

炭素繊維強化プラスチックにおける研削穴あけに関する研究

梶本英嗣*・近藤拓郎*・原隆仁*²

A Study on the Drilling by Grinding in Carbon Fiber Reinforced Plastics

Eiji Sugimoto, Takuro Kondo and Ryuji Hara

本研究では炭素繊維強化プラスチックの安価で高品位な穴あけ加工の実現に向けて、一般砥石を用いた研削加工での穴あけについて検討した。その結果既存 CFRP 用切削工具と比較し研削穴あけ工具は優れた加工品位と同等の加工時間、コスト面での優位性を確認した。

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP）は炭素繊維をエポキシ等の樹脂により含浸硬化させた繊維強化プラスチックである。軽量・高強度な構造部材として注目されており、優れた機械的特性を持つものの、製造にはコストがかかり、性能を優先される航空機や高級車、スポーツ用品等の一部の利用にとどまっている。また CFRP の機械加工における加工性は、すでに様々な検討が行われ¹⁻³⁾、難削材として知られている。特にデラミネーション（層間剥離）やアンカットファイバー（切り残し）等の発生が問題となる。図 1 に CFRP の汎用ドリルでの加工例と不良の一例を示す。これらは CFRP の母材である各種樹脂材に対して、強化材の炭素繊維の強度が著しく高いことと、炭素繊維による激しい工具摩耗が影響している⁴⁻⁶⁾。このため CFRP の機械加工は主にダイヤモンドコーティング工具によって行われている。しかしダイヤモンドコーティング工具は高価であり、コスト高につながっている。図 2 に炭素繊維の直径と刃先の大きさの関係を示す。炭素繊維の直径はおよそ $7\mu\text{m}$ であるが⁷⁾、ダイヤモンドコーティング工具の膜厚は $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度と言われている⁸⁾。このことから切削工具の切り込みを極力薄くしても、細い炭素繊維を大きな刃で加工することになり、適切に切削することは困難であることが予想される。図 3 に CFRP の研削加工イメージを示す。切削加工に対して、研削加工は微細な砥粒による加工であり、切り込みも小さく、CFRP の高品位加工には適していると考えられる。また研削砥石は多刃工具であり工具摩耗の激しい CFRP の加工において、数枚の切れ刃しか有しない切削工具よりも有利であると思われる。しかし CFRP の機械加工に関する研究は切削加工を中心に行われ、研削加工に関連した報告は少ない。柘植らは CFRP の研削穴あけの検討を行い、高品位な穴加工の可能性について示している⁹⁾。有澤らはダイヤモンド砥粒の電着工具を用いた CFRP の高能率加工について報告している¹⁰⁾。そこで本研究では、より安価で高品位な穴加工を、切削工具と同等の加工時間で実現することを目指し、一般砥石の軸付き工具を用いて検討を行った。



(a) 汎用ドリルでの加工例



切り残し (アンカットファイバー) デラミネーション (層間剥離) 浮き・盛り上がり

(b) 不良の一例

図 1 CFRP の汎用ドリルでの加工例と不良の一例

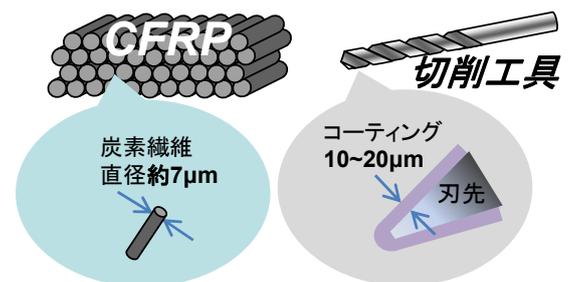


図 2 炭素繊維の直径と刃先の大きさの関係



図 3 CFRP の研削加工イメージ

* 企業支援部加工技術グループ

*2 株式会社テイケン

2. 実験装置及び実験方法

2・1 研削穴あけ実験装置

図4に研削穴あけ実験装置を示す。加工実験は立形マシニングセンタ(日立精機製 VKC-45)を用いて行った。マシニングセンタの主軸にはサイドスルーホルダ(大昭和精機製 BBT40-ONBS13N-165)を固定した。工具はパイプ状の軸付き砥石を使用した。砥石はGC砥石を使用し金属パイプにエポキシ系接着剤で接着した後、ダイヤモンド軸付き砥石により、形状を付加した。サイドスルーホルダに工具を固定し、圧縮空気を供給することで、工具先端からエアブローしつつ加工実験を行った。加工により生じる切り屑は集塵機により常に集塵した。図5にサイドスルーホルダの軸受けの変更概要を示す。サイドスルーホルダは湿式での使用を前提としているため、エアブローによる運用ができない。これは加工液の軸受け部からの漏れを抑えるため滑り軸受けが使用されていることから、エアブローで運用すると発熱し焼き付いてしまうためである。そこで軸受け部からの発熱が無いように、滑り軸受けをベアリングに変更した。図6に軸受けを変更したサイドスルーホルダの温度経過を示す。軸受け変更後、サイドスルーホルダに軸受けに起因する発熱が生じていないことを確認した。加工中に被削材に生じるスラスト力は切削動力計(Kistler 製 Type9257B)により測定した。切削動力計はマシニングセンタのテーブル上に固定し、切削動力計上部に工具径よりも1mm大きい穴をあけたアルミ合金製及びベークライト製のバックプレートを固定、被削材はバックプレート上面に固定した。被削材には板厚3mmの熱硬化性CFRP板(茨木工業製 SC014)を使用した。加工中に切削動力計より出力される信号はチャージアンプ(Kistler 製 5080A)を介してノートPCに保存した。また、加工した穴の直径はビデオプローブ式三次元測定機(OGP 製 Smart Scope ZIP300)で測定した。

