

軽量部材加工技術に関する研究（第3報）

小川大介*、加賀忠士*

Study on lightweight material machining technology (III)

OGAWA Daisuke* and KAGA Tadashi*

軽量部材として注目されている炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）の切削加工では、加工条件だけでなく、工具の形状や材種、被削材の繊維配向が、工具摩耗や加工品質に影響することが知られている。そこで、工具形状およびツールパスに着目し、CFRPの切削加工実験を行い、切削抵抗および工具摩耗、ケバの状態について評価した。その結果、すくい角については、ポジティブ形状の方が切削抵抗を抑制し、ケバの量を抑えることができ、ツールパスについては、アップカットの方が工具摩耗を低減し、ケバを抑えることができることがわかった。

1. はじめに

近年、環境や省エネルギー問題の観点から、航空機や自動車部品等に、軽量かつ機械的強度の高いCFRPの適用が増えている¹⁾。このCFRPを部品として使用するためには、成形加工した後、切削や穴あけなどの二次加工が必要となることから、高品位で高能率な切削加工に関する研究が盛んに行われている^{2)~5)}。CFRPは、金属材料などの等方材と異なり、繊維配向によって切削特性に異方性が生じることから、ケバやデラミネーション（層間剥離）が発生して仕上げ面性状の品質が低下する。また、炭素繊維によって工具寿命が短くなることから、難削材といわれている。これらの対策として、低能率加工やコーティング工具などが検討されているが、製造コストが高くなるなど課題がある。そこで、主軸回転数や送りなどの加工条件、工具形状やコーティング、CFRPの繊維配向などが、加工品質や工具摩耗へ与える影響を把握することが望まれている。

これまでに当センターでは、主軸回転数や送りなどの加工条件が加工面品質に与える影響や、工具コーティングの有無による工具摩耗の特性について調査を行ってきた⁶⁾⁷⁾。今年度は、工具形状（すくい角）およびツールパスを変えた時の切削抵抗および工具摩耗、ケバの状態について評価を行ったので報告する。

2. 実験

2.1 実験装置および被削材料

実験には、5軸NC加工機（ヤマザキマザック（株）、VARIAXIS630-5XII）を用いた。NC加工機のテーブル上に切削動力計（日本キスラー（株）、JZ90012A）を配置し、その上に治具を介して被削材を固定して切削実験を行った。切削条件は、主軸回転数 5000・7000・9000min⁻¹、1刃送り 0.01・0.1・0.2mm/tooth、径切込み

10mm、軸切込み5mmとし、アップカットおよびダウンカットによるドライ加工を行った。被削材に用いた熱硬化性CFRPは、一方向材を配向積層[90/0/±45]_sして疑似等方板としたもので、板厚は8mmである。この材料を板幅110mmに切断し、加工実験に用いた。

切削抵抗の計測方向は図1に示すとおり、Fx、Fy、Fzの3分力を計測し、それらの合力を求めて解析した。加工後の工具の評価については、デジタルマイクロスコプ（（株）キーエンス製、VHX-1000）とレーザー顕微鏡（（株）キーエンス製、VK-9700/9710）を用いて工具摩耗量を計測した。工具摩耗は、エンドミル工具先端から、0.8（繊維方向90°）・1.8（45°）・2.8mm（0°）の3箇所を測定し、平均したものを工具摩耗量とし、被削材110mm加工後に計測した。

2.2 工具形状（すくい角）

切削工具は、直径20mm、ねじれ角10°の4枚刃超硬エンドミル工具を用いた。図2に示すように、すくい角がポジティブ形状（プラス角度）となれば、シャープな切れ刃形状によって切削抵抗が小さくなり、ネガティブ形状（マイナス角度）の場合、耐摩耗性が向上するといった特徴を有していることから、本研究において、すくい角を-2°、+6°、+10°の3種類の工具を用いた加工実験を行い、それぞれの切削抵抗や工具摩耗について評価した。

2.3 ツールパス

切削加工時におけるツールパスは、図3に示すように、アップカットとダウンカットと呼ばれる加工方法がある。これまで筆者らは、ダウンカットのツールパスを用いて実験を行ってきた。ダウンカットは、切りくず厚さが最大の所から刃先が被削材に食い込み、0となる方向に進むツールパスで、金属加工の場合、工具寿命が長くなる利点がある。一方、アップカットはその逆で、表面粗さが滑らかになる利点がある。そこで、ツールパスによる切削抵抗や工具摩耗、およびケバの状態について評価し

