

# 複雑形状部品の高効率加工技術の開発

工業材料科 研究員 福田 洋平  
工業材料科 科長 瀧内 直祐

インペラー及びタービンブレード等の複雑形状部品の加工には、5軸制御工作機械とボールエンドミルが用いられる。しかし、ボールエンドミル切削において最適な工具経路及び切削条件の決定手法は確立されていない。そこで本研究では、加工コスト（工具コストおよび加工時間等）の削減を目的とした、最適切削条件の決定手法確立を図る。

また、航空機のフレームおよび送風機等の翼部材等として利用が広がっている炭素繊維強化プラスチック（難削材料）に対して、基礎的な切削加工技術を構築する。平成25年度は炭素繊維強化プラスチックの切削加工技術構築に取り組んだ。

## 1. 緒言

近年、航空機等のフレーム素材として、炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）が注目されている<sup>[1]</sup>。CFRPは高強度かつ軽量という特徴を持つ。また、使用する素線、バインダとなる樹脂材料、および積層方法等によって設計者の所望する弾性率、引張強さおよび方向特性等の機械的性質を得ることができる優れた構造用材料である。

しかし、CFRPは成形工程の煩雑さ、また難加工性を有することから、汎用的な構造材料としての利用はまだ進んでいない。CFRPの切削加工において、超高強度な炭素繊維は工具の摩耗を促進するとともに、バリとなってエッジ部の品位を落とす。また、積層構造はデラミネーションと呼ばれる層間剥離を生じる原因となっている。そして、素線や積層方向等の違いによっても加工面の品位が大きく変化する。

CFRPを高効率かつ高品位に加工するための専用工具（ダイヤモンドコーティング工具等）が複数の工具メーカーから販売されているが、それらの工具は航空機産業で多く利用されるため、インチ仕様のもものがほとんどである。また、その価格は鉄鋼材料を加工するための工具に比べて数倍から十数倍と非常に高価であるため、安価でラインナップが豊富な工具での最適な加工条件が加工現場から求められている。さらに、CFRPの強度特性に応じた加工性に関する情報も入手が困難であり、加工現場から求められている。

そこで本研究では、①CFRP専用工具に比べ価格が安い汎用工具を用いた穴加工実験および②CFRP専用工具を用いた3種のCFRPに対する加工実験を行った。

## 2. 汎用工具を用いた穴加工実験

### 2.1 特徴的な4種のドリルによる穴加工実験

CFRPの穴加工において、ドリルの形状および加工条件が穴品位に及ぼす影響を評価するため、樹脂用（ろうそく型）、アルミ合金用、高硬度鋼用および鋼用のドリルを用いて穴加工実験を行った。回転数は各ドリルの対象材質における推奨値とした。実験条件を表1に、送り量0.05mm/revにおける加工後の穴の状態を表2に示す。

表1 4種のドリルによる穴加工実験

	先端角 (°)	ねじれ角 (°)	回転数 (min <sup>-1</sup> )	送り量 (min/rev)
樹脂用	-	30	5570	0.25
アルミ合金用	130	35	7960	0.20
高硬度鋼用	140	15	2790	0.10
鋼用	140	30	7964	0.05

樹脂用ドリルにおいて、表面、裏面ともに良好な品位を得ることができた。また、各条件により得られた結果は以下のとおりである。

- ① 表面より裏面のバリが発生しやすい。
- ② 表面のバリは送り速度が高いほど発生しやすい。
- ③ 高硬度鋼用ドリルにて表面品位が良い。
- ④ 鋼用ドリルにて裏面品位が良い。

以上より、良好な表面品位を得るためには、低い送り速度、大きい先端角および小さいねじれ角の条件が有効である。また、裏面品位は先端角とねじれ角の影響により変化する。

表2 ドリル加工後の穴品位

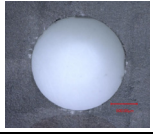
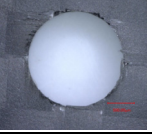
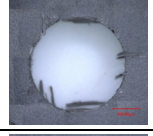
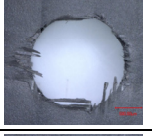
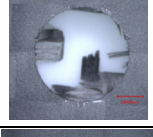
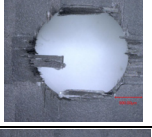
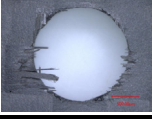
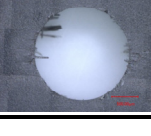
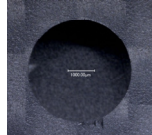

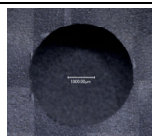
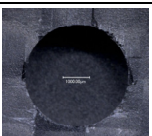
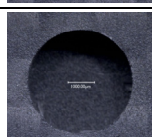
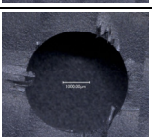
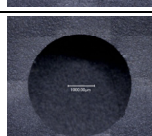
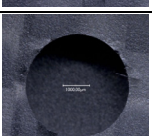
	表面	裏面
樹脂用		
アルミ用		
高硬度鋼用		
鋼用		

