

平成 22 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「難切削材料（炭素繊維）に対応した切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書
(概要版)

平成 23 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人三重県産業支援センター

目 次

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

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1－3 実施計画

1－4 成果の概要

1－4 当該プロジェクトの連絡窓口

第 2 章 加工技術について（加工損傷への対応）

第 3 章 精度向上について（加工精度維持への対応）

第 4 章 加工後の CFRP の分析・評価について（加工損傷への対応）

第 5 章 刃形、すくい角等の切削状況について（加工の高能率化及び工具等の高寿命化）

第 6 章 ウォータージェット加工機に付加される制御装置等の検討

第 7 章 工作機械の精度について

第 8 章 まとめ

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) 研究開発の背景

世界の航空機産業は中国、東南アジアの経済発展等による需要増大により、引き続き高水準の受注が予想されている。また、航空機産業は、広範な技術波及効果、知識集約性が高く裾野が広いという技術的特性を有し、最先端の技術をシステム統合するハイテク産業であるが、一方においては、安全性を確保し、かつ省エネ・低コスト化も求められていることから常に軽量化、高強度先進部材の導入が進められている。軽量化の対策としては、航空機の構造材種がアルミ合金から CFRP に切り替わるという動きが急速に高まっている。しかし、CFRP の加工においては繊維の方向性によるねじれ、めくれ、むしれ、更には高強度のために、ひび、割れ、欠けの問題が発生するなどの切削加工がきわめて困難な材料であることから、高精度な加工技術の確立が求められている。

(2) 研究の目的

航空機産業では燃費向上を図るために軽量化が求められており、その対応として炭素繊維強化熱硬化性プラスチックの採用が行われているが、これにかかる切削加工に関しては、加工時に生ずるバリ・剥離等の加工損傷に対する技術が確立していないのが現状である。本研究開発では、加工損傷を防止するとともに高精度、高能率、低コストな加工を目指し、ウォータージェット方式と工具切削を併用した複合切削技術を確立するものである。

(3) 研究の概要

航空機部材である CFRP は難切削材料であり、例えば穴径 $\phi 20\text{mm}$ 、厚さ 25mm の穴加工を行った場合、超硬ドリルでは $120\text{min}/1$ 穴程度を要する。また 3 穴程度切削でドリルの切削能力が大幅に低下するなど、能率面、寿命等に大きな問題がある。そこで本研究では、切削能力において著しく改善可能な超高压ウォータージェットによる粗加工に加えて、仕上げ用ダイヤモンドドリルによる複合加工を一体化制御で行うことにより、高効率・高精度加工技術の確立を目指す。本手法の確立により、前出加工例(条件)において $5\text{min}/1$ 穴の高効率加工と加工精度の維持が期待できる。なお本加工技術を確立するためには、加工品質の確保(バリ・剥離等の防止)、精度の維持向上(加工面等の面粗度の向上等)、加工能率の向上(適正工具の選定及び工具の高寿命化等)が挙げられる。

