

# CFRP および難削性金属材料の加工技術の開発 CFRP の効率的切削加工技術の研究(第 3 報)

大塚裕俊\*・水江宏\*・橋口智和\*  
\*機械・金属担当

## Efficient Cutting Technology of CFRP (The 3rd)

Otsuka HIROTOSHI\*・Hiroshi MIZUE\*・Tomokazu HASHIGUTI\*  
\*Machinery and Metallurgy Section

### 要 旨

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic=炭素繊維強化プラスチック)に対し、市販の超硬合金製ボールエンドミルを用いて穴加工実験を行い、切削抵抗・工具摩耗・加工穴の品質について調べた。4 枚刃ボールエンドミルを用いたヘリカル穴加工では、工具摩耗は大きい汎用のスクエアエンドミルやドリルより剥離やアンカットが少なく、100 穴までの加工では CFRP 専用ドリルに迫る穴品質が確認できた。また、2 枚刃ボールエンドミルを用いた縦送り穴加工では、送り速度を増すと工具摩耗を抑制でき、50 穴程度までなら穴品質も比較的良好であることがわかった。さらに各加工条件での真円度と直径誤差を比較・評価し、ヘリカル加工用の NC プログラムを改良して真円度の向上を図った結果、CFRP 専用ドリルによる穴とほぼ同等の精度を得た。

### 1. はじめに

炭素繊維は、鉄と比較すると比重は 1/4 以下、比強度は 8 倍以上と優れた性質を有している。CFRP は、炭素繊維を樹脂によって成形した複合材料であり、現在、宇宙産業、航空機産業、スポーツ用品産業などで使用されている。今後、自動車の排気ガス規制の強化に対応するため、車体の軽量化を目的に普及価格帯の自動車部品などへの活用が期待されている。

一方炭素繊維は、ジュラルミンなどの金属材料と比較して重量当たり単価が高く、また、成形時間もかかるといった問題がある。さらに、成形後の切削加工においては、炭素繊維が工具摩耗を増大させ、樹脂材部分では剥離が生じるなど、難加工性が指摘されている。

本テーマでは、成形後の後工程で必要となる切削加工について、市販のボールエンドミルを用いて穴加工実験等を行い、工具の寿命、加工品質などについて検討した。

### 2. 実験方法

使用した工具の基本的な仕様を **Table 1** に示す。工具はすべて超硬合金を母材としたソリッド工具である。Tool A~G は、2013、2014 年度に使用した工具であり、比較のため再掲した。2015 年度新規に使用した工具(Tool H、I)は、超硬合金母材に(Al,Ti)N コーティングが施された鋼材用の汎用ボールエンドミルである。4 枚刃の Tool H はヘリカル穴加工に、2 枚刃の Tool I は縦送り穴加工に使用した。また、スクエアエンドミル(Tool G)を用いて、真円度改善のためのヘリカル

穴加工実験を行った。

被削材となる CFRP の仕様や、加工実験機およびその構成等は、2013、14 年度とほぼ同じであり省略する。

Table 1 Specifications of Solid Cemented carbide Tools

Symbol of tool	Tool Type Diameter mm	Specifications
A	End mill (Square end) 5.0	Two-flutes (Al,Ti)N coating Flute length 20mm
B	Drill 6.0	Cr coating Point angle 140° Normal type
C	Drill 6.0	Diamond coating Point angle 120°
D	Drill 6.0	Diamond coating for CFRP Point angle 90°
E	Drill 6.375	Diamond coating for CFRP
F	Drill 6.375	Diamond coating for CFRP Multi angle
G	End mill (Square end) 6.0	Four-flutes (Al,Ti)N coating Flute length 13mm
H	End mill (Ball end) 6.0	Four-flutes (Al,Ti)N coating Flute length 12mm
I	End mill (Ball end) 6.0	Two-flutes (Al,Ti)N coating Flute length 12mm

## 2.1 ボールエンドミルによるヘリカル穴加工

ヘリカル穴加工での条件を **Table 2** に示す. 工具突出し量はコレット端面から 25mm とした.

