

Title	GFRP切削時の工具摩耗に関する研究
Author(s)	里中, 忍
Citation	大阪大学, 1979, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27709
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

GFRP切削時の工具摩耗に関する研究

昭和53年12月



里 中

忍

GFRP切削時の工具摩耗に関する研究

昭和53年12月

•

里 中 忍

第	1	章	緒	論	1
第	2	音	GFR	P 切削時の工具摩耗挙動	5
	2	. 1	緒	言	5
	2	. 2	実験	方法	5
	2	.3	実験	結果	8
		2.3	3.1	切削状態	8
		2.3	3.2	工具摩耗	9
	2	. 4	力学	モデルを使った理論解析	11
	2	. 5	結	言	17
第	3	章	低速切]削時の工具摩耗の機構	19
	3	. 1	緒	言	19
	3	. 2	実験	方法	19
	3	. 3	実験	結果	20
		3.3	3.1	切削速度の影響	20
		3.3	3.2	すくい角の影響	23
		3.3	3.3	切込みの影響	25
		3.3	. 4	ガラス繊維の方向の影響	27
		3.3	3.5	ガラス繊維含有率の影響	29
	3	. 4	理論	解析結果との比較検討	31
	0	5	絟	- 국	33

第4章	高速切削時の工具摩耗の機構	8	38	5
-----	---------------	---	----	---

4	. 1	緒	言35
4	. 2	実験	方法35
4	.3	実験	結果36
	4.3	. 1	切削速度の影響36
	4.3	. 2	送り量の影響
	4.3	. 3	切削距離の影響
	4.3	. 4	ガラス繊維含有率の影響46
4	. 4	理論	解析結果との比較検討47
4	. 5	結	言
ダに	音	切削 剤	の影響51

第8	5 -	章		切削斉	りの影響						•••••		 			51
Ę	ó.	.]	L	緒	言…								 			51
ł	5	• •	2	実験	方法								 •••••	•••••		-51
Ę	j,	. ?	3	実験	結果お。	よびオ	考察									55
	Į	5	. 3	. 1	低速域	にお	けるち	 別削剤	の影	響…		·····	 	•••••		55
				(1)	工具摩	耗…							 	•••••	•••••	55
				(2)	曲げ強	さ…							 			59
				(3)	摩擦試	験結	果						 ••••••			-61
				(4)	考	察…							 •••••		•••••	62
		5	. 3	. 2	高速切)削時	の工具	し 摩耗	に及	ぼす	影響	§	 •••••			-65
				(1)	工具摩	₹耙…							 			66
				(2)	被削材	温度	の影響	¥					 			-70
				(3)	、 曲げ強	さ…				•••••			 		•••••	-71
				(4)	考	察	•••••				•••••		 ••••••			·71
ļ	5		4	結	言								 		• • • • • • • • •	-73

第6	章	_	匚具材	「質の影響	75
б	.]		緒	晋	75
6	. 2	;	実験	方法	75
6	. 8	3	実験	結果および考察	76
	6.	3	. 1	工具摩耗	76
	6.	3	. 2	走査形電顕による摩耗部の観察	79
	6.	3	. 3	切削距離の影響	32
	6.	3	. 4	工具材の物理的性質の影響	34
6	. 4	ŀ	結	言	37

箆7 章	統	括	9
舟(平	47 CV	10	υ

•

第1章 緒 論

ブラスチックの特性とガラス繊維の強度とを合わせた特性をもつGFRP (glass fiber reinforced plastic) はその機械的強度と軽量さ, 優れ た耐腐食性, 耐薬品性, 絶縁性などの点から大きく脚光を浴び, 宇宙航空機器 をはじめ建築用材料, 電気部品などの工業用材料として各方面に広く用いられ, 将来その用途もさらに広がると思われる. 一般にGFRPは成形品のままで使 用されるもののほかに, 切断をはじめ部品少数の場合とか, 精度の要求される 部品や複雑な形状の部品などのように製品の形状や精度が問題となる場合には 切削や研削などの機械加工が必要となるものが多い.

GFRPを含めて現在使用されている強化ブラスチックの強化材およびブラ スチックの種類は多く、またそれぞれの性質も異なり、金属材料に比べて特異 な機械的、熱的性質を有し、切削加工に際しては種々の特異現象が観察される ことがこれまでの論文^{(1)~(12)}で報告されている。特にGFRPの切削において は、工具摩耗が大きな問題となり、金属材料の切削時とは異なった摩耗形態を 示し、従来から使用されている工具ではその摩耗量も大きくなる。また切削面 もGFRPの種類や切削条件により異なり、場合によっては切削面の樹脂とガ ラス繊維との分離を引き起こし、仕上面の精度を著しく低下させることもある。 このような材料の切削に関する研究^{(13)~(25)}は比較的少なく、ブラスチックの切 削の中で一部述べられているほか、布入りやアスベスト入りなどの他の強化プ ラスチックと比較して述べられているものがあるが、断片的である。

津枝,長谷川ら⁽²⁶⁾はガラス繊維強化フェノール樹脂の断続切削をアルミナ入りフ ェノール樹脂の場合と比較して行ない,切削速度,送り速度,すくい角が大き くなるほど工具摩耗は大きくなること,GFRP切削用の工具としてはK種が 優れていること,切削熱は工具摩耗に直接影響しないことなどを示した.

長谷川,花崎⁽²⁷⁾は粘弾性としてのプラスチックと強化材を組み合わせた場合

の強化材の挙動を理論的に解析して工具摩耗に及ぼす強化材の影響を明らかに し,被削材中のガラス繊維の変形速度を速くするような切削ならびに被削材と 工具との接触面積が大きいような切削ではガラス繊維と工具との間の接触圧が 大きくなり、工具が摩耗しやすくなることを示した。

長谷川,花崎ら⁽²⁸⁾は種々の切削剤を用いてGFRPの断続切削を行ない,粘 度の高い切削剤は工具摩耗を激しくし,粘度の低い切削剤は工具摩耗を軽減さ せるが、マット状にはいっているGFRPの場合には効果がないことを示した。

このほか佐久間,瀬戸⁽²⁹⁾はGFRP切削時の工具摩耗に対する工具材種の影響を調べ,高速切削においては切削温度の上昇による工具の熱軟化と工具表面 に発生する熱応力が工具摩耗を大きくしていることを報告している.井戸,井 上⁽³⁰⁾は切削速度500^m/min以上の超高速域におけるGFRP切削時の工具摩 耗について研究している.またE.Heitz⁽²⁵⁾はGFRP切削時のダイヤモンド 工具の性能について述べている.

しかしながらこれらの報告は断片的で、なかには矛盾した記述もみられ、系 統的な報告は少ない。そこで本研究では極低速域から高速域までの広範囲にお けるGFRP切削時の工具摩耗特性を明らかにするため、一連の実験を行なっ た。すなわちガラス繊維強化プラスチックの低速二次元切削と旋削を行なって、 工具摩耗の挙動を明らかにし、一方GFRP中のガラス繊維とプラスチックを それぞれ曲げ剛性をもった弾性体と三要素モデルで示される粘弾性体で置き換 えて、切削の際のガラス繊維の挙動を理論的に解析し、両方の結果を比較検討 した。

本論文の構成は以下の通りである。

第2章ではGFRP切削時における工具摩耗の挙動および切削状態を明らか にし、切削時におけるガラス繊維の挙動を曲げ剛性をもつ弾性体と三要素モデ ルで表わされる粘弾性体から成る力学モデルを用いて、理論的に解析した。 第3章ではガラス繊維強化エポキン樹脂の低速二次元切削を行なって工具摩

-2-

耗の挙動を調べ,第2章の理論解析結果と比較検討して低速切削時の工具摩耗 の機構を明らかにした.

第4章では旋削による高速切削時の工具摩耗の挙動を調べ,第2章の理論解 析結果と比較検討して高速切削時の工具摩耗機構を明らかにした。

第5章では種々の切削剤を用いてGFRPの低速二次元切削および旋削を行 ない、切削剤が工具摩耗特性に及ぼす影響について明らかにした。

第6章では現在使用されている代表的な工具6種を用いてGFRPの旋削を 行ない、工具材種が工具摩耗特性に及ぼす影響について明らかにした。

第7章は本論文の総括である.

参考文献

- (1) 稲生:機械技術,5,2(1957),10.
- (2) 鴨川:精密機械,27,10(1961),660.
- (3) 大越, 鴨川:プラスチックス,9,11 (1960), 18.
- (4) 鴨川:精密機械,27,11(1961),726.
- (5) 鴨川:精密機械,28,8(1962), 468.
- (6) 鴨川:精密機械,29,9(1963),611.
- (7) 益子, 隈部, 安昧: 日本機械学会論文集, 29, 202 (1963), 1054.
- (8) 安昧:日本機械学会論文集,39,320(1963),1327.
- (9) 田島:機械と工具,7,6(1963),19.
- (10) 小林:日本機械学会論文集,30,220(1964),1467.
- (11) 斎藤:日本機械学会論文集,31,224(1965),657.
- (12) 鴨川: 塑性と加工, 14, 146 (1973), 239.
- (13) 田丸, 白石: 機械技術, 4, 7 (1956), 65.
- (14) 小林: プラスチックス,5,9(1956), 16.
- (15) R.A. Wason: The Tool Engineer, 36, 1 (1957), 109.

- (16) 津枝, 長谷川ほか:日本機械学会論文集, 26, 169 (1960), 1233.
- (17) 小林, 斎藤: プラスチックス,9,12(1960), 41.
- (18) 小林:機械と工具,6,2(1962),23.
- (19) G.A. Ebelhare : The Tool and Manufacturing Engineer,50, 4 (1963), 99.
- (20) 田島:機械と工具,7,7(1963), 39.
- (21) 鴨川:精密機械,34,6(1968), 377.
- (22) 鴨川:精密機械,35,2(1969),101.
- (23) 長谷川,花崎ほか:日本機械学会論文集,35,276(1969),1788.
- (24) 井上:マシニスト,17,11 (1973),55.
- (25) E. Heitz : Plastverarbeiter, 27, 9 (1976), 469.
- (26) 津枝,長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266 (1968), 1813.
- (27) 長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1821。
- (28) 長谷川, 花崎ほか:日本機械学会論文集,34,266(1968), 1826.
- (29) 佐久間, 瀬戸:日本機械学会論文集,44,381(1978),1752.
- (30) 井上, 井戸:精密機械, 39, 3(1973), 78.

第2章 GFRP 切削時の工具摩耗挙動

2.1 緒 言

前章でも述べたようにGFRPを切削する際には激しい工具摩耗を生じるが、 その挙動は切削条件に大きく依存している。そのうち比較的高速切削時の切削 速度依存性や被削材と工具の接触面積の効果はすでに明らかにされている⁽¹⁾⁽²⁾ しかしながら、工具摩耗が切削速度に依存する範囲や低速域における工具摩耗 の挙動は明らかでない。

そこで本章では極低速域から高速域までの広範囲における工具摩耗特性を明 らかにするため、ガラス繊維強化エポキシ樹脂を用いて低速二次元切削と旋削 を行ない、GFRP切削時のガラス繊維の挙動を観察するとともに、極低速域 から高速域までの工具摩耗の挙動を明らかにした。さらにこの結果をもとにし て、GFRPを弾性体と三要素モデルの粘弾性体に置き換えて、切削の際のガ ラス繊維の挙動を理論的に解析した。

2.2 実験方法

低速二次元切削実験装置 の概観を図2.1に示す。 日立製二番立フライス盤の 主軸頭に工具動力計を介し て工具を取り付け,被削材 をバイスによりテーブルに 固定し,テーブルの左右送 りによって切削運動を,上 下送りによって切込みを与



図2.1 切削実験装置

えた.工具としては高速度鋼第4種製完成バイトロ12.7を使用し、平面研削

盤で研削後、油と石により仕 上げた。これは低速切削のた め、超硬工具では測定値を比 較できる摩耗量を生じさせる 切削距離を実際上とれないた めである。被削材は厚さ6mm のガラス繊維強化エポキシ樹 脂であって、250×80に切 り出したものを使用した。ガ ラス繊維は平織の布の 状態ではいっており. 含有率は約50%であ る。被削材中のガラス 繊維の方向は切削運動 方向および切込み方向 である、表2.1 に切 削条件を. 表 2.2 に 被削材の機械的性質を 示す。切削抵抗の測定 には、図2.2 に示す ような一層わく組型工 具動力計を製作して使 用した。この動力計は 水平方向および鉛直方

表2.1 低速二次元切削の切削条件

すくい角 a°	10
逃 げ 角 r°	11
刃先丸味半径(µm)	5
切削速度(mm/min)	16,19,30,56,112
切込み (mm)	0.1

表2.2 被削材の機械的性質

曲げによる縦弾性係数(kg/mm ²)	1850
曲げ強さ (kg/mm ²)	45



図2.2 工具動力計

向の4本の柱の圧縮ひずみと引張ひずみを検出するもので、表2.3 に基本的 な特性を示す、実験に使用した動力計,増幅器、ペン書きレコーダーとも低速 二次元切削の範囲では切削抵抗 の変動に追随するものである.

また旋削には山崎鉄工所製の 高速精密旋盤を使用し,1^m/min 程度の低速切削ができるように 駆動用電動機(5 kw, 1700 r pm) を別に設け、無段変速機を介し

表2.3 工具動力計の特性

旧田共会	水平方向 1000kg
限 芥 何 里	鉛直方向 700kg
相方工业	水平→鉛直 0.8%以下
相上一步	鉛直→水平 0.5%以下
田本作動数	水平方向 2.7×10 ³ Hz
回有饭到奴	鉛直方向 2.4×10 ³ Hz

て主軸を駆動した。被削材はガラス繊維強化エポキシ樹脂であって、外径75 mm,内径60mmのパイプ材および直径300mm,厚さ50mmの円板材を使用し、 ガラス繊維含有率はそれぞれ約65%および50%である。被削材中のガラス 繊維はパイプ材では軸方向と円周方向にはいっていて、両方向におけるガラス 繊維の割合は8.6:1であり、また円板材では平織状のガラス繊維が軸に垂直 に積層されている。切削実験は被削材を保持具で主軸に固定して外丸削りを行 なった。パイプ材では軸方向のガラス繊維は横切れ刃によって切削され、送り 量の分だけ工具と接触して力を受ける。この1回転当りの送り量は低速二次元 切削の切込み深さに対応する。円板材では平織状のガラス繊維が積層されてい るため、低速二次元切削の切込

み深さに対応する量は変化する. 工具材種は超硬合金P10 であ って,円板材の場合には(0,6, 6,6,8,0,0.5)の工具を使用 し,バイブ材の場合にはスロー アウェイ型チップTNG 331

表2.4 旋削の切削条件

$1 \sim 332$
200, 300
1.0
0.15, 0.177

をN 22 R-33 型のホルダに取り付けて使用した.表2.4 に旋削の切削条 件を示す。

工具摩耗量としては旋削の場合にはノーズ先端から0.6mmの位置での横逃げ

面摩耗幅をとり,低速二次元切削の場合には摩耗前の刃先から摩耗面におろし た垂線の長さでもって定義した刃先後退量を測定した.