これまでに水圧・砥粒量に対する剥離性状の観察及び人工ダイヤモンドを電着

した工具による切断面の仕上げ加工について検討し、課題の抽出を行った。

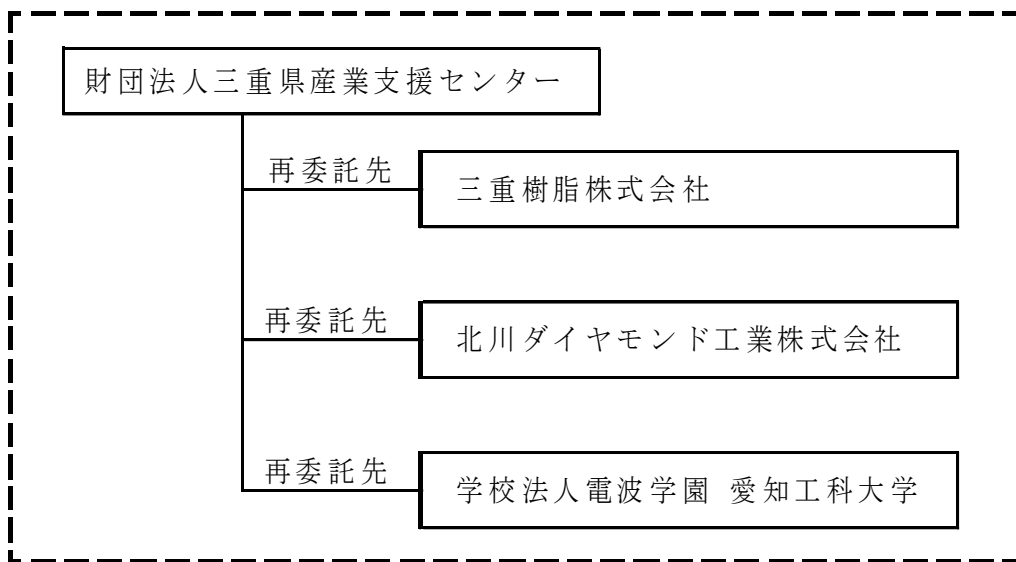
本年度は、昨年度の結果を踏まえて、切断開始時および切断継続時の最適投入水圧と砥粒およびCFRP板の厚さの関係をさらに詳細に調べるとともに、仕上げ加工用のダイヤモンド工具の形状および使用するダイヤモンドの粒度の変化とが仕上げ面性状にどのような影響を与えるかについて調べる。

- 1) ウォータージェットによる加工技術について（加工損傷への対応）
- 2) 精度の向上について（加工精度維持への対応）
- 3) 加工後のCFRPの分析評価について
- 4) 刃形、すくい角等の切削状況について
- 5) ウォータージェット加工機に付加される制御装置の検討
- 6) 工作機械の精度について

