

システム開発  
22 - F - 7

航空機用等の炭素繊維強化プラスチック  
(CFRP)の加工技術の開発に関する  
フィージビリティスタディ  
要 旨

平成23年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 財団法人 金属系材料研究開発センター



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp/>

## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人JKAから機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究等補助事業を実施しております。

これらを効果的に実施するために、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長：東京大学名誉教授 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「航空機用等の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の加工技術の開発に関するフェージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人金属系材料研究開発センターに委託し、実施した成果であります。関係諸分野に関する施策が展開されていくうえで、本フェージビリティスタディの成果が一つの礎石として、皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成23年3月

財団法人 機械システム振興協会

## はじめに

近年、航空機をはじめ自動車などの輸送機器用の材料として炭素繊維強化プラスチック（以下「CFRP」と呼ぶ。）が注目されています。CFRPは、他の主要な構造材料と比較して、比重が小さく、比強度、比弾性率が高く、最も軽くて、高剛性、高強度な材料という特長を持っています。

地球温暖化対策として、航空機や自動車業界において、軽量化による燃費の向上が進められていますが、特にCFRPの採用の検討が増えており、すでに多くの採用例が出ています。しかしながらCFRPを航空機の構造材として使用する場合、剛性以外に厳しい基準の精度、面粗度が要求されるため、当然機械加工が必要となります。現在回転工具を用いた機械加工が主流ですが、加工の送り速度を上げると加工面粗度が大きくなり、層間剥離のようなダメージを与える可能性があること、及び工具のコストが高いといった課題があり、CFRP使用拡大のネックとなっています。

そこで、本フィージビリティスタディ（以下「F/S」と呼ぶ。）では、CFRPの高品質な加工を目的とし、摩耗の少ない新考案工具とそれを最大限に生かす加工機械の確立を目指しました。

本報告書の作成にあたり、大阪大学大学院工学研究科准教授 藤原順介委員長、テクノ・フュージョン株式会社副社長 杉上孝二委員、同企画調査部長 吉川高雄委員、新日本工機株式会社 技術部部长 川本茂委員、財団法人機械システム振興協会、及びご指導とご協力をいただいた多くの関係者の方々に深く感謝申し上げます。

平成23年3月

財団法人 金属系材料研究開発センター

## 目次

### 序

#### はじめに

1	F / Sの目的	1
2	F / Sの実態体制	9
3	F / S成果の要約	12
3 . 1	F / S 提案加工法とテスト装置の開発	12
3 . 2	非回転型新工具の設計、製作とその評価	17
3 . 3	加工後のワークのダメージ評価	36
4	F / Sの今後の課題及び展開	43

## 1 F / Sの目的

### 1.1 背景と目的

#### 1.1.1 目的

航空機の構造材料は長らくアルミニウム合金が主体であったが、近年、強度があり軽量でもある炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」と呼ぶ。）の利用が始まっており、炭酸ガス削減の観点からも今後大いに利用の拡大が予想され、また期待もされている。

現在のCFRPの機械加工は、回転工具によるものが主流として使われており、加工の用途としては、航空機の胴体、翼、それらを補強するビーム材のトリム加工、孔あけ加工が主要なものである。回転工具を使った加工の場合、加工の送り速度を上げると、加工面粗度が大きくなり、場合によっては、層間剥離のようなダメージを与える不安がある。CFRPは、引張り強度は大きいですが、座屈強度(圧縮強度)は大きくない。

さらに、加工により層間剥離があると座屈強度は大きく低下する。特に、マトリクスが熱硬化性樹脂の場合、問題となる。また、通常アルミニウム加工に比べ工具が高価で、寿命が短いのも大きな問題である。

今回計画中のF / Sでは、CFRPの高品質な加工を目的とした磨耗の少ない新考案工具とそれを最大限に生かす加工機械の確立を行う。

#### 1.1.2 背景及びCFRPの特長

CFRPは、比重、比強度、比弾性率からもわかるように、主な構造材料の中で、一番軽くて、高剛性、高強度な材料という特長を持っている（図1-1-1、図1-1-2）。

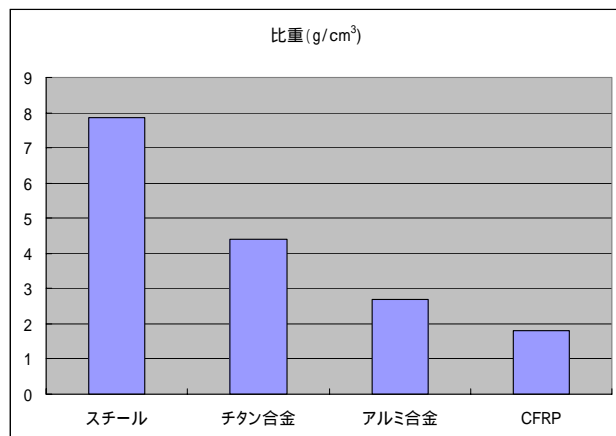


図1-1-1 主な構造材料の比重

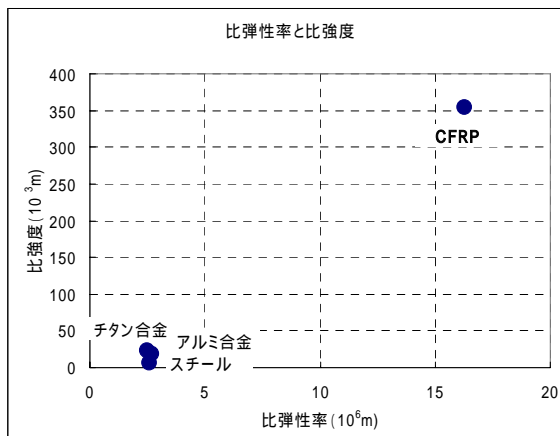


図1-1-2 主な構造材料の比強度と比弾性率

地球温暖化対策（炭酸ガス削減）として、軽量化による環境負荷低減を進めている自動車業界や航空機分野において、この特長を持つCFRPの使用される割合が非常に高くなっていくことは、当然予想される（図1-1-3、1-1-4、1-1-5）。

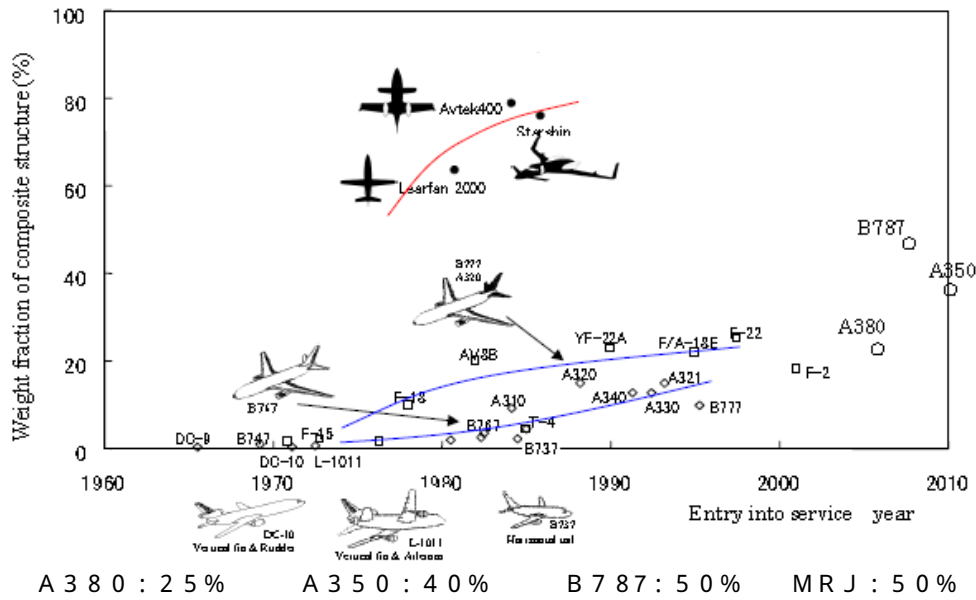


図1-1-3 CFRPの航空機構造材への使用比率（重量比）

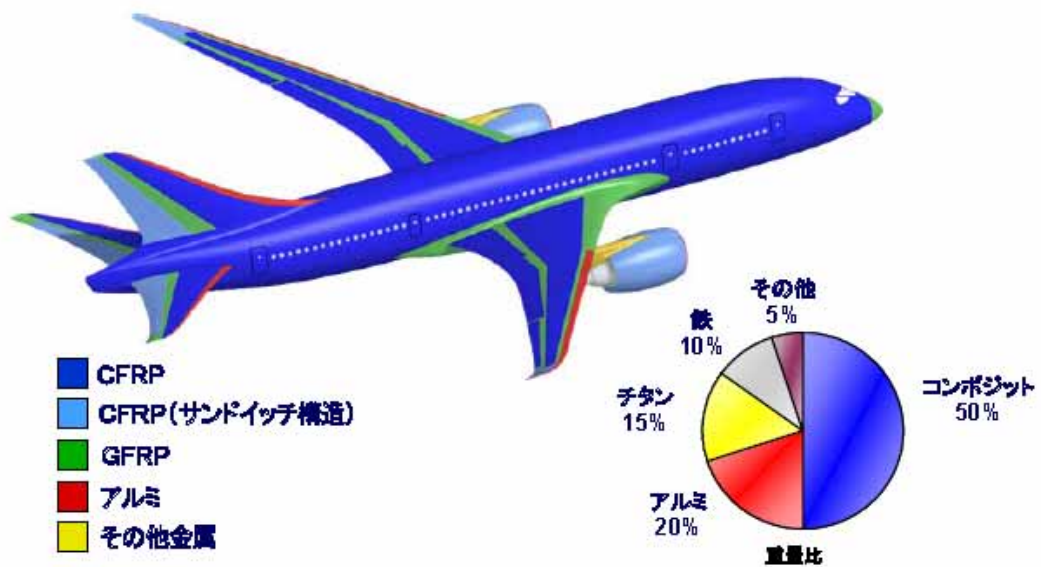
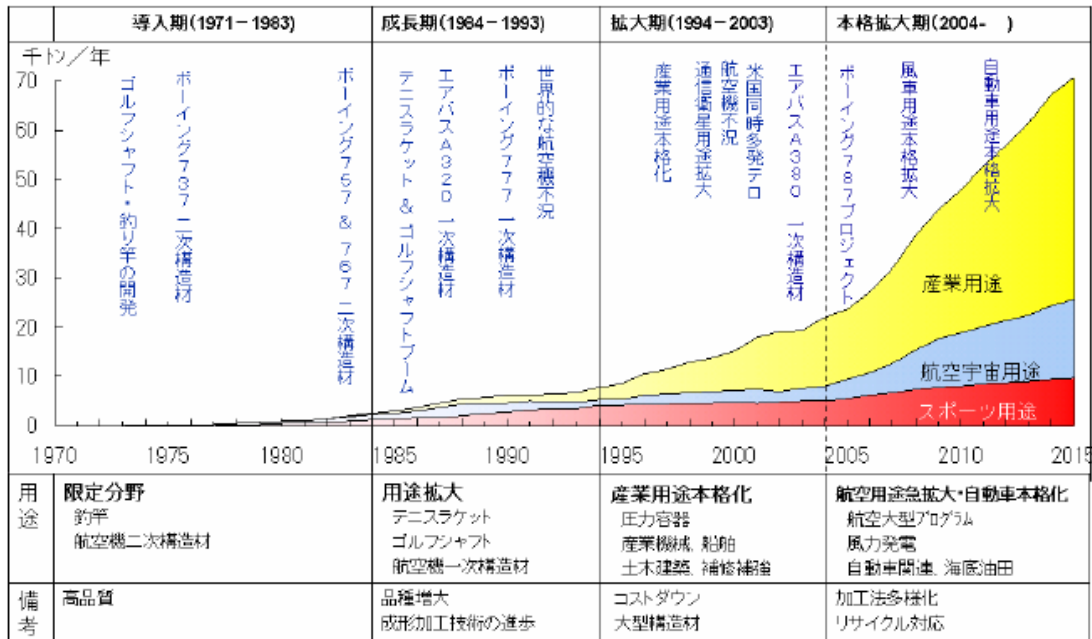


図1-1-4 B787のCFRP使用部位



PAN：ポリアクリロニトリル

図1-1-5 PAN系炭素繊維の需要見通し（航空機国際共同開発促進基金（ADF）委託調査）

アルミニウム合金の代わりに、CFRPを航空機の構造材料として使用する場合、剛性以外に厳しい基準の精度、面粗度が要求されるため、当然、機械加工が必要となる。

このCFRPは、炭素繊維からなる繊維層と、熱硬化したエポキシ樹脂のマトリックス層が交互にある構造となっている（図1-1-6）。

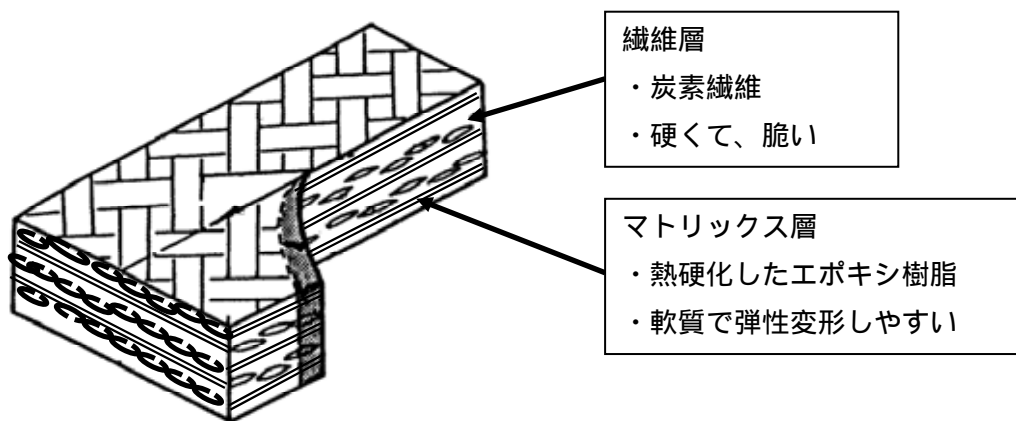


図1-1-6 CFRPの構造

### 1.1.3 CFRP加工の現状及び加工事例・評価例

回転工具加工の例として、このCFRPを、粒度の異なるダイヤモンド工具（図1-1-7）を用いてフライス切削実験を行った結果を示す。

実験で使用したダイヤモンド工具は

電着ダイヤモンド工具

ダイヤモンド砥粉をニッケルで固着

SLダイヤモンド工具

ダイヤモンド砥粉をロー付けで固着

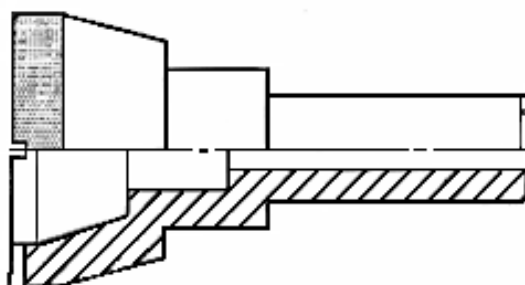


図1-1-7 ダイヤモンド工具

切削条件は、主軸回転数 $5,000\text{min}^{-1}$ 、切込み深さ $0.08\text{mm}$ （電着ダイヤモンド工具）、 $0.1\text{mm}$ （SLダイヤモンド工具）にて、送り速度を変化させて、ドライ切削で実施した（図1-1-8）。



