

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 2 報)

水江宏*・橋口智和*

*機械・金属担当

Efficient Cutting Technology of CFRP (The 2nd)

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、市販のドリルおよび超硬合金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。ダイヤモンドコーティングが施された CFRP 専用とされる超硬合金ドリルは、刃先の摩耗がきわめて少なく長寿命であり、切削抵抗が低く保たれ、加工穴の品質が高いことが確かめられた。また、汎用の超硬合金エンドミルを使用したヘリカル加工による穴あけでは、送り速度を増しても、工具の摩耗に大きな影響はなく、1 周あたり Z 軸方向の切込量を増大させることで、工具の摩耗が抑制されることがわかった。

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、航空機やレーシングカー、スポーツ用品、高級車などに適用範囲が広がっている。さらに、自動車産業では、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、樹脂材のはく離などによる加工品質の低下などが問題となっている。

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、市販のエンドミル・ドリ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仕様を、Table 1 に示す。うち Tool A, B, C, D は、2013 年度に使用した工具を比較のため再記載した。本年度使用した工具は、Tool E, F, G である。

Tool E は CFRP 加工用の超硬合金ドリルで、多層 CDV ダイヤモンドコーティングが特徴である。Tool F は CFRP 加工用の超硬合金ドリルで、マルチアングルと微結晶ダイヤモンドコーティングが特徴である。Tool G は超硬合金母材に (Al,Ti)N コーティングが施された 4 枚刃の汎用スクエアエンドミルである。

被削材となる CFRP は、カーボンファイバーに東レ社製 T700S を使用している。上下面の表層に 0° /90° 平織を 1 層ずつ、内層として UD(ユニダイレクショナル材=単方向材)を 0° /90° /45° /-45° を複数積層し、熱硬化性樹脂をマトリックスとして厚さ 6mm に成形したものである。炭素繊維の仕

Table 1 Specifications of Tools

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

様および特性・用途を **Table 2, 3** に示す。

加工実験の構成を **Fig.1** に示す。安田工業製マシニングセンターYBM850Vの加工テーブル上に、キスラー製3成分工具動力計9257Bを固定し切削抵抗を測定した。Fig.1はドリル加工時の構成で、エンドミル加工ではコレットチャックを使用した。

加工液は使用せず、吸塵装置により切りくずを排出した。

2.1 ドリル加工

ドリル加工で使用した加工条件を **Table 4** に示す。ドリル (Tool E, F)加工では、ステップ送りは行わず工具回転軸方向(Z軸方向)への等速直線運動のみとし、直径6.0mmの穴加工を各工具で200穴まで実施した。

Table 2 Specifications of carbon fiber (T700S)

Tensile Strength	MPa	4900
Tensile Modulus	GPa	230
Elongation	%	2.1
Density	g/cm ³	1.8

*from TORAY US website

Table 3 炭素繊維トレカ(R)の製品ラインナップ・用途

製品	特性	主な用途
T1100G	高強度・高弾性率	航空機一次構造, 打ち上げロケット, スポーツ
T1000G	高強度・中弾性率	打ち上げロケット, スポーツ
T800S	高強度・中弾性率	航空機一次構造, スポーツ
T700S	高強度・標準弾性率	航空機一次構造, 産業全般, スポーツ
T300	標準弾性率	航空機二次構造, 産業全般, スポーツ

TORAY JP ウェブサイトより

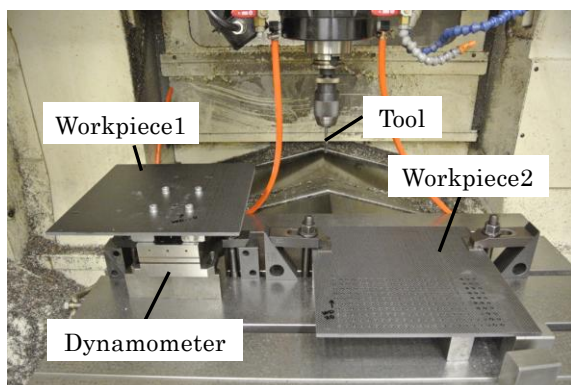


Fig.1 Setup for experiment

2.2 エンドミル加工

エンドミル加工での条件を **Table 5** に示す。工具突出し量は、コレット端面から25mmとした。以降、例えば送り速度600mm/min, 1周回Z切込量1.0mmの場合、F600 Z1と記載する。

