

# 熱可塑性 CFRP の切削・研削加工技術の確立 (第2報)

柘植 英明、加賀 忠士、萱岡 誠

## Establishment of the cutting and grinding processing technology of CFRTP (II)

Hideaki Tsuge, Tadashi Kaga and Makoto Kayaoka

熱可塑性 CFRP は、ホットプレス成形により短時間で成形を行うことができるため、自動車等の量産部品に適した材料として注目されている。本研究では、熱可塑性 CFRP の切削および研削加工による端面加工（トリム加工）を行い、熱可塑性 CFRP の加工特性を把握するとともに、熱可塑性 CFRP の加工に適した加工技術の確立を目指す。今年度は、熱可塑性 CFRP に適した切削工具仕様の検討およびダイヤモンド配列砥石を用いたトリム加工について基礎的な検討を行った。その結果、切削加工においては、熱可塑性 CFRP に適した工具のすくい角およびねじれ角を把握することができた。また、研削加工においては、ダイヤモンド配列砥石の加工性能がダイヤモンド電着砥石よりも非常に優れていることが明らかとなった。

### 1. はじめに

熱可塑性 CFRP は、ホットプレス成形により、短時間で成形を行うことができるため、量産が必要となる自動車部品等に適した材料として注目されており、実用化に向けた取り組みが行われている<sup>1)~3)</sup>。しかし、プレス成形後に製品外周部の端面加工が必要となることがあるが、熱可塑性 CFRP は、熱硬化性 CFRP と同様に工具摩耗やバリ等の欠陥が生じやすい難削材料である。また、熱可塑性 CFRP は、新しい材料であることから加工データは蓄積されておらず、切削および研削加工における加工データの収集が必要不可欠となっている。

昨年度は、ダイヤモンドコーティング超硬エンドミルを用いたトリム加工における冷却の影響およびダイヤモンド電着砥石を用いたトリム加工について加工条件が加工面性状に及ぼす影響について検討した<sup>4)</sup>。

そこで本年度は、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するために、工具形状と加工条件を変えた場合の加工力を理論計算することによって工具仕様を絞り、工具を試作して加工性能を評価した。また、ダイヤモンド配列砥石を用いた研削加工における加工性能を評価したのでこれを報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置および被削材料

加工実験には5軸 NC 加工機（ヤマザキマザック、VARIAXIS630-5X）を用い、熱可塑性 CFRP は、BOND LAMINATES 社の TEPEX201を用いた。加工実験用の被削材として、切削加工実験においては厚さ2mmの板材をそのまま用い、研削加工においてはホットプレス（Pinette Emidecau Industries、ONE DOWN-ACTING SINGLE ACTION 500）を用いて、2枚を重ね合わせて4mm厚にした板材を用いた。この試料を、55×45mmの大きさに切断し、固定用の穴を左右に3穴ずつ設けた。

#### 2.2 エンドミルによる切削加工

熱可塑性 CFRP に適した切削工具の仕様を検討するために、図1に示すような、ねじれ角0°、すくい角0°、工具径φ12mmの2枚刃超硬エンドミルを用いて、リード角0°、工具回転数6000min<sup>-1</sup>、送り0.2mm/tooth（送り速度2400m/min）のトリム加工（半径方向の切込みは、エンドミル直径と同じ12mmのスロットニングで、試験片を2つに分割）による切削力測定実験を行った。加工実験の様子を図2に示す。ここで得られた加工力データを基に、工具形状および加工条件による加工力の概算を行うことで工具仕様を絞り込んだ。その後、工具を試作して加工実験を行った。図2に、切削加工実験の様子を示す。



