

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	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

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

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 GFRP 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
2.3.1 切削状態	8
2.3.2 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
3.3.1 切削速度の影響	20
3.3.2 すくい角の影響	23
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
3.3.5 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
3.5 結 言	33
第4章 高速切削時の工具摩耗の機構	35

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	40
4.3.3	切削距離の影響	41
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	49
第5章	切削剤の影響	51
5.1	緒言	51
5.2	実験方法	51
5.3	実験結果および考察	55
5.3.1	低速域における切削剤の影響	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	高速切削時の工具摩耗に及ぼす影響	65
(1)	工具摩耗	66
(2)	被削材温度の影響	70
(3)	曲げ強さ	71
(4)	考察	71
5.4	結言	73

第6章 工具材質の影響	75
6.1 緒言	75
6.2 実験方法	75
6.3 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	82
6.3.4 工具材の物理的性質の影響	84
6.4 結言	87
第7章 総括	89

第 1 章 緒 論

プ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プラスチックの強化材およびプ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、プ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、マット状にはいつている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シ樹脂の低速二次元切削を行なって工具摩

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, 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, 安味：日本機械学会論文集, 29, 202 (1963), 1054.
- (8) 安味：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, 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えた。工具としては高速度鋼第 4 種製完成バイト $\phi 12.7$ を使用し、平面研削

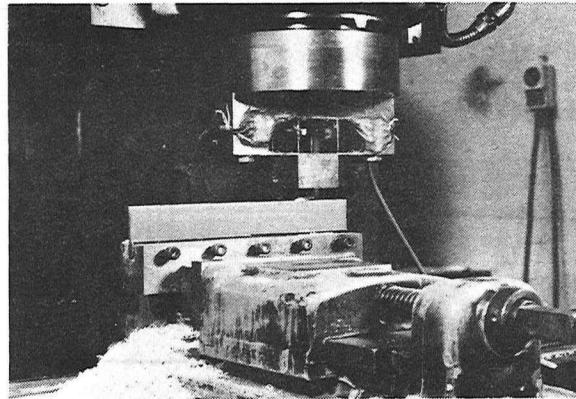


図 2.1 切削実験装置

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

表2.1 低速二次元切削の切削条件

すくい角 α°	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

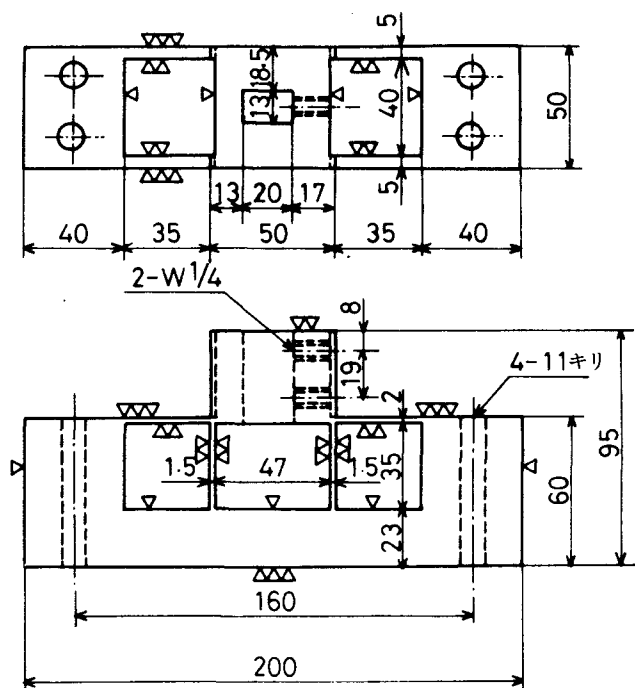


図2.2 工具動力計

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、 $1\text{ m}/\text{min}$ 程度の低速切削ができるように駆動用電動機（5 kw, 1700rpm）を別に設け、無段変速機を介し

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75mm, 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、パイプ材の場合にはスローアウェイ型チップTNG331

をN22R-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

表2.3 工具動力計の特性

限界荷重	水平方向	1000kg
	鉛直方向	700kg
相互干渉	水平→鉛直	0.8%以下
	鉛直→水平	0.5%以下
固有振動数	水平方向	$2.7 \times 10^3 \text{ Hz}$
	鉛直方向	$2.4 \times 10^3 \text{ Hz}$

表2.4 旋削の切削条件

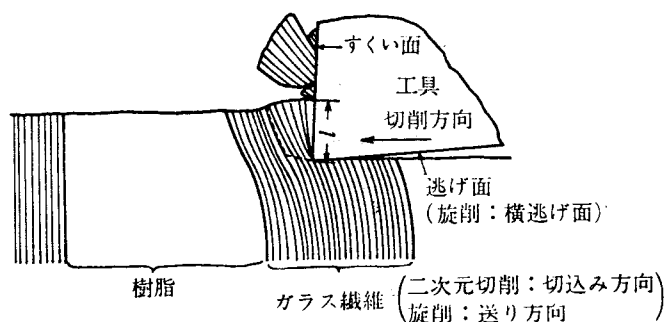
切削速度 (m/min)	1 ~ 332
切削距離 (m)	200, 300
切込み (mm)	1.0
送り (mm/rev)	0.15, 0.177

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を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

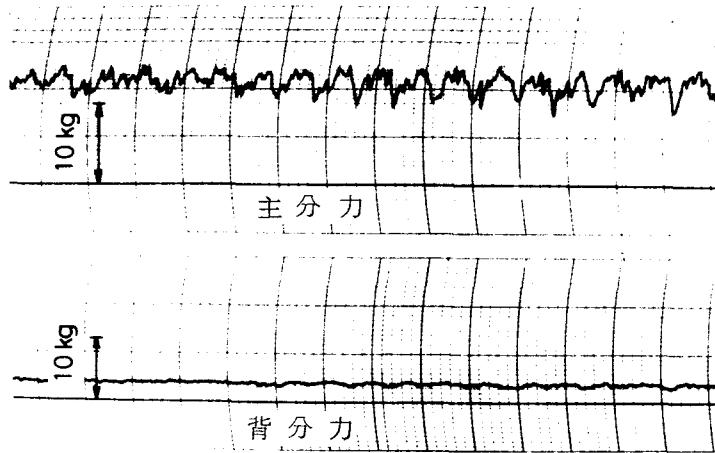
図2.3は低速二次元切削の際に切れ刃がガラス繊維部を切削しているときの切削状態を示すスケッチである(写真ではガラス繊維部が不鮮明のためスケッチで示す)。図は切りくずが被削材から分



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こる。二次元切削に使用した試料ではガラス繊維は切削運動方向および切込み方向にはいつているが、切込み方向にはいつ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つ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



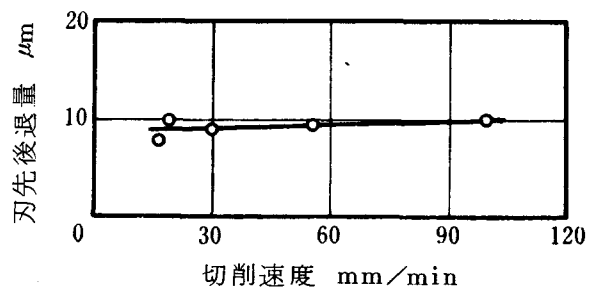
切削速度：16 mm/min，切込み：0.1 mm
 切削幅：2.8 mm，すくい角：10°

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

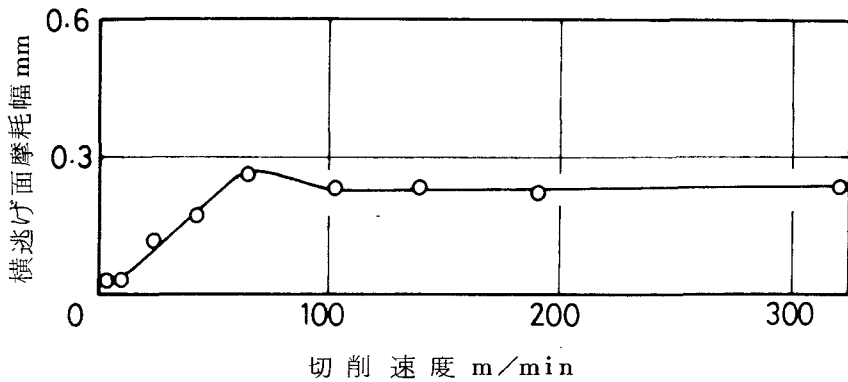
図 2.5 は低速二次元切削において、切込みを一定にした時の切削速度と刃先後退量の関係である。図からわかるように、刃先後退量は一定で、低速域での工具摩耗は切削速度を変化させても変化がない。逃げ面



すくい角：10°，切込み：0.1 mm
 切削距離：5 m

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。

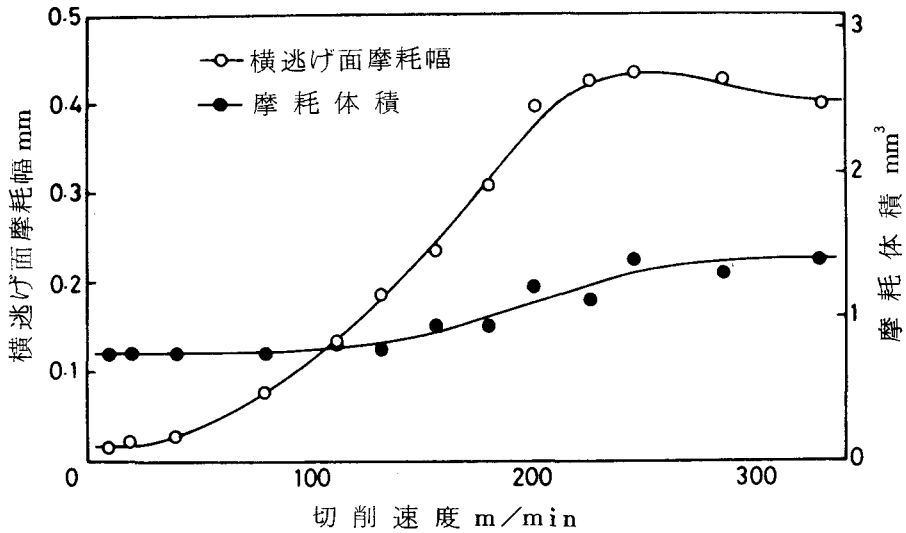


切込み：1.0 mm, 送り：0.177mm/rev, 切削距離：300m
被削材：パイプ材

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 $10\text{m}/\text{min}$ 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 $70\text{m}/\text{min}$ 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 $70\text{m}/\text{min}$ 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、三つの領域に分かれ、摩耗体積もほぼ同様の傾向となっている。



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

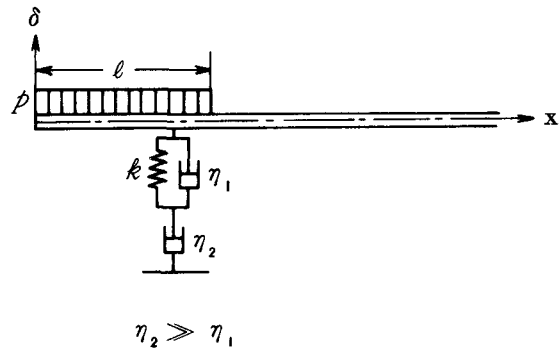


図 2.8 被削材中のガラス繊維と樹脂の力学モデル

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 l 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 k 、 η_1 、 η_2 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、 k ：ガラス繊維単位長さあたりのばねのばね定数、 η_1 、 η_2 ：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、 δ_0 ：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、 $\eta_2 \gg \eta_1$ としているから粘性係数 η_1 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 $\eta_2 = \infty$ すなわち剛体と考えるべく、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 η_2 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 $\eta_1 = 0$ と考えるべく、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 η_1 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。

$$\left. \begin{array}{l}
 x \leq l \\
 EI \frac{d^4 \delta}{dx^4} = -k \delta - \frac{v \eta}{\delta_0} \delta + p \\
 x \geq l \\
 EI \frac{d^4 \delta}{dx^4} = -k \delta - \frac{v \eta}{\delta_0} \delta
 \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

式(2.1)の解は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{x \leq l} &= e^{ax} (c_1 \cos ax + c_2 \sin ax) + e^{-ax} (c_3 \cos ax + c_4 \sin ax) + \frac{p}{4EIa^4} \\ \delta_{x \geq l} &= e^{-ax} (c_5 \cos ax + c_6 \sin ax) \end{aligned} \right\} (2.2)$$

ただし、 a は次式によって定義される。

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

次に示す境界条件を用いると、式(2.2)は式(2.4)になる。

$$\begin{aligned} x = 0 ; \quad \frac{d^2 \delta_{x \leq l}}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^3 \delta_{x \leq l}}{dx^3} = 0 \\ x = l ; \quad \delta_{x \geq l} = \delta_{x \leq l}, \quad \frac{d \delta_{x \geq l}}{dx} = \frac{d \delta_{x \leq l}}{dx}, \quad \frac{d^2 \delta_{x \geq l}}{dx^2} = \frac{d^2 \delta_{x \leq l}}{dx^2}, \\ \frac{d^3 \delta_{x \geq l}}{dx^3} = \frac{d^3 \delta_{x \leq l}}{dx^3} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{x \leq l} &= \frac{p(l)}{8EIa^4} \left\{ 2 - e^{ax-al} \{ \cos al \cos ax + \sin al \sin ax \} \right. \\ &\quad \left. - e^{-ax-al} \{ (\cos al - 2 \sin al) \cos ax + \sin al \sin ax \} \right\} \\ \delta_{x \geq l} &= \frac{p(l)}{8EIa^4} \left\{ e^{-ax+al} \{ \cos al \cos ax + \sin al \sin ax \} \right. \\ &\quad \left. - e^{-ax-al} \{ (\cos al - 2 \sin al) \cos ax + \sin al \sin ax \} \right\} \end{aligned} \right\} (2.4)$$

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。

$$V = \frac{p(l)}{4a} \{ 1 + e^{-2al} (\sin 2al - 2 \sin^2 al - 1) \} \quad (2.5)$$

al が少し大きい値をとれば、 v 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

されるとき分布荷重の強さは次式で表わされる。

$al \gg 1$ であって、変位速度が十分小さい範囲では

$$p = 4K \sqrt{\frac{k + \eta_1 (EI)^{1/4} v k^{3/4} \sqrt{2} K}{4EI}} \quad (2.6)$$

$al \gg 1$ であって、変位速度が十分大きい範囲では

$$p = 2 \sqrt{\frac{4kK^4}{EI} + \frac{1}{2} v^4 \eta_1^4 + \frac{1}{2} \left(v^8 \eta_1^8 + \frac{48v^4 k \eta_1^4 K^4}{EI} \right)^{1/2}} \quad (2.7)$$

