平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「加工最適化機能を有する CFRP(CFRTP)高精度加工システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 四国経済産業局 委託先 公益財団法人とくしま産業振興機構

第1章 研究開発の概要	1
1−1 研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-1-1 研究開発の背景	
1−1−2 研究開発の目的及び目標	
1-2 研究体制	
1-2-1 研究組織・管理体制	
1−2−2 管理者及び研究員	
1-2-3 協力者	
1-3 成果概要	
1−4 当該研究開発の連絡窓口	
第2章 本論	8
2-1 CFRP および CFRTP の加工条件および積層構造に対するデータベース化	
2-2 CFRP 加工専用 CAM の開発	
2−3 CFRP および CFRTP の超音波振動アシスト加工技術の開発	
2−3−1 超音波振動アシスト装置の開発	
2-3-2 超音波振動を援用した CFRP の穴あけ	
2−4 工作機械用液体窒素,液化炭酸噴霧システムの開発	
2-5 強制冷却(液体窒素,液化炭酸供給法)を用いた切削加工技術の開発	
2-5-1 液体窒素冷却環境化における CFRTP の硬さ試験	
2-5-2 強制冷却法を用いた CFRTP の切削加工	
第3章 全体総括	23
3-1 研究開発成果	

3-2 今後の課題 3-3 事業化計画

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

自動車産業においては、地球温暖化問題への対応が強く求められる中、エンジン効率向上 や電気エネルギーの移行等様々な技術開発が行われている。中でも車体の軽量化は共通的に 燃費改善に大きく寄与するため、自動車部材には既存の鋼に代わる新素材として炭素繊維強 化プラスチック(CFRP)の応用が進められている。

CFRP は、成形品毎で積層構造や配列が異なる不均一素材であり、本特性は機械加工においてデラミネーションの発生や炭素繊維の剥離や脱落を発生させる要因となる。この欠陥は製品強度を低下させるものであり、川下製造企業からは、加工欠陥を皆無としその面性状を飛躍的に向上させる加工品の提供を強く求められている。

また、CFRP製品のもう一つの課題は、製品製造サイクルタイムの遅さである。本課題に対して、近年、成形性、製品保守、材料のリサイクル性に優れた CFRTP の利用拡大が進みだした。 CFRTP のマトリックス樹脂には熱可塑性樹脂が用いられており、これは熱により軟化する特徴を持ち、現状ではその加工が極めて困難であるため、早急な加工技術の確立が求められている。

1-1-2 研究開発の目的及び目標

本研究開発では、CFRP(CFRTP)の素材特性や機械加工における課題について、CFRP (CFRTP)の加工特性データベースを作成し、これに基づき最適加工条件を速やかに選定できるシステムの開発を行う。また、切削抵抗の抑制と切りくず排出性を向上させる超音波振動アシスト技術を取り入れ、CFRP機械加工の高能率化及び高精度化を図る。また、熱により軟化する特性をもつ CFRTP については、機械加工時の加工熱がその被削性を低下させる要因となるため、冷却に液体窒素及び液化炭酸を用いた強制冷却法等を取り入れることにより、樹脂の軟化を防ぎその高精度加工を実現する。

株式会社アスカ,独立行政法人産業技術総合研究所および徳島県立工業技術センターでは、「CFRP および CFRTP の加工条件および積層構造に対するデータベース化」をテーマとして、CFR(T)P の機械加工特性をデータベース化する. CFR(T)P は炭素繊維の種類や積層構造によりその比強度は異なる. 比強度の変化は機械加工においても切削抵抗の変動や加工熱の不均衡を招き、デラミネーション等の加工欠陥につながると考えられる. このため、CFR(T)Pの積層構造や配列に応じた工具、加工条件および加工パスの選定を行う必要がある.

そこで、炭素繊維の比強度、積層構造及び配列を変えた CFRP をオートクレーブ法およびホットプレス法により製作し、ドリルを用いた穴あけ加工、エンドミルを用いた側面切削加工を実施し、加工条件や工具摩耗に起因して変動する切削抵抗を計測すると共に加工面性状やデラミネーションの有無をデータベース化する. さらに、切削熱により被削性が変化することが予想できる CFRTP については、温度に対する加工特性について評価する.

本研究開発の目標は、工具種類、加工条件、CFR(T)P 成形品の積層構造や比強度が切削抵

抗や加工面精度に及ぼす基礎データを取得し、データベース化することである.

慶應義塾大学,多賀電気株式会社および徳島県立工業技術センターでは、「CFRP の超音波振動アシスト切削加工実験」をテーマとして、CFRP の機械加工における超音波振動の有効性について調査する. 超音波振動の援用は、切りくず分断効果および切りくず排出性の向上が期待でき、切削抵抗や切削熱の低減により、高能率加工が実現できるとともに、デラミネーション等の加工欠陥の抑制につながると考えられる.

超音波振動の援用方法は、工具を軸方向に対して超音波振動領域で振動させる軸振動切削と超音波キャビテーション援用加工法のそれぞれの効果について調査する.

超音波振動装置は、多賀電気(株)にて試作し、慶應義塾大学及び徳島県立工業技術センターにて振動装置の出力(振幅)、工具回転数、送り速度を変化させ、切削抵抗や加工面性状について評価する。超音波キャビテーション援用法では、超音波振動の出力を可変することによりキャビテーション強度を変化させ、加工穴内部の切りくず排出性や工具への切りくず溶着状態を調べる。また、2 つの超音波技術を併用した場合における被削性(加工面性状、切削力など)についても評価する。

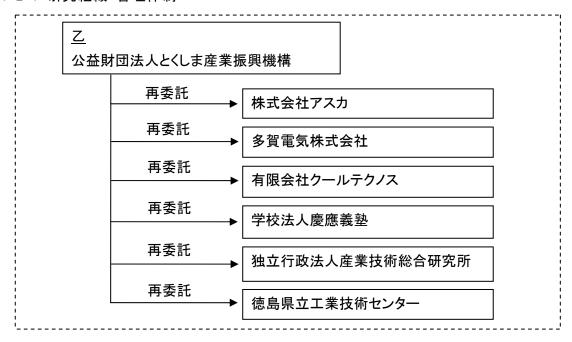
本研究開発の目標は、切りくず分断効果及び切りくず排出性を促す超音波技術を応用すると共に、最適加工条件を選定することで、切削油剤を噴出する通常加工法に対して切削エネルギーを 1/2 程度に低減させることである.

有限会社クールテクノスおよび徳島県立工業技術センターでは、「工作機械用液体窒素、液化炭酸噴霧システムの開発」をテーマとして、CFRP(CFRTP)の強制冷却切削加工に有効な専用装置の開発を目指す.本装置は、特に加工熱により軟化する熱可塑性樹脂をマトリックスに用いる CFRTP の加工に有効であると考えられる.

