

# 丸のこによる CFRP 切断時の加工面特性と工具損傷

東京農工大学 ○助川 悠 ◎笹原 弘之

## 要 旨

本研究ではエンドミル加工やアプレシブウォータージェット加工に比べて高能率加工が期待される丸のこによる CFRP 切断時の加工面特性と工具損傷について論じている。丸のこ切削とエンドミル切削との差異を明らかにし、繊維配向角と加工面創成の状態を論じた。また、丸のこでは横振れが横切れ刃の摩耗に大きく影響すること、適切な1刃送りにより工具摩耗を低減できることを明らかにした。

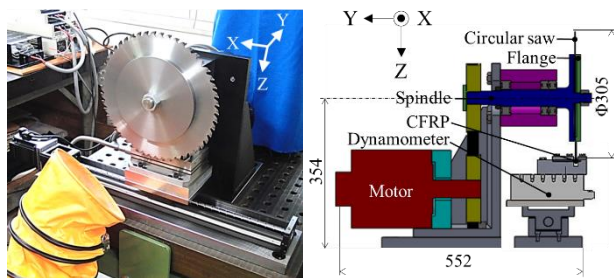
## 1. 結 言

現在航空機産業では CFRP(炭素繊維複合材料)が、環境・資源問題への関心の高まりから需要を増している。CFRP は従来航空機に用いられていた金属材料と比較して軽量、高強度であるため、需要が増している。CFRP のトリミング加工はウォータージェットやエンドミルによって行われるが、コスト面や加工能率の面での問題が指摘されている<sup>1)</sup>。

そこで、丸のこの多くの切れ刃を持ち、高速回転が可能である利点を生かし、丸のこを湾曲させることにより曲線切断にも適用する提案が山田ら<sup>2)</sup>によりなされており、のこ刃の弾性域の変形量であれば任意の自由曲線に適用することが可能である。また、楠富は超硬のエンドミルと同切削速度で丸のこの CFRP 直線切断試験を行い、丸のこでの表面粗さは CFRP 積層方向、工具送り方向ともに、エンドミルの場合と比べて非常に小さく、工具横逃げ面の工具摩耗が小さいことを示した<sup>3)</sup>。これらの結果から丸のこによる CFRP 切断は有用であると考えられるが、未だ加工メカニズムは未解明である点が多い。そこで本研究では様々な条件での CFRP 直線切断を行い、加工面特性および工具摩耗について調査する。

## 2. 実験方法

図1に丸のこの高速試験機の外観および断面図を示す。本試験機は X 軸方向の直進軸を有し、サーボモータにより主軸回転速度とテーブル送り速度を制御することができる。主軸の最高回転速度は  $3000 \text{ min}^{-1}$  である。切削力を測定するために試験機に3成分動力計を固定している。



(a) Appearance

(b) Cross section

Fig.1 Circular saw test machine

丸のこによる CFRP 切断時の加工メカニズムを解明するために、様々な条件で丸のこの CFRP 切削試験を行い、加工面特性と工具摩耗を調査した。厚さ 4 mm の航空機に用いられる汎用 CFRP に対して切削試験を行った。表 1 に基本的な切削条件を示す。加工面特性の解明のために、レーザー顕微鏡による加工面の観察を行った。工具摩耗はマイクロスコープにより工具逃げ面の摩耗幅を測定した。また、丸のこの面外方向振動の振幅の測定には渦電流式の変位センサを用いた。

Table.1 Cutting Conditions

Tool	Circular saw	
Material of tool	Cemented Carbide Z10	
Number of cutting edges	50	
Workpiece	CFRP 擬似等方材 三菱レイヨン TR380G250	
Workpiece thickness	mm	4
Feed rate	mm/min	818
Spindle speed	$\text{min}^{-1}$	327
Cutting speed	m/min	314
Feed per tooth	mm/tooth	0.05
Cutting direction	Down cut	
Protrusion amount	mm	5

## 3. 振動抑制

丸のこを固定するフランジと丸のこの間に制振合金を挟み込んだ場合と挟まなかった場合とで丸のこによる CFRP 直線切断試験を行い、CFRP 切断時の振動が工具摩耗に与える影響について調査した。マンガンを主成分とする制振合金は振動エネルギーを熱に変換することによって音や振動を吸収する機能をもつ<sup>4)</sup>。図2に16パス(2400 mm)切削時の振幅をFFT解析した結果を示す。制振合金なしではおよそ 270 Hz を1周期とした振動が支配的である。この周波数はのこ刃1刃が CFRP を断続的に切削する周波数である 273 Hz と一致している。つまり、制振合金なしではのこ刃1刃が CFRP を切削する際の振動の影響を受けやすいことがわかる。