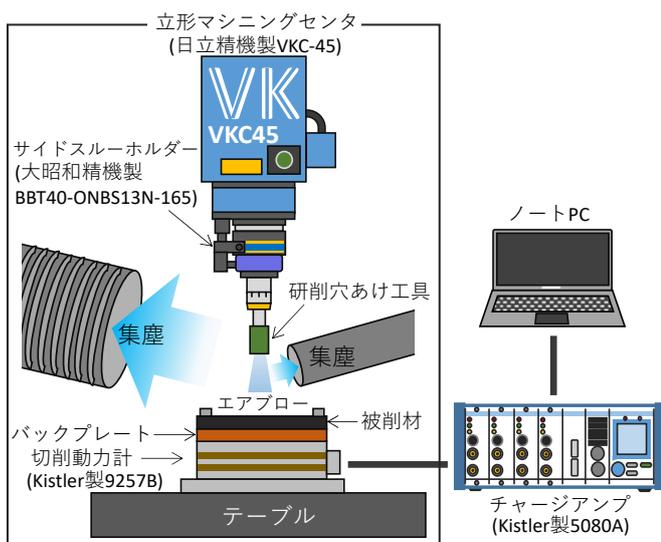


図4 研削穴あけ実験装置

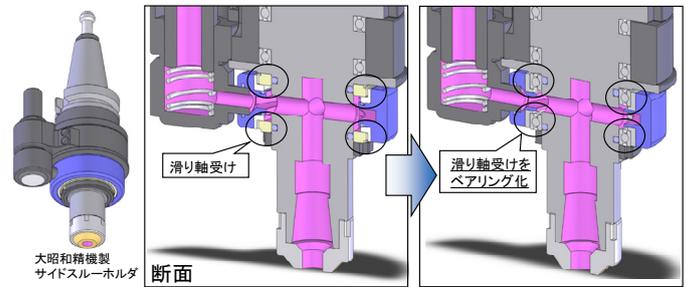


図5 サイドスルーホルダの軸受けの変更概要

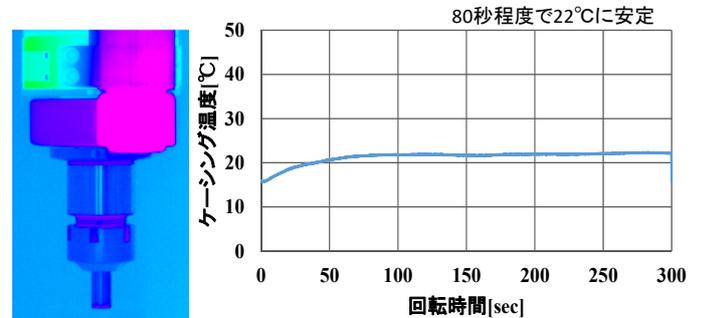


図6 軸受けを変更したサイドスルーホルダの温度経過

2・2 工具先端エア圧力及び流量測定

図7に工具先端エア圧力、流量測定の概要を示す。被削材には加工途中を模擬したドーナツ状の溝をつけた。その溝に工具をはめ込んだ状態で圧縮空気を供給し、加工中のセンタースルーでのエアブローと同じ状況を再現した。圧力計は工具とホルダの間に取り付けることで、工具先端エア圧力として測定した。また水で湿らせた工具を用いることで、工具から微粒化された液滴が飛散するようにし、その様子を高速度ビデオカメラ(フォトロン製 FASTCAM APX RS250k model1)で撮影した。図8に流速測定時の高速度画像の一例を示す。高速度ビデオカメラのフレームレートは15000fpsとした。工具近傍における液滴速度とエアの流速は等しいと仮定し、フレームレートと液滴の移動距離をもとにエアの流速を求めた。そして工具のスリット部を流路とみなし、その最小断面積を流路断面積とし測定した流速からエアの流量を算出した。