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、式(2.5)は次のように書き改められる。

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

al と p 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は小さい)では分布荷重の幅が小さいほど分布荷重の強さが大きくなることわかる。そしてこの範囲では

$$p \doteq \frac{K}{l} \quad (2.9)$$

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

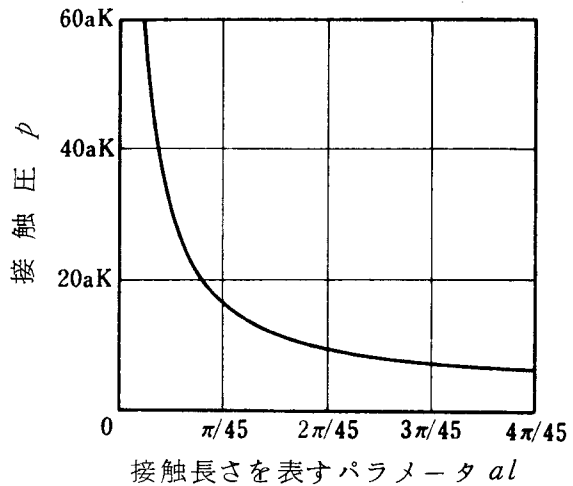


図 2.9 al と p の関係

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 p が変位速度にほぼ比例する条件下では，分布荷重の幅は p 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($al \ll 1$ 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， $al \ll 1$ の条件で次式が容易に求まる。

$$k \delta_0^{1/3} + \eta_1 \delta_0^{1/3} v = \left(\frac{4K^4}{EI} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

ここで δ_0 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 δ_0 は次式で近似できる。

$$\delta_0 = \frac{4K^4}{EI \eta_1^3 v^3} \quad (2.11)$$

式(2.11)を式(2.3)に代入して al を求めれば

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

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， $al \ll 1$ 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， $al \gg 1$ の条件で分布荷重端におけるたわみ δ_0 は

$$\delta_0 = \frac{p}{8EI a^4} \quad (2.13)$$

となり，式(2.7)を近似展開すると次式が求まる。

$$p \doteq 2v\eta \left\{ 1 + \frac{1}{4} \frac{16kK^4}{v^4 \eta^4 EI} \right\} \quad (2.14)$$

式(2.3), (2.13), (2.14)から al を求めると

$$al = l \sqrt[4]{\frac{k}{4EI} + \frac{\eta_1^4 v^4}{16K^4}} \quad (2.15)$$

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, $v \neq 0$ 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 $p \doteq 2K \sqrt[4]{\frac{4k}{EI}}$ 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. $x \geq l$ でのたわみ $\delta_{x \geq l}$ は式(2.4)を求めたのと同様にして

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

で表わされる. ただし式中 $4a^4 \equiv \eta_2 (1 - e^{-\frac{4}{\eta_2} t})$ 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

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{1}{2} \int_l^\infty \left(\frac{d\delta_{x \geq l}}{dx} \right)^2 dx = \left\{ \frac{p}{8EIa^4} \right\}^2 \frac{a}{8} \{ 3 + e^{-2al} (-6 + 6 \sin 2al + 4 \sin^2 al) \\ + e^{-4al} (3 + 4 \cos 2al \sin^2 al - 6 \sin 2al + 4 \sin^2 al \sin 2al + 4 \sin^2 al) \} \quad (2.17) \end{aligned}$$

$$\div 6 \left\{ \frac{pl}{8EI} \right\}^2 \left\{ \frac{4EI t}{\eta_2} \right\}^{5/4} \quad (2.17)'$$

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 Δl 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

が大きくなる。

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) 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シ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 $16\text{mm}/\text{min}$ 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 (0.2kw , 1420rpm) を設け、二個の減速機 (減速比: $1/10$, $1/30$) を介してテーブルを駆動した。変速は二個の減速機間の 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シ樹脂のほかに、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シ樹脂 (ガラス繊維: すだれ織状) を、切込みの影響を調べる実験では比較のためにガラス繊維強化フェノール樹脂も用いた。

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、

0.092mm 間隔の格子線を焼き付けた被削材を用いた。格子線焼き付けの概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%水溶液+重クロム酸アンモニウム15g+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、真空焼杯中に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%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刃先後退量、切れ刃単位長さ当た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

すくい角 α°	10, 20, 30
逃げ角 r°	11
刃先丸味半径(μm)	5

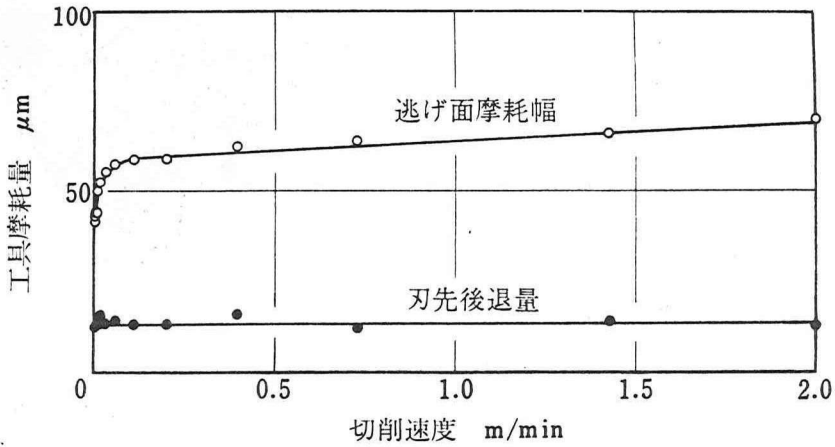
表3.2 切削条件

切削速度(mm/min)	1.2~2000
切削距離(m)	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

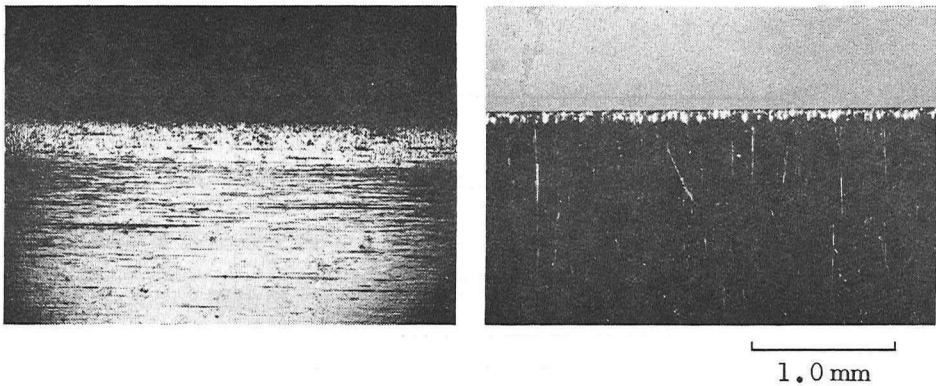
切込み、切削距離を一定としたときの切削速度と摩耗量の関係を図3.1に



切込み：0.3mm，切削距離：5m，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0.1m/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



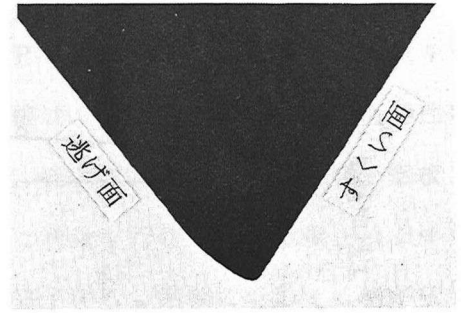
(a) すくい面摩耗部

(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つ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掘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

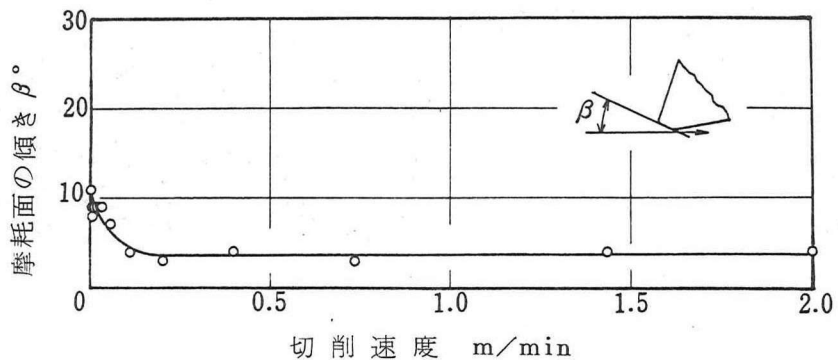


100 μ m

切削速度: 396 mm/min, 切込み: 0.3 mm
 切削距離: 5 m, 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つ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



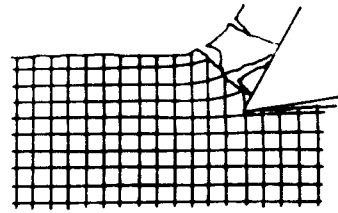
切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 工具: SKH4

図3.4 切削速度と摩耗面の傾き β との関係

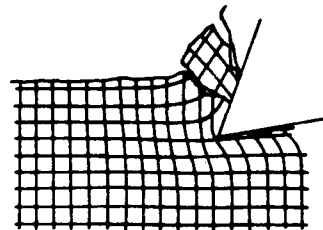
部分に対応している。また摩耗面が切削運動方向となす角度が切削速度により変化しているので、この角度を測定した。その結果を図3.4に示す。摩耗面の角度は逃げ面摩耗幅が急変する切削速度 0.1 m/min 以下では大きく、それ以上の切削速度ではほぼ一定の値となっている。これは逃げ面摩耗幅が急変する極低速域で摩耗形態が変化することを意味し、後述するようにガラス繊維の軸方向の変位量増分が大きく影響している。

3.3.2 すくい角の影響

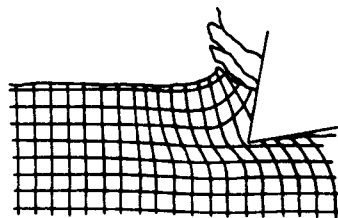
図3.5は側面に格子線を焼き付けたガラス繊維強化エポキシ樹脂を、すくい角を変えて切削した際に観察される格子変形状態および切りくず生成状態を示すスケッチである（写真不鮮明のためスケッチで示す）。図からわかるように、工具すくい面と切りくずとの接触長さはすくい角によって差があり、すくい角が大きいほど短くなっている。また格子の変形はすくい角が小さいほど大きく、しかも変形領域は刃先前方に広がっている。3.2で述べた方法により求めたすくい角 10° の場合の変位曲線を図3.6に示す。変位量はガラス繊維部では大きく、樹脂部では小さくなっている。図3.7は切れ刃レベル上の各点が破断するまでに示した切削運動方向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



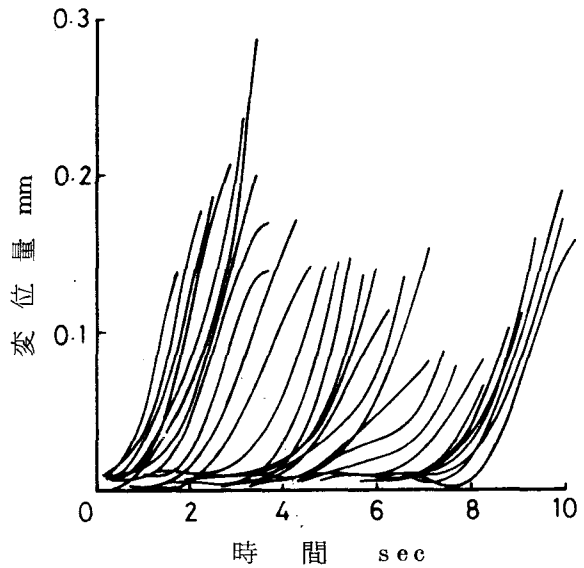
(c) すくい角 10°

切削速度： 19 mm/min
切込み： 0.3 mm

図3.5 切りくず生成状態

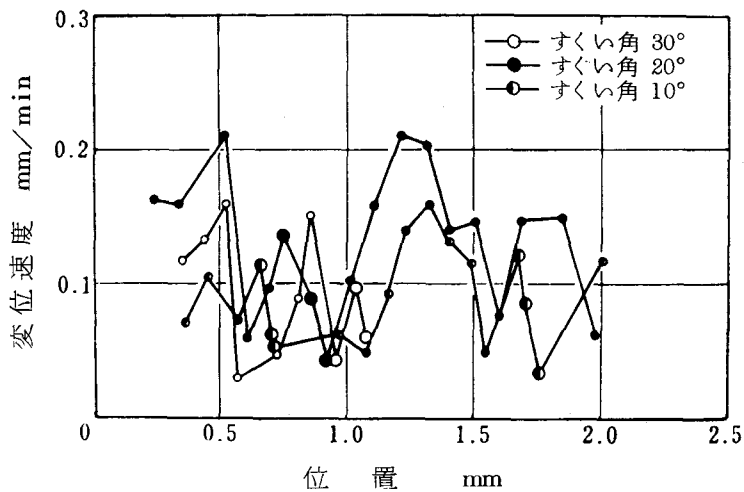
繊維部であり、変位速度の低い部分は樹脂部である。ガラス繊維部の変位速度は明らかにすくい角によって差があり、 20° が最大であり、 30° 、 10° は同程度であって、 20° より低い値を示している。

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



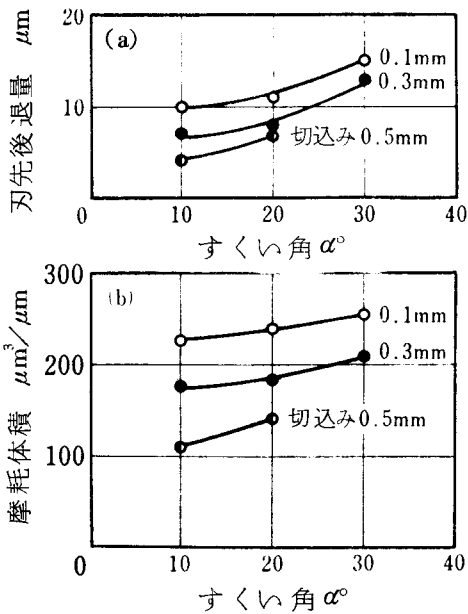
切削速度: $19\text{mm}/\text{min}$, 切込み: 0.3mm
すくい角: 10°

図3.6 変位曲線



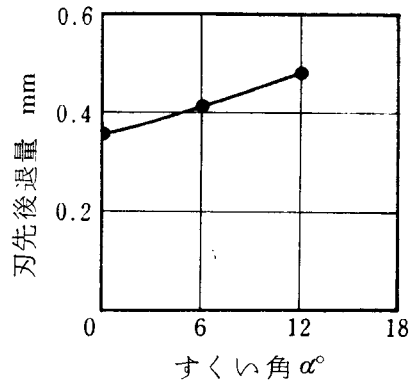
切削速度: $19\text{mm}/\text{min}$, 切込み: 0.3mm

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, α , 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: 500m

図3.9 旋削における工具摩耗

刃の単位幅あたりの摩耗体積を示す。刃先後退量，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。

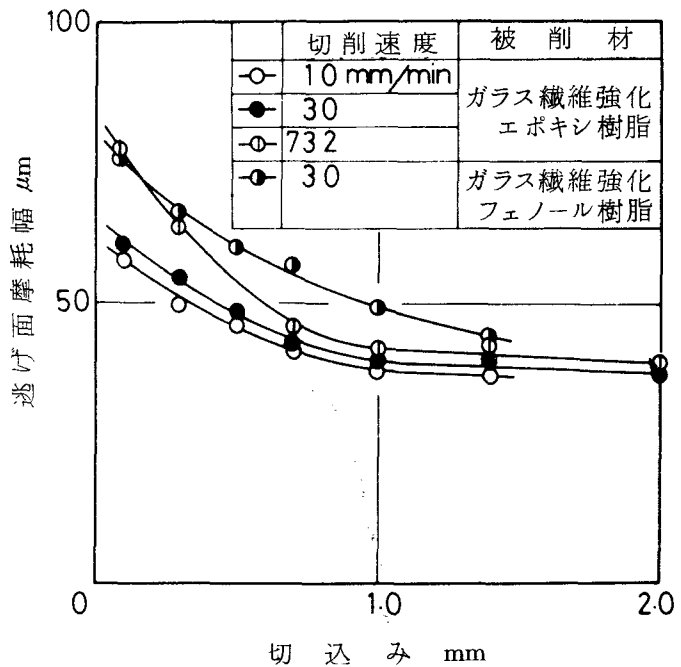
3.3.3 切込みの影響

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 $732\text{mm}/\text{min}$ 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.

