

# CFRP の機械加工技術に関する研究

— ジャイロ式穴あけ法による穴あけ加工技術の開発 —  
 柘植英明、小川大介、佐藤丈士

Research on the machining technique of CFRP  
 - Development of the drilling technique with gyro-driving grinding wheel system -  
 Hideaki TSUGE Daisuke OGAWA and Joji SATO

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の穴あけ加工において、2 軸回転砥石による新規穴あけ加工法 (以降、ジャイロ式砥石穴あけ加工法) を提案し、その加工原理について説明する。また、その基礎的な加工特性を把握するためにジャイロ式砥石穴あけ装置を製作し、CFRP の穴あけ加工実験を行った。その結果、ジャイロ式砥石穴あけ加工法における CFRP の穴あけ加工では、ケバや剥離がほとんどない良好の加工が行えることを確認した。また、C/CG 砥石およびダイヤモンド電着砥石の耐久性について知見を得ることができた。

## 1. はじめに

現在、航空機や自動車産業を中心とした輸送機産業において、燃費向上等による CO<sub>2</sub> の排出量削減が喫緊の課題となっている。この課題に対する解決策として、機体や車体の軽量化が必要不可欠であり、軽量でかつ高強度の材料である炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) の利用が進んでいる<sup>1)</sup>。

当研究所においては平成 20 年度より、図 1 に示すジャイロ式砥石穴あけ加工法を提案し、ジャイロ式砥石穴あけ加工技術の研究を行ってきた。図 1 に示すように、ジャイロ式砥石穴あけ加工法とは、砥石回転軸とシャフト回転軸の 2 軸によって回転運動を行う工具を被加工物である CFRP に貫通させることによって穴あけを行う加工法のことである。なお、円盤砥石の回転を砥石回転、シャフト軸まわりの回転をジャイロ回転と定義する。本加工法では、切りくずが排出され易いことと、研削する砥石面が常に入れ替わるために、工具の研削による加工熱が抑えられることが特徴となる<sup>2)3)</sup>。また、用いる砥石によっては、穴あけ加工コストを抑えることが可能となる。

## 2. ジャイロ式砥石穴あけ装置の開発

本加工原理の有効性を確認するために、平成 20 年度には図 2 に示す小型実験装置を製作した。この小型実験機は、卓上旋盤 (コスモキカイ (株)、L-4000 型) の往復台の上に、自動送り機能を有する円盤砥石が固定され、主軸台には CFRP が固定できるようになっている。また、粉塵の飛散を防ぐために、主軸台をアクリル板によって覆い、集塵機にて切りくずの集塵を行っている。本実験機では、被加工材料である CFRP 自身を回転させることにより、CFRP の回転軸 (ジャイロ回転軸) と円盤工具である砥石の回転軸 (砥石回転軸) が直交するジャイロ式砥石穴あけ加工法を実現している。小型実験機においては、ジャイロ回転数 100~2000rpm、砥石回転数 100~5000 rpm、送り速度 1~50mm/min の範囲内で任意に加工条件を設定することができる。加工穴径サイズは、φ30mm である。この小型実験機により CFRP の穴あけ加工を行ったところ、剥離やバリがほとんど生じない良好な穴あけ加工ができることが確認できた。そこで、平成 21 年度には、図 3 に示すジャイロ式砥石穴あけ装置-1 号機を開発した。

