

熱可塑性炭素繊維強化プラスチックにおける機械加工に関する研究

近藤拓郎*・梶本英嗣*

Study on Machining of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics Takuro Kondo and Eiji Sugimoto

本研究は熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRTP)の機械加工(研削穴開け加工, 切削穴開け加工)において, 加工点近傍の被削材温度を高速赤外線サーモグラフィにより測定し, 加工時の温度上昇に作用する要因について検討した。その結果, 研削穴開け加工では加工熱を冷却することが難しく適切に加工することが困難であること, 切削穴開け加工では送り速度を上げ工具先端角度を鈍角にすることで被削材温度上昇を抑制し加工品位を改善出来る可能性があることを確認した。

1. 緒言

CFRTP は炭素繊維複合材料の一つで, 軽量・高強度・高剛性といった優れた特徴を有し金属に代わる機械材料として注目されている。航空機やスポーツ用途等に多く採用されている熱硬化性炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP)が高温で硬化する熱硬化性樹脂をマトリクス材料として用いているのに対し, CFRTP は低温で硬化し高温で軟化する熱可塑性樹脂をマトリクス材料として用いている¹⁾。熱可塑性樹脂を用いることで CFRTP は CFRP に対し量産性やリサイクル性に優れ, 特に自動車産業での用途拡大が期待されている²⁾。しかしながら CFRTP の機械加工は, CFRP の機械加工と同様に層間剥離(以下、デラミネーション)や工具摩耗の激しさといった問題に加え, 加工熱による影響で品位が悪化するという熱可塑性樹脂の性質上の問題がある³⁾。このような加工熱の影響も含め, CFRTP の機械加工については未だ十分な検討がなされていないのが現状である。そこで本研究では, CFRTP において研削穴開け加工と切削穴開け加工の可能性と加工条件と加工熱との関係について検討した。

2. 冷却下での穴開け加工

CFRP は, 研削穴開け加工で高品位に加工出来るとされている^{4, 5)}。一方で CFRTP はマトリクス樹脂の性質上, 加工品に対して加工熱による悪影響が懸念される。そこで本実験では, 冷風または液体窒素による冷却下で研削工具とドリルを用いて加工実験を行い, 研削加工と切削加工の可能性を検討した。

2・1 実験装置及び実験方法

図1に冷却加工実験装置を示す。表1に実験に使用した各機器の仕様を示す。冷却加工実験装置は立形マシニングセンタ上に設置した。被削材は, 断熱処理したバットをステージ上に固定し, バットの中にスペーサーで底上げした状態で固定した。冷却方法は, 冷風と液体窒素の2種類の方法で, 加工方法は当て板無しの穴開け加工を行った。冷風による加工は砥石工具で実施し, 液体窒素による液中加

工は砥石工具とドリルで実施した。冷風による冷却方法は, -10℃の冷風を冷風器によって発生させてセンタースルーホルダーに供給し, 工具先端からの吹き付け加工とした。液体窒素による冷却方法は, 加工点が液体窒素中になるようにバットを液体窒素で満たし, 液中加工とした。表2に冷却下での穴開け加工の加工条件を示す。