[ 切削条件 ]

- 工具径： $50 \times 35\text{mm}$
- $N = 5,000\text{min}^{-1}$   
( $V = 785\text{m/min}$ )
- $t = 0.08\text{mm}$ （電着50）  
 $0.10\text{mm}$ （SL30）
- ドライ切削

図1-1-8 ダイヤモンド工具での切削実験



その結果は、図1-1-9、図1-1-10のとおりである。

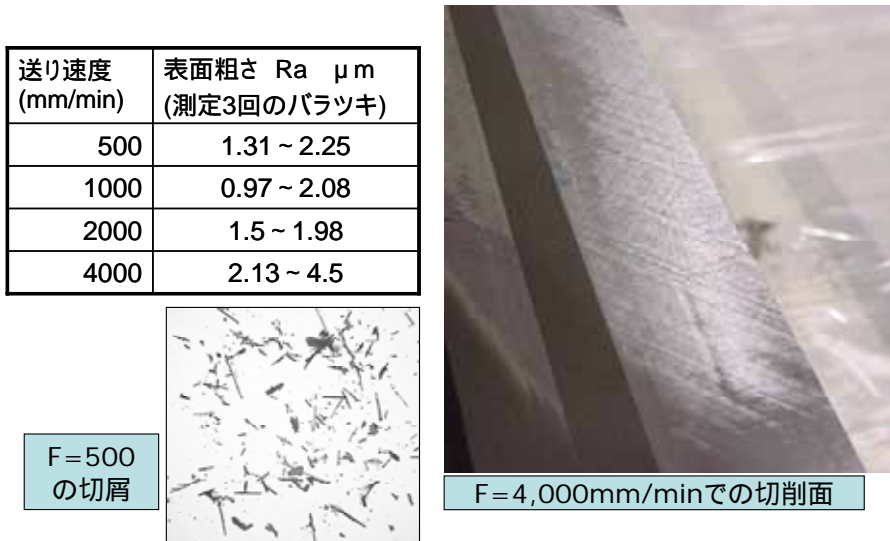


図1-1-9 電着ダイヤモンド工具（粒度0.4mm）での切削実験結果

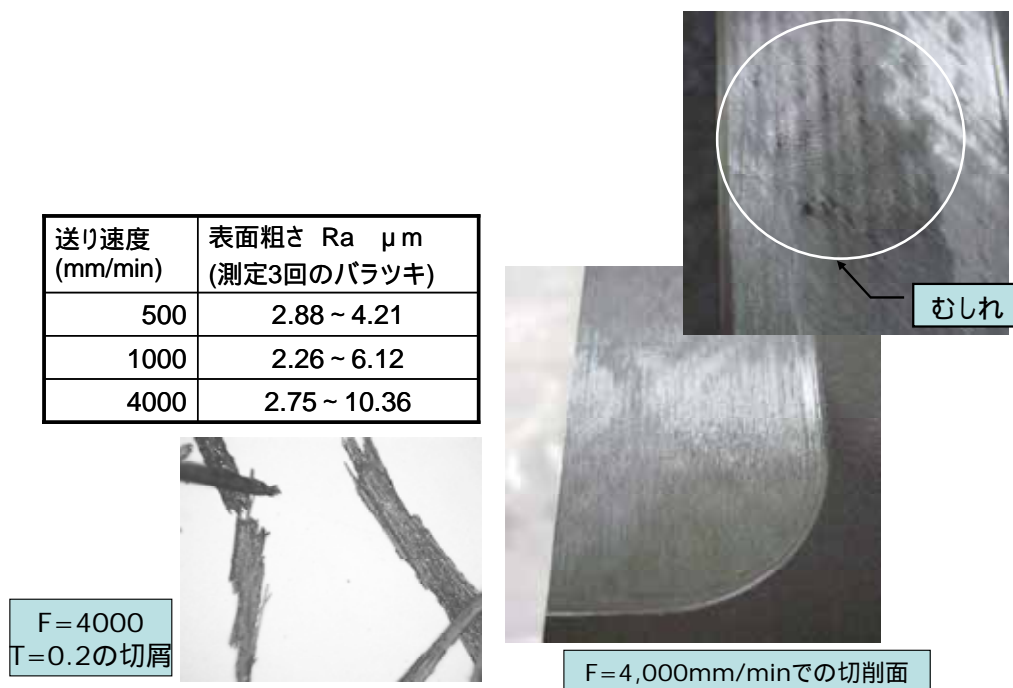


図1-1-10 SLダイヤモンド工具（粒度0.75mm）での切削実験結果

本結果の送り速度と表面粗さの関係を、図1 - 1 - 11に示す。

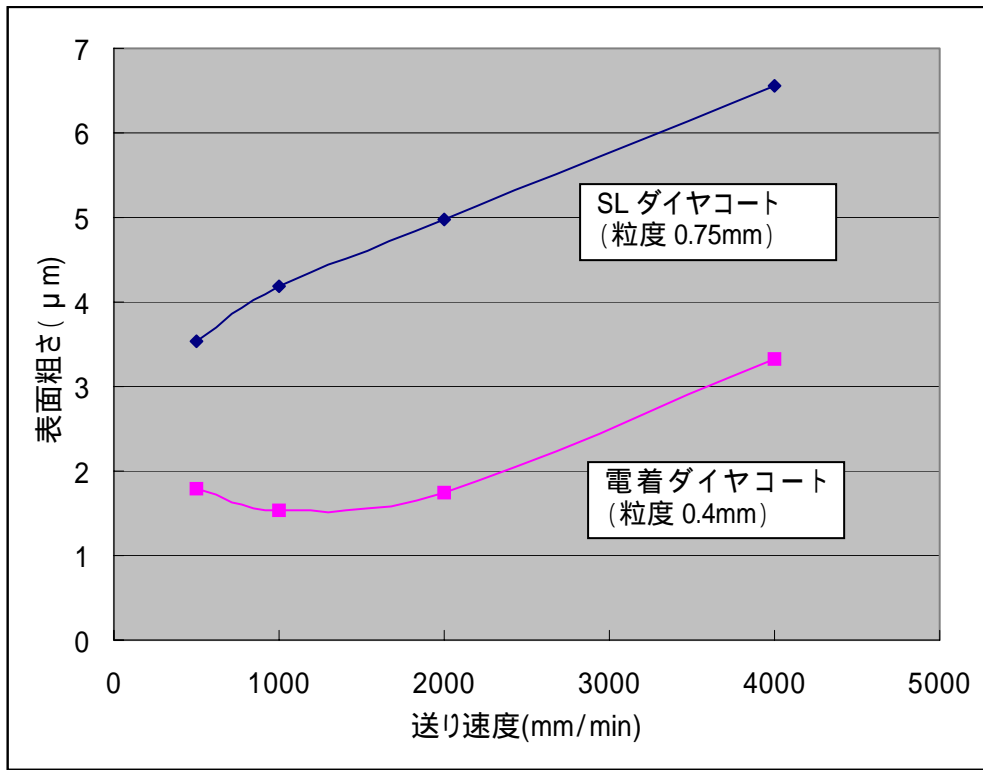


図1 - 1 - 11 送り速度と表面粗さの関係

ダイヤモンドの粒度の小さい方が、面粗度が小さくなり、むしろ、層間へのダメージなどの面性状も向上していることから、CFRPの切削原理は、ネガティブの刃先を持つダイヤモンドで、マトリクス部を引っ掻きながら削り、その中に潜む炭素繊維を削るのではなく、刃先で「折る」、「破断」する切削であるということがわかる(図1 - 1 - 12)。

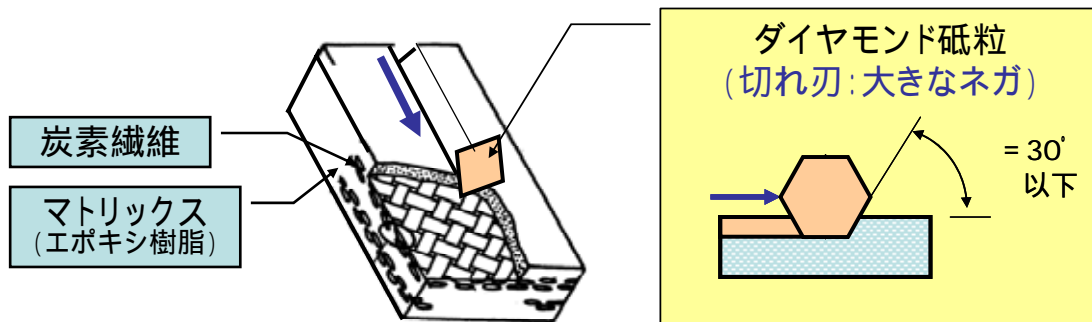


図1 - 1 - 12 ダイヤモンド砥粒による加工の原理

また、この切削現象は、エンドミルによるトリム加工においても同様である（図1 - 1 - 13）。

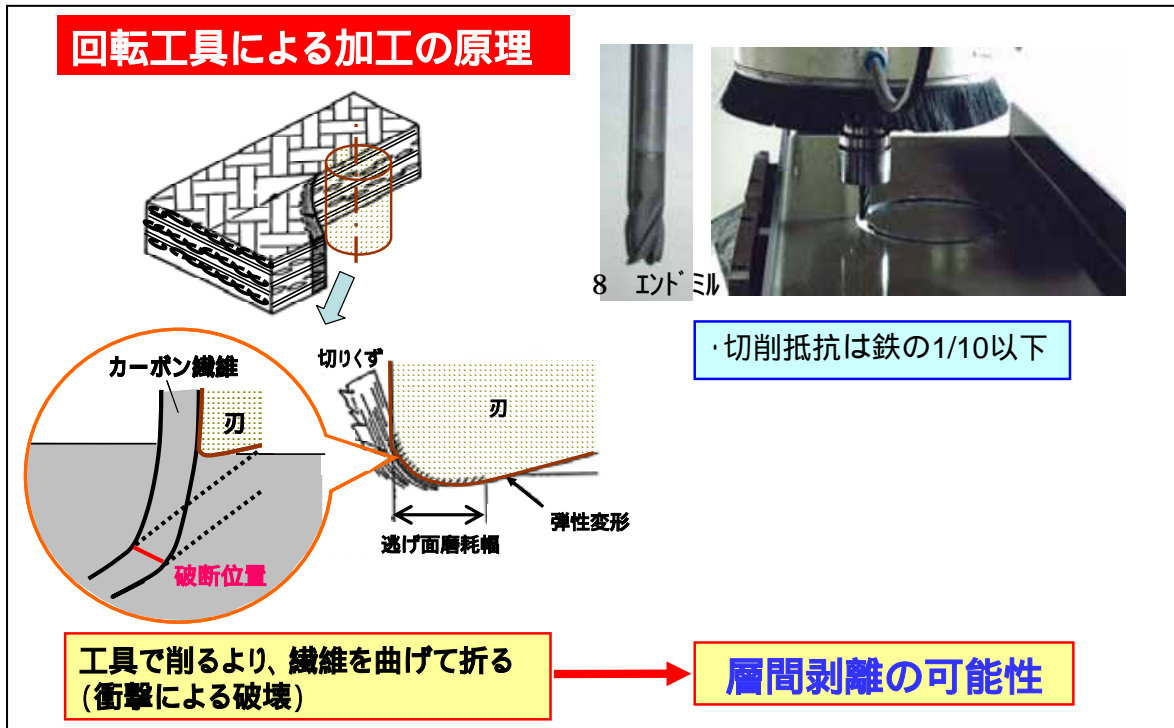


図1 - 1 - 13 回転工具による加工の原理

ただ、このエンドミルによるトリム加工の場合、工具刃のネジレ角が、切削面の品質に影響を及ぼす。ネジレ角のない直刃の工具では、切断面の品質は良く、ネジレ角が大きくなればなるほど、バリ、層間剥離が発生し、品質は悪くなる。しかし、直刃の工具は、工具摩耗が激しく、工具の寿命が極端に短くなる（図1 - 1 - 14、1 - 1 - 15）。

