

複合材料(CFRP)及び耐熱合金の切削加工技術

秋田県産業技術センター 加藤 勝、沓澤 圭一

1. 緒 言

複合材料であるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、その軽くて強い特性によって省エネルギーを実現するものとして、航空機のみならず自動車や家電等に更なる応用が期待されている。しかしながら、CFRPの切削加工（穴あけ、トリム等）では、工具摩耗が激しいこと、バリやデラミネーション（層間剥離）等が発生することが課題となっており、高能率・高品質に加工することが求められている。また、CFRPはその成形方法の相違によって特性に違いがあり、加工形態にも相違が見られる材料である。

近年、各工具メーカーからCFRP加工用と称される工具が販売されるようになってきた。昨年度の本事業では、最もニーズが多い穴加工を対象に、数種類の工具（ドリル、エンドミル）を用いて、穴加工及びエンドミルによるヘリカル穴加工実験を行い、工具摩耗やCFRPの加工状態について調査した。今年度は、数種類のルーターやエンドミルを用いて、トリム加工（取り除き加工）実験を行い、工具摩耗やCFRPの加工状態について調査したので報告する。

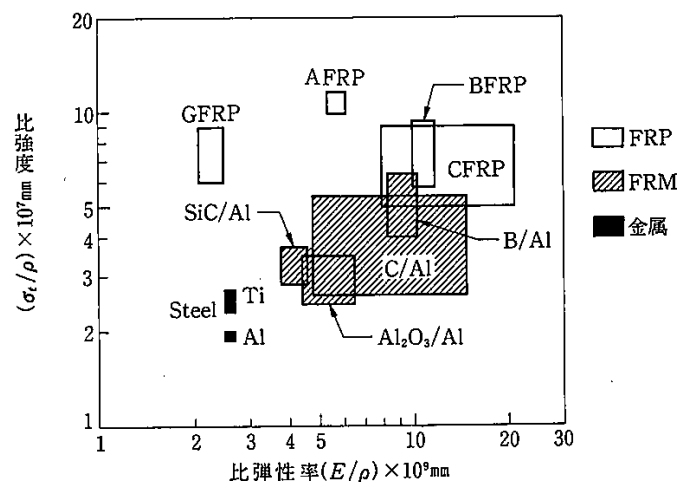
また、近年の航空機産業への参入支援に相まって、航空機のジェットエンジン関係で使用する耐熱合金（インコネル、ハステロイ等）の加工ニーズも出始めている。そこで、ニッケル基の耐熱合金であるハステロイX材を対象に、数種類のドリル工具を用いて穴加工実験を行い、同様に工具摩耗や加工状態を調査したので報告する。

2. 調査研究内容

2-1 の項では一般的な CFRP の材料特性について、2-2 の項ではルーターやエンドミルによる CFRP のトリム加工技術について、2-3 の項ではハステロイ X の材料特性について、2-4 の項ではドリルによるハステロイ X の穴加工技術について述べる。

2-1 CFRP の特性

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic:炭素繊維強化プラスチック）は、炭素繊維に合成樹脂（一般的にはエポキシ樹脂）を含浸した後、硬化させて成形した複合材料（Composite）である。炭素繊維は $5\sim 10\mu\text{m}$ の太さの極細繊維であり、優れた力学的特性を持っているが、PAN 系とピッチ系があり、弾性率、強度だけでなく、熱的特性など物理的性質でも多くの種類がある。



【図 1 各種材料の比強度・比弾性率】

製品の性能要求を満たすために適した炭素繊維を選定する必要があり、希望の特性を得るために PAN 系とピッチ系を組み合わせることもある。

一般的な CFRP 成形では、材料としてエポキシ樹脂マトリックスのプリプレグシート（一般的な厚みは 0.1mm から 0.3mm 程度）を用いる。プリプレグシートには、一方向のみに炭素繊維を引き揃えた UD 材と、縦・横に炭素繊維を織り込んだクロス材がある。成形品は UD 材を同じ方向に積層して成形した場合と、縦と横に方向を変えて積層して成形した場合では、成形品の性能が大きく変化する。また、プリプレグシートは、-20℃以下の冷凍保存が必要であり消費期限も 3～6 ヶ月程度と短いため、近年は平織した炭素繊維を真空引きしながらエポキシ樹脂を含浸させて成形する Vatrm (Vacuum Assist Transfer Resin Mold) 成形法が普及しつつある。