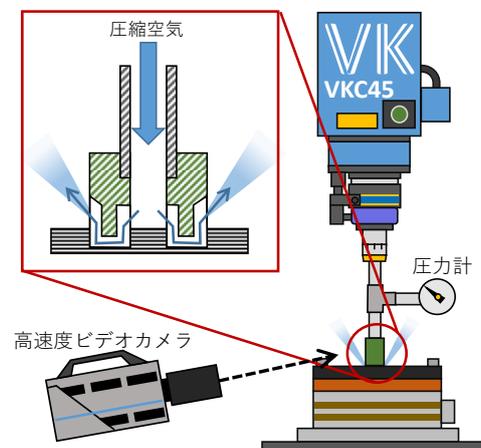


図7 工具先端エア圧力、流速測定の概要

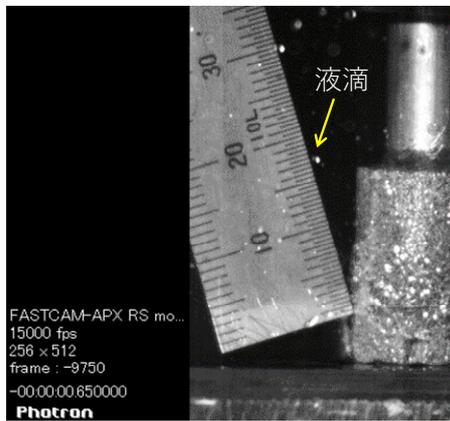


図8 流速測定時の高速度画像の一例

3. 実験結果及び考察

3・1 スラスト力低減に効果のある要因調査

CFRPの穴あけにおいてデラミネーションやアンカットファイバー等の発生を抑えるには加工中に軸方向に生じるスラスト力を低減することが重要である¹¹⁻¹²⁾。そこで工具形状の検討を行うにあたり、スラスト力低減に効果のある要因について調査を行った。基本形状の工具を基準とし、砥石の多孔質化、スリットの付加、砥石の粒度、先端角の影響について検討を行った。砥石の多孔質化については基本形状の工具と同じ形状で、多数の気孔を有する砥石を使用した工具（以下多孔質工具）を使用した。スリットの付加については基本形状の工具の内径部から底面、外径部にかけて連続するスリットを付加した工具（以下スリット工具）を使用した。図9に要因調査の際の加工条件を示す。要因調査の際の加工条件はどの条件においても適切に加工ができるように設定した。主軸回転数は4000rpm、主軸送り速度50mm/minとした。切り屑による目詰まりを防ぐ目的で、50 μ m切り込んだ後、スタート地点に戻り再度50 μ m切り込むことを繰り返すステップ加工を行った。また切り屑を除去するため工具先端よりエアブローを行った。図10に研削穴あけを行った穴の例を示す。デラミネーションやアンカットファイバー等もなく非常に優れた加工品位であると言える。

図11に基本形状におけるスラスト力を示す。基本形状における加工中のスラスト力は最大でおよそ700Nであった。図12に多孔質工具におけるスラスト力を示す。多孔質工具におけるスラスト力は最大でおよそ500Nであり、基本形状よりも低減できることが分かった。

図13にスリット工具におけるスラスト力を示す。スリット工具におけるスラスト力は最大でおよそ350Nであり、多孔質工具よりもさらに低減した。多孔質工具及びスリット工具を用いることでスラスト力を低減できることが分かる。これは切り屑の排出性が向上したことで、目詰まりを低減できたことによる効果であると思われる。特にスリット工具は、スラスト力を大きく低減でき、またスリット本数により切り屑排出性を制御しやすいため有効であると言える。

図14に各粒度におけるスラスト力を示す。粒度120と粒

度60を比較した結果、貫通までの毎ステップにおける最大値の平均値は粒度120で363.5N、粒度60で360.6Nであり、顕著な差は確認できなかった。

図15に先端角を付加した際のスラスト力を示す。先端角を付加することにより、基本形状の工具よりも深く工具を切り込む必要があるため、加工時間が長くなることが分かる。またスラスト力は加工開始から増加していき、途中で減少に転じる傾向を示した。これは先端角を付加したことで工具と被削材の接触面積が切り込み深さに応じて変化するためである。先端角により貫通時のスラスト力を低減できるため、デラミネーションの低減に有効であると言える。