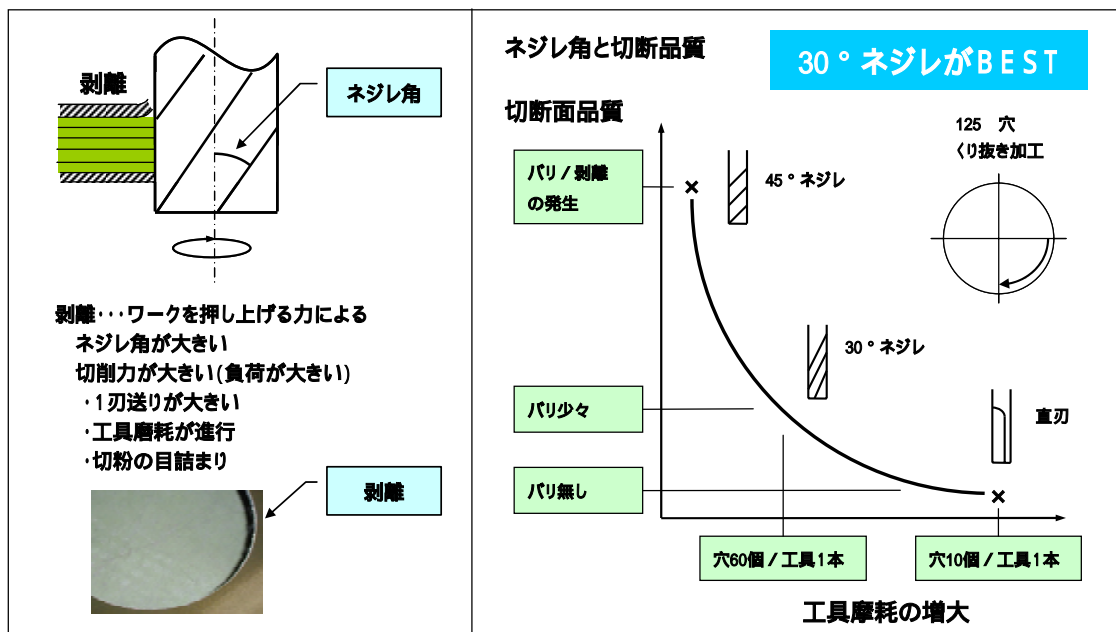


図1 - 1 - 14 ネジレ角と切断品質

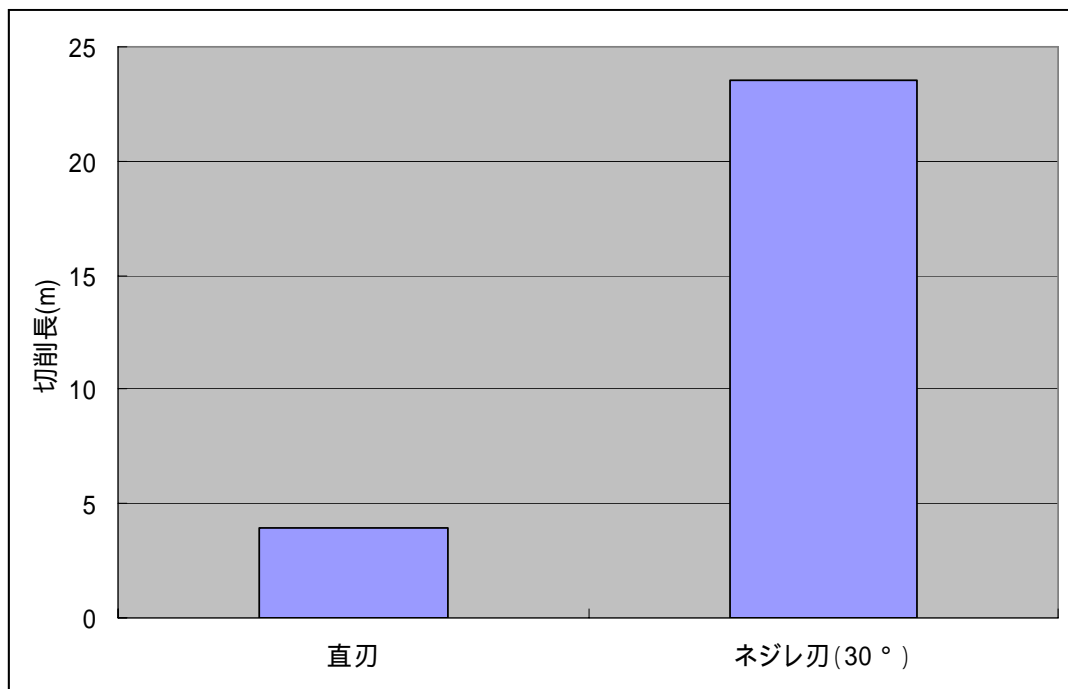


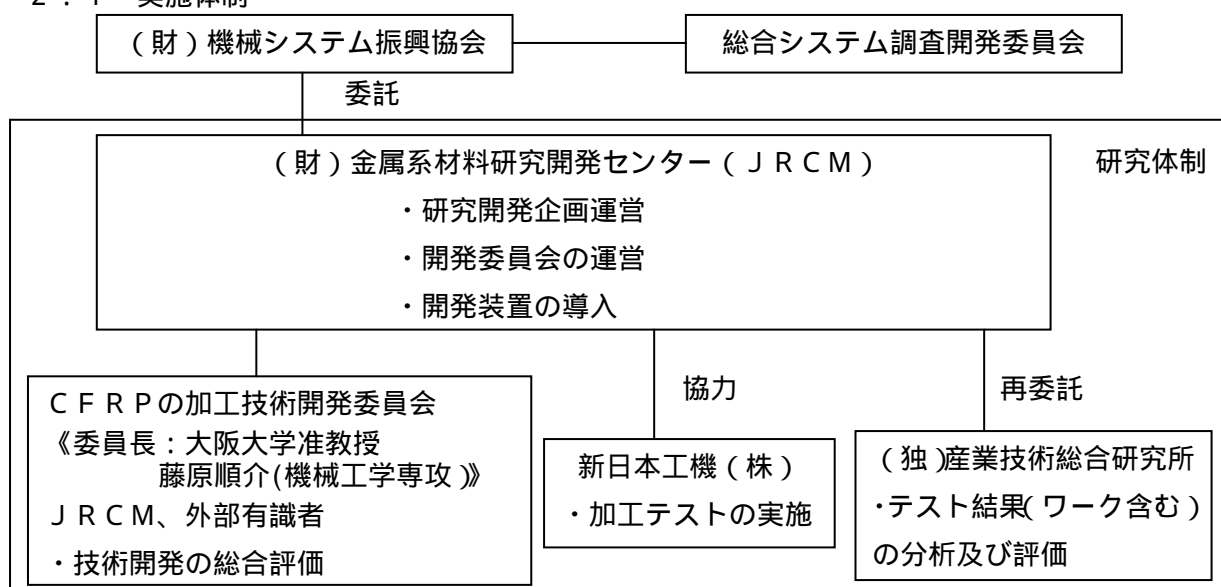
図1 - 1 - 15 8エンドミル限界切削長（層間剥離発生までの寿命）

このように、CFRPを回転工具で機械加工した場合、刃先で折るという加工は、衝撃による破壊となってしまう、CFRPへのダメージが、そのまま層間剥離の原因となる。また、工具摩耗も激しく、工具寿命が短いという問題もあり、ケバ立ち、層間剥離のない、もっと効率的な加工方法が求められている。

## 2 F / Sの実施体制

財団法人機械システム振興協会からの委託を受け、財団法人機械システム振興協会内に  
ある「総合システム調査開発委員会」の審議を受けて、財団法人金属系材料研究開発セン  
ターでは財団法人金属系材料研究開発センターが「CFRPの加工技術開発委員会」を組  
織開催し、同委員会の調整のもとに開発に関するF / Sを実施した。また、新日本工機  
(株)と協力し、(独)産業技術総合研究所にはテスト結果の分析や評価を再委託して、  
本F / Sを実施した。

### 2.1 実施体制



### 2.2 業務分担

財団法人金属系材料研究開発センター

- ・ 研究企画運営
- ・ 開発委員会の運営
- ・ 開発装置の導入

CFRPの加工技術開発委員会

- ・ 技術開発の総合評価
- (独)産業技術総合研究所
- ・ テスト結果(ワーク含む)の分析及び評価

新日本工機 (株)

- ・ 加工テストの実施

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 名誉教授	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 総合研究機構 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 招聘研究員	志 村 洋 文
委 員	早稲田大学 研究戦略センター 教授	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦

航空機用等の炭素繊維強化プラスチック

(CFRP)加工技術開発委員会委員名簿 (順不同・敬称略)

委員長	国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 准教授	藤原 順介
委員	テクノ・フュージョン株式会社 副社長	杉上 孝二
委員	テクノ・フュージョン株式会社 企画調査部長	吉川 高雄
委員	新日本工機株式会社 技術本部 信太山工場 技術部 部長	川本 茂
事務局	新日本工機株式会社 技術本部 信太山工場 技術部 F A 課 課長	村上 昭
事務局	新日本工機株式会社 技術本部 信太山工場 技術部 F A 課 係長	平川 幸一
事務局	新日本工機株式会社 技術本部 信太山工場 技術部 F A 課 主任	榎本 圭史
事務局	独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 基盤的加工研究グループ チームリーダー	岡根 利光
事務局	独立行政法人 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 医用計測技術グループ グループ長	兵藤 行志
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 専務理事	小紫 正樹
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 非鉄材料研究部 部長	箕浦 忠行

### 3 F / S 成果の要約

#### 3.1 F / S 提案加工法とテスト装置の開発

##### 3.1.1 テスト装置

C F R P 加工用の回転を用いない切削性に優れた新工具の開発と、その能力を生かす高剛性の工作機械の組合せによる C F R P に優しい加工方法を確立するためのテスト装置を開発した。

C F R P の最適な加工条件を追及するために、下記構成の装置とした ( 図 3 - 1 - 1 )。

N C 装置及び制御盤 6

加工ヘッド 6

工具取付アダプタ

工具

C F R P 加工テストピース

ワーククランプ治具 1

真空ポンプ 1

超低温空気発生器及び噴出ノズル 2

加速度センサー 3

F F T アナライザー 3

三分力動力計 4

チャージアンプ及びデータ収集システム 4

カメラ付実体顕微鏡システム ( 工具摩耗状況確認用 ) 5

切粉回収装置

加工テスト用機械本体 6

- 1 加工ワークの C F R P を、バキューム方式によりクランプする装置として、真空ポンプ及び真空クランプ治具を準備する。
- 2 切削中の工具冷却効果をテストするために、超低温空気発生装置によるコールドエアを工具に噴射する装置を準備する。
- 3 切削中のヘッド振動を記録する装置として、加速度センサー及び F F T アナライザーを準備する。
- 4 切削中の切削力を記録する装置として、三分力動力計及びチャージアンプは、既存装置を使用するものとする。
- 5 工具摩耗を解析するために、工具摩耗状況確認用マイクロ스코プを準備する。
- 6 N C 装置及び制御盤、加工ヘッド、加工テスト用機械本体は、既存設備機を使用するものとする。



機械本体（既存設備機使用）

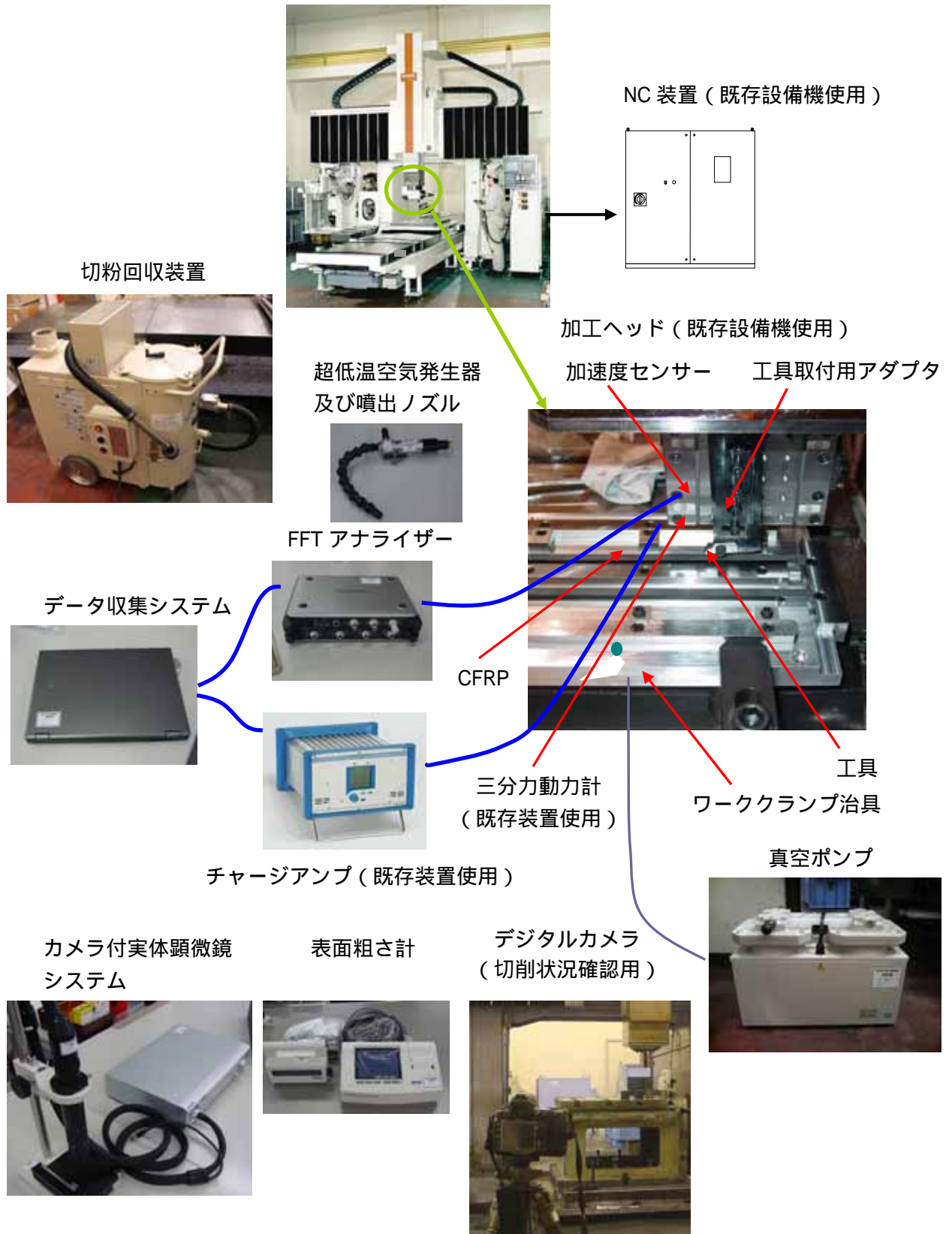


図3 - 1 - 1 テスト装置構成

従来工具のテスト加工時は、立主軸を装着し、主軸に工具をセットし加工を実施した（図3 - 1 - 2）。

非回転型新工具によるテスト加工時は、立主軸にダミープレート装着し、アダプタをボルトにて取り付け、新工具をセットし、テスト加工を実施した（図3 - 1 - 3）。



図3 - 1 - 2 従来工具による加工



図3 - 1 - 3 新工具による加工

## 2) CFRP加工テストパネル/テストピース

非回転型の新工具によるCFRPの加工において、最適な工具形状、切削条件を求めることを目的として以下に示す平板材テストパネル(図3-1-4)を準備しテスト加工を実施した。更に最適条件における複合材加工後の繊維へのダメージ評価を行うことを目的として平板材テストパネルを切断して、 $t6 \times 10 \times 615$  mmの短冊形状のテストピースを製作した(図3-1-5)。最終のダメージ評価用のテストピース形状を図3-1-6に示す。

### 最適な工具形状、切削条件を求めるための平板材テストパネル

寸法	$t10 \times 600 \times 1000$ mm
成形方法	CRRPオートクレーブ成形
積層仕様	T700相当/EPプリプレグ 三菱レイヨン12K $\times$ 24ply
数量	6枚

### 各種条件によるデータ取りのための平板材テストパネル

寸法	$t10 \times 700 \times 1200$ mm
成形方法	CRRPオートクレーブ成形
積層仕様	T700相当/EPプリプレグ 三菱レイヨン12K $\times$ 24ply
数量	UD繊維方向 $90^\circ$ 1枚
	UD繊維方向 $45^\circ$ 1枚
	$0^\circ / 90^\circ$ 交互積層 1枚
	$\pm 45^\circ$ 交互積層 1枚



図3-1-4 平板材テストパネル



図3 - 1 - 5 ダメージ評価用テストピース形状 (写真)

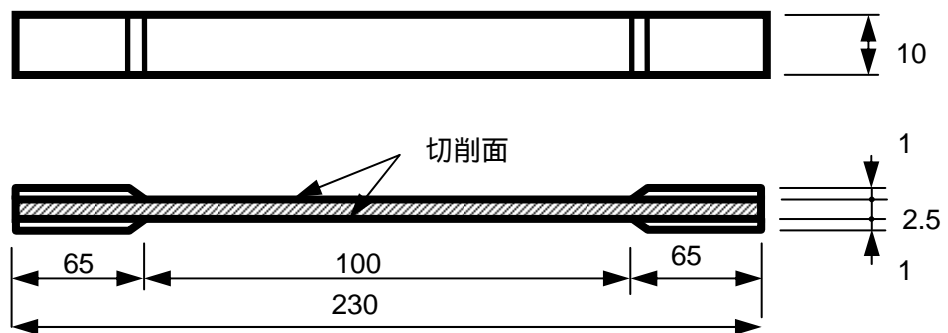


図3 - 1 - 6 ダメージ評価用テストピース形状

### 3.2 非回転型新工具の設計、製作とその評価

前章に示したテスト装置を使用して、下記F/Sを実施するものとする。

#### 3.2.1 非回転型新工具の設計、製作

難加工CFRPに適合するように、竹・木材などの繊維質材料にダメージ与えることなく加工するための木工工具及び彫刻刀の加工形態を参考にし、工具寿命などを勘案して工具材料及び工具形状に改良を加える(図3-2-1)。

