GFRP の 加 熱 切 削*

長谷川 嘉雄** 花 崎 伸 作*** 橋 村 雅 之†

Cutting of GFRP at Elevated Temperature

Yoshio HASEGAWA, Shinsaku HANASAKI and Masayuki HASHIMURA

In order to reduce the tool wear in cutting GFRP, turning of both pipe and disk of GFRP and drilling of a GFRP plate were carried out under the condition of elevated temperature below 423 K. The pipe was the unidirectional glass fiber reinforced polyester resin, and the disk as well as the plate was the glass cloth reinforced epoxy resin. Both the mechanism of reducing the tool wear and the influence of the cutting temperature on it are considered from the experimental results. The reducing effects of tool wear range from the low cutting speed inducing the relative small tool wear to the high cutting speed inducing the large tool wear directly proportional to the cutting speed. This is based on the decrease of the shear strength and the hardness of the glass fiber, and the decrease of the viscosity of matrix. However, as the bonding between the glass fiber and the matrix also becomes weak at elevated temperature, the condition of the cut surface is not good in many cases. The cemented carbide P 10 showed the remarkable increase of tool wear even at 373 K in heating the tool itself. Consequently, in cutting GFRP with the carbide tool, it is considered that the cutting heat has the two effects, that is, the one is the reducing effect of tool wear due to the variation of the mechanical properties of workpiece, the other is the promoting effect of the tool wear due to the decrease of hardness of the bonding phase of carbide tool and these two effects cancel out. In case of coating tool, the flank wear width decreases with increase of cutting speed. This differs from the case of the cemented carbide tool, the cermet tool and HSS tool.

Key words: GFRP cutting, hot machining, turning, drilling, tool wear, tool wear mechanism

1. 結 言

GFRP 切削時の工具摩耗は非常に激しく、基本的にはざらつき摩耗であるが、切削条件に大きく依存する^{1)~6)}。この切削条件に対する依存性は理論的に説明されている⁷⁾²⁾。この理論によると、GFRP を構成するマトリックスの粘性とガラス繊維のせん断強度が工具摩耗に大きく影響し、これらの値が小さい場合、工具摩耗は小さい。またざらつき摩耗では、摩耗は被削材(被削材中の硬質物質)と工具との硬度の違いに依存する。

さて、熱可塑性プラスチックは温度上昇とともに軟化し、熔融する。熱硬化性プラスチックは温度上昇とともに軟化の後炭化する。ガラスの硬度は温度上昇につれ低下する⁸⁾。ガラス繊維の引張強度は温度が

高くなると低下するが⁹⁾、せん断強度も低下すると考えられる。したがって、GFRP を加熱切削すると工具摩耗の低減が期待できる。そこで本報告では旋削と穴あけについて、加熱による工具摩耗軽減効果を調べた。また、その結果を利用して切削温度の工具摩耗に及ぼす影響についても考察を加えた。

2. 実験装置および方法

2.1 旋削実験

実験にはジャパノカズヌーブ旋盤360 HB-X (40~2500 rpm, 無段変速, 5.15 kW) を使用した。被削材は表1に示す一方向強化ポリエステル樹脂パイプ材と、平織強化円板材で、外周旋削を行った。その際、パイプ材は内部に電気ヒータを備えたマンドレルにはめ、切削時と同じ回転速度で空転させながら内部から加熱し、表面の温度が所定の一定温度になってから切削した。円板材の場合は恒温槽で加熱後、主軸に取り付け切削した。この際、切削時の被削材温度を次のように設定した。すなわち、均一に加熱した被削材を切

* 原稿受付 昭和62年4月24日。昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月1日)にて発表

** 正 会 員 摂南大学工学部(寝屋川市池田中町17-8)

*** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市山田丘2-1)

† 正 会 員 新日本製鉄(株)(相模原市淵野辺5-10-1)