ヘリカル加工の工具パスを **Fig.1** に示す. 短い直線パスで構成される擬似的なヘリカル加工を行うための NC プログラムを作成した. らせん 1 周回(360 度)を  $n$  分割(XY 平面への投影形状は正  $n$  角形)し, 同時に Z 軸(回転軸)方向に下げていることで擬似的なヘリカル加工を行っている(以降,  $n$  を **1 周回分割数**という). 本 NC プログラムでは, 工具パス半径(工具パスがつくる正多角形に外接する円の半径), 1 周回分割数, らせん 1 周回あたりの Z 軸方向の切込量(以降, **1 周回 Z 切込量**という), 加工深さなどを初期値として設定できる.

工具パスの半径(らせんの半径)は, 1.0mm に設定した. 工具直径は 6.0mm なので, 加工穴の直径( $n$  が大きい場合多角形を円とみなした場合の直径)は 8.0mm となる.

プログラム上の送り速度設定は F800mm/min, 1 周回 Z

Table 2 Cutting conditions

Cutting conditions	Tool H	
Cutting speed m/min (Rotational speed $\text{min}^{-1}$ )	100 (5305)	
Axial depth of cut in circumference mm	1.0	3.0
Setting feed speed mm/min *1	800	800
Real feed per revolution mm/rev	0.13	0.13
Real feed speed mm/min *1	706	708
Cutting direction	Up cut milling	
Workpiece	CFRP	
Workpiece thickness mm	6.0	
Coolant	Dry (Suction)	

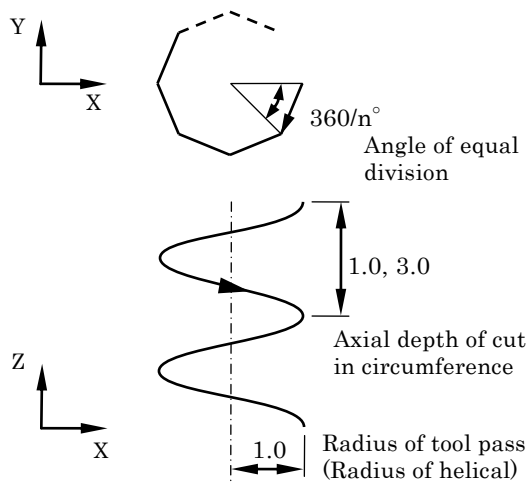


Fig.1 Cutting pass for helical end milling

切込量が 1.0 と 3.0mm の場合の影響を調べた. (以降, 例えば送り速度 800mm/min, 1 周回 Z 切込量 1.0mm の場合, F800 Z1 と記載する.)

100 穴まで貫通穴加工を実施し, 工具の摩耗状態, 切削抵抗, 穴の入口出口の状態などを評価した.

## 2.2 ボールエンドミルによる縦送り穴加工

穴加工条件を **Table 3** に示す. 工具突出し量は, コレット端面から 30mm とした. 工具パスは, ドリル加工と同様に縦送り(工具回転軸方向への等速直線運動)のみとした. 直径 6.0mm の穴加工を 200 穴まで実施し, 工具の摩耗状態, 切削抵抗, 穴の入口出口の状態などを評価した.

Table 3 Cutting conditions

Cutting conditions	Tool I	
Cutting speed m/min (Rotational speed $\text{min}^{-1}$ )	60 (3183)	
Feed speed mm/min	159	318
Feed per revolution mm/rev	0.05	0.1
Workpiece	CFRP	
Workpiece thickness mm	6.0	
Coolant	Dry (Suction)	

## 2.3 真円度と直径誤差, スクエアエンドミルによる真円度改善のためのヘリカル穴加工

工具(Tool A~D)を用いて 2013~2015 年度に加工を行った穴の真円度と直径を CNC 三次元測定機で計測・評価した. 測定箇所は CFRP 板厚の中央, 直径 2mm のプローブを使用した. 測定点数は直径 6mm の場合, 約 600 点, 直径 8mm の場合は約 830 点で評価した.