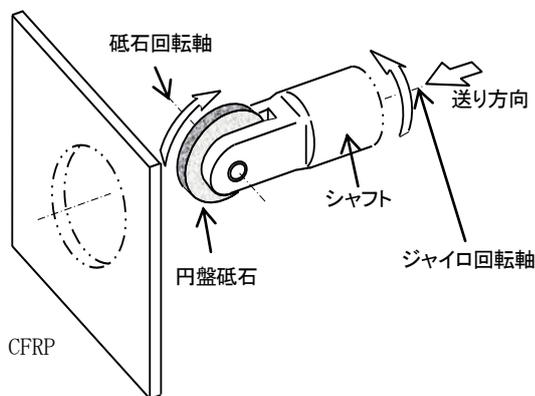


図 1 ジャイロ式砥石穴あけ加工法の原理

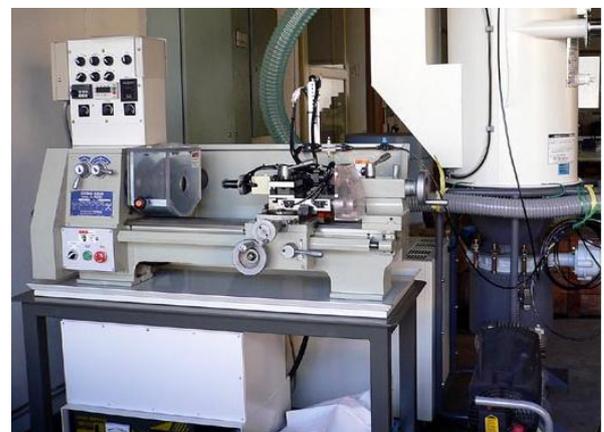


図 2 小型実験装置の外観写真

このジャイロ式砥石穴あけ装置-1号機は、ジャイロ加工を実現するジャイロ加工ヘッドが上下に駆動する主軸コラムに取り付けられており、このヘッドが下降することによって穴あけ加工を行う。ジャイロ加工ヘッド部の全長は約410mm、重量は約15kgであり、ヘッド上部にあるモーターからの駆動力を複数の歯車を用いてジャイロ回転と砥石回転に振り分けている。この歯車を交換することによって砥石回転とジャイロ回転の回転比率を約2:1から6:1に変えることができる。砥石の最大回転数は7500rpm、ジャイロ最大回転数は約3750rpm、加工穴径はφ20mmである。また、内部から圧縮空気を噴出させることで、ヘッド内部への粉塵の侵入を防いでいる。なお、送り速度となる主軸コラムの下降速度は、1~50mm/minの範囲内で任意に設定可能である。被加工材であるCFRPの周りをアクリル板によって覆い、発生する粉塵を集塵機によって集塵している。この1号機の開発によって、ジャイロ式砥石穴あけ加工が可能な加工装置の実現が達成できた。平成22年度には、加工穴径の小径化を目指して、ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機を試作した。試作したジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機のジャイロ加工ヘッド部を図4に示す。このヘッド部の全長は約440mm、重量は約11kg、加工穴径はφ10mmである。1号機と比べて重量が約4kg軽量化できたのは、駆動モーターを小型高出力タイプに変更したこと、砥石回転とジャイロ回転の回転比を固定すること、更には本体の材質の変更による軽量化を行ったことによるものである。更なる加工穴径の小径化を検討したが、歯車やベアリングおよび工具軸本体の強度が加工力に耐え得るように設計することが困難だったため断念した。



図3 ジャイロ式砥石穴あけ装置-1号機

平成23年度には今までの試作装置によるノウハウを踏まえ、実用化を検討するためのプロトタイプとして、ハンディータイプ型のジャイロ式砥石穴あけ装置-3号機を開発した。図5に可搬部の外観写真を示す。この3号機は、駆動モーターをジャイロ加工ヘッドから外してフレキシブルシャフトにより駆動力を伝えることで軽量化を図ったため、可搬部の内部に送り機構および送り用モーターを組み込んでいるにも関わらず、可搬部の重量は約15kgとなっている。なお、加工時は専用の治具に可搬ヘッドをロックして加工を行う。

### 3. 実験

ジャイロ式砥石穴あけ加工法の加工特性および砥石の耐久性の評価を行うために、C/GC 砥石およびダイヤモンド電着砥石を用いてCFRPに穴あけ加工実験を行った。

#### 3.1 実験装置

穴あけ加工実験には、ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機を使用した。よって、加工穴径はφ20mmとなる。

#### 3.2 被削材 (CFRP) の主な仕様

被削材であるCFRP (天龍コンポジット(株)製) は、引張弾性率 230GPa の PAN 系の炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させた 厚さ 0.25mm の一方向性炭素繊維ブ



図4 ジャイロ式砥石穴あけ装置-2号機のジャイロ加工ヘッド部



図5 ジャイロ式砥石穴あけ装置-3号機の可搬部

リプレグ (UD プリプレグ) を 0/90° 方向に積層し、オートクレーブにて加熱硬化させている。試験片の寸法は、100×100mm である。但し、C/GC 砥石の加工実験には板厚 3mm、ダイヤモンド電着砥石の加工実験には板厚 5mm の試料を用いた。図 6 に、C/GC 砥石による加工実験の様子を示す。