評価項目としては、加工精度、面粗度などもあるが、基本的にはCFRP素材への加工によるダメージを低減させることを目標とする。例えば加工前後の曲げ強度の低下がないことなどが目標となる。

工具材質についても、加工条件・寿命・価格を勘案して最適な条件を探る。基本的には高靱性材料・単結晶素材の工具を検討する。サファイア、CBN、ダイヤモンドなどが候補である。高剛性6軸加工機と組み合わせて使用することにより、複雑形状に対する最適すくい角制御加工を可能にする。

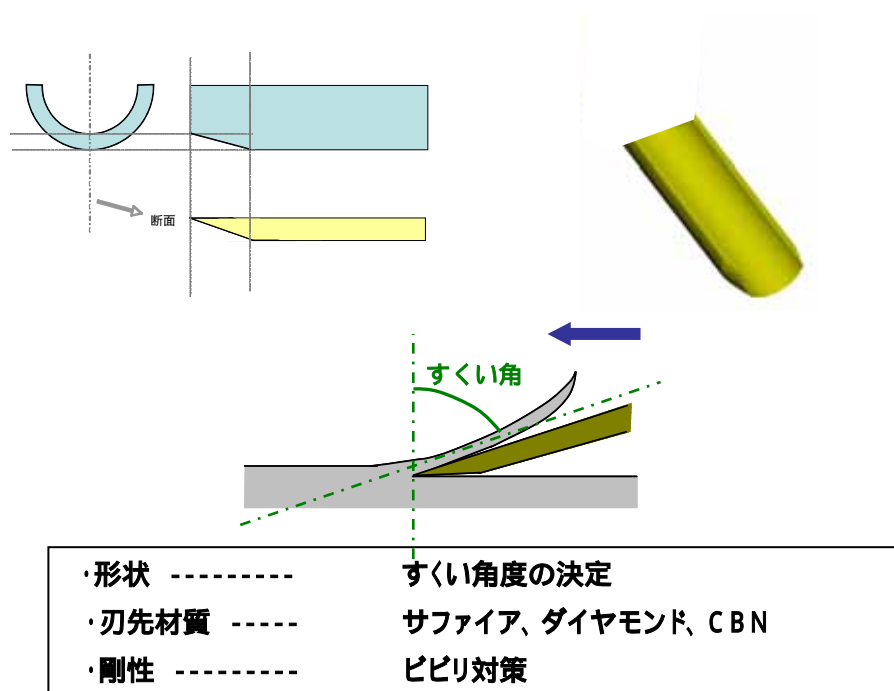


図3-2-1 工具の刃先形状の例

CFRP加工に適合するように、本F/Sでは以下の工具を準備し、テスト加工を行った。

図3-2-2に今回製作した新工具を示す。

材質 \ 刃先角	30°	45°	60°
ダイヤモンド	1本	1本	1本
超硬	3本	3本	3本
ハイス	3本	7本	10本

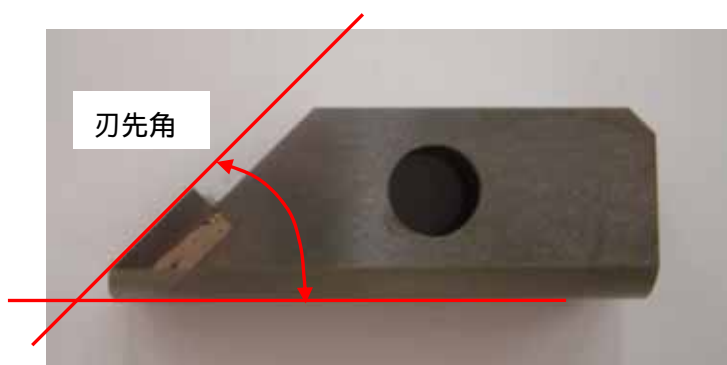
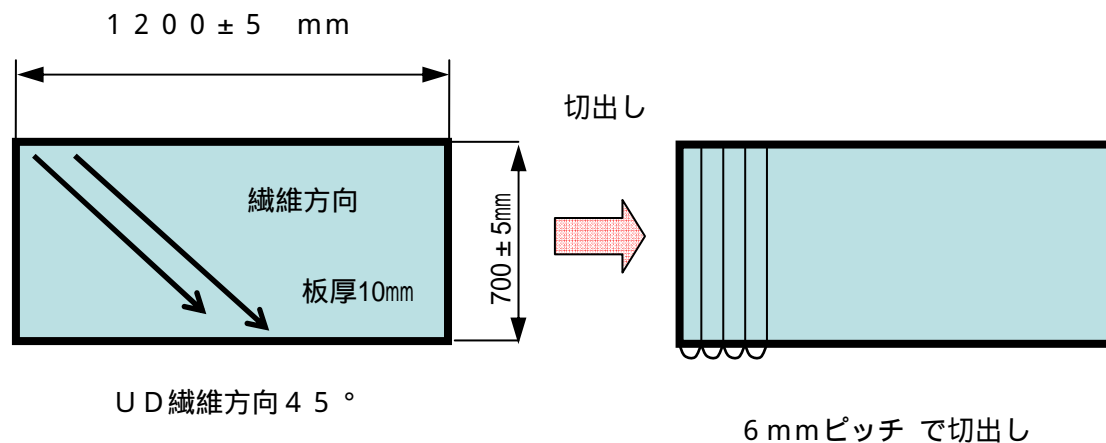


図3-2-2 新工具

### 3.2.2 平板切削テスト（直線加工）及び評価

#### 1) テストピース

以下に示すCFRPテストパネル（UD繊維方向45°）を短冊形に切断し、従来工具と非回転型新工具で加工を行った。



#### 2) すくい角と切削動力の関連調査

工具のすくい角を変化させ加工を行い切削動力計により切削抵抗を測定し、その関係を調査することを目的とした（図3-2-3参照）。

すくい角の異なる2種類の非回転型新工具にてCFRPの切削を同切削条件にて行い、そのときの切削動力を測定した。

すくい角30°と45°の2種類の工具にて以下の条件で試験を行った。

使用工具	刃先角45°超硬工具、刃先角60°超硬工具
切込み量	0.5mm
取得データ	切削動力
	X, Y, Z 3方向の動力を測定し、切削動力とした。

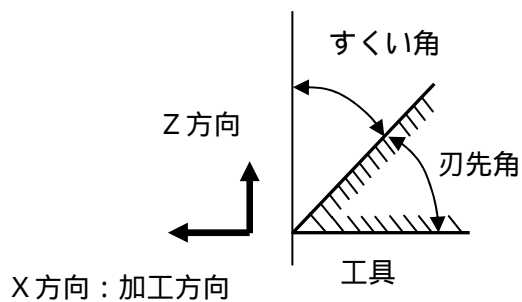


図3-2-3 すくい角と刃先角の関係

各試験条件での動力計データを図3 - 2 - 4から図3 - 2 - 7に示す。

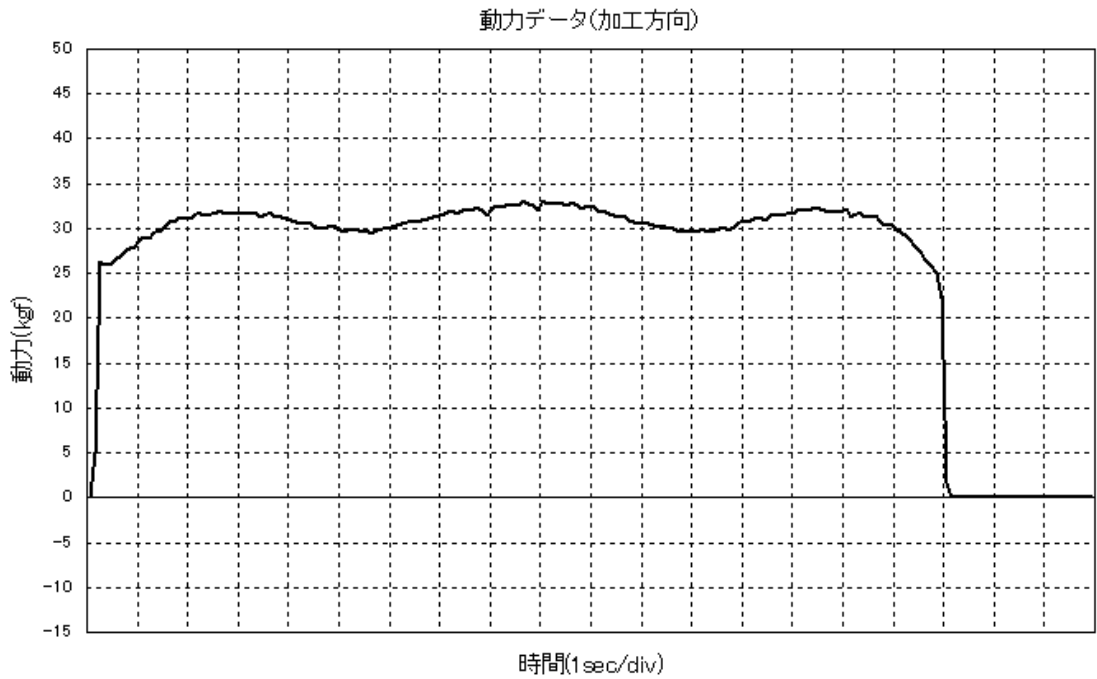


図3 - 2 - 4 45°超硬 動力データ

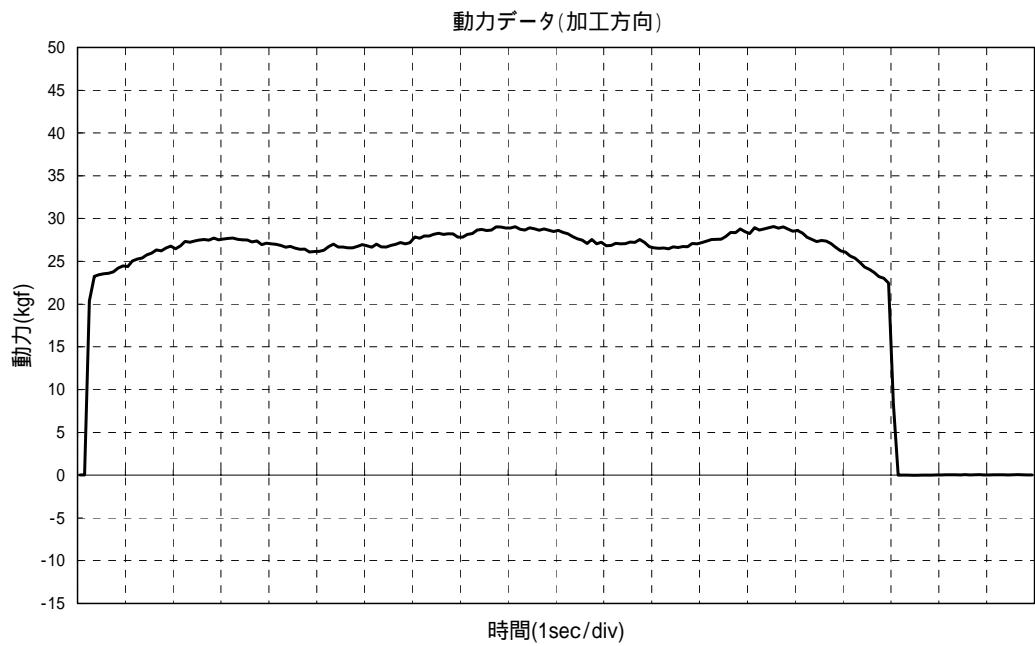


図3 - 2 - 5 45°超硬 動力データ



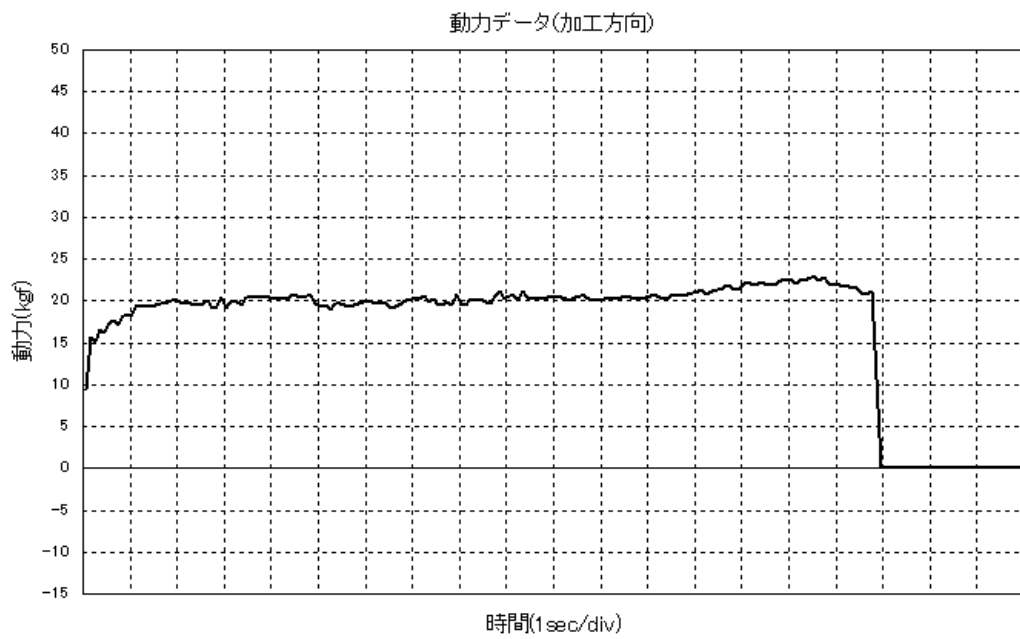


図 3 - 2 - 6 60°超硬 動力データ

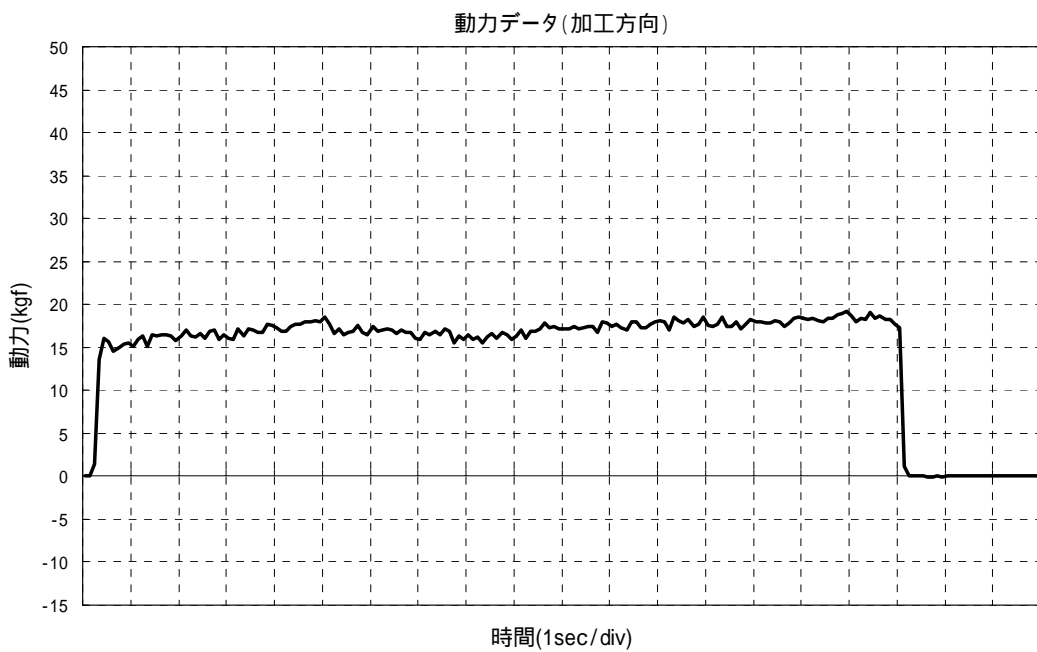


図 3 - 2 - 7 60°超硬 動力データ

図3 - 2 - 4 から図3 - 2 - 7 のデータより主分力 ( X 軸 ) の動力は、刃先角 4 5 ° の方が大きい。

6 0 ° 工具の方が 4 5 ° 工具よりも主分力が小さくなっているが、一般的なすくい角と切削力との関係とは反対の結果となった。

### 3 ) 工具、装置、ワークの剛性調査 ( ビビリ )

開発した加工システム全体の剛性を調査することを目的とした。

開発した加工システム全体の剛性を調査するため、同じテスト材を従来工具であるエンドミルカッタと非回転型新工具で切削し、ワーク及び機械主軸の振動を振動計にて測定した。エンドミルは、カッタの側面を使い、幅 1 0 mm のテスト材を 1 回の切削で加工した。単位時間における一刃当りの切粉排出量が同じになるように各工具の切削条件を設定した。