1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

【研究組織及び管理体制】

（1）研究組織（全体）



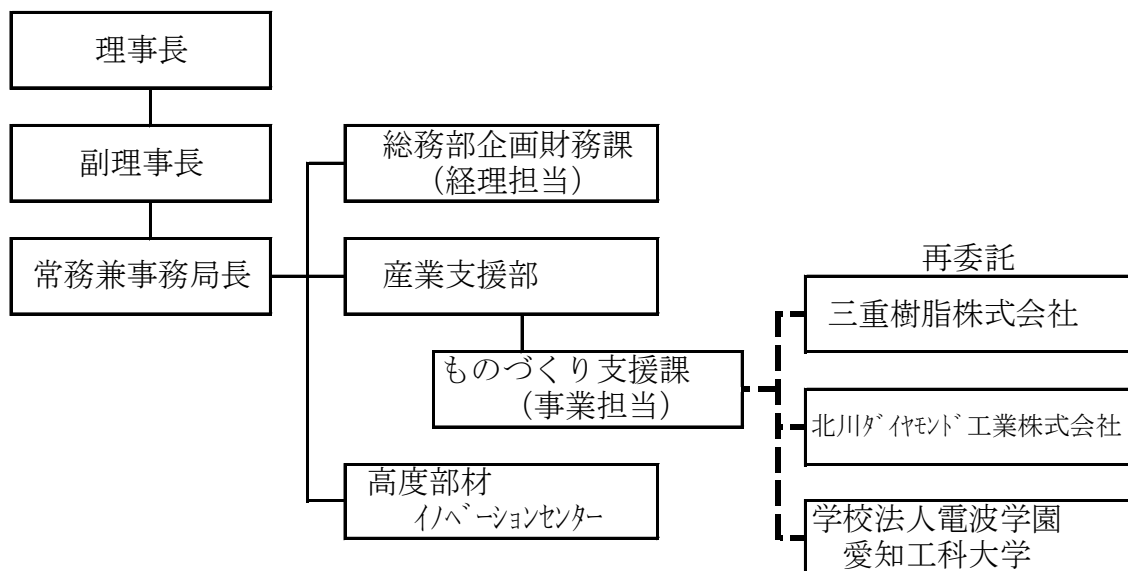
総括研究代表者（P L）
三重樹脂株式会社
代表取締役 打田 昌昭

副総括研究代表者（S L）
学校法人電波学園
愛知工科大学
工学部教授 井上 久弘

(2) 管理体制

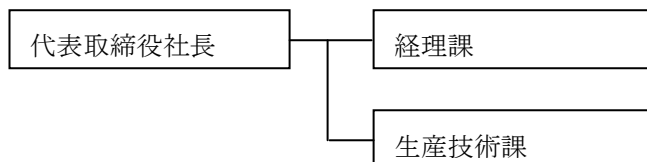
①事業管理者

財団法人三重県産業支援センター

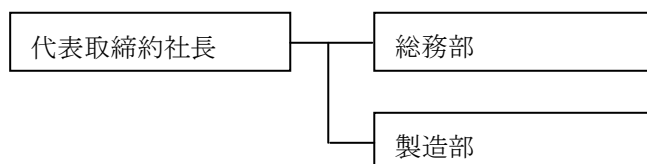


② (再委託先)

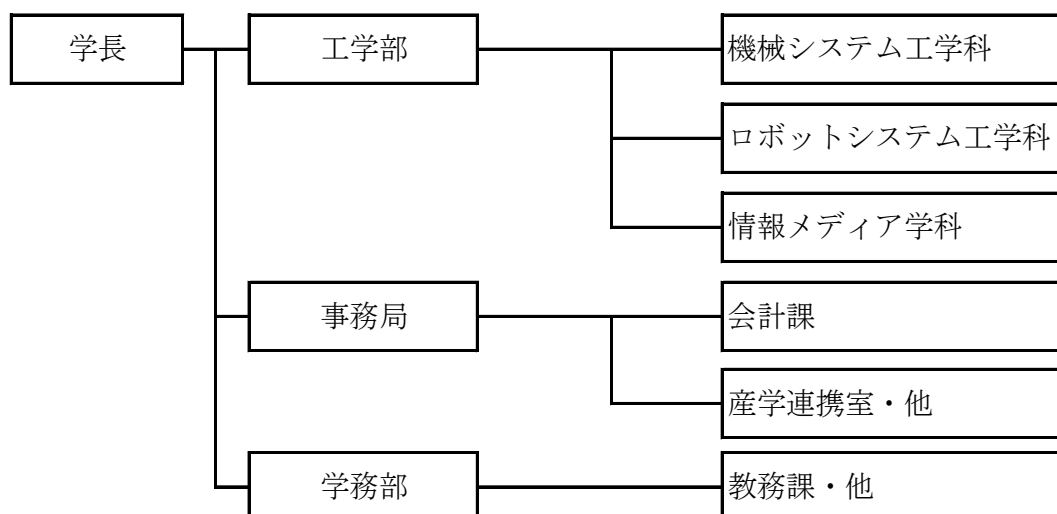
三重樹脂株式会社



北川ダイヤモンド工業株式会社



学校法人電波学園 愛知工科大学



(2) 管理員及び研究員

①管理員

【事業管理者】 財団法人三重県産業支援センター

氏 名	所属・役職
片山 良夫	常務理事兼事務局長
大森 将生	総務部企画財務課
井上 哲志	産業支援部ものづくり支援課長
湯浅 幸久	産業支援部ものづくり支援課ものづくりグループリーダー
樋尾 勝也	産業支援部ものづくり支援課ものづくりグループ
濱條 勉	産業支援部ものづくり支援課ものづくりグループ
三島 享郎	産業支援部ものづくり支援課ものづくりグループ
廣田 尚史	産業支援部ものづくり支援課ものづくりグループ

②研究員

【再委託先】

三重樹脂株式会社

氏 名	所属・役職
打田 昌昭	代表取締役社長兼主任研究員
岡田 尚則	副主任研究員
打田 和馬	研究員
馬場 洋征	研究員

北川ダイヤモンド工業株式会社

氏 名	所属・役職
北川 正樹	代表取締役社長
安達 忠雄	製造部長

学校法人電波学園 愛知工科大学

氏 名	所属・役職
井上 久弘	工学部ロボットシステム工学科教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人三重県産業支援センター

(経理担当者) 総務部企画財務課 主幹 大森 将生
(業務管理者) 常務理事兼事務局長 片山 良夫

(再委託先)