Table 1 Work materials

	Shape	Glass fiber contents and its condition	Mark
Glass fiber reinforced polyester resin (For turning)	pipe O. D. 70 I. D. 65	50%, unidirection, parallel to axis	A
Glass fiber reinforced epoxy resin (For turning)	disk ϕ 200	50%, cloth, perpendicular to the axis	B
Glass fiber reinforced epoxy resin (For drilling)	plate T. 8.0	50% cloth	C

削時と同じ回転速度で空転させて冷却曲線を求め、切削前後の被削材表面平均温度が設定温度となるように、切削開始時の温度を定めた。

工具を加熱する場合には、超硬チップに近接させてホルダに穴をあけ、挿入した電気ヒータで加熱し、コーナ部すくい面温度を所定の温度に設定した。

以上の設定温度の測定には、スポット径 0.25 mm の赤外線温度計を使用した。

使用工具は超硬合金 P 10 である。これは超硬合金 K 10 などに比し、耐摩耗性が著しく劣るが、短い切削距離で工具摩耗を検出するために採用した。チップ形状 TNGN 160408 のチップを CTG NR 2020 ホルダに取り付けて使用した。工具摩耗量としては逃げ面における最大摩耗幅を測定した。

切削条件は表 2 に示すとおりである。

2.2 穴あけ実験

実験には昌運カズヌーブ旋盤 HB-500 (40~3 200 rpm, 9 kW) を使用した。被削材は平織強化エポキシ樹脂積層板で、電気ヒータを埋め込んだアルミニウム製の熱板を介して往復台に取り付けた。被削材が所定の一定温度に達した後、主軸に取り付けたねじれぎりによって積層に垂直に、ピッチ 10 mm で順次横方向にずらせて穴あけを行った。設定温度の測定は、 ϕ 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対により行った。試料幅 200 mm の中央と端部、板表面と板厚中央で温度差は 1 K 以下であった。使用したねじれぎりの諸元と切削条件を表 2 に示す。工具摩耗量としては両切れ刃の中央での逃げ面摩耗幅を測定し、平均値をとった。また、ドリル侵入側と貫通側を目視観察するとともに、埋込み樹脂で固めた後、穴軸を含む面で切断し、穴壁におけるガラス繊維の剝離状態を調べた。

3. 実験結果

3.1 旋削の場合

図 1 は一方向強化ポリエステル樹脂パイプ材を加熱切削した場合の、切削速度に対する工具摩耗の依存性

Table 2 Cutting conditions

Turning	
Cutting speed V m/s	0.3, 1.3, 3.0, 4.0, 5.0
Feed rate S mm/rev	0.10
Depth of cut a mm	1.0
Cutting distance l m	100, 300
Tool Tip Holder Geometry	Cemented carbide P 10 TNGN 160408 CTG NR 2020 (-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.8)
Cutting fluid	nothing
Drilling	
Spindle speed n rpm	2 000, 3 200
Feed rate S mm/rev	0.05
Twist drill Diameter mm Length mm Web mm Point angle Helix angle Rake Clearance angle	Cemented carbide K 10 10 65 1.25 118° 38° 10° 10°

を示したものである。300 K (常温) における切削速度 5.0 m/s および 323 K における切削速度 4.0 と 5.0 m/s では、被削材が切削途中から切れ刃前方で碎けて、正常な切削状態でなくなったため飽和傾向を示している³⁾。また、被削材温度 373 K および 423 K における切削速度 3.0 m/s 以上では、切削初期より表層部が剝離し、切込み量が設定値 1.0 mm に対し、約 0.5 mm となった。これは被削材の温度上昇により、ガラス繊維とマトリックスの接着強度が低下した¹⁰⁾ためである。このように実質の切込みが小さくなった結果として、工具摩耗が小さくなっていると考えられる⁵⁾が、本被削材を用いた実験では、摩耗急増域における最大摩耗幅が切込みにほぼ比例している。