続いて、図3にのこ刃横逃げ面の摩耗幅の比較を示す。16パス(2400 mm)において摩耗幅は制振合金がない場合とある場合とでそれぞれ  $68 \mu\text{m}$ 、 $56 \mu\text{m}$  であった。制振合金を挟むことによって剛性と減衰能が高まったことにより、横逃げ面と炭素繊維との擦過頻度が少なくなり摩耗が減少したものと考えられる。

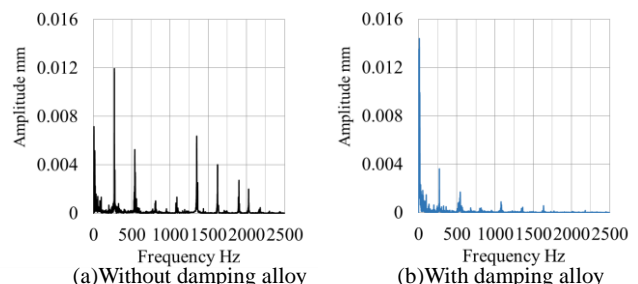


Fig.2 FFT analysis of amplitude (Cutting length 2400 mm)

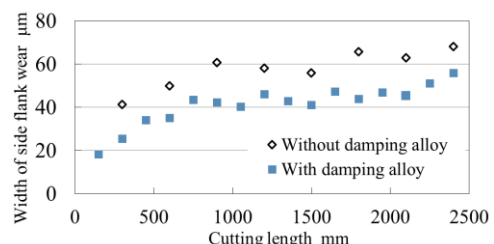


Fig.3 Comparison of side flank wear

#### 4. 1刃送り量が工具摩耗に及ぼす影響

丸のこのチップと同一材種のエンドミルの推奨1刃送りの0.05 mm/toothと、CFRPとのこ刃の擦過する回数が2倍、0.5倍になる0.025 mm/tooth, 0.1 mm/toothで実験を行った。図4にX方向とZ方向の切削力の合力  $F_{xz}$  の比較を示す。すべての条件で切削距離が長くなると切削力が大きくなっている。これは摩耗幅が大となったためと考えられる。

続いて、図5に16パス(2400 mm)切削後の工具摩耗幅を示す。3枚のこの刃の裏面の刃の横逃げ面摩耗幅を平均した。1刃送りが大きいかほど摩耗は小さくなった。これは同一切削距離において、繊維を切断する回数が少なくなり、強靱な炭素繊維に擦過されることによるアブレシブ作用の影響が小さくなるからだと考えられる<sup>5)</sup>。

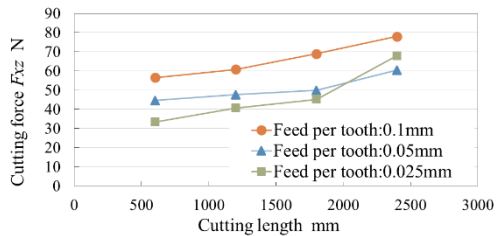


Fig.4 Effect of feed per tooth on cutting force

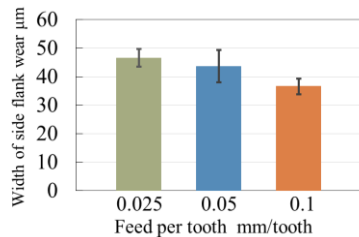


Fig.5 Comparison of average side flank wear

#### 5. 繊維配向角と切削特性の関係性

全ての繊維配向角が同一方向であるCFRP一方向材を用いて、丸のこによるCFRP切削試験を行い繊維配向角と切削特性との関係を調べた。繊維配向角は工具送り方向に平行な方向を $0^\circ$ 、時計回りを正方向として、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $-45^\circ$ の4種類を用いた。図6に8パス(1200 mm)切削時の切削力の合力  $F_{xz}$  を示す。

また、図7に板厚4mmのCFRPを切削する際に、のこ刃1刃の前切れ刃と横切れ刃が1回の切削あたりに切断する炭素繊維本数の合計を示す。繊維のピッチを $7\mu\text{m}$ とし、のこ刃のエッジがCFRPを切削する際の軌跡から、1刃が1度に切削する面積を算出し、面積をピッチの2乗で割ることで炭素繊維切断本数を求めた。切削力は $0^\circ > \pm 45^\circ > 90^\circ$ の順で大きくなっており、炭素繊維切断本数が多いほど切削力は大きくなる事が分かる。 $90^\circ$ のように炭素繊維切断本数が少ない場合は繊維の界面に沿うように前切れ刃が進むため、切削力は樹脂の強度に依存する。樹脂の強度は炭素繊維と比べて著しく小さいことから炭素繊維切断本数が少ないほど切削力は小さくなると考えられる。