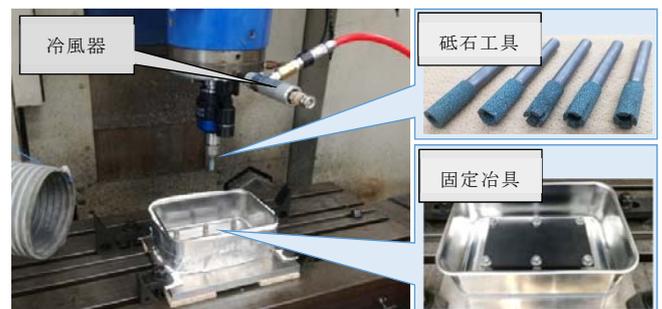


図1 冷却加工実験装置

表1 冷却加工実験装置の仕様

加工機	立形マシニングセンタ (株)牧野フライス製作所 FNC74-20A
被削材	CFRTP 樹脂:PA6 炭素繊維:3K 平織 板厚:4mm
砥石工具	中空軸付き砥石(内製品) 外径:10mm 内径:5mm 砥粒:炭化ケイ素 ボンド:ビトリファイド 切り屑排出用スリット有
ドリル	NACHI ストレートシャンクドリル (株)不二越 直径:10mm 材質:HSS 被膜:四酸化被膜 工具先端角度:118°
冷風器	TOHIN エアークーラー 東浜工業(株) AC-60
ホルダー	ハイジェットホルダー 大昭和精機(株) BBT40-ONBS13N-165

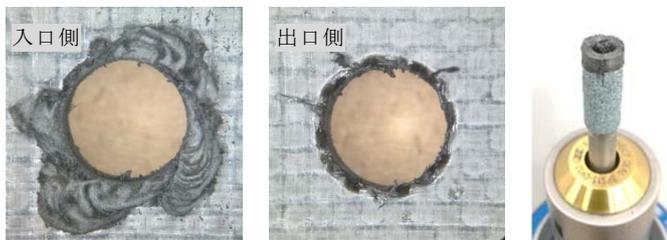
* 企業支援部加工技術グループ

表2 冷却下での穴開け加工の加工条件

	研削加工	切削加工
工具	砥石工具	ドリル
主軸回転数[rpm]	6,400	640
送り速度[mm/min]	100	110
クーラント (冷風)	方式:吹き付け 温度:-10℃	-
クーラント (液体窒素)	方式:液中 温度:-196℃	

2・2 実験結果

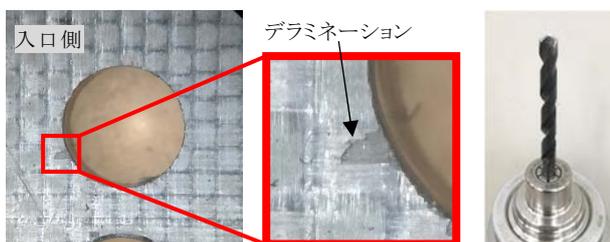
図2に各冷却条件における加工穴の状態を示す。研削穴開け加工では、冷風の吹き付けと液体窒素中のどちらの冷却方法でも樹脂の軟化を抑制することが出来ず、良好に加工することは出来なかった。特に入口側に再硬化した付着物が多く確認された。また砥石工具については、軟化した樹脂により目詰まりを起こし1穴の加工で使用不能となった。一方、液体窒素中での切削穴開け加工では、研削穴開け加工で見られた軟化の形跡は見られなかったが、入口側にデラミネーションが確認された。



a) 冷風の吹き付けによる研削穴開け加工



b) 液体窒素中での研削穴開け加工



c) 液体窒素中での切削穴開け加工

図2 各冷却条件における穴の状態

3. 切削穴開け加工での加工条件と加工熱

CFRTPの穴開け加工は、超合金工具またはダイヤモンド工具を用いることが推奨されており⁶⁾、CFRTP専用の工具も市販されている。高品位な穴開け加工には、工具の形状や耐摩耗性が重要であるが、熱による影響を低減することで更に加工品位を改善出来る可能性がある。そこで本実

験では、工具の摩耗状態や送り速度、工具先端角度等の条件を変更することで加工時に発生する加工熱やスラスト力を変化させ、加工条件による影響を確認し加工条件と加工熱との関係について検討した。

3・1 実験装置及び実験方法

図3に温度・スラスト力測定実験装置の構成を、表3に実験に使用した各機器の仕様を示す。切削動力計を立形マシニングセンタのステージ上に固定し、その上に被削材固定治具を取り付けて被削材を固定した。被削材最高温度は、高速度赤外線サーモグラフィを用いて測定した。また、ドリルが貫通した際の被削材出口側の温度を測定出来るように、被削材下部に鏡面処理を施した金属板を設置した。