また, スクエアエンドミル(Tool G)についてはヘリカル穴加工の NC プログラムを改善して真円度の向上と直径誤差の改善を試みた. ヘリカル加工条件は F800 Z3 とし, 以下のとおり 4 種の穴加工を 1 本のエンドミルで記載順に行った.

- ① ヘリカル加工の工具パスの半径を 1.0mm で加工実施
- ② ヘリカル加工の工具パスの半径を 0.9mm とし,
  - a. F800, 半径 1.0mm の円弧切削を実施
  - b. F400, 半径 1.0mm の円弧切削を実施
  - c. F200, 半径 1.0mm の円弧切削を実施

## 3. 実験結果

### 3.1 ボールエンドミルによるヘリカル穴加工

#### 3.1.1 刃先の摩耗

工具刃先逃げ面の状態を **Table 4** に示す.

顕微鏡による観察では, 100 穴加工後の刃先の状態は, これまでの汎用の超硬合金製エンドミルと同様で, チッピング

などは確認されず刃先が滑らかに摩耗している。コーティングが磨滅し超合金母材が現れた摩耗の幅を確認すると、スクエアエンドミル(Tool G)の結果と同様に、1 周回 Z 切込量は 1.0 より 3.0mm の方が、工具の摩耗量が少ない。スクエアエンドミル(Tool G)ではコーナー部に負荷が集中し摩耗が大きいが、ボールエンドミル(Tool H)では、顕著に摩耗が進行した部分は無く摩耗の幅も小さい。

Table 4 Conditions of Ball end cutting edge

Number of holes	F800 Z1 Cutting edge	F800 Z3 Cutting edge
1st		
10th		
50th		
100th		
Tool G Square end cutting edge(Reference diagram)		
100th		

### 3.1.2 切削抵抗

Fig.2 に穴个数と Z 方向の切削抵抗の関係を示す。Z 方向の切削抵抗は、ボールエンドミル(Tool H)がスクエアエンドミル(Tool G)より大幅に小さかった。スクエア型の場合、底刃

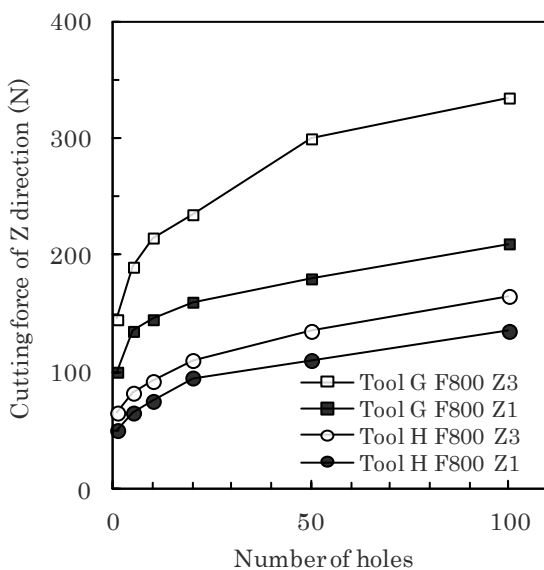


Fig.2 Relation between number of holes and cutting force (Z axis)

は常に全面が加工に作用しており接触長さは工具直径分となるが、ボール型の場合、工具中心から工具進行方向の部分が加工に作用しており、接触長さはおよそ工具半径分となること、Z 方向の加工抵抗の違いの大きな要因になっていると思われる。

Fig.3 に穴个数と X 方向の切削抵抗の関係を示す。X 方向では、ボールエンドミルの方が大きくなった。スクエア型でのヘリカル加工における外周刃の加工領域は、第 2 報で示したが、ボール型の場合の加工領域は数学的表現が難しくその理由は説明できない。