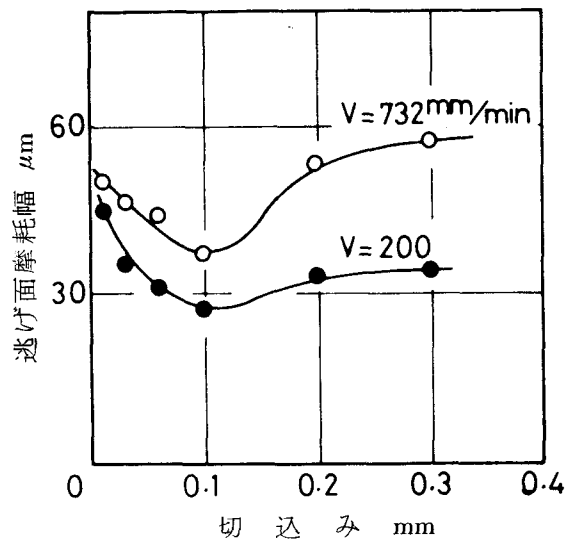
10は切削速度 $732\text{mm}/\text{min}$
 までの結果であったが、第4
 章で示すようにこの効果は第
 1領域のさらに高い切削速度
 でも観察された。

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シ樹脂
 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: 5 m, 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



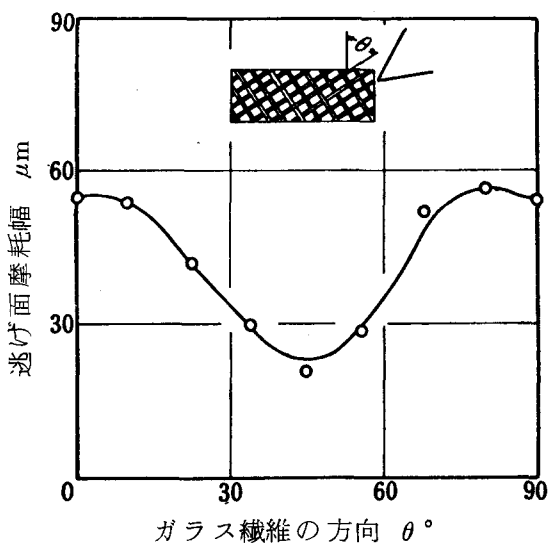
切削距離: 5 m, ガラス繊維含有率: 50%
 工具: SKH4, すくい角: 10°

図3.11 切込みと逃げ面摩耗幅の関係

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 732 mm/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 0.1 mm 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。 200 mm/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

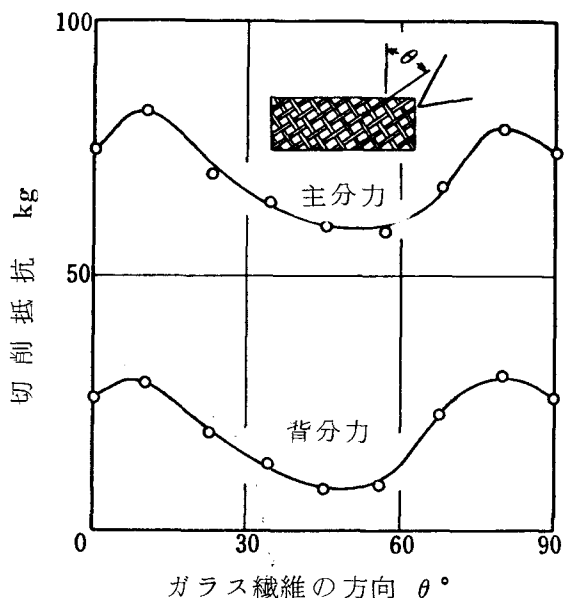


切削速度: 30 mm/min , 切込み: 0.3 mm
 切削距離: 5 m , 工具: SKH4
 すくい角: 10°

図 3.12 ガラス繊維の方向と逃げ面摩耗幅の関係

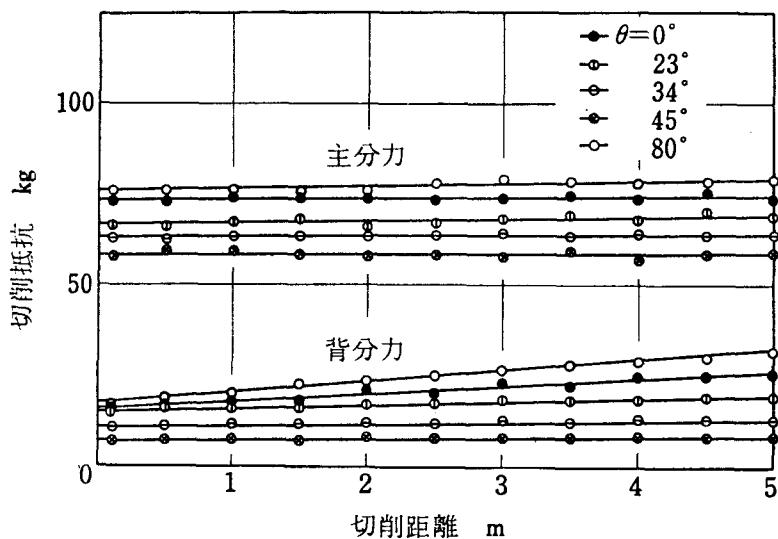
を調べたが、差は認められなかった。図 3.13 はガラス繊維の方向と切削抵抗の関係である。GFRP 切削時の切削抵抗は変形領域および擦過領域における接触荷重と摩擦力によって決まるが、代表的なガラス繊維の方向をとって切削距離と切削抵抗の関係をみると図 3.14 に示すようになり、この図より切削

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：30mm/min，切込み：0.3mm
 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



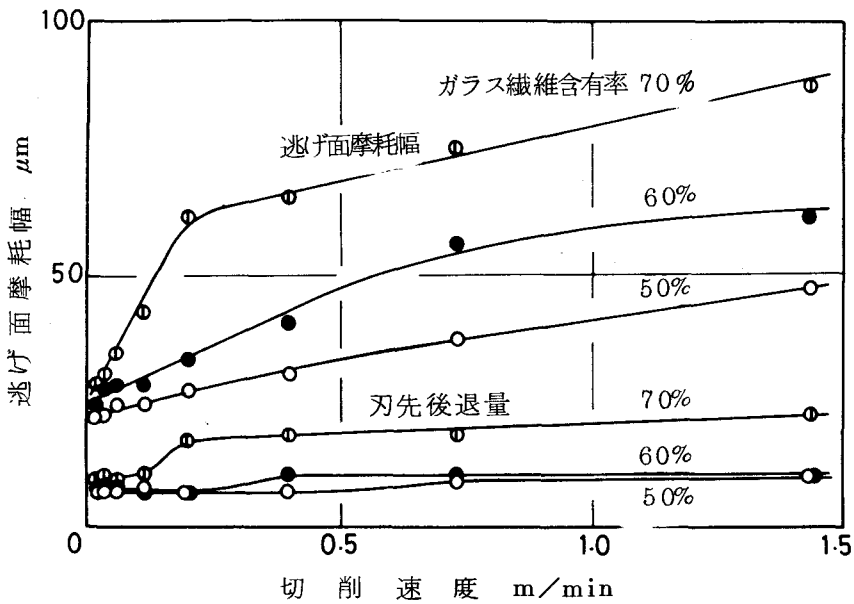
切込み：0.3mm，切削速度：30mm/min，工具：SKH4
 すくい角：10°

図3.14 切削距離と切削抵抗の関係

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

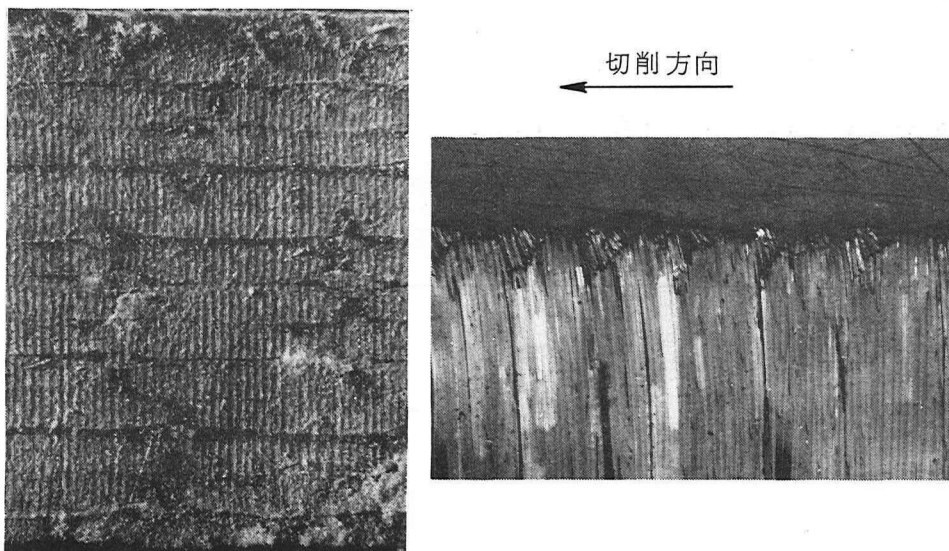
切込みを 0.1 mm、切削距離を 5 m とし、ガラス繊維含有率を 50、60、70 % と変化させた場合の切削速度と工具摩耗量の関係を図 3.15 に示す。逃げ



切込み：0.1 mm、切削距離：5 m、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、刃先後退量ともガ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、200mm/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：0.1 mm ，切削距離：5 m
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

数は70%で13層, 60%, 50%でそれぞれ9層, 6層となっていて, 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, 3.6 mm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⁾。

$$h = A \tan \theta \rho_1 L / H \quad (3.1)$$

ここで, A は定数, θ は接触面のあらさによって決まる定数, ρ_1 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で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つている場合には, 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, 平行にはいつ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。この時ほつ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。したがって接触圧は式(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 η_2 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つているので、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、刃先丸味部を擦過するに要する時間は低速切削ほど大きくなる。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、

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、 η_2 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ポ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.
- (3) 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.

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じの材料を 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 l 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

工具 \ 被削材	パイプ材	円板材
超合金 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

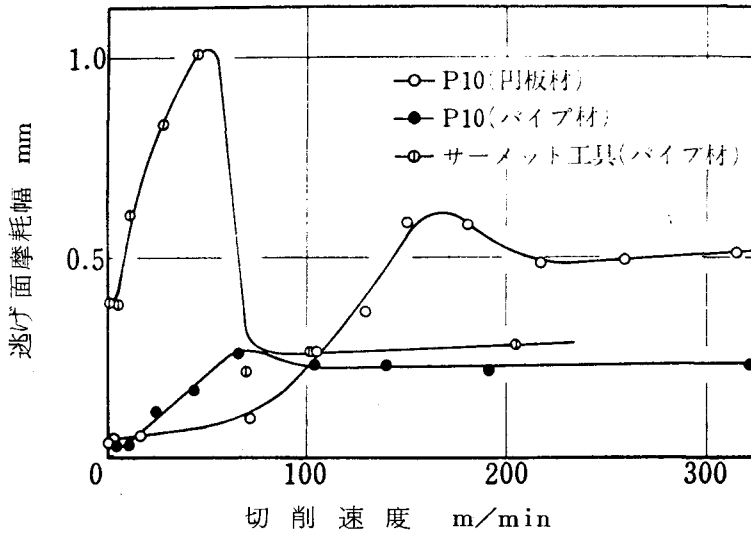
切削速度 V (m/min)	1~332
切削距離 L (m)	100~300
切込み t (mm)	1.0
送り f (mm/rev)	0.075~0.354