図 1 に各種材料の比強度・比弾性率を示す。CFRP は軽くて強い材料であることがわかる。また、表 1 に参考として複合材料 (CFRP・GFRP) やその他材料の機械的特性等を示す。比重はステンレス鋼の 1/4 以下でありながら、引張り強さは約 3 倍と非常に優れていることがわかる。但し、CFRP は耐衝撃性は低いので注意が必要であるとともに、積層材であるので、内部欠陥が生ずる可能性がある。使用に当たっては超音波探傷装置等で検査を必要とする場合もある。

【表 1 複合材料や他材料の主な機械的特性】

素材	比重	引張 強さ Mpa	引張 弾性 率 Gpa	曲げ 強さ Mpa	曲げ 弾性 率 Gpa	線膨張 係数 10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	熱伝導率 Kcal/mh℃	体積低効 率 Ωcm	連続使 用温 度 ガラス 転移 点℃
CFRP 高強度繊維 (1方向) PAN系	1.5	1570 ～ 4410	118 ～ 147	1270 ～ 1960	88 ～ 127	0.2 ～ 0.4	3.0 ～ 3.5	4×10 ⁻⁵	120 ～ 200
CFRP 高剛性 (1方向) ピッチ系	1.7	1470 ～ 1960	235 ～ 480	590 ～ 1180	147 ～ 412	-0.8 ～ -0.3	4 ～ 5	2×10 ⁻⁵	120 ～ 200
GFRP ガラス繊維 (1方向) Vf.60	2	1080	44	1120	44	7	0.24 ～ 0.28	1×10 ⁻¹⁵	120 ～ 200
アルミニウ ム A5052	2.7	245	70	---	---	23.6	100	2.65×10 ⁻⁶	250
ステンレス SUS304	7.9	588	206	---	---	17.5	12.9	4.45×10 ⁻⁶	600
チタン 6AL4V	4.5	98	118	---	---	8.2	6.8	72×10 ⁻⁶	350
グラファイト	1.6 ～ 1.7	2060 ～ 5400	9 ～ 12	21 ～ 88	92 ～ 136	3 ～ 4.2	81 ～ 128	0.9 ～ 2.2	---
C/C コンポジット	1.45 ～ 1.75	49 ～ 80	9293	118 ～ 412	17 ～ 127	0.5 ～ 0.6	3 ～ 5	260 ～ 290	3000

2-2 CFRP のトリム加工技術

【表 2 CFRP 材のトリム加工条件】

2-2-1 実験内容

市販の CFRP 材（穴織カーボン製：100×100×厚さ 10mm、UD+表層クロスタイプ、表面つや有り）を対象に、ルータータイプのダイヤモンドコーティング工具 3 種類、エンドミルタイプのダイヤモンドコーティング工具 3 種類、DLC コーティングエンドミル 1 種類、超硬ソリッドエンドミル 1 種類、ハイス母材の TiN 系コーティングエンドミル 1 種類の計 3 社 9 種類の工具を用いて、マシニングセンタ（日立精機製 VKC45 II）で片削りによるトリム加工実験を行った。CFRP 材はバイスに挟んで固定し、各工具とも時間の関係上、切削長 1m（10 パス）まで加工した。切削加工条件を表 2 に示す。

評価として、工具摩耗と加工面状態をマイクロスコープ（ハイロックス製 KH-2700）で観察し、CFRP の加工面粗さを表面粗さ測定機（東京精密製サーフコム 3000A-3DF）で測定した。

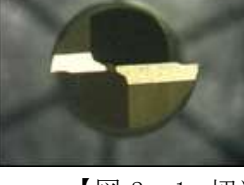
番号	メーカー	形状	材種
①	H社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
②	M社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
③	O社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
④	M社	4枚刃	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑤	O社	4枚刃	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑥	O社	4枚刃逆ねじれ	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑦	M社	2枚刃	超硬母材DLCコーティング
⑧	M社	2枚刃	超硬ソリッド
⑨	M社	2枚刃	ハイス母材TiNコーティング
被削材			CFRP (100×100×t10mm) 両面クロス織り ツヤ有り
工具径(mm)			6
主軸回転数(min-1)			10000
切削速度(m/min)			188
送り速度(mm/min)			1000
1回転当たりの送り(mm/rev)			0.1
径方向切り込み(mm)			1
切削長(m)			1
クーラント			エア吸引
加工方式			ダウンカット