図1 切削工具の外観

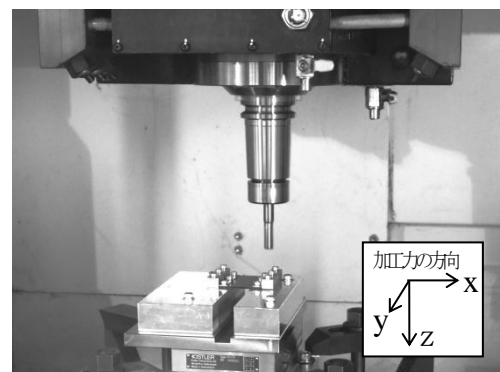


図2 切削加工実験の様子

## 2. 3 砥石による研削加工

昨年度に実施したダイヤモンド電着工具によるトリム加工実験では、工具回転数  $1000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $50 \text{ mm/min}$  の加工条件以外では加工が困難であった。その理由として、研削加工においては、 $1 \text{ mm}$  の径方向切込量は大き過ぎるために目詰まりが生じたことが考えられる。そこで、径方向切込量を  $0.5 \text{ mm}$  として、図3に示す直径  $\phi 10 \text{ mm}$ 、ダイヤモンド粒度#60 のダイヤモンド電着砥石を用いて加工実験を行った。なお、加工条件については、昨年度実施した条件のうち、単位回転あたりの送りが同じになる、工具回転数  $1000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $50 \text{ mm/min}$  と工具回転数  $2000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $100 \text{ mm/min}$ 、工具回転数  $4000 \text{ min}^{-1}$  および送り速度  $400 \text{ mm/min}$ 、工具回転数  $8000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $200 \text{ mm/min}$  の4条件にて加工実験を実施した。図4に加工実験の様子を示す。



図3 ダイヤモンド電着砥石の外観

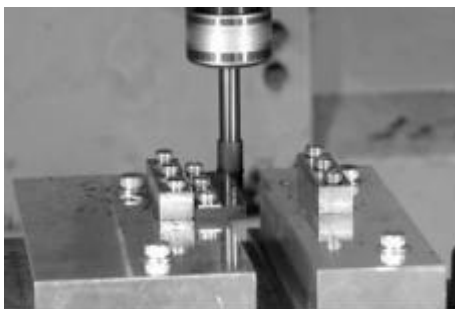


図4 研削加工の様子



(a) 粒度#60



(b) 粒度#80

図5 ダイヤモンド配列砥石の外観

熱硬化性 CFRP の加工においては、ダイヤモンド配列砥石の研削能力が一般的なダイヤモンド電着砥石よりも優れていることが明らかとなっている<sup>5)</sup>ので、熱可塑性 CFRP への適性についても検討した。用いたダイヤモンド配列砥石の外観を図5に示す。粒度は#60、砥粒ピッチは  $0.8 \text{ mm}$  である。ダイヤモンド砥粒の配列は、加工面に研削痕が目立たないようにするために円周方向に対して僅かに傾けてダイヤモンド砥粒を配置している。

## 3. 結果及び考察

### 3. 1 切削加工における工具形状の検討

工具形状と加工条件を変えたときの加工力を求める切削理論は既に確立されており<sup>6) 7)</sup>、本研究においても、この手法を用いて加工力の概算を行う。

加工力を概算するために、ねじれ角  $0^\circ$ 、すくい角  $0^\circ$ 、工具径  $\phi 12 \text{ mm}$  の超硬工具を用いたトリム加工(半径方向の切込みは、エンドミル直径と同じ  $12 \text{ mm}$  のスロットニングで、試験片を2つに分割)における切削実験を行い、加工力を計測した。計測した加工力を図6に示す。なお、加工力の  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  の方向は図2に示すとおりである。この加工実験から得られた加工力のデータから、円周方向の切り取り厚さと加工力の関係を得ることができ、加工力の概算に必要な単位切れ刃長さあたりのエッジフォース(刃先の丸みに起因する切削力)、摩擦角、せん断面せん断応力の各係数を同定し、各ねじれ角における3方向の比切削抵抗を求めている。これらの係数を用いた加工力概算が、実際の加工力と一致しているかどうかを確認するために、リード角を  $-40^\circ$  にした場合の実際に切削したときの加工力と加工力概算を比較した。その結果、図7に示すように、実切削時の加工力と加工力概算の結果は、ほぼ合致していることを確認した。

次に、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するために、上記で得られた単位切れ刃長さあたりのエッジフォース、3方向の比切削抵抗を用い、ねじれ角、すくい角を変えたときの加工力の概算を行った。

加工条件を含めた工具の基本仕様の決め方は、板材のばたつきを少なくすること、つまり、板厚方向に働く力の変動幅が小さくなることを主眼に置いている。本研究では、加工力の概算結果を基に、工具の基本仕様を絞り込み、6種類の工具を試作して加工性能を評価した。

一例として、すくい角  $7^\circ$ 、ねじ角  $10^\circ$  の試作工具 No.4 の工具を用いて、リード角  $0^\circ$ 、工具回転数  $6000 \text{ min}^{-1}$ 、送り  $0.2 \text{ mm/tooth}$  の条件における加工面を図8に示す。この図からわかるように、バリの発生していない良好な加工面となっている。加工面粗さについては、 $R_a$  が  $2 \mu\text{m}$  を下回る値となっている。また、昨年度実施した市販のダイヤモンドコートエンドミルによる加工面(図9)と比較すると、試作した工具による加工面はバリがほとんど発生していない良好な加工面となっており、試作工具の有用性が示された。