2.3 実験結果

2.3.1 切削状態

図 2.3 は低速二 次元切削の際に切れ 刃がガラス繊維部を 切削しているときの 切削状態を示すスケ ッチである(写真で はガラス繊維部が不 鮮明のためスケッチ で示す).図は切り くずが被削材から分



切削速度:16mm/min,切込み:0.3mm,すくい角:10° 図 2.3 切りくずの生成状態

離する寸前の状態であり、破断は点線に沿って起とる.二次元切削に使用した 試料ではカラス繊維は切削運動方向および切込み方向にはいっているが、切込 み方向にはいっているガラス繊維は数回にわたって破断され、樹脂部切削時に は切込みに比べてガラス繊維間の樹脂部が広いので、はじめのうち切りくずは 切削自由面に向って容易に破断される。切れ刃がガラス繊維に近づけば、ガラ ス繊維と樹脂部の接着強度が強いことにより、樹脂はすくい面に盛り上がり、 ガラス繊維は変形するが、容易に破断しない。したがってガラス繊維は工具す くい面から直接に、あるいは切りくずを介して力を受ける。また切削運動方向 にはいったガラス繊維も破断するため、切りくずは不連続となる。図2.4 は この時の切削抵抗の変動を示すオシログラムである。被削材はガラス繊維の切 削特性がめいりょうに現われるように、ガラス繊維部と樹脂部が分離した厚さ

-8-



切削速度: 16^{mm}/min, 切込み: 0.1mm 切削幅: 2.8mm, すくい角: 10°

図2.4 切削抵抗のオシログラム

2.8 mmの試料を用いた。図から明らかなように、ガラス繊維部と樹脂部を示す周期的な変動のほかに、より周期の短い変動がみられるが、これはガラス繊維が数回にわかれて破断していた観察結果と対応するものである。

2.3.2 工具摩耗

図2.5 は低速二次元切 削において,切込みを一定 にした時の切削速度と刃先 後退量の関係である。図か らわかるように,刃先後退 量は一定で,低速域での工 具摩耗は切削速度を変化さ せても変化がない.逃げ面 摩耗幅も第3章で示すよう



図2.5 切削速度と工具摩耗の関係

に、この切削速度範囲では切削速度の影響はなく、ほとんど一定である.



切込み:1.0 mm,送り:0.177mm/rev,切削距離:300m 被削材:パイプ材

図2.6 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係(旋削)

図2.6は図2.5に接続する高速側の領域において、パイプ材を旋削した時 の切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係である。切削速度の変化に対して工具摩耗 は三つの領域に分けられる。すなわち、切削速度約10m/min までの低速域に おける低水準の工具摩耗一定の領域(以下第1領域と称する)、約70m/min までの切削速度範囲における工具摩耗急増領域(以下第2領域と称する)、お よび約70m/min 以上の工具摩耗一定の領域(以下第3領域と称する)である。 三つの領域のうち第2領域は津枝、長谷川らの行なったフライス削りによる断 続切削結果でも観察されている⁽²⁾が、第1領域と第3領域は観察されていない。

図2.7 は円板材を旋削した時の切削速度と工具摩耗量の関係である.工具 摩耗量としては逃げ面摩耗幅と、切削前後の重量変化で求めた摩耗体積を採用 した.円板材の場合、切れ刃とガラス繊維との相対的な位置関係は明確ではな い.すなわち、切れ刃の場所によって変化するだけでなく、平織状にはいった ガラス繊維のため被削材1回転中に4回周期的に変化する.しかし工具摩耗は 図2.6 に示すパイプ材の旋削結果と同様の傾向を示し、三つの領域に分けら れ、摩耗体積もほぼ同様の傾向となっている.

-10-



被削材:円板材

図2.7 切削速度と摩耗量の関係(旋削)

2.4 力学モデルを使った理論解析

GFRP切削時の工具摩耗はざらつき摩耗と考えられる。すなわち摩耗量は 接触荷重に比例する。長谷川,花崎⁽²⁾は工具摩耗の切削速度依存性を明らかに するために、プラスチックの挙動として二要素モデルを考え、ガラス繊維の変 形速度が十分大きい範囲で

はガラス繊維が破断する時 の分布荷重の強さが変形速 度に比例して増大すること を説明した。本実験では極 低速域から高速域までの広 範囲の切削速度域に適用で きるモデルとして,三要素 モデルを採用した。図2.



図2.8 被削材中のガラス繊維と樹脂の 力学モデル

8にそのモデルを示す。2.3.1で述べたようにガラス繊維は工具すくい面か ら直接に、あるいは切りくずを介して力を受ける、この力を受けている部分の 長さを工具とガラス繊維との接触長さしと定義し、力学モデルではガラス繊維 を半無限長の曲げ剛性をもったはり、工具から受ける力を一様分布荷重と仮定 し、プラスチックの力学的作用を単位長さ当りぇ、 η, η, なるばねとダッシュ ポットで置き換えている.ここで、 p:ガラス繊維がせん断されるときの一様 分布荷重の強さ、すなわち工具がガラス繊維を擦過してゆくときの接触荷重, E:ガラス繊維の縦弾性係数.Ⅰ:ガラス繊維の断面二次モーメント. &:ガ ラス繊維単位長さあたりのばねのばね定数, η, η,: ガラス繊維単位長さあた りのダッシュポットの粘性係数, v:分布荷重端での変位速度, δ₀:分布荷重 端での変位量, K:ガラス繊維一本当りのせん断強さとする. 図2.8 に示す ように, η,≫η,としているから粘性係数η,のダッシュポットが有効に作用す る変位速度に対しては η=∞ すなわち剛体と考えてよく, フォークトモデル が並んだモデルとなる。これに対して粘性係数 7,のダッシュポットが有効に作 用する変位速度に対しては η=0 と考えてよく, ばねとダッシュポットが直 列に組合されたマックスウェルモデルが並んだモデルとなる。粘性係数7.が有 効に作用する変位速度において、座標を図2.8のように定めてガラス繊維に 作用する分布荷重のつりあいを考えると、次のようになる。

 $x \leq l$ $E I \frac{d^{4} \delta}{d x^{4}} = - k \delta - \frac{v \eta}{\delta_{o}} \delta + p$ $x \geq l$ $E I \frac{d^{4} \delta}{d x^{4}} = - k \delta - \frac{v \eta}{\delta} \delta$ (2.1)

式(2.1)の解は次のように与えられる。

-12-

$$\delta_{x \leq l} = e^{-ax} \left(c_{1} \cos ax + c_{2} \sin ax \right) + e^{-ax} \left(c_{3} \cos ax + c_{4} \sin ax \right) + \frac{p}{4 E I a^{4}} \right\} (2.2)$$

$$\delta_{x \geq l} = e^{-ax} \left(c_{5} \cos ax + c_{6} \sin ax \right)$$

ただし, aは次式によって定義される.

$$4 a^4 \equiv \frac{k + \eta_1 v / \delta_0}{E I}$$
(2.3)

次に示す境界条件を用いると、式(2.2)は式(2.4)になる。

$$x = 0 ; \frac{d^2 \delta x \le i}{dx^2} = 0 , \frac{d^3 \delta x \le i}{dx^3} = 0$$

$$x = l ; \delta_{x \ge l} = \delta_{x \le l} , \frac{d \delta_{x \ge l}}{dx} = \frac{d \delta_{x \le l}}{dx} , \frac{d^2 \delta_{x \ge l}}{dx^2} = \frac{d^2 \delta_{x \le l}}{dx^2} ,$$

$$\frac{d^3 \delta_{x \ge l}}{dx^3} = \frac{d^3 \delta_{x \le l}}{dx^3}$$

$$\delta_{x} \leq t = \frac{P(t)}{8EIa^{4}} \left\{ 2 - e^{ax-at} \left\{ \cos at \cos ax + \sin at \sin ax \right\} - e^{-ax-at} \left\{ (\cos at - 2\sin at) \cos ax + \sin at \sin ax \right\} \right\}$$

$$\delta_{x} \geq t = \frac{P(t)}{8EIa^{4}} \left\{ e^{-ax+at} \left\{ \cos at \cos ax + \sin at \sin ax \right\} - e^{-ax-at} \left\{ (\cos at - 2\sin at) \cos ax + \sin at \sin ax \right\} \right\}$$

$$(2.4)$$

これよりガラス繊維に生ずるせん断力が導かれ, x = l で最大値をとり, 次式 で表わされる.

$$V = \frac{p(t)}{4a} \left\{ 1 + e^{-2at} \left(\sin 2at - 2\sin^2 at - 1 \right) \right\}$$
(2.5)

al が少し大きい値をとれば、 ッを平均値で代表させることにより、長谷川, 花崎⁽²⁾の解析の場合と同様に、ガラス繊維がせん断されるときの分布荷重の強 さとガラス繊維の変位速度との関係が得られる. すなわちガラス繊維がせん断 されるときの分布荷重の強さは次式で表わされる。

al ≫1であって,変位速度が十分小さい範囲では

$$p = 4K \sqrt[4]{\frac{\cancel{k} + \eta_1 (EI)^{\frac{1}{4}} v \cancel{k}^{\frac{3}{4}} N_2 K}{4EI}}$$
(2.6)

al ≫1であって、変位速度が十分大きい範囲では

$$p = 2 \sqrt[4]{\frac{4 \, \& K^4}{E \, I} + \frac{1}{2} \, v^4 \, \eta_1^4 + \frac{1}{2} \, \left(\, v^8 \, \eta_1^8 + \frac{4 \, 8 v^4 \, \& \eta_1^4 \, K^4}{E \, I} \right)^{1/2}} \tag{2.7}$$

ところでガラス繊維は式(2.5)で示される最大せん断力がガラス繊維のせん断 強さKに達したとき破断するものとすると、式(2.5)は次のように書き改めら れる.

$$p = \frac{4 a K}{1 - e^{-2al} \{1 + 2\sin^2 al - \sin 2al\}}$$
(2.8)

alとクの関係を図示すれば図2,9となる。図からパラメータalの小なる範 囲(ガラス繊維の変位速度 60aK は小さい)では分布荷重の 幅が小さいほど分布荷重の Þ 40aK 強さが大きくなることがわ Ш 쀺 かる. そしてこの範囲では 接 20aK

$$\not = \frac{K}{l} \qquad (2.9)$$

となり、ガラス繊維の変位 速度はガラス繊維破断時の 分布荷重の強さにほとんど



図2.9 al とpの関係

-14-

影響しない。したがって式(2.6),(2.7),(2.9)は次のことを意味する。 すなわち、分布荷重の強さクが変位速度にほぼ比例する条件下では、分布荷重 の幅はクに影響がなく、逆に分布荷重の幅に反比例する条件下では、変位速度 の影響はない。

つぎに式(2.9)の適用限界(al ≪1を満すvの上限)がどのような特性を もつかを調べる.式(2.3)と式(2.4)とから, al ≪1 の条件で次式が容易 に求まる.

$$k \delta_{o}^{\frac{1}{3}} + \eta_{I} \delta_{o}^{\frac{1}{3}} v = \left(\frac{4 K^{4}}{E I}\right)^{\frac{1}{3}}$$
 (2.10)

ここで る。はガラス繊維破断時の分布荷重端での変位量を表わすものとし、 v と 同符号をとる。そこで vのゼロ近傍の値を除けば る。は次式で近似できる。

$$\delta_{0} = \frac{4K^{4}}{E I \eta_{1}^{3} v^{3}}$$
(2.11)

式(2.11)を式(2.3) に代入して al を求めれば

$$al = l \sqrt[4]{\frac{k}{4EI} + \frac{\eta_1^4 v^4}{16K^4}}$$
(2.12)

となる.式(2.9),(2.12)より分布荷重の幅 l を小さくすれば p は大きくなるが、 al ≪1を満たす v の値が大きくなることがわかる.

式(2.7)の成立する限界を求めると次のようになる.式(2.4)より,al≫1 の条件で分布荷重端におけるたわみ δ₀は

$$\delta_{0} = \frac{\dot{p}}{8 E I a^{4}} \tag{2.13}$$

となり、式(2.7)を近似展開すると次式が求まる.

$$p \doteq 2 v \eta \left\{ 1 + \frac{1}{4} \frac{1 6 \, \ell K^4}{v^4 \, \eta^4 E \, I} \right\}$$
(2.14)

式(2.3), (2.13), (2.14)からalを求めると

$$a\,i = l \sqrt[4]{\frac{\cancel{k}}{4E\,l} + \frac{\eta_1^4\,\upsilon^4}{16\,K^4}} \tag{2.15}$$

となり、式(2.12)と同じ形になる.

pは式(2.6), (2.7), (2.9)で表わされるが、 $l 又は^{k}/EI$ が非常に大 きく、 v = 0の条件で $al \gg 1$ となる場合には、低速域では式(2.6), (2.7) は $p = 2K \sqrt[4]{\frac{4k}{EI}}$ となって v の影響を受けず、v がある程度大きくなって式 (2.6)に接続され、v がさらに大きくなると式(2.7)が適用される範囲とな る、しかしながら、本実験で使用した供試材料では図2.6 および第4章で示 す実験結果からわかるように、式(2.6)が適用される範囲は狭く、pは主とし て式(2.7), (2.9)で示される.

また η_2 が有効に作用する変位速度に対してはマックスウェルモデルが並んだ モデルとなるが,式(2.6),(2.7),(2.9)を導いたのと同様にして解析で きて,ガラス繊維がせん断されるときの分布荷重の強さは式(2.9)で表わされ る.図2.8においてマックスウェルモデルが並んだモデルにおけるx = lで のガラス繊維の軸方向の変位 λ を求める. $x \ge l$ でのたわみ $\delta_{x \ge l}$ は式(2.4) を求めたのと同様にして

 $\delta_{x \ge l} = \frac{p}{8EIa^4} e^{-a(x-l)} \left\{ (1 - e^{-2al}) \cos a(x-l) + 2e^{-2al} \sin al \cos ax \right\} \quad (2.16)$

で表わされる. ただし式中 $4a^4 \equiv \eta_2(1-e^{-\frac{4}{\eta_2}})$ であり、 また t は荷重が作用 しはじめてからの時間である. このとき軸方向の変位 λ は

$$\lambda = \frac{1}{2} \int_{l}^{\infty} \left(\frac{d \, \delta_{x \ge l}}{dx}\right)^{2} dx = \left\{\frac{p}{8EIa^{4}}\right\}^{2} \frac{a}{8} \left\{3 + e^{-2al} \left(-6 + 6\sin 2al + 4\sin^{2}al\right)\right\}$$

 $+e^{-4al}(3+4\cos 2al\sin^2 al-6\sin 2al+4\sin^2 al\sin 2al+4\sin^2 al)\}(2.17)$

$$= 6 \left\{ \frac{p_l}{8EI} \right\}^2 \left\{ \frac{4EIt}{\eta_2} \right\}^{5/4}$$
 (2.17)'

となる、実際の切削では、多数のガラス繊維が平行にはいっていて、切れ刃に よって破断されるが、第4章で述べる切削部断面の観察から、破断後のガラス 繊維と樹脂は一体となっている、切削の進行に伴い、破断後のガラス繊維は破 断時の接触圧で刃先丸味部を擦過し、ガラス繊維を支持している樹脂は粘弾性 挙動を保持すると考えられる。そこで破断後のガラス繊維のたわみが式(2.16) で表わされると仮定すると、軸方向の変位も同じく式(2.17)で表わされる。 したがってガラス繊維が破断されてから刃先丸味部を擦過中の変位量増分 4 λ は低速ほど大きくなる。

2.5 結 言

GFRP切削時の工具摩耗の挙動および切削状態を調べるために、ガラス繊維強化エポキシ樹脂の低速二次元切削と旋削を行ない、さらにその結果をもと にGFRPを弾性体と三要素モデルの粘弾性体に置き換えて、ガラス繊維の挙 動を理論的に解析した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) GFRP切削時の工具摩耗は三つの領域に分けられる. すなわち, 切削 速度に関係なく一定で小さい領域(第1領域), 切削速度とともに急激に増加 する領域(第2領域)および切削速度に関係なく一定で大きい領域(第3領域) である.