加工方法は、ドリルによる当て板無し穴開け加工とした。ドリルは、工具研磨機で工具先端角度の調整・研磨をした研磨ドリルと、事前に25穴のCFRTP穴開け加工を行い摩耗させた摩耗ドリルの2種類を使用した。図4に研磨ドリルの外観を示す。また、図5に研磨ドリルと摩耗ドリルの切れ刃の状態を示す。表4に切削加工条件を示す。切削加工条件は、16種類の条件で実施し、切削加工中の温度とスラスト力を測定した。加工温度は、ドリル出口の被削材の最高温度を高速度赤外線サーモグラフィで測定し、その温度で評価することとした。図6に加工温度の測定箇所を示す。測定箇所は、高速度赤外線サーモグラフィで撮影した熱画像において被削材の穴の縁から約0.5mmの位置とした。

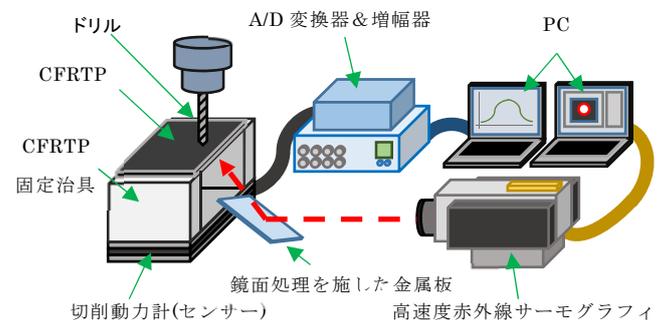


図3 温度・スラスト力測定実験装置の構成

表3 温度・スラスト力測定実験装置の仕様

加工機	立形マシニングセンタ (株)牧野フライス製作所 FNC74-20A
被削材	CFRTP 樹脂:PA6 炭素繊維:3K平織 板厚:4mm
ドリル	NACHI ストレートシャンクドリル (株)不二越 直径:10mm 材質:HSS 被膜:四酸化被膜
切削動力計	KISTLER 9257A
高速度赤外線サーモグラフィ	Telops FAST-IR 2K
ドリル研磨機	VERTEX VDG-13A

3・2 実験結果



図4 工具先端角度を調整したドリルの外観

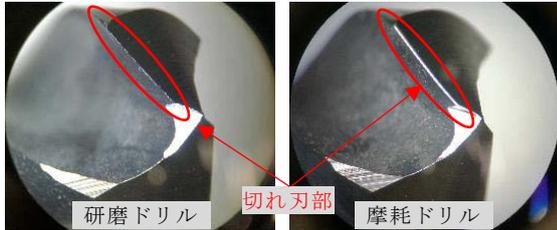


図5 研磨ドリルと摩耗ドリルの切れ刃の状態

表4 加工条件

条件 No	クーラント	当て板	回転速度 [rpm]	工具状態	送り速度 [mm/min]	工具先端角度 [°]
1	無し	無し	640	研磨	110	90
2						100
3						118
4						130
5						140
6					220	90
7						100
8						118
9						130
10						140
11					330	90
12						100
13						118
14						130
15						140
16				摩耗	110	118

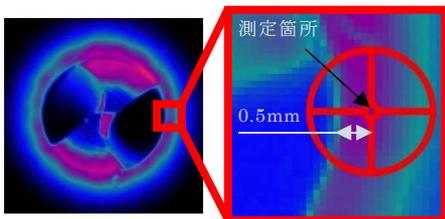


図6 加工温度の測定箇所

図7に工具先端角度 118° における各送り速度の被削材最高温度を示す。送り速度を速くすることで被削材最高温度が低減される傾向が確認された。最も温度の低い送り速度 330mm/min の最高温度は 61.3℃で、送り速度 110mm/min の最高温度と比較して 37.7℃低い結果であった。

図8に送り速度 330mm/min における各工具先端角度の被削材最高温度を示す。工具先端角度を鈍角にすることで被削材最高温度が低減される傾向が確認された。最も温度の低い工具先端角度 140° の最高温度は 40.2℃で、工具先端角度 90° の最高温度と比較し 28.8℃低い結果であった。