また、エンドミル(Tool G)の工具パスを **Fig.2** に示す。エンドミル加工実験では、短い直線パスで構成される擬似的なヘリカル加工(らせん加工)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平面上で正n角形)し(以降、**1周回分割数**という)、同時にZ軸方向に下げることによって擬似的なヘリカル加工を行っている。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)、ヘリカルの総周回数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。

1周回Z切込量が1.0mmの場合、プログラム上の送り速度設定はF600, F800, F1200mm/minとして影響を調べ

Table 4 Cutting conditions

Cutting conditions	Tool E, F
Cutting speed m/min (Rotational speed min ⁻¹)	60 (2996)
Feed per revolution mm/rev (Feed speed F mm/min)	0.05 (150)
Workpiece	CFRP
Workpiece thickness mm	6.0
Coolant	Dry (Suction)

Table 5 Cutting conditions

Cutting conditions	Tool G			
Cutting speed m/min (Rotational speed min ⁻¹)	100 (5305)			
Axial depth of cut in circumference mm	1.0		3.0	
Setting feed speed mm/min *1	600	800	1200	800
Real feed per revolution mm/rev	0.1	0.13	0.2	0.13
Real feed speed mm/min *1	539	706	1048	708
Cutting direction	Up cut milling			
Workpiece	CFRP			
Workpiece thickness mm	6.0			
Coolant	Dry (Suction)			

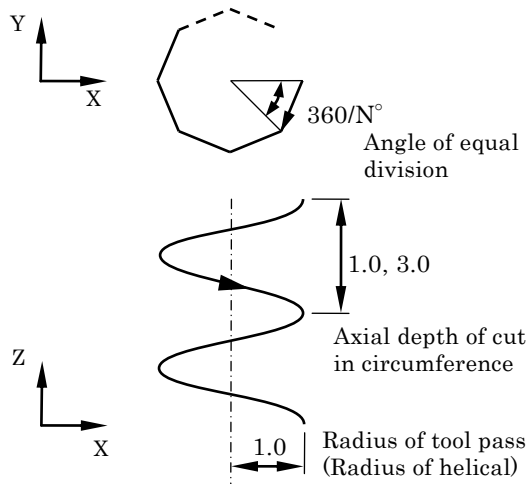


Fig.2 Cutting pass for helical end milling

た。また、送り速度 F800mm/min の場合、1 周回 Z 切込量は 3.0mm として影響を調べた。

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を評価した。

3. 実験結果

3.1 ドリル加工

3.1.1 刃先の摩耗

工具刃先部逃げ面の状態を Table 6 に示す。

顕微鏡による観察では、200 穴加工後の Tool E, F の刃先の状態は、Tool D と同様で、摩耗の進行がほとんど確認されない。全ての工具でチッピングなどは確認されない。

3.1.2 切削抵抗

加工穴個数と Z 軸方向の切削抵抗の関係を Fig.3 に示す。Tool A, B, C, D は、2013 年度の結果である。CFRP 専用ドリルとされる Tool E, F の切削抵抗の変化は、Tool D と同様で、1 穴目から 200 穴目まで徐々に増加する傾向はあるものの大きな変化は確認されなかった。ダイヤモンドコーティングの効果と思われる。

切削抵抗の測定データを Table 7 に示す。今回の加工条件では 2013 年度の Tool D の切削抵抗が最も低く保たれた。Tool E は、穴数の増加に関係なく、加工中に異常振動（ビビリ）が発生することがあった。多くの場合、加工開始からビビリが生じ、工具先端が板底を抜けた後、ビビリが大きくなる。ビビリの発生状況がたとえば 10 穴目の X 軸方向の切削抵抗として記録されている。加工条件の変更や被削材の固定方法などの工夫により結果は変わるとされる。

Tool F は、主切れ刃の角度が、3 段階で構成された形状（マルチポイントアングル）になっており、穴出口部の剥離を抑制する効果があるとされているが、工具先端が板底を抜けた後もしばらく加工が続くため、加工時間は長くなる。

Table 6 Conditions of cutting edge

Number of holes	Tool E	Tool F
	Major cutting edge	Major cutting edge
1st		
10th		
50th		
100th		
200th		