(2) 工具とガラス繊維の接触圧は、切削速度に比例して増加する条件下では、 分布荷重の幅は関係なく、分布荷重の幅に反比例する条件下では、切削速度の 影響はない。

(3) 分布荷重の幅が小さくなると、工具とガラス繊維の接触圧は大きくなるが、接触圧が分布荷重の幅に依存する切削速度域は広くなる.

(4) 極低速域では工具丸味部を擦過しているガラス繊維の軸方向の変位増分

参考文献

1

(1) 津枝,長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1813.

١,

(2) 長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1821.

.

第3章 低速切削時の工具摩耗の機構

3.1 緒 言

前章において,GFRP切削時の工具摩耗は三つの領域に分けられることが わかった。すなわち,第1領域の低速域では工具摩耗は切削速度に関係なく一 定でしかも小さく,高速の第2領域では切削速度にほぼ比例し,第2領域より さらに高速の第3領域では切削速度に関係なく一定で大きくなる。また,ガラ ス繊維の挙動を理論的に解析した結果,ガラス繊維の変形速度および工具と被 削材中のガラス繊維との接触長さが工具摩耗に影響することも明らかになった。

本章では、低速域すなわち第1領域における工具摩耗の機構を明らかにする ため、ガラス繊維強化エポキン樹脂の低速二次元切削を行なって、工具摩耗に 対する切込み、すくい角、切削速度、ガラス繊維の方向の影響を調べ、その結 果を第2章で求めた理論解析結果と比較検討すると同時に、すくい角の影響に ついては変形速度についても調べた。

3.2 実験方法

本章で用いた実験装置および切削方法は前章の低速二次元切削の場合と同様 である.ただ16mm/min 以下の切削速度は本装置では与えられないので、テ ーブル上に別に駆動用電動機(0.2 kw, 1420 rpm)を設け、二個の滅速機 (滅速比: 1/10, 1/30)を介してテーブルを駆動した.変速は二個の滅速機間 のVベルト車の直径の比を変えることによって行なった.被削材は前章の低速 二次元切削で用いたガラス繊維強化エポキン樹脂のほかに、ガラス繊維含有率 の影響を調べる実験ではガラス繊維含有率がそれぞれ50,60,70%のガラ ス繊維強化エポキン樹脂(ガラス繊維さ有率がそれぞれ50,60,70%のガラ

変形速度の測定には、被削材側面にフォトエッチング法の手法を用いて、

0.092 mm間隔の格子線を焼き付けた被削材を用いた. 格子線焼き付けの大要 は次の通りである. 感光液として水溶性のPVA感光液(重合度 500 ポリビ ニルアルコール粉末8 多水溶液+重クロム酸アンモニウム15 g +表面活性剤 少量)を用い,被削材側面に薄く塗布する. 乾燥後,真空焼枠中で格子原板と 密着させ,紫外線により感光する. 流水中で現像を行ない,その後, 10 多無 水クロム酸水溶液中で硬膜処理を行なって完了する. 実験に際しては格子線を 焼き付けた被削材をガラス板とともにバイスに固定して切削を行ない,格子の 変形を顕微鏡で10倍に拡大して高速度カメラで連続的に撮影した. 観察の結 果,被削材表面の各点の変位が破断まで連続的であったので,この連続写真か ら各点の変位を時間の関数として4次式で近似し,最小自乗法によりその係数 を定めた. このようにして求めた4次式を時間に関して微分し,破断時刻にお ける導関数の値を求め,その点の破断時の変位速度とした.

摩耗量としては逃げ面摩耗幅のほかに刃先後退量,切れ刃単位長さ当りの摩 耗体積も測定した。刃先後退量の測定および摩耗形態の観察には完全焼鈍した アルミニウム片に刃先を押し込み,刃先の形状を写し取って,これを埋込用樹脂 に埋込んでバフ加工後,写真撮影して行なった。表3.1に工具形状を,表3. 2に切削条件を示す.

表3.1 工具形状

表3		2	切削条	件
	-		~~	

すくい角 α°	10,20,30	切削速度(mm/min)	1.2~2000
逃げ角 r°	11	切削距離(m)	5
刃先丸味半径(µm)	5	切 込み (mm)	0.1~2.0

3.3 実験結果

3.3.1 切削速度の影響

切込み、切削距離を一定としたときの切削速度と摩耗量の関係を図る.1に



切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 工具: SKH4 図 3.1 切削速度と工具摩耗量の関係

示す.摩耗量としては逃げ面摩耗幅と刃先後退量をとった.逃げ面摩耗幅は切 削速度が約0.1^m/minまでは切削速度とともに急激に増加し,それ以上ではほ ぼ一定となる.同じ摩耗状態を刃先後退量でみると,データのばらつきの範囲 内で一定値を示している.この時の逃げ面摩耗部とすくい面摩耗部の一例を図



1.0 mm

(a) すくい面摩耗部

(b) 逃げ面摩耗部

切削速度: 396mm/min, 切込み: 0.3mm 切削距離: 5m, すくい角: 10°

図3.2 工具摩耗状態

3.2に, 完全焼鈍したアルミニ ウムに写し取った摩耗部の断面を 図3.3に示す.すくい面には摩 耗痕が観察されるが,摩耗量とし ては小さく,クレータ摩耗も生じ ていない.これは切削運動方向に はいっているガラス繊維によって 生じるが,切削運動方向のガラス 繊維は切れ刃によって容易に堀り 起こされ破壊することによる.こ れに対して逃げ面には激しい摩耗



100 µm

切削速度:396^{mm/}min,切込み:0.3mm 切削距離:5m, すくい角:10°

図3.3 工具摩耗部断面

が生じ,逃げ面摩耗幅は図3.2(b)に認められるように周期的に変動している. 図2.3からもわかるように,逃げ面摩耗は切込み方向にはいったガラス繊維 が切れ刃によって破断された後,刃先丸味部から逃げ面にかけて擦過すること によるもので,摩耗幅の周期的な変動は平織状のガラス繊維が被削材中に積層 されているために生じ,逃げ面摩耗幅の大きい部分が積層されたガラス繊維の



切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 工具: SKH4 図 3.4 切削速度と摩耗面の傾きβとの関係

部分に対応している.また摩耗面が切削運動方向となす角度が切削速度により 変化しているので,この角度を測定した.その結果を図3.4に示す.摩耗面 の角度は逃げ面摩耗幅が急変する切削速度0.1^m/min以下では大きく,それ以 上の切削速度ではほぼ一定の値となっている.これは逃げ面摩耗幅が急変する 極低速域で摩耗形態が変化することを意味し,後述するようにガラス繊維の軸 方向の変位量増分が大きく影響している.

3.3.2 すくい角の影響

図3.5は側面に格子線を焼き付けた ガラス繊維強化エポキシ樹脂を、すくい 角を変えて切削した際に観察される格子 変形状態および切りくず生成状態を示す スケッチである(写真不鮮明のためスケ ッチで示す)。図からわかるように、工 具すくい面と切りくずとの接触長さはす くい角によって差があり、すくい角が大 きいほど短かくなっている。また格子の 変形はすくい角が小さいほど大きく、し かも変形領域は刃先前方に広がっている。 3.2で述べた方法により求めたすくい 角10°の場合の変位曲線を図3.6に示 す.変位量はガラス繊維部では大きく, 樹脂部では小さくなっている。図3.7 は切れ刃レベル上の各点が破断するまで に示した切削運動方向の最大変位速度で ある。大きな変位速度を示す部分がガラ



(a) すくい角 30°



(b) すくい角 20°



(c) すくい角10°
 切削速度: 19mm√min
 切込み: 0.3mm

図3.5 切りくず生成状態

ス繊維部であり,変位速度 の低い部分は樹脂部である. ガラス繊維部の変位速度は 明らかにすくい角によって 差があり,20°が最大であ り,30°,10°は同程度で あって,20°より低い値を 示している.

図3.8はすくい角を変 えたときの工具摩耗の変化 を切込みをパラメータにし て示したものである。(a)図 は刃先後退量,(b)図は切れ



切削速度:19mm/min,切込み:0.3mm すくい角:10°





切削速度: 19mm/min,切込み: 0.3mm

図3.7 切れ刃レベル上の各点の最大変位速度



切削速度:19mm/min,切削距離:5m 図3.8 すくい角と工具摩耗の関係



工具形状(0, a, 6, 6, 15, 15, 0.5), 切削速度: 500m/min,切込み. 1.0mm,送り: 0.2mm/rev, 切削距離: 500 m

図3.9 旋削における工具摩耗

因の単位幅あたりの摩耗体積を示す。因先後退量,摩耗体積とも同じ傾向を示 しており、実験の範囲内ではすくい角を大きくすれば工具摩耗は大きくなって いる。また切込みを大きくすると工具摩耗は小さくなっている。比較のために、 旋削で横すくい角を変えた場合の工具摩耗を図3.9に示す。被削材中のガラ ス繊維の方向と切れ刃の相対位置は二次元切削の場合と異なるが、工具摩耗は 同傾向を示している。また津枝、長谷川ら⁽¹⁾のフライス削りでも同様な傾向を 示すことが報告されている。

3.3.3 切込みの影響

工具摩耗に対するすくい角の影響として,工具と被削材中のガラス繊維との 接触長さが大きく関係していることが明らかになった。したがって切削速度 19mm/min の場合の図3.8のように,切込みを変えると工具と被削材中の ガラス繊維との接触長さの効果が一層明確になる。図3.8では0.5mmまでの 切込みであったが,切込み範囲を2.0mm まで広げてその効果を調べた。極低

速域の10,30 mm_{min}, 第1領域 の732mm/minの場 合の切込みと逃げ面 摩耗幅の関係を図3. 10 に示す。図から わかるように、切込 みが小さくなるほど 工具摩耗は大きくな っていることがわか る。比較のために用 いたガラス繊維強化 フェノール樹脂の場 合にも、同様の傾向 が観察された。図3. 10 は切削速度 732mm/min までの結果であったが、第4

章で示すようにこの効果は第 1領域のさらに高い切削速度 でも観察された.

図3.11はガラス繊維の状態がすだれ織状になっている ガラス繊維強化エポキン樹脂 の場合の切込みと逃げ面摩耗 幅の関係である。切込み0.1 mmまでは切込みの増加にした



切削距離: 5m, すくい角: 10°, 切込み: 0.3mm 図3.10 切込みと逃げ面摩耗幅の関係



切削距離:5m, ガラス繊維含有率:50% 工具:SKH4, すくい角:10°

図3.11 切込みと逃げ面摩耗幅の関係

-26-

がい,逃げ面摩耗幅は減少し,図3.10 と同様の傾向を示しているが,0.1 mm以上になると逃げ面摩耗幅は大きくなる.この傾向は切削速度732mm/min の場合に特に顕著である.この切削速度においては切込みが0.1mm以上になると,3.3.5で述べるようなびびりが発生することから,びびりが大きく影響しているものと推察される.200mm/min の場合にもびびりは発生するが,間欠的であり,その影響は小さいと思われる.

3.3.4 ガラス繊維の方向の影響

図3.12はガラス繊維の 方向が工具摩耗に及ぼす影 響を二次元切削によって調 べたものである。すなわち、 切れ刃と平行な軸のまわり に被削材を適宜回転させて 切削を行なった。図中の0° (90°)の状態がこれまでの 実験に対応するガラス繊維 の方向である。図より角度 0°の近傍が工具摩耗最大で あり、45°において最少に なっていることがわかる。 しかもその差はかなり大き

い.しかし工具の摩耗形態



切削速度:30^{mm}/_{min},切込み:0.3mm 切削距離:5m , 工具:SKH4 すくい角:10°

図3.12 ガラス繊維の方向と逃げ面摩 耗幅の関係

を調べたが,差は認められなかった。図3.13 はガラス繊維の方向と切削抵抗の関係である。GFRP切削時の切削抵抗は変形領域および擦過領域における接触荷重と摩擦力によって決まるが,代表的なガラス繊維の方向をとって切削距離と切削抵抗の関係をみると図3.14に示すようになり,この図より切削

距離による主分力の変動は 小さく, また背分力が増加 していることがわかる.し たがって切削抵抗は摩擦力 の影響をほとんど受けず, 主に接触荷重によるものと 考えられる.図3.12 お よび図3.13 より認めら れるように,ガラス繊維の 方向が変化した場合,切削 抵抗と工具摩耗の変化が同 様の傾向を示しているが, これはガラス繊維の方向が 変化することによって,工



.

切削速度:30^{mm}/_{min},切込み:0.3 mm 工具:SKH4 ,切削幅:6mm すくい角:10°

図3.13 ガラス繊維の方向と切削力 の関係



切込み: 0.3mm, 切削速度: 30mm/min, 工具: SKH4 すくい角: 10°

図3.14 切削距離と切削抵坑の関係

具を擦過する時の接触荷重が変化することによるものと思われる.

3.3.5 ガラス繊維含有率の影響

切込みを0.1 mm, 切削距離を5 mとし, ガラス繊維含有率を50, 60,70 %と変化させた場合の切削速度と工具摩耗量の関係を図3.15 に示す. 逃げ



切込み: 0.1mm,切削距離: 5m, すくい角: 10°, 工具: SKH4

図3.15 切削速度と逃げ面摩耗幅の関係

面摩耗幅, 刃先後退量ともカラス繊維含有率が増加すると大きくなっているが, この傾向は逃げ面摩耗幅において特に顕著である.逃げ面摩耗幅は極低速域では 切削速度とともに急激に増加し, それ以上ではゆるやかになっている.この傾 向はガラス繊維含有率70%の場合に顕著である.刃先後退量は70%の場合 が一番大きく, 60, 50%では70%に比べると小さいが, 60%の場合がわ ずかに大きくなっている.またガラス繊維含有率50, 60, 70%の被削材を 切削する際に,切削速度がそれぞれ732, 396, 200^{mm}/min 以上になると



(a) 切削面

(b) 切削断面

切削速度: 732^{mm}/min, 切込み: 0.1mm, 切削距離: 5m すくい角:10°

図3.16 びびり発生時の切削面

びびりを発生した. 図3.16 はびびりを発生したときの切削面の状態および 断面形状の一例を示したものである. 図はガラス繊維含有率70%, 切込み0.1 mm, 切削速度732^{mm/}minの場合で,(a) 図が切削面状態,(b)図が断面形状 である. 切削面には周期的なびびりマークが観察され, 劣悪な仕上面となって いる. これを断面形状でみると,びびりによって表面からとび出したガラス繊 維が破断していることがわかる. これはびびりによって切り残されたガラス繊 維が逃げ面に押し込まれ,工具とガラス繊維の接触荷重が大きくなり破損した ものと考えられ,その結果,工具摩耗も大きくなると推察される. 図3.15 において刃先後退量が急激に変化する切削速度とびびりの発生し始める切削速 度が対応していることからもわかる.

