

丸のこによる CFRP 高速切断時の加工面特性と工具損傷

東京農工大学 ○楠富 達仁, 山田 洋平 ◎笹原 弘之

要 旨

本研究では、丸のこによる高効率CFRP加工の実現を目指している。そこでCFRP切断時の加工メカニズムを解明するために、新たに丸のこのCFRP切断試験機を開発し、エンドミル加工との比較を行い、CFRP切断時の加工面特性および工具摩耗を調査した。その結果、丸のこはエンドミルと比べて工具摩耗が非常に小さく、CFRP積層方向と工具送り方向の表面粗さにおいて優れた値を示し、アンカットファイバーが少ない良好な加工面が得られることを示した。

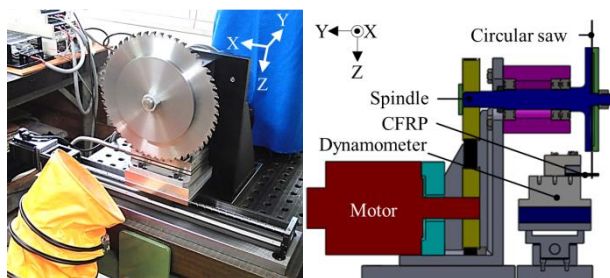
1. 緒 言

航空機産業において航空機の軽量化による低燃費化・高性能化を図るべく、一般的な金属材料と比較して比強度が優れる CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の適用が年々拡大している¹⁾。それに伴い、CFRP 製品の加工時間の短縮やコストの削減が求められる。CFRP 製品のトリミング工程はウォータージェットやエンドミルによる加工が主流であるが、CFRP は難削材であるため加工能率を上げられない、工具寿命が短いという問題がある²⁾。

そこで、新たな CFRP 加工技術として考えられているのが、丸のこによる CFRP 高速切断である。丸のこは、多くの切れ刃を持ち、高速回転が可能のため加工能率が高く、加工コストが低いといった優れた特徴を持つ。山田らは丸のこによる CFRP 直線切断とエンドミル加工との比較を行い、丸のこはエンドミルと比べて、工具刃先温度を抑制することができ、良好な加工断面が得られることを示した³⁾。こ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、丸のこによる CFRP 切断時の詳細なメカニズムは不明瞭である。そこで本研究では、丸のこによる CFRP 高速切断時の加工メカニズムの解明を目的とする。新たに丸のこの CFRP 高速切断試験機を開発し、エンドミル加工との比較を行い、CFRP 切断時の加工面特性および工具摩耗を調査する。

2. 実験方法

図 1 に新たに開発した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 3000min^{-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 Developed circular saw

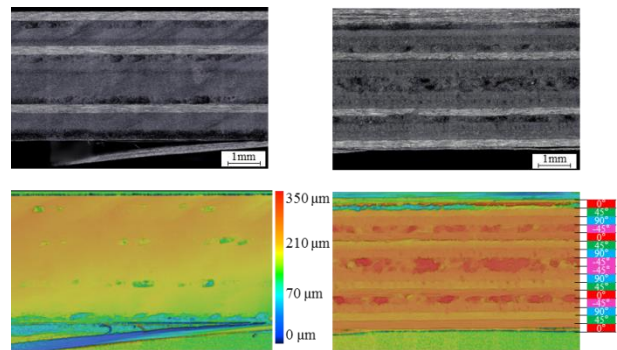
丸のこによる CFRP 切断時の加工メカニズムを解明するために、丸のことエンドミルによって CFRP 切削試験を行い、加工面特性と工具摩耗を調査した。表 1 に切削条件を示す。単純な比較を行うために、切削条件は切削速度と一刃送り速度を同一とし、厚さ 4mm の航空機用 CFRP に対して切削試験を行った。そして加工面特性の解明のために、レーザー顕微鏡による加工面の観察と表面粗さの測定を行った。工具摩耗は顕微鏡により工具逃げ面の摩耗幅を測定した。

Table.1 Cutting Conditions

Tool	Circular saw	Endmill
Material of tool	Cemented Carbide	
Number of cutting edges	50	2
Workpiece	CFRP	
Workpiece thickness	mm	
Workpiece length	mm	
Feed rate	mm/min	mm/min
Feed per tooth	mm/tooth	
Cutting speed	m/min	
Spindle speed	min ⁻¹	min ⁻¹
Cutting direction	Down cut	
Depth of cut	mm	mm