2-2-2 実験結果

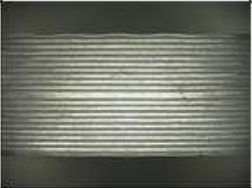
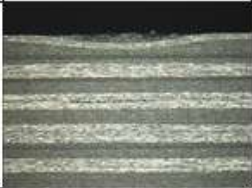
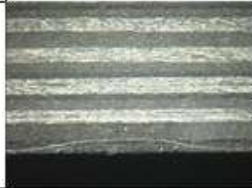
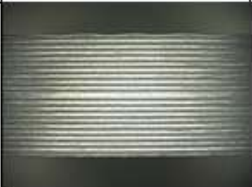
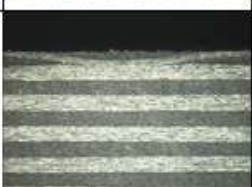
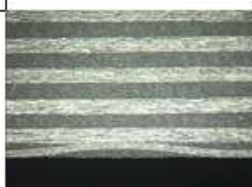
2-2-2-1 工具摩耗状態について

図 2 に 1m 切削後の各工具の側面刃の工具摩耗状態を示す。参考として新品状態の底刃形状も示している。①～③のルータータイプ及び④～⑥のエンドミルタイプのダイヤモンドコーティング工具は、切削長 1m 程度では殆ど工具摩耗は観察されず、十分な性能を確認できた。今回は時間の関係上、これらの工具寿命まで切削加工実験を行うことが出来なかったため、今後検討していきたいと考えている。

一方、⑦の DLC コーティング工具は若干刃先部のコーティング部の摩耗が観察された。やはり、DLC コーティングはダイヤモンドコーティングよりも劣ることがわかった。また、⑧の超硬ソリッド工具も、DLC コーティングよりも多く刃先部の摩耗が観察され、特に CFRP の直角方向の積層部に当たる箇所に激しい摩耗が見られた。⑨のハイス母材 TiN コーティング工具は、⑧よりも更に激しく工具摩耗が進み、ハイス母材まで段々上に摩耗していた。従って、今回の加工条件は、⑧や⑨の工具には高すぎる設定であったと思われるが、それらを考慮しても、ダイヤモンドコーティング工具を選定することが適切であると考えられる。

メーカー	タイプ	新品(底刃形状)	新品(側刃形状)	1m切削後	結果
①H社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
②M社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
③O社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
④M社	ダイヤモンドコーティング				摩耗無し ○
⑤O社	ダイヤモンドコーティング				摩耗無し ○
⑥O社	ダイヤモンドコーティング(逆ねじれ)				摩耗無し ○
⑦M社	DLCコーティング				若干摩耗有り△
⑧M社	超硬ソリッド				摩耗有り×
⑨M社	TiNコーティング(ハイス母材)				使用不可×

【図2 1m切削後の工具摩耗状態】

メーカー	タイプ	1m切削後(全面)	1m切削後(表側)	1m切削後(裏側)	結果
①H社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
②M社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
③O社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
④M社	ダイヤモンドコーティング				バリ無し ○
⑤O社	ダイヤモンドコーティング				バリ無し ○
⑥O社	ダイヤモンドコーティング(逆ねじれ)				バリ無し ○
⑦M社	DLCコーティング				若干表側バリ有り△
⑧M社	超硬ソリッド				表側バリ有り×
⑨M社	TiNコーティング(ハイス母材)				カーボン繊維むしれ×