図9に各工具先端角度及び各送り速度における被削材最高温度を示す。図9からも被削材最高温度は送り速度が速く工具先端角度が鈍角である方が低くなる傾向にあることが分かる。

図10に各工具先端角度及び各送り速度における加工品位を示す。加工した穴の周囲に発生したバリや切り残しは、送り速度が遅く工具先端角度が鋭角な条件に多く発生する傾向が確認された。摩耗ドリルによる加工品位は、全16条件の中で最も粗悪であった。

図11に工具先端角度 118° 送り速度 100mm/min における研磨ドリルと摩耗ドリルの被削材最高温度を示す。被削材最高温度は、研磨ドリルで 99.0℃、摩耗ドリルで 97.4℃であった。両結果の最高温度に差がみられなかった要因は、100℃付近でマトリクス樹脂の軟化に伴う熱の吸収があるためと推測される。

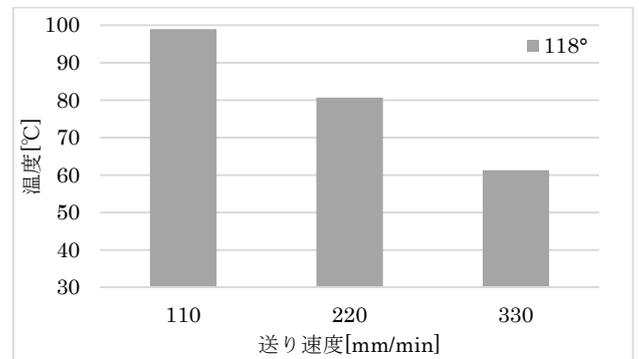


図7 工具先端角度118° における各送り速度の被削材最高温度

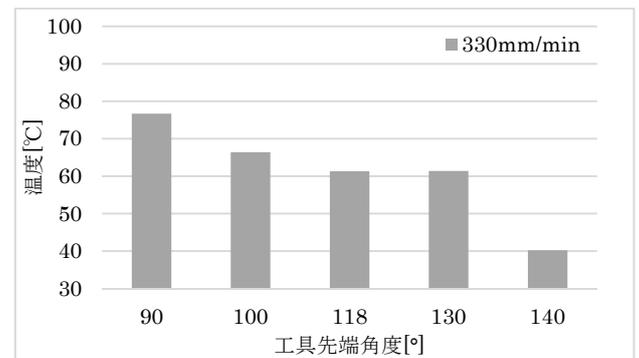


図8 送り速度330mm/min における各工具先端角度の被削材最高温度

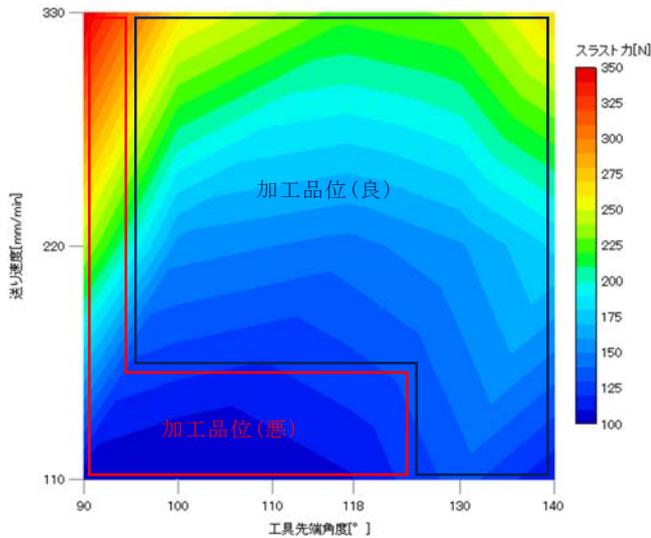


図14 各工具先端角度及び各送り速度における最大スラスト力

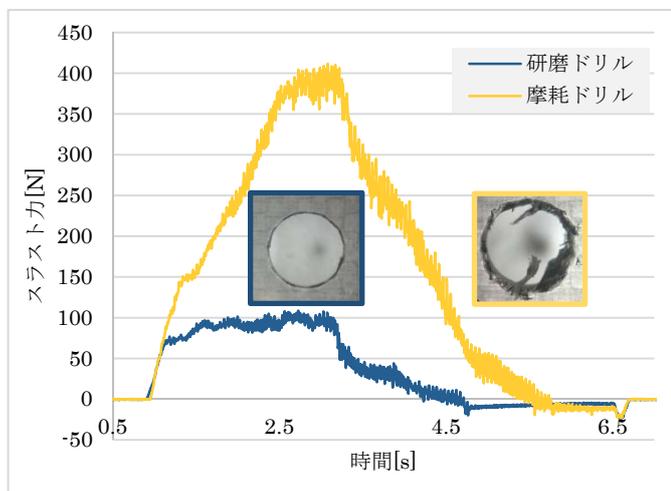


図15 工具先端角度118° 送り速度100mm/minにおける研磨ドリルと摩耗ドリルのスラスト力の時間経過

4. 考 察

CFRTP の研削穴開け加工において、液体窒素を用いて冷却しても、樹脂の軟化を防ぐことが出来なかった。これは加工点で発生した加工熱で液体窒素が気化し、加工点に直接液体窒素が届かなかった可能性が考えられ、CFRTP の研削穴開け加工時の加工熱を冷却することの難しさを示すものであった。よってCFRTPを研削穴開け加工することは困難であると思われる。また、同様に液体窒素を用いて切削加工を行った場合、デラミネーションが発生した。このことから、切削加工においては過剰な冷却は弊害を生じる可能性があると言え、切削加工では加工に適した温度が存在すると思われる。