3. 加工面特性とデラミネーション

レーザー顕微鏡により観察した 16 パス切削後 (切削距離 2400mm) の加工面の様子を図 2 に示す。丸のこによる加工面はエンドミルと比べて凹凸が小さく平坦で良好な加工面であることがわかる。しかし、加工面にカッターマーク、下面部にはデラミネーションが確認できる。カッターマークの発生にはこの刃の横振れが起因していると考えられる。工具摩耗が進行し切れ味が悪化すると、正常な切断が行われず、この刃の半径方向に負荷される切削力が大きくなり、この刃の台金が面外方向に弾性変形する。この変形がこの刃の横振れであり、面外方向の力である F_y 成分の切削力が加工面性状に大きな影響を与えると考えられる。エンドミルの加工面は図(b)の下のコントラスト図から繊維の配向方向が変わる炭素繊維層毎に凹凸が異なっていることがわかる。これは切れ刃の摩耗速度が炭素繊維配向角によって異なるためであると考えられる。また加工面の中央部の -45° の炭素繊維層にむしれが確認できる。これはエンドミルの刃先が摩耗し、切れ味が悪化したことにより正常な切削が行われなくなったためであると考えられる。丸のこがエンドミルと比べて良好な加工面が得られるのは、丸のこの工具摩耗が小さいためであると推測される。



(a) Circular saw

(b) Endmill

Fig.2 Machined surface

表面粗さの測定結果を図3に示す。測定位置は、長さ150mmの試験片に対して中央の75mmの位置である。測定方向はCFRP積層方向と工具送り方向の2種類で算術平均粗さRaを測定した。測定は3回行い、平均した値を用いた。

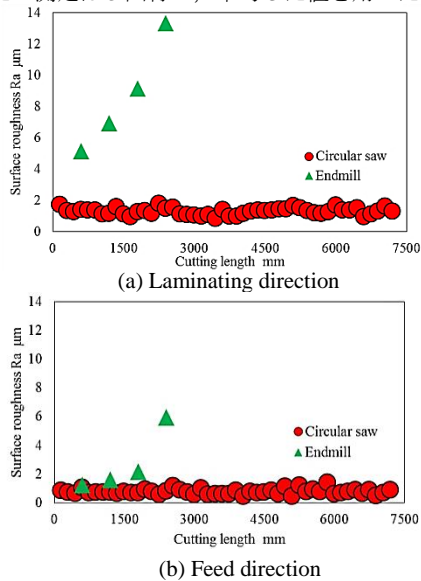


Fig.3 Surface roughness of CFRP

CFRP積層方向、工具送り方向ともに、丸のこ切断後の表面粗さはエンドミルの場合と比べて非常に小さいことがわかる。エンドミル切断後の表面粗さは、切削距離が長くなるにつれて急激に大きくなっている。また4パスの段階で、エンドミルの表面粗さは、生産現場における航空機用部材のトリム加工の基準である125 micro-inches Ra (Ra 3.175 μm)の算術平均粗さを上回っている。一方丸のこの表面粗さは、切削距離が長くなってもほとんど変化がみられず、エンドミルの切削距離の3倍である48パス切断後(切削距離7200mm)においても航空機用部材のトリム加工の基準の算術平均粗さを下回る2μmRa以下を維持している。これは切削距離が長くなってもこの刃の工具摩耗は小さく、良好な切れ味を持続しているためであると考えられる。また丸のことエンドミルの両者においても、積層方向の表面粗さの方が工具送り方向よりも値が大きいことがわかる。これは、CFRPの加工面は繊維の配向方向が変わる炭素繊維層毎に凹凸が異なるため、積層方向において加工面の高低差が増大し、表面粗さに大きな値が出力されるためであると考えられる。

4. 工具摩耗の測定結果と考察

16パス切断後(切削距離2400mm)の丸のこの横逃げ面の様子を図4に示す。図4(a)はマイクروسコープによる写真、図4(b)はレーザー顕微鏡による拡大図である。拡大図において刃先が摩耗し丸みを帯びていることが確認できる。