300 K の場合と 323 K の場合とを比較すると、切削速度 0.33, 1.33 m/s では加熱の効果が若干認められるが、3.0 m/s では差がない。373 K, 423 K の場合、3.0 m/s 以上の切削速度における表層の剝離による実質切込みの低下を考慮しても、加熱による摩耗軽減効果は現れているようである。

図 2 は平織強化エポキシ樹脂円板材を加熱切削した場合である。切削速度 0.33 m/s では工具摩耗が非常に少なく、加熱の効果は明白でないが、1.33 m/s 以上の実験点では工具摩耗の軽減が認められる。そして、それは被削材温度が高くなるほど、切削速度に対する

Fig. 1 Dependence of tool wear on cutting speed at various temperature of work material
Tool; cemented carbide P 10, Work material; A, Cutting distance; 300 m

Fig. 2 Dependence of tool wear on cutting speed at various temperature of work material
Tool; cemented carbide P 10, Work material; B, Cutting distance; 100 m

摩耗の増加割合が小さくなる形で生じている。

上述のように、被削材を加熱することによって工具摩耗は軽減されるが、目視による観察では、同一切削距離における切削仕上面の状態は差が認められないか、むしろパイプ材を 373 K, 423 K に加熱した場合の高速域のように悪化した。

3.2 穴あけの場合

図 3 に平織ガラス繊維強化エポキシ樹脂板 (板厚 8.0 mm) を $\phi 5.0$ のねじれぎりで穴あけしたときの、穴あけ個数の増大に伴う切れ刃中央部における逃げ面摩耗幅の増加状況を示す。回転数 2 000 rpm と 3 200

Fig. 3 Growth of flank wear in process of drilling
Tool; cemented carbide K 10, $\phi 5.0$ twist drill, Work material; C

rpm の間には摩耗幅にほとんど差が認められないが、いずれの回転数の場合も、被削材を加熱することによる摩耗の軽減が認められる。

このように、きりもみにおいても被削材を加熱することにより工具の摩耗は軽減されるが、目視観察では、加工部の状態は変化が無いが、むしろ悪くなった。

図 4 は 500 穴目のドリル侵入側と貫通側の断面の顕微鏡写真である。ドリル侵入側をみると、常温では穴壁と板表面とは直角をなしており、穴壁表層部に損傷が認められないが、373 K では、穴壁と板表面とは直角をなしているものの、穴壁表層部でストランドが白く見え、ストランドとマトリックスの剥離が生じたことを示している¹¹⁾。このような剥離は 1 穴目でも約 0.3 mm, 500 穴目では約 0.6 mm に達している。これに対してドリル貫通側では、常温においても板表層部に小さな盛り上がり認められるが、373 K に加熱した場合には、穴壁面と板表面とは直角ではなく、板表層部が層間剥離を生じ、また穴壁表層部でのストランドとマトリックスの剥離は、ドリル侵入側よりも深く、500 穴目では約 1.0 mm に達している。

3.3 工具を加熱した場合

工具と被削材のそれぞれに対する切削熱の影響を明らかにする目的で、3.1 項で述べた実験に対して、工具を加熱した場合の工具摩耗を調べたのが図 5 であ

Fig. 4 Situation of hole surfaces
Spindle speed; 3 200 rpm, Feed rate; 0.05 mm/rev,
Number of hole; 500

Fig. 5 Dependence of tool wear on cutting speed at
various temperature of tool
Tool; cemented carbide P 10, Work material; A, Cut-
ting distance; 300 m

る。被削材は図1の実験に用いたのと同じパイプ材である。切削速度 0.33 m/s の場合を除き、わずか 373 K に加熱したにすぎないのに工具摩耗が増大している。なお、工具を加熱した場合の切削速度 4.0, 5.0 m/s においても、切削の途中から工具切れ刃前方で被削材が碎ける現象が生じた。