三重樹脂株式会社

(経理担当者) 経理課担当 打田 弘子
(業務管理者) 代表取締役社長 打田 昌昭

北川ダイヤモンド工業株式会社

(経理担当者) 総務部経理主任 岸 伸子
(業務管理者) 代表取締役社長 北川 正樹

学校法人電波学園 愛知工科大学

(経理担当者) 会計課課長 坂倉 洋治
(業務管理者) ロボットシステム工学科
学科長 大西 正敏

1－3 成果の概要

CFRP 切削加工にウォータージェットを用いた場合の剥離低減条件の再実験および寸法精度・面粗度等の最適化を図るため、装置が持つ種々のプログラムと水圧・砥粒の量、切断即と等の関係を調べた。結果から最適な条件を見出すことができた。また超音波探傷装置による測定ではフォーカス型プローブによる測定を適していることが分かり、微細な欠陥の観察には不向きであるが、剥離のような面的欠陥は把握することができる可能性を得ることができた。

またドリル取付部の剛性についても、ブラケットの剛性をアップすることにより対策ができ、目標の精度も確保が出来た。

この結果、当初の目的、目標はクリアできたと判断します。

また CFRP 試験片切断部の内部損傷観察結果についても問題点が明らかとなり、さらなる観察方法の検討が必要と考えます。

1－4 当該プロジェクトの連絡窓口

(研究実施者)

研究実施者 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先
三重樹脂株式会社	代表取締役 打田 昌昭	① 〒513-0818 三重県鈴鹿市安塚町 1516 ② 代表取締役 打田 昌昭 ③ Tel :059-383-5028
北川ダイヤモンド 工業株式会社	代表取締役 北川 正樹	① 〒460-0013 名古屋市中区上前津 1-6-1 ② 代表取締役 北川 正樹 ③ Tel :052-331-1021
学校法人電波学園 愛知工科大学	学長 内田 高峯	① 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 ② 工学部ロボットシステム工学科 教授 井上 久弘 ③ Tel :0533-68-1135

(アドバイザー)

機関名又は氏名	所在地又は住所	① 代表者役職・氏名 ② 連絡先担当者 ③ 電話番号
三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所	〒455-0024 名古屋市港区大江町 10	① 執行役員 名古屋航空宇宙システム製作所長 山田 陽二 ② 大江西工作部主翼コンポジット課 工務係長 武藤 豊 ③ Tel :052-611-2716
三菱レイヨン株式会社豊橋技術研究所複合材料開発センター	〒440-8601 愛知県豊橋市牛川通 4-1-2	① 所長 青木邦廣 ② 主任研究員 佐野 智雄 ③ Tel :0532-64-2247
社団法人中部航空宇宙技術センター	〒460-0008 名古屋市中区栄二丁目 9-26	① 会長 川口 文夫 ② 専務理事 近藤 靖彦 ③ Tel :052-221-6681
株式会社フロッジャパン	〒465-0025 名古屋市名東区上社 4-129	① 代表取締役社長 小野 宏康 ② テクニカルサービスマネージャー 馬場 保生 ③ Tel :052-701-7021
旭ダイヤモンド工業株式会社三重工場	〒518-0131 三重県伊賀市ゆめが丘 7-8-1	① 専務取締役・生産技術本部長兼三重工場長 安本 劭 ② 生産技術部 副部長 竹内 友幸 ③ Tel :0595-26-7330
鈴鹿商工会議所	〒513-0802 三重県鈴鹿市飯野寺 816	① 会頭 大泉 源之 ② 常務理事 明石 孝利 ③ Tel :059-382-3222
鈴鹿市産業振興部 産業政策課 ものづくり動く支援室	〒513-0801 三重県鈴鹿市神戸 1-18-18	① 室長 森 英也 ② アドバイザー 長峰 隆 ③ Tel :052-382-7011