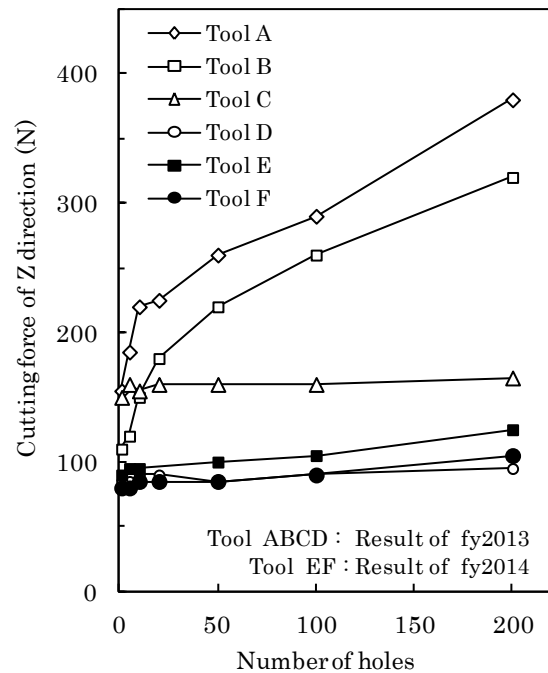


Fig.3 Relation between number of holes and cutting force

3.1.3 加工穴の品質

Table 8 に穴入口・出口の状態を示す。Tool D, E, F の比較において、目視による穴の状態の外観評価を以下に述べる。3 つの工具ともに 200 穴まで全ての穴はかなりの高品質である。

仔細をみると、Tool E では穴入口出口ともに少ない頻度で小さな剥離が確認される。また出口では少ない頻度で小さなアンカットも確認される。また、ビビリが生じたと思われる穴の内壁面には、光沢ムラが確認できる。光沢ムラは穴入口部に

多くみられる。

Tool F では剥離はほとんど確認されない。また出口に少ない頻度で小さなアンカットが確認される。入口部の小さなカエリ(バリ)が他の 2 工具よりわずかに大きいようである。これはマルチポイントアングルの刃先形状により、穴貫通後、3 番目の刃が非常に小さな切取り厚さで穴拡大の加工が進むことで、CFRP が押し広げられる方向に作用し、穴入口部のバリの生成が進行するためではないかと思われる。本加工条件では、送りが遅すぎた可能性もある。

3.2 エンドミルによるヘリカル加工

3.2.1 刃先の摩耗

Fig.4 に加工穴個数と工具コーナーの後退量(コーナー摩耗量)の関係を示す。Table 9 に底刃の状態を示す。

コーナー摩耗量は、初期摩耗のばらつきを排除するために、1 穴加工後を摩耗量 0 として計測した。工具の摩耗量は、1 周回 Z 切込量が 1.0mm の場合、送り速度を変化させても大きな変化は現れなかった。回転数は同じなので、送り速度が速いほうが刃先の切削距離は短く(加工時間は短く)なり、工具寿命には有利であると思われるが、材料の切取り

Table 7 Cutting force (drill)