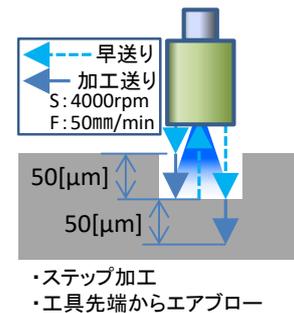


図9 要因調査の際の加工条件

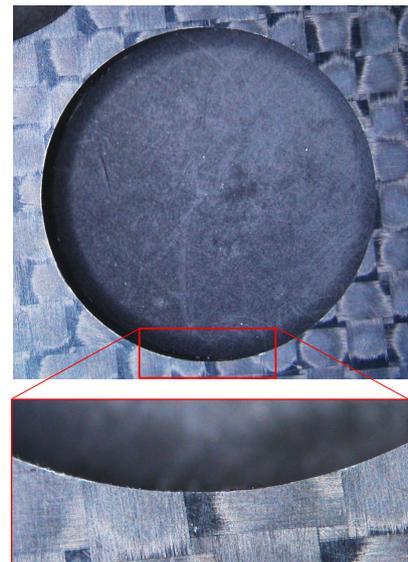


図10 研削穴あけを行った穴の例

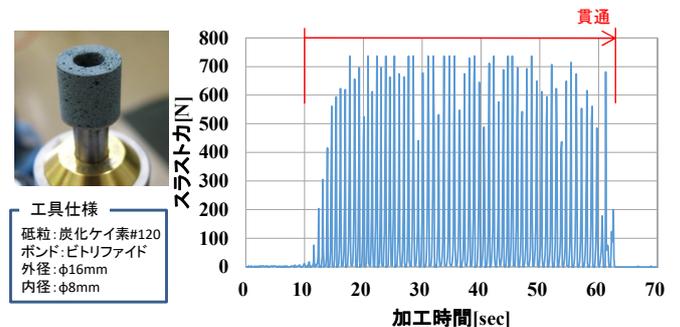


図11 基本形状におけるスラスト力

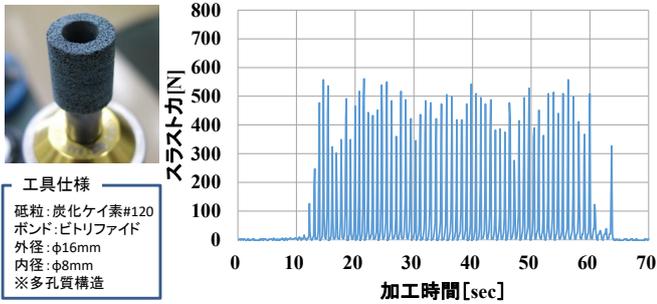


図 12 多孔質工具におけるスラスト力

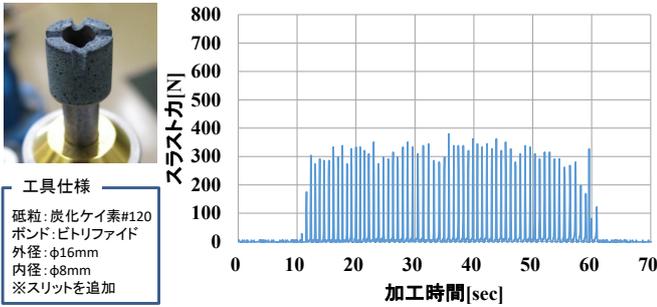
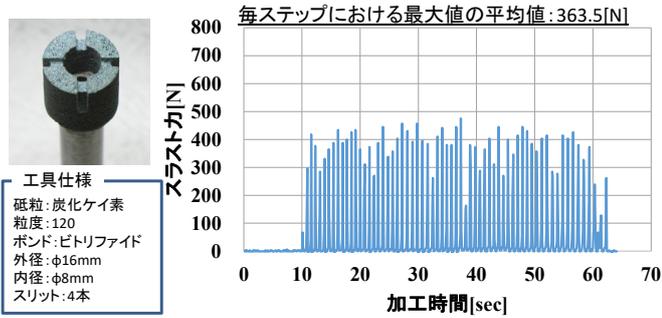


図 13 スリット工具におけるスラスト力



(a) 粒度 120



(b) 粒度 60

図 14 各粒度におけるスラスト力

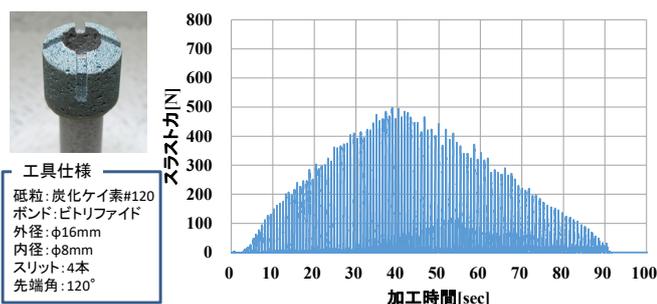


図 15 先端角を付加した際のスラスト力

3・2 スリット本数及び供給エアについての検討

研削穴あけにおいて適切なスリット本数を調査するため、2本から8本の各種スリット工具を作製した。図16にスリット本数検討用工具を示す。切り屑排出性はスリット本数の他に、供給するエアの影響も受けることが予想される。そこで、各種スリット工具において、加工時を模擬した工具先端エア圧力及び流量測定を行った。そして各スリット工具において、工具先端エア圧力とエア流量の加工品位との関係性を調査した。表1に各スリット工具の入口及び出口の品位を示す。工具先端エア圧力が強すぎる場合、出口側にデラミネーションが発生する傾向を示した。また逆に弱すぎると入口側に樹脂の浮きが発生する傾向であった。出口側のデラミネーションはエア圧力が高すぎ、貫通する直前に板厚の薄くなった被削材をエアの圧力によって押し抜いたことで生じたと思われる。入口側の浮きは、切り屑排出性の低下及び冷却効果の低下に伴う加工熱による樹脂の劣化が原因と思われる。

図17に各スリット工具のエア圧力と流量における加工品位の関係を示す。加工品位の良はデラミネーションやアンカットファイバー等の不良が一切無い状態、可は同じく不良はないが良より若干劣る状態、不可は穴の入口側、もしくは出口側一方に一部不良が見られた状態、悪は穴の入口側、出口側両方に不良が見られた、もしくは工具が破損した状態である。本実験において良好な加工品位を示したのは青い破線で囲った領域となった。特にスリット2本のエア圧力0.05MPa、スリット6本のエア圧力0.02MPaが良好な結果を示した。スリット本数が多くなると良好な結果を得られるエア圧は低くなるが、これは流路が増えることで、より低圧でも流量を確保しやすくなることと、切り屑の通り道が増えることでより効率良く切り屑排出が促されるためであると思われる。砥石強度を向上すれば8本以上のスリットも実現できる可能性は残されているものの、現状では6本スリットが妥当であると思われる。

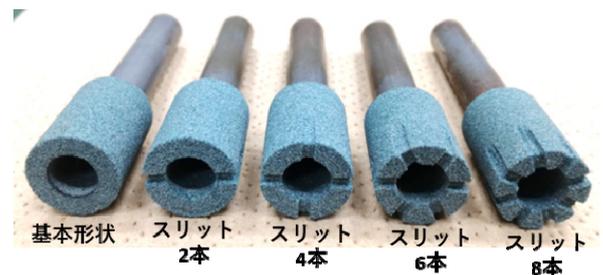


図 16 スリット本数検討用工具

表 1 各スリット工具の入口及び出口の品位

		工具先端エア圧力[MPa]			
		0.01	0.02	0.05	0.10
スリット2本	入口	浮き	浮き	◎	◎
	出口	◎	◎	◎	デラミ
スリット4本	入口	荒れ	◎	◎	◎
	出口	デラミ 切り残し	◎	◎	デラミ
スリット6本	入口	浮き	◎	◎	◎
	出口	◎	◎	微デラミ	デラミ
スリット8本	入口	工具破損	工具破損	工具破損	荒れ
	出口				デラミ 切り残し