第2章 加工技術について（加工損傷への対応）

2-1 加工技術について

概要：ドリルユニットのブラケットの剛性を上げ、振動計により共振点の測定を実施し共振の発生が少ないことが確認出来た。

AWJ（バキュームアシスト）の場合、ガーネット供給時にチューブ内に目詰まりが不特定に発生し、素材表面ないし下面に剥離が生じる。

そのため、初期穿孔をAWJ（バキュームアシスト）で行う以外に、小径ドリルで行う方法について検討する。

研究目標：研究課題である $\phi 20$ をAWJで60穴あける為の下孔である。剥離が生じて、 $\phi 20$ の中であれば、問題はない。

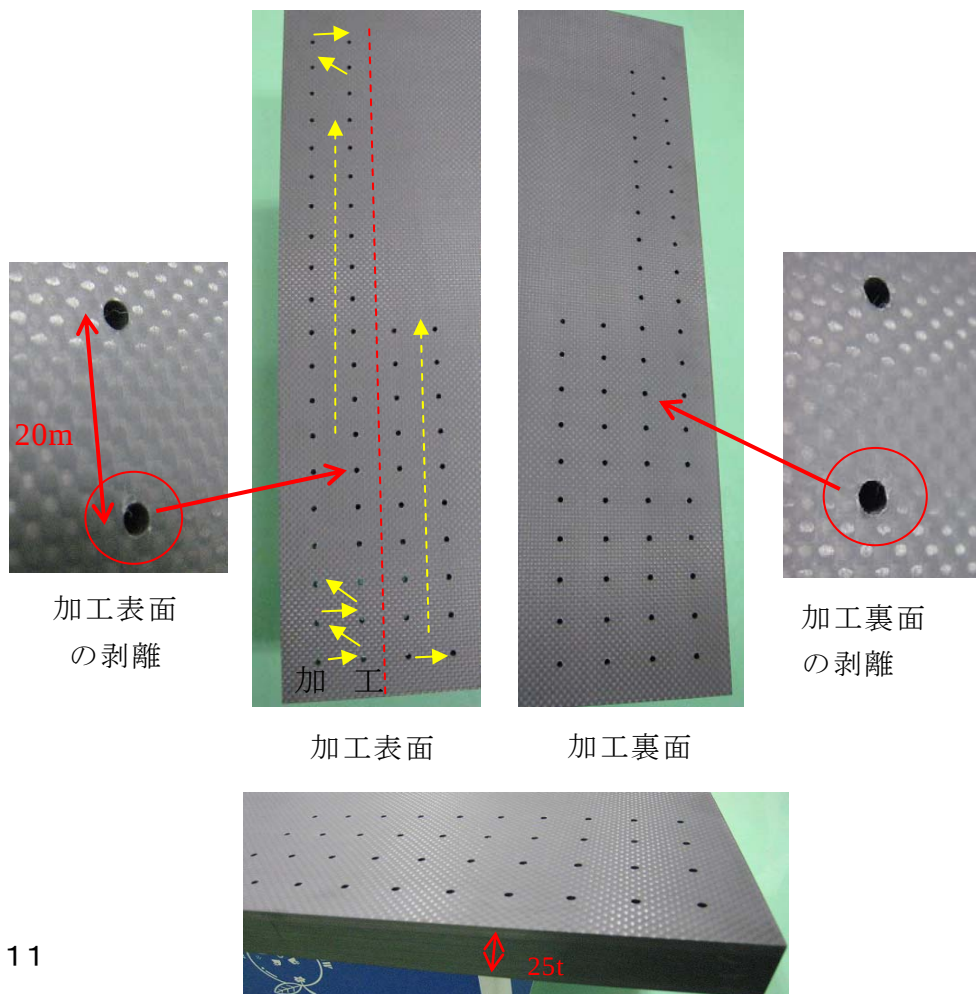
使用した道具と材料及び条件

道具：ドリルユニットシステム

材料：CFRP 板厚 25mm ダイヤ一体焼結「ビームドリル」 $\phi 3$

条件：ステップ 10 回（切り込み量 2.5mm） 回転数 6000 r p m 切削速度 20mm/min

加工手順：ドリルユニットシステムを使用し、材料をクランプで固定し、上記の条件で湿式（水）加工を行う。



考察：1本のドリルで60穴加工する事が出来た。下孔1ヶ所の加工時間は、2分30秒であった。加工上下面に小さな剥離が見られるが、 $\phi 20$ をあける下孔であるので問題はない。