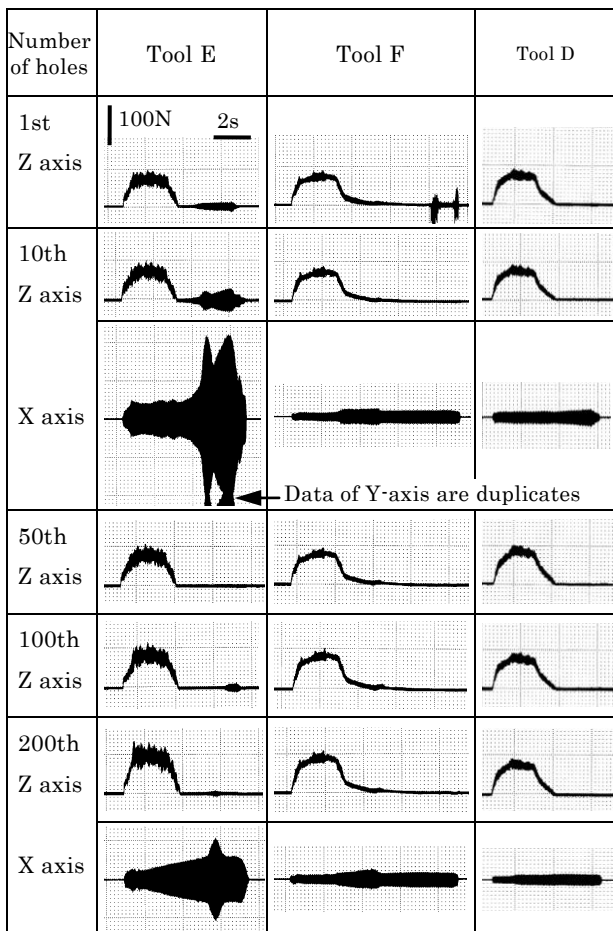
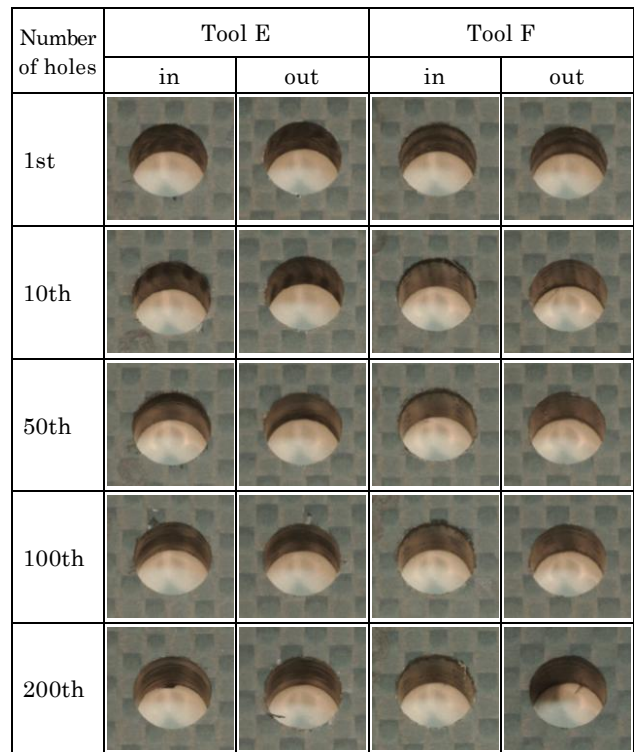


Table 8 Conditions of hole (Hole diameter: 6mm)



厚さが増加することで刃先の負荷が増大し、相殺された可能性がある。

一方、送り速度 F800 のとき 1 周回 Z 切込量を 1.0 から 3.0mm に増加させると、工具の摩耗量が低減した。1 周回 Z 切込量を増したことで、底刃コーナーの切削距離が短くなり、底刃で負担していた除去作用が一部外周刃に移った(外周刃の接触長さが長くなった)ことが原因と思われる。

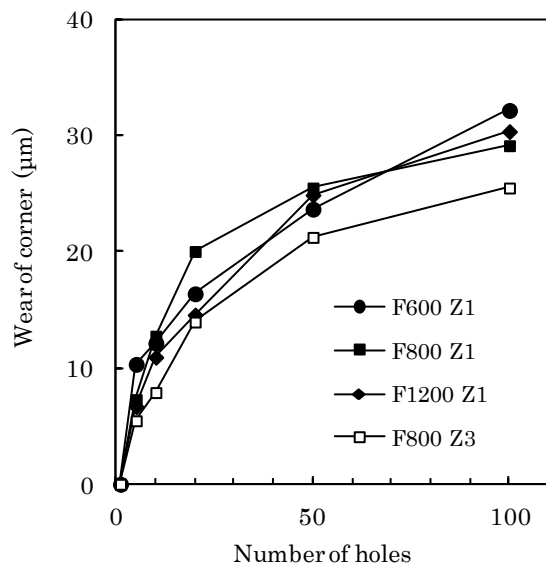


Fig.4 Relation between number of holes and wear of corner

Table 9 Conditions of cutting edge

Number of holes	F800 Z1 End cutting edge	F800 Z3 End cutting edge
1st		
10th		
50th		
100th		

摩耗の形態は、2013 年度と同様で、チッピングなどは確認されず刃先がなめらかに丸くなっている。

3.2.2 切削抵抗

Fig.5 に穴个数と Z 軸方向の切削抵抗の関係を示す。

Fig.6 に穴个数と X 軸方向の切削抵抗の関係を示す。

- ① Z 軸方向の切削抵抗は、1 周回 Z 切込量が 1.0mm の場合、送り速度を増加させるほど増大した。
- ② Z 軸方向の切削抵抗は、送り速度 F800 の場合、1 周回 Z 切込量を 1.0 から 3.0mm に増加させると約 60% 増大した。
- ③ X 軸方向の切削抵抗(Y 軸方向も同様)は、1 周回 Z 切込量が 1.0mm の場合、送り速度を増加させても大きな変化は見られなかった。