使用工具 刃先角 6 0 ° 超硬工具、刃先角 6 0 ° ダイヤモンドエンドミル工具

送り速度 2 , 5 0 0 mm / min 、 1 , 0 0 0 mm / min

取得データ 切削振動

上記条件で加工したときの主軸及びワークの振動を振動計にて取り込み F F T アナライザにてデータ解析を行った。

各試験条件での振動解析データを図 3 - 2 - 8 から図 3 - 2 - 1 1 に示す。

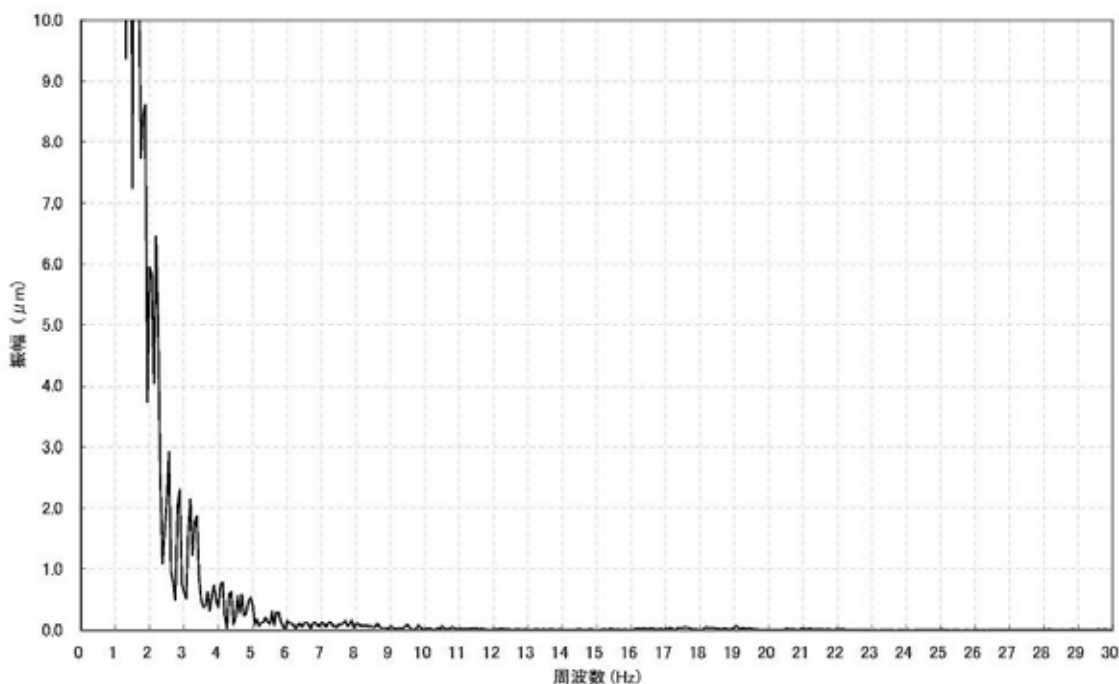


図 3 - 2 - 8 エンドミル F 1 0 0 0 Z 方向ワーク振動データ

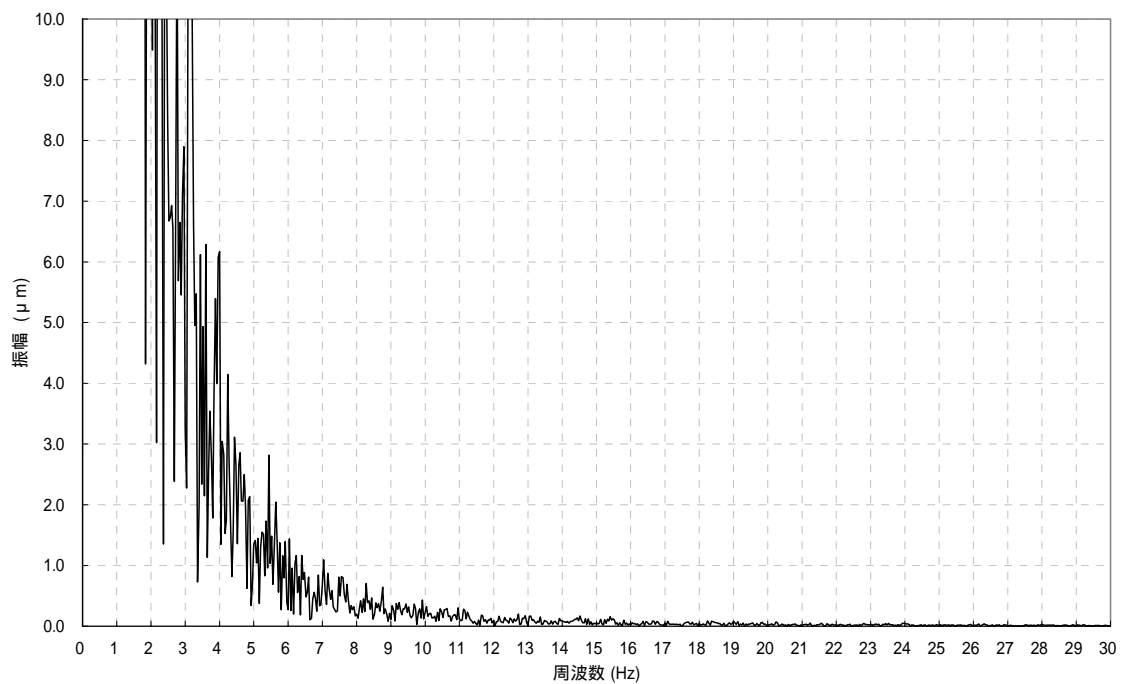


図3 - 2 - 9 60°超硬工具F2500 Z方向ワーク振動データ

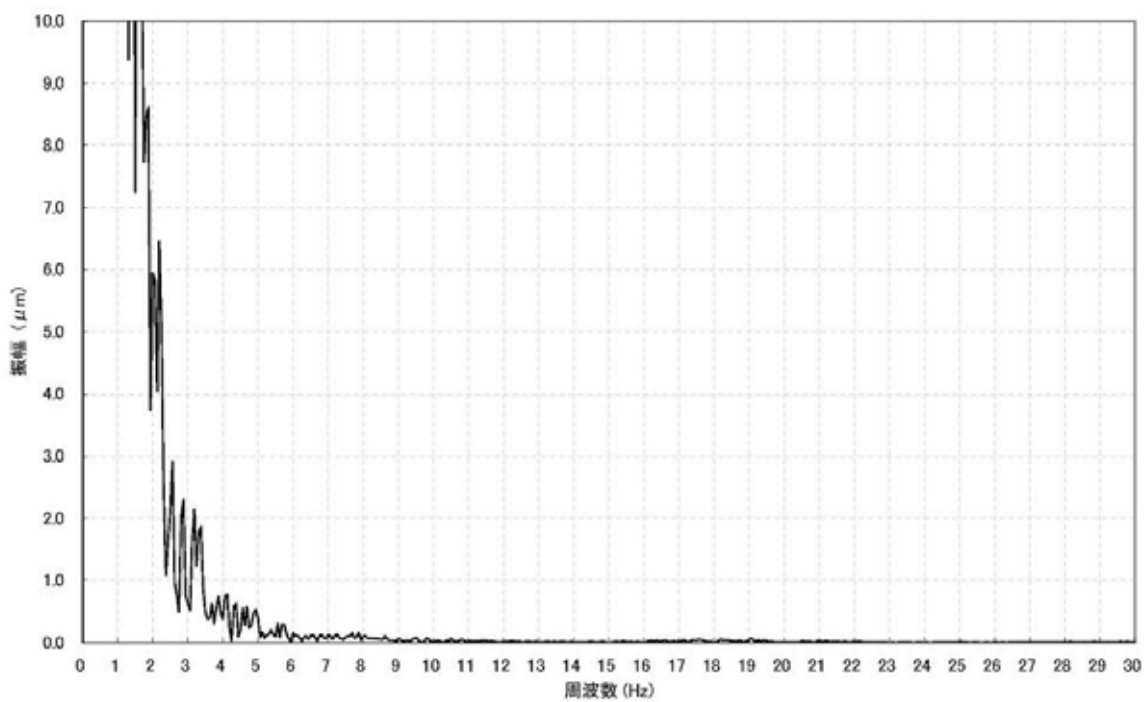


図3 - 2 - 10 エンドミルF1000 Y方向主軸振動データ

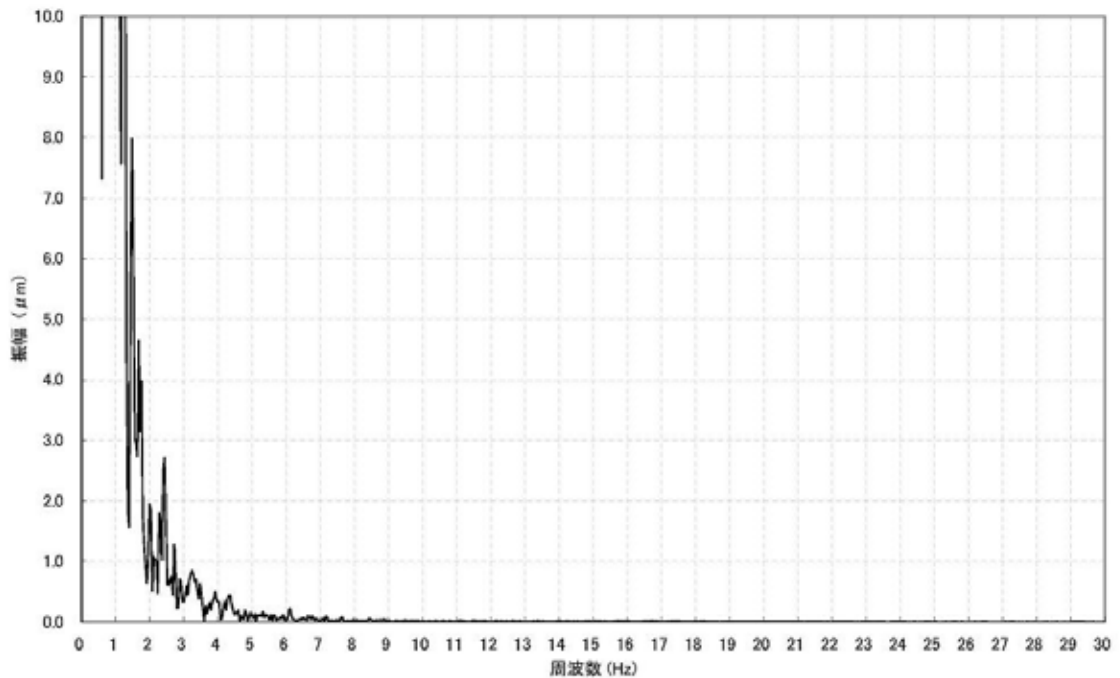


図 3 - 2 - 1 1 60°超硬工具 F 2 5 0 0 Y 方向主軸振動データ

新工具、エンドミル工具のいずれの場合も X 方向（切削方向）の振動は大きく、データ的に比較ができないため、Y 方向、Z 方向のデータを収集し評価した。

振動計のデータを比較するとワークの振動で新工具の方が振幅が、若干大きく、主軸の振動はほぼ同じ振動が発生している。

切削位置と振動計の関係やワークのセッティングの方法が全く同じ状態でないことを考えるとほとんど差がないといえる。

従って、非回転型の新工具の切削においても従来工具と同様の機械剛性、ワークのセッティング方法で加工ができることがわかった。

但し、今回は工具の使用頻度が少ない状態での比較であったので、切削距離との関係についても調査する必要があると思われる。

#### 4) すくい角と切削性、面粗度の関連調査

工具のすくい角を変化させ加工を行い、加工後のワークの表面粗さを測定し、その関係を調査することを目的とした。

すくい角の異なる 2 種類の非回転型新工具にて CFRP の切削を同切削条件にて行い、加工面の顕微鏡写真の撮影と表面粗さ計による表面粗さを測定した。

すくい角 30° と 45° の 2 種類の工具について以下の条件で試験を行った。

使用工具	刃先角 45° 超硬工具、刃先角 60° 超硬工具
送り速度	2,500 mm/min
取得データ	加工面顕微鏡データ、表面粗さデータ

立体的なイメージを見るため、顕微鏡写真は加工スタート地点方向より、加工面の上方 30° 斜め上から撮影した。

各試験条件での加工面顕微鏡データ及び表面粗さデータを図 3 - 2 - 1 2 から図 3 - 2 - 1 3 に示す。

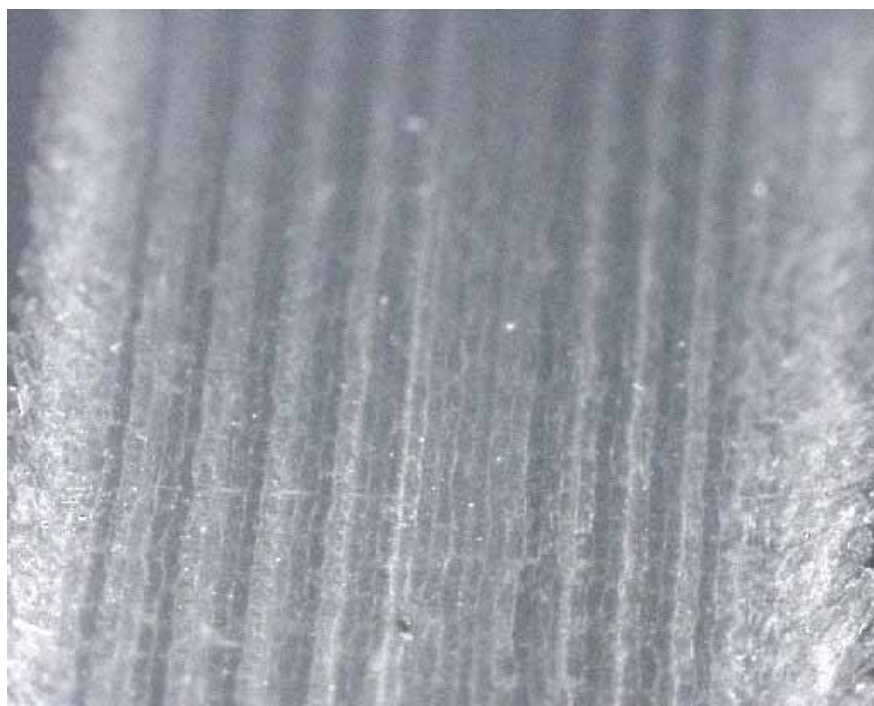


図 3 - 2 - 1 2 45° 超硬工具 加工面顕微鏡データ(倍率 25 倍)  
粗さ計データ 3 箇所平均: Ra 1.38 μm



図3 - 2 - 13 60°超硬工具 加工面顕微鏡データ(倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均：Ra0.79μm