続いて、図8に横逃げ面摩耗幅の比較を示す。また、図9に仕上げ面を切削する横切れ刃の1刃が1回の切削あたりに切断する炭素繊維の本数を示す。 $0^\circ$ において繊維切断本数が少ないにもかかわらず摩耗幅が大きい理由は、横切れ刃が繊維の界面に沿うように進み、その際に断ち切れないままの繊維の上を横逃げ面が擦過するため、繊維切断とは違ったアブレシブ作用が働くからだと考えられる。ここでSEMを使用して観察した各配向角における加工面の様子を図10に示す。 $45^\circ$ の加工面では繊維の輪郭がはっきりと見えるが $90^\circ$ の加工面では仕上げ面が平坦であることがわかる。 $45^\circ$ において摩耗幅が大きくなった理由はこの炭素繊維と擦過したからだと考えられる。また $-45^\circ$ では、炭素繊維が断ち切られずに弾性変形後に仕上げ面よりも深部で破断する事象が起こっているため、加工面は荒れている。その際は炭素繊維を切断していないため摩耗幅も小さくなると

考えられる。

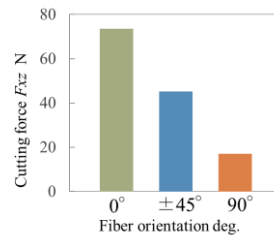


Fig.6 Effect of fiber orientation on cutting force

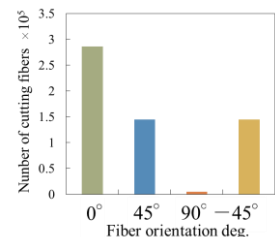


Fig.7 Relationship between fiber orientation and number of cutting fiber

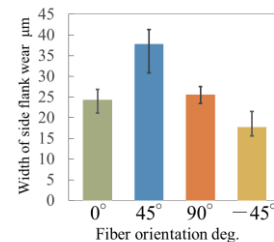


Fig.8 Effect of fiber orientation on side flank wear

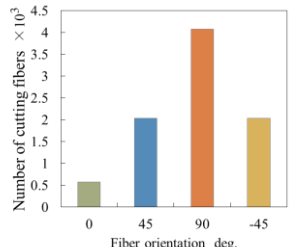


Fig.9 Number of cutting fiber of side cutting edge

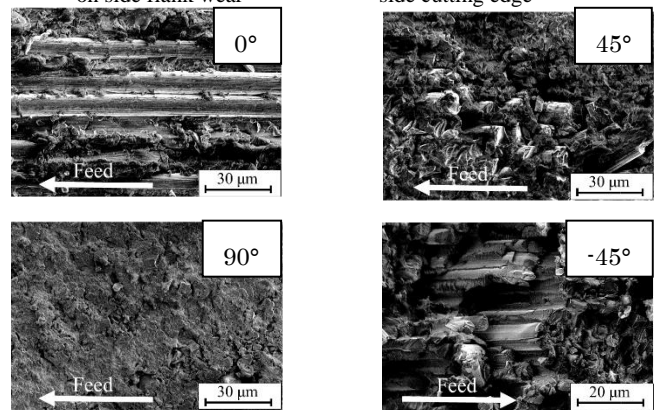


Fig.10 SEM images of machined surface on circular saw cutting

#### 6. 結言

丸のこによるCFRPの切削における加工面特性や工具摩耗を調査し、以下のことを明らかにした。

- 1) 丸のこの面外方向の振動を抑制することにより、横逃げ面と炭素繊維との擦過頻度が減り、工具摩耗は小さくなる。
- 2) 1刃送りを大きくすることにより切削力は大きくなるが、切削回数が少なくなるため、工具摩耗は小さくなる。
- 3) 加工面の様子は繊維配向方向により異なり、横逃げ面との擦過の仕方も異なる、その違いが繊維切断本数の他に、横逃げ面の摩耗の大きさを左右する要素となっている。

#### 参考文献

- 1) 有澤秀彰, 炭素繊維複合材(CFRP)の高効率加工技術, 日本機械学会誌, 116, (2013), 824-825.
- 2) Yohei Yamada and Hiroyuki Sasahara, Free-form curves cutting using flexible circular saw, Precision Engineering, 38, 3 (2014) pp. 611-616.
- 3) 楠富達仁, 丸のこによるCFRP高速切断時の加工面特性と工具損傷, 第22回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会論文集, (2015), pp3-4.
- 4) 渡辺伸, 櫻井文仁, 田村駿人, 制振合金「スターサイレント」組み込み工具保持具, ツールエンジニア 4月, (2015), pp75-79.
- 5) Murakami Daichi, Yashiro Takeshi, Sasahara Hiroyuki, Clarification of relationship between fiber orientation and tool wear in milling of CFRP, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21, (2013), pp277-280,