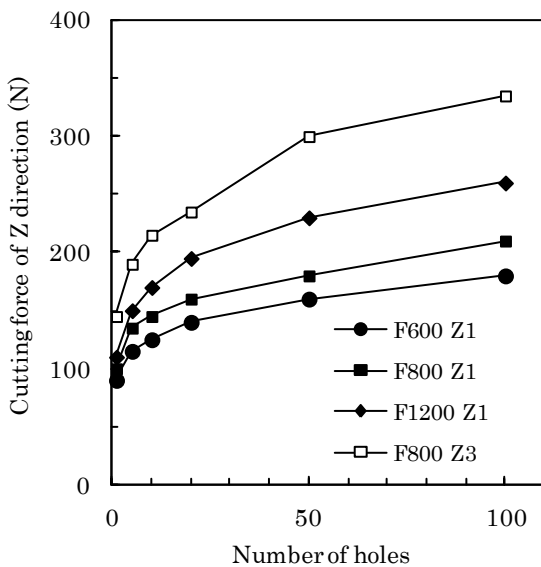


Fig.5 Relation between number of holes and cutting force (Z axis)

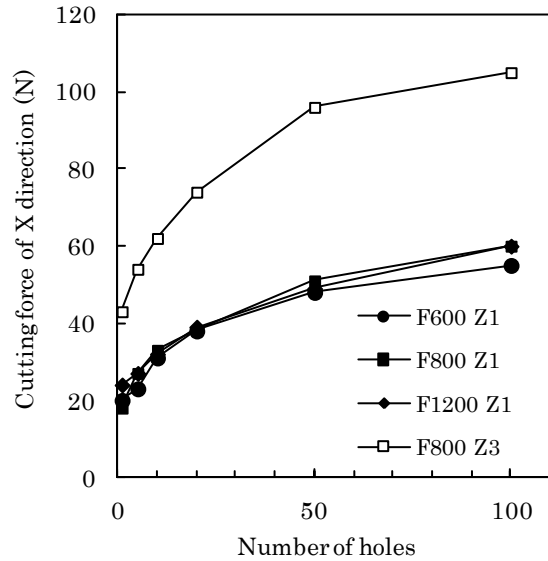


Fig.6 Relation between number of holes and cutting force (X axis)

- ④ X 軸方向の切削抵抗は、送り速度 F800 の場合、1 周回 Z 切込量を 1.0 から 3.0mm に増加させると約 75% 増大した。

ヘリカル加工時の加工領域を表す模式図を Fig.7 に示す。工具中心が -X 軸上からスタートし、1 周回切込んで -X 軸上にまた戻ってきた状態である、また、外周刃による加工領域を各座標平面に投影した領域形状として三面図の形式で Fig.8 に示す。X-Z 図と Y-Z 図では、工具の終点の底刃高さを Z0 として描いている。さらに、円筒面に描かれる外周刃の加工領域を平面に展開した形状を Fig.9 に示す。

なお、Fig.8, 9 中の条件 C は加工実験が未実施の参考データである。

底刃の切削面の形状は円である。外周刃の切削面の形状は、ヘリカル半径、工具半径、1 周回あたり Z 切込量を定数とし、ヘリカルの回転角 θ を媒介変数とした式であらわされる曲線、底刃の円弧ならびに、円筒形とみなした工具と穴内壁の