表4 エンドミル加工後の穴品位

	表面	裏面
30° ねじれ CR無し		
45° ねじれ CR無し		
30° ねじれ CR有り		
45° ねじれ CR有り		

## 2.2 ソリッドエンドミルによる穴加工実験

前節の実験により、良好な表面品位を得るためには先端角が大きい工具を用いることが有効であると確認された。そこで、先端角が180°に相当するエンドミルを用いて穴加工実験を行った。実験にはねじれ角が異なるエンドミル、またコーナーアール（以下、CR）を有するエンドミルを使用した。実験条件を表3に、送り量0.05mm/revにおける加工後の穴の状態を表4に示す。

表3 エンドミルによる穴加工実験

	回転数 (min <sup>-1</sup> )	送り量 (mm/rev)
30° ねじれCR無し	8000	0.25
45° ねじれCR無し		0.20
30° ねじれCR有り		0.15
		0.10
45° ねじれCR有り		0.05

CRの無いエンドミルは表面にバリおよび裏面にデラミネーションが発生したが、CRを有するエンドミルにおいて表面のバリは発生しなかった。また、CRを有する45° ねじれのエンドミルにおいては裏面のデラミネーションも抑制されていた。

## 3. CFRP専用工具を用いた加工実験

CFRPは素線の強度、積層方法等により強度が変化するとともに加工面の品位も大きく変化する。そこで、特徴的な3タイプのCFRPに対して、CFRP専用工具を用いて穴加工実験を行い、穴品位の評価を行った。加工実験に使用したCFRPの素線仕様を表5に示す。素線の強度より、それぞれ超高弾性タイプ、高弾性タイプおよび高強度タイプとする。いずれも、熱硬化性エポキシプリプレグを90°交互積層させた材料である。

表5 CFRPの素線仕様

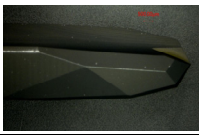
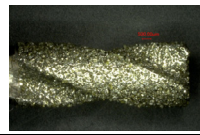
	素線の引張弾性率 (MPa)	素線の引張強さ (MPa)
超高弾性タイプ	795	3500
高弾性タイプ	294	5940
高強度タイプ	230	4300

### 3.1 CFRP専用ドリルを用いた穴加工実験。

実験に使用したドリルおよび実験条件を表6に示す。回転数および送り量はメーカーの推奨条件である。

CFRP専用ドリルは航空機産業で多く利用されるため、径がインチ仕様のものが多く、本実験に使用したダイヤモンドドリルもインチ仕様のためのラインナップである。

表6 専用工具による穴加工実験

	ダイヤモンドドリル オーエスジー(株)製 D-STAD	電着ダイヤモンドドリル オーエスジー(株)製 ES-DS
		
工具径 (mm)	4.864	4.0
回転数 (min <sup>-1</sup> )	3900	8000
送り量 (mm/rev)	117	24

加工後の穴の状態を表7および表8に示す。

超高弾性タイプの穴品位は両ドリルともに良好な穴品位を得ることができたが、ダイヤモンドドリルの入口部にわずかなバリが生じた。

高弾性タイプに対してダイヤモンドドリルを用いて加工した結果、入口部にわずかなバリが生じ、出口部に大きなバリが発生した。電着ダイヤモンドドリルを用いた結果、入口部は良好な品位を得ることができたが、出口部で加工のスラスト力により最終層が大きく剥離し、抜け代を1mm設けているにもかかわらず、貫通することができなかった。

高強度タイプの穴品位は、高弾性タイプの結果と同様であったが、バリの本数、剥離領域を比較した場合、高弾性タイプの方が若干良好であった。

表7 専用工具による加工後穴品位 (表面)



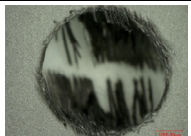

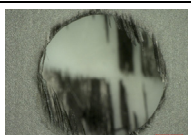

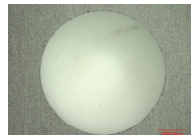
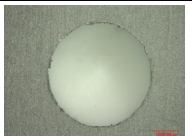
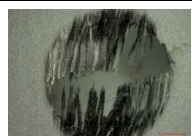

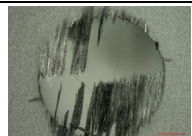
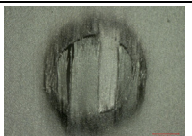
	ダイヤモンド ドリル	電着ダイヤモンド ドリル
超高弾性 タイプ		
高弾性 タイプ		
高強度 タイプ		

表8 専用工具による加工後穴品位 (裏面)

	ダイヤモンド ドリル	電着ダイヤモンド ドリル
超高弾性 タイプ		
高弾性 タイプ		
高強度 タイプ		

以上の結果より、バリおよびデラミネーションの発生に影響を及ぼす材質の仕様は、素線の引張強さであると考えられる。しかし、穴内部の側面はいずれも良好な面品位となっており、最表層に引張強さの低い素線を用いることで、穴品位を大幅に改善できると考えられる。

#### 4. 結 言

CFRPの切削加工技術構築に取り組み、下記の結果を得た。

- 1) 穴加工において良好な表面品位を得るためには、低い送り速度、大きい先端角および小さいねじれ角の加工条件が有効である。
- 2) 穴加工にCR有りの強ねじれのエンドミルを用いることで、入口部、出口部ともに良好な穴品位を得ることができる。
- 3) CFRPの穴加工におけるバリおよびデラミネーションの発生要因は素線の引張強さが最も影響していると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 鈴木真二ら, 現代航空論, 東京大学出版会(2012).