◎:良 (不良が一切ない状態) ○:可 (不良は無いが良よりも若干劣る) 荒れ: 多数の不良あり
 デラミ: デラミネーションあり 浮き: 樹脂の盛り上がりあり 切り残し: アンカットファイバーあり

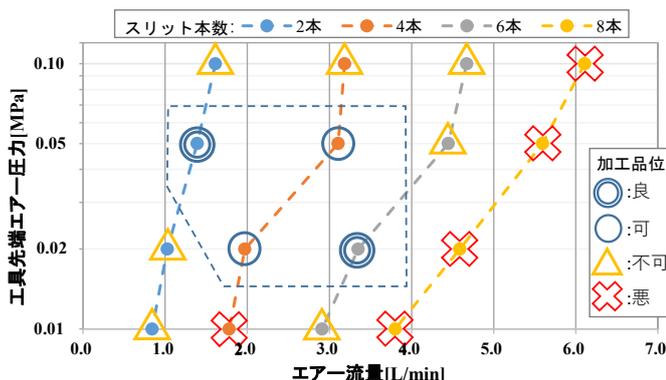
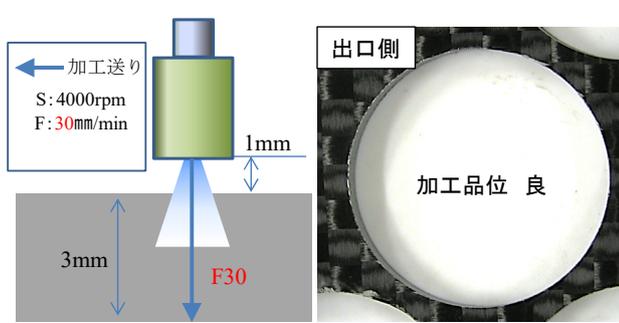


図 17 各スリット工具のエア圧力と流量における加工品位の関係

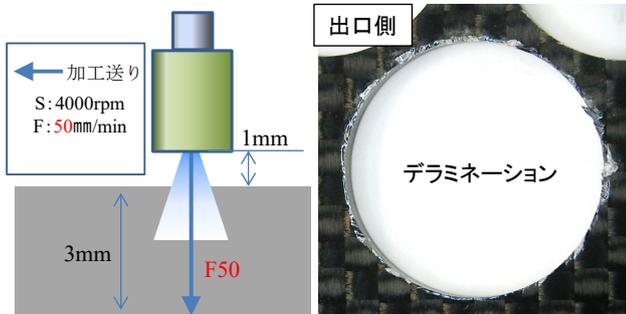
3・3 加工条件による加工時間短縮への検討

ステップ加工による研削穴あけは良好な加工品位を実現できるものの、1穴あたり50秒程度の時間を要する。これは既存CFRP用切削工具の加工時間7.2秒に対して非常に遅いものである。そこで、加工条件を検討し、研削穴あけの高速化を検討した。図18に各加工条件と出口品位を示す。図18(a)について、ステップ加工を行わず送り速度30mm/minによる1パス加工を行った。その結果良好な加工品位を得られた。これはスリット等の検討により切り屑排出性を向上できたことによる結果であると言える。しかし図18(b)で示すように送り速度を50mm/minに上げるとデラミネーションが発生した。そこで図18(c)で示すように加工開始から2.5mmまでをより高速な送り速度100mm/minで、残りの0.5mmを送り速度25mm/minで加工したところ、良好な加工品位が得られた。さらに図18(d)で示すように送り速度100mm/minの切り込み深さを0.2mm増やし2.7mm(残り量0.3mmまで)を高速で加工したが、この条件ではデラミネーションが発生した。図19に各加工条件における品位と被削材の層との関係を示す。被削材として使用したCFRP板は13層で構成され、1層あたりの厚みは0.2~0.3mmである。上記4条件の結果からデラミネーションが発生したのは出口側の2層に相当する0.5mmを高速で加工した場合である。CFRPの各層と各層は樹脂の強度のみで保持されており、板厚が薄くなるとスラスト力に耐えられず、層間の樹脂が破断しデラミネーションが発生する。つまり出口側2層分を加工する際は送り速度を落としスラスト力を極力かけないように加工する必要があることが分かる。一方で本被削材においては加工開始から11層は板厚があり、スラスト力を多少かけても問題ないため、高速で切り込むことが可能であることが分かった。よって加工開始から出口側3層目までを高速で切り込み、出口側2層(0.5mm)を低速で加工することで加工品位を維持したまま加工時間の短縮が行えることが分かった。