Fig. 6 Dependence of tool wear on cutting speed
(Theory)

4. 考 察

4.1 加熱切削による工具摩耗軽減の機構

GFRP 切削時の工具摩耗は基本的にはざらつき摩耗であるから、被削材を加熱することによって被削材中のガラス繊維の硬度が低下すれば、工具摩耗は軽減される。

理論解析⁵⁾によれば、GFRP 切削時の工具摩耗の切削速度に対する依存性は、切削温度の影響を無視して、定性的に図6に示す曲線ABCDEで表される。ここで、切削速度の影響の小さい領域ABを第1領域、切削速度に比例する領域CDを第2領域と称する。切削速度以外の切削条件を一定とすると、被削材中のガラス繊維のせん断強度、縦弾性率、マトリクスの粘性と弾性によって、この特性曲線は縦軸との交点、および接線の傾きが変化する。これら4つの因子のうち、ガラス繊維の縦弾性率とマトリクスの弾性とは影響が小さい。ガラス繊維のせん断強度については、これに比例して縦軸との交点が変わり、領域ABにおいて影響が大きく、マトリクスの粘性については、領域CDでの傾きがこれに比例し、この領域で影響が大きい。領域BCでは両因子の影響が入れ替わる。また、ガラス繊維の圧壊強度に比例して領域DEのレベルが変化する。

GFRPを加熱することによって、ガラス繊維のせん断強度、圧壊強度、マトリクスの粘性のそれぞれが低下すれば、切削熱による温度上昇を無視して、図6のA～Eの状態からA'～E'の状態になる。

さらに、ガラス繊維とマトリクスの接着強度が加熱

によって低下すれば、ガラス繊維が切削時の変形中にマトリクスから剥離しやすくなる。ガラス繊維がマトリクスから剥離すると、上述の理論解析の結果はあてはまらないが、ガラス繊維は変形しやすいため工具摩耗は小さくなる。

4.2 各因子の温度依存性

ガラス繊維の硬度の温度依存性についての報告例はないようである。バルクのガラスでは、常温付近での硬度変化はかなり大きく、常温に対して 473 K では 40~50% 低下する⁸⁾。

ガラス繊維のせん断強度の温度依存性も報告がないようである。ガラス繊維単独のせん断試験は非常に困難であるので、すだれ織状強化エポキシ樹脂について、繊維方向に切り出した試験片 (2.1 mm×6.0 mm) を用いて、両側を拘束した二面せん断試験を行った (せん断速度 1.0 mm/min)。その結果、288 K における 190 MPa から 373 K では 140 MPa に低下した。同一材料から切り出した試験片 (6.0 mm×15.0 mm) の 3 点曲げ試験 (JIS K 7203) 結果では、同じ温度において 830 MPa および 780 MPa である。373 K におけるせん断強度は常温における値の 25% 低下し、曲げ強さの低下は 6% である。同じ温度におけるガラス繊維の引張強度の低下率⁹⁾は曲げ強さの低下率とほぼ同じである。したがって、曲げ強さの低下に対しては、マトリクスの強度低下はほとんど影響していない。せん断強度の大幅低下に対してもマトリクスの強度低下の影響は小さいと考えられる。

マトリクスの粘性については次のような実験を行った。断面 10.0 mm×8.0 mm、長さ 200 mm の片持ちばりの自由端に 200 g の質量を付けて水平面内で横振動させ、その減衰状態から粘性係数を求め、常温における値を基準にして相対値として温度依存性を求めた。結果を図 7 に示す。エポキシ樹脂では、常温付近での低下はゆるやかで、400 K 付近で急減している。ポリエステル樹脂の場合、常温付近での低下が急で、350 K 以上ではゆるやかになっている。