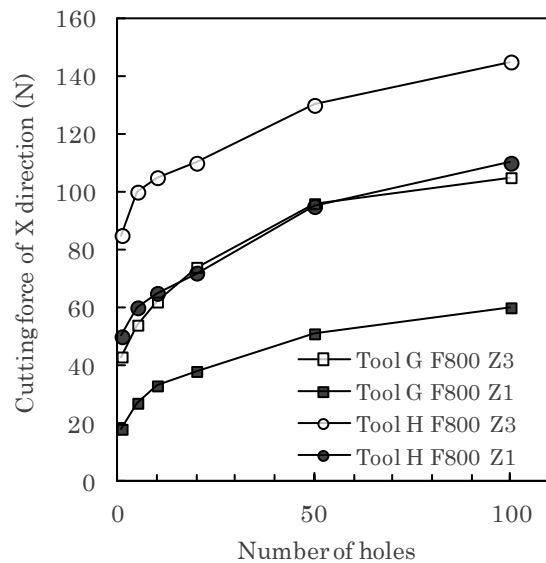


Fig.3 Relation between number of holes and cutting force (X axis)

Table 5 に切削抵抗の測定データを示す。Tool G はフラットな底刃が加工開始時に全面接触するため急激な加工抵抗の増大が確認される。一方、Tool H はボール形状の先端から徐々に加工面積が大きくなるため、加工抵抗の急激な増大は確認されない。また、穴出口部の加工工程でも Tool G は急激に加工抵抗が減少するが、Tool H は徐々に加工抵抗が減少していく。

### 3.1.3 加工穴の外観品質

Table 6 に穴入口・出口の状態を示す。目視による穴の状態を以下に述べる。2 条件ともにアンカットやわずかな剥離は確認されるが、100 穴までかなりの高品質である。汎用ドリル、汎用スクエアエンドミルより優れ、CFRP 専用ドリルに迫る穴品質が確認できたが、刃先摩耗の大きさは、ダイヤモンドコーティングが施された CFRP 専用ドリルがかなり有利であり、100 穴以上の加工では、差異が大きくなると予想される。

#### ○ 穴入口部

スクエアエンドミル(Tool G)と比較して剥離やアンカットが少なく高品質である。CFRP 専用ドリルとの比較では同等ま

たは少し劣る。

○ 穴出口部

アンカットが少しあるが、剥離はほとんど確認されず高品質である。Tool Gとの比較して高品質である。CFRP専用ドリルと比較してほぼ同等である。剥離にだけ着目すると一部のCFRP専用ドリルよりも良い。

Table 5 Cutting force (Tool H Endmill)

Number of holes	F800 Z1.0		F800 Z3.0	
	Tool H	Tool G	Tool H	Tool G
1st Z axis				
10th Z axis				
50th Z axis				
100th Z axis				
X axis				

Table 6 Conditions of hole (Hole diameter: 8mm)

Number of holes	Tool H F800 Z1		Tool H F800 Z3	
	in	out	in	out
1st				
10th				
50th				
100th				

### 3.2 ボールエンドミルによる縦送り穴加工

#### 3.2.1 刃先の摩耗

穴個数増加に伴う刃先の摩耗状態を Table 7 に示す。送り速度が速い方が工具摩耗が少ない。F159 の 100 穴加工後と F318 の 200 穴加工後がほぼ同じである。他の工具・条件と同様にチッピングなどは確認されずに、摩耗形態は非常に滑らかである。

Table 7 Conditions of Ball end cutting edge

Number of holes	F159 Cutting edge	F318 Cutting edge
1st		
10th		
50th		
100th		
200th		

#### 3.2.2 切削抵抗

加工穴個数に対する Z 軸方向の切削抵抗を Fig.4 に示す。F159 と F318 は、送り速度は 2 倍であるが、切削抵抗は約 10~18% の増加であった。

Table 8 に切削抵抗の測定データを示す。ヘリカル穴加工と同様にボールエンドミルの場合は、穴入口部と出口部の工程ではなだらかに変化している。振れ幅も小さく加工が安定している。また、ビブリの発生も抑制できている。これは外周