【図 3 1m 切削後の CFRP 側面の加工状態】

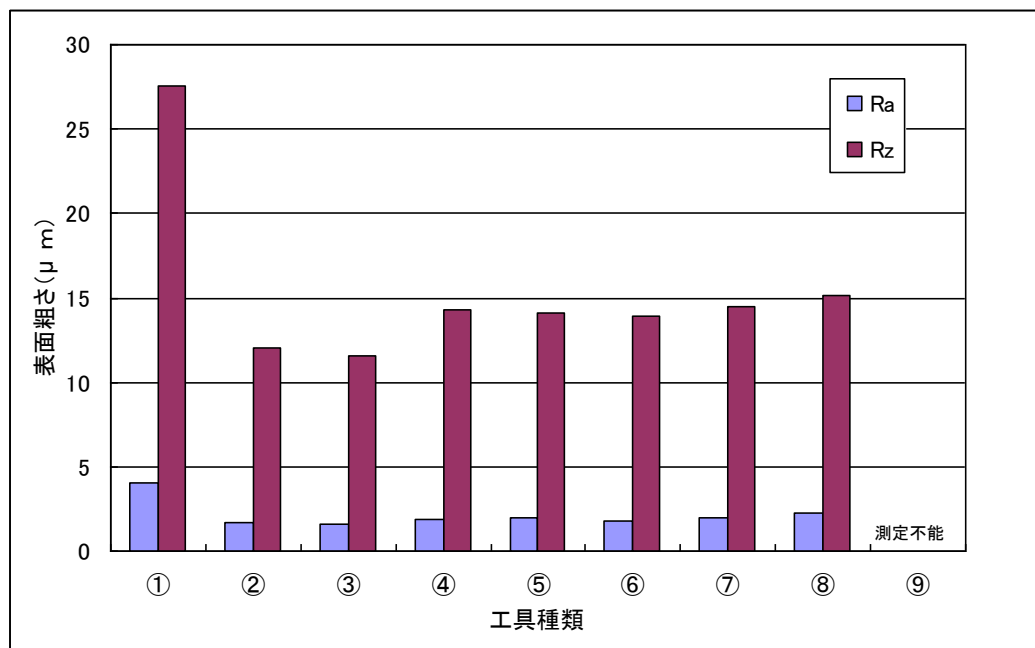
2-2-2-2 CFRP 材の加工状態について

図 3 に 1m 切削後の CFRP 材の加工状態を示す。左側が全面で、中央が表面部、右側が裏面部の拡大した様子である。①～⑥のダイヤモンドコーティング工具は切削面の見た目も良好で、表面・裏面ともバリは見られなかった。ルータータイプとエンドミルタイプの明確な差も見受けられなかった。また、⑥の工具は表層部のバリやデラミネーションを抑制するために、逆ねじれの構造となっている工具であったが、他工具との加工面状態の明確な差は見受けられなかった。一方、⑦の DLC コーティング工具は、表面のクロス織り部で若干のバリが観察された。⑧の超硬ソリッド工具は、同様の箇所で⑦よりも更に大きいバリが観察された。⑨のハイス母材 TiN コーティング工具は、全面でカーボン繊維がむしれた状態になっており、表面もクロス繊維の切り残しが観察された。

上述した CFRP 加工面の状態は、2-2-2-1 で述べた工具摩耗状態の結果と一致しており、工具摩耗が加工面状態に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

2-2-2-3 CFRP 材の加工面粗さについて

図 4 に、CFRP 加工面の厚さ方向の加工面粗さを示す。表面粗さはそれぞれ 3 箇所測定した平均値であるが、⑨の工具については加工面がむしれ面であったため測定不能であった。①の工具が著しく加工面粗さが悪く、②、③の工具は逆に最も加工面粗さが良かった。④～⑥の工具はほぼ同様の加工面粗さであった。一般的に、ルータータイプは荒加工向け、エンドミルタイプは仕上げ加工向けと言われているが、ルータータイプでもエンドミルタイプより加工面粗さが良いものがあることがわかった。⑦と⑧の工具は、②～⑥のダイヤモンドコーティング工具に比べて若干加工面粗さが悪化した。これらも工具摩耗によるものと考えられる。従って、加工面状態及び加工面粗さの観点からも、CFRP のトリム加工には、ダイヤモンドコーティング工具が適していると判断できる。また、工具形状はねじれ角の小さい多刃工具が有効であると思われる。