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

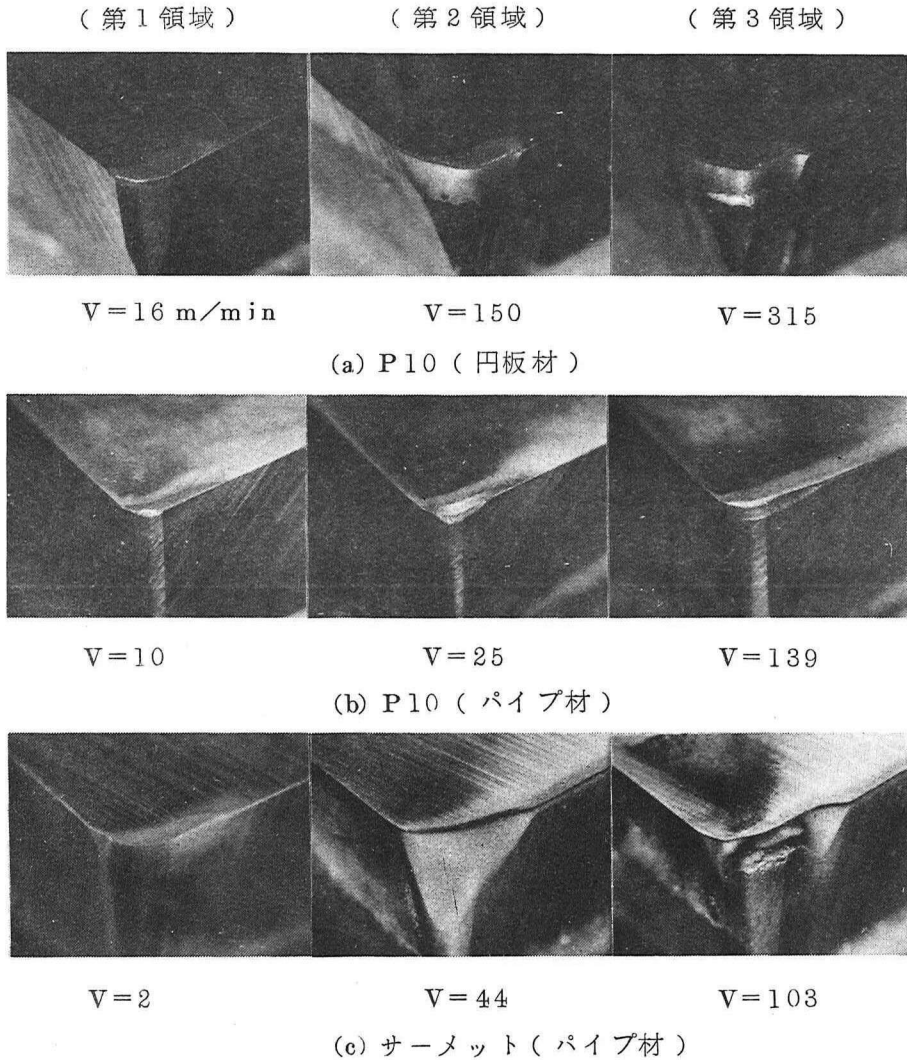
図 4.1 は切込み、送り、切削距離を一定としたときの切削速度と逃げ面摩耗幅の関係である。いずれの場合にも類似の摩耗特性を示している。すなわち、第 2 章で述べたように、工具摩耗は切削速度に関係なく一定で、しかも小さい低速の第 1 領域、切削速度とともに急激に増加する第 2 領域、そして第 2 領域よりさらに高速での工具摩耗一定の第 3 領域に分けられる。ただ、超合金 P10 で円板材を切削した場合に第 1 領域が広いこと、またサーメットでパイプ材を切削した場合に第 3 領域での水準が第 2 領域の極大点よりかなり低いことなどの点に差が認められる。



切込み：1.0mm，送り：0.177mm/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 P 10 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 領域では切れ刃にほぼ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，P 10 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。P 10 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



切込み：1.0mm，送り： 0.15 mm/rev ，切削距離：300m

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

10m/min (第1領域)			
44m/min (第2領域)			
103m/min (第3領域)			
切削速度 送り	0.177mm/rev	0.254mm/rev	0.254mm/rev

切込み：1.0mm, 切削距離：300m, 被削材：パイプ材
 図4.4 切削断面

0.5mm

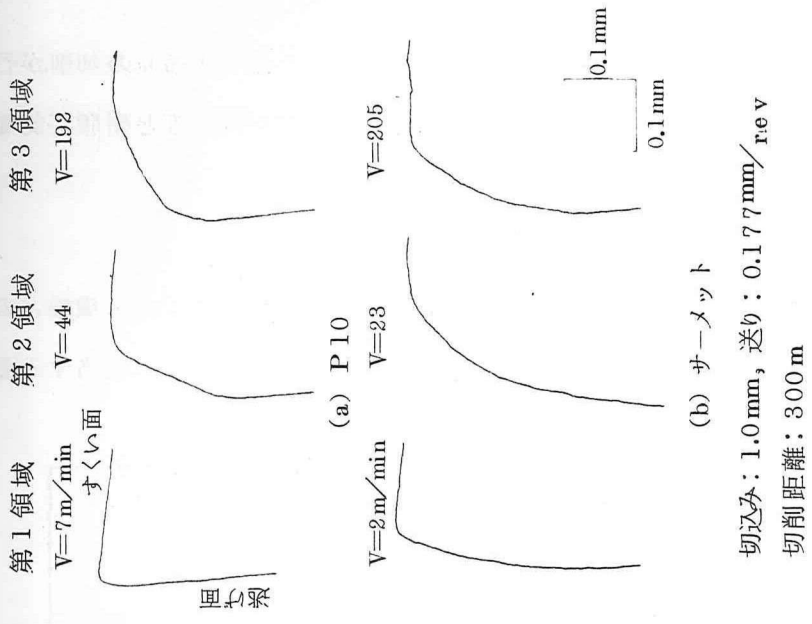


図4.3 摩耗部断面曲線

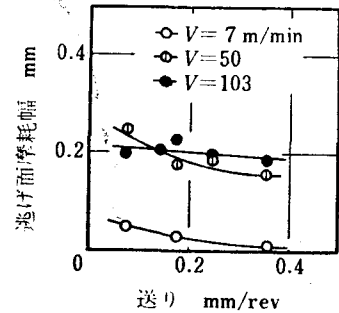
では、ガラス繊維が切削面から多少突出しており、工具形状通りの切削が行なわれていない。さらに樹脂部にクラックがはいり、ガラス繊維と樹脂が剥離している。

4.3.2 送り量の影響

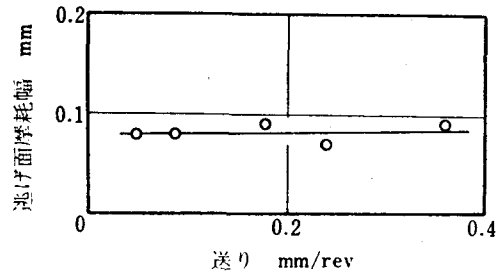
第2章では第1領域における工具摩耗は工具と被削材中のガラス繊維との接触長さの影響を受けることが明らかになったが、この接触長さに相当する量はパイプ材の旋削の場合、1回転あたりの送り量に相当する。そこで各領域に属する切削速度、すなわち第1領域の7、第2領域の50、第3領域の103 m/min について、送り量を変えた実験を行なった。

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くなるにつれ、工具摩耗は増加して、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)の切削距離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、切削距離



(a) 切削距離 $L=300\text{m}$



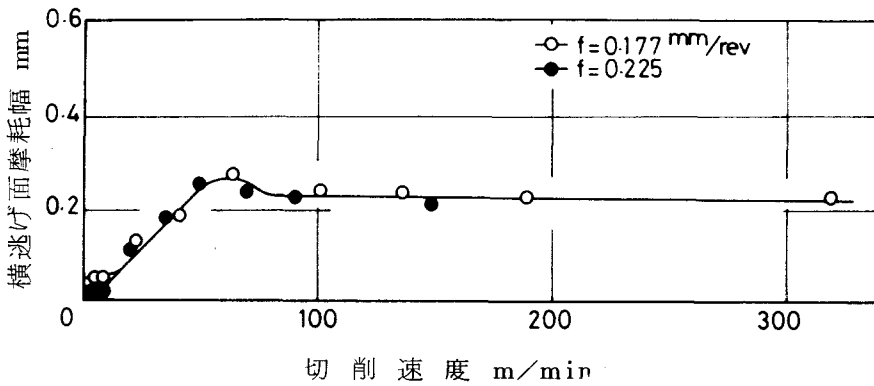
切削速度: 50 m/min 、切込み: 1.0 mm

(b) 切削距離 $L=100\text{m}$

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

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 $103\text{m}/\text{min}$ 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。

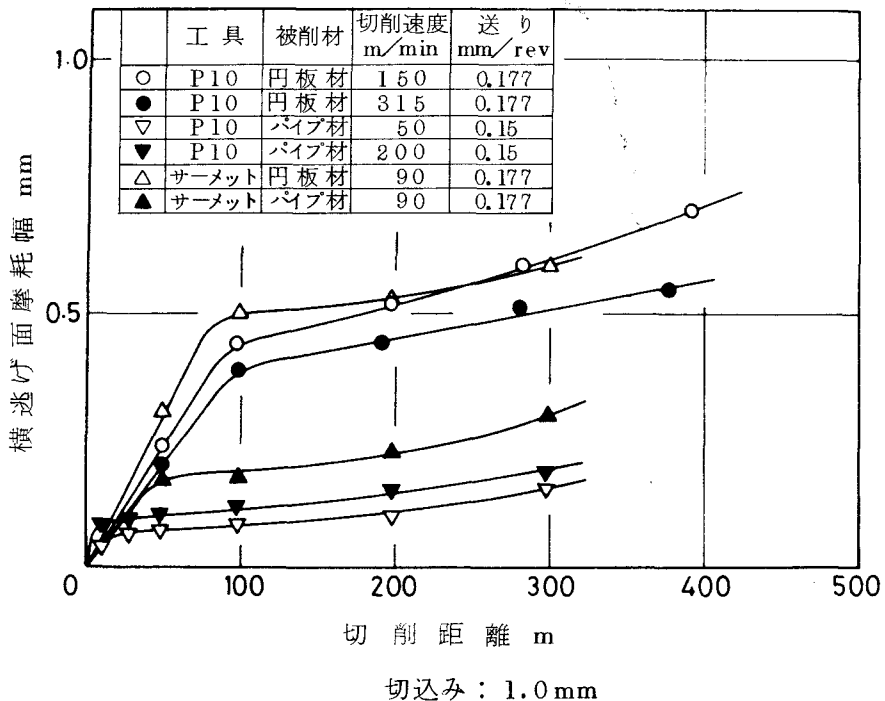


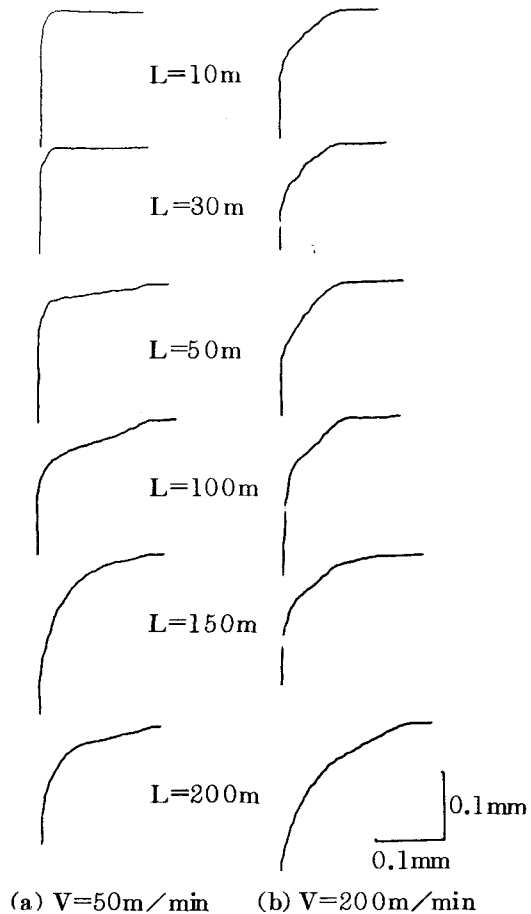
図4.7 切削距離と横逃げ面摩耗幅の関係

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, 200 m/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 $200\text{m}/\text{min}$ 、切削距離200mの場合の被削材の切削断面を図4.10に示す。第

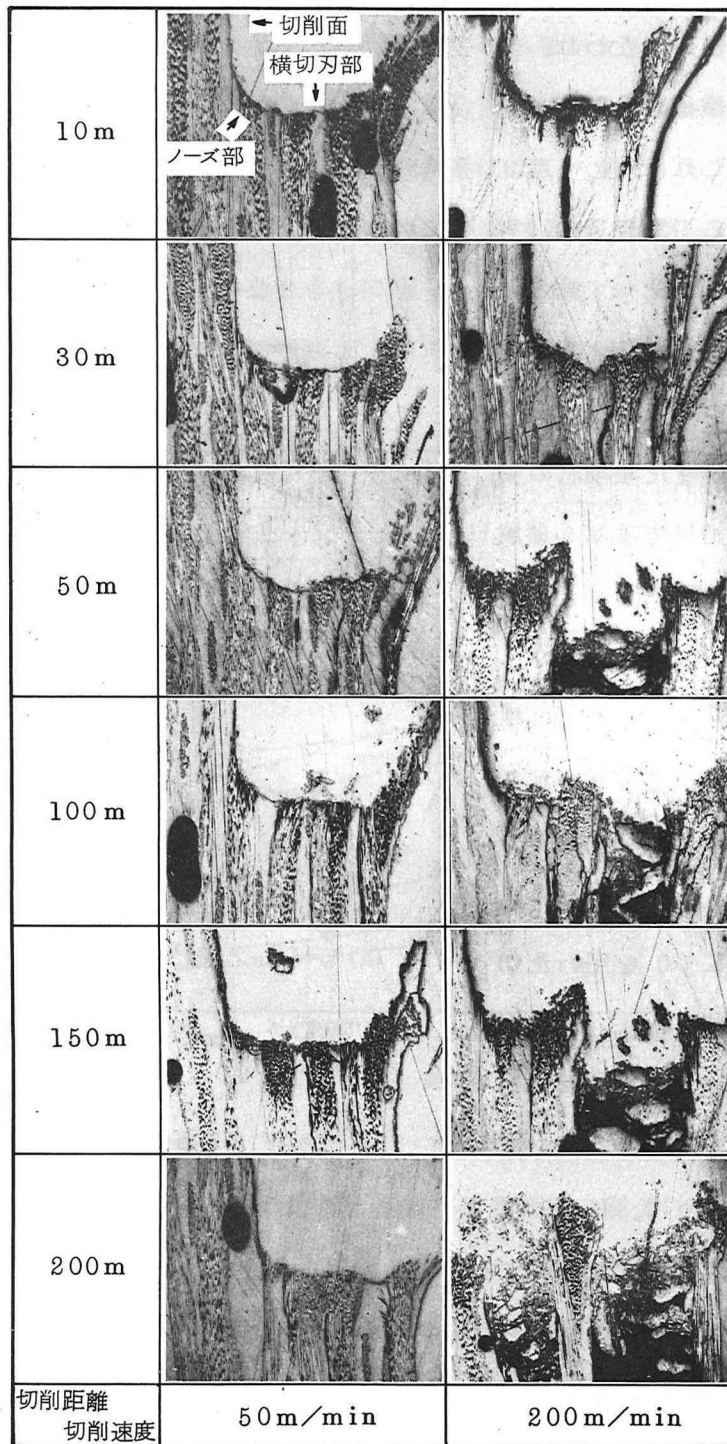
6章で示すように、K10で

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 $200\text{m}/\text{min}$ 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: $0.15\text{mm}/\text{rev}$,
工具: P10