* 機械部

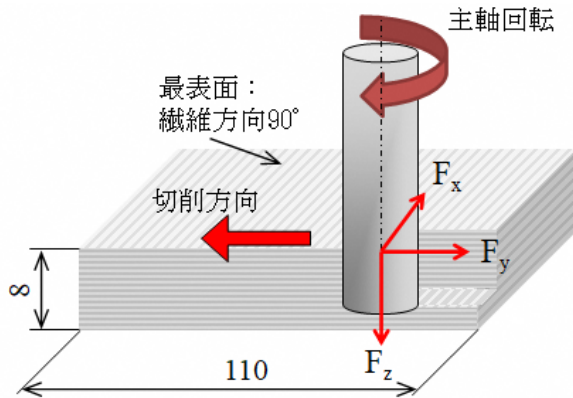
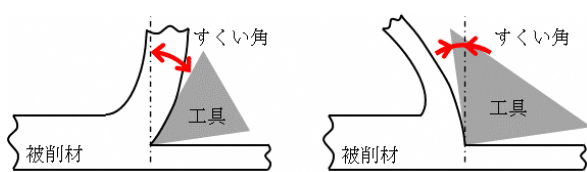


図1 切削加工モデル



(a) ポジティブ形状 (b) ネガティブ形状
図2 工具形状（すくい角）

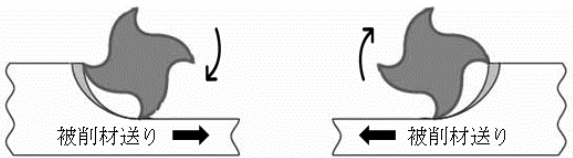


図3 ツールパス

た。なお切削工具は、直径20mm、ねじれ角 10° 、すくい角 $+6^\circ$ の4枚刃超硬エンドミル工具を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 すくい角に関する評価

すくい角の違いによる、ダウンカット時の切削抵抗の測定結果を図4に示す。すくい角がネガティブ形状（ -2° ）とポジティブ形状（ $+6^\circ$ 、 $+10^\circ$ ）とを比較すると、ネガティブ形状の切削抵抗の方が高いことが確認できた。特に、主軸回転数 9000min^{-1} 条件において比較すると、約2倍の差が生じていた。また、昨年度までの結果と同様、送り速度を遅くすることで、切削抵抗の抑制に効果があることが確認できた。ポジティブ形状のすくい角、 $+6^\circ$ と $+10^\circ$ における切削抵抗については、すくい角 $+10^\circ$ の方が小さくなると予想していたが、条件によっては逆転現象が起きていた。この要因については、工具刃先の状態や切りくず排出などの影響によって生じたのではないかと考えられる。

次に、ダウンカット時の工具摩耗量測定結果を図5に示す。すくい角の違いによる工具摩耗量の傾向は確認で

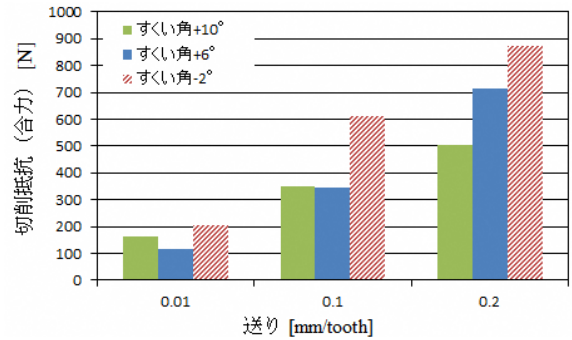
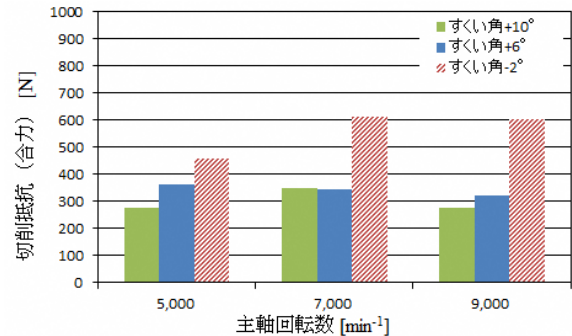
(a) 送り速度と切削抵抗（主軸回転数： 7000min^{-1} ）(b) 主軸回転数と切削抵抗（送り： 0.1mm/tooth ）