表面粗さ計で測定したデータを見ると、すくい角が小さい方が面粗度が良い。表面粗さは従来の回転工具とほぼ同じ値を示している。

すくい角が45°の切粉は図3 - 2 - 14に示すように連続したつながった切粉になるが、すくい角が30°の場合は切粉がせん断され細かい切粉になる。顕微鏡データで見るとすくい角が45°の加工面では加工パスがはっきりと認められる。すくい角が30°の加工面は加工パスの跡が認められず、均一の加工面となっている。切粉の状態が加工面の関係に影響しているものと思われる。

非回転型の新工具ではすくい角を小さくする方が切削力も小さくなり、加工面も綺麗に仕上がりに、刃先もチップング頻度が低くなり、切粉もせん断され切粉回収処理が容易になる。



すくい角45°の切粉



すくい角30°の切粉

図3 - 2 - 14 切粉形状

#### 5) 送り速度と面粗度の関連調査

送り速度を変化させ加工を行い、加工後のワークの表面粗さを測定し、その関係を調査することを目的とした。

同一工具にて送り速度を変化させ加工を行い、加工面の顕微鏡写真の撮影と表面粗さ計による表面粗さを測定した。

送り速度  $2500\text{ mm/min}$  と  $1000\text{ mm/min}$  で下記工具を使用して試験を行った。

使用工具	刃先角 $60^\circ$ 超硬工具
送り速度	$2,500\text{ mm/min}$ 、 $1,000\text{ mm/min}$
取得データ	加工面顕微鏡データ、表面粗さデータ

各試験条件での加工面顕微鏡写真と表面粗さ計による平均数値、及び波形データを図3-2-15、図3-2-16に示す。

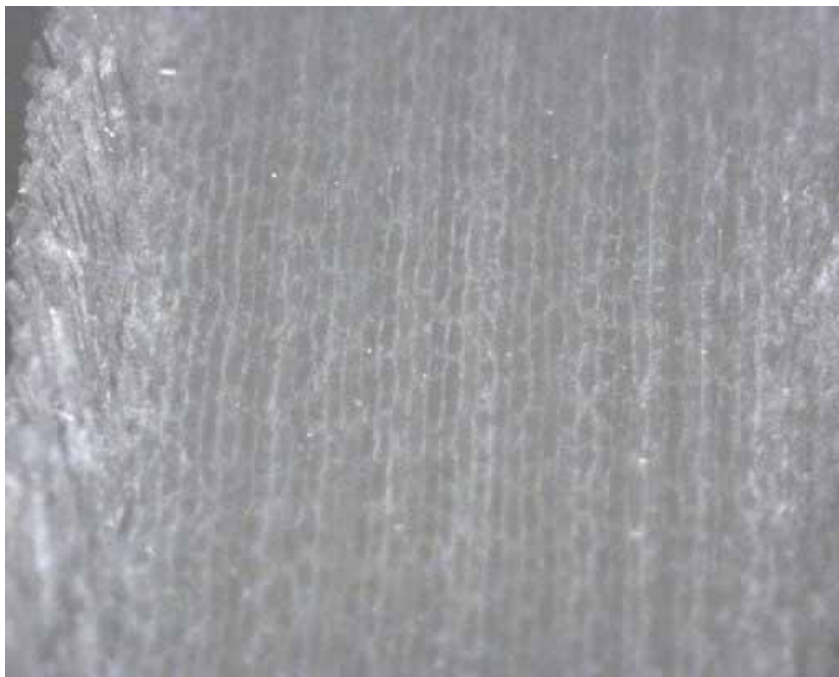


図3-2-15 送り速度  $1000\text{ m/min}$  加工面顕微鏡データ(倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均:  $Ra 0.84\text{ }\mu\text{m}$



図3 - 2 - 16 送り速度2500m/min 加工面顕微鏡データ(倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均: Ra0.79μm

顕微鏡写真や表面粗さデータから見ると送り速度を2.5倍変えた状態でも加工面はほとんど変化が見られない。送り速度を更に上げた試験も行ったが、加工面の状態としては顕著な差は認められない。ただし、工具刃先のチッピングが発生し実際の加工としては今回作成した工具では困難である。

従来工具では、工具、材質により最適な切削条件が求められており、送り速度を変えると回転数も変えなければならない。送り速度だけを上げると工具の寿命に影響し、加工面は悪くなるので送り速度を大きく上げることはできない。

従来工具では最適な切削条件が決められており、それから外れると、工具寿命や加工面に影響し実際の加工には適さないが、新工具では最適な切削条件が広範囲に存在することが確認できた。

#### 6) 切削長と工具摩耗の調査

切削長を変化させた加工を行い、工具摩耗状態を測定して、その関係を調査することを目的とした。

新品のダイヤモンド工具を使用し、以下の切削条件で100m切削し、新品状態と100m切削時の切削動力、加工面状態、工具刃先状態を調査した。

使用工具                      刃先角60°ダイヤモンド工具(新品)



切削距離 100m

取得データ 切削動力、加工面顕微鏡データ、工具刃先顕微鏡データ

各試験条件での動力計データ、加工面及び工具刃先の顕微鏡写真を図3-2-17から図3-2-22に示す。

(1) 切削動力の変化

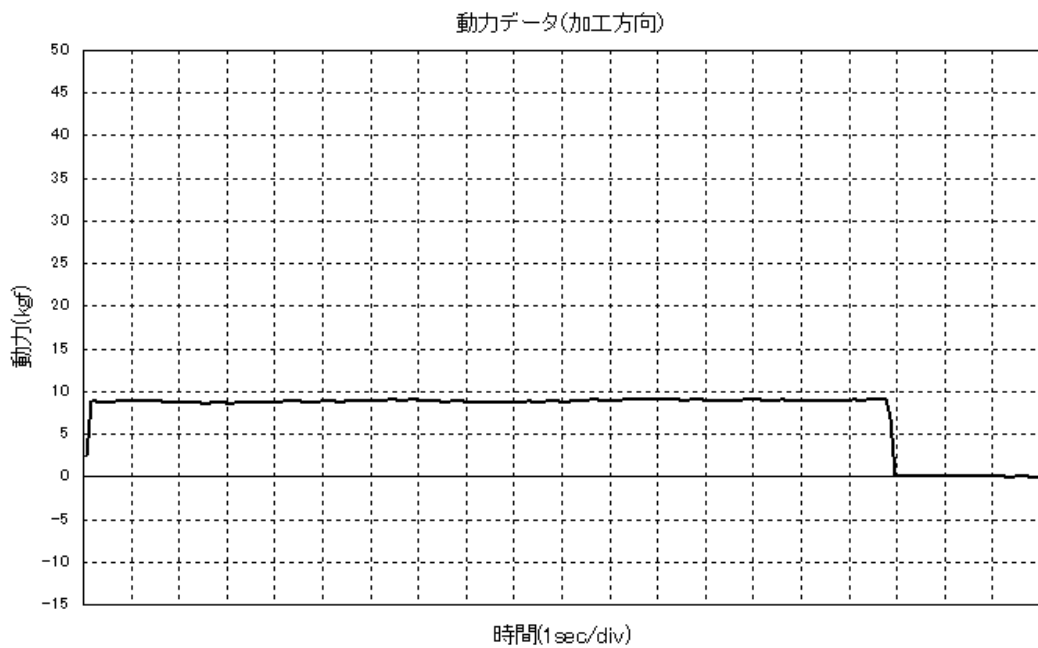


図3-2-17 45°ダイヤモンド工具(切削開始)動力データ

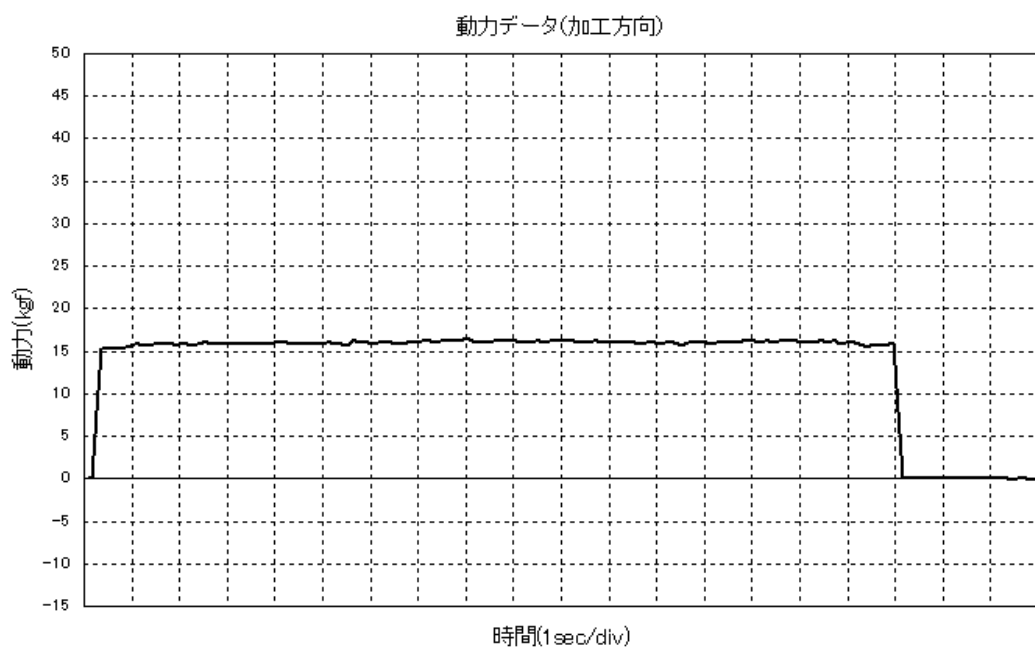


図3-2-18 45°ダイヤモンド工具(切削長100m)動力データ

(2) 加工面の変化



図3 - 2 - 19 45°ダイヤモンド工具(切削開始)加工面(倍率50倍)

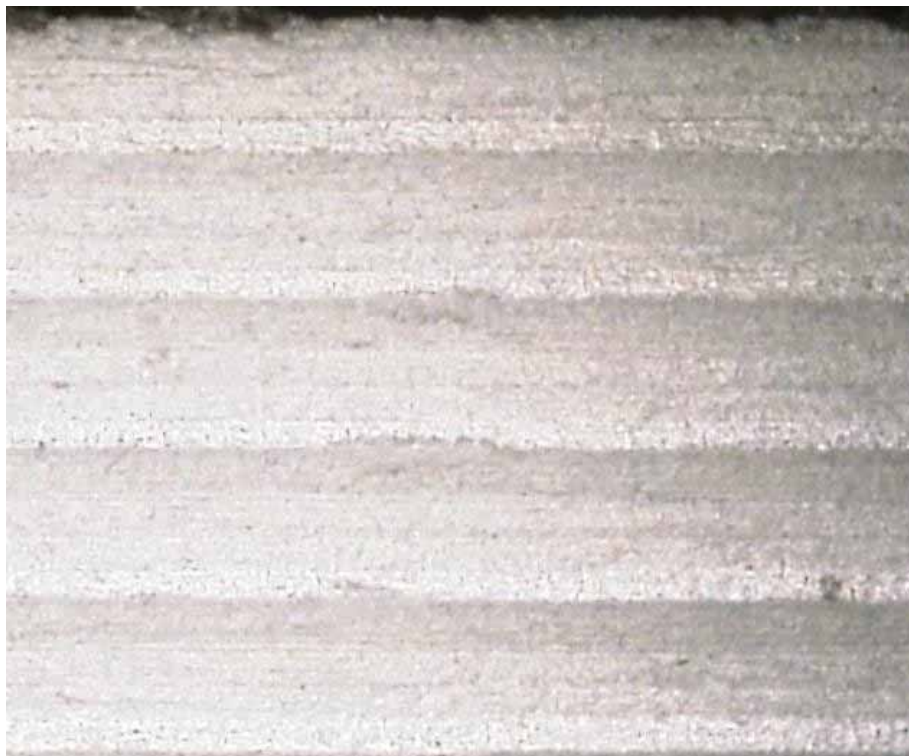
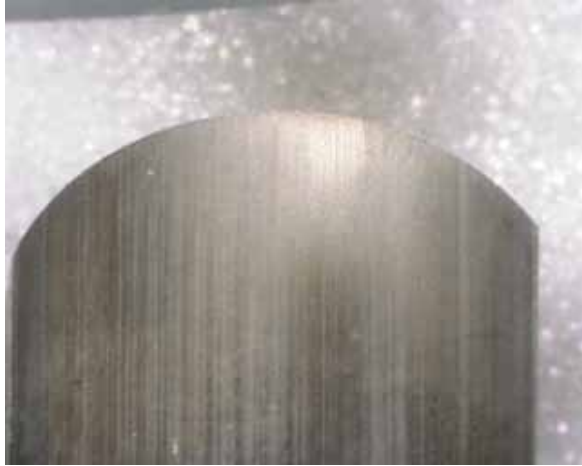
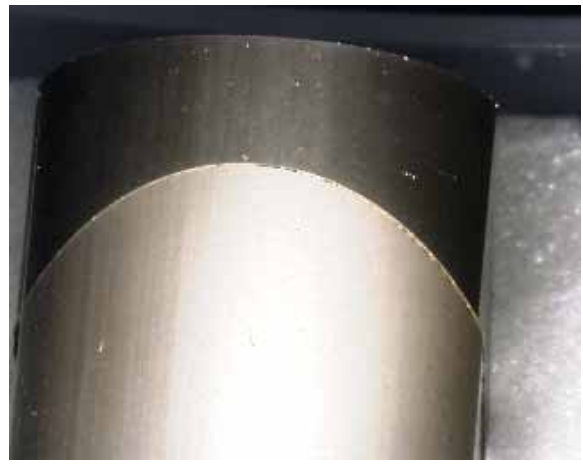