本実験に使用した被削材はすだれ織状のガラス繊維が積層されており、積層

-30 -
数は70%で13層,60%,50%でそれぞれ9層,6層とないっていて,一本のガラス繊維束の切削方向の長さはそれぞれ3.8,3.7,3.6mmである。 したがって切れ刃がガラス繊維部を切削する距離はガラス繊維含有率が大きい ほど長く,工具摩耗も大きくなったものと推察される。

3.4 理論解析結果との比較検討

前節の実験結果から,低速域(第1領域)の工具摩耗は極低速域で摩耗形態 が変わるほかは切削速度の影響を受けず,工具とガラス繊維との接触長さに影 響を及ぼす切込みとすくい角が大きく影響していることがわかった。ここでは 低速域におけるこのような実験結果を第2章で求めた理論解析結果と比較検討 する。

一般にGFRP切削時の工具摩耗はざらつき摩耗と考えられ、摩耗幅 h は次のように表わされる⁽³⁾⁽⁴⁾

 $h = A \tan \theta \, P_{\perp} L / H \tag{3.1}$

とこで, A は定数, θ は接触面のあらさによって決まる定数, P₁は接触圧力, L は摩擦距離, H は材料の硬さである.式(3.1)において, 摩耗幅 h は接触 圧力,摩擦距離に比例して増加し,材料の硬さに反比例する.したがって,同 一の工具と被削材の組み合わせては工具摩耗は摩擦距離と接触圧力で決まる.

本実験の二次元切削のようにガラス繊維が切れ刃と直角にはいっている場合 には、図2.3に示したように、切れ刃によってガラス繊維が破断されるが、 破断されたガラス繊維が切れ刃を擦過してゆくとき、平行にはいったガラス繊 維でまだ破断されていないガラス繊維が前方に存在するため、このガラス繊維 が破断したガラス繊維の変形状態を保っていると考えられる。この時ほぼ切削 運動方向のみの力で保たれ、その力は式(2.8)の関係に従うと考えられる。ま た切れ刃には丸味が存在するから、破断されたガラス繊維がこの丸味部を擦過 するときには、丸味部には法線方向の力が生じる. この力も式(2.8)の関係に 従うと考えられる. したがって、ガラス繊維と工具すくい面の接触長さが工具 摩耗に及ぼす影響は図2.9の形で表わされる. 図3.1, 図3.8 および図3 10の実験結果は切削速度が小さく、また工具摩耗に対してもその影響がない ことから、低速二次元切削の範囲は al の小さい範囲である. したがって接触 Eは式(2.9)で表わされ、工具摩耗はこの接触長さの機構で支配されていると 考えられる. このほかに、長谷川、花崎⁽⁴⁾は工具と被削材の接触面積の効果が あることを報告している. この効果は工具と被削材の接触面積の増加がマトリ ックスの変形をなめらかにする結果、ガラス繊維と刃先との間の接触圧が高く なる効果である. 本実験において切込みを大きく、もしくはすくい角を小さく すれば、ガラス繊維が工具から力を受ける部分の長さが増加すると同時に、工 具と被削材の接触面積も増加するため、工具と被削材の接触面積の効果も存在 するが、接触長さの効果のほうが大きくて図3.8 および図3.10のような結 果になったものと考えられる.

図3.1では極低速域で工具摩耗の形態が変化するほかは切削速度の影響は なく、式(2.9)に従って理論解析結果とも一致する.工具摩耗形態が変化する 極低速域では、図2.8のモデルにおいて η₂が有効となる粘性の大きなダッシ ュポットとばねが直列に組合さったマックスウェルモデルが並んだ力学モデル が適用できる。すでに述べたように、実際の被削材では多数のガラス繊維が平 行にはいっているので、破断後のガラス繊維も未破断のガラス繊維と同様の挙 動を示すものと考えられる。そこで破断後のガラス繊維のたわみが式(2.16) で表わされると仮定すれば、ガラス繊維の軸方向の変位は式(2.17)で表わさ れる。切削速度が小さくなると被削材中のガラス繊維の変形速度も小さくなり、 ガラス繊維が破断した後、刃先丸味節を擦過するに要する時間は低速切削低ど 大きくなる。したがって、式(2.17) より、ガラス繊維が刃先丸味部を擦過す る際の軸方向変位量の増分は、切削速度が小さくなるにつれ、増加する。一方、

-32-

工具とガラス繊維の接触圧は式(2.9)によって表わされ、図3,1の実験結果 でも刃先後退量はほぼ一定となっている。その結果、η₂が有効となる極低速域 では摩耗面の角度が大きくなり、また逃げ面摩耗幅も小さくなるものと推察さ れる。

またすだれ織状のガラス繊維で積層されたガラス繊維強化エボキシ樹脂では びびりを発生し、劣悪な切削面を形成するばかりでなく、工具摩耗にも大きく 影響している。これは黄銅などのような不連続切りくずの発生を伴う場合に生 じる切りくず生成の周期性に起因するびびりと類似している⁽²⁾すなわち、前章 で述べたように、ガラス繊維部は数回にわかれて周期的に破断し、不連続切り くずを発生しているが、これによってびびりが発生するものと推察される。

3.5 結 言

GFRPの低速二次元切削を行なって第1領域の工具摩耗の挙動を明らかに し、その結果を理論解析結果と比較検討した。おもな結果は次の通りである。

(1) 工具とガラス繊維の接触長さが工具摩耗に大きな影響をもつところでは、 ガラス繊維の変位速度(すなわち切削速度)は影響がない。

(2) 極低速域で工具摩耗面と切削運動方向のなす角が切削速度の低下ととも に大きくなる切削速度領域がある。

- (3) 被削材中のガラス繊維の方向が工具摩耗に影響する。
- (4) ガラス繊維含有率が増加すると工具摩耗も大きくなる。

参考文献

- (1) 津枝,長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1813.
- (2) 星:びびり現象,工業調査会(1977), 95.
- R.T. Spurr, T.P. Newcomb : Inst. Mech. Engr. Proc. Conf. on Lubrication and Wear (1957), 269.

(4) 長谷川,花崎:日本機械学会論文集, 34, 266(1968), 1821.

<u>(</u>

第4章 高速切削時の工具摩耗の機構

4.1 緒 言

第3章ではGFRPの低速二次元切削を行ない,切削速度,切込み,すくい 角,ガラス繊維の方向などの切削条件が第1領域における工具摩耗に及ぼす影 響を力学モデルを用いた理論解析結果と対比させて検討した。その結果,第1 領域の工具摩耗は変位速度の影響を受けず,工具と被削材中のガラス繊維との 接触長さに大きく依存していること,極低速域では摩耗形態が変化すること, ガラス繊維の方向が工具摩耗に影響することおよびガラス繊維の含有率が増加 するに従い工具摩耗も大きくなることを明らかにした。

本章では平織状のガラス繊維がはいった円板材およびパイプ材を用いて旋削 を行ない,切削速度,切削距離,送り量およびガラス繊維含有率を変化させた 場合の工具摩耗量および摩耗形態を調べ,その結果を第2章の理論解析結果と 比較して,第2領域と第3領域の工具摩耗機構と第2領域から第3領域に移る 遷移領域について検討した。

4.2 実験方法

本章で用いた実験装置は第2章の旋削の場合と同様である。被削材は第2章 で用いたパイプ材と円板材を用いた。またガラス繊維含有率を調べる実験では 前章の二次元切削で用いたのと同一の材料を4~5板重ねて円板材とした。円 板材ではパイプ材の場合の送り量のように,第2章で述べた/に相当する量が 明確でない。すなわち,工具に対するガラス繊維の方向および接触状態が切れ 刃の場所によって変化するだけでなく,平織状あるいはすだれ織状にはいった ガラス繊維のため,被削材1回転中に平織状のガラス繊維では4回,すだれ織 状のガラス繊維では2回周期的に変化する。使用工具は超硬合金P10とサー メットで,工具形状を表4.1に示す。

表4.1 工具形状

被削材 工具	パイプ材	円板材
超硬合金P10	(0,6,6,6,8,0,0.5)	(0,6,6,6,15,15,0.5)
サーメット	(0,6,6,6,15,15,0.5)	

被削材を主軸に固定して外 丸削りを行ない, 表4.2に 示すように, 切削速度, 切削 距離, 送り量を変化させて工 具摩耗量, 摩耗状態および被 削材の切削状態の変化を調べ

表 4.2 切削条件

切削速度 V(m/min)	1~332
切削距離L(m)	100~300
切 込みt (mm),	1.0
送 りf (mm/rev)	0.075~0.354

た.摩耗量としては工具先端から 0.6 mm の位置での横逃げ面摩耗幅をとり、 摩耗部の断面曲線をあらさ計(東京精密製サーフコム)で測定した.また外丸 削りを途中で停止し,切削部を切込み方向と送り方向を含む平面で切断した切 削部断面写真をとって,被削材の切削状態を調べた.

4.3 実験結果

4.3.1 切削速度の影響

図4.1は切込み,送り,切削距離を一定としたときの切削速度と逃げ面摩 耗幅の関係である.いずれの場合にも類似の摩耗特性を示している.すなわち, 第2章で述べたように,工具摩耗は切削速度に関係なく一定で,しかも小さい 低速の第1領域,切削速度とともに急激に増加する第2領域,そして第2領域 よりさらに高速での工具摩耗一定の第3領域に分けられる.ただ,超硬合金P 10 で円板材を切削した場合に第1領域が広いこと,またサーメットでパイプ 材を切削した場合に第3領域での水準が第2領域の極大点よりかなり低いこと などの点に差が認められる.

-36-



切込み:1.0mm,送り:0.177^{mm/}rev, 切削距離:300m

図4.1 切削速度と逃げ面摩耗幅の関係

上述の三つの領域の摩耗形態を図4.2に示す. 図において左端が第1領域, 中央が第2領域,右端が第3領域である. 超硬合金P10 ではパイプ材,円板 材とも第1領域では逃げ面にもすくい面にも摩耗はほとんど観察されないが, 第2領域では逃げ面に大きな三角形状の摩耗が観察される.また第3領域では 切れ刃に倒ま平行な摩耗が逃げ面に生じている.サーメットでも同様の傾向を示 しているが,P10 に比較して第2領域,第3領域の刃先後退量が大きくなっ ている. このことをさらに明らかにするために,あらさ計によって摩耗部の断 面曲線を調べた.その結果を図4.3に示す. P10 では第1領域の摩耗部断 面曲線にはほとんど変化がなく,摩耗していない工具断面に近い形状となって いるが,第2領域では逃げ面摩耗が大きく,しかも刃先後退量もわずかに生じ ている.第3領域では逃げ面摩耗幅は第2領域ほど大きくないが,刃先後退量 が非常に大きくなっていて,しかもその大きさは送り量にほぼ等しい.サーメ









V = 2	V = 44	V = 103
	(c) サーメット(パイプ材)	
切込み: 1.0mm,	送り: 0.15mm/rev, 切削距離:	300 m

図4.2 工具摩耗形態

ットの場合にも, ほぼ同様の傾向となっている. 図4.4 は三つの領域に対応 する切削速度でパイプ材を外丸削りし, 切削を途中で停止して, 切削部を切込 み方向と送り方向を含む平面で切断した切削断面写真である. 図より, 第1領 域および第2領域では, ほぼ工具形状通りに切削されていて, 切削面からのガ ラス繊維の突出はほとんどない. それに対して, 第3領域に属する103^m/min

-38-





では、ガラス繊維が切削面から多少突出しており、工具形状通りの切削が行なわれていない。さらに樹脂部にクラックがはいり、ガラス繊維と樹脂が剝離している。

4.3.2 送り量の影響

第2章では第1領域における工具摩耗は工具と被削材中のガラス繊維との接触長さの影響を受けることが明らかになったが、この接触長さに相当する量は パイプ材の旋削の場合、1回転あ

たりの送り量に相当する.そこで 各領域に属する切削速度,すなわ ち第1領域の7,第2領域の50, 第3領域の103^m/min について, 送り量を変えた実験を行なった. 図4.5 にその結果を示す.第1 領域に属する切削速度では送り量, すなわち接触長さが短かくなるに つれ,工具摩耗は増加していて, 第2章で述べた理論解析結果およ び第3章の実験結果とも一致する. 第2領域に属する50^m/minでは 図4.5(a)の切割距離300m で は接触長さの影響があるようにみ えるが,(b) 図に示す通り、切削距



図4.5 送りと逃げ面摩耗幅の関係

離100mではその影響が認められない。(a)図の結果は次のように考えられる。 切削距離100mまでは力学モデルに近い状態で切削されているが,切削距離が 長くなると工具摩耗は進行し,刃先後退量も大きくなる。小さい送りの場合に は送り量が刃先後退量と同程度になって,ガラス繊維が破断するより逃げ面側

-40-

に押し込まれる傾向が強くなり、それまでの切削状態とは異なった状態になる. 大きい送りの場合と比較して摩耗形態、摩耗量も異なってくるので、直接比較 できないことを意味する。第3領域に属する103^m/min では接触長さに関係 なくほぼ一様な工具摩耗になっている。図4.1、図4.5の実験結果によれば、 この領域では切削速度および工具と被削材中のガラス繊維との接触長さはとも に工具摩耗に影響を及ぼさない。図4.5では各領域の特定の切削速度に対し て接触長さを変化させたが、図4.6は低速域で工具摩耗に差のある接触長さ



切削距離: 300m, 切込み: 1.0mm, 工具: P10, 被削材: パイプ材

図4.6 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

(パイプ材の旋削での1回転あたりの送り量)2水準を選んで、切削速度を変 化させたものである. この図においても、工具摩耗は三つの領域に分けられ ることならびに第1領域で接触長さが小さいほど工具摩耗が大きくなることが わかる.しかし、第2章の理論解析で明らかになった第1領域での接触長さが 小さいほど、工具摩耗一定の切削速度範囲が広いという結果は、データのばら つきもあって、この図からは明らかでない。

4.3.3 切削距離の影響

÷.,

前節までの結果から、第2領域と第3領域では工具摩耗の挙動が異なること

がわかった.すなわち,第2領域では切削速度の影響が大きく,送り量の影響 は切削距離が長く,しかも送り量が小さい場合以外はその影響が少ない.これ に対して第3領域では切削速度と送り量の影響はなく一定で,刃先後退量が大 きく,被削材の切削面にはガラス繊維の突出が観察され,樹脂とガラス繊維も 分離している.このような挙動をさらに明らかにするため,切削距離を変化さ せた時の工具摩耗,被削材の切削断面,摩耗部断面曲線を調べた.