【図 4 CFRP の加工面粗さ】

2-3 ハステロイ X 材の特性

ハステロイ (HASTELLOY) は、主にニッケル基にモリブデンやクロムを多く加えることで耐食性や耐熱性を高めた合金であり、米ヘインズ社 (Haynes International, Inc) の商標である。広く使用されている合金群であるため日本でも一般名化している。ニッケルを主成分する合金でモリブデンやクロム、鉄などの成分量のちがいで、ハステロイ B、ハステロイ C、ハステロイ X などがある。析出硬化型のニッケル基合金に属し、耐酸化性の高いものや耐熱性が高い金属であるため、腐食性環境や高温環境での使用に向くが、物理的強度やクリープ強度、疲労強さは特段の強さを持たないため、構造材には向かない。一般的に、圧力計のダイヤフラムなどの耐食性が求められる場合やジェットエンジンの燃焼室などの耐熱性が求められるものに使用される。表 3 にハステロイの化学成分を示す。今回の実験では、鉄が多く含まれるハステロイ X を被削材とした。ハステロイ X は、1200℃の高温まで耐食性の優れた合金で、加工性、溶接性も比較的良好な材料である。

【表 3 ハステロイ材の化学成分】

合金の商品名 "HASTELLOY 〇〇"	Ni	Co	Cr	Mo	W	Fe	Si	Mn	C	その他
B-2	69	≤1	≤1	28	–	≤2	≤0.1	≤1	≤0.01	–
B-3	≥65	≤3	1.5	28.5	≤3	1.5	≤0.1	≤3	≤0.01	Al≤0.5, Ti≤0.2
C-4	65	≤2	16	16	–	≤3	≤0.08	≤1	≤0.01	Ti≤0.7
C-2000	59	≤2	23	16	–	≤3	≤0.08	–	≤0.01	Cu-1.6
C-22	56	≤2.5	22	13	3	3	≤0.08	≤0.5	≤0.01	V≤0.35
C-276	57	≤2.5	16	16	4	5	≤0.08	≤1	≤0.01	V≤0.35
G-30	43	≤2	30	5.5	2.5	15	≤1	≤1.5	≤0.03	Nb≤0.8, Cu≤2
N	71	≤0.2	7	16	≤0.5	≤5	≤1	≤0.8	≤0.08	Al+Ti≤0.5, Cu≤0.35
W	63	≤2.5	5	24	–	6	≤1	≤1	≤0.12	V≤0.6
X	47	≤1.5	22	9	0.6W	18	≤1	≤1	≤0.10	B≤0.008

2-4 ハステロイ X の穴加工技術

2-4-1 実験内容

ハステロイ X 材 (φ80×厚さ 5mm) を対象に、超硬ソリッドドリル 2 種類、超硬母材コーティングドリル 2 種類、ハイス母材コーティングドリル 3 種類の計 5 社 7 種類の工具を用いて、マシニングセンタ (日立精機製 VKC45II) で G83 のステップ送りによる穴あけドリル加工実験を行った。ハステロイ X 材はバイスに挟んで固定し、各工具とも時間の関係上、10 穴まで加工を目標とした。切削加工条件を表 4 に示す。クーラントのかけ方については、④の工具のみセンタスルー対応なので内部給油とし、その他の工具は外部給油とした。評価として、工具摩耗とハステロイ X の加工状態をマイクロ스코プ (ハイロックス製 KH-2700) で観察した。

2-4-2 実験結果

2-4-2-1 工具摩耗状態について

図 5 に 10 穴加工後（⑥と⑦は途中で中止）の各工具の底刃の工具摩耗状態を示す。参考として新品状態の底刃形状も示している。①及び②の超硬ソリッド工具は、共に 10 穴加工が可能であり、①は刃先先端の僅かな摩耗が観察された。②は工具剛性を持たせるためシンニングを施さず芯厚を厚くし、スクイ角も小さめの構造とした特注品であるが、底刃片部に僅かチッピングが見受けられた。上述した構造が逆に切削抵抗を上げてしまったために起こったものと推定される。③及び④のコーティング工具は、共に 10 穴加工可能であり刃先先端の摩耗がそれぞれ観察されたが、③の複合多層コーティング工具の方が摩耗は少なく、④の工具の方が摩耗は多かった。④は内部給油方式なので摩耗の抑制に寄与するものと思われたが、内部給油の明確な効果は認められなかった。