ガラス繊維の圧壊強度については、これに支配される摩耗が従来の多くの実験において生じていないので検討を省略する。

ガラス繊維とマトリクスの接着強度に対しては、界面のせん断強度と温度の関係が調べられている¹⁰⁾。それによると界面せん断強度は温度上昇とともに直線的に減少し、エポキシ樹脂では 393 K、ポリエステル樹脂では 373 K で常温の数%の強度になる。

4.3 実験結果の検討

4.1 項で述べた機構に対して、実際には切削熱の影響

Fig. 7 Dependence of viscosity of matrix on temperature

を加味する必要がある。切削熱による温度上昇は、切削速度が大なるほど、また工具が摩耗するほど大きくなる。その結果として、ガラス繊維の硬度低下に対する加熱の効果は、低速において大きいが高速では小さくなる。ガラス繊維のせん断強度の変化は低速においてのみ影響するので、切削熱の影響は考慮の余地が少ない。比較的高速域で影響の大きいマトリクスの粘性は、切削熱の影響を考慮する必要があるが、図 7 に示す特性から、表層部のマトリクス温度がエポキシ樹脂では 430 K、ポリエステル樹脂では 370 K 程度以上では粘性の変化が小さいため、温度が変化してもマトリクスの粘度変化による工具摩耗への影響は小さい。

以上の検討から、実験結果は次のように解釈できる。旋削の場合、低速の第 1 領域では工具摩耗が小さいため必ずしも顕著に現れていないが、ガラス繊維の硬度とせん断強度の低下により工具摩耗が軽減されている。一方向ガラス繊維強化ポリエステル樹脂で加熱温度 373 K および 423 K では、前述のようにガラス繊維とマトリクスが剥離しやすいため、低速の第 1 領域でも切残しが少なくなつて、摩耗が軽減されているものと考えられる。工具摩耗が急増する切削速度領域の第 2 領域では、平織強化エポキシ樹脂の場合、マトリクスの粘性低下により摩耗は大きく軽減されている。一方向強化ポリエステル樹脂の場合、373 K、423 K ではガラス繊維とマトリクスの剥離のため、実切込みの減少とともに切残しが減少し、見かけ上顕著な効果が現れているが、剥離による実切込みの減少が生じていない 323 K では、切削速度 3.0 m/s で 300 K との間に差が認められない。これは、切削熱のため切れ刃近傍ではマトリクスの粘性の変化が小さな温度範囲にまで加熱されているためと考えられる。

図 3 に示す穴あけにおいては、3 200 rpm においても切れ刃中央の切削速度は 0.42 m/s で、これは第 1 領域に属する切削速度であり、2 000 rpm と 3 200 rpm

Fig. 8 Dependence of tool wear on cutting speed
Tool; coated cemented carbide, Work material; glass fiber reinforced phenolic resin, Cutting distance; 300 m, Feed rate; 0.1 mm/rev

とで工具摩耗に大差なく、加熱の効果はガラス繊維のせん断強度と硬度の低下によると考えられる。切削トルクとスラストの測定結果は、373 Kに加熱した状態では、常温に対しいずれの値も約30%の低下を示し、スラストの低下からも工具摩耗の軽減が納得できる。ただし、加熱切削時に繊維とマトリクスの剥離（層間剥離を含む）が生じているのは界面の接着強度並びにマトリクス自体の強度の低下が大きい¹²⁾ためである。

コーティド超硬工具がGFRPの切削には不適で、特に低速において逃げ面の摩耗が激しいことを既に報告した⁶⁾。図8はそれを定量的に示したもので、被削材は平織ガラス繊維強化フェノール樹脂である。図より、逃げ面摩耗幅は切削速度の増大とともに減少し、切削速度4.0 m/s付近で極小値をとるような傾向を示している。しかしながら、摩耗部をすくい面に平行に測定すると、同図中に示すごとく切削速度の増大につれて単調に増大している。工具がある程度摩耗した場合、摩耗面のすくい面に近い部分では、被削材中のガラス繊維が冷却された状態で接触することになり、既報の摩耗機構⁵⁾により切削速度の増大につれて摩耗幅が増大するのに対し、摩耗面の逃げ面に近い部分では、接触している被削材中のガラス繊維の硬度、マトリクスの粘性が切削熱により低下し、他方実験の範囲内ではコーティング層は切削熱の影響を受けないため、切削速度の増大につれて摩耗が軽減されることが考えられる。このような切削熱の影響は摩耗の進行とともに大きくなる。