図4.8 摩耗部の断面曲線



切込み: 1 mm, 送り: 0.15 mm/rev, 工具: P10 ┌──────────┐
1 mm

図 4.9 切削断面

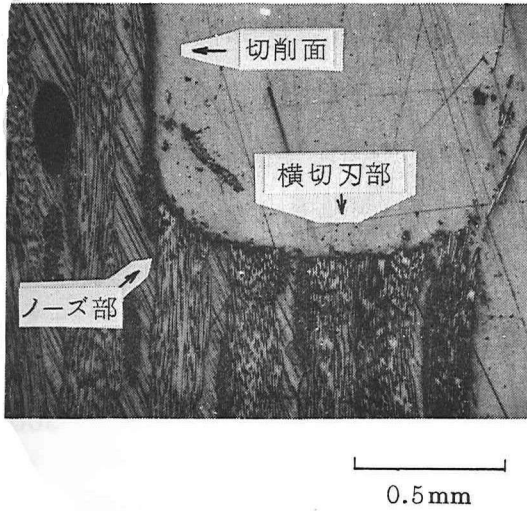
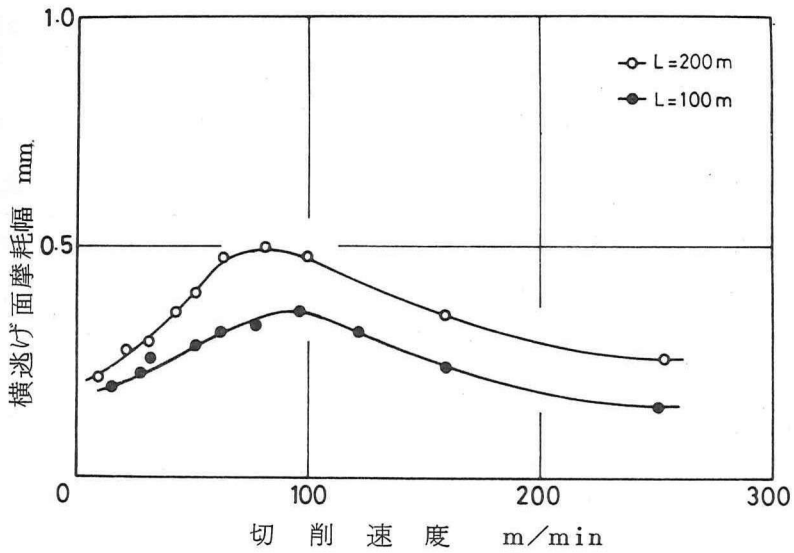


図 4.10 切削断面

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



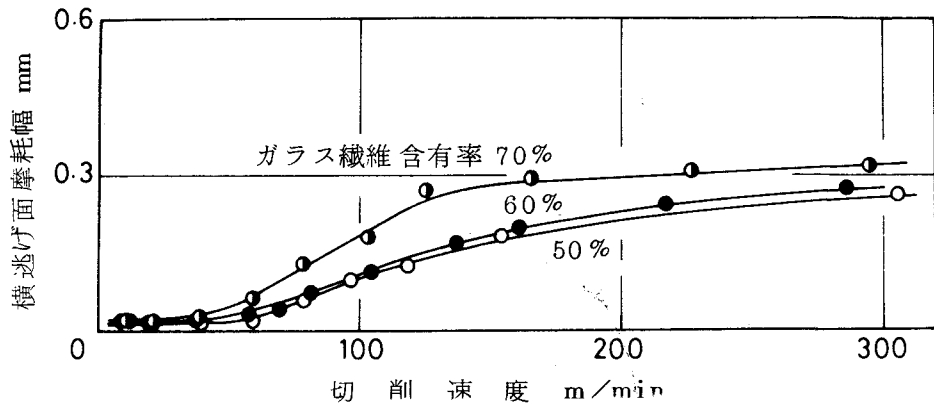
切込み: 1mm, 送り: 0.15 mm/rev, 工具: サーメット

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

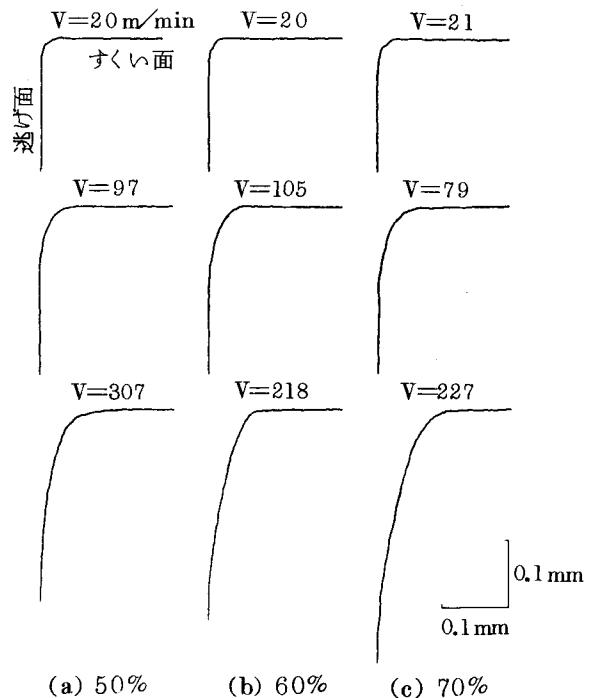


切込み：1.0 mm，送り：0.096mm/rev，切削距離：200m，工具：P10

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：0.096mm/rev，
切削距離：200m，工具：P10

図4.13 工具摩耗部断面曲線

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_1 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

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⁽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

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 $al \approx 1$ 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うけず、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.
- (3) W.D.Mahler : Kunststoff, 67, 2 (1977), 81.
- (4) 井上, 井戸: 精密機械, 39, 3 (1973), 78.

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ほか、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、GFRP 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ブで調節した。

被削材は第2章で用いた材料と同じものを使用した。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ベストを巻いて、その上をガラスウールチューブで絶縁されたカントル線で巻き、外筒を介して被削材を取り付けたもので、カントル線の両端子は内筒の中心部を通してスリッピングに接続される。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
切削剤供給量(cc/m)	170

表5.2 旋削の切削条件

切削速度(m/min)	10~303
切込み(mm)	1.0
送り(mm/rev)	0.15
切削距離(m)	200
切削剤供給量(cc/min)	180

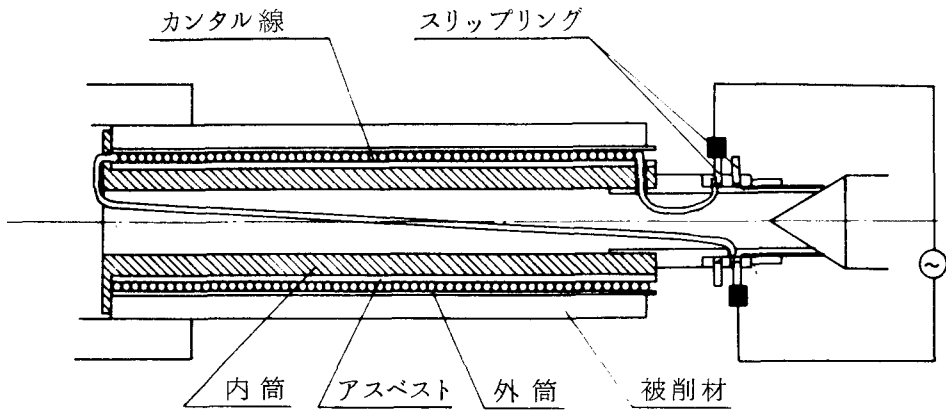


図 5.1 被削材加熱装置

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。

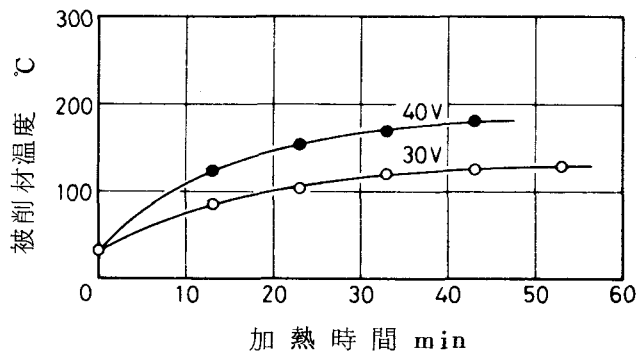


図 5.2 校正曲線

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 で示すよう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 $1 \text{ mm}/\text{min}$ で荷重

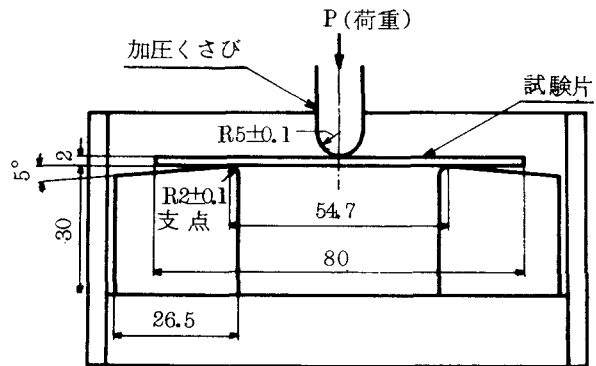


図 5.3 曲げ試験装置

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

表 5.3 切削剤の性質（低速二次元切削）

	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 5.4 切削剤の性質（旋削）

切 削 剤	J I S	比 重	粘度(cSt)	摩擦係数
灯 油	—	0.78	1.52	—
タ ー ビ ン 油	—	0.86	47.6	—
油 性 系 切 削 油	1-5	0.90	35.4	0.14
塩化系不活性型切削油	2-3	0.90	26.5	0.14
塩化系活性型切削油	3-1	0.87	10.3	0.14
硫化塩化系不活性型切削油(A)	2-1	0.86	7.6	0.15
硫化塩化系不活性型切削油(B)	2-5	0.90	35.4	0.14
硫化塩化系超活性型切削油	2-3	0.93	59.0	0.13
水 溶 性 切 削 液(A)	W 3-1号	1.09	0.874	0.14
水 溶 性 切 削 液(B)	W 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つているた

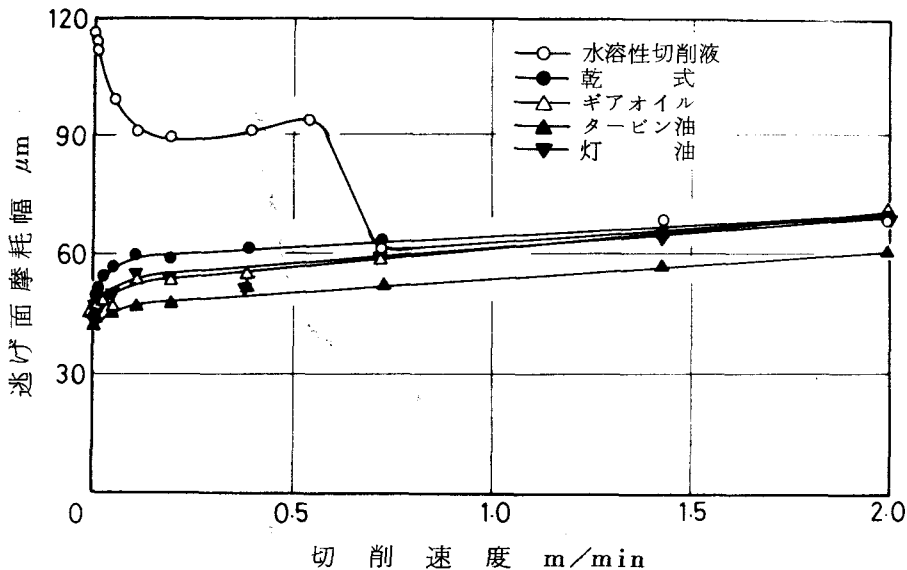
め、表面から約 0.1 mm の深さまでのガラス繊維が剝離することから、横逃げ面摩耗幅はノーズ先端から 0.4 mm の位置で測定し、その影響を少なくした。また低速二次元切削では、切削剤を用いた場合にクレータ摩耗が観察されることもあり、あらさ計によってすくい面摩耗も同時に調べた。

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 100 mm/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 cc/m

図 5.4 切削速度と逃げ面摩耗幅の関係

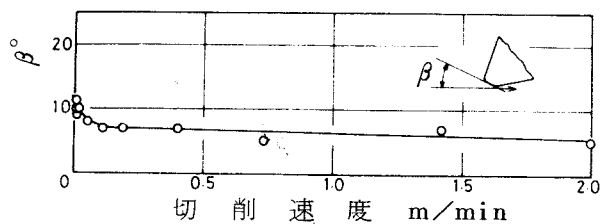
はほぼ一定の割合で漸増している。逃げ面摩耗幅はタービン油，ギアオイル，灯油の順に大きくなっているが，いずれも乾式の場合より小さい。ただ，灯油とギアオイルの場合には，切削速度が約 $1400\text{mm}/\text{min}$ 以上では乾式の場合と同程度になっている。これに対して水溶性切削液は上述の切削剤とは異なった傾向を示す。すなわち，

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，

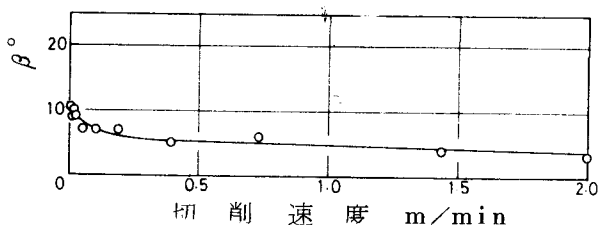
それに続く約 $550\text{mm}/\text{min}$ までの速度域ではほぼ一定で，それ以上の切削速度域では乾式の場合とほぼ同じ値となっている。

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，

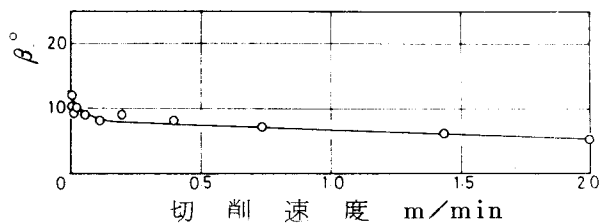
タービン油，ギアオイル，水溶性切削液の場合である。図より極低速で激しい工具摩耗を生じる水溶性切削液は切削速度が低下するに従い，摩耗面の角度 β も小さくなり， $16\text{mm}/\text{min}$ 以下の切削速度