図4.7 切削距離と横逃げ面摩耗幅の関係

切削速度,切込み,送りを一定とした時の切削距離と横逃げ面摩耗幅の関係 を図4.7に示す.いずれの場合も同様の傾向を示し,初期摩耗後漸増してい る.第2領域と第3領域の代表的な切削速度50,200m/minの場合の摩耗部 断面曲線と被削材の切削断面写真をそれぞれ図4.8,図4.9に示す. 第2 領域では刃先後退量の進行より逃げ面摩耗の進行が大きく、切削面は工具形状

どおりの切削が行なわれ、樹 脂とガラス繊維の分離もほと んどない。これに対して第3 領域における刃先後退量は第 2領域のそれに比べて非常に 大きく、切削が進行するに従 い増加し、ついには送り量に 等しくなる. また被削材の切 削面は切削初期では第2領域 と同じように工具形状どおり の切削が行なわれているが、 切削距離が 50m 以上では樹 脂とガラス繊維の分離が起こ り、ガラス繊維は切削面から 飛び出している。比較のため に超硬合金K10を用いた切 削速度 200^m/min, 切削距 離200mの場合の被削林の切 削断面を図4.10に示す。第 6章で示すように、K10 で



図4.8 摩耗部の断面曲線

はこの条件は第2領域に属する。図から明らかなように、切削速度200m/min の場合でもほぼ工具形状どおりの切削が行なわれている。したがって第3領域 は切削速度により決まるのではなく、工具摩耗の進行状態で決まると考えられ る。そこでサーメットを用いて、切削距離100mと200mの場合の切削速度 と横逃げ面摩耗幅の関係を調べた。その結果を図4・11に示す。 両方の場合 とも切削速度に対する工具摩耗特性は同様の傾向を示しているが、第2領域か



切込み:1mm, 送り:0.15^{mm}/rev, 工具:P10 lmm

図4.9 切削断面

-44-



図 4.10 切削断面

0.5mm

切込み:1.0mm,送り:0.15mm/rev 切削速度:200m/min,切削距離:200m,工具:K10



切込み:1mm,送り:0.15mm/rev,工具:サーメット

図4.11 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

ら第3領域に移る切削速度が切削距離100mの場合が高速側になっており,上述のことを裏付けている。

4.3.4 ガラス繊維含有率の影響

第3章で明らかにしたように、低速切削時の工具摩耗に及ぼす ガラス繊維含



切込み: 1.0 mm,送り: 0.096 mm/rev,切削距離: 200 m,工具: P10

図4.12 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

有率の影響はガラス繊維含 有率が大きいほど,工具摩 耗は大きくなる.ここでは ガラス繊維含有率がさらに 高速の工具摩耗特性に及ぼ す影響について調べた.

ガラス繊維含有率をパラ メータとした時の切削速度 と横逃げ面摩耗幅の関係を 図4.12に示す. いずれ の場合とも,これまでの結 果と類似の摩耗特性を示し ており,またガラス繊維含 有率が大きいほど工具摩耗



切込み: 1.0 mm,送り: 0.096^{mm/}rev, 切削距離: 200m,工具: P10

図4.13 工具摩耗部断面曲線

-46-

は大きくなっているが,ガラス繊維含有率50%と60%の場合には図3.14 のような差はなく,ほぼ同程度である。またガラス繊維含有率70%の場合に は50,60%の場合と比較して,第2領域から第3領域への遷移域が低速側に 移動している。この時の各領域の代表的な切削速度における摩耗部断面曲線を 図4.13に示す。第1領域では逃げ面摩耗も刃先後退量も小さく,第2領域 では刃先後退量に比べて逃げ面摩耗幅が大きく,また第3領域では刃先後退量 が非常に大きくなっていて,これまでの結果と同様である。

4.4 理論解析結果との比較検討

前節の実験結果から第2領域と第3領域では工具の摩耗挙動が異なることが わかった.すなわち,第2領域では工具摩耗は接触長さの影響をうけず,切削 速度に依存していて三角形状の摩耗形態を呈し,しかも被削材の切削面はほぼ 工具形状どおりの切削が行なわれている.これに対して第3領域では工具摩耗 は接触長さ,切削速度に関係なく一定で,切れ刃にほぼ平行な摩耗形態となり, 刃先後退量も非常に大きく,送り量にほぼ等しくなっている.また被削材の切 削面では樹脂とガラス繊維が分離して,ガラス繊維が切り残され,ガラス繊維 が切削面から突出している.このような結果を第2章の解析結果と対比させる と次のようになる.

解析結果によると,接触圧 p は al の小さい範囲では変形速度の影響はなく, 工具と被削材中のガラス繊維との接触長さに依存するが,第3章の低速二次元 切削の実験結果は解析結果と合致した。旋削においても,第1領域では図4.5 図4.11 に示すように,同様の傾向が観察された。alが大きくなり,しか も変形速度が大きくなると,図2.8のモデルにおいて η,が有効となり,切削 時の工具とガラス繊維の接触圧は式(2.7)によって表わされ,変形速度にほぼ 比例する。式(2.7)が有効となる範囲では al の値が大であり,接触長さは接 触圧に影響しない。被削材の切削断面の観察によると,第2領域ではガラス繊

-47-

維と樹脂の分離はなく, ほぼ工具形状どおりの切削が行なわれ, また刃先後退 量も大きくないことから, この領域では図2.8のモデルが適用できる. した がって, 第2領域における工具摩耗は式(2.7)に支配される. この領域の存 在はフライス削りを行なった長谷川, 花崎ら⁽¹⁾⁽²⁾の結果あるいはガラス繊維と 樹脂の混練物を射出する際のノズルの摩耗を解析したW.D. Mahler⁽³⁾の結果と も一致している.またこの領域では図4.5, 図4.11に示すように, 工具摩 耗は工具とガラス繊維の接触長さの影響をうけていない.理論解析の結果によ れば, 第2領域では原点を通る直線に近い増加を示している. 一方実験結果を みると, パイプ材に対してP10, サーメットを使用した場合はほぼ合致して いるが, 円板材に対してP10を用いた場合は第2領域で急増していて, 原点 を通る直線からずれている. パイプ材も円板材も構成材料は同じであり, 工具 に対するガラス繊維の方向が力学モデルからずれていることも理由と考えられ る.

第2領域よりさらに高速の第3領域は第2章の解析結果からはでてこないも ので、長谷川、花崎⁽²⁾のフライス削りにおいても実験的にその存在は認められ なかった。切削断面写真の例で示したように、この領域では切削部のガラス繊 維と樹脂が分離しており、第2章の力学モデルでは表わされない状態になって いる。また切削面からガラス繊維が飛び出した状態になっていることは 500 m/min以上の高速切削を行なった井上、井戸⁽⁴⁾も報告している。しかしながら、 図4.9から明らかなように、この領域でも切削初期にはガラス繊維の分離は 起こらず、ほぼ工具形状どおりの切削が行なわれる。比較のために、P10の 場合にガラス繊維と樹脂が分離する切削速度で、超硬合金K10を用いて切削 した時には分離していない。一方刃先後退量は切削初期には小さいが、切削が 進むにつれて大きくなり、送り量にほぼ等しくなる。したがって、この領域に おけるガラス繊維と樹脂の分離は切削速度に依存するのではなく、刃先後退量 によると考えられる。すなわち刃先後退量が小さい切削初期には、ガラス繊維

¥.,.

-48-

と樹脂の分離が起こらず, ほぼ工具形状どおりの切削が行なわれて, 図2.8 の力学モデルが適用でき,工具とガラス繊維の接触圧は式(2.7)に従う.この 領域では変形速度も大きく,工具とガラス繊維の接触圧も大きくなって,逃げ 面摩耗同様,刃先後退量も促進される。切削距離が長くなると,刃先後退量は 送り量にほぼ等しくなり,それまで一体となって切削された被削材は逃げ面摩 耗部に押し込まれる傾向が強くなって,刃先丸味部から逃げ面摩耗部を擦過し ながら押しつぶされる。その結果,ガラス繊維と樹脂は分離し,被削材は完全 に切削されずに,ガラス繊維は切削面から突出したものと考えられる。切削距 離が長い場合あるいはガラス繊維含有率が大きい場合に,第2領域から第3領 域に移る切削速度が低速側に移るのは主としてこのような理由によると考えら れる。

第1領域から第2領域に移り変わる領域は力学モデルではal ≈1 に相当す る部分である。実験結果からみるとこの遷移領域は狭いようであるが,詳細は 第5章,第6章で述べる。

4.5 結 言

本章で得られた主な結果は次の通りである。

(1) 第2領域の工具摩耗は工具とガラス繊維の接触長さには依存せず、変形 速度(切削速度)にほぼ比例して増加する。

(2) 第3領域の工具摩耗はガラス繊維の変形速度および工具とガラス繊維の 接触長さの影響をりけず、一定となる。

(3) 第2領域と第3領域の遷移域は工具摩耗の摩耗状態により決まり、切削 距離が長いほど、またガラス繊維含有率が大きいほど低速側になる。

参考文献

(1) 津枝,長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1813。

(2) 長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1821.

, A

- (3) W.D. Mahler : Kunststoff, 67, 2(1977), 81.
- (4) 井上,井戸:精密機械, 39, 3(1973), 78.

ų.

第5章 切削剤の影響

5.1 緒 言

GFRP切削時には強度の高いガラス繊維によって激しい工具摩耗を生じる が、その挙動は切削条件に大きく依存している。乾式切削時の工具摩耗の機構 については、すでに第3章と第4章で明らかにした。すなわち工具と被削材中 のガラス繊維の接触長さが影響する条件下では、ガラス繊維の変形速度の影響 はなく、ガラス繊維の変形速度が影響する条件下では、工具と被削材中のガラ ス繊維との接触長さは影響を及ぼさない。さらにガラス繊維の変形速度が影響 する第2領域より高速の第3領域では両方の影響がない。このような工具摩耗 特性に及ぼす切削剤の効果については種々の効果が考えられる。金属切削の場 合のような冷却作用や潤滑作用の低かに、切削剤の浸透による被削材強度の低 下あるいはガラス繊維の挙動への影響などがあるが、その報告は少ない。長谷 川、花崎ら⁽¹⁾ は高速切削時には冷却作用や潤滑作用による効果よりも切削剤の 粘性による効果が大きく、粘度の低い切削剤が工具摩耗軽減に有効であると報 告している。またWason⁽²⁾はダイヤモンド工具を用いて切断する際には、切削 液の使用が有効であると述べている。しかしながら、切削剤の使用は切りくず 飛散防止には有効であるが、工具摩耗に対するその効果は不明な点が多い。

そこで本章では、種々の切削剤を用いて低速二次元切削と旋削を行ない、G FRP切削時の工具摩耗特性に及ぼす切削剤の影響を調べ、その効果を検討した。

5.2 実験方法

本章で用いた実験装置および切削方法は第2章の場合と同じである。切削剤の供給方法は低速二次元切削の場合には、切削剤を入れた容器をコラム上に置き、ビニルホースを介して自由落下させ、切削剤が工具すくい面に供給できる

ように取り付け, また旋削の場合にはギアポンプを使用した.供給量の調節は 低速二次元切削の場合には, ビニルホース途中に設けた二枚の締付板を締付け ることにより行ない, 旋削の場合にはギアポンプとノズルの間に設けたバルプ で調節した.

被削材は第2章で用いた材料と同じものを使用したが、旋削の場合には外径 75mm,内径65mm のガラス繊維強化ポリエステル樹脂も用いた。被削材中 のガラス繊維はこれまでのものと異なり、内側と外側の一層にマット状のガラ ス繊維が敷いてあり、中心部は軸方向にのみガラス繊維がはいっている。マッ ト状のガラス繊維は工具に対する相対的な位置関係が明確でないため、実験に 際してはあらかじめ取り除いて、ガラス繊維が一方向にのみはいった中心部で 行なった。使用工具は高速度鋼第4種製完成バイトと超硬合金P10 である。 高速度鋼第4種の工具形状は第2章の場合と同じ形状のものを用い、P10 は スローアウェイ型チップTNP331で、ホルダはN22R-33型である。 表 5.1に低速二次元切削の切削条件を、表5.2 に旋削の場合のそれを示す。

また,被削材温度が工具摩耗 に及ぼす影響を調べるために, 図 5 . 1 に示すような加熱装置 を用いた切削実験も行なった. この装置は円筒の外側にアスペ ストを巻いて,その上をガラス ウールチューブで絶縁されたカ ンタル線で巻き,外筒を介して 被削材を取り付けたもので,カ ンタル線の両端子は内筒の中心 部を通ってスリップリングに接 続される.電源にはスライダッ

表5.1 低速二次元切削の切削条件

切削速	度(mm/ _{min})	3~2000
切 込	み(mm)	0.3
切削距	離(m)	5,10
切削剤供給	3量(^{с с} ∕ _m)	170

表5.2 旋削の切削条件

切	削 i	速度(^m /min) $10 \sim 303$
切	込	み(mm)	1.0
送		𝔅 (mm∕re	v) 0.15
切	削量	臣 離(m)	200
切		ŧ給量(℃/mi	n) 180



図 5.1 被削材加熱装置

クを接続して電圧を調 節した。被削材の温度 はあらかじめ同一材料 を用いて作成した校正 曲線により決めた。図 5.2に校正曲線を示 す。

切削剤が被削材の強度に 及ぼす影響は曲げ試験によ って調べた.これは第2章 で用いた工具動力計上に図 5.3 で示すよりな支点を 持つ容器を設置し,容器内 に切削剤を満たした後,図 に示す加圧くさびによって 荷重速度1 mm/min で荷重





図 5.3 曲げ試験装置

を加えるものである。曲げ試験に使用した材料はガラス繊維が試験片長手方向

	粘 度(cSt)	表面張力(dyn/cm)	接触角(°)
純 水	0.849	73.6	19
水ガラス10%水溶液	1.10	59.5	13
灯油	1.52	23.0	0
タービン 油	47.6	28.7	13
ギアオイル	586	18.1	24
水溶性切削液	0.874	62.2	16

表5.3 切削剤の性質(低速二次元切削)

表5.4 切削剤の性質(旋削)

切		— 肖	ÍU		剤	J	I	\mathbf{s}	比	重	粘度()	eSt)	摩擦係数
灯					油		-		0.	78	1.52	2	_
Ŗ	_	ビ		ン	油				0.	86	47.6		
油	性	系	切	削	油]	l –	5	0.	90	35.4		0.14
塩化	系	不 活	性型	切削	」油	4	2	3	0.	90	26.5		0.14
塩化	系	活 惂	も 型	切削	油	ç,	3 ~	1	0.	87	10.3		0.14
硫化	塩化	系不	活性	型切	削油(A)	4	2 –	1	0.	86	7.6		0.15
硫化	塩化	系不	活性	型切	創油(B)	2	2 –	5	0.	90	35.4		0.14
硫化	塩化	系超	活性	型切	削油	ź	2	3	0.	93	59.0		0.13
水	溶	性	切	削	液(A)	W a	3-	1号	1.	09	0.87	74	0.14
水	溶	性	切	削	液(B)	W a	3-	2号	1.	19			0.48

と幅方向に10:1の割合ではいったガラス繊維強化エポキシ樹脂で、 試験片の寸法は2×25×80である.