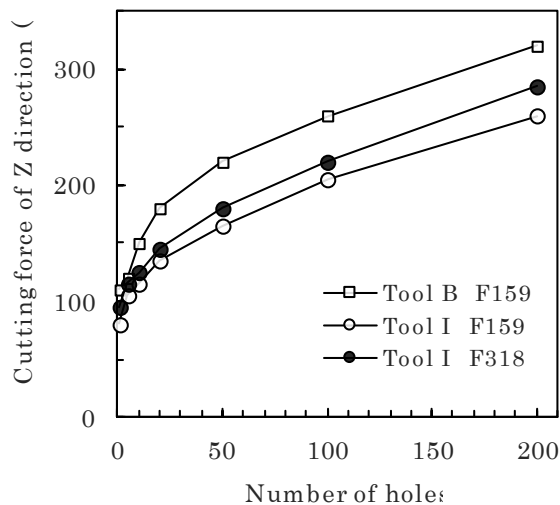


Fig.4 Relation between number of holes and cutting force (Z axis)

刃の有無や工具の剛性の違いによるものと思われる。

### 3.2.3 加工穴の外観品質

**Table 9** に穴入口部、出口部の状態を示す。F159 の場合、30 穴程度までは、比較的穴の品質は良い。以降出口部ではアンカットが増大し、40 穴を超えると入口出口ともにアンカットと剥離が増大し穴品質は悪化する。

F318 では、50 穴程度までは良いが、70 穴を超えると穴品質は悪化する。

Table 8 Cutting force (Tool I Endmill)

Number of holes	F159		F318
	Tool I	Tool B	Tool I
1st Z axis			
10th Z axis			
50th Z axis			
100th Z axis			
200th Z axis			
X axis			

Table 9 Conditions of hole (Hole diameter: 6mm)

Number of holes	Tool I F159		Tool I F318	
	in	out	in	out
1st				
10th				
50th				
100th				
200th				

### 3.3 真円度と直径誤差

Tool B~F, I の縦送り加工穴(2013~2015 年度に加工した穴)の真円度を **Fig.5** に示す。グラフ中のシンボルは、工具先端形状をイメージして三角マークはドリル、四角マークはスクエアエンドミル、丸マークはボールエンドミルを示す。

汎用の超硬ドリル(Tool B)は穴の外観品質は良くない結果であったが、真円度は劣っていない。汎用のボールエンドミル(Tool D)による縦送り穴加工は、CFRP 専用ドリルと比べても比較的良い結果となった。Tool I では、送り速度が速い方(F318)が真円度は良好であった。

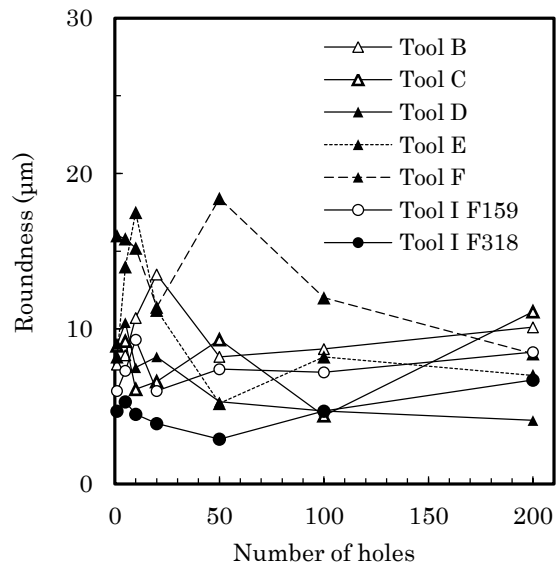


Fig.5 Roundness and number of holes

Tool A による加工穴および Tool G, H によるヘリカル加工穴(いずれも 2013~2015 年度に加工した穴)の真円度を **Fig.6** に示す。スクエアエンドミルで送り速度を変化させた Tool G の F600Z1, F800Z1, F1200Z1 では、送り速度が高くなるに従い真円度が悪化した。また、スクエアエンドミル Tool G とボールエンドミル Tool H との同条件での加工穴(F800Z1 と F800Z3)では、工具形状や1周回 Z 切込量の違いによる大きな差は確認されない。