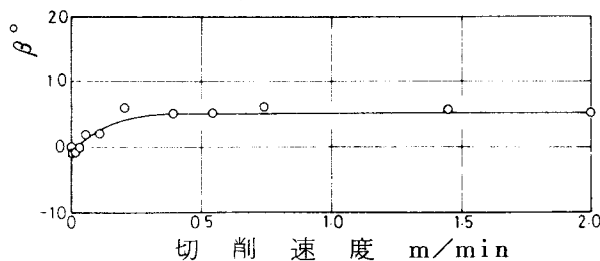
(a) 灯油



(b) タービン油



(c) ギアオイル

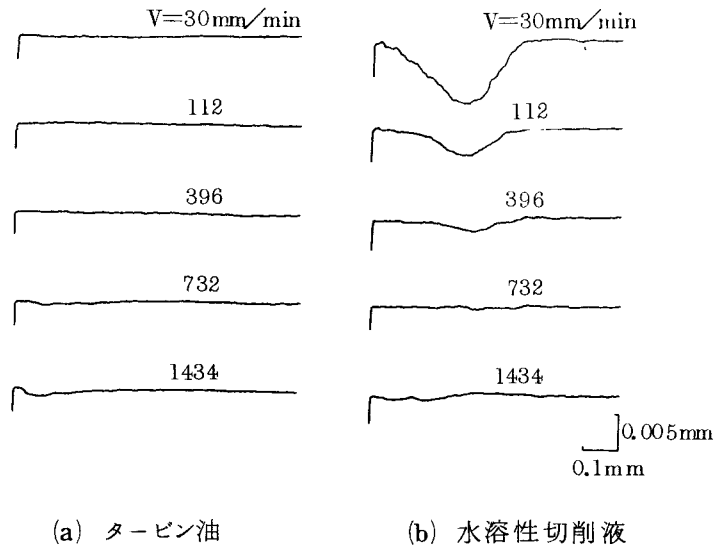


(d) 水溶性切削液

切込み： 0.3mm ，切削距離： 5m
 切削剤供給量： $170\text{cc}/\text{m}$

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。



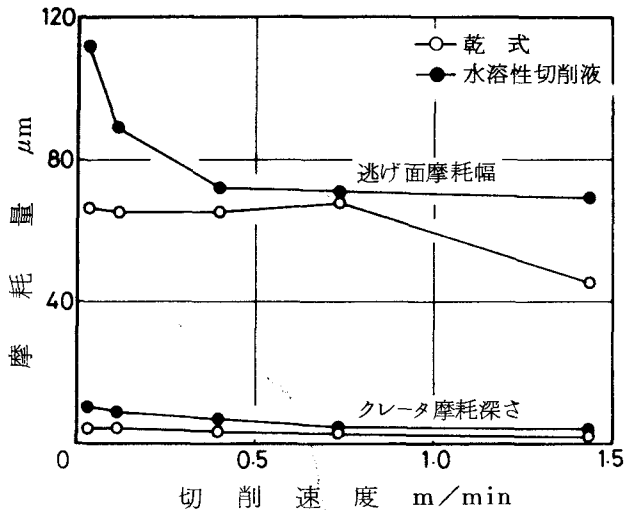
切込み: 0.3 mm, 切削距離: 5 m, 切削剤供給量: 170 cc/m
 工具: SKH4

図5.6 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 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。

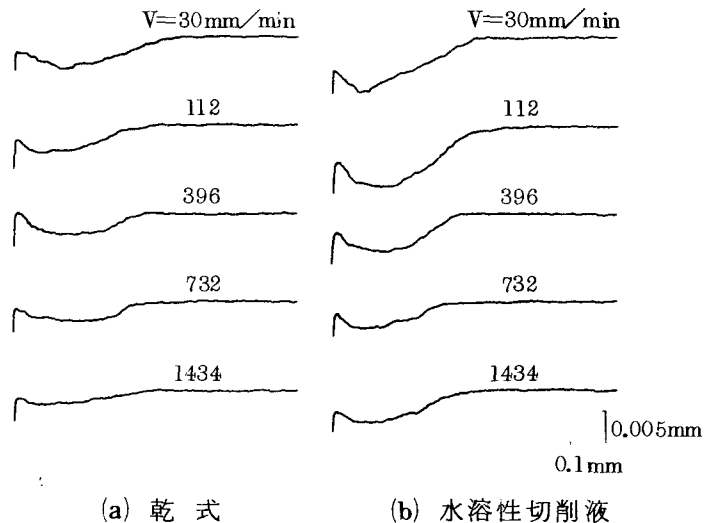
比較のために、水溶性切削液を用いてガラス繊維強化フェノール樹脂の切削も行なった。この時の切削速度と摩耗量の関係を図5.7、すくい面の摩耗状態

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400mm/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1434mm/minの時の逃げ面摩



切込み：0.3 mm，切削距離：5 m，
 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 cc/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シ樹脂の場合と同様、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。

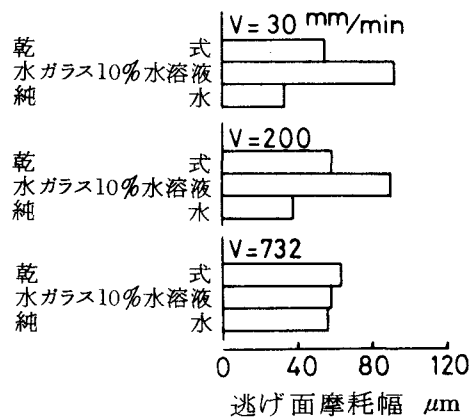
以上の結果から、工具摩耗に対する切削剤の効果は切削剤の種類、切削速度により異なることがわかった。図

5.9 は切削剤として水ガラス10%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。図から明らかのように、水ガラス10%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、200 mm/min では約1.5倍、732 mm/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り、

低速ほど小さくなっているが、732 mm/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

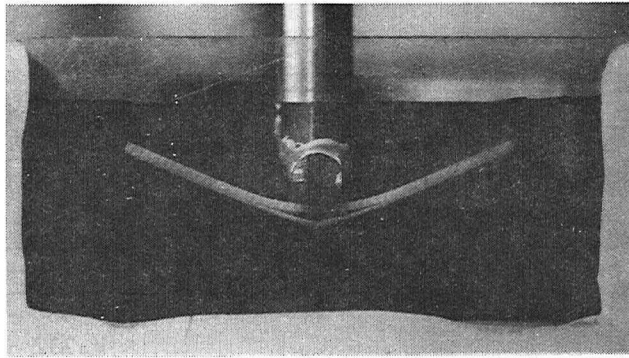
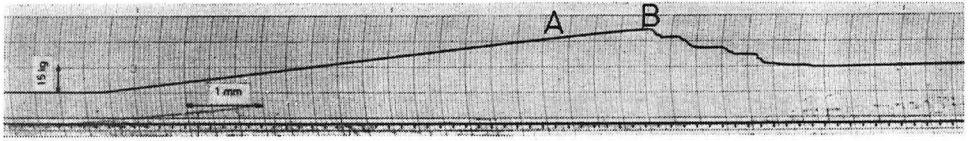
工具摩耗に対する切削剤の影響は切削剤の種類および切削速度によって異なる



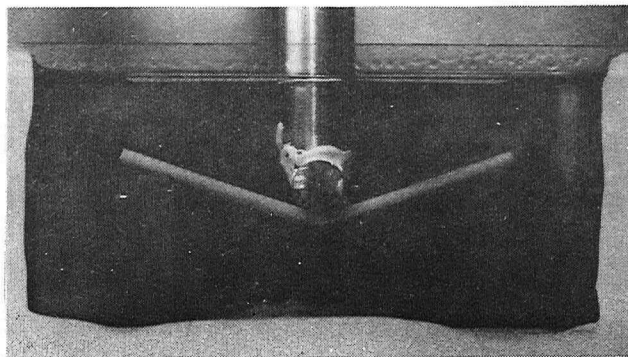
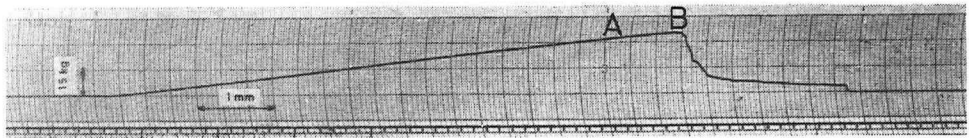
切込み：0.3 mm， 切削距離：5 m
 切削剤供給量：170 cc/m ， 工具：SKH4

図5.9 切削剤と逃げ面摩耗幅の関係

り、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ほぼ同様の傾向を示す。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⁽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。

表5.5 曲げ強さ

	曲げ強さ(kg/mm ²)
大 気 中	88.5
純 水	92.9
水ガラス10%水溶液	88.4
灯 油	89.2
タービン油	89.3
ギアオイル	90.2
水溶性切削液	87.5

(3) 摩擦試験結果

切削剤が工具摩耗に及ぼす要因としては、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
 摩擦が多いこと
 から、工具とガ
 ラス繊維、ガラ
 ス繊維とガラス
 繊維の摩擦を調
 べた。その結果
 を表5.6に示
 す。工具とガラ

表5.6 摩擦係数

	工具-ガラス繊維	ガラス-ガラス
乾式	0.42	0.16
純水	0.52	0.62
水ガラス10%水溶液	0.62	0.68
灯油	0.30	0.31
タービン油	0.22	0.13
ギアオイル	0.31	0.19
水溶性切削液	0.56	0.65

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なことが考えられる。

(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

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)~(iii)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⁾。

$$Z^2 = K_1 \frac{\sigma \cos \theta}{\eta_0} r \cdot t \quad (5.1)$$

Z : t時間に液体が浸透する深さ

- r : 空孔の直径
- η_0 : 液体の粘性
- σ : 液体の表面張力
- θ : 液体の接触角
- K_1 : 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_0 , 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(iv)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 $\sigma \cos \theta / \eta_0$ は浸透しやすさを示すパラメータであって、

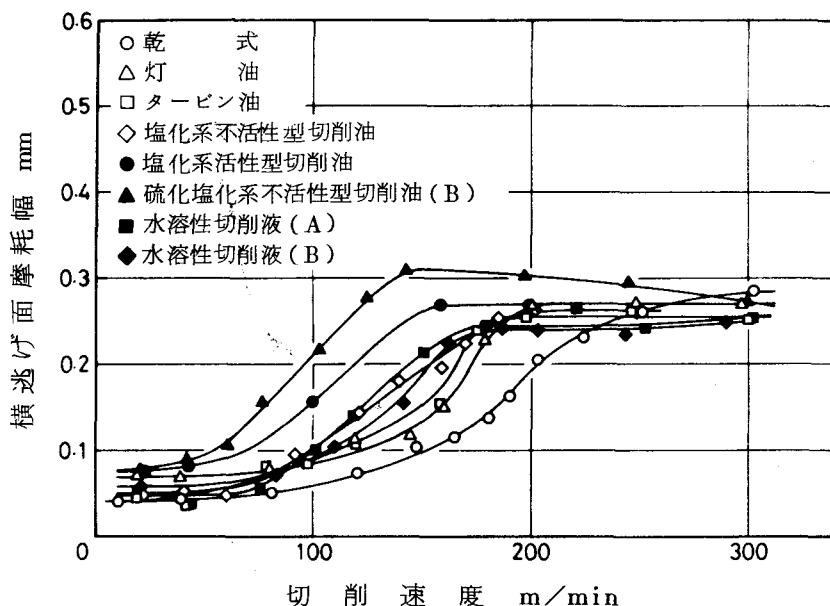
表5.7 $\sigma \cos \theta / \eta_0$

純	水	81.5
水溶性	切削液	67.5
水ガラス10%	水溶液	48.7
灯	油	13.9
タービン	油	0.505
ギア	オイル	0.0251

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



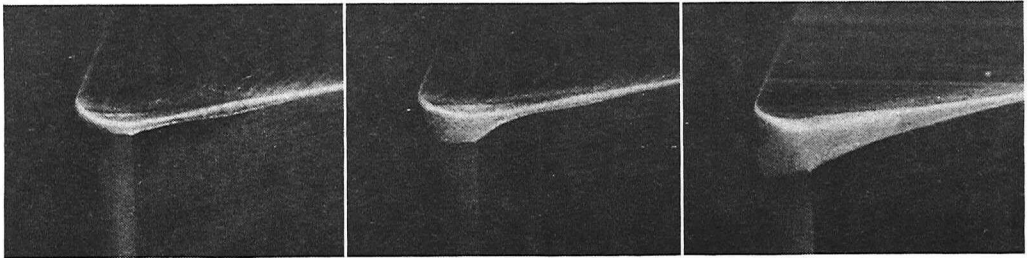
切込み：1.0mm，送り：0.15mm/rev，切削距離：200m，切削剤供給量：180cc/min

図5.11 切削速度と横逃げ面摩耗幅の関係

(第1領域)

(第2領域)

(第3領域)

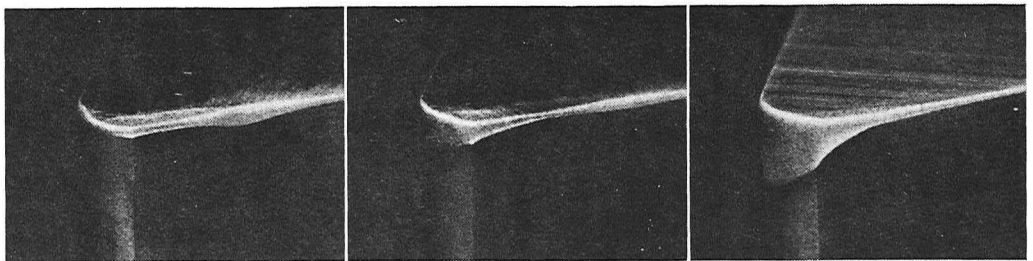


$V = 20 \text{ m/min}$

$V = 77$

$V = 246$

(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：1.0 mm，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。