本研究開発の目標は、液体窒素(液化炭酸)の噴霧量を 100g/min 以下で十分な冷却能力を持ち、同装置のランニングコストを 800 円/h 以下に抑えるシステムを開発することである。 さらに、同装置を用いた CFRP(CFRTP)の強制冷却切削加工について取組み、エンドミル加工では、加工面の表面粗さを 0.02mm 以内とし、また、穴あけ加工では真円度 0.05mm 以内の加工精度を達成する.

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織・管理体制



総括研究代表者(PL)

所属:株式会社アスカ

役職:取締役社長 氏名:田中 義浩 副総括研究代表者(SL)

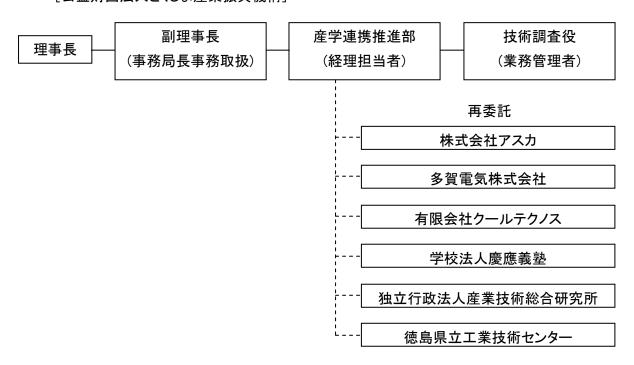
所属:慶應義塾大学理工学部

役職:教授

氏名:青山 藤詞郎

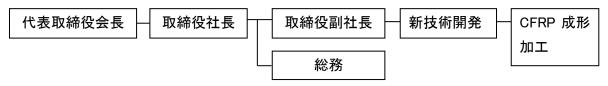
①事業管理者

[公益財団法人とくしま産業振興機構]

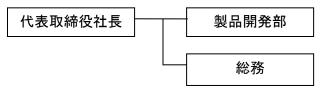


②(再委託先)

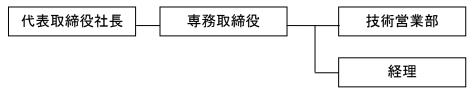
株式会社アスカ



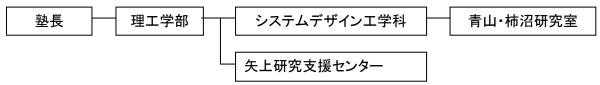
多賀電気株式会社



有限会社クールテクノス

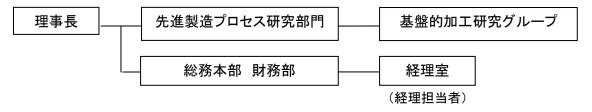


学校法人慶應義塾

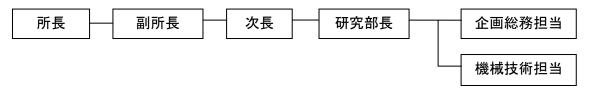


独立行政法人産業技術総合研究所

(業務管理者:先進製造プロセス研究部門長)



徳島県立工業技術センター



1-2-2 管理者及び研究員

【事業管理者】公益財団法人とくしま産業振興機構

氏 名	所属•役職	備考
宮崎 淳	産学連携推進部·部長	
矢野 翔太	産学連携推進部·主事	

【再委託先】

株式会社アスカ

氏 名	所属•役職	備考
田中 義浩	取締役社長	総括研究代表者(PL)
多田 耕造	取締役	
豊口 浩司	新技術開発CFRP成形加工	

多賀電気株式会社

氏 名	所属·役職	備考
浜田 晴司	製品開発部·部長	
上山 崇	製品開発部・主任研究員	
石井 大哲	製品開発部•研究員	

有限会社クールテクノス

氏 名	所属•役職	備考
和田 嘉之	代表取締役社長	
和田 好史	専務取締役技術営業部長	

学校法人慶應義塾

氏 名 所属・役職		備考
青山 藤詞郎	慶應義塾大学理工学部・教授	副総括研究代表者(SL)
柿沼 康弘	慶應義塾大学理工学部・准教授	

独立行政法人産業技術総合研究所

氏 名	所属∙役職	備考
碓井 雄一	基盤的加工研究グループ・主任研究員	
岡根 利光	基盤的加工研究グループ・研究グループ長	

徳島県立工業技術センター

氏 名	所属•役職	備考
小川 仁	機械技術担当・主任	
日開野 輔	機械技術担当・主任	
平岡 忠志	機械技術担当•主任	

1-2-3 協力者

アドバイザー

氏 名	所属∙役職	指導·協力事項
西 泰博		CFRP成形特性
松本 元基	三菱マテリアル株式会社開発部・サブリーダ	機械加工用工具
矢野 哲夫	独立行政法人産業技術総合研究所四国産学官	材料(加工)特性
	連携センター・イノベーションコーディネータ	
尾崎 浩一	独立行政法人産業技術総合研究所イノベーショ	CFRP加工データ
	ン推進本部・イノベーションコーディネータ	ベース作成

1-3 成果概要

CFRP(CFRTP)の高能率・高精度加工の実現を目指し、平成 23 年度~25 年度の 3 ヵ年で主に以下のサブテーマについて研究開発を実施した。

- ①CFRP および CFRTP の加工条件および積層構造に対するデータベース化
- ②CFRP 加工専用 CAM の開発
- ③CFRP および CFRTP の超音波振動アシスト加工技術の開発
- ④工作機械用液体窒素,液化炭酸噴霧システムの開発
- ⑤強制冷却(液体窒素,液化炭酸供給法)を用いた切削加工技術の開発

サブテーマ①では、CFRP および CFRTP の切削加工特性および研削加工特性について被削材の種類や加工条件の変化に伴う切削抵抗や加工面性状を測定し、同素材の切削加工特性について評価した。特に、穴あけ加工とフライス加工について重点を置き、穴出入口部のバリや断面の加工面性状などを研削加工及び切削加工の面から調査した。また、蓄積した加工結果に基づき加工データベースを作成し、これは、XML型データベースを用い、検索したい加工法や材料などのキーワードを入力することで、Web ブラウザ上で加工事例を簡便に検索できるものとなった。

サブテーマ②では、サブテーマ①から得られた知見に基づき、穴加工およびポケット加工が行える CFRP 専用 CAM の開発を行った。同 CAM には CFRP の積層構造を入力することで、切削抵抗を低減させる加工パスを出力することができ、通常の工作機械に付随するマクロ機能による加工パスに比べて工具摩耗を抑制できることが確認できた。