Fig.5 の縦送り加工穴と比べて真円度は非常に大きい(悪い)。最も良好な真円度を示した Tool A の工具パスは、ヘリカルパスではなく円弧とランプ加工を組み合わせたものである。

そこで真円度不良の原因と思われるヘリカル加工用の NC プログラムを改良し ToolG を用いて再加工実験した結果、良好な真円度が得られた(シンボル  $\boxtimes$ )。仕上げの円弧切削パスの送り速度が F800 の場合、円弧切削を実施しない場合と同等である。円弧切削の送り速度を F400 以下とするとほぼ縦送り穴加工(ドリル加工)と同等の真円度が得られる。

Tool B~F, I の縦送り加工穴(2013~2015 年度に加工し

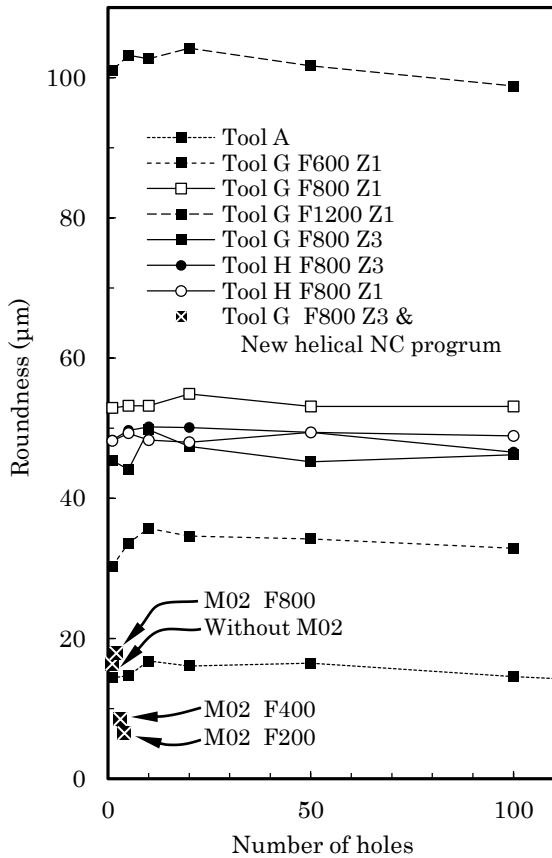


Fig. 6 Roundness and number of holes

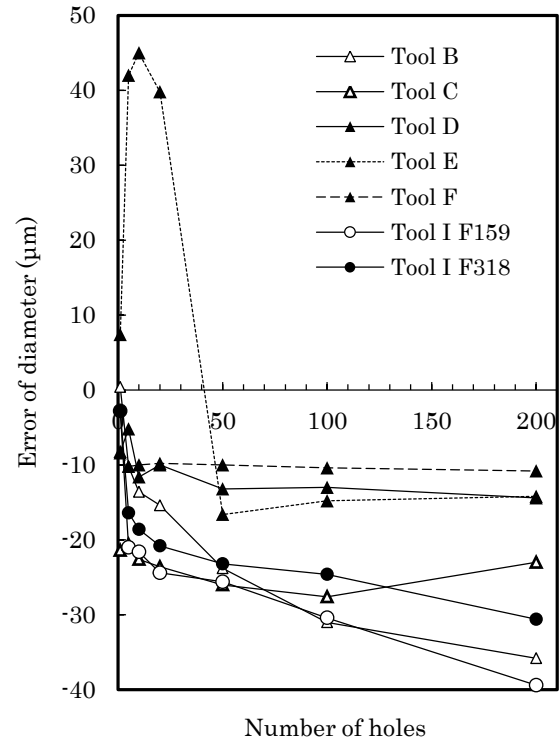


Fig. 7 Error of diameter and number of holes

た穴)の直径誤差を **Fig. 7** に示す. Tool E は加工中ビビリが発生していたため寸法誤差が異常に大きくなったと考えられる. この部分を除けば, CFRP 専用ドリルは誤差が小さく 200 穴まで安定してる. 汎用のドリル Tool B や汎用のボールエンドエンドミル Tool I は, 加工穴数が多くなるに従い, 穴直径が小さくなっている. これは工具刃先の摩耗が原因と考えられる. Tool I の F159 と F318 では, 刃先の摩耗が少ない F318 の方が直径誤差は小さい.