CFRTP の切削穴開け加工については、スラスト力の低減よりも、被削材の温度上昇を抑制することで品位が向上することが分かった。被削材の温度上昇抑制には、送り速度の高速化と工具先端角度の鈍角化が効果的である。送り速度の高速化は、工具と被削材が摩擦する時間を軽減するた

め、被削材の温度上昇が抑えられるものと推測される。

工具先端角度の鈍角化による被削材の温度上昇抑制効果は、工具の外周部切れ刃形状にあると推測する。図16に工具先端角度の違いによる切れ刃の形状の変化を示す。通常のねじれ刃の切れ刃の形状は、工具先端角度を鋭角から鈍角に変えることにより、凸の弓なり形状から凹の弓なり形状に変化する⁷⁾。図17にドリル外周部における刃の進入角度を示す。工具先端角度が鋭角の場合、切れ刃の外周側は被削材に対し負の進入角度で接触するのに対し、工具先端角度が鈍角の場合は正の進入角度で接触することが分かる。今回の実験では、工具先端角度は鈍角の方が良い結果が得られた。これは、工具先端角度を鈍角化することで正の進入角度で被削材に切れ刃が進入し、切れ味の良い良好な品位の加工が出来たものと推測される。

スラスト力については、従来 CFRP において工具先端角度を鋭角化しスラスト力を低減することが加工品位向上に有効である⁸⁾とされていた。しかし本実験で被削材として用いた CFRTP においては、工具先端角度を鈍角にさせ、スラスト力が大きい状態で加工した方が良い結果が得られた。これは熱可塑性樹脂の特性上デラミネーションが発生しにくいという特徴と^{9, 10)}、温度上昇による樹脂の軟化に伴う炭素繊維の拘束力低下が CFRP よりも激しく生じることが影響していると思われる。

以上のことから、CFRTP の切削加工では、CFRTP とは異なりスラスト力の低減を重視する必要性はなく、熱可塑性樹脂の熱による軟化を防ぐことが重要であり、送り速度は速く、工具先端角度は鈍角にして加工することが CFRTP の切削加工では良いと考えられる。