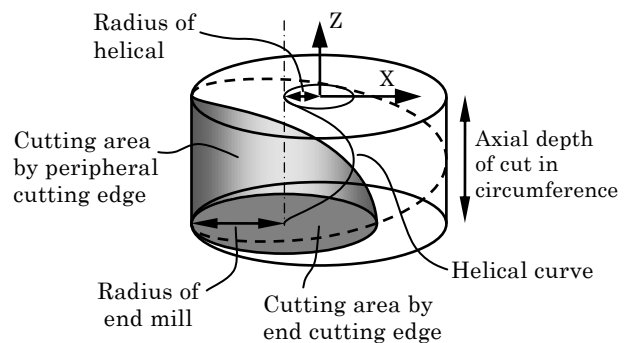


Fig.7 Schema of cutting area in circumference at helical end milling

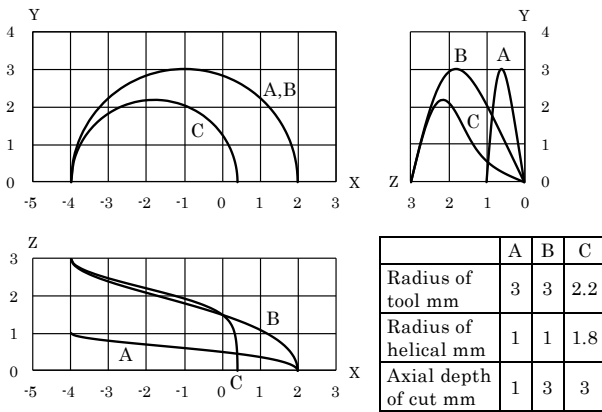


Fig.8 Projected planform of cutting area at helical end milling

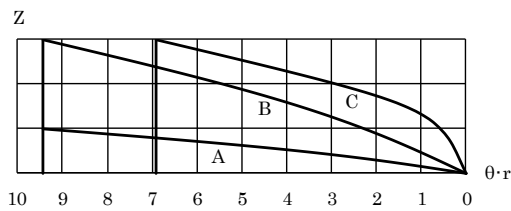


Fig.9 Development view of cutting area by peripheral cutting edge at helical end milling

接触線に囲まれた領域となる。

送り速度が増加すると、切削面の面積は同じであるが、底刃と外周刃が負担する被削材の切り取り厚さはそれぞれ増加する。

1 周回 Z 切込量を大きくすると、外周刃の切削面の面積は、ヘリカル半径 1.0mm, 1 周回 Z 切込量が 1.0mm の場合は約 16.1mm², 1 周回 Z 切込量が 3.0mm の場合は約 5.36mm²となり、外周刃の接触長さは長くなる。また、底刃の切削面の面積は同じであるが、切り取り厚さが増加する。これらのことから、以下の可能性を推察する。

1. Z 軸方向の切削抵抗 F600Z1, F800Z1, F1200Z1 の比較および F800Z1, F800Z3 の比較について、おもに底刃の背分力が切削抵抗として計測される(主分力はねじれ)と考えられる。また、今回の実験条件だけでは、切り取り厚さの変化がどのように影響しているかは不明である。Z 軸方向の切削抵抗はエンドミル底刃のセンター部(切削速度 0 点近傍)の影響と背分力の影響が大きい、と仮定すると、送り速度の増加に伴い切削抵抗が増加することがわかる(①, ②)。

2. X 軸方向の切削抵抗 F600Z1, F800Z1, F1200Z1 の比較について、送りを増しても、外周刃の接触長さは同じであり、また、工具の摩耗状態によっては、切り取り厚さによっては、切り取り厚さが小さい場合は、逃げ面で材料を押し方向に大きな力(背分力)が生じ、切り取り厚さが大きくなるに従

い、主分力は増すが背分力が減少すると仮定すると、相殺されて同じになると考えられる(③)。

3. X 軸方向の切削抵抗 F800Z1, F800Z3 について、外周刃の接触長さが長くなり切削抵抗は増大すると考えられる(④)。

Table 10 に切削抵抗の測定データを示す。

Z 軸方向の切削抵抗は、被削材への食い付き時に、短時間に切削抵抗が増大している。刃先の摩耗のため、刃先が被削材に接触した直後は、削り取りの作用よりも刃先が被削材表面を擦る作用が大きく影響しているためと思われる。

刃先が食い込んだ後、Z 軸方向の切削抵抗は、穴が深くなるに従い、徐々に減少している。ドリル加工のように底刃の影響を考えると、穴が深くなるに従い切りくずの排出性の低下など、切削抵抗(-Z 方向の力)の増大などが考えられる。しかしながら、ヘリカル加工の場合、外周刃がそのねじれ角により、被削材を引き上げる方向に切削抵抗(+Z 方向の力)が作用するため、穴が深くなるに従い、外周刃の接触長さが増大し、+Z 方向の切削抵抗が大きくなるためと考えられる。

なお、Fig.5 のグラフデータの計測では、ばらつきを考慮して、切削抵抗の急激な増大箇所は含めていない。

Table 10 Cutting force (Tool G Endmill)

Number of holes	F600 Z1.0	F800 Z1.0	F1200 Z1.0	F800 Z3.0
1st Z axis				
10th Z axis				
50th Z axis				
100th Z axis				
X axis				