図 6 C/GC 砥石による加工実験

### 3. 3 加工用砥石

#### 3. 3. 1 C/GC 砥石

研削砥石の性能を決める主要要素としては、砥粒の種類、粒度、結合剤 (ボンド剤)、組織 (砥粒率) および結合度 (砥石強度) の5つの要素がある<sup>4)5)</sup>。本実験に用いた砥粒は、黒色炭化ケイ素質研磨材 (カーボランダム : C) と緑色炭化ケイ素質研磨材 (グリーンカーボランダム : GC) を複合化した C/GC 砥粒を用いた。C/GC 砥粒の粒度は #100 であり、結合剤は砥粒の保持力と適度な自生作用をもつビトリファイド (V) とした。組織は目詰まり防止を目的として砥粒率が低くなるような粗な組織とし、結合度は中間結合度 (K) とした。砥石の直径は 20mm、厚さは 3mm であり、砥石の中心には 12.7mm の穴があいている。この中央の穴に、金属製の V 溝プーリが一体となったホイールを差し込み、エポキシ系接着剤によって砥石と接着している。C/GC 砥石の加工面を図 7(1) に示す。

#### 3. 3. 2 ダイヤモンド電着砥石

用いた電着砥石中央部の直径は 20mm、厚さは 3mm、砥石加工面は半径 9mm の円弧状となっている。砥石の中心には 12.7mm の穴があいており、C/GC 砥石と同様のホイールを差し込んで、エポキシ系接着剤を用いて接着を行っている。図 7(2) に、ダイヤモンド電着砥石の加工面を示す。ダイヤモンド砥粒の粒度は #80 であり、250 $\mu$ m 程度のダイヤモンド粒子が砥石加工面に接着されていることが確認できる。

### 3. 4 加工条件

C/GC 砥石を用いた穴あけ加工条件は、砥石回転数を 6000rpm、ジャイロ回転数を 1000rpm、送り速度を 5mm/min とし、ダイヤモンド電着砥石を用いた穴あけ加工では、砥石回転数を 7800rpm、ジャイロ回転数を 2800rpm、送り速度を

10mm/min とした。予備実験から、C/GC 砥石にてダイヤモンド砥石と同一の加工条件で穴あけを行うと、加工負荷が大きいため C/GC 砥石の破損が生じたため、加工負荷が小さくなる加工条件とした。

## 4. 結果及び考察

C/GC 砥石では、17 穴目の途中で砥石の破損が生じた。ジャイロ式砥石穴あけ加工法では、通常の研削と異なり砥石に横方向からの力が加わることになる。本実験において使用している砥石の厚みは 3mm と薄いため、横方向の加工負荷に耐えることができなかったものと考えられる。一方、ダイヤモンド電着砥石では、40 穴まで穴あけ加工を行ったが砥石の寿命は迎えておらず、これ以降も穴あけは可能な状態である。図 8 に、加工距離と加工穴径の変化を示す。図から C/GC 砥石では、10mm 加工あたり約 22.4 $\mu$ m 穴径が減少しているのに対して、ダイヤモンド電着砥石では約 3.8 $\mu$ m 穴径が減少している。C/GC 砥石のように砥石加工面が平型形状の場合は、砥石エッジによる加工が主体となるために、砥石エッジの摩耗が急速に進む。穴径は対角エッジの距離となることから、穴径は急速に小さくなる。しかし、加工面形状が円弧形状の C/GC 砥石を用いて穴加工を行うと、砥石の目詰まりにより 1 穴しか加工することができず、C/GC 砥石の砥石形状と加工穴径の減少についての検討を行うことは困難であった。



(1) C/GC 砥石 (2) ダイヤモンド電着砥石  
図 7 砥石加工面の様子

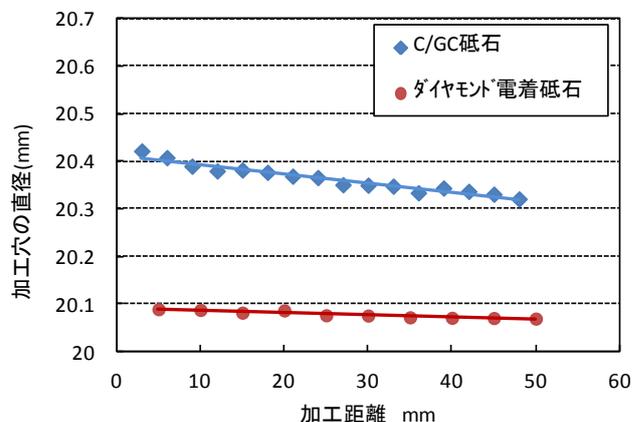
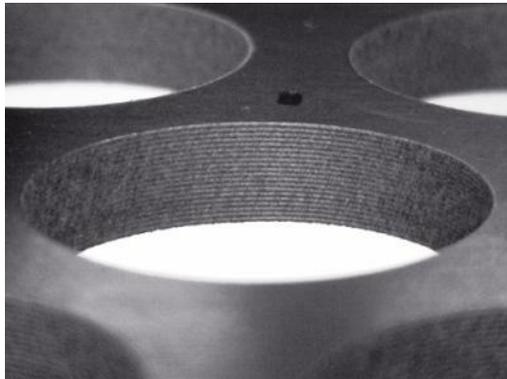