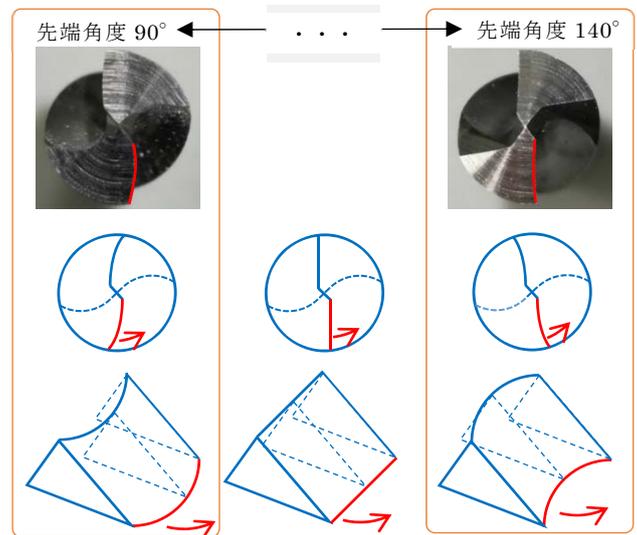
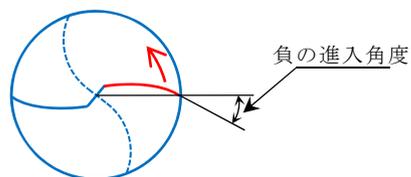
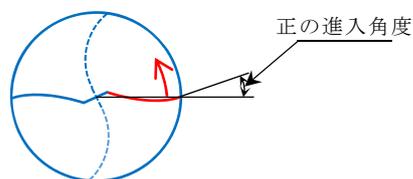


図16 工具先端角度の違いによる切れ刃の形状

参考文献



a) ドリル先端角度(鋭角)



b) ドリル先端角度(鈍角)

図17 ドリル外周部における刃先の進入角度

5. 結 言

本研究ではCFRTPに対し、冷却による研削穴開け加工及び切削穴開け加工の可能性と、切削穴開け加工における加工条件と加工熱との関係について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 冷却下であっても研削穴開け加工は困難である。
- 2) 冷却下の切削穴開け加工はデラミネーションの発生が懸念される。
- 3) 送り速度及び工具先端角度は被削材温度上昇低減に効果がある。
- 4) 送り速度は速く、工具先端角度は鈍角で加工することが望ましい。

- 1) 日本機械学会編, 機械工学便覧デザイン編β2, 材料学・工業材料, p. 213(2006).
- 2) 影山裕史: 自動車用CFRP技術の最新動向, まてりあ第**53**(12), p. 615(2014).
- 3) 加賀忠士, 安藤敏弘: 熱可塑性CFRPの切削加工に関する研究, 岐阜県工業技術研究報告No.1(2013).
- 4) 梶本英嗣: 炭素繊維強化プラスチックにおける研削穴あけの検討, 61st FRP CON-EX2016 講演論文集, p. 225-227(2016).
- 5) 柘植英明, 小川大介, 佐藤丈士: CFRPの機械加工技術に関する研究-ジャイロ式穴あけ法による穴あけ加工技術の開発-, 岐阜県工業技術研究所報告No.1(2013).
- 6) 鶴澤潔, ほか: CFRPの成型・加工・リサイクル技術最前線, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 63-68(2015).
- 7) 日本機械学会編, 機械工学便覧デザイン編β3, 加工学・加工機器, p. 137-139(2006).
- 8) 山田茂, 高野登, 深見修平, 川崎洋, 森田昇: CFRP材料の高効率・高精度加工法に関する研究, 第15回国際工作機械技術者会議論文集(ポスターセッション論文抜粋版), 一般社団法人日本工作機械工業会, p. 42(2012).
- 9) 田中秀岳: 熱可塑性炭素繊維強化樹脂の穴あけ加工, 精密工学会誌 **81**(6), 公益社団法人精密工学会, p. 507(2015).
- 10) 升谷正宏: 熱可塑性プラスチックをマトリックスとする高性能複合材料について, 日本複合材料学会誌 **11**(1), p. 7-15(1985).