### 3. 2 研削加工におけるダイヤモンド配列砥石の検討

図10に、ダイヤモンド粒度#60のダイヤモンド電着砥石を用いて、単位回転あたりの送りが同じになる、工具回転数  $1000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $50 \text{ mm/min}$  と工具回転数  $2000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $100 \text{ mm/min}$  工具回転数  $4000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $200 \text{ mm/min}$ 、および工具回転数  $8000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $400 \text{ mm/min}$  の条件におけるトリム加工面を示す。ダイヤモンド電着砥石では、工具回転数  $4000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $200 \text{ mm/min}$  の加工条件からは加工が困難となっていることがわかる。これに対して、ダイヤモンド配列砥石では、図11に示すように、工具回転数  $8000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $8000 \text{ mm/min}$  においても加工が可能である。また、表面粗さについては、ダイヤモンド電着砥石は、加工が可能であった工具回転数  $2000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $100 \text{ mm/min}$  において、 $R_a$  値が  $10.9 \mu\text{m}$  であったのに対して、ダイヤモンド配列砥石においては、工具回転数  $8000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $2000$  および  $4000 \text{ mm/min}$  においては  $R_a$  値が  $0.9 \mu\text{m}$ 、送り速度  $8000 \text{ mm/min}$  では  $1.5 \mu\text{m}$  と良好な加工面になっている。以上から、熱可塑性 CFRP の研削加工において、ダ

イヤモンド配列砥石はダイヤモンド電着砥石と比べ 20 倍以上の加工速度で加工が可能であることが明らかとなった。図12および13にダイヤモンド電着砥石およびダイヤモンド配列砥石の加工後の砥石作用面を示す。ダイヤモンド電着砥石では目詰まりが僅かに生じているが、ダイヤモンド配列砥石は目詰まりが全く見られない。このことから、耐久性についても優れていると考えられる。

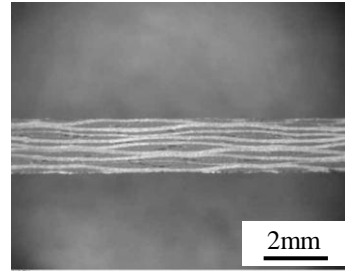


図8 試作工具No.4における加工面（アップカット側）  
( $6000 \text{ min}^{-1}$ , リード角  $0 \text{ deg}$ ,  $0.2 \text{ mm/tooth}$ )

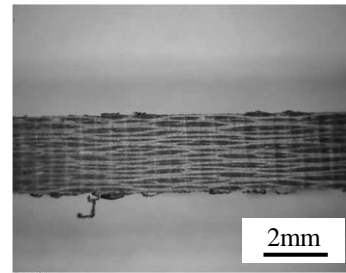


図9 市販エンドミルによる加工面（アップカット側）  
( $6000 \text{ min}^{-1}$ , リード角  $0 \text{ deg}$ ,  $0.2 \text{ mm/tooth}$ )

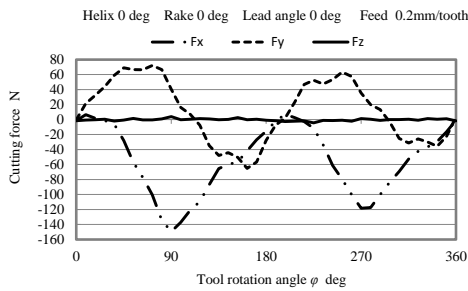
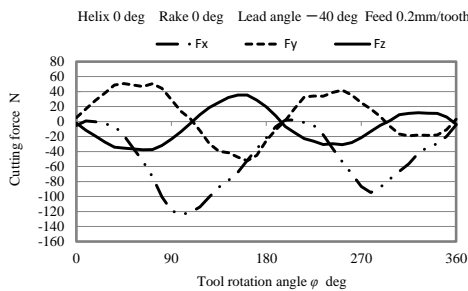
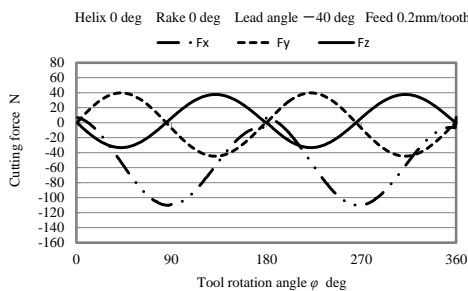