図3 - 2 - 20 45°ダイヤモンド工具(切削長100m)加工面(倍率50倍)

(3) 工具刃先変化



工具上面より撮影



工具下面より撮影

図3 - 2 - 21 45°ダイヤモンド工具(切削開始前)工具刃先(倍率2.5倍)



工具上面より撮影



工具下面より撮影

図3 - 2 - 22 45°ダイヤモンド工具(切削長100m)工具刃先(倍率2.5倍)

従来工具では切削長が長くなると振動が発生し、加工面に影響を与える。非回転型の新工具は100m切削後でも加工面については顕微鏡写真で見える限り大きな変化は認められず、加工面としては問題のないレベルである。

工具の顕微鏡写真を見るとチップングが発生している。従来加工のダイヤモンド工具でも100mも加工できないので、チップングは発生する可能性はある。100m加工時の切削動力がスタート時の1.5倍に増加しており、工具のチップングが影響したものと推測される。

### 7) 繊維方向と面粗度及び切削力の調査

ワークの繊維方向を変化させて加工を行い、切削動力計により切削抵抗、加工後のワークの表面粗さを測定して、その関係を調査することを目的とした。

同一工具で同一切削条件にて45°UD材を順方向と逆方向で加工を行い、そのときの切削動力、加工面の顕微鏡写真及び、表面粗さデータを測定した。更に90°UD材でも同様の試験を行った。

使用工具	刃先角60°超硬工具
送り速度	2,500mm/min
取得データ	切削動力、加工面顕微鏡データ、表面粗さデータ

各試験条件での動力計データ、加工面顕微鏡写真及び表面粗さデータを図3-2-23から図3-2-28に示す。

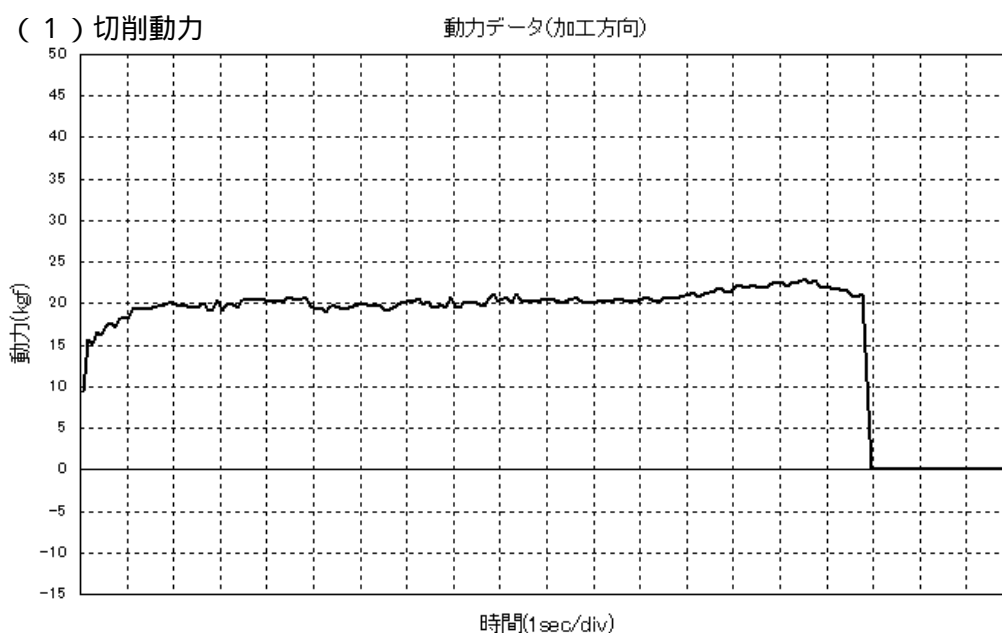


図3-2-23 45°UD材(順方向加工)動力データ

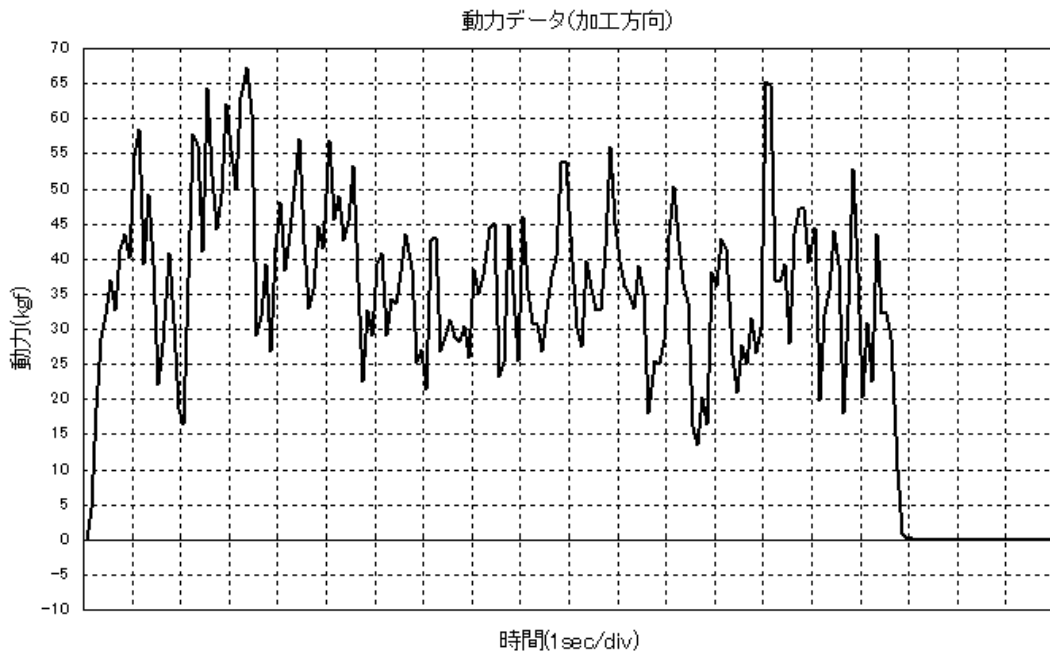


図3 - 2 - 24 45° UD材 (逆方向加工) 動力データ

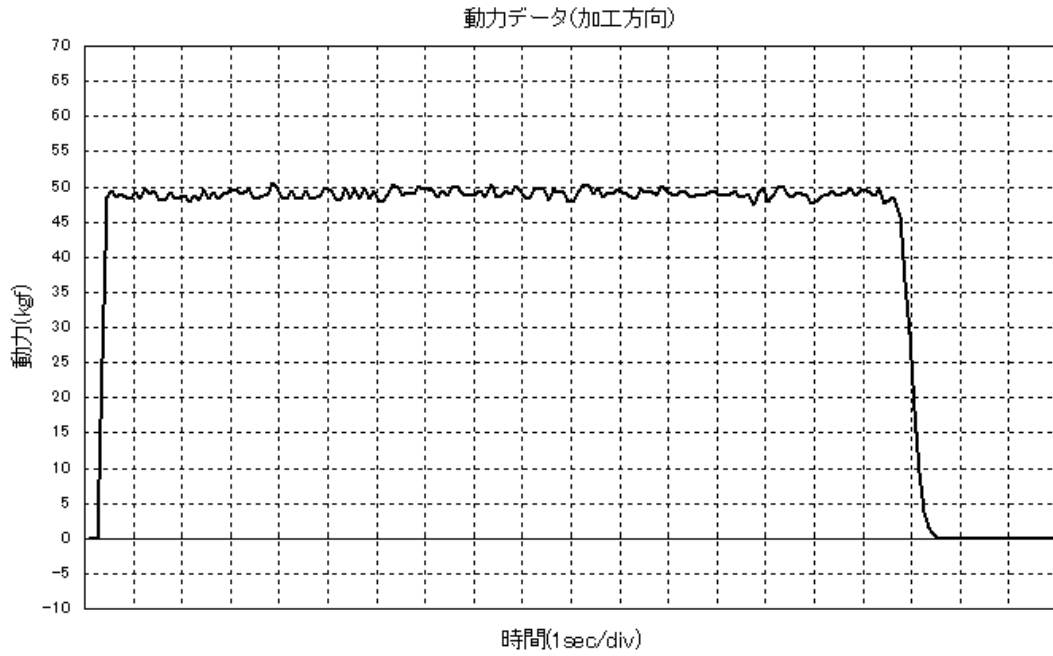


図3 - 2 - 25 90° UD材 動力データ

(2) 加工面データ (顕微鏡データ、表面粗さ計データ)

顕微鏡データは加工面の状況を確認するため、ワークの真上より撮影した。



図3 - 2 - 26 45°UD材(順方向) 加工面 (倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均: Ra 0.79 μm



図3 - 2 - 27 45°UD材(逆方向) 加工面 (倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均: Ra 19.95 μm



図3 - 2 - 28 90°UD材 加工面 (倍率25倍)  
粗さ計データ3箇所平均: Ra 3.87 μm

45°UD材の逆方向加工は加工面も荒れており、切削動力も全く安定しておらず、切削というよりヤスリなどでこすっているイメージに近い。90°UD材の加工は45°逆方向加工よりはましで切削動力も安定はしているが、45°順方向加工の倍以上の切削力がかかっており、加工面も表面粗さデータでは4倍近く悪くなっている。

これはテスト材が一方向の繊維材で強度的に繊維方向のみで保たれているため、繊維方向と逆の力がかかる切削では繊維を切断するのではなく、むしり取るような状態になっていると思われる。試験対象にはなっていなかったが、従来の回転工具では逆方向加工でも、順方向加工と同程度の加工ができています。

### 3.3 加工後のワークのダメージ評価

開発した切削方法によって加工された材料が、従来の切削工具によって加工された材料と比較して、マクロな力学特性がどのように変化するかを実験的に確認し、開発した切削方法の有効性を検証することを目的とする。

#### 1) 力学試験

開発した切削方法によって加工された炭素繊維強化プラスチックが、従来の切削方法によるものと比較して力学特性が向上するかどうかを評価するために、引張り強度特性の比較を行った。

具体的な試験片に関しては、図3-2-29に示す色付の部分を、新しい加工方法及び従来の加工方法で作製した2種類を準備し、その力学特性の差異を調べた。表面加工の力学的な効果を検証するには、表面の影響を的確に捉えられる試験片のバルク品からの作製方法、形状、例えば適切な厚み  $C$  を採用することとした。また、必要に応じて、何も加工を加えない状態の試験片、あるいは側面へも加工を行った場合などの条件を考慮することとした。

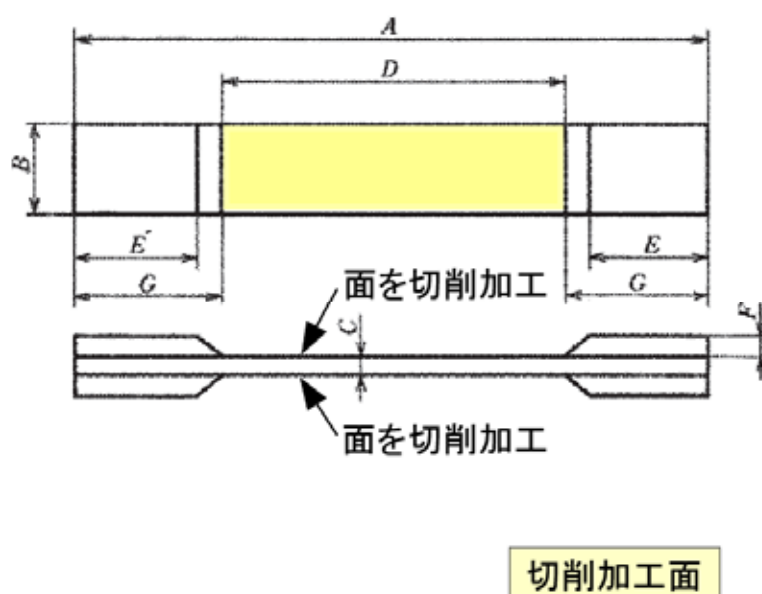


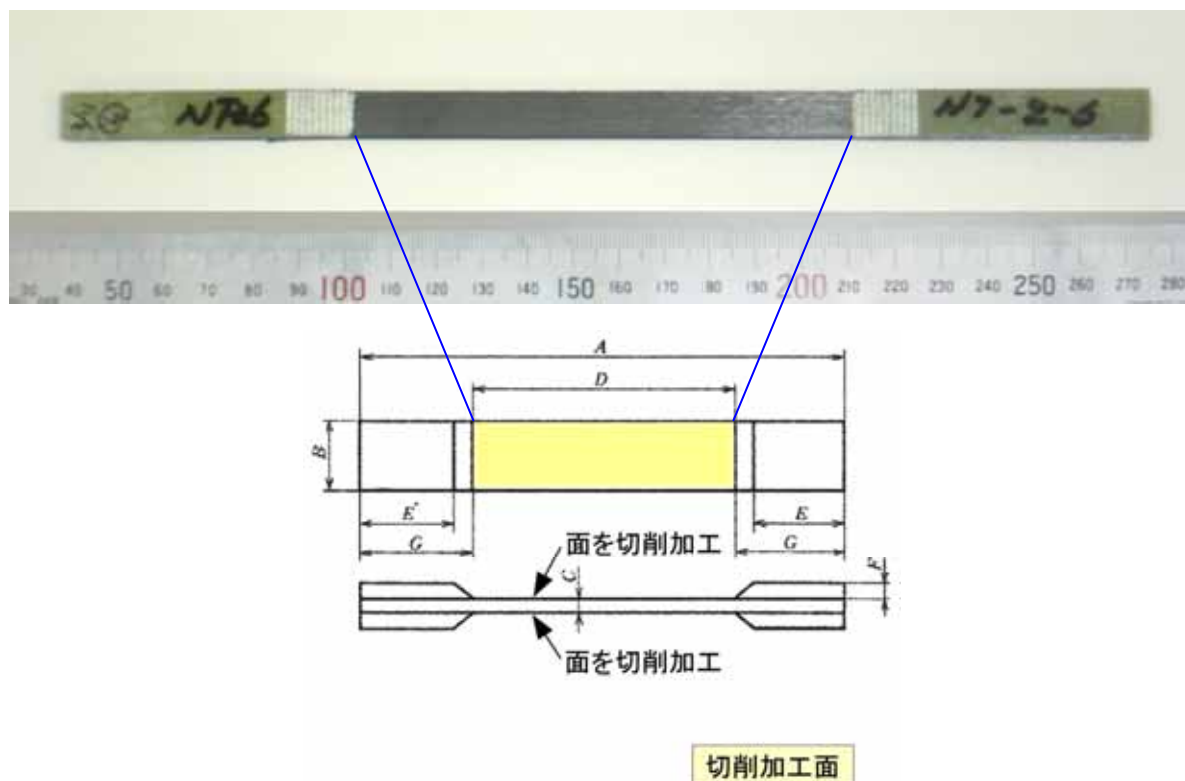
図3-2-29 試験片形状及び新旧の切削方法による切削加工面



開発した切削方法及び従来の切削方法で、UD繊維方向45°、及び0°/90°交互積層の2種類、計4種類の試験片を作製し、その引張り強度特性を比較した(各n=5)。具体的な試料を次に示す。