3.2.3 加工穴の品質

Table 11 に穴入口・出口の状態を示す。

CFRP 専用のドリル(Tool D, E, F)の穴加工と比較すると、20～30 穴までは小さなアンカットや剥離が確認されるだけで、大きな違いはなく高品質である。しかしながら、30 穴を超えると入口部のアンカット・剥離、出口部のアンカットが目立ち始める。それでも、要求品質が厳しくなければ60穴程度までは許容範囲である。これ以降は、入口のアンカットや剥離、出口の小さなアンカットが穴品質を損なっている。

ヘリカル加工の穴入口部の比較では、F600Z1 は、40 穴目以降でバリが目立つ。F800Z1, F1200Z1, F800Z3 では大きな違いは確認されない。

穴出口部について、F600Z1, F800Z1 ではアンカットはあるが、目立つ剥離は少ない。F1200Z1, F800Z3では小中程度の剥離が確認され、アンカットは少ない。

穴入口部の品質や工具摩耗の観点から、穴入口部、中間部では、送り速度を速めたり1周回 Z 切込量を大きくし、また、穴出口部の品質の観点から、出口部では送り速度を遅くしたり1周回 Z 切込量を小さくすることが効果的である。

Table 11 Conditions of hole (Hole diameter: 8mm)

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

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る。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ある。

備 考 (*1)

上述 Table 5 Cutting conditions 内に記載の Setting feed speed および Real feed speed について。

エンドミル工具のヘリカル加工実験では、加工機の仕様により、ヘリカル加工(XY 平面での円弧補間(G02,03)動作時の Z 軸方向の同時駆動)ができないため、直線補間(G01XYZ)により、正多角形を描く動作と同時に Z 方向の駆動を行うことで、擬似的なヘリカル加工を実現している。

直線移動量を小さくするほど正多角形は、円弧の形状に近づくが、工具の動作においては加減速の頻度が高まり、プログラム上の送りの設定値(Setting feed speed)より平均実送り速度(Real feed speed)が小さくなることが予想される。

そこで、CFRP 加工実験前に、送りの設定値、1周回分割数および平均実送り速度の関係について調査した。調査条件を Table A に示す。

Table A 調査条件

周回数	10
送り設定値	300～2000mm/min
1周回あたり分割数	3～180
工具パス半径	1.0mm
1周回あたり Z 切込量	1.0, 3.0mm

マシニングセンターの主軸には工具ホルダを装着せず、空運転により調査した。制御装置から得られる時間変数(分解能は 1ms)を、NC プログラム上のヘリカル加工開始行と終了行で取得し、実加工時間を計測した。実加工時間とヘリカル加工動作の総移動距離から平均実送り速度を求めた。

ヘリカル加工における1周回分割数と平均実送り速度の関係を Fig.A に示す。1周回 Z 切込量が 1.0, 3.0mm の場合に、工具 1 回転あたり送り量が 0.1, 0.13, 0.2 になるように、本グラフから送りの設定値、1周回分割数を決定した。選択された平均実送り速度、1周回分割数などを Table B に示す。

また、1周回 Z 切込量が 1.0 の場合のより広範条件での調査結果を Fig.B に示す。

調査前には、単一の G01 補間長(G01 の移動距離)が短くなる(1周回分割数が多くなる)に従い、全体的には平均実送

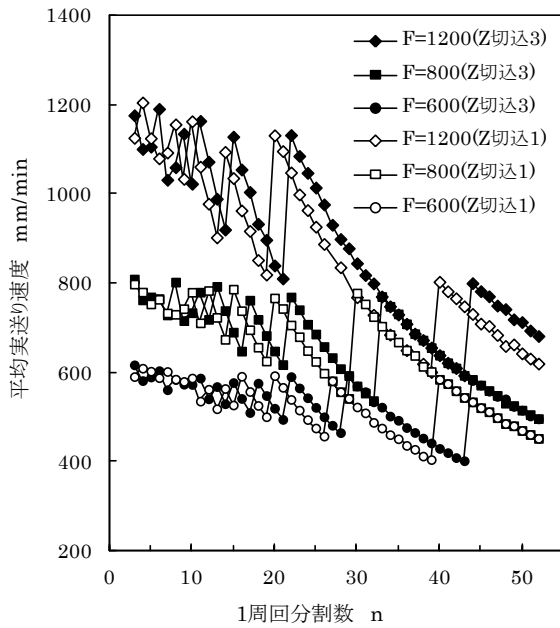


Fig.A 擬似ヘリカル加工パスにおける 1 周回分割数と平均実送り速度の関係

り速度が減少する。そうしたなか、NC プログラム中の三角関数や四則演算上「割の良い」分割数などにおいて特異的に平均実送り速度が増減することがあるだろうと思われた。