一方、⑤～⑦のハイス母材コーティング工具については、⑤は 10 穴加工可能であったが、刃先摩耗は特に底刃片部で多かった。③と⑤は母材違いの同じコーティング品であるが、ハイス母材の方が超硬母材よりも摩耗が多いことがわかった。価格は超硬母材の方がハイス母材の約 2 倍するが、超硬母材を選択する方が賢明であろう。また、⑥の工具は 5 穴で、⑦の工具は 4 穴で底刃の工具欠損が確認されたため加工中止とした。今回の実験により、ハイス母材の Ti 系コーティング工具は適さないことがわかった。

一方、⑤～⑦のハイス母材コーティング工具については、⑤は 10 穴加工可能であったが、刃先摩耗は特に底刃片部で多かった。③と⑤は母材違いの同じコーティング品であるが、ハイス母材の方が超硬母材よりも摩耗が多いことがわかった。価格は超硬母材の方がハイス母材の約 2 倍するが、超硬母材を選択する方が賢明であろう。また、⑥の工具は 5 穴で、⑦の工具は 4 穴で底刃の工具欠損が確認されたため加工中止とした。今回の実験により、ハイス母材の Ti 系コーティング工具は適さないことがわかった。

2-4-2-2 ハステロイ X 材の加工状態について

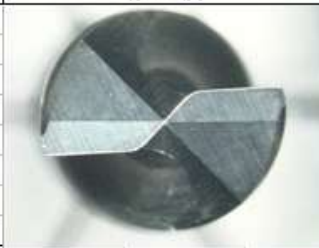
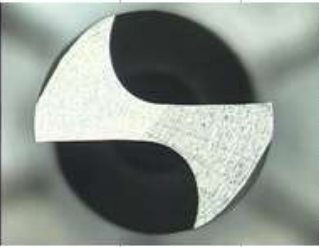
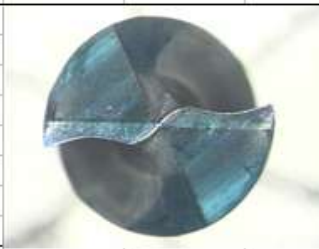
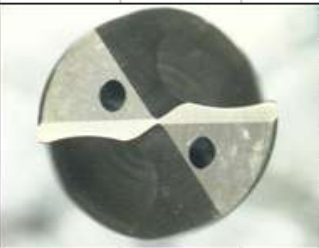
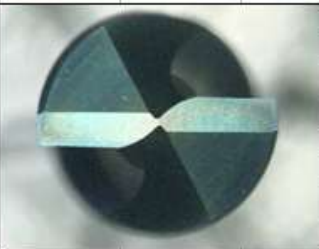
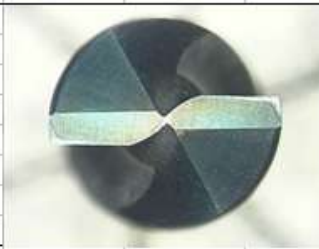
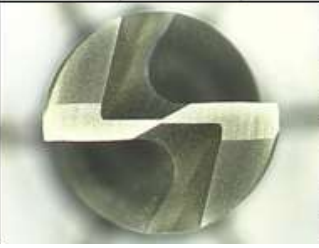
図 6 にハステロイ X 材の 10 穴目の加工状態を示す（⑥は 5 穴目、⑦は 4 穴目）。①～④の超硬系工具は、写真ではわかりにくいが入り側及び出口側のバリも比較的少なく、良好な加工状態であった。特に①と③の穴内壁の加工状態が良好であり、これは上述した工具摩耗状態と結果が一致していた。

一方、⑤の工具は 10 穴加工可能であったが、①～④の超硬系工具よりもバリは多く観察された。⑥及び⑦の工具はそれぞれ未貫通となっており、工具欠損による影響を受けている様子が見受けられた。

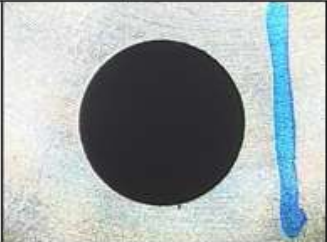
以上のことから、ハステロイ X の穴加工では、コーティングに関係なくハイス母材工具は不適であり、超硬ソリッドまたは超硬コーティング工具が適していると判断できる。また、シンニングを施している工具の方が工具に掛かる負荷も少なく、工具寿命が良くなると考えられる。