研究目標である60穴は、達成出来たが、加工時間については、AWJ、ダイヤモンド工具による仕上げの加工時間を考慮して検討する必要がある。

第3章 精度向上について（加工精度維持への対応）

概要：アブレイシブウォータージェット方式による加工では、ワーク対象物の硬度や複合状態、及び水圧等の加工条件により、切断面に歪み（下部での波模様の揺れなど）が生じるおそれがある。

その切断面の歪みをドリルユニットシステム（ダイヤモンド工具）を使用し、面粗度及び加工精度の目標値を確保しなければならない。

ここでは、加工能率を上げ、加工コストを抑えた切削条件を検討する。

ランニングコストがかかるガーネット量を減らし、ポンプのシール寿命を短くする最高圧(600Mpa=87000psi)を抑え、AWJの最適条件を検討する。

研究目標：AWJ 切削加工は、精度維持のためドリルユニットシステムで加工する前加工である。そのため、最適条件を考慮し、 $\phi 20$ に対し上面と下面が $\phi 19.9 \sim \phi 19.8$ ($-0.1 \sim -0.2$) に入るように加工する。

使用した道具と材料及び条件：

道具：アブレイシブウォータージェット（AWJ）

材料：CFRP 板厚 25mm

条件：圧力 ①414Mpa (60000psi) ②311Mpa (45000psi)