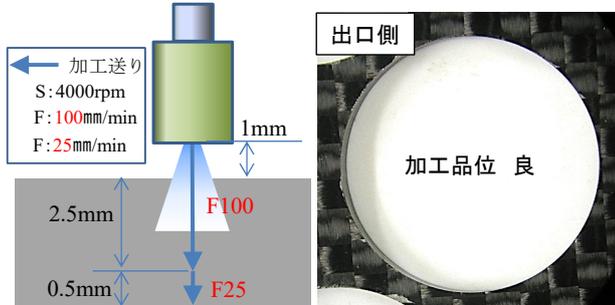
図20に形状を検討した研削穴あけ工具と加工条件を示す。過去の検討結果をもとに形状を検討した研削穴あけ工具を作製した。内径を拡大し除去体積を低減し、スリットは6本とした。また先端角により出口側のスラスト力を極力低減することを狙った。加工条件は加工開始から2.5mmを高速で、出口側0.5mmを低速で加工するようにした。図21に形状を検討した研削穴あけ工具のスラスト力を示す。スラスト力は最大で100Nであり、加工時間は6.6秒であった。スラスト力は基本形状の工具のおよそ1/7、加工時間も50秒から6.6秒へと大幅に改善できた。また、スラスト力は加工開始から緩やかに増加し、出口に向かい低減していくため、CFRPの加工にとって理想的なスラスト力の変化を得られた。



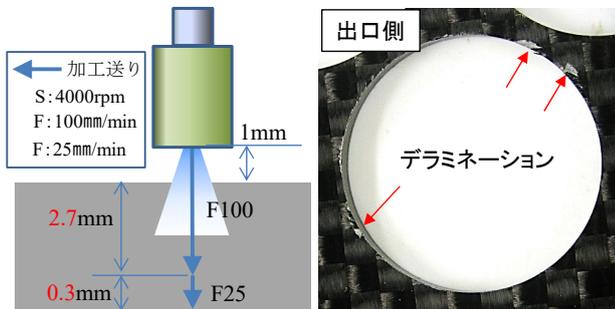
(a) 1パス加工 F30



(b) 1パス加工 F50



(c) 1パス加工F100(2.5mm)→F25(0.5mm)



(d) 1パス加工F100(2.7mm)→F25(0.3mm)

図 18 各加工条件と出口品位

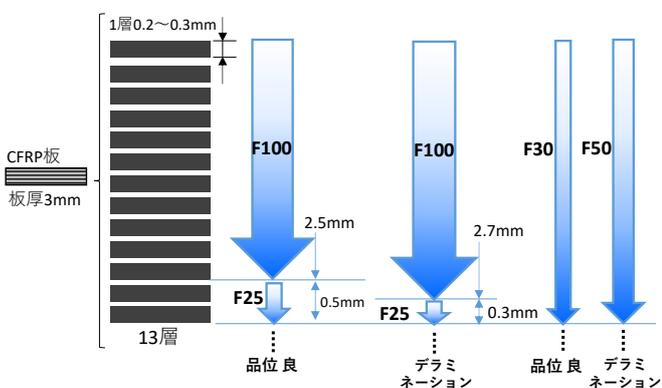


図 19 各加工条件における品位と被削材の層との関係



図 20 形状を検討した研削穴あけ工具と加工条件

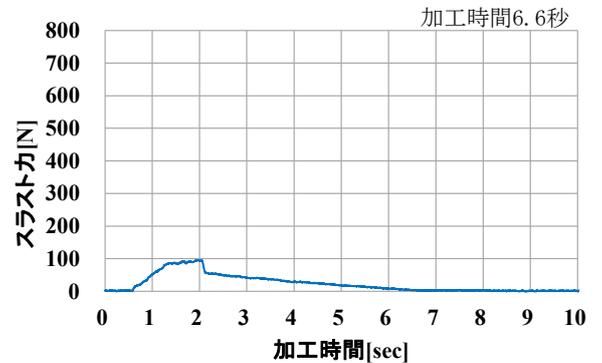


図 21 形状を検討した研削穴あけ工具のスラスト力

3・4 研削穴あけ工具の加工コストの試算

研削穴あけ工具の加工コストを試算するため、研削穴あけ工具の摩耗試験を行った。また比較対象として既存 CFRP 用切削工具でも同様の試験を行った。図 22 に既存 CFRP 用工具と加工条件を示す。使用した工具は直径 9.55mm の超硬合金にダイヤモンドコーティングを施した切削工具である。加工条件は工具メーカーの推奨条件とし、回転数 2000rpm、送り速度 200mm/min とした。また工具の先端角が段階的に変化する特徴的な形状のため、通常のドリルよりも深く切り込む必要があり、工具先端が被削材底面から 20mm に達するまで切り込むようにした。図 23 に既存 CFRP 工具で加工した穴の状態を示す。大規模なデラミネーションは最後まで発生しなかったが、比較的初期から大きなアンカットファイバーが頻発した。図 24 に既存 CFRP 工具の穴直径の推移を示す。加工初期からしばらく穴直径が多少変動するものの、1500 穴の加工が行えた。アンカットファイバーが頻発するものの素晴らしい耐摩耗性があることが分かった。図 25 に摩耗試験用研削穴あけ工具と加工条件を示す。既存 CFRP 用切削工具と比較できるようにほぼ同じ直径である直径 10mm の研削穴あけ工具を作製した。スリットは 6 本では工具強度が不足するため 4 本とした。加工条件は過去の検討結果を参考にしつつ直径に合わせて周速を落とし回転数 6400rpm とした。図 26 に摩耗試験用研削穴あけ工具で加工した穴の状態を示す。まれに小さなアンカットファイバーが生じる場合があったが終始優れた品位であった。図 27 に研削穴あけ工具の穴直径の推移を示す。加工初期は初期摩耗と思われる穴直径の減少がみられるものの、変動は少なく典型的な摩耗曲線を描いているように思われる。110 穴目で工具が破損したが、定常摩耗と思われる状態から突然破損していることから、工具摩耗により少しずつ増加す