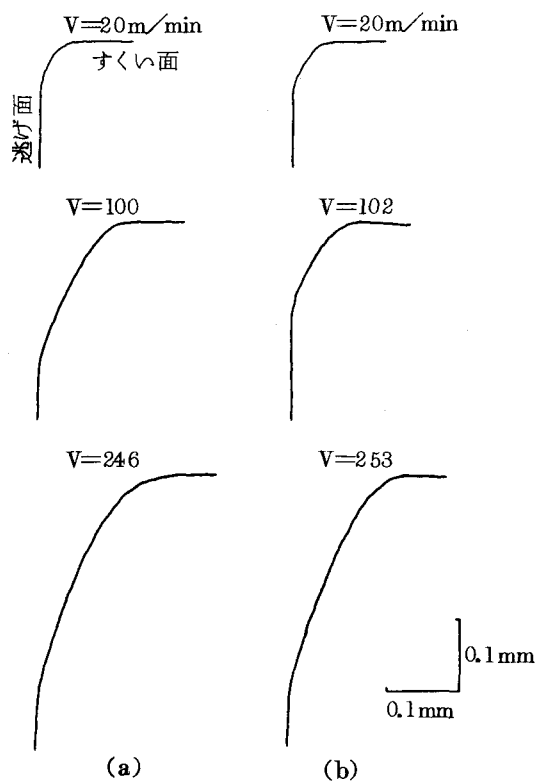
(1) 工具摩耗

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。

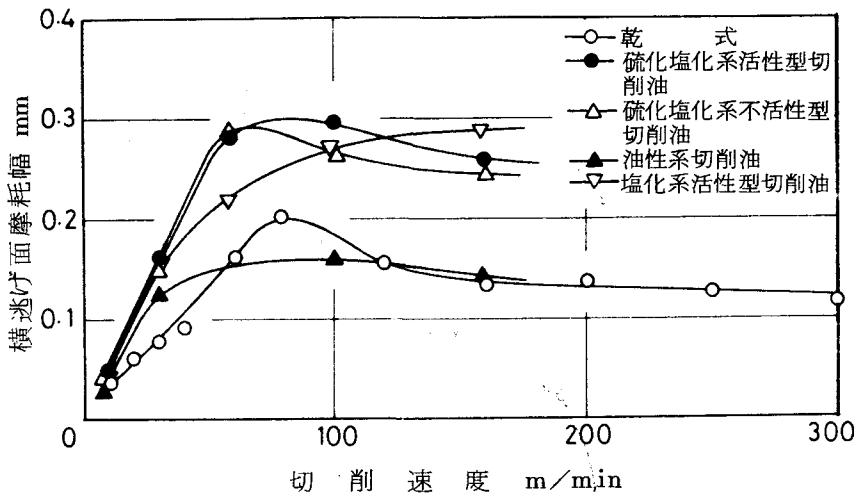
切削剤の供給量と工具摩耗の関係を図5.15に示す。(a)はガラス繊維強化ポリエステル樹



(a) 硫化塩化系不活性型切削油(B)
(b) 水溶性切削液(B)

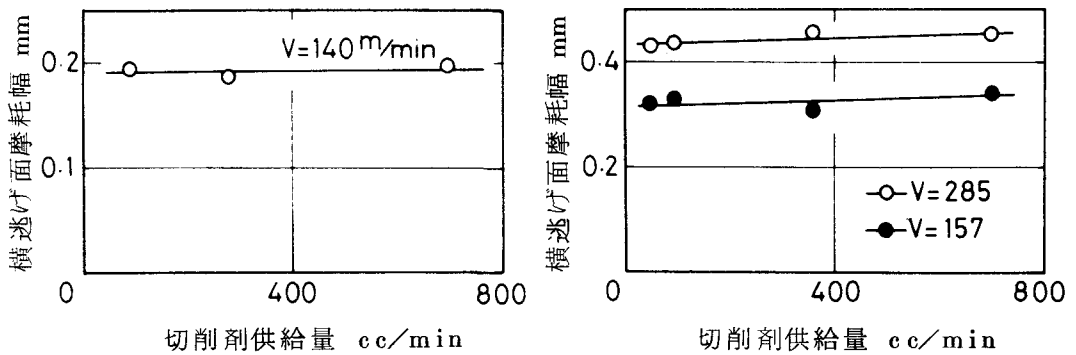
切込み：1.0mm，送り：0.15mm/rev，
切削距離：200m，切削剤供給量：180cc/min
工具：P10

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：180cc/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)

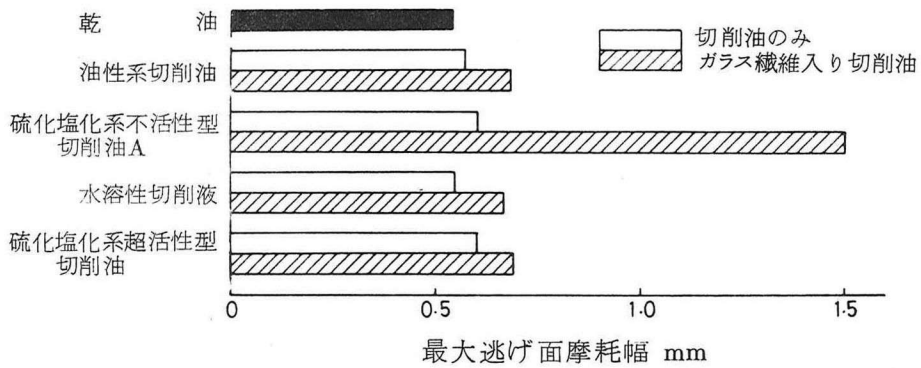
切込み：1.0 mm，送り：0.15 mm/rev
 切削距離：200m，工具：P10

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

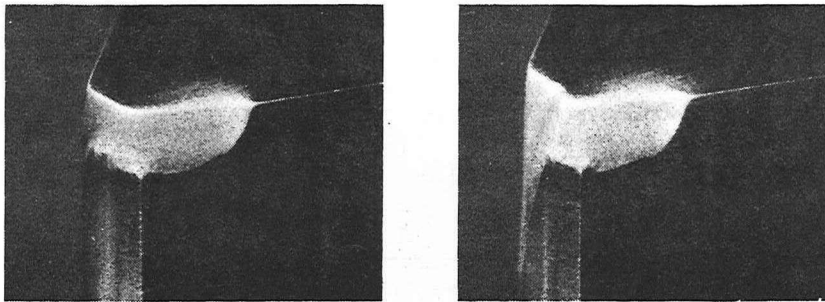
量を変化させても工具摩耗には影響がなく、長谷川、花崎ら⁽⁵⁾の結果とも一致している。

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ていない切削剤



切込み：1.0mm，送り：0.15mm/rev，切削速度：256m/min
 切削距離：200m，切削剤供給量：180cc/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：0.15mm/rev，切削速度：256m/min
 切削距離：200m

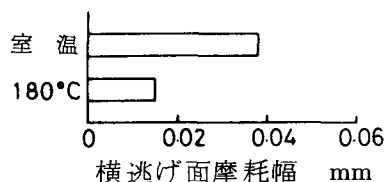
図5.17 工具摩耗形態

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に示すようにノー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領域への遷移領域が低速側にずれ、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化させ、工具摩耗への影響を調べた。

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剥離しやすくなっている。



切込み：1.0mm，送り：0.15mm/rev
 切削距離：200m，工具：P10
 切削速度：9m/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。

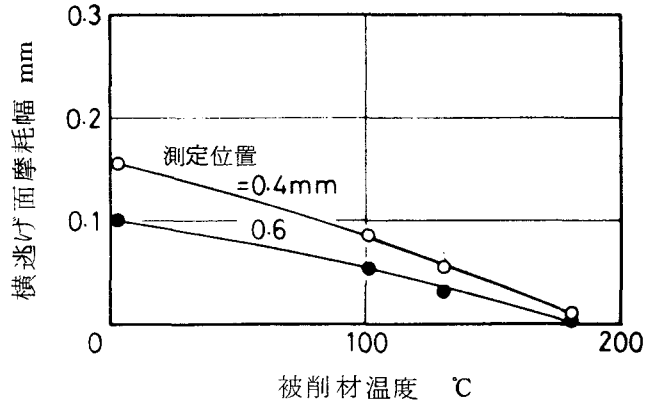
(3) 曲げ強さ

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

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 $al \approx 1$ に対応し，式(2.12)および式



切込み: 1.0 mm, 送り: 0.15 mm/rev, 切削距離: 200 m
 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 削 剤	曲げ強さ (kg/mm ²)
大 気 中	88.4
灯 油	89.2
油性系切削油	91.0
塩化系不活性型切削油	90.6
塩化系活性型切削油	92.1
硫化塩化系不活性型切削油(A)	88.6
硫化塩化系不活性型切削油(B)	95.7
硫化塩化系超活性型切削油	87.9
水溶性切削液(A)	90.7
水溶性切削液(B)	87.5

(2.15) から η , K , l が大きく影響する。津枝, 長谷川⁽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 l 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 η 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 η 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⁽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。

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：複合材料工学，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

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
の場合には口18の完成バイト

表6.1 切削条件

切削速度(m/min)	9~298
切込み(mm)	1.0
切削距離(m)	11, 100, 200
送り(mm/rev)	0.15

表6.2 工具材の物理的性質

	比重	硬度 H _{RA}	抗磁力 Oe	抗折力 kg/mm ²	ヤング率 ² ×10 ³ kg/mm ²	圧縮強さ ² kg/mm ²	熱伝導度 cal/s·cm·°C
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
P10	10.8	91.9	165	151	48.2	500	0.06
K10	14.7	90.9	210	210	63.1	585	0.25
M10	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

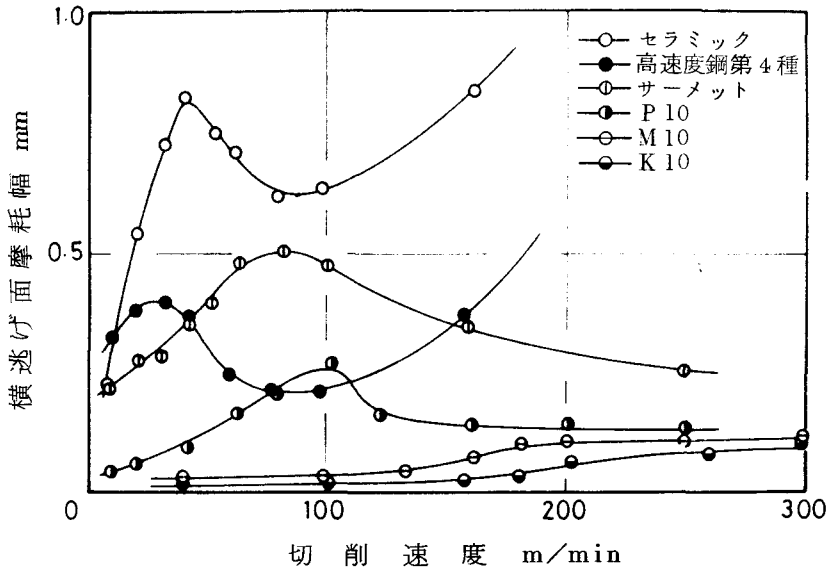
からTNG 331の形状のチップを切り出し、表面を研削盤で仕上げた後、ノーズ部を油と石により仕上げた。表6.2に工具材の物理的性質を示す。

工具摩耗量としてはノーズ先端から0.6mmの位置での横逃げ面摩耗幅をとり、摩耗部断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,

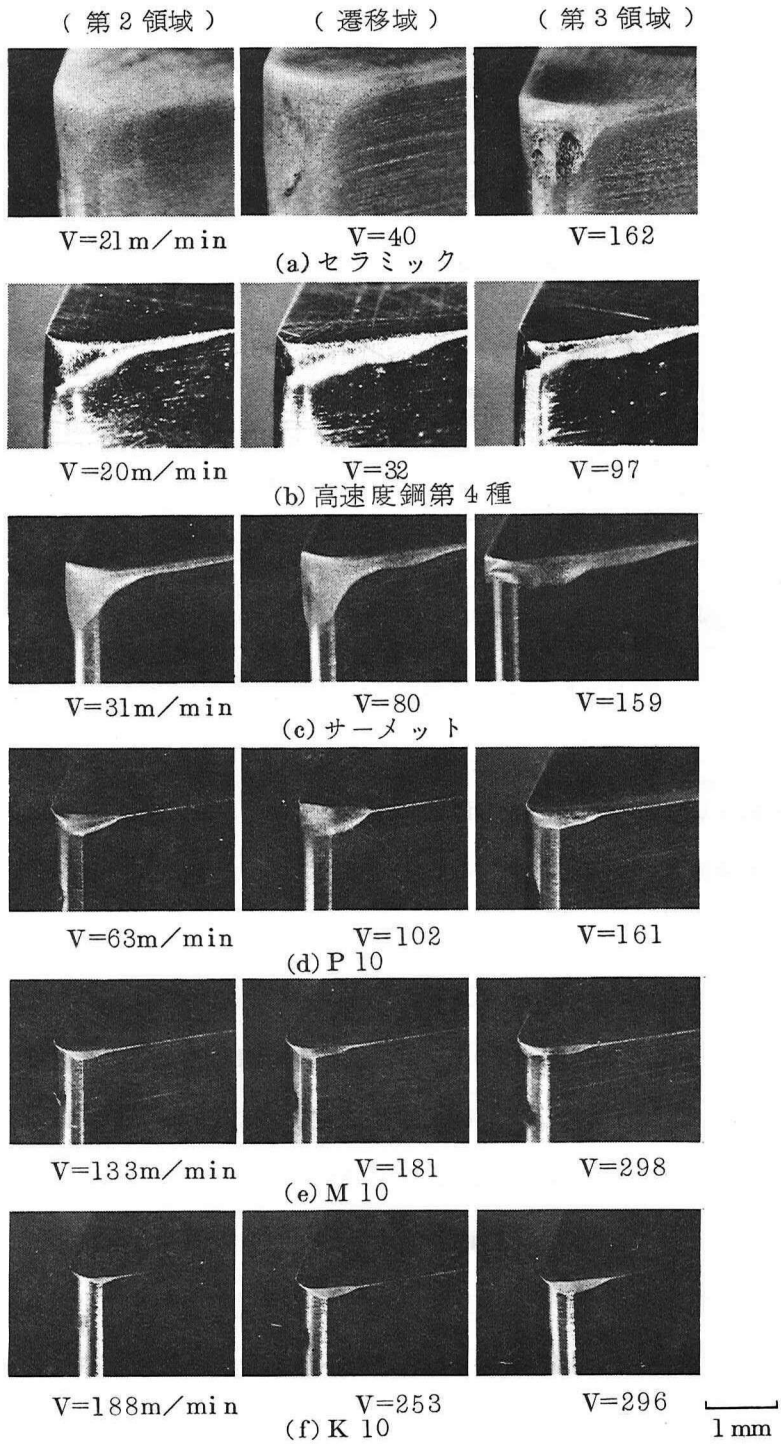


切込み：1.0 mm，送り：0.15 mm/rev，切削距離：200 m

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、サーメット、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ほ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