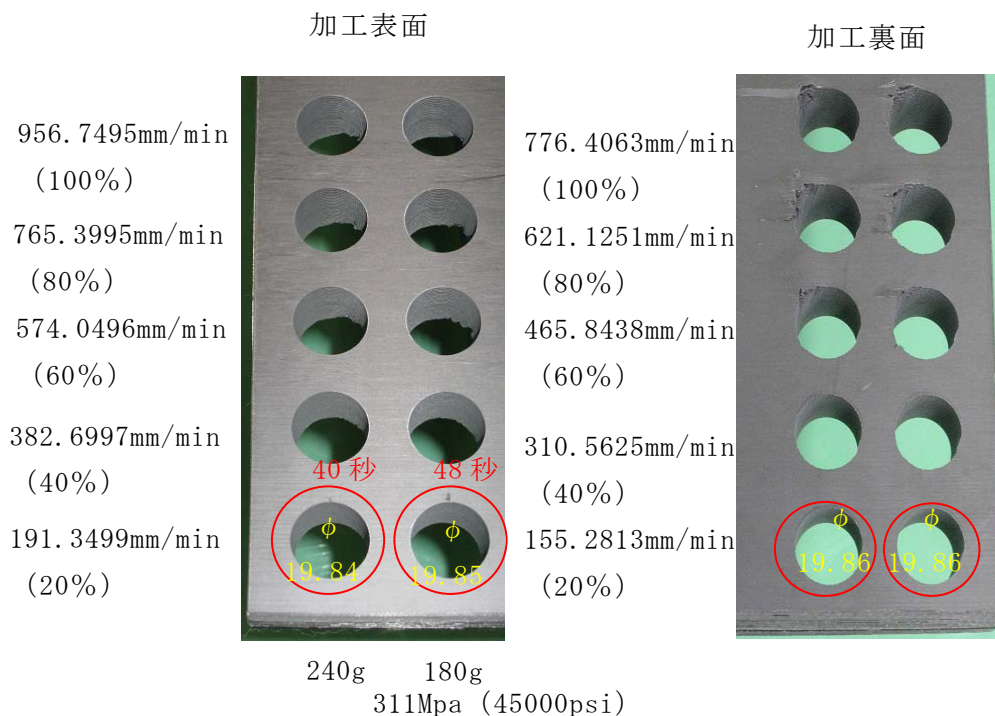
ガーネット ①240 g ②180 g

AWJ 角度補正プログラム：切削性 31.00-カーボングラファイト

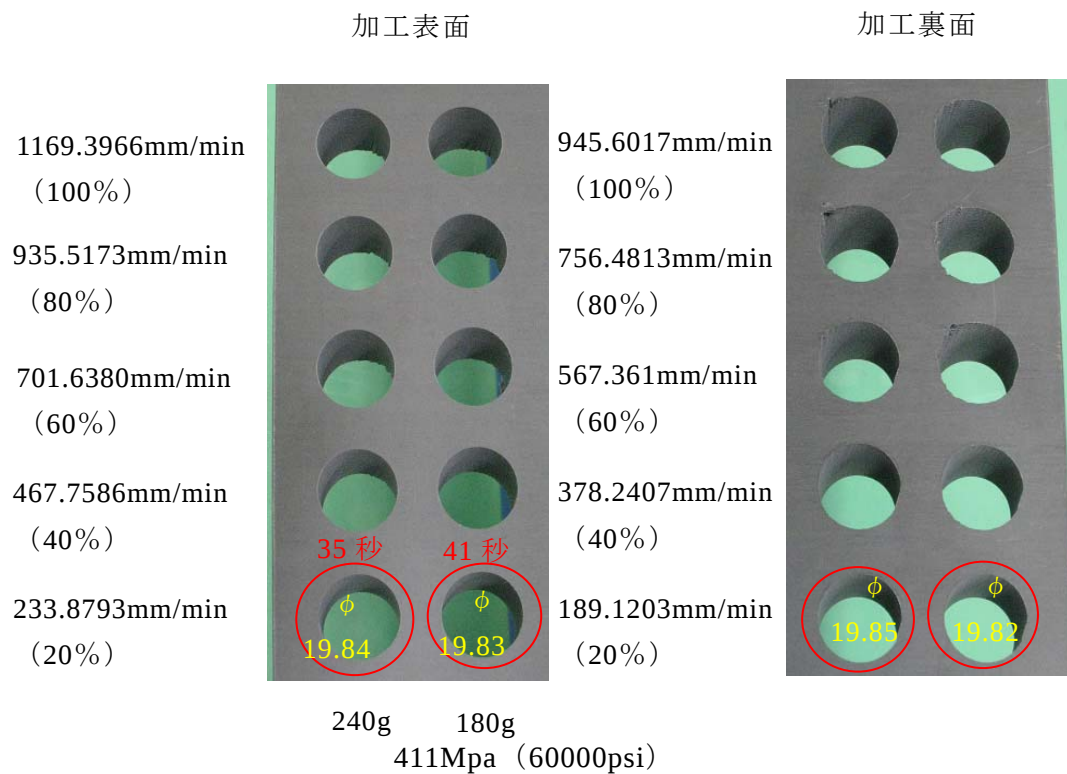
切削速度 20% 40% 60% 80% 100%

加工手順：①AWJ（バキュームアシスト）を使用し、下孔をあける。

②上記の条件で、AWJ 角度補正プログラムを使用し切削加工する。



考察：圧力 311 (45000psi) の場合、240 g、180 g とともに AWJ 切削速度が 40% 以上になると、加工裏面に剥離、損傷が激しく、前加工には適さない。切削速度 20% の場合は、剥離、損傷なく、精度も目標値をクリアした。ガーネット量 240 g の方が、180 g よりも 8 秒速く切削する事ができた。



考察：圧力 411 (60000psi) の場合も、AWJ の切削速度が 40% 以上になると剥離が発生する。311Mpa 同様、切削速度 20% の時、剥離、損傷なく、精度も目標値をクリアした。加工時間は、240 g が 35 秒、180 g が 41 秒で、6 秒 240 g の方が速く切削できた。AWJ 加工最適値は、411Mpa (60000psi)、ガーネット 240 g、切削速度 233.8793mm/min) である。

第 4 章 CFRP 材の切断部付近に発生する損傷の有無についての評価方法

アブレイシブ・ウォータージェットによって切断された CFRP 材の切断端部付近に発生する可能性のある層間剥離について超音波探傷技術を用いて観察した結果、剥離の存在を確認することができた。一方で、その大きさや正確な位置の特定については、切断面特有の複雑な音波の反射などにより改善すべき新たな課題として明らかとなった。

4-1. 観察装置の選定

オートクレーブ成形によって積層された CFRP 材は黒色を呈し、その内部の損傷を光学的な方法で観察することは困難な材料である。CFRP 材の内部に存在する層間剥離などの損傷を非破壊的な方法で観察する方法としては現在、超音波振動波の反射を捕える方法としての超音波探傷試験法しか考えられない。