実際は予想と大きく異なり、平均実送り速度は、送り設定値を変更しても反比例的な性質を示す複数の曲線(双曲線?)上に沿うものとなった。逆にいえば、この反比例的な曲線上以外の平均実送り速度は設定し得ない(わずかな例外データはある)。

Table B 平均実送り速度設定条件等

1 周回 Z 切込量 mm	1.0			3.0
1 周回分割数	22			24
G01 補間長 mm	0.288			0.289
G01 接続角度 deg	164			167
送り設定値 mm/min	600	800	1200	800
平均実送り速度 mm/min (mm/rev)	539 (0.1)	706 (0.13)	1048 (0.2)	708 (0.13)

送りの設定値を大きくしても単一の補間長が短いと送り速度は設定値に到達しないまま加工が進むので、1 周回あたり分割数が多くなると平均実送り速度の限界線(Fig.B)が現れることは予想できる。

一方、制御装置には、加減速動作での設定パラメータや直線補間(G01)や円弧補間(G02,G03)の接続角度の違いによる動作設定パラメータ、プログラムの先読み設定パラメータなどがある。また、使用者からは設定出来ないサーボアンプの設定パラメータなどがあると思われる。反比例的な複数の曲線にほぼすべてのデータが一致する理由については、こ

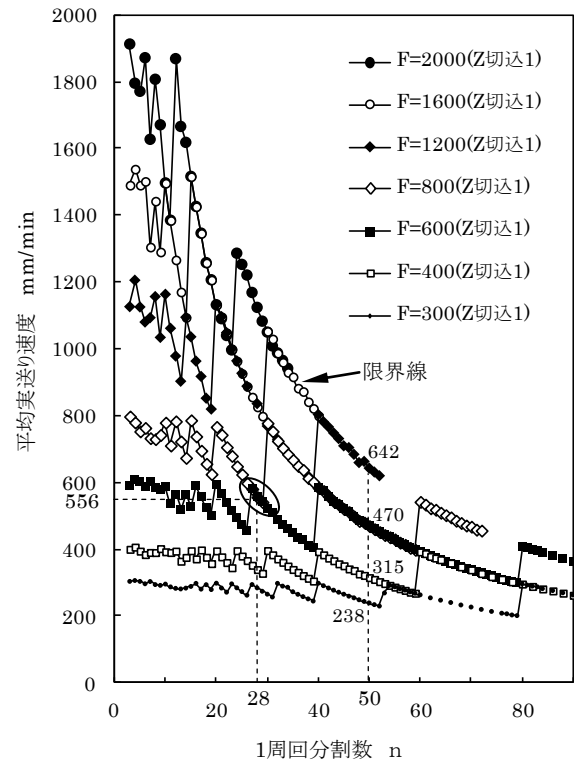


Fig.B 擬似ヘリカル加工パスにおける 1 周回分割数と平均実送り速度の関係

これらのパラメータが影響していると思われるが、本調査では結論を得ない。

加工実験上の問題点は、1 周回分割数を決定すると、送りの設定値を細かく変化させても、平均実送り速度はとびとびの値しか選択できないことである。たとえば 1 周回分割数 50 に設定すると、送りの設定値を F300 以上の範囲では、細かく変更しても、平均実送り速度は 297, 392, 584, 800 のみとなる。

また、Fig.Bによると、たとえば分割数 28 の場合、送り設定値が F600 と F800 では、同じ平均実送り速度 556mm/min となる。分割数 28 のときの単一の G01 補間長は 0.227mm、各 G01 間の接続角度は 167° である。機械的にも送り速度に余裕があると思われる条件領域(限界線より内側の領域)においても、工作機械使用者からは理解困難な平均実送り速度となる。

このような現象が他の加工機で発生するか不明であるが、加工現場で重要なことは、擬似ヘリカル加工パスかどうかにかかわらず、3D-CAD/CAM などで出力した比較的短い直線補間による曲面加工などにおいて、工具のビビリや損傷、精度向上のための対策として、加工担当者がより低い送り設定値に変更しても、工作機械や加工プログラムによっては実際の送り速度は変化しない場合があることを認識することで