本実験で使用した切削剤を表5.3,表5.4に示すが,表5.3に示した切削剤の性質のうち,粘度,表面張力,接触角についてはそれぞれオストワルド粘度 計を用いた方法、毛細管上昇法、拡大映像法によって求めた。

工具摩耗量および摩耗状態の測定方法は第3章および第4章の場合と同じで あるが、旋削の場合には被削材中のガラス繊維が一方向にのみはいっているた め、表面から約0.1 mm の深さまでのガラス繊維が剝離することから、横逃げ 面摩耗幅はノーズ先端から0.4 mm の位置で測定し、その影響を少たくした、 また低速二次元切削では、切削剤を用いた場合にクレータ摩耗が観察されるこ ともあり、あらさ計によってすくい面摩耗も同時に調べた。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 低速域における切削剤の影響

(1) 工具摩耗

低速二次元切削時の工具摩耗に及ぼす切削剤の影響を調べるため、種々の切 削剤を用いてガラス繊維強化エポキシ樹脂を切削した時の切削速度と逃げ面摩 耗幅の関係を図5.4に示す。ギアオイル、灯油、タービン油を用いた場合に は乾式切削と類似の傾向を呈し、切削速度約100mm/min 以下では切削速度 の低下とともに逃げ面摩耗幅も急激に減少しているが、それ以上の切削速度で



切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 切削剤供給量: 170° c/m

図5.4 切削速度と逃げ面摩耗幅の関係

はほぼ一定の割合で漸増している.逃げ面摩耗幅はタービン油,ギアオイル, 灯油の順に大きくなっているが,いずれも乾式の場合より小さい.ただ,灯油 とギアオイルの場合には,切削速度が約1400^{mm}/min以上では乾式の場合と 同程度になっている.これに対して水溶性切削液は上述の切削剤とは異なった 傾向を示す.すなわち,

極低速域では切削速度の 低下とともに急激な工具 摩耗を生じて, 乾式の場 合のほぼ2倍の値を示し. それに続く約550^{mm}/min までの速度域ではほぼ一 定で. それ以上の切削速 度域では乾式の場合とほ ぼ同じ値となっている. この時の工具摩耗面と切 削運動方向のなす角βを 図5.5に示す。(a)、(b)、 (c)、(d)はそれぞれ灯油. タービン油、ギアオイル、 水溶性切削液の場合であ る.図より極低速で激し い工具摩耗を生じる水溶 性切削液は切削速度が低 下するに従い、摩耗面の 角度βも小さくなり,16 mm/min 以下の切削速度



切削剤供給量:170° °/m

図5.5 切削速度とβの関係

では切削運動方向に一致している。この傾向は図3.4 の乾式の場合と逆である。灯油、タービン油、ギアオイルの場合には、乾式の場合と同様の傾向を示して、極低速域では切削速度の低下とともに増加している。



(a) タービン油(b) 水溶性切削液

切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 切削剤供給量: 170°°/m 工具: SKH 4

図5.6 すくい面摩耗状態

図5.6はすくい面の摩耗状態をあらさ計によって測定した一例である. (a) はタービン油,(b)は水溶性切削液の場合である. タービン油の場合には,本実 験の切削速度範囲ではクレータ摩耗はほとんど観察されないが,水溶性切削液 では,図に示すように396^{mm}/min</sup>以下ではクレータ摩耗が生じ,その程度 は低速ほど深くなっている.ギアオイルと灯油の場合にはクレータ摩耗はほと んど観察されず,タービン油の場合と同じような傾向になっている. このよう に水溶性切削液はほかの切削剤と異なった現象が観察される.

比較のために、水溶性切削液を用いてガラス繊維強化フェノール樹脂の切削も 行なった。この時の切削速度と摩耗量の関係を図5.7, すくい面の摩耗状態 を図5.8に示す. ガラ ス繊維強化フェノール樹 脂の場合にも,ガラス繊 維強化エポキシ樹脂の場 合と同様,極低速域では 切削速度の低下とともに 激しい工具摩耗を生じ, 約400^{mm/}min以上の切 削速度では乾式切削の際 の工具摩耗と同程度にな っている.なお乾式切削 では切削速度1434 mm/minの時の逃げ面摩



切削剤供給量:170^{cc/}m, 被削材:ガラス繊維強化フェノール樹脂,工具:SKH4

図5.7 切削速度と摩耗量の関係



切込み: 0.3 mm,切削距離: 5 m,切削剤供給量: 170° c/m, 工具: SKH4,被削材: ガラス繊維強化フェノール樹脂

図5.8 すくい面の摩耗状態

耗幅が小さくなっているが、これは被削材の切削幅が狭いために切削の際に切 削幅の影響が現われ、実際より小さい逃げ面摩耗幅になったためと思われる。 クレータ摩耗は両方の場合に発生し、その程度はガラス繊維強化エポキン樹脂 の場合と同様、低速になるほど深くなっている。

このように水溶性切削液を用いた場合には乾式切削に比較してクレータ摩耗 は深く、しかも切れ刃近傍での摩耗が激しくなっている.

以上の結果から,工具摩耗に対する切削剤の効果は切削剤の種類,切削速度 により異なることがわかった。図

5.9 は切削剤として水ガラス 10 多水溶液と純水を使用した場 合の逃げ面摩耗幅を乾式切削と比 較したものである。図から明らか なように、水ガラス10 多水溶液 では水溶性切削液と同様、30 mm/min では乾式切削の約2倍、 200mm/min では約1.5倍、 732mm/min では同程度の逃げ 面摩耗となっている。これに対し て純水を使用した場合には、逆に 乾式切削の場合より小さい値とな



切込み:0.3 mm, 切削距離:5 m 切削剤供給量:170 ^{cc}∕_m,工具:SKH4

図5.9 切削剤と逃げ面摩耗幅の 関係

り,低速ほど小さくなっているが,732mm/minでは乾式切削に近い値となっている。クレータ摩耗についても水ガラス10%水溶液では水溶性切削液と同様の傾向を示し、クレータ摩耗が観察されるが,純水の場合には観察されなかった。

(2) 曲げ強さ

工具摩耗に対する切削剤の影響は切削剤の種類および切削速度によって異な

り,その影響は低速ほど大きくなることがわかった。切削剤が工具摩耗に及ぼ す影響の一つに被削材の強度変化が考えられるが,ここでは曲げ試験により調 べた。





(a) 純 水





(b) 灯 油

図5.10 曲げ荷重とたわみの関係

図5.10は代表的な曲げ荷重とたわみの関係およびその時の試験片破断の様 子を示したものである.(a)は純水,(b)は灯油の場合で,それ以外の切削剤は灯 油と低度同様の傾向を示す.図において,曲げ荷重はたわみとともに一定の割 合で増加するが、A点に達すると増加の割合が低下し、B点で破断し始める. 破断後の挙動は純水とその他の切削剤とでは異なり、純水の場合には曲げ荷重 の低下が階段状になっているのに対し、灯油などの場合には瞬時に低下してい る.これは試験片破断の様子を示した写真からもわかるように、純水の場合に は試験片中のガラス繊維の層ごとの破断が引張り側のほうから順に起こり、灯 油の場合には同時に起こることによる。純水の場合のこのような現象は遠藤ら⁽¹⁾ が報告しているように、純水の存在によりガラス繊維と樹脂の接着強度が低下 し、ガラス繊維層間の相対的なすべりが起こって、破断は図のように層ごとに 起こっているものと考えられる。このような効果はその他の切削剤ではほとん ど観察されない。

表5.5 は曲げ試験によって得られた曲げ強さである. タービン油,灯油,水溶性切削液の場合には大気中とほぼ同程度であるが,純水の場合にはやや大きくなっている.

(3) 摩擦試験結果

切削剤が工具摩耗に及ぼ

表5.5 曲げ強さ

				曲げ強さ(kg/mm ²)
大	灵		中	88.5
純			水	92.9
水ガラン	×10%	5水液	^容 液	88.4
灯			油	89.2
A -	ビ	ン	油	89.3
ギア	オ	1	r	90.2
水溶	性切	削	液	87.5

す要因としては,強度変化のほかに摩擦がある.GFRP切削時の摩擦として は工具とガラス繊維,ガラス繊維とガラス繊維,ガラス繊維と樹脂,工具と樹 脂の摩擦が考えられる.しかしながら,樹脂を切削する際の工具摩耗は小さく, また切削時のガラス繊維束ではガラス繊維と樹脂の接触はほとんどなく,ガラ

ス繊維どうしの	表 5	.6 摩擦係数	
摩擦が多いこと		工具ーガラス繊維	ガラスーガラス
から,工具とガ	 乾 式	0.42	0.16
ラス繊維、ガラ	純 水	0.52	0.62
- +++ +++	水ガラス10%水溶液	0.62	0.68
ス繊維とカラス	灯油	0.30	0.31
繊維の摩擦を調	タービン油	0.22	0,13
べた.その結果	ギアオイル	0.31	0.19
を表5.6 に示	水溶性切削液	0.56	0.65

す. 工具とガラ

ス繊維の摩擦係数は乾式の場合と比較して純水、水ガラス10%水溶液、水溶 性切削液が高く、灯油、タービン油、ギアオイルは低くなっている、またガラ スとガラスの摩擦は乾式の場合に比べてタービン油が小さく、純水、水ガラス 10%水溶液,水溶性切削液は非常に高いが、その他の切削剤は乾式の場合よ り高いが純水より低い。

(4) 考 察

本実験の条件では、切削剤を供給しなければ、工具摩耗に及ぼすガラス繊維 の挙動は第2章の理論解析結果を用いて大略説明できる。ここでは切削剤の効 果を調べるために、切削剤を供給した時のガラス繊維の挙動を検討する。切削 状態にあるGFRPに及ぼす切削剤の影響としては次のようたことが考えられ る.

(i) ガラス繊維と樹脂の界面への影響

切削状態にあるGFRP中のガラス繊維と樹脂は切削力によって変形を受け、 接着面は破壊される。接着面のメカニズムについては不明な点もあるが。水の 影響については化学的に安定な結合状態にあるガラス繊維と樹脂が、水分の浸 透によりその結合力を低下させることが支配的である。(1)(2) 切削剤中の曲げ試験 でも図5.9(a)に示すように、純水の場合には特異な現象が観察され、破断時

-62-

にはガラス繊維層ごとの剝離が起こることから,他の切削剤に比較して界面結 合力が低下したと考えられる.

(ii) 被削材強度への影響

切削剤は浸透あるいは拡散により界面をぬれた状態にする。この時,切削力 を支えているガラス繊維は切削剤により強度を変化することが考えられる。こ れまでの報告で⁽³⁾⁽⁴⁾ 水の存在がガラス繊維の強度を低下させることが述べられ ているが、そのメカニズムについては明らかでない。

(Ⅲ) 界面に及ぼす切削剤の潤滑効果

界面が破壊されたガラス繊維束はガラス繊維が互いに摩擦しながら変形する. ガラス繊維間の摩擦を大きくする切削剤では,ガラス単繊維間の相対的なすべ りが小さくなり,ガラス繊維の変位量や軸方向の変位量が小さくなるものと推 察される.

(Ⅳ) 工具とGFRPの摩擦に対する潤滑効果

工具は破断されたガラス繊維によって刃先丸味部から逃げ面にかけて擦過されるが、切削剤を供給することにより摩擦状態が変化する。表5.6 より灯油、 タービン油、ギアオイルを使用すると潤滑性が良く、摩擦を小さくするが、水 ガラス10%水溶液や水溶性切削液を用いると潤滑性が悪く、摩擦が大きいと 考えられる.

(i)~(ii)の効果は切削剤が界面に浸入することによって生じるが、その過程としては毛管作用による浸透と拡散による浸透が考えられる.拡散による浸透は 毛管作用のそれに比較して、拡散時間が短かく無視できる。毛管作用による浸 透深さは次式の関係が成り立つことが報告されている⁽³⁾

$$Z^{2} = K_{1} \frac{\sigma \cos \theta}{\eta_{0}} r. t$$
(5.1)

Z : t時間に液体が浸透する深さ

-63-

r : 空孔の直径

η。: 液体の粘性

θ : 液体の接触角

K.: すきまの形により決まる定数

切削時のガラス繊維のすきまの状態は変化を受けず、また同一の切削剤では 切削速度が変化しても η_{o} , θ , σ は変化しないと考えられ、切削剤のガラス繊 維間への浸透深さは式(5.1)より時間 t の平方根に比例すると推察される。実 際の切削では擦過時間は低速ほど長く、浸透深さも低速ほど深くなる。

本実験の切削速度は接触圧が式(2.9)に従う範囲であって, 工具摩耗は工 具とガラス繊維の接触長さに影響される.図5.4,図5.9 では切込みは一 定で接触圧は変わらないが,切削剤を供給した場合の極低速域の工具摩耗は潤 滑性の良い灯油,タービン油,ギアオイルでは乾式の場合より小さく,また潤 滑性の悪い水ガラス10%水溶液,水溶性切削液では大きくなっている.これ は工具とガラス繊維の摩擦状態が切削剤により変化し,主としてW)の効果が大 きく影響しているものと思われる.ただ純水の場合には潤滑性が悪いにもかか わらず,工具摩耗は小さくなっているが,これについては後述する.

また式(2.17)が有効となる極低速では(iii)の潤滑効果が影響すると考えられる. すなわち, 潤滑性の良い切削剤ではガラス繊維間の摩擦は小さくなってた

わみやすくなり, 擦過時の軸方向変 位量増分も大きくなって摩耗面の角 度も大きくなる、この傾向はガラス 繊維間の摩擦係数が小さく, 浸透深 さが深いほど顕著に現われる. 式 (5.1)において $\sigma \cos \theta / \eta_o$ は浸透 しやすさを示すバラメ – タであって,

表5.7
$$\sigma \cos \theta / \eta$$

純					水	81.5	
水	溶	性	切	削	液	67.5	
	ラ	ス]	0%	水	溶液	48.7	
٢Ţ					油	13.9	
\$			ビ	ン	油	0.50)5
ギ	ア	;	才	1	ル	0.02	51

-64-

表5.7 にその値を示す。 純水,水ガラス10%水溶液,灯油,水溶性切削液 は浸透しやすく,タービン油,ギアオイルは浸透しにくいことがわかる。一方, ガラス繊維間の摩擦係数は乾式に比較してタービン油は小さいが,その他の切 削剤は大きくなっている。したがってガラス繊維間の摩擦係数の大きい水溶性 切削液や水ガラス10%水溶液では,極低速ほど摩耗面の角度βが小さくなっ ている。灯油,タービン油,ギアオイルではガラス繊維間の摩擦係数は乾式の 場合に比較して大差がないこと、ならびに水溶性切削液,水ガラス10%水溶 液に比較して浸透しにくいことにより,摩耗面の角度βに及ぼす大きな影響は 認められない。

純水の場合には摩擦係数,浸透性が水ガラス10%水溶液,水溶性切削液と 同程度であるにもかかわらず,工具摩耗は逆の傾向を示しているが,これは(i), (ii)の効果が大きく作用し,擦過中の界面の剝離あるいはガラス繊維の破壊が起 こることによると考えられる。



5 3.2 高速切削時の工具摩耗に及ぼす影響

切込み: 1.0mm,送り: 0.15^{mm}/_{rev},切削距離: 200m,切削剤供給量: 180^{cc}/_{min} 図 5.11 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係



V=20m/min V=77 (a) 硫化塩化系不活性型切削油(B)



V=20
 V=102
 V=253
 (b) 水溶性切削液(B)

切込み:1.0mm,送り:0.15^{mm}/_{rev},切削距離:200m 切削剤供給量:180^{cc}/_{min}

図5.12 工具摩耗形態

低速二次元切削の実験結果から,切削剤が工具摩耗に及ぼす影響は切削剤の 潤滑性,浸透性に依存し,その効果は低速ほど顕著に現われることがわかった。 ここでは切削剤が高速切削時の工具摩耗に及ぼす影響を旋削によって調べた。

(1) 工具摩耗

種々の切削剤を用いて、ガラス繊維強化ポリエステル樹脂を旋削した時の切 削速度と横逃げ面摩耗幅の関係を図 5.11 に示す. 図から明らかなように、 いずれの切削剤の場合にも工具摩耗は三つの領域に分けられ、乾式切削時の工 具摩耗特性と類似した傾向を示している.しかしながら、乾式切削の場合に比
較して第1領域が狭いこと,第2領域から第3領域への遷移域が低速側に移っ ていること,第1領域,第3領域の工具摩耗に差があることなどに差が認めら れる.なかでも硫化塩化系不活性型切削油は他の切削剤に比べて,その傾向が 大きい.代表的な切削剤である硫化塩化系不活性型切削油(B)と水溶性切削液(B) について,この時の摩耗形態を図5.12に示す.第4章の図4.2で明らかに した乾式切削に比較すると,第3領域の摩耗形態が異なっている.すなわち, 乾式切削では第3領域の摩耗形態は切れ刃と平行な摩耗になっているが,切削

剤を用いた場合には第2領域と 同じような三角形状の摩耗となっている。しかしながら、摩耗 部の断面曲線を示した図5.13 からわかるように,第2領域で は刃先後退量は小さく,逃げ面 摩耗が大きくなり,第3領域で は刃先後退量が非常に大きくなっていて第4章で明らかにした 乾式切削の場合と同様な傾向を 示している。

図5.14 は同様の実験をガ ラス繊維強化エポキシ樹脂につ いて行なったもので,ガラス繊 維強化ポリエステル樹脂の場合 と同様の傾向になっている。

切削剤の供給量と工具摩耗の 関係を図5.15に示す. (a)は ガラス繊維強化ポリエステル樹



(a) 硫化塩化系不活性型切削油(B)(b) 水溶性切削液(B)

切込み: 1.0 mm,送り: 0.15^{mm}/_{rev}, 切削距離:200m,切削剤供給量: 180^c%_{min} 工具: P10

図5.13 摩耗部断面曲線



切込み:1.0 mm,送り:0.15 mm/rev,切削距離:200m 切削剤供給量:180^{cc}/min,被削材:ガラス繊維強化エポキシ樹脂

図5.14 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係



(a)パイプ材(塩化系不活性型切削油)

(b)円板材(硫化塩化系不活性型切削油A)

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.15^{mm}/_{rev} 切削距離: 200m, 工具: P10

図5.15 切削剤供給量と横逃げ面摩耗幅の関係

脂のパイプ材に塩化系不活性型切削油を供給した場合,(b)は円板材に硫化塩化 系不活性型切削油(A)を供給した場合である.いずれの場合とも,切削剤の供給

-68-

量を変化させても工具摩耗には影響がなく,長谷川,花崎ら⁽⁵⁾の結果とも一致 している.

