 $\theta=45^\circ$ と一定である。図より切削残留量と同様に切込みに比例して加工変質深さは増加するが、 $\alpha=-10^\circ$ の場合と $\alpha=10^\circ$ ならびに 30° の場合とでは主分力の増加割合が異なることがわかる。すなわち前者が切込みに比例して急増するのに対し、後者は緩やかな増加を示す。これらの傾向は図6で示された切込みの主分力に及ぼす影響と対応していることがわかる。したがって繊維角 $\theta=45^\circ$ では加工変質深さと主分力の変化傾向が切込みを変化させても定性的によく対応することが明らかとなった。

4.3 発生機構ならびに考察

図10に今回対象としている繊維截断形の切削過程を示す。なお切削残留量ならびに加工変質深さの発生機構を説明するため前報で述べた基本的な切削機構¹⁾の一部について説明の都合上記す。この切削形式は一方向性材の繊維角が $15^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の条件で現れ、その過程は(1)繊維層に刃先が食い込んで截断する過程と

Fig. 10 Cutting mechanism of fiber cutting type

(2)それらを切りくずとして排出する過程とからなる。まず過程(1)では刃先が繊維層と接触し、截断しようとするが前報で述べたように以下の原因でただちに截断できない。すなわち刃先周辺のマトリクスであるエポキシ樹脂は低弾性率のため三点曲げ試験のような形で工具刃先によって曲げ変形させられるが、他方高強度ぜい性材料の炭素繊維は曲げ変形しにくく、エポキシ樹脂の変形に十分追従できないので界面での結合を破壊させて対応していく。その結果エポキシ樹脂は拘束が少なくなって変形しやすくなり、図10に示すように曲げ変形量の差によって界面で繊維配向方向にすべりが発生することになる。つまりこの時点で界面に剥離が生じたことになる。さらなる過程の進行により繊維と樹脂は両者ともにそれなりに充分曲げ変形した後刃先で分断される。繊維ならびに樹脂、すなわち繊維層の曲げ変形を主として定量的かつ切削機構に直接関与する形で表現する場合には、図のように曲げひずみを切削方向にとりたわみ量 dr 、変形をたわむと以後表現すると、繊維層はたわんだ後刃先により分断され、切りくずが生成される。繊維角やすくい角によって分断点は切削予定線に対し上方もしくは下方という具合に支配される。そして加工面側に分断された繊維層が刃先の通過とともに弾性回復する。その結果切削されるべくして切削されなかった量、すなわち切削残留量が生成される。言い換えればこの弾性回復量の切込み方向の量が切削残留量である。弾性回復の際に加工面側に分断された繊維層は図10の矢印で示すごとく工具逃げ面を強く擦過する(ブラッシング作用)。

以上の過程を考察すると切削残留量は繊維層のたわみ量と分断点の位置とによって決定される。すなわち図に示すように加工面側に分断された繊維層の弾性回復時の工具逃げ面との接触面積や弾性回復量自体がそ

れら二要因によって変化させられ、これがブラッシング作用の大小となるので背分力の変化とも対応することになる。

このように考えていくと図2の切削残留量の傾向が理解できる。例えば複雑な傾向を呈す $\alpha=10^\circ$ の場合 $\theta=30\sim60^\circ$ では刃先角と繊維角の幾何学的関係よりたわみ量が少なく、切りくず排出空間角 γ^{11} も大きく刃先周辺に変形が集中し、分断点が刃先近傍に存在するため、切削残留量は小さくなり、 $\theta=15^\circ$ では繊維角が小さくたわみ量が大きくなるため切削残留量は大きくなる。さらに $\theta=90^\circ$ ではたわみ量は比較的小さく、分断点が刃先近傍となるため切削残留量は小さくなる。またすくい角が大きくなるほど一般にたわみ量が小さくなるとともに切りくず排出空間角が大きく、分断点が刃先近傍となるので、切削残留量が小さくなる図の傾向が説明できる。

さて繊維層がたわむ時には繊維と樹脂界面でのすべりの発生によってその接合状態が破壊されているので、その厚さが加工変質深さとなる。主分力は大きく分けて繊維層を截断する力と截断した繊維層を切りくずとして排出する力からなる¹¹。もちろんこれらの力は背分力の要因ともなっているが、それらの寄与は小さいと思われる。前者の截断する力はさらに繊維層への食い込みやすさと截断しやすさに別れる。食い込みやすさは変形領域の大小となって現れ、変形領域の食い込み予定線下方の大きさとも対応すると考えられる。したがって食い込み予定線下方の変形領域である加工変質深さは食い込みやすさに対応することになり、これは加工変質深さと主分力の大きさとの対応も意味することになる。截断しやすさは刃先での分断の際発生する割れの数や規模によって変化するが¹¹、これは食い込みやすさに比べ比較的小さいと推定される。

なおたわみ量と変形領域とは上述の説明などからも推察されるように必ずしも大小関係が対応するとは限らない。

5. 結 論

CFRP切削の特徴的な現象である切削残留量ならびに加工変質深さに着目し、新しく考案した方法により測定を実施し、それらの値について考察するとともに発生機構を検討した結果以下のことが明らかになった。

- (1) 通常の金属切削での切残し量に相当する切削残留量は金属に比べ大きく、繊維角やすくい角によって大きく変化し、その傾向は背分力の変化傾向と定性的によく対応する。これは繊維角 $\theta=45^\circ$ であれば切込みが変化しても成り立つ。
- (2) 切削残留量の大小はブラッシング作用の大小に対応し、繊維層のたわみ量と刃先での分断点の位置とによって支配されると考えられる。
- (3) 金属の加工変質層の厚さに相当する加工変質深さは繊維とマトリクスであるエポキシ樹脂との界面で接合が破壊した部分と考えられ、その測定は被削材側面を拘束し二次元切削した側面をノマルスキー式微分干涉顕微鏡で観察すれば干涉色の差として把握できる。
- (4) 加工変質深さが繊維角やすくい角によって変化する傾向は主分力のそれと定性的によく対応し、これは繊維角 $\theta=45^\circ$ であれば切込みが変化しても成り立つ。
- (5) 主分力の構成要因である繊維層の食い込みやすさは変形領域となって現れるので、切削予定線下方の変形領域である加工変質深さの大小は主分力の大小と定性的によく対応する。

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った東レ株式会社に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 金枝敏明、高橋正行：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、精密工学会誌, 55, 8 (1989) 1456.
- 2) 金枝敏明、高橋正行：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）—繊維角および工具すくい角の影響、昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1987) 699.
- 3) 金枝敏明、高橋正行：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2報）—加工面について、昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1987) 659.
- 4) 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.
- 5) A. Koplev, Aa. Lystrup and T. Vorm : The Cutting Process, Chip, and Cutting Forces in Machining CFRP, Composites, 14, 4 (1983) 374.