Tool A による加工穴および Tool G, H によるヘリカル加工穴(いずれも 2013~2015 年度に加工した穴)の直径誤差を **Fig. 8** に示す. Tool G の F600, F800, F1200 の比較では, 送り速度が小さい方が誤差は少ない. 1 周回 Z 切込量の違い (Tool G, H の F800Z1, F800Z3) は, 直径誤差への影響が小さい.

Tool A, G, H は汎用の工具であり, 加工穴個数が多くなるに従い, 穴直径が小さくなっている. 直径の縮小量は 100 穴までで約 20~40  $\mu\text{m}$  である. ドリルに比べて直径誤差はかなり大きい, 変化量は同程度であるのでヘリカル加工時または円弧切削の工具パスの半径値を調整することで対応可能と考える.

真円度を改善するために実施した加工実験の穴では, 円弧切削の送り速度が小さいほど直径の誤差は小さくなった.

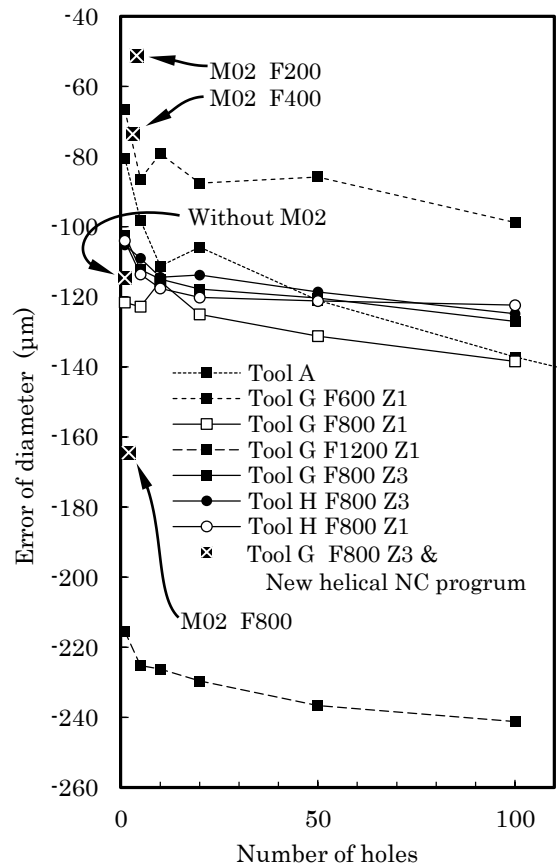


Fig. 8 Error of diameter and number of holes

## 謝 辞

本テーマは、九州各県工業系公設試連携研究で実施しました。本研究に多大なる御連携と御支援をいただいた九州各県公設試の担当研究員に心よりお礼申し上げます。

## 追 記

本実験結果は、限られた実験条件のもとに確認された現象であり、比較のため条件を統一している都合上、各工具メーカーが推奨する加工条件ではない設定があります。また、穴の状態の判定は、定量的な判断基準がなく、担当者の判断によるものです。

第1～3報で示した全実験データは、センター内で閲覧可能です。CFRPの加工で特に重要となる加工穴の外観品質(剥離やアンカット)は、写真では状態を伝えられません。現物を確認し、各自で評価してください。

Tool A～Gの実験条件や結果は、研究報告第1報(2013年度)と第2報(2014年度)を参照してください。

※1 ヘリカル加工における設定送り速度と実送り速度の関係については第2報(2014年度)P.7「備考」を参照してください。