る研削抵抗に砥石が耐えられなくなり破断したと思われる。図 28 に研削穴あけ工具及び既存 CFRP 用工具の加工可能数を示す。初期摩耗が終了したと思われる状態から穴の許容誤差として $50\mu\text{m}$ の範囲に収まる加工数を加工可能数とした。その結果それぞれの加工可能数は研削穴あけ工具でおおよそ 50 穴、既存 CFRP 用工具でおおよそ 700 穴であった。また研削穴あけ工具は 1 本 1000 円程度で作製できるのに対し、既存 CFRP 用工具は 1 本 58,000 円である。このことをもとにそれぞれの 1 穴あたりの加工コストを試算すると、既存 CFRP 用工具は 82.8 円/穴、研削穴あけ工具は 20 円/穴であり、加工コストにおいて研削穴あけ工具は既存 CFRP 工具より優れる結果となった。研削穴あけ工具の穴精度は安定しているものの、現状では摩耗が早く進行するため、加工現場では頻繁な工具交換を強いられることになり現実的ではない。しかし砥石の材質を検討するなど工具摩耗を低減できる可能性はまだ多く残されており、CFRP において研削穴あけは有効であると思われる。

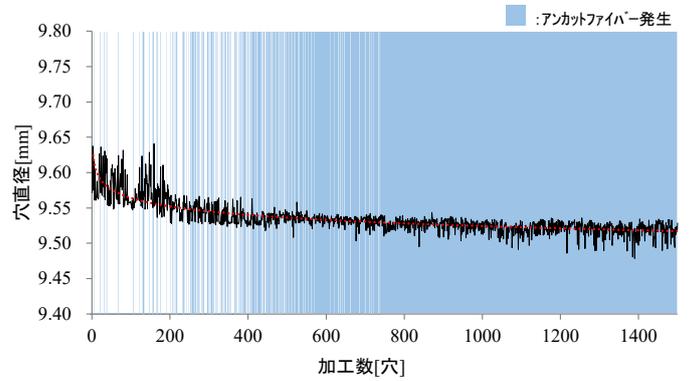


図 24 既存 CFRP 工具の穴直径の推移

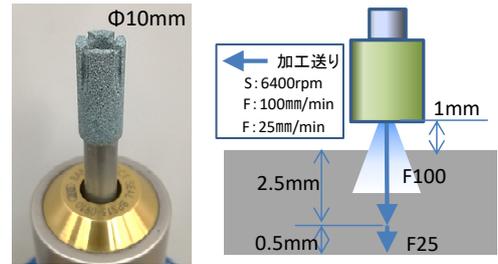


図 25 摩耗試験用研削穴あけ工具と加工条件

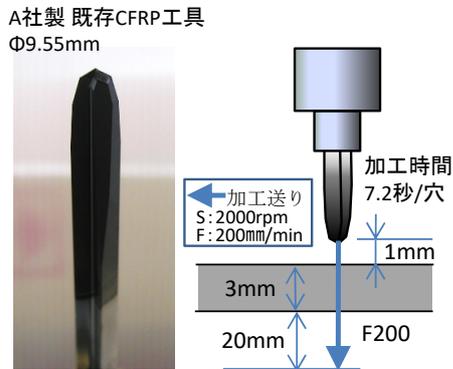


図 22 既存 CFRP 用切削工具と加工条件

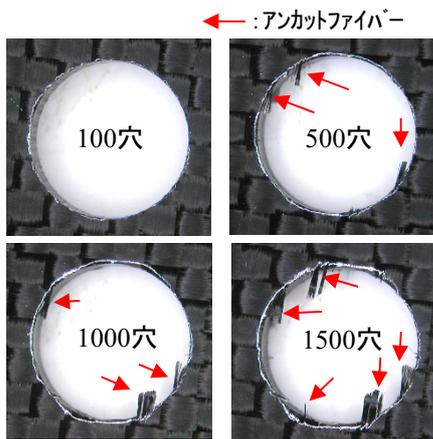


図 23 既存 CFRP 工具で加工した穴の状態

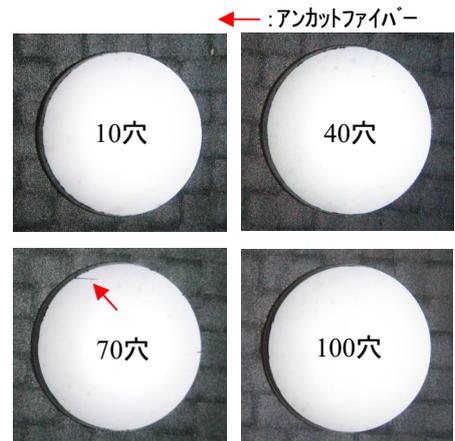


図 26 摩耗試験用研削穴あけ工具で加工した穴の状態

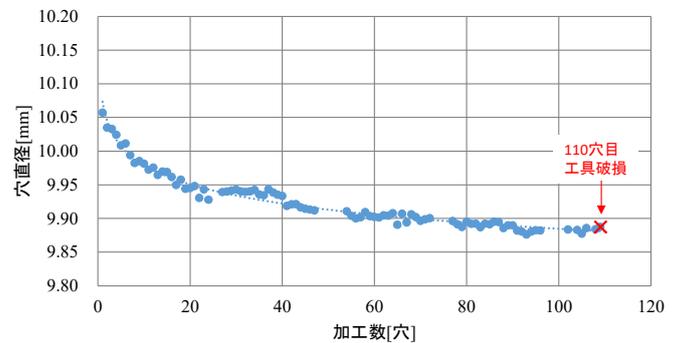


図 27 研削穴あけ工具の穴直径の推移

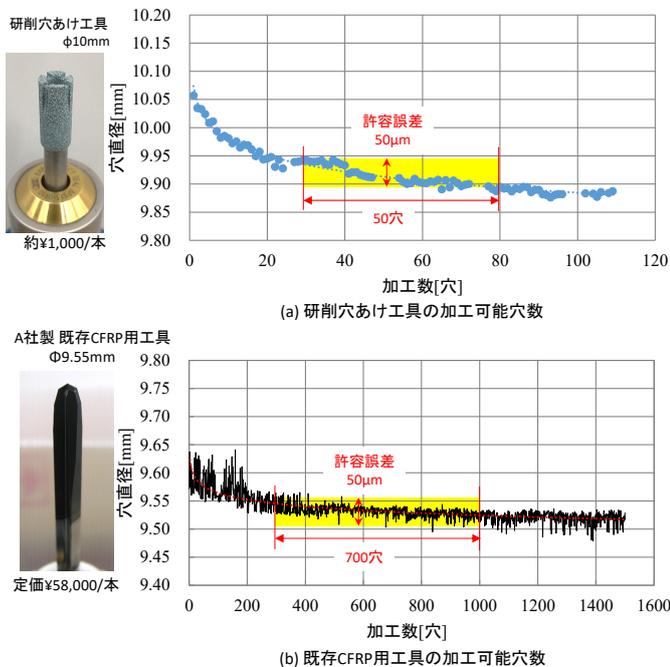


図 28 研削穴あけ工具及び既存 CFRP 用工具の加工可能数

4. 結 言

本研究では炭素繊維強化プラスチックの安価で高品位な穴あけ加工の実現に向けて、一般砥石を用いた研削加工での穴あけについて検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 砥石の多孔質化及びスリットの付加,先端角の付加は研削穴あけのスラスト力低減に効果がある。特にスリットの付加による低減効果が大きい。
- 2) 付加するスリットの本数は6本が妥当である。その際の工具先端エア圧力は0.02MPa程度が適している。またエア圧力は強すぎると出口側にデラミネーションが発生し、弱すぎると入口側に樹脂の盛り上がりが発生する。
- 3) 加工開始から出口側3層目までを高速で切り込み,出口側2層(0.5mm)を低速で加工することで加工品位を維持したまま加工時間の短縮が行える。