第1領域,第3領域では切削剤によって工具摩耗が異なるが,長谷川,花崎 ら⁽⁵⁾のフライス削りによる断続切削によると,高速域ではガラス繊維によるラ ッピング効果が存在することを報告している。そこでこの効果を調べるために, 円板材の旋削を行ない,ガラス繊維のはいった切削剤とはいっていない切削剤



切込み: 1.0mm,送り: 0.15^{mm}/_{rev},切削速度: 256^m/_{min} 切削距離: 200m,切削剤供給量: 180^c/_{min},工具: P10,被削材:円板材



図5.16 切削剤中のガラス繊維粉による摩耗増幅作用

切削油のみ ガラス繊維入り切削油

切込み:1.0mm, 送り:0.15^{mm}/_{rev}, 切削速度:256^m/_{min} 切削距離:200m

図 5.17 工具摩耗形態

の場合の工具摩耗を比較した。その結果を図5.16に示す。 ガラス繊維のはいった切削剤でははいっていない切削剤よりも大きな工具摩耗を示し、特に硫化塩化系不活性型切削油(A)ではその傾向が顕著で、図5.17 に示すようにノ - ズ部にその差が認められる。

(2) 被削材温度の影響

切削剤を用いてGFRPを旋削した場合に,第1領域から第2領域への遷移 域が低速側にずれ,また第2領域での切削速度に対する工具摩耗率が乾式切削 の場合に比較して大きくなっている。一般にガラス繊維強化ポリエステル樹脂 は加熱された場合,その強度が著しく低下することが報告されている⁽⁶⁾切削の 際にも被削材は切削熱により加熱され,強度が低下するが,切削剤を用いた場 合には冷却作用によりその影響が小さくなると考えられる。切削剤のこの効果 を明らかにするため,ここでは被削材

の 温度を変 に さ そ , 工 兵 摩 托 へ の 影 審 を 調 べ た .

図5.18 は第1領域において被削 材の温度が工具摩耗に及ぼす影響を示 したものである。被削材温度は180℃ であるが、室温の場合に比較して小さ くなっている。この時、被削材は常温 の場合に比べて表面のガラス繊維層が 剝難しやすくなっている。



切込み: 1.0mm,送り: 0.15^{mm}/_{rev}
切削距離: 200m,工具: P10
切削速度: 9^m/_{min},乾式

図5.18 被削材温度と横逃 げ面摩耗幅の関係

図5.19 は第2領域における被削材温度と横逃げ面摩耗幅の関係を示す. 被削材温度が上昇するに従い,工具摩耗は小さくなり,約180℃ においては 工具摩耗はほとんど生じない.したがって切削剤を使用した場合には,切削熱 による温度上昇が妨げられるため,被削材の強度の低下が少なくなると考えら れる. (3) 曲げ強さ

前節と同様, 切削剤 による被削材の強度の 変化を曲げ試験によっ て調べた。その結果を 表5.8 に示す。 硫化 塩化系不活性型切削油 (B)と塩化系活性型切削 油は強度が非常に大き く. その他の切削剤は それほど大きな変化は ないことがわかる。工 具摩耗についても、上 述の二つの切削剤では 大きくなっている. し たがって、被削材の強 度変化も工具摩耗に影 響すると考えられる。

(4) 考察

以上の結果と第2章 の理論解析結果および 第4章の結果を比較し



切込み:1.0mm,送り:0.15^{mm/}rev,切削距離:200m 工具:P10,切削速度:80^{m/}min,乾式

図5.19 被削材温度と横逃げ面摩耗幅の関係

表5.8 曲げ強さ

切			剤	曲げ強さ(kg/mm ²)
大	気		中	8 8.4
 灯			油	8 9.2
油性	系 切	削	油	91.0
塩化系	不活性型	切削	油	9 0. 6
塩化系	活性型	切削	油	9 2.1
硫化塩(七系不活性	型切削	油(A)	8 8.6
硫化塩化	公系不活性	型切削	油(B)	9 5.7
硫化塩(二系超活性	型切削	油	8 7.9
水溶	性 切	削	液(A)	9 0. 7
水溶	性切	削	液(B)	8 7.5

て、高速切削時の工具摩耗に及ぼす切削剤の効果を検討する。切削剤を用いた 場合、工具摩耗は第1領域と第3領域でその大きさが異なり、第1領域と第2 領域および第2領域と第3領域の遷移域が低速側にずれている。解析結果によ ると、第1領域と第2領域の遷移域は al ≈1 (C対応し,式(2.12) および式 (2.15)からヵ,K, / が大きく影響する. 津枝,長谷川ら⁽⁷⁾あるいは田島⁽⁸⁾ の報告によると、GFRP切削時の切削温度は200~300℃で、 この温度範 囲ではガラス繊維の強度の低下は小さく、ガラス繊維の強度Kの影響は小さい. また第1領域においては工具摩耗量も小さく、ガラス繊維と工具の相対的な位 置関係の変化も少ないことから工具とガラス繊維の接触長さ / の影響も小さい と考えられる.したがって被削材を加熱した実験結果からも推察されるように、 被削材の温度上昇により樹脂のヵが大きく影響すると考えられる.すなわち、 切削剤の冷却作用により、樹脂の粘性係数ヵが大きくなって第2領域が低速側 にずれたものと考えられる.ただ硫化塩化系不活性型切削油(B)と塩化系活性 型切削油ではその傾向が顕著になっているが、これは切削剤による強度の向上 も影響していると推察される.

また第2領域と第3領域の遷移域も低速側にずれる.第4章で述べたように 第2領域と第3領域の遷移域は、刃先後退量が大きくなり、工具とガラス繊維 の接触長さと同程度になる領域であって、第3領域ではもはや第2章のモデル は適用できなくなり、被削材は摩耗部に押し込まれて、ガラス繊維と樹脂が分 離する.切削剤を用いた場合、冷却作用のために切削熱による被削材強度の低 下が抑止され、工具摩耗が激しくなる.したがって、刃先後退量が工具とガラ ス繊維との接触長さにほぼ等しくなる切削速度は乾式に比較して低い切削速度 で生じ、第2領域と第3領域の遷移域が低速側にずれたものと考えられる.ま た高速切削時の工具摩耗の差は長谷川、花崎ら⁽⁵⁾の報告によると、ラッピング 効果が大きく影響することが明らかにされているが、第3領域では被削材は逃 げ面摩耗部に押し込まれ、ガラス繊維は押しつぶされることならびに図5.16 に示すように切削剤中のガラス繊維の存在が工具摩耗を大きくすることからラ ッピング効果が一層起こりやすくなったものと推察される.しかしながら、粘 度によるこの効果の差は明確でなかった。

-72-

5.4 結 言

切削剤を用いてGFRPの切削を行ない、切削剤が工具摩耗に及ぼす影響を 第2章~第4章の結果と比較検討した。本章で得られた主な結果は次の通りで ある。

(1) 工具摩耗に及ぼす切削剤の影響としては低速域では潤滑効果,高速域で は冷却効果があるが,第3領域ではラッピング効果もある.

(2) 低速域の潤滑効果は工具とガラス繊維,ガラス繊維とガラス繊維の間で 大きく作用し,潤滑性の良い切削剤は工具摩耗の軽減に効果がある。

(3) 切削剤として純水を用いた場合,工具摩耗は小さくなるが,ガラス繊維と樹脂の接着に悪影響がある。

(4) 高速域の冷却効果は被削材の強度低下を抑止し、工具摩耗を大きくする.

(5) 被削材の強度を高くするような切削剤は工具摩耗を大きくするが、この 効果は低速域では顕著でなく、潤滑効果に相殺されているものと考えられる。

参考文献

- (1) 遠藤,渡辺:日本機械学会論文集,40,337(1974),2462.
- (2) 北条,津田,桑原:日本複合材料学会誌,2,2(1976),72.
- (3) 林編: 複合材料主学, 日科技連出版社(1971), 85。
- (4) 山室, 瀬川, 佐久間: 工業材料13, 12(1965), 106.
- (5) 長谷川,花崎ら:日本機械学会論文集,34,266(1968),1826.
- (6) 滝山: プラスチック材料講座10 ポリエステル樹脂,日刊工業新聞社 (1971),204.
- (7) 長谷川,花崎:日本機械学会論文集,34,266(1968),1813.
- (8) 田島:機械と工具, 7, 7(1963), 39.

.

. .

· · ·



.

第6章 工具材質の影響

6.1 緒 言

第4章までにおいて,低速二次元切削および旋削による実験ならびに力学モ デルによる理論解析の両結果から,GFRP切削時の工具摩耗特性を明らかにし た.また第5章では切削剤が工具摩耗に及ぼす影響を検討した。その結果,工 具摩耗は三つ領域に分けられ,比較的高速切削時には激しい工具摩耗を生じ, 切削剤による工具摩耗軽減の効果はないことがわかった。

GFRP切削時の工具摩耗に及ぼす工具材種の影響についてはわずかな報告 (1)~(3)がなされていて、佐久間⁽³⁾らは高速切削時には工具の熱軟化と熱応力によ る破壊が支配的であり、主として工具材の熱伝導率、抗圧力、熱膨張係数が大 きく影響していることを述べているが、工具摩耗の機構については不明な点が 多い.

そこで本章では,現在使用されている代表的な工具材6種を用いて旋削を行 ない,工具材質がGFRP切削時の工具摩耗特性に及ぼす影響を明らかにする と同時に最適工具材についても検討した。

6.2 実験方法

÷,

実験には大阪工作所製のジャパン・カズヌーブ旋盤を使用し,被削材は第2 章で用いたガラス繊維強化エポキシ樹脂であって,外径75mm,内径60mm のパイプ材(ガラス繊維含有率65%)と外径300mm,厚さ50mm の円板材 (ガラス繊維含有率50%)を用いた。切削実験は長さ200mm のパイプ材あ るいは円板材を保持具で主軸に固定し,外丸削りによって行なった。この時の 切削条件を表6.1に示す。

また本実験で用いた工具は高速度鋼第4種(SKH4A),超硬合金(P10, K10, M10), サーメット,セラミックの6種で,スローアウェイ型チップ

-75-

TNG 331 (セラミックの場合 にはTNG 332)をN22R-33型のホルダに取り付けて使 用した.ただし高速度鋼第4種 の場合にはロ18の完成バイト

表6.1 切削条件

切削	速度(m/min)	9~298		
切ど	と み(mm)	1.0		
切削距離(m)		11,100,200		
送	り(mm∕rev)	0.15		

-									
	比 重	硬 度 H _{RA}	抗磁力 Oe	抗折力 kg/mm ²	ヤング率 ×10 ³ kg/mm ²	圧縮強さ kg/mm ²	熱伝導度 cal∕s·cm•℃		
高速度 鋼 第 4 種	8.5~8.8	83.8~85.3	_	350~400	*21.0	300~420	0.05~0.07		
サーメット	7.1	91.8~92.3	-	150~180	40.6	-	0.05		
P 10	10.8	91.9	165	151	48.2	500	0.06		
K10	14.7	90.9	210	210	63.1	585	0.25		
M1 0	13.0	92.1	230	160	47.0	600	0.1 ~0.12		
セラミック	3.96~3.99	92.0~95.0		80	35.0~45.0	280	0.04~0.05		

表6.2 工具材の物理的性質

からTNG331の形状のチップを切り出し,表面を研削盤で仕上げた後,ノー ズ部を油と石により仕上げた. 表6。2に工具材の物理的性質を示す.

工具摩耗量としてはノーズ先端から0.6 mmの位置での横逃げ面摩耗幅をとり, 摩耗部新面曲線をあらさ計で,摩耗状態を走査形電顕で観察した。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 工具摩耗

工具として超硬合金P10, M10, K10, サーメット, セラミック, 高速度 鋼第4種を用いて, パイプ材の外丸削りを行なった。 図6.1に切削速度と横 逃げ面摩耗幅の関係を示す.本実験で使用した旋盤では切削速度を9m/min 以下にとることができないため, 超硬合金P10, サーメット, セラミック,



切込み: 1.0 mm,送り: 0.15mm/rev,切削距離: 200m

図6.1 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

高速度 鋼第4種では第1領域は明らかでなく,第2領域と第3領域のみが観察 された。高速度鋼第4種とセラミックを使用した場合には,第3領域で急激な 工具摩耗を生じて,高速度鋼第4種の場合には切削不可能となった。また第2 領域においても高速度鋼第4種とセラミックの切削速度に対する工具摩耗増加 率は大きく,サーメッド,P10がこれに続き。M10,K10 は非常に小さく, 工具摩耗量も小さい。したがって,第2領域と第3領域の遷移域も高速度鋼第 4種,セラミック,サーメット,P10,M10,K10 の順に低速側にずれて いる。図6.2はおのおのの工具が第2領域と第3領域で生ずる工具摩耗形態 を示す。第2領域ではすべての工具で三角形状の摩耗を呈し,第3領域ではセ ラミックの場合のみ三角形状の摩耗を生じ、大きな欠けが観察されるが、その 他の工具では切れ刃に径ぼ平行な工具摩耗となっている。

図6.3は各領域における工具摩耗部の断面曲線を代表的な工具P10,K10, 高速度鋼第4種について示したものである。図から明らかなように,第2領域

-77-



図6.2 工具の摩耗形態

-78-

では逃げ面摩耗が大きくなっ ているが,第3領域では逃げ 面摩耗はほとんど進行せず, むしろ刃先後退量が大きい. この傾向はすべての工具で観 察された.