図5に示す超硬合金P10の場合、工具摩耗が急増する切削速度域ではわずか373 K程度の工具加熱で、明らかに逃げ面摩耗が増大している。800 K程度まで

P10の硬度低下はわずかであり、これは結合剤部の硬度低下のためと考えられる。このことは各種の超硬合金でGFRPを切削したときの工具摩耗の切削速度依存性が、切削熱の影響を無視した図6に示す理論曲線A～Eにはほぼ一致する大きな原因と考えられる。すなわち、切削熱によるマトリクスの粘性低下とガラス繊維の硬度低下による工具摩耗減少効果が、超硬合金工具の結合剤部の硬度低下による工具摩耗増大効果によって相殺されると考えられる。

5. 結 論

- (1) GFRPを加熱して切削すると工具摩耗を軽減できる。
- (2) 工具摩耗が軽減されるのは、被削材中のガラス繊維のせん断強度の低下(低速域で有効)、マトリクスの粘性の低下(比較的高速域で有効)およびガラス繊維の硬度の低下による。
- (3) 加熱切削するとマトリクスの強度低下のため、ガラス繊維とマトリクスの剥離が生じやすく、切削仕上げ状態は悪くなる。
- (4) 超硬合金P10を用いた実験では、わずか373 K程度に工具を加熱することにより、工具摩耗が増大する。これより、GFRPを超硬合金工具で切削する場合、切削熱によるGFRP側の工具摩耗軽減作用と工具側の摩耗増大作用とが相殺し合っていると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 津枝正介ほか：強化プラスチックの断続切削における工具摩耗（第1報）、日本機械学会論文集，**34**，266（1968）1813。
- 2) 佐久間敬三，瀬戸雅文：強化プラスチック（GFRP）切削における工具摩耗（工具材種の影響）、日本機械学会論文集，**44**，381（1978）1752。
- 3) 長谷川嘉雄，花崎伸作，里中 忍：GFRP切削時の工具摩耗特性，精密機械，**44**，11（1978）1334。
- 4) 長谷川嘉雄ほか：GFRP切削時の工具摩耗特性に及ぼす工具材種の影響，精密機械，**47**，6（1981）651。
- 5) 長谷川嘉雄，花崎伸作，藤原順介：GFRPの切削加工における工具摩耗，日本複合材料学会誌，**10**，1（1984）29。
- 6) 長谷川嘉雄，花崎伸作，錦美 誠：GFRP切削における工具の摩耗機構，精密機械，**50**，11（1984）1747。
- 7) 長谷川嘉雄，花崎伸作：強化プラスチックの断続切削における工具摩耗（第2報），日本機械学会論文集，**34**，266（1968）1821。
- 8) J. H. Westbrook：Hardness-temperature Characteristics of Some Simple Glasses, Phys. and Chem. of Glasses, **1**, 1, (1960) 32。
- 9) 牧 廣，島村昭治ほか：複合材料技術集成，産業技術センター（1976）206。
- 10) 大沢直志ほか：ガラス繊維-熱硬化性樹脂系複合材料における臨界繊維長の温度依存性，繊維学会誌，**33**，1（1977）39。
- 11) 井上久弘：GFRP材の切削加工に関する研究，材料，**36**，402（1987）242。
- 12) 三輪 実ほか：ガラス繊維-エポキシ樹脂および不飽和ポリエステル樹脂系複合材料の強度の温度依存性，繊維学会誌，**33**，1（1977）44。