図4 切削抵抗測定結果

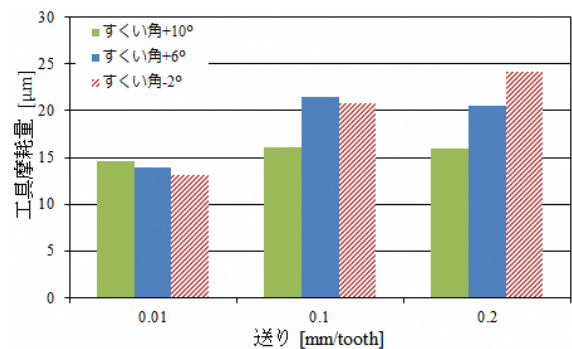
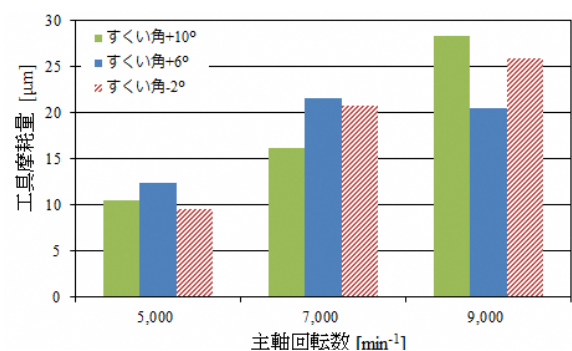
(a) 送り速度と工具摩耗（主軸回転数： 7000min^{-1} ）(b) 主軸回転数と工具摩耗（送り： 0.1mm/tooth ）

図5 工具摩耗量測定結果

きなかった。全体的な傾向としては、送り速度および主軸回転数を遅くすることで、工具摩耗量の低減効果があるといえる。使用後の工具状態の一例を図6に示す。切



(a) すくい角-2°



(b) すくい角+10°

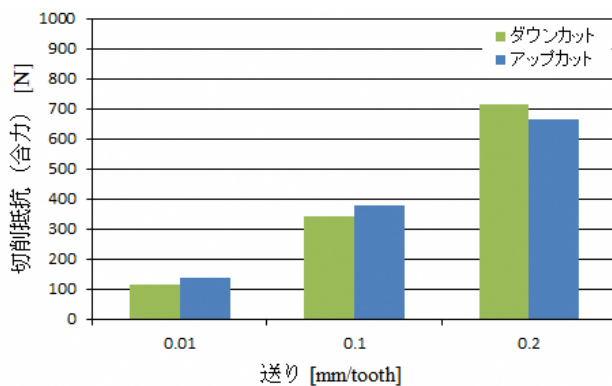
図6 工具状態

(主軸回転数：7000min⁻¹、送り：0.2mm/tooth)

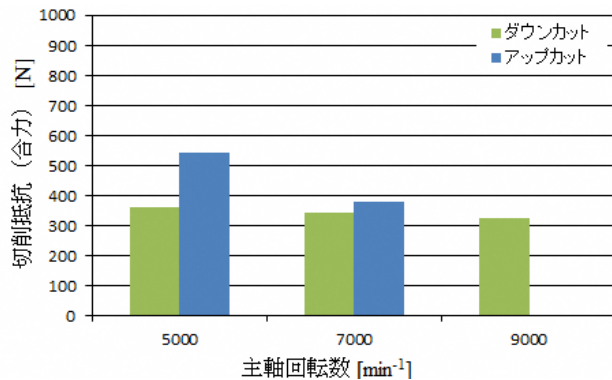


図7 加工面状態

(主軸回転数：9000min⁻¹、送り：0.1mm/tooth)

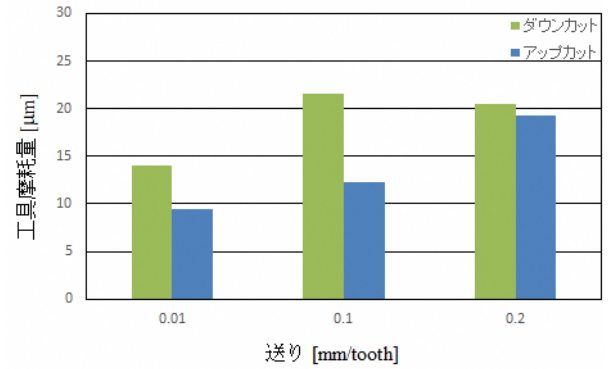


(a) 送りと切削抵抗 (主軸回転数：7000min⁻¹)

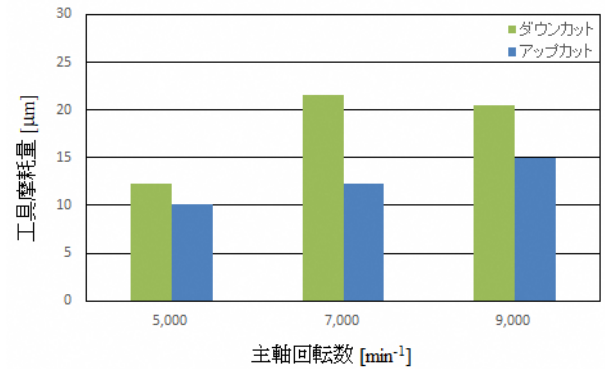


(b) 主軸回転数と切削抵抗 (送り：0.1mm/tooth)