試料A	従来工具	8ダイヤコートエンドミル	UD繊維方向45°
試料B	新工具		UD繊維方向45°
試料C	従来工具	10超硬エンドミル	0°/90°交互積層
試料D	新工具		0°/90°交互積層

試料形状は JISK7083:1993 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張 - 引張疲れ試験方法の規格に準じ(幅は製作工程に合わせて変更) 切削面積を十分に確保してその力学的な効果の検証に適切なものとした。具体的な各長さを図3-2-30に示す。



A=237mm B=10.5mm C=2.5mm D=107mm E=50mm F=2mm G=65mm

図3-2-30 試験片形状

参考：JIS K 7083:1993 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張 - 引張疲れ試験方法

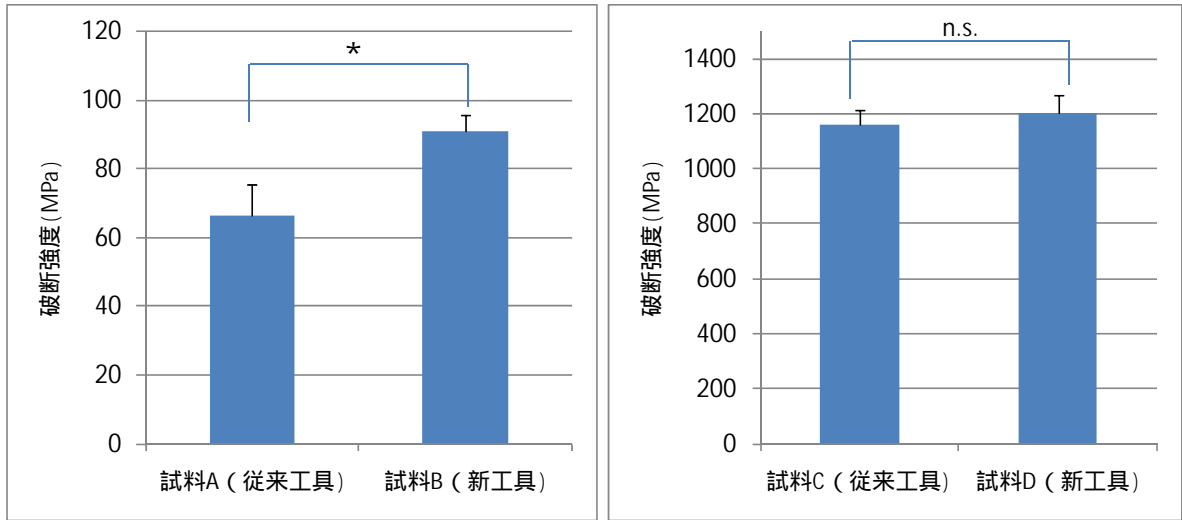
材料試験機(TOYO BALDWIN, TENSILON, UTM-10T : 図3 - 2 - 3 1 ) を用いて、2.0 m / minのクロスヘッドスピードにより変位を負荷し、引張り強さを室温・湿度環境にて求めた。



図3 - 2 - 3 1 材料試験機

開発した切削方法と従来の切削方法による試験片の破断強度特性を図3 - 2 - 3 2 に示す。

左図は、試料A ( 従来工具 8 ダイヤコートエンドミルUD繊維方向45° ) 及び試料B ( 新工具UD繊維方向45° ) である。右図は、試料C ( 従来工具 10 超硬エンドミル0° / 90°交互積層 ) 及び試料D ( 新工具0° / 90°交互 ) である。



\* : $p < 0.05$

試料A	従来工具	8 ダイヤコートエンドミル	UD 繊維方向 45°
試料B	新工具		UD 繊維方向 45°
試料C	従来工具	10 超硬エンドミル	0° / 90° 交互積層
試料D	新工具		0° / 90° 交互積層

図3 - 2 - 3 2 炭素繊維方向及び加工方法による破断強度比較 (各 n=5)

UD 45° の場合には、0° / 90° 積層の場合と比較して、その強度は 1 / 100 以下となっている。そして、UD 45° での新工具による加工試料は、従来工具による加工試料に比べて、27%程度、有意に ( $p < 0.05$ ) 破断強度が上昇していることがわかる。

炭素繊維の力学的な寄与がほとんどないために破断強度自体は低く、かつ従来の回転工具の刃先は、繊維 母材の複合表面に微細なダメージ (クラック) を生じさせるなどの理由が考えられる。新工具の有用性が示されたものと言える。

一方、0° / 90° 交互積層の場合は、従来工具及び新工具において有意な差は認められなかった。この場合は炭素繊維の力学的な寄与が大きく母材へのダメージは相対的に小さくなること、あるいは従来工具の切削痕も長軸方向に方向性を有しており、新工具の切削痕に近いことから、繊維 - 母材複合表面へのダメージに関する評価も必要と考えられる。

特に、試料Aと試料Cにおいては、従来工具においてダイヤコートと超硬エンドミルを替えたのみでも切削痕が大きく異なるため、検討が必要と言える。炭素繊維の方向性や、従来工具及び新工具による切削による強度変化の精査が必要である。

## 2) 赤外線サーモグラフィ試験

前述の力学試験は、材料のマクロな力学挙動を計測するものであった。一方、赤外線サーモグラフィ試験（図3-2-33）は、材料表面の赤外線放射を捉えるため、面内の構造の不均一性、あるいは力学状態を描画することが可能である。今年度の研究開発においては、力学試験に記載の試料各1片を用いて、新しい切削方法と従来の切削方法によって、両者に異なった赤外放射特性が認められるかどうかを2次元イメージングにより検証し、力学試験結果とのプレリミナリな比較検討を行うこととした。



図3-2-33 赤外線サーモグラフィ試験装置及び10kN油圧制御材料試験機

試料に引張り荷重を油圧サーボ形材料試験器（MTS 858Mini Bionix）にて、 $600 \pm 500$  N、5 Hzにて負荷しながら、赤外線サーモグラフィ試験（熱弾性応力測定及び散逸エネルギー測定）を行った。赤外線サーモグラフィ装置（Cedip Silver 450M）では、負荷荷重周期とのロックイン方式で、 $320 \times 240$ 画素16,000画像を取得し熱弾性応力を解析している。

参考規格

- 1) NDIS3425:2008 熱弾性応力測定法
- 2) NDIS3427:2009 赤外線サーモグラフィ試験方法通則 (NDIS:日本非破壊検査協会規格)

前述の力学試験と同様に、開発した切削方法及び従来の切削方法で、UD繊維方向45°、及び0°/90°交互積層の2種類、計4種類の試験片を作製し、その赤外線放射特性を比較した(各n=1)。具体的な試料を次に示す。

試料A	従来工具	8ダイヤコートエンドミル	UD繊維方向45°
試料B	新工具		UD繊維方向45°
試料C	従来工具	10超硬エンドミル	0°/90°交互積層
試料D	新工具		0°/90°交互積層

試料の赤外線サーモグラフィ試験結果を図3-2-34に示す。引張り力600±500N、5Hzにて負荷した場合、試料Aは簡単に破損してしまうため、データには含まれない。

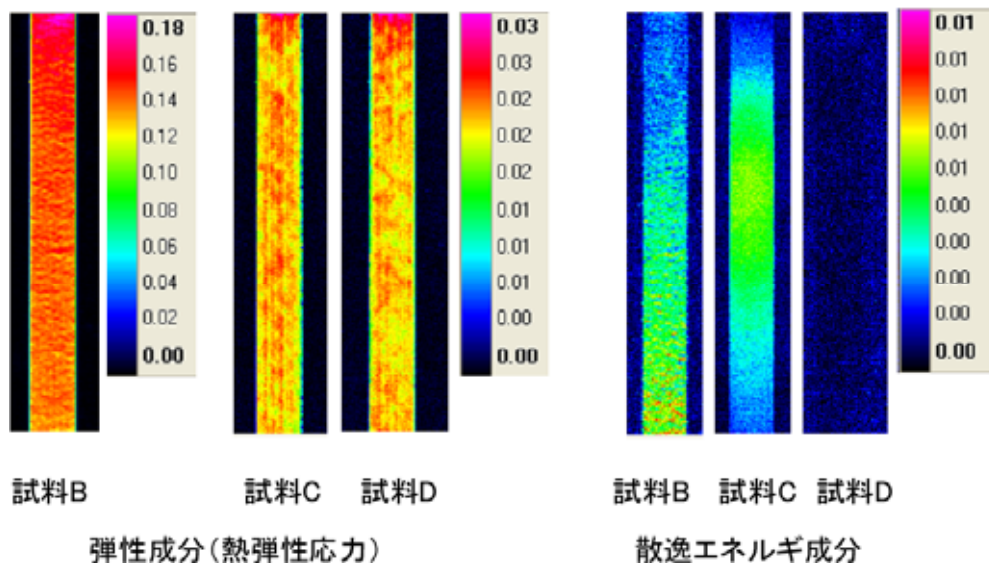


図3-2-34 試料による赤外線サーモグラフィ試験結果の比較(温度スケール K)

弾性成分(熱弾性応力)においては、試料Bの応力(温度値)が高いが、炭素繊維の力学的な寄与がほとんどないために母材からの赤外線放射が大きくなるものと考えられる。試料C、DのPCD交互0°、90°においては、両工具において弾性成分は同様な方向性を持って可視化されている。

一方、弾性成分でない温度変化は散逸エネルギー成分に示される。試料Bでは下側チャック近傍、試料Cでは中央部に変化があるが、不可逆的なダメージの発生も一因と考えられ

る。一方、試料Dでは認められないが、この成分は動的に変化するものであり、時間経過による解析は必要である。

いずれも、 $n=1$ のプレリミナリな結果であり、統計的な精査が必要である。

## 4 F / Sの今後の課題及び展開

### 4.1 今後の課題

平板での新提案工具の実用性は認められた。従来工具に比べて、主軸の動力が要らないため機械自体を安く作れるし、主軸を回転させる電力が不要となり省エネをアピールできる。加工後の粉塵も従来工具の場合、細かな粒子が飛び散り人体に影響があるが、新工具で加工すると切粉が飛び散らず下に落ちて切屑になるため環境にやさしい。

今後の課題としては以下に示す内容が考えられる。

チップングのし難い切削性の良い工具を追及していかなければならない。そのためには材質、形状について最適な条件を探していく必要がある。

従来工具と生産性で比較すると送り速度が遅く従来工具の方が早く削れるので、更なる生産性を上げる必要がある。このためには加工面の改善、工具チップングの回避を考慮に入れながら送り速度を上げて加工できる方法を検討すべきである。

#### 4.1.1 工具の最適形状

刃先角による切削性、加工面粗度について研究を行い、刃先角が大きいほど加工面粗度も切削動力も少なく、非回転工具の仕様としては適していると結論付けられるが、チップングの問題が解決できなければ実用には結びつかない。

今後は刃先の形状、新しい材質の研究、更により切削性を上げるための付属機能の開発を行い実用的な新工具の開発を目指す。

#### 4.1.2 長時間耐久テスト

複合材は炭素繊維を含んでいるため、工具磨耗による工具寿命が問題となる。従来工具の場合は加工面や切れ味が落ちることで工具寿命となり工具交換をしなければならない。新工具では、工具のチップングが加工面と低下や切れ味に影響されにくく、長時間工具を使用し続けられる可能性がある。今回の試験では100mまでの切削であったが、更に長時間切削にて顕著に現れる要因を探ることで新しい問題が発見される可能性もある。今後は長時間の耐久試験を通して、新工具の評価を行っていきたい。

#### 4.1.3 切削条件の絞り込み

加工面の状態のみ考えれば、送り速度はまだ上げられると考えられる。

但し、速度を上げると

- ・工具刃先にチップングが発生
- ・切削力の増加に伴い、ワークのズレや治具からのワーク離脱の問題が発生する。

これらを考慮しながら速度のアップを検討していき最適な切削条件を見つけていきたい。

また切込量について今回は固定したが、重切削の研究も進めていきたい。

#### 4.1.4 ダメージ評価試験の精度向上

力学試験では、より実用的な試料に対して、新しい切削工具のワーク側への効果や影響を高感度に評価できる方法を検討、選択する必要がある。一方、赤外線サーモグラフィ試験では、熱弾性応力測定や散逸エネルギー測定によって、2次元的な損傷検出・可視化が可能であり、ワーク側への効果・影響評価にも適した方法と言える。今後、積極的な活用と統計的な試料の解析を行い、新しい切削工具の開発へフィードバックしていきたい。

#### 4.2 期待される成果と成果の展開

材料としてCFRPは軽くて強いことから今後益々需要が広がっていく。但し、鉄やアルミのように切削が容易ではなく、切粉の処理も含め加工にはまだまだ改善させるべき課題も多く、工具も高価なダイヤモンドなどを使用しなければ生産性が上がらない。CFRPの加工が安い工具で、やさしい環境の中でできるのであれば、飛躍的にCFRPの使用が増えてくると予想される。

##### 4.2.1 航空機分野への期待される成果

航空機にとって燃料費を抑えることが炭酸ガス削減の面からも最も重要な要素である。そのためにもアルミなどの金属材料に比べ軽量で強度のあるCFRPは益々使用範囲が広がっていくものと思われる。新工具による複合材加工が設備投資費用、設備維持費用、環境面から従来工具より優位に立つことができれば、今後の航空機の発展に寄与できるものとする。

##### 4.2.2 自動車分野への期待される成果

自動車も高級車を中心にCFRPの使用が広がっている。価格的な問題から一般車への普及はもう少しかかるものと思われるが、自動車にとっても燃費の問題は重要課題で、重量の軽量化が求められるところである。自動車では様々な部分にCFRPが使われる可能性があり、航空機に比べ小物で大量生産が必要なことからトリム加工が主要な加工になると思われる。

新工具でトリム加工ができるようになれば、自動車業界へのCFRPの使用が加速されていくものと期待する。

##### 4.2.3 成果の展開

今回の研究で、新工具によるCFRPの加工の可能性があることが確認できた。これを実用化するためにチップングの改善と生産性の向上を目指し次の研究を進めていきたい。

CFRPの利用拡大を図ろうとしている航空機産業などに対してこの成果に基づくCF



R Pの高精度、高能率な加工方法と機械を供給することとする。これにより、高能率な加工方法が、中小企業にも広く普及することが期待でき、また、我が国工作機械の技術の向上と、航空機運用面などでの炭酸ガス排出削減に寄与できることとなる。

- 禁無断転載 -

システム開発 22 - F - 7

# 航空機用等の炭素繊維強化プラスチック (CFRP)の加工技術の開発に関する フェージビリティスタディ

平成 23 年 3 月

作 成 財団法人機械システム振興協会  
東京都港区三田一丁目4番28号  
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人金属系材料研究開発センター  
東京都港区西新橋1-5-11 第11 東洋海事ビル6F  
TEL 03-3592-1282