サブテーマ③では、工具軸振動型の切削加工装置と、加工近傍を超音波洗浄雰囲気にして切りくず排出を促す超音波アシスト装置の開発を行い、同装置を用いた穴あけ加工について取組んだ。これら超音波振動装置を応用した CFRP の加工では、切りくず排出性の向上や切削抵抗の抑制効果が確認でき、穴出入口のデラミネーションが抑制できることが明らかとなった。

サブテーマ④では、液体窒素および液化炭酸噴霧システムの開発について取組み、CFRP の冷却実験を基にそのノズル形状の最適化を狙った。液体窒素噴霧装置では冷却性能は極めて高い $(-100^{\circ}C)$ ものの安定した噴霧までに時間がかかる。一方、液化炭酸噴霧装置では前者に比べ CFRP の冷却温度は低いが $(-80^{\circ}C)$ 、切削加工時と噴霧におけるタイムラグは少なく、実際の加工現場で簡便に利用できる仕様となった。

サブテーマ⑤では、液体窒素浸漬法および液化炭酸噴霧法を用いた CFRTP の切削加工について取組んだ。加工熱によりマトリックス樹脂が軟化する CFRTP では、乾式加工及び湿式加工では樹脂バリが顕著である。しかし、強制冷却法を用いることで樹脂の軟化が抑制でき樹脂バリを大幅に低減できた。また、加工面も向上することが確認できた。

なお、当初、CFRP の積層構造計測システムも開発する予定であった。これは、超音波振動切削の技術を応用し、穴あけ加工と同時にその加工抵抗を測定し、CFRP の積層構造(一方向材およびクロス材)の把握を目的とするものであり、積層構造が明らかでない CFRP の評価に有効であると考えていた。しかし、研究開発期間中に株式会社アスカにおいて CFRP 成形設備が拡充し、また、取引先より CFRP の成形業務を委託されるなど、CFRP の成形から加工までの一貫生産体制が構築され、未知成形品の加工を行うことが少なくなったことよりテーマから除外した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

① 事業管理者

公益財団法人とくしま産業振興機構

〒770-8021 徳島市雑賀町西開 11-2

TEL: 088-669-4757/FAX: 088-669-4759

(経理担当者) 産学連携推進部 部長

(業務管理者) 産学連携推進部 主事

宮崎 淳

矢野 翔太

第2章 本論

2-1 CFRP および CFRTP の加工条件および積層構造に対するデータベース化

積層構造や繊維種類、成形方法などを変化させた CFRP および CFRTP に対して機械加工を行い、切削抵抗や加工面性状および工具摩耗を測定すると共に、得られた結果をデータベース化し簡便に閲覧できるシステムを開発した。

当プロジェクトチームでは、自ら CFRP および CFRTP を成形できる設備および技術を有しており、表 2-1-1 に示す材料特性が明らかな被削材を柔軟に用意することが出来る. これら、被削材を用いて、表 2-1-2 に示す数々の機械加工を行い、工具形状や加工条件および加工法に対する加工特性を評価した. 極めて多くの加工事例について取り組み、以下一例を紹介する.

成形品	繊維種類	成形方法	成形条件
CFRP	一方向材	オートクレーブ	炭素繊維種類
CFRTP	クロス材	ホットプレス	積層構造
			成形条件
			マトリックス樹脂

表 2-1-1 被削材(CFRP および CFRTP)の成形条件

表 2-1-2 当該研究開発で取り扱った機械加工法の概要

加工方法		工具	工具緒元	条件
切削加工	フライス削り	エンドミル	母材種	冷却方法
	穴あけ	ドリル	コーティング	加工条件
	ねじ立て	タップ	先端角	加工パス
		プラネットカッタ	ねじれ角	
	平削り	スローアウェイチップ	すくい角	
研削加工	研削	ダイヤモンド電着工具	粒度	
		軸付砥石	形状	

事例 1) エンドミル側面切削におけるバリ

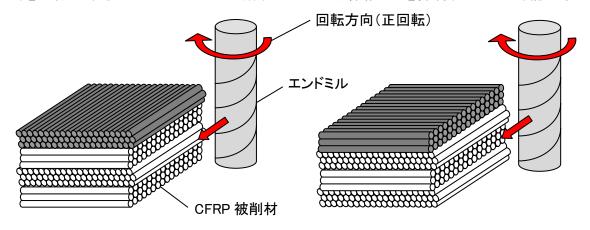
板厚約 8mm の CFRP について、エンドミルを用いた側面切削加工を湿式で行った. 工具には 超硬合金を母材とする直径 6mmのエンドミルを用い、径方向切込み量を 0.2mmとし、切削方 向(アップ、ダウン)と繊維方向の違いによるバリの有無について評価した.

図 2-1-1 は、被削材の繊維方向と切削方向の例を示したものである。被削材は一方向繊維を約 2mm間隔で 90°配向を変化させ積層しており、被削材の設置方法(裏,表)および切削方向(アップカット、ダウンカット)により、その加工面性状は変化する.

図 2-1-2 は、被削材の設置方法および切削方向を変化させた場合の加工面性状を示している。同図 a), b)に示すように、被削材上面の繊維方向と工具送り方向が垂直な場合、切削方向の違いによらず上面に繊維バリが生じる。加工に用いた工具は、すべて正のねじれ角であり、被削材には上向きの軸方向分力が生じる。再上面では繊維の拘束力がないためバリが発生するものと考えられる。

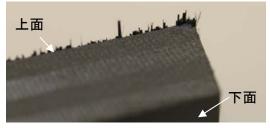
次に、被削材上面の繊維方向と工具送り方向を平行にした場合、上面での繊維バリは抑制できるが、アップカットにおいて、加工終了部で繊維バリが確認できた。その発生は、繊維方向と工具送り方向が垂直な位置であり、加工終了部で拘束力がない炭素繊維が、送り方向分力により剥離したと考えられる。ダウンカットにおいては、顕著な繊維バリは確認されなかった。

本被削材によるエンドミルを用いた側面切削においては、被削材上面繊維方向と工具送り方向を平行とし、さらにダウンカットで切削することにより繊維バリを抑制することが可能である.