【表 4 ハステロイ X の切削加工条件】

番号	メーカー	材種
①	M社	超硬ソリッド
②	T社	超硬ソリッド
③	O社	超硬母材複合多層コーティング
④	H社	超硬母材TiSiN系コーティング
⑤	O社	ハイス母材複合多層コーティング
⑥	O社	ハイス母材TiN系コーティング
⑦	F社	ハイス母材TiCNコーティング
被削材		ハステロイX t5mm
工具径(mm)		6
主軸回転数(min-1)		1000
切削速度(m/min)		18.8
送り速度(mm/min)		50
1回転当たりの送り(mm/rev)		0.05
軸方向切り込み(mm)		1
目標加工穴数(穴)		10
クーラント		水溶性エマルジョン
加工方式		G83固定サイクル

工具	タイプ	新品	加工後	加工穴数	結果
①M社	超硬ソリッド			10穴OK	刃先摩耗小○
②T社	超硬ソリッド			10穴OK	刃先若干チッピング有り△
③O社	超硬母材 複合多層 コーティング			10穴OK	刃先摩耗小○
④H社	超硬母材 TiSiN系 コーティング オイルホール付き			10穴OK	刃先摩耗中△
⑤O社	ハイス母材 複合多層 コーティング			10穴OK	刃先摩耗大△
⑥O社	ハイス母材 TiN系コーティング			5穴中止	欠損×
⑦F社	ハイス母材 TiCN系 コーティング			4穴中止	欠損×

【図5 10穴加工後の工具摩耗状態】

工具	タイプ	入口側	出口側	加工穴数	結果
①M社	超硬ソリッド			10穴OK	バリ小○
②T社	超硬ソリッド			10穴OK	バリ小○
③O社	超硬母材 複合多層 コーティング			10穴OK	バリ小○
④H社	超硬母材 TiSiN系 コーティング オイルホール 付き			10穴OK	バリ小○
⑤O社	ハイス母材 複合多層 コーティング			10穴OK	バリ中△
⑥O社	ハイス母材 TiN系コー ティング			5穴中止	未貫通×
⑦F社	ハイス母材 TiCN系 コーティング			4穴中止	未貫通×

【図 6 10 穴加工後のハステロイ X の加工状態】

3.結 言

本実験により以下のことが明らかになった。

○CFRP 材のトリム加工について

- (1) CFRP 材のトリム加工では、工具寿命や加工品位の観点から、超硬母材のダイヤモンドコーティング工具の使用を推奨する。超硬及び DLC コーティング工具でもトリム加工は可能であるが、直ぐにバリ等が生じる可能性が高い。また、ハイス母材コーティング工具は不適である。
- (2) ダイヤモンドコーティング工具では、一般的にルータータイプは荒加工向け、エンドミルタイプは仕上げ加工向けと言われているが、仕上げ面粗さは明確な差は見られないものもある。また、ダイヤモンドコーティングの膜厚が加工品質に影響する可能性が高いので、出来る限りシャープな切れ刃を有する超微粒・薄膜のダイヤモンドコーティングが良い。
- (3) ねじれ角の大きい工具は表面のバリやデラミネーション（層間剥離）を促進する可能性があるため、工具形状としては、ねじれ角の小さい多刃工具が有効であると考えられる。
- (4) 一概に CFRP 材と言っても多種多様である。工具メーカーが CFRP 加工用と推奨する工具でも、すべての CFRP 材に適するとは限らない。従って、テスト加工等を踏まえて工具選定することが望ましい。

○ハステロイ X の穴加工について

- (1) 工具材質としては、超硬ソリッドまたは超硬母材のコーティング工具の使用を推奨する。また、工具形状としては、シンニングを施したシャープな切れ刃を有する形状が良いと考えられる。
- (2) ハイス母材のコーティング工具は、コーティングの種類により使用可能なものもあるが、一般的には使用不可と判断できる。
- (3) 本実験で使用したセンタースルードリルは、切屑排出性は良かったが工具摩耗の抑制にはあまり効果が認められなかった。標準形状より価格が高い分、使い分けが必要であると考えられる。

参考文献

- (1) 「炭素繊維の最先端技術」 シーエムシー出版
- (2) 「航空機材料」 (社)日本航空技術協会
- (3) 米ヘインズ社ホームページ