上述の工具摩耗特性は第4 章までの結果と類似の特性を 呈し,その機構についてはす でに明らかにされた。しかし ながら,各領域の範囲あるい は遷移域が工具材により異な り,工具摩耗にも大きな差が 認められる。

6.3.2 走査形電顕による摩耗部の観察

図6.4 は横逃げ面摩耗部 を走査形電顕で観察したもの である.(a)は高速度鋼第4種,



図6.3 摩耗部の断面曲線

(b)はサーメット,(c)はセラミックの場合で,超硬合金P10,M10,K10 は サーメットと同様の摩耗状態を呈している.図からわかるように,高速度鋼第4 種では軟らかい工具基質がガラス繊維によってすきとられ,硬い炭化物は摩耗 面に露出しているのが観察され,第2領域,第3領域とも同様の摩耗状態とな っている.したがって高速度鋼第4種の工具摩耗は軟らかい組織がガラス繊維 によってすきとられ,保持力の低下した炭化物が脱落して生じるものと推察さ れる.第3領域の工具摩耗急増部では,その摩耗形態および摩耗部の電顕写真





(c) セラミック

20 µm

_

Ľ

切込み: 1.0 mm,送り: 0.15mm/rev,切削距離: 200m

図6.4 摩耗部の電顕写真



(a) 高速度鋼第4種



20 µm

(b) セラミック

切込み: 1.0 mm,送り: 0.15 mm/rev,切削距離: 200m

図 6.5 第3領域の工具摩耗急増部

を示した図6.5(a)から明らかなように、摩耗部はそれまでとは異なった摩耗 状態となり、炭化物も軟らかい組織も同時に持ち去られ、かなり平坦な摩耗面 となっている。これは第3領域の摩耗急増部が高速度鋼の熱軟化により生じた ものと考えられる。 サーメットの場合にも、本実験の速度範囲では摩耗状態に差がなく、摩耗部 は炭化物粒子が露出していて、結合相はほとんど観察されていない。したがっ て焼結合金の工具摩耗は高速度鋼第4種と同じように、軟らかい結合相がガラ ス繊維によってすきとられ、保持力の低下した炭化物粒子が脱落して起こるも のと考えられる。

セラミックの場合にも各領域の摩耗部の差は認められないが、セラミックは 高速度鋼や超硬合金と異なり、自己焼結形の Al_2Q_3 で形成されるため、その摩 耗状態も異なっている。すなわち、表6。2からも明らかなように、セラミッ クの場合、抗折力が小さくもろいために、ガラス繊維が摩耗部を擦過する際に Al_2Q_3 が微細な割れを起こしているものと考えられる。ただ第3領域の摩耗急 増部では刃先後退量も大きく、被削材が逃げ面摩耗部に押し込まれる傾向が強 いため、セラミックに過大な荷重が作用し、図6.5(b)に示すように摩耗部に は大きな欠けが発生したものと思われる。しかしながら、この大きな欠けは連 続的に起こるのではなく、図6.5(b)の電顕写真から明らかなように、大きな 欠けが発生した後では工具摩耗は Al_2Q_3 の微細な割れによって促進されている ものと推察される。

6.3.3 切削距離の影響

図6.1から明らかなように、 第1領域と第2領域の遷移域は工具材により 異なり、工具摩耗が大きいほど低速側にずれている。切削剤を用いた場合にも 同様の傾向が観察されるが、これは主として切削剤による被削材の冷却作用に よることが明らかになった。工具材による第1領域と第2領域の変化は工具摩 耗の大きさや工具材の物理的性質に左右されると考えられるが、ここでは工具 摩耗の大きさの影響を調べるため、切削距離による工具摩耗曲線の変化を調べ た。すなわち、異なった工具材で第1領域における工具摩耗が同程度になる切 削距離をとり、切削速度と工具摩耗の関係を求めた。その結果を図6.6 に示 す。被削材はガラス繊維強化ポリエステル樹脂で、工具は超硬合金 P10 と高



切込み: 1.0mm, 送り: 0.15^{mm}/_{rev}, 被削材: ガラス繊維強化ポリエステル樹脂

図6.6 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

速度鋼第4種を使用し、切削距離はそれぞれ200mと11mである。高速度鋼 第4種の場合には第2領域における増加の割合は大きく、また第2領域と第3 領域の遷移域も低速側にずれ、切削速度250^m/min 以上では急激な工具摩耗 を生じている。しかしながら第1領域と第2領域の遷移域は超硬合金 P10 の 場合とほぼ一致しているが、高速度鋼第4種の場合がわずかに低速側にずれて いる。

第1領域と第2領域の遷移域に及ぼす工具摩耗の影響をさらに明らかにする ために、同一工具材で切削距離を変化させた場合の切削速度と工具摩耗の関係 を調べた。図6.7にその結果を示す。工具は高速度鋼第4種で、切削距離は 11mと100mである。切削距離100mの場合には、11mの場合に比較して 低速域の工具摩耗が大きく、第1領域と第2領域の遷移域も低速側にずれてい る。これは切削距離100mの場合には工具摩耗が大きいために、切削距離11 mの場合に比べて切れ刃に大きな力が作用する部分が広くなり、1が大きくな



切込み: 1.0 mm,送り: 0.15^{mm}/rev,工具:SKH4 被削材:ガラス繊維強化ポリエステル樹脂

図 6.7 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

ったことに相当し,式(2.12)および式(2.15)からわかるように第1領域と 第2領域の遷移域が低速側に移動したものと考えられる.

6.3.4 工具材の物理的性質の影響

種々の工具を用いてGFRPの旋削を行なった結果,工具摩耗特性に差が認 められ,第1領域と第2領域の遷移域が低速側にずれること,低速域と第3領 域の工具摩耗の大きさが異なること、第2領域の工具摩耗増加率に差があるこ と,第3領域において高速度鋼第4種,セラミックでは工具摩耗が急増する領 域が存在することなどが明らかになった。このうち第1領域と第2領域の遷移 域,第3領域の高速度鋼第4種,セラミックの工具摩耗急増部についてはすで に述べた。ここでは工具材の物理的性質と工具摩耗を比較して,低速域におけ る工具摩耗,第2領域における工具摩耗増加率について検討する。

図6.8 は低速域における横逃げ面摩耗幅と工具材の物理的性質の関係を示したものである。低速域の横逃げ面摩耗幅は第1領域が比較的明確な超硬合金



図6.8 低速域の工具摩耗と工具材の物理的性質の関係

P10, M10、K10 についてはその値をとり、その他の工具については切削速 度10^m/minの時の値を採用した.低速域では切削熱が工具摩耗に及ぼす影響 はほとんどなく、工具摩耗は機械的なざらつき摩耗によって起こると考えられ る.したがって工具材種による工具摩耗の差は式(3.1)からわかるように、工 具の硬度が最大の因子と考えられる。 図6.8では硬度は工具摩耗には関係な くほぼ一定となっているが、GFRP切削時の工具摩耗は図6.4 からもわか るように、直径10μm、あるいはそれ以下のガラス繊維によって結合相がすき とられるため、工具摩耗に影響する硬度はマクロ的な硬度ではなく、ミクロ的 なもの、すなわち超硬合金の結合相のような軟らかい部分の便度によると考え られる。焼結合金の場合には、WC、TiC、TaC などの硬い炭化物粒子は直接 に摩耗しなくても、周囲の結合相がすきとられ、摩耗は進行する。また超硬合 金において工具摩耗はP10が一番大きく、M10、K10 は非常に小さくなっ ている。一般に、超硬合金は結合材としてCoを用いており、 その含有量が小 さくなるに従い, 圧縮強さ, 熱伝導度, ャング率, 硬さは大きくなる⁽⁴⁾が. 図 6.8の関係は工具摩耗が小さいほど圧縮強さ、ヤンク率、 熱伝導度が大きく

なっている.したがって,工具摩耗には結合材の含有量も大きく影響している ものと考えられる.サーメットの場合には超硬合金よりさらに大きな工具摩耗 となっているが、これはサーメットの場合,結合相が Ni であってその含有率

も20%とかなり多くなって いることによると考えられる。

高速度鋼も焼結合金と同様 の機構で工具摩耗が起こるが, 図6.9に示した顕微鏡組織 から明らかなように,炭化物 組織が工具基質上に点在し, その割合も少ないことから, 工具摩耗はかなり容易に起こ



50 µm

図6.9 高速度鋼第4種の顕微鏡組織 (腐食液:王水)



図6.10 工具摩耗増加率と工具材の物理的性質の関係

ると考えられる。これに対してセラミックの場合には図6,8 からもわかるよ うに、抗折力が小さいため、微細な割れによって工具摩耗は進行しているもの と思われる。

切削速度が大きくなると、被削材および工具材の温度が上昇し、被削材の粘 性係数ηが減少し、結合相の硬度も低下する。図6.10に第2領域における工 具摩耗増加率と工具材の物理的性質の関係を示す。図6.8と同様の傾向を示し、 工具摩耗の増加率については、上述の硬度およびその含有量が大きく影響して いると考えられるが、佐久間ら⁽³⁾が報告したように、工具の温度上昇による硬 度の低下も影響していると考えられる。また超硬合金K10,M10では第1領 域と第2領域の遷移域がかなり高速側にすれているがこれは前節で述べた工具 摩耗の進行による接触長さの効果のほかに、熱伝導度が大きいために、工具の 硬度の低下が小さいことも影響していると推察される。

以上のことからGFRP切削用工具としては抗折力が少なくとも150~160 kg/mm²以上は必要で,結合相の硬度は高く,しかもその含有量が少ないほど 良く,現在使用されている工具では超硬合金M10,K10が最適である.

6.4 結 言

本章で得られた主な結果は次の通りである.

(1) GFRP切削時の工具摩耗はざらつき摩耗で,結合相の硬度およびその 含有量が大きく影響し,結合相が硬く,その含有量の少ないものほど工具摩耗 は小さくなる.

(2) 第1領域と第2領域の遷移域には,工具摩耗の進行に基づく接触長さが 長くなる効果が影響している。

(3) 高速切削時には、高速度鋼第4種では熱軟化により切削不可能となる切削速度域が存在し、セラミックでは大きな欠けが生じる.

(4) GFRP切削用工具としてはK10, M10 が最適である。

参考文献

- (1) 田島:機械と工具, 7, 7(1963), 39.
- (2) 津枝, 長谷川, 花崎: 日本機械学会論文集, 34, 266(1968), 1813.
- (3) 佐久間, 瀬戸:日本機械学会論文集, 44, 381(1978), 1752.
- (4) たとえば、日本金属学会編:金属便覧、丸善(1964)、511.

GFRP切削時の工具摩耗は切削条件に大きく依存し,特に高速切削時には 激しい工具摩耗を生じる.このような工具摩耗は加工精度を低下させるばかり でなく,場合によっては劣悪な仕上面となる.GFRP切削時の工具摩耗特性 を明らかにすることは,加工精度や仕上面を改善する上で重要であるばかりで なく,種々のGFRPの切削条件を設定するのに有用である.本論文ではGF RPの低速二次元切削および旋削を行なって,工具摩耗の挙動ならびに被削材 の切削状態を調査し,力学モデルを用いたガラス繊維の挙動の理論解析結果と 比較検討して,GFRP切削時の工具摩耗特性を調べた.得られたおもな結果 を要約すると次の通りである.

(1) 第2章では代表的な切削条件でGFRPの低速二次元切削および旋削を 行なって工具摩耗の挙動を明らかにし、さらにGFRPの切削状態を力学モデ ルに置き換えてガラス繊維の挙動を理論的に解析した。その結果、工具摩耗は 三つの領域に分けられ、それぞれ切削速度に関係なく小さな工具摩耗を生じる 低速域(第1領域),切削速度の増加とともに激しい工具摩耗を生じる高速域 (第2領域),切削速度に関係なく大きな工具摩耗を生じる高速域(第3領域) である。一方、理論解析結果から、工具とガラス繊維の接触長さが大きく影響 する条件下では、ガラス繊維の変形速度の影響はなく、ガラス繊維の変形速度 が影響する条件下では、工具とガラス繊維の接触長さは影響しないことがわか った。

(2) 第3章ではGFRPの低速二次元切削を行ない,その結果を第2章の理 論解析結果と比較検討して,第1領域の工具摩耗の機構を調べた.その結果, 第1領域の工具摩耗は変形速度の影響を受けず,工具とガラス繊維の接触長さ に依存し,すくい角の小さい条件あるいは切込み深さが大きい条件では工具摩 耗が大きくなること,極低速域で摩耗形態が異なること,ガラス繊維の方向に

-89-

よって工具摩耗が異なることおよびガラス繊維含有率が増加すると工具摩耗が 大きくなることを明らかにした。

(3) 第4章ではGFRPの旋削結果を第2章の理論解析結果と比較検討して、 第2領域と第3領域の工具摩耗の機構を調べた。その結果、第2領域ではガラ ス繊維の変形速度が大きく影響し、工具摩耗は切削速度とともに増加すること、 第3領域では刃先後退量が大きくなり、被削材が摩耗部に押し込まれ、工具摩 耗は切削速度、送りに関係なく一定で、切削面も悪いこと、および第2領域と 第3領域の遷移域は刃先後退量の大きさによって決まることがわかった。

(4) 第5章では種々の切削剤を用いて、GFRPの低速二次元切削および旋 削を行ない、切削剤が第3、4章で明らかになった工具摩耗特性に及ぼす影響 を調べた。その結果、極低速域では工具とガラス繊維、ガラス繊維間の潤滑効 果に大きく影響すること、第2領域および第3領域では被削材を冷却する効果 が大きいため、第1領域と第2領域および第2領域と第3領域の遷移域はとも に低速側に移動すること、第3領域ではラッピング効果も存在すること、さら に切削剤による被削材の強度の変化が工具摩耗に影響することが明らかになっ た.

(5) 第6章では種々の工具を用いてGFRPの旋削を行ない,工具材質が第 3,4章で明らかになった工具摩耗特性に及ぼす影響を調べ,GFRP切削時 の最適工具について検討した。その結果,抗折力は少なくとも150~160 kg/mm² は必要で,結合相あるいは工具材の軟らかい組織の硬度が高く,その 含有量が少ないほど工具摩耗は小さいこと,また工具摩耗の大きい場合には第 1領域と第2領域の遷移域は低速側にずれること,およびGFRP切削用工具 としては超硬合金K10,M10が最適であることが明らかになった。

-90-

謝 辞

本研究を行なりにあたり,終始御懇切なる御指導と御鞭撻を賜わりました大 阪大学教授 長谷川嘉雄先生,大阪大学助教授 花崎伸作先生に衷心より感謝 の意を表します.

また論文を御校閲していただき,有益なる御助言と御教示を賜わりました大 版大学準和秀夫教授,井川直哉教授,堀川 明教授に対して厚く感謝の意を表 します.

また日頃から御指導を賜わっている大阪大学堀内 宰助手,大阪電気通信大学安富雅典講師をはじめ大阪大学工学部機械工学科,産業機械工学科の諸先生 方に深謝致します.

さらに実験の遂行に際し種々の労を煩らわせた大阪大学工学部岩崎信三技官, 森山重信技官をはじめ,熱心な御助力をいただいた河相 修,山本秀弘,久保 田茂樹,難波江周一郎,石垣 敦,豊田年行,前橋正人の諸氏に感謝致します.