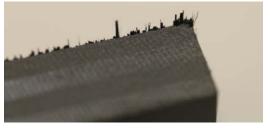


- a) 被削材上面繊維と工具送り平行
- b) 被削材上面繊維と工具送り垂直

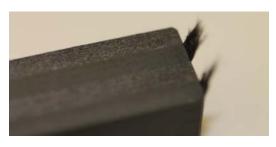
図 2-1-1 被削材の繊維方向と切削方向(ダウンカット)の例



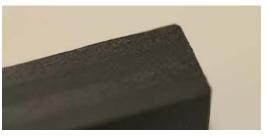
a) 上面繊維方向垂直, アップカット



b) 上面繊維方向垂直, ダウンカット



c) 上面繊維方向平行, アップカット d) 上面繊維方向平行, ダウンカット 図 2-1-2 被削材の繊維方向と切削方向の違いによる繊維バリの状況



事例 2) CFRTP の平削り(二次元切削)における切削抵抗

CFRTP を二次元切削し、工具形状と加工温度の影響を調べた。また、雰囲気温度の影響を見るため、試作した被削材加熱治具を用いて常温と 120°Cに加熱した場合とで比較した。

すくい角 15 度の超硬スローアウェイチップを用い、切削速度 10m/min で切削した時の切削力を図 2-1-3 に示す. 図中のパラメータ d は切り込み深さを示している. 図では繊維方向を 0 度~180度として表示してあるが、CFRTP の繊維がクロス状に編まれているので、繊維方向 0 度と 90 度、45

度と 135 度は同じ状態のものを切削していることになる. CFRTP の切削では以下のような特徴があることが分かる.

- ・繊維方向が0度/90度の組合せの時に、主分力・背分力ともに大きくなる.
- ・主分力は切り込みが大きくなると増加するが、背分力は切り込みが小さいときほど大きくなる。
- ・主分力・背分力ともに高温で小さくなり、120℃のときに常温切削時の 2/3 に低下する.

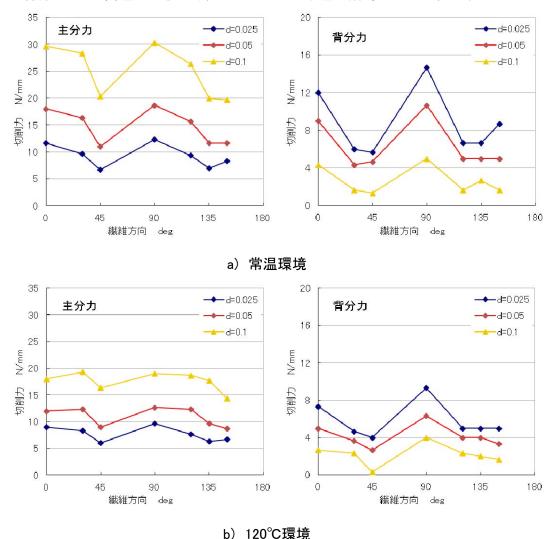


図 2-1-3 CFRTP 二次元切削時の切削力

得られた加工事例について、キーワード検索により簡便に事例検索が出来る CFRP(CFRTP)加工特性データベースを開発した。データベースの作成には産業技術総合研究所デジタルものづくり研究センターが中心となって取組んだ『加工技術データベース』を応用した。

本データベースは XML 型データベースを用いており、マイクロソフトエクセルのマクロプログラムを用いて XML データを作成する。まず、カテゴリを『加工法』、『材料』および『注目点』に分類し、各カテゴリに対してキーワードを追加する。本キーワードが加工事例(実験結果)データのメタデータとなり、ユーザはキーワード(メタデータ)を順に選択することで必要とする加工事例(実験結果)データを Web ブラウザ上で簡便に検索することが出来る。

CFRP(CFRTP)加工特性データベース検索例を図 2-1-4 に示す. 加工法より『エンドミル端面切

削』を選択し、材料および注目点から『CFRP(UD)積層材』『加工品質(バリ、粗さ)』を選択すると該当する加工事例がリストアップされ、この中から目的に応じた加工データを閲覧する.

なお、本加工結果には、加工条件と共にコメントを設けるようにした。これにより、CFRP 加工初心者に対して、その加工ノウハウを瞬時に理解させ、新規加工案件に対する対応を迅速にする効果があると考えられる。

	CFR(T)P加工データベース
Select	List
加工法:	切削一般 ドリル穴あけ エンドミル穴あけ 砥石穴あけ エンドミル端面切削 砥石端面研削 ねじ切り その他
材料:	CFRP(UD) TERP(DDA) TERP(UD-DDA) TERP(UD) TERP(UD
注目点:	加工品質(バリ,粗さ) 工具寿命 加工速度 加工力 加工温度 加工環境 CFRP(CFRTP)材料特性
4件のデー	-タが選択されました。

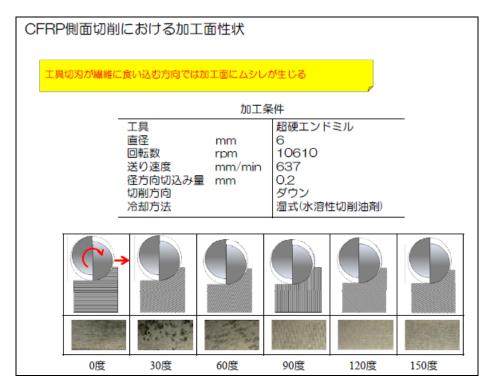


図 2-1-4 CFR(T)P 加工データベースの検索フロ一図

2-2 CFRP 加工専用 CAM の開発

一般的に、工作機械に付随する対話プログラムや汎用 CAM は、金属材料のように等方性材料を対象としたものである。しかし、CFRP および CFRTP の切削加工特性を蓄積した結果、異方特性の強いこれら材料では、加工条件や加工パスにより工具摩耗および加工面性状は大きく異なり、最適な加工条件が存在することがわかった。この知見に基づき、CFRP 加工専用 CAM を開発した。

CFRP 加工専用 CAM では大きく分けて 2 つの機能を開発した. 1 つは穴あけ加工パス生成機能で,もう 1 つはポケット加工パス生成機能である.

図 2-2-1 に CFRP 加工専用 CAM の構成を示す. 本ソフトは大きく3 つのフォームに分かれており、上からメインフォーム、加工条件編集フォーム、工具編集フォームとなっている. 本ソフトでは加工条件や工具を一度作成しておけば、ユーザはメインフォーム上で位置や材料板厚、炭素繊維方向などを指定するだけで CFRP 用の加工プログラムが自動作成できる. 加工条件編集フォームでは使用する工具、回転数、送り速度、加工方法などの加工条件を指定する. メインフォームで指定した各位置について指定の加工条件で順に加工が行われる. 工具編集フォームでは使用する工具の番号、種類、直径を編集する. 工具編修フォームで編集した内容は即座にメインフォームや加工条件編集フォームに反映される.