切込み：1.0 mm，送り：0.15mm/rev，切削距離：200m

図6.2 工具の摩耗形態

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、

(b)はサーメット、(c)はセラミックの場合で、超合金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

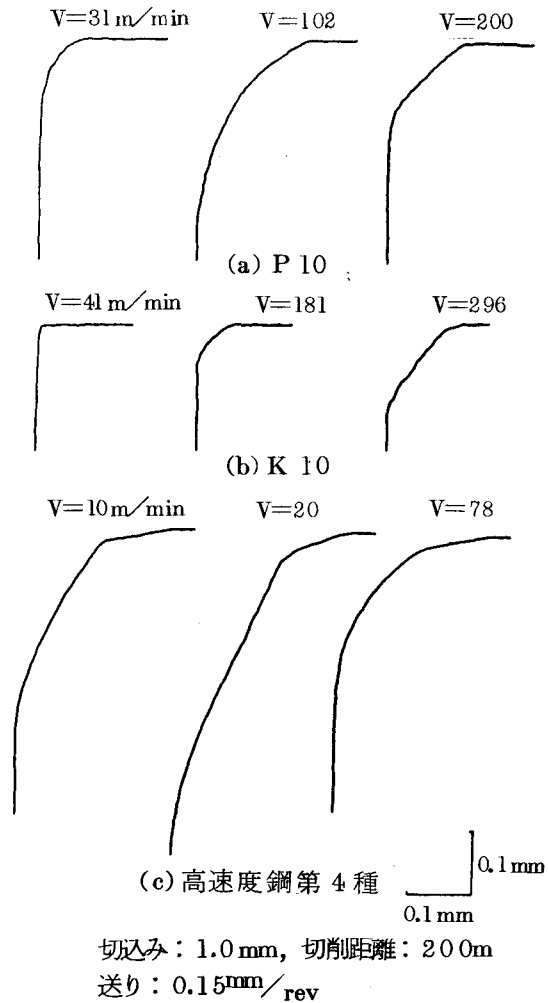
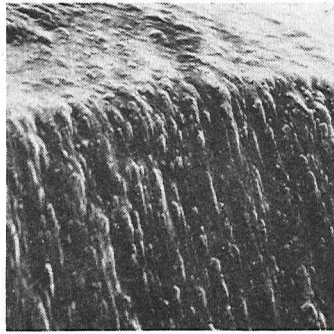


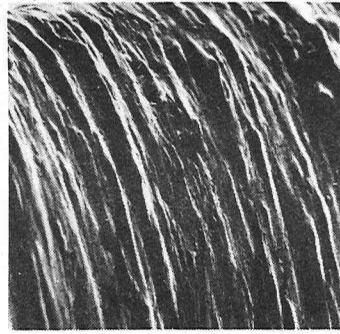
図6.3 摩耗部の断面曲線

(第2領域)



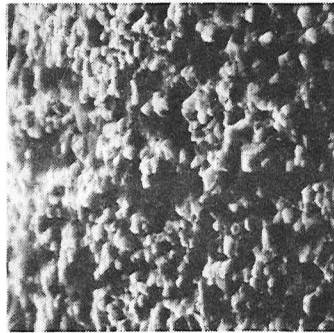
V=20m/min

(第3領域)

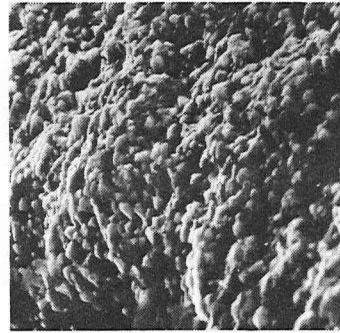


V=97

(a) 高速度鋼第4種

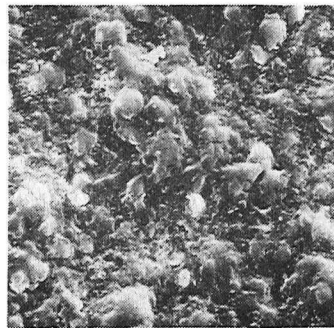


V=43

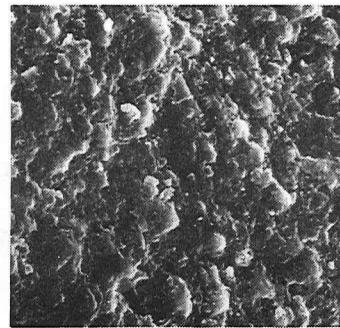


V=99

(b) サーマット



V=20



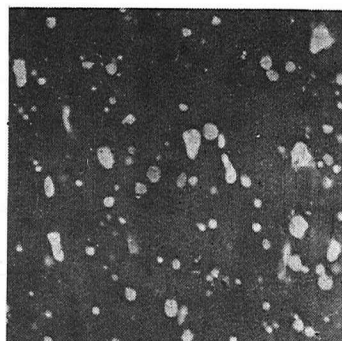
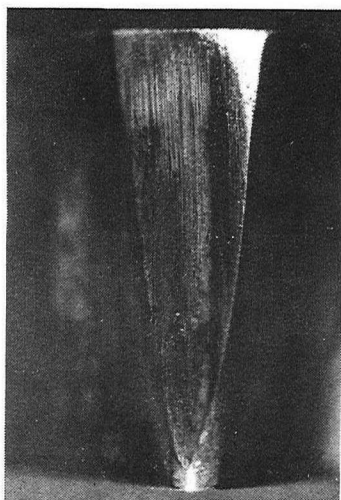
V=61

(c) セラミック

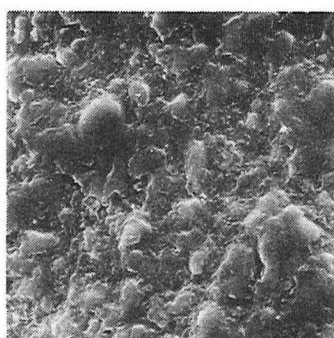
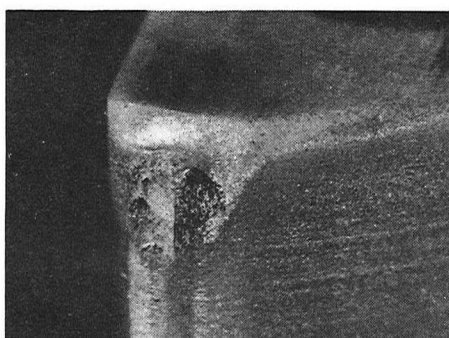
20 μ m

切込み: 1.0mm, 送り: 0.15^{mm}/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

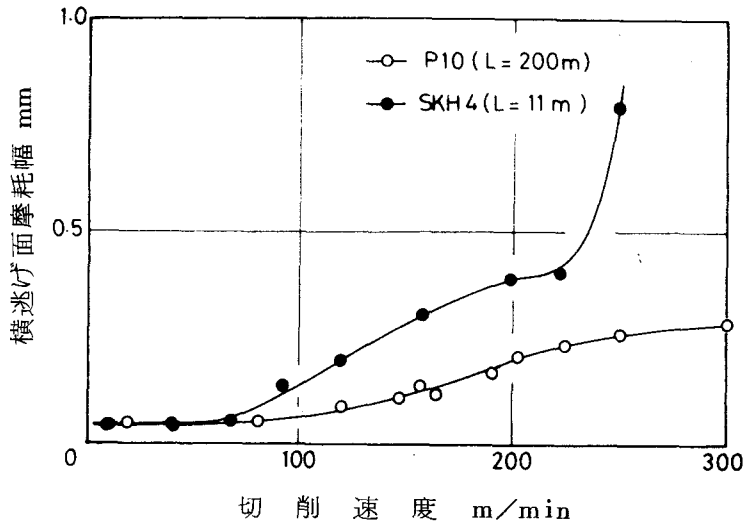
を示した図6.5(a)から明らかなように、摩耗部はそれまでとは異なった摩耗状態となり、炭化物も軟らかい組織も同時に持ち去られ、かなり平坦な摩耗面となっている。これは第3領域の摩耗急増部が高速度鋼の熱軟化により生じたものと考えられる。

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_2O_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、ガラス繊維が摩耗部を擦過する際に Al_2O_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_2O_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

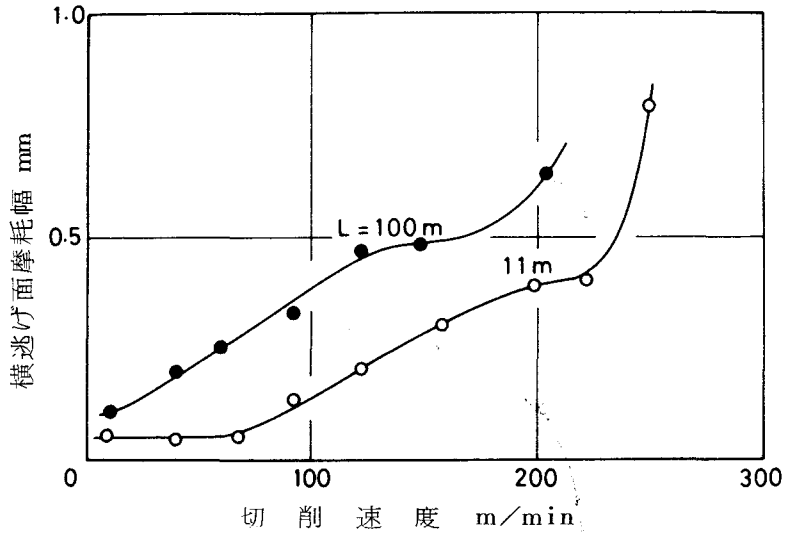


切込み：1.0mm，送り：0.15mm/rev，
被削材：ガラス繊維強化ポリエステル樹脂

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250m/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、切削距離11m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、 l が大きくな



切込み: 1.0 mm, 送り: 0.15mm/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

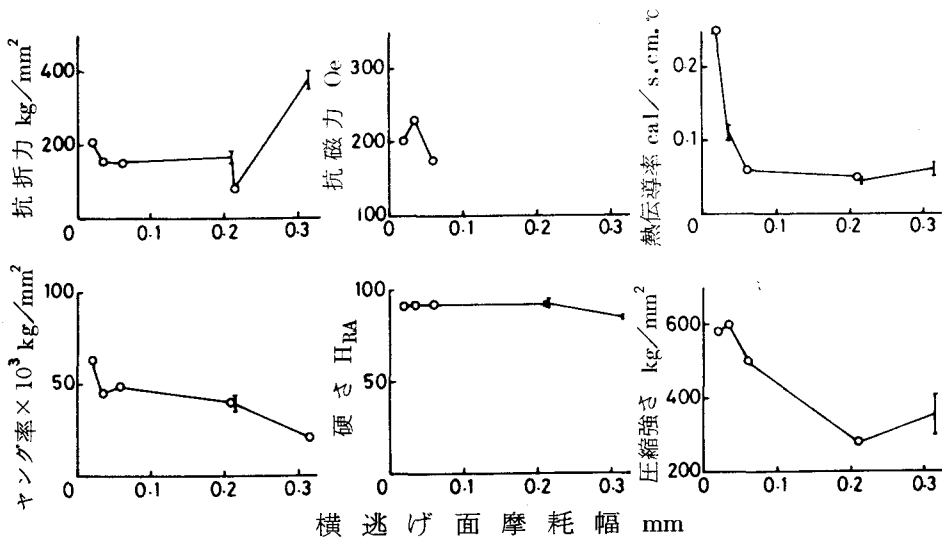


図 6.8 低速域の工具摩耗と工具材の物理的性質の関係

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 からわかるように、直径 $10\ \mu\text{m}$ 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、すなわち超合金の結合相のような軟らかい部分の硬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、ヤング率、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、ヤング率、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

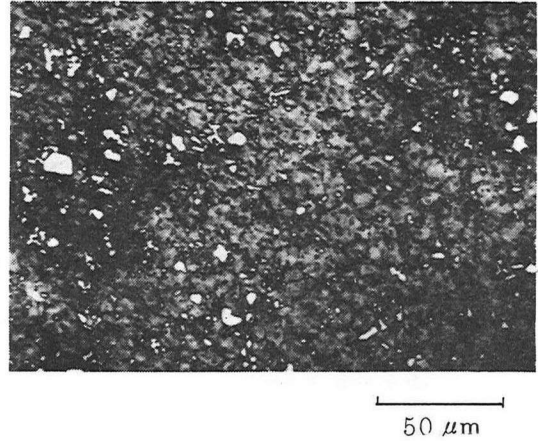


図 6.9 高速度鋼第 4 種の顕微鏡組織 (腐食液: 王水)

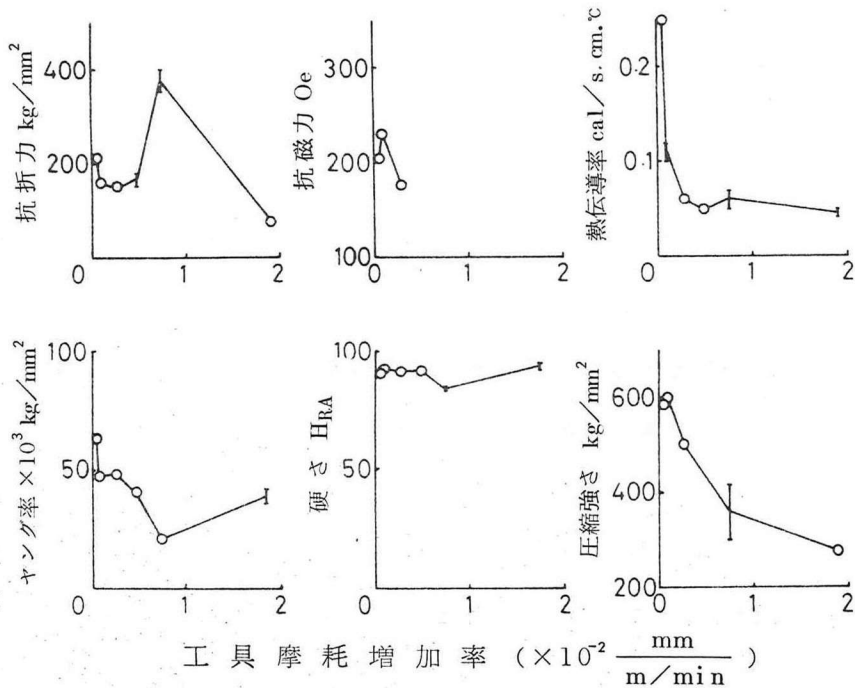


図 6.10 工具摩耗増加率と工具材の物理的性質の関係

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、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考えられる。

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.

第 7 章 総 括

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

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こと、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。

謝

辞

本研究を行なうにあたり、終始御懇切なる御指導と御鞭撻を賜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りました大阪大学津和秀夫教授、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。