図8 切削抵抗測定結果

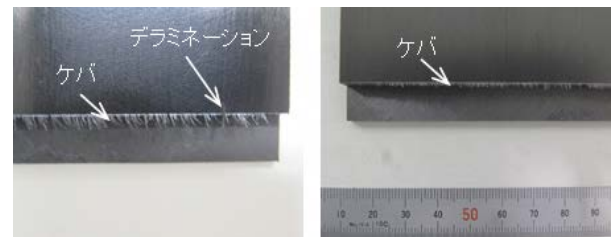


(a) 送りと工具摩耗 (主軸回転数：7000min⁻¹)



(b) 主軸回転数と工具摩耗 (送り：0.1mm/tooth)

図9 工具摩耗量測定結果



(a) ダウンカット

(b) アップカット

図10 加工面状態

(主軸回転数：7000min⁻¹、送り：0.1mm/tooth)

れ刃の一部分に凹凸が生じているのは、炭素繊維の積層方向によって工具摩耗に違いが生じたことが要因であり、これが工具摩耗量のバラツキに影響したのではないかと考えられる。

CFRP の加工面状態としては、図7に示すように、すくい角-2°より、すくい角+6°および+10°の方がケバの発生が少なく、良好な仕上げ面が得られることがわかった。

以上のことから、エンドミル工具のすくい角の選定については、ポジティブ形状のすくい角の方が切削抵抗を抑制し、ケバの量を抑えることができる。

3. 2 ツールパスに関する評価

ツールパス (アップカットおよびダウンカット) によ

る切削抵抗の測定結果について、図8に示す。ただし、主軸回転数 9000min^{-1} におけるアップカットの切削抵抗結果については、データを取得できなかったため、省略している。全体的な切削抵抗の傾向として、ツールパスの違いによる切削抵抗の差は小さいことが確認できた。ただし、主軸回転数 5000min^{-1} 条件については、アップカットの切削抵抗の方が約3割増加していた。

次に、工具摩耗量について測定した結果を、図9に示す。ダウンカットと比べ、アップカットの方が工具摩耗を抑えることが確認できた。一般的に、ダウンカットの方が、切削長さが短くなることから工具寿命が長くなると言われているが、CFRPの切削加工においては、アップ加工の方が工具摩耗は少なかった。ダウンカットでは、工具が被削材に食い込む際の衝撃があるが、アップカットでは、切りくず厚さがゼロから始まる方ため、衝撃を少なくでき、工具摩耗の低減効果があったのではないかと考えられる。

CFRPの加工面状態について、図10に示すように、アップカットの方がケバの量が低減されていることが確認できた。ダウンカットは工具が被削材から抜ける所が加工面となるが、アップカットの場合、被削材に食い込むところが加工面となる。そのため、アップカットでは、未加工部分が加工変形を抑制し、ケバが少なくなったと考えられる。

以上のことから、アップカットの方が工具摩耗やケバの量を抑えることができる。

4. まとめ

工具形状およびツールパスに関するCFRPの切削加工実験を行い、切削抵抗や工具摩耗、およびケバの状態に関する評価を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) エンドミル工具のすくい角については、ポジティブ形状の方が切削抵抗を抑制し、ケバの量を抑えることができる。
- 2) CFRP 切削加工のツールパスについては、アップカットの方が工具摩耗を低減し、ケバを抑えることができる。

【謝 辞】

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団の研究助成金により実施させて頂きました。また、本研究にあたり、ご協力いただきましたミズノテクニクス株式会社様、株式会社エムテック様に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) J.Takahashi, Development in Composites Technology for Reduction of Environmental Load, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.57, No.8, PP. 852-855, Aug.2008

- 2) 酒井ら, 炭素繊維強化熱可塑性樹脂のトリミング加工に関する研究, 日本機械学会第9回生産加工・国策機械部門講演会論文集, 85.2012
- 3) 坂本ら, CFRP板のエンドミル加工に関する研究, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, PP311-312, 2013
- 4) 加賀, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2, pp47-49, 2014
- 5) 加藤, 鳥取県産業技術センター研究報告 No.19, PP.39-43, 2016
- 6) 小川ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp51-54, 2019
- 7) 小川ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp9-10, 2020