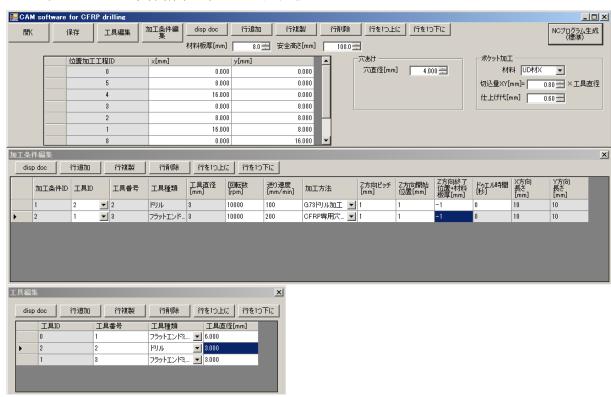


図 2-2-1 CFRP 加工専用 CAM の構成

ポケット加工パス生成機能を用いて CFRP に対してポケット加工を行い, 工作機械の対話プログラムと比較した. 一方向材からなる CFRP に対して, ハイスエンドミルを用い縦横それぞれ 40mm, 深さ 2mmのポケット加工を行い, 工具摩耗を比較した. 表 2-2-1 に示す加工条件の下水溶性切削油剤を用いた湿式環境下で加工を行った.

工具側面の画像を図 2-2-2 に、工具先端の画像を図 2-2-3 に示す。工具側面の画像を見ると工具の逃げ面の摩耗量は CFRP 加工専用 CAM を利用した工具の方が少ないことがわかる。また、工具先端の画像を見るとマシニングセンタの対話機能を利用した工具は CFRP 加工専用 CAM を利用した工具よりも逃げ面の摩耗量が大きく、その差は 28 μ m であった。以上からポケット加工に CFRP専用の加工パスを利用することで工具摩耗を抑制できることがわかった。

表 2-2-1 加工条件

工具直径 mm	6	
回転数 rpm(切削速度 m/min)	10610 (200)	
送り速度 mm/min(送り mm/tooth)	424(0.02)	
冷却	水溶性切削油剤(20%希釈)	
切削方向	ダウンカット	
軸方向切込み量 mm	2	
ポケットサイズ	縦 40mm × 横 40mm	

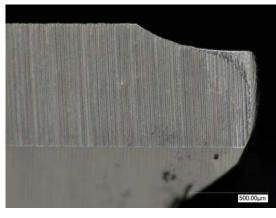


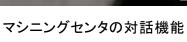
500.00µm

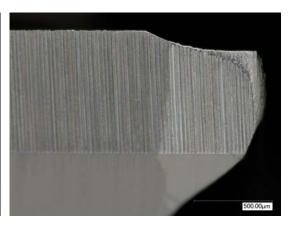
マシニングセンタの対話機能

CFRP 加工専用 CAM

図 2-2-2 工具側面の摩耗







CFRP 加工専用 CAM

図 2-2-3 工具先端の摩耗

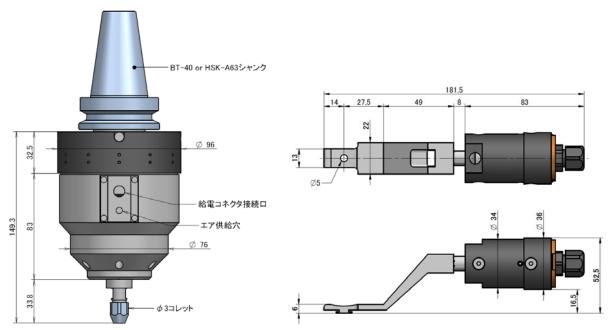
2-3 CFRP および CFRTP の超音波振動アシスト加工技術の開発

2-3-1 超音波振動アシスト装置の開発

CFRP は高強度な炭素繊維と樹脂の複合材料であることより、その機械加工では分断された炭素粉と樹脂が切りくずとして排出される. 硬脆材料の加工では、工具を超音波振動領域で振動させ、切りくずの分断効果と共に切削速度を増加させることにより切削性能が向上するため、炭素繊維の機械加工においても本効果が有効であると考えられる. また、分断した切りくずの排出には、加工近傍を超音波洗浄雰囲気にして、その洗浄効果で切りくず排出を促す超音波キャビテーション法が有効であると考えられる. 以上のことより、CFRP の加工においても超音波振動の援用効果が期待でき、既存製品よりも高速回転が可能で且つ振動振幅の大きい超音波振動アシスト装置の開発に取り組んだ.

図 2-3-1 に高速回転型の超音波スピンドルの概要を示す. 本装置は 20000rpm の高速回転であると共に, 軸方向に最大 9µm の超音波領域で振動することが可能である. また, バランス調整により低速域から高速域において工具径方向の振動振れは極めて小さい.

次に、図 2-3-2 に超音波キャビテーション付与装置の概要を示す。通常、発振周波数が低くなると波長の関係で振動子が大型化する欠点があるが、振動子の振動モードを軸振動からたわみ振動とする事で波長が短くなり、従来と同等以上の使い勝手の良い装置となっている。また、たわみ振動子を小型化しており、マシニングセンタ等の加工機に取り付け易い構成としている。



(発振周波数 69.7kHz, 振幅 9μmP-P, 最高回転数 20000rpm)

(発振周波数 20kHz, 振幅 13μmP-P)

図 2-3-1 高速回転型超音波スピンドル

図 2-3-2 超音波キャビテーション付与装置

2-3-2 超音波振動を援用した CFRP の穴あけ

CFRP の穴あけに超音波振動を援用した効果を実験的に検証した. 工具振動切削法には, 切削抵抗軽減効果が, キャビテーション援用加工法には切削液の流動性を向上し, 切りくずや熱の排出を促す効果が期待される. 工具振動切削およびキャビテーション援用加工, そしてその両方を合わせた複合振動援用加工について慣用加工と比較した. 超音波援用条件は表 2-3-1 のとおりである. 工具には直径 3mm のツイストドリルを用い, 表 2-3-2 に示す加工条件の下, CFRP に対して 50 穴×3 セットずつの穴あけを行い, 切削抵抗, 工具摩耗および穴出口部のデラミネーションについて評価した. 加工実験装置の概要は図 2-3-3 のとおりである.

表 2-3-1 超音波援用条件

キャビテーシ	ョン	あり	なし
工具振動 -	あり	Hybrid	Vibration
	なし	Cavitation	Conventional

表 2-3-2 切削条件

工具回転数	8000 min ⁻¹	
送り速度	80 mm/min	
切削液	水溶性切削液(20 倍希釈)	
加工深さ	4.0 mm(貫通)	

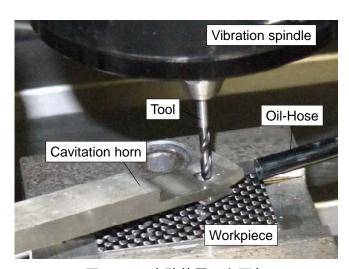


図 2-3-3 実験装置の主要部

切削抵抗の時間推移の一例を図 2-3-4 に示す. 穴あけ加工では x, y 方向にはほとんど力は生じていなかったため, z 方向(スラストカ)のみ評価した. CFRP の加工では工具食いつき時に最大値を示し. 徐々に減少していくような挙動を示すことが分かった.