図 8 加工距離と加工穴径の変化

図9(1)にダイヤモンド電着砥石による5mm加工後(1穴加工後)の加工面、図9(2)に50mm加工後(10穴加工後)の加工面の様子を示す。加工距離が増加すると、僅かに入り口側の盛り上がりが大きくなっているが、層間剥離は見られなかった。また、バリも小さなバリが僅かに見られる程度であった。同様に、C/GC砥石について



(1) 1穴加工後(加工距離: 5mm)



(2) 10穴加工後(加工距離: 50mm)

図9 CFRP穴あけ加工面の様子

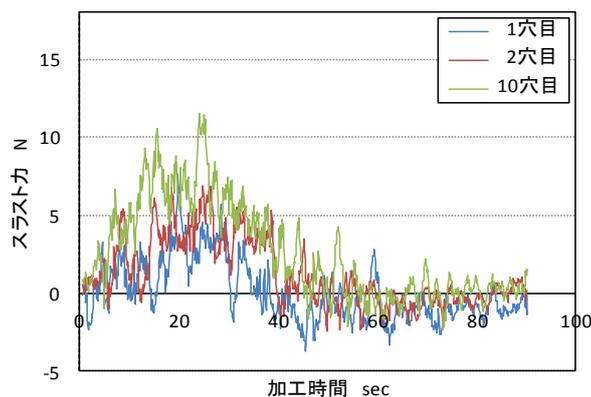


図10 CFRP穴あけ加工面の様子

も大きなバリや層間剥離は見られなかった。しかし、ダイヤモンド電着砥石における加工力(スラスト力)については、図10に示すように加工毎に徐々に増加している。これは、電着砥石におけるダイヤモンド砥粒の摩耗と砥石の目詰まりが原因だと推察される。

## 5. まとめ

CFRPの穴あけ加工において、2軸回転砥石による新規穴あけ加工法(ジャイロ式砥石穴あけ加工法)を提案し、その基礎的な加工特性を把握するためにジャイロ式砥石穴あけ装置を製作し、CFRPの穴あけ加工実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) ジャイロ式砥石穴あけ加工法を用いたCFRPの穴あけ加工法では、バリや層間剥離が生じない良好な加工面となることが確認できた。
- 2) C/GC砥石による耐久試験では、加工距離が48mmで砥石の破損が生じた。一方、ダイヤモンド電着砥石は40穴まで穴あけを行ったが、穴あけの限界には至っておらず、40穴以降も十分に穴あけ可能である。
- 3) C/GC砥石では、10mm加工あたり約22.4 $\mu$ m穴径が減少しているのに対して、ダイヤモンド電着砥石では約3.8 $\mu$ m穴径が減少する。
- 4) ダイヤモンド電着砥石の加工力は、加工距離が長くなるほど増加する。これは、ダイヤモンド砥粒の摩耗と砥石の目詰まりが原因であると推察される。

## 【謝 辞】

本研究は、文部科学省、地域イノベーション戦略支援プログラム(グローバル型)「東海広域ナノテクものづくりクラスター」において行われた研究成果の一部である。ここに感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 前田豊: 炭素繊維の応用と市場, シーエムシー出版, 2008
- 2) 渡辺義見他: CFRPの新規穴あけ加工技術—傾斜機能砥石を用いたジャイロ式穴あけ加工—日本機械学会誌, Vol.115, No.1118, pp61, 2012
- 3) 柘植英明他: 2軸回転砥石を用いたCFRPの新規穴あけ加工法の提案, 砥粒加工学会誌, Vol.56, No. 9, pp 612-617, 2012
- 4) 河村末久他: 切削加工と砥粒加工, 共立出版株式会社, 1991
- 5) (社)砥粒加工学会編, 砥粒加工技術のすべて, 工業調査会, 2006