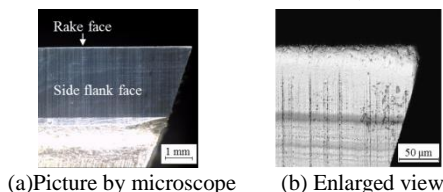
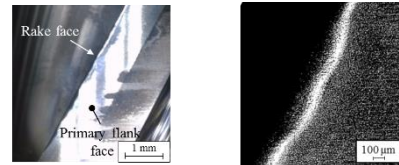


Fig.4 Side flank wear of circular saw

16パス切断後(切削距離2400mm)のエンドミルの第一逃げ面の様子を図5に示す。逃げ面が波打つように摩耗していることが確認できる。CFRPは板厚方向に配向角が異なる炭素繊維が積層されているが、エンドミルによるCFRP加工は同一の切れ刃が毎回転同じ炭素繊維層を切削する。摩耗速度は炭素繊維配向角によって異なるため、炭素繊維層毎に摩耗の進行も異なり、刃先が図5(b)のように波状に摩耗したと考えら

れる。一方丸のこは、炭素繊維層の面外方向から切断が行われるため、横逃げ面は均一に摩耗したと考えられる。



(a) Picture by microscope (b) Enlarged view

Fig.5 Primary flank wear of Endmill

エンドミルの第一逃げ面と丸のこの横逃げ面の摩耗幅の比較を図6に示す。丸のこはエンドミルと比べて、工具摩耗の進行が遅く、工具寿命が長いことがわかる。エンドミルの摩耗幅は切削距離2400m地点において104μmであるのに対し、丸のこは50μmと半分以下の値となっている。エンドミル加工の3倍の切削距離7200mmまで切断を行ったが、66.7μmとエンドミルと比べて非常に工具摩耗が小さいことがわかる。これはエンドミルが2枚刃であるのに対し、丸のこは50枚刃と切れ刃多く工具摩耗が分散したためであると考えられる。

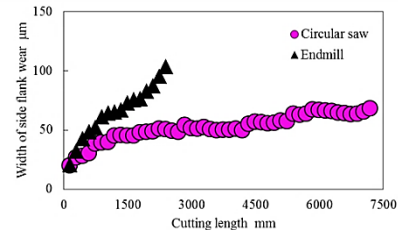


Fig.6 Width of side flank wear

丸のこの工具摩耗が小さいことは、丸のことエンドミルの両者の切削特性の違いにも起因していると考えられる。図7に切り厚さの違いを示す。丸のこはほぼ一定の切り厚さを維持するのにに対し、エンドミルは $\theta = 180^\circ$ 付近において切り厚さが0となり、切削が行われずに刃先が加工面上を滑りする状態となるため、エンドミルの工具摩耗が進行すると考えられる。

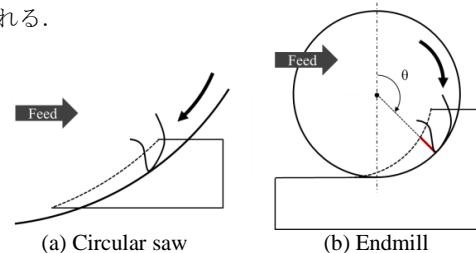


Fig.7 Nominal thickness of cut

5. 結言

丸のことエンドミルによってCFRPの切削試験を行い、加工面特性と工具摩耗を調査し、以下のことを明らかにした。

- 1) 丸のこはエンドミルと比べて、凹凸が小さく平坦で良好な加工面が得られる。
- 2) 丸のこ切断後の表面粗さは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、切削距離が長くなってもほとんど変化しない。
- 3) 丸のこはエンドミルと比べて、工具横逃げ面の工具摩耗が非常に小さく、工具寿命も長い

参考文献

- 1) 北野彰彦, 航空機の軽量化を支える炭素繊維複合材料, 化学と教育, 59, 4, (1971), 226-229.
- 2) 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.
- 3) 山田洋平, 笹原弘之, 大澄信行, 畠山和也, 曲線切断を可能とする丸のこ切削: CFRP直線切断時の切削特性, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2013A(0), (2013), 313-314.