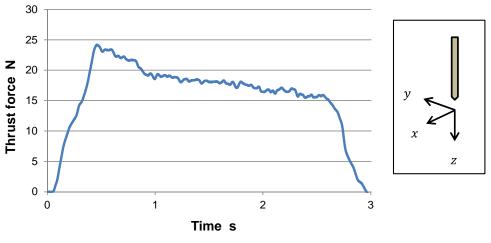


図 2-3-4 スラストカの時間推移

次に、各加工法におけるスラスト力をプロットしたものを図 2-3-5 に示す. いずれの加工法においても加工穴数の増加に伴い切削抵抗も大きくなっている点は共通している. 工具振動のみ(Vibration)の場合では平均して 16%、キャビテーションのみ(Cavitation)の場合では 3%程度の減少率だった. 複合振動援用加工(Hybrid)では両者の相乗効果により、平均で 21%の切削抵抗軽減効果が得られた. 以上より、切削抵抗の減少への寄与率はキャビテーションよりも工具振動の方が大きく、2 つの手法を組み合わせることで相乗効果が得られることが分かった.

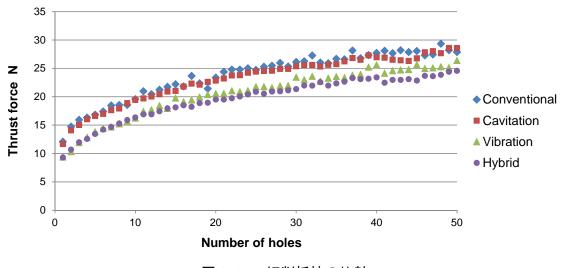


図 2-3-5 切削抵抗の比較

この原因を探るため、工具状態を観察した。工具側面の観察結果を図 2-3-6 にまとめた。キャビテーションは切りくずの工具への付着を防ぎ、切れ刃を切削しやすい状態に保つことができるということが確認できた。また、工具振動により切りくずは細かくなるため、複合加工ではさらに切りくず排出性が向上したのではないかと考えられる。工具逃げ面摩耗について図 2-3-7 にまとめた。10 穴加工するごとに工具摩耗を逃げ面のあらかじめ定めた数か所で測定し、その結果の平均値をプロットしている。工具摩耗の進行に超音波振動による大差はなく、どの加工法も 10 穴目までに工具が大きく初期摩耗を起こし、その後は加工穴数の増加に伴い、ほぼ直線的に摩耗が拡大していくような

挙動を示した. 一般的に摩耗量が 100μm に到達すると工具を交換する必要がある. 50 穴加工が終了した段階では摩耗量はまだ 50μm 程度であり, 引き続き加工が行えると判断できる.

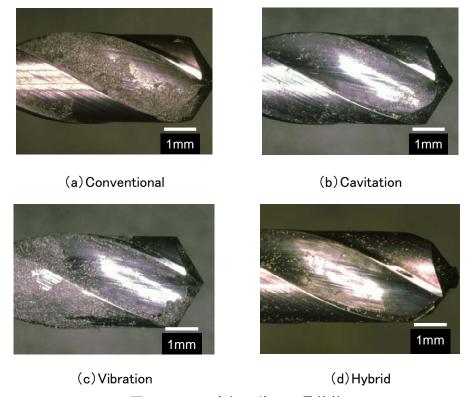


図 2-3-6 50 穴加工後の工具状態

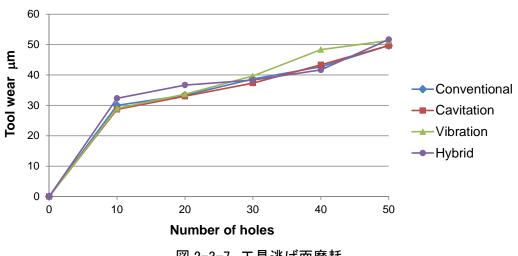
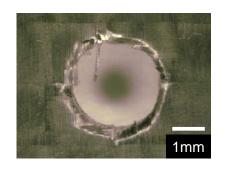


図 2-3-7 工具逃げ面摩耗

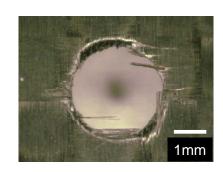
また、加工穴品位について評価を行った。入口はどの加工法でも目立ったバリや欠けなどなく、 十分きれいだったので、今回は主に出口状態について考察を行った。 図 2-3-8 に各加工法における 50 穴目の出口状態の光学顕微鏡による観察結果をまとめた。 繊維の切り残しやデラミネーションが見受けられる。 デラミネーションの原因は複合材料特有の性質である異方性および不均質性によるものであると考えられる。

具体的に述べると、CFRP の構造は前述のとおり、プレプリグという炭素繊維を同一方向に敷き

詰めたものに樹脂を含浸させて成形したものを何層にも積層させた構造をしている。したがって、その層同士が接着されている部分は材料中で最も強度が劣るため、ある程度の力が加わると CFRP 内の樹脂や繊維が切削される前に工具から逃げるようにして剥離してしまう。この異方性や不均質性がデラミネーションの主な要因である。



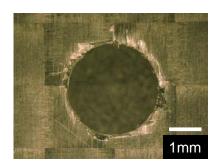
(a) Conventional



(b) Cavitation

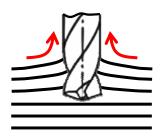


(c) Vibration

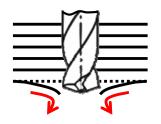


(d) Hybrid

図 2-3-8 加工穴出口(50 穴目)



(a) 入口: peel up delamination



(b) 出口: push out delamination

図 2-3-9 デラミネーションの発生メカニズム

デラミネーションは加工穴の入口と出口で生じることが多い.しかし,図 2-3-9 に示すように入口と出口でデラミネーションの発生原因は異なる.入口の層間剥離は,ドリルの切れ刃が被削材と接触したときにドリルの溝に沿って工具進行方向とは逆方向に剥離する力がはたらき,層を引き離すことによって起こる.一方,出口側で起こる層間剥離は,加工が進み,ドリル先端が穴出口に近付くにつれ被削材の厚みが減少して変形しやすくなり,最終的に層に作用する力が層間の接着強度を超えることで表層の繊維がドリル径よりも広い領域で外側に剥離し,ドリルが抜けきっても繊維は逃げているため,この剥離が残ることが原因と考えられる.