図6 トリム加工（リード $0^\circ$ ）における実際の加工力

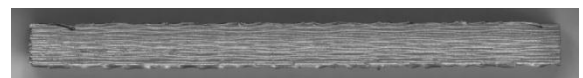


(a) 実際の加工力

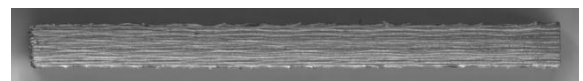


(b) 概算した加工力

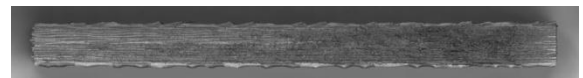
図7 トリム加工（リード $-40^\circ$ ）における切削力



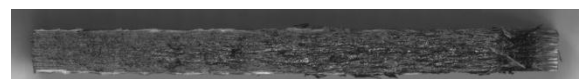
(a) 工具回転数  $1000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $50 \text{ mm/min}$



(b) 工具回転数  $2000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $100 \text{ mm/min}$

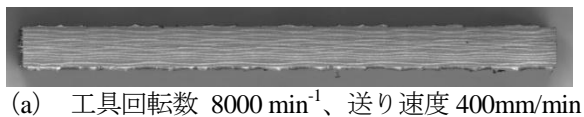


(c) 工具回転数  $4000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $200 \text{ mm/min}$

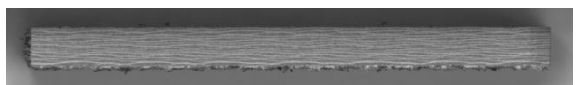


(d) 工具回転数  $8000 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度  $400 \text{ mm/min}$

図10 ダイヤモンド電着砥石による研削加工面

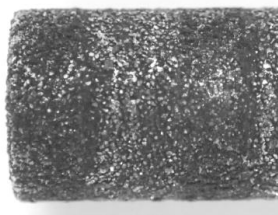


(a) 工具回転数 8000 min<sup>-1</sup>、送り速度 400mm/min

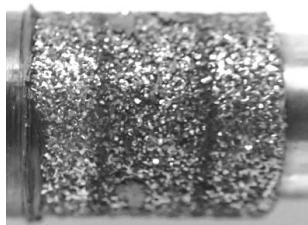


(b) 工具回転数 8000 min<sup>-1</sup>、送り速度 800mm/min

図1.1 ダイヤモンド配列砥石による研削加工面



(a) 工具回転数 2000min<sup>-1</sup>、送り速度 100mm/min



(b) 工具回転数 4000min<sup>-1</sup>、送り速度 200mm/min

図1.2 加工後のダイヤモンド電着砥石の作用面

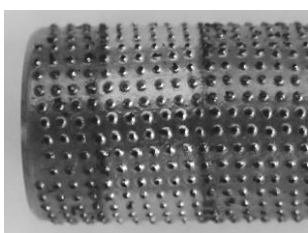


図1.3 加工後のダイヤモンド配列砥石の作用面  
(工具回転数 8000min<sup>-1</sup>、送り速度 800mm/min)

#### 4. まとめ

熱可塑性 CFRP の切削および研削加工によるトリム加工実験を行った結果、下記の結論を得た。

- 1) 切削加工においては、熱可塑性 CFRP に適した工具仕様を検討するための加工実験を行い、工具を試作した。試作した工具を用いてトリム加工を行った結果、一般的なエンドミルによる加工と比べ、バリがほとんど発生しない良好な加工面となることが確認できた。
- 2) ダイヤモンド配列砥石による加工性能は、#60 ダイヤモンド電着砥石の 20 倍以上の加工速度で加工が可能であることが明らかとなった。

今後は、熱可塑性 CFRP に適した切削工具の仕様および研削加工技術について更に検討を行い、熱可塑性 CFRP の加工技術の確立を目指す。

#### 【謝 辞】

本研究の一部は、株式会社 エムテック様との共同研究により実施しました。ご協力を頂きました皆様に深く感謝申し上げます。

#### 【参考文献】

- 1) 青木, CFRP の自動車分野への応用の現状と課題, 機械技術, Vol.62, No.13, pp.24-28, 2014
- 2) 加賀ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 1 号, pp.24-27, 2013
- 3) 前田, 炭素繊維の応用と市場, シーエムシー出版, 2008
- 4) 柘植ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第 2 号, pp.39-42, 2014
- 5) 柘植ら, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.3, pp.168-172, 2014
- 6) 社本ら, 切削機構を理解しよう, 日本機械学会講習会テキスト, pp.1-14, 2008
- 7) 社本ら, 3次元切削機構に関する研究(第1報), 精密工学会誌, Vol.68, No.3, pp.408-414, 2002