- 4) 形状検討の結果得られた研削穴あけ工具を用いて加工した結果,最大スラスト力100N,加工時間6.6秒を実現した。基本形状の工具と比較しスラスト力はおおよそ1/7,加工時間は50秒から6.6秒へ大幅に改善できた。また既存CFRP用工具の加工時間は7.2秒であり,研削穴あけ工具で同等の加工時間を実現できた。

- 5) 1穴あたりの加工コストを試算したところ,既存CFRP用工具は82.8円/穴,研削穴あけ工具は20円/穴であり,加工コストにおいて研削穴あけ工具は既存CFRP工具より優れる結果となった。
- 6) 研削穴あけ工具は既存CFRP用工具と比較し優れた加工品位と同等の加工時間,コスト面での優位性を確認した。

参考文献

- 1) 金枝敏明,高橋正行,CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の切削機構に関する研究(第1報),精密工学会誌 p.1456-1461(1989)
- 2) 金枝敏明,高橋正行,CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の切削機構に関する研究(第2報),精密工学会誌 p.1058-1063(1990)
- 3) 金枝敏明,CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の切削機構に関する研究(第3報),精密工学会誌 p.491-496(1991)
- 4) 柳下福蔵,CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の切削加工, p.14(2014)
- 5) 佐久間敬三,横尾嘉道,瀬戸雅文,強化プラスチック(GFRP・CFRP)の穴あけに関する研究,日本機械学会論文集中(C編)49巻446号,p.1799-1807(1983-10)
- 6) 山崎訳,機械と工具(米国MTTFプロジェクト報告),25-1(1981)
- 7) 村上陽太郎 炭素繊維の製法,構造及び性質(財)大阪科学研究技術センター附属ニューマテリアルセンター, NMC ニュース No. 37, (2005-4)
- 8) 羽生博之,小田木寛,村上良彦,神谷庄司,坂真澄,刃先形状の最適化による高性能ダイヤモンドコーティングドリルの開発,精密工学会誌,Vol. 68, No. 3, p.415-419(2002)
- 9) 柘植英明,小川大介,佐藤丈士,岐阜県工業技術研究所研究報告 No. 1, p.20-23(2013).
- 10) 有澤秀彰,赤間知,仁井谷春彦,三菱重工技法 Vol. 49 No. 3, 4-10(2012).
- 11) 柳下福蔵,CFRPの切削加工,精密工学会誌,Vol. 82, No. 4p.340-345(2016)
- 12) CFRPドリル貫通過程における工具送り速度と層間剥離抑制,田村昌一,近藤弘康,中野佑一,松村隆,2014年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, p.317-p318(2014)