2-4 工作機械用液体窒素,液化炭酸噴霧システムの開発

CFRP はマトリックス樹脂にエポキシなど熱硬化性樹脂を用いるものの,ガラス転移点を超えると樹脂の軟化が起こり炭素繊維保持力の低下の原因となる。また,熱可塑性樹脂をマトリックス樹脂に用いる CFRTP では,高温環境化での樹脂の軟化は CFRP に比べて激しい。このように,機械加工時の切削熱により加工面精度の低下が予想できる CFRP および CFRTP では,液体窒素や液化炭酸ガスを冷却に用いた強制冷却法によりその切削性能が向上すると考えられる。そこで,工作機械に実用レベルで簡便に設置できる液体窒素および液化炭酸ガス噴霧装置の開発を行った。

図 2-4-1 に液化炭酸ガス噴霧システムの概要を示す.液化炭酸ガスは圧力容器で供給される.液体窒素噴霧システムではサブクーラを用い液体窒素を加冷却状態にしておかないと安定供給が困難であったが、液化炭酸ガスの場合サブクーラは必要なく、単純な構成で安定供給が行える.

次に、冷却性能評価として、図 2-4-2 に示す噴霧ノズルを用意し、工作機械主軸に取り付けたノズルを定速で移動させながら、熱電対を挿入した CFRP に液化炭酸ガスを噴霧し、その冷却温度を測定した。噴霧条件を表 2-4-1 に、また、冷却性能評価の概要を図 2-4-3 に示す。また、比較のために液体窒素噴霧システムの冷却性能も評価した。



図 2-4-1 液化炭酸ガス噴霧システム

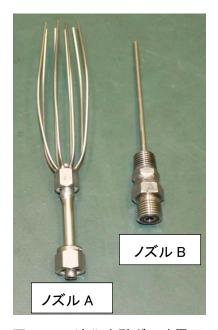


図 2-4-2 液化炭酸ガス噴霧用ノズル

液体窒素および液化炭酸ガス噴霧中は、激しい白煙が上がらず、作業に影響がないことが確認できた。また、噴霧中の酸素濃度も 18%を切ることはなく、作業者への問題はなかった。冷却温度を図 2-4-4 に示す。液体窒素に比べると液化炭酸ガスは冷却性能が低いが、氷点下の値を示している。冷却温度は送り速度の増加に伴い、温度も上昇する。使用した三種のノズルの中では、ノズルA が最も冷却効果が高く、送り速度 100mm/min, 200mm/min においてもほぼ同じ温度を示しており、液化炭酸ガスの冷却限界温度近くまで冷却できていると考えられる。ノズル B では、噴霧流量が最も多いが、冷却性能は低い。これはノズルの径が大きいため、個体のドライアイスが直接ワークピースに噴射され、付着したため気化潜熱による冷却能力が低下したと考えられる。

表 2-4-1 冷却実験条件

冷却対象	CFRP
冷却方法	LN ₂ , LCO ₂
	LCO ₂
	A: 8 本
ノズル	B: 1 本
	LN ₂
	10 本
送り速度	100, 200, 500 mm/min
ノズル高さ	25 mm

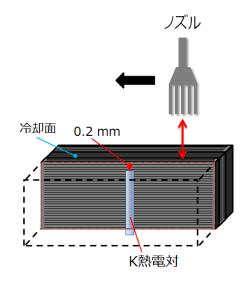


図 2-4-3 冷却実験方法

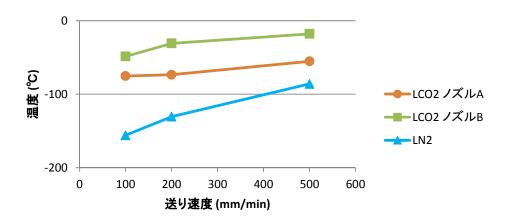


図 2-4-4 冷却温度測定結果

2-5 強制冷却(液体窒素,液化炭酸供給法)を用いた切削加工技術の開発

2-5-1 液体窒素冷却環境化における CFRTP の硬さ試験

CFRTP の加工に強制冷却法を取り入れることで、樹脂の軟化を抑制できることが期待できるが、本効果を実験的に評価することを目的として、強制冷却環境化での CFRTP の押し込み試験を実施し、その弾性率の評価した。

図 2-5-1 に示すように、工作機械のテーブル上に動力計を設置し、その上にワークとして CFRTP を固定する. (b)に示す先端形状の超硬の丸棒(接触部分の直径が 0.8mm)を徐々にワークに近づけていき、一定の力になるまで 1μm ずつ押し込んでいく、今回は Fz=50N を目安とした.

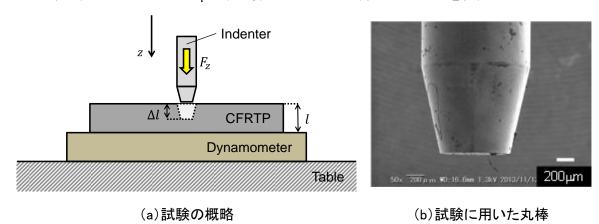


図 2-5-1 冷却硬化確認試験

押し込んだ深さ⊿Iの測定には白色干渉顕微鏡(Zygo)を用いた. ワークの厚みを I, 超硬丸棒とワークの接触面積を A とすると、実験的弾性率は、

$$B = \frac{F_B/A}{\Delta l/l}$$

で計算ができる. 押し込み試験は室温(24°C)と液体窒素を用いた極低温(−196°C)の 2 つの温度下で各 10 回ずつ行った. 押し込み試験の結果より, CFRTP は液体窒素によって冷却されると室温と比較して弾性率が約 10 倍になることがわかった. したがって, CFRTP の加工時に問題となる樹脂の軟化や溶融を防ぐ効果が期待できる.

2-5-2 強制冷却法を用いた CFRTP の切削加工

2-5-1 項より強制冷却法を用いることで、CFRTP の軟化を抑制する効果があることが確認できたことより、機械加工時の切削熱によるマトリックス樹脂の軟化を抑制できると考えられる。そこで、エンドミルを用いた側面切削について、4種の冷却条件(乾式加工、湿式加工、液体窒素、液化炭酸ガス)における切削抵抗、工具摩耗および加工面性状について評価した。被削材はクロス材の CFRTP を用い、表 2-5-1 に示す加工条件にて、エンドミル側面切削実験を行った。

液体窒素および液化炭酸ガスを用いた切削では、白煙が発生したが、被削材を目視により容易に確認でき、作業性への悪影響は少ないと考えられる.

乾式、湿式、液化炭酸ガス、液体窒素のそれぞれの冷却方法でCFRTP 加工後のバリ発生は、

乾式加工および湿式加工で顕著に現れたが、液化炭酸ガスおよび液体窒素を用いた極低温加工では、大幅に小さくなった。しかしながら、バリ取り工程が必要な程度である。液体窒素を用いた場合のバリは、最も小さいが、上面にデラミネーションが認められた。デラミネーションの発生個所は、繊維方向が工具送り方向と垂直な方向であり、正のねじれ角を持つエンドミルによりワークピースを上方へ引き上げる力が発生し、冷却により被削材の硬脆化のために発生したと考えられる。

図 2-5-2 に乾式, 湿式, 液化炭酸ガスおよび液体窒素のそれぞれの冷却方法での電子顕微鏡により観察した CFRTP の加工面性状を示す. 乾式加工では, マトリクス樹脂が溶融した痕跡が見られる. また, 分断された炭素繊維が付着し埋没している. 乾式以外の冷却方法では, マトリクス樹脂の溶融した痕跡が見られず, 表面性状は良好である. しかしながら, 湿式, 液化炭酸ガス, 液体窒素の三種類の冷却方法による明確な差異は見られない.

表2010/// —217// B田切出加工术门		
被削材	CFRTP (クロス材, t=3.0×50 mm)	
工具	超硬エンドミル (φ6.0m, 2枚刃, コーティングなし)	
切削速度	200 m/min	
一刃あたりの送り	0.02 mm/tooth	
切込み量	径方向:1.0 mm, 軸方向: 3.0mm	
切削方向	ダウンカット	
冷却条件	乾式, 湿式, 液化炭酸ガス, 液体窒素	

表 2-5-1 CFRTP エンドミル側面切削加工条件

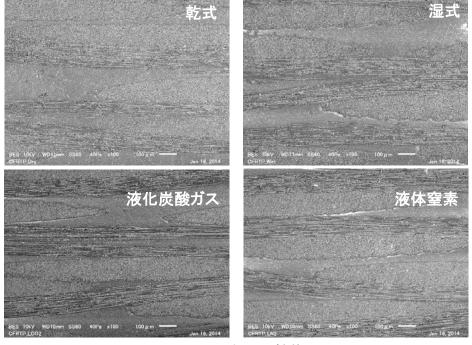


図 2-5-2 加工面性状

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

本研究開発事業における成果について、サブテーマ毎に以下に示す、

①CFRP および CFRTP の加工条件および積層構造に対するデータベース化

CFRP および CFRP の機械加工(切削加工,研削加工)について,その加工特性を被削材種類,工具,加工条件,加工温度など幅広い条件の下で評価し、その加工事例をキーワード検索で簡便に検索できるデータベースを作成した.

②CFRP 加工専用 CAM の開発

加工特性のデータベース化より、炭素繊維の方向や積層構造および加工条件により、工具摩耗を抑制すると共に加工面性状を向上させる最適加工条件および加工パスが存在することが明らかとなった。この知見を基に、穴あけ加工およびポケット加工を行う CFRP 加工専用 CAM を開発した。

③CFRP および CFRTP の超音波振動アシスト加工技術の開発

超音波領域で軸方向に振動する超音波振動切削装置および加工近傍を超音波洗浄雰囲気とする超音波キャビテーション付与装置の開発した. 本装置を用いた CFRP および CFRTP の穴あけ加工では切削抵抗の低減効果が得られ, 穴出口部のデラミネーションを抑制することが確認できた.

④工作機械用液体窒素,液化炭酸噴霧システムの開発

工作機械に簡便に設置できる液体窒素および液化炭酸ガス噴霧装置の開発を行った.

⑤強制冷却(液体窒素,液化炭酸供給法)を用いた切削加工技術の開発

熱により軟化する CFRP および CFRTP に用いられるマトリックス樹脂は、液体窒素や液化炭酸ガスを用いた極低温環境化で硬化することが確認できた。液体窒素および液化炭酸ガス噴霧装置を用いた CFRTP の切削加工では、切削熱によるマトリックス樹脂の軟化を抑制し、バリの抑制や加工面品位の向上効果が得られた。

3-2 今後の課題

本研究開発期間において極めて多くの加工事例について取組んだが、CFRP および CFRTP の加工すべてを網羅したわけではない. 例えば、CFRP の切断加工や 3 次元形状加工など、また、素材に関しては 2~3mm 程度の短繊維素材を用いた CFRTP などについては取組んでいない. さらに、CFRTP については、マトリックス樹脂の種類や成形方法などが十分に確立しておらず、本素材を用いた産業部品の量産化にはもう少し時間を有するのではないかと想定している. 今後も継続的に加工特性の評価を実施すると共に得られた成果をデータベースに追加していく計画である.

また、液化炭酸ガス噴霧装置では、目標としているランニングコストを達成できていない。今後 主流となる CFRTP が確立していない現状では、素材の特定が難しく冷却方法の最適値を見出 せていない。今後、いかなる素材に対しても十分な冷却性能を発揮できるよう、追跡研究により ノズル形状の再検討を実施すると共に同装置の低コスト化を図っていく。

3-3 事業化計画

事業最終年度である平成 25 年度には、本研究開発で得られた成果をパネル化しサンプル品と共に掲示し、新規市場および顧客獲得に向け写真 3-3-1 に示す展示会や講演会等の営業活動を積極的に実施している。この中で、CFRTP の加工に関する案件も見え始め、研究開発成果を活用する予定である。

今後も、展示会等へ積極的に参加することで事業拡大を図る所存である.

- 〇展示会への出展状況
- 1) 新機能性材料展 2014 2014 年 1 月 29 日~31 日, 東京ビックサイト
- 2) 中部ものづくり基盤技術展2014年2月18,19日,名古屋中小企業振興館
- 〇対外発表の状況
- 1) 炭素繊維複合材料(CFRP)講演会 2014年2月28日, 香川県産業技術センター 「市場展開を見据えた炭素繊維複合材料(CFRP)の製造と製品事例」

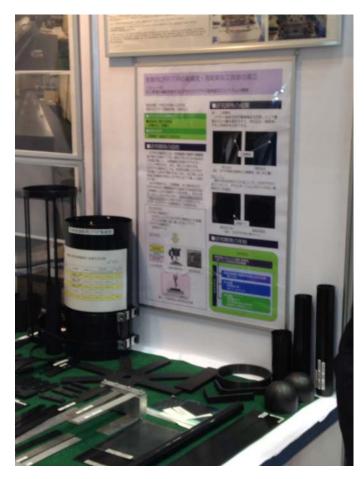


写真 3-3-1 展示会出展状況(於:新機能性材料展 2014)