このような観点から超音波探傷器を切断加工面の品質評価判定装置として購入しました。超音波振動子に関しましては測定精度を向上させるために 6 種類の周波数の異なる振動子を購入しました。これは超音波振動の周波数が大きくなるほど損傷の検出能力が向上するためです。ただ、周波数が大きくなると試料内部での損失も大きく測定できる深さが浅くなります。超音波探傷器としては水中で行う超音波探傷器と空中で行う超音波探傷器とがありますがこれまで広く使用されている水中に試料を設置する超音波探傷器を選択しました。

今回購入しました超音波探傷映像化装置の全体図を写真 1 に各パーツの詳細を写真 2 から写真 4 に示します。



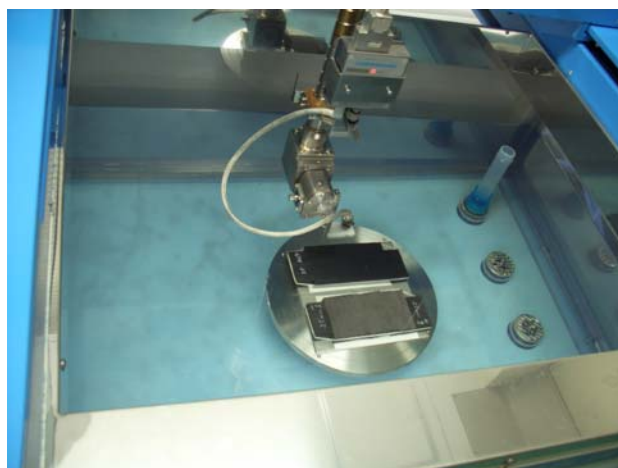
写真 1 超音波探傷映像化装置
日本クラウトクレマ株式会社製
(SDS-Win 6500R)



写真 2 超音波探傷器操作盤



写真 3 超音波探傷子と探傷用水槽



写

写真 4 測定中の試料(FRP 材)と探傷子

超音波探傷子 (6 種類) の内訳 :

5MHz NF

5MHz 0.8inch F

2.25MHz 0.5inchF

3.5MHz 0.7inchF

10MHz 1inchF

15MHz 2inchF

4-2. 測定方法

超音波探傷器は観察する試料を水中に保持し、試料表面に超音波の振動波を水中で当てて、試料内部に存在する異物又は亀裂面からの反射波を捕えることによって、内部に異物又は亀裂が存在することを把握するものです。この亀裂の判定は試料底面からの反射波との差で判定します。

亀裂が存在する場合、亀裂面が試料表面に平行した状態で存在する場合は容易に見つけることが出来ますが、試料表面に垂直に存在する幅の狭い亀裂の場合は捕えることが困難です。この場合は超音波振動波を斜めから当てて亀裂からの反射波を幾何学的に捕える方法が提案されていますが大きな亀裂の場合は可能ですが小さな亀裂の場合は困難とされています。

今回測定する CFRP 材は試料表面に対して平行に炭素繊維が積層された試料ですので、切断面に発生する可能性のある亀裂としては試料表面に平行な層間剥離と考えられます。このため一般に測定されておりますように試料表面に超音波振動波を当ててその反射波を捕えれば用意に切断面の剥離が観察されると思われました。ただ、現在の超音波探傷器の測定能力はmmオーダーと考えられておりますので精密測定としての μm オーダーの測定は無理と考えられます。

4－3．試料端部の測定結果と問題点その（1）

一般に行われている方法でアブレイシブ・ウォータージェットで切断加工した CFRP 材の試験片を観察した結果を写真 5 に示します。

この試料は厚さ 20mm、幅 30mm、長さ 60mm の試料で試料端部にカッターナイフの先端を試料平面に平行に厚み方向の深さを変えて食い込ませた傷をつけたものです。

画像の右側に見える赤い部分が今回カッターナイフによってつけた損傷です。

画像の中心部分(約 9 割程度)は試料中の繊維状態も観察されますが、試料周辺部は青色のぼやけた状態になっております。この青色のぼやけた中に赤色の損傷が存在します。本来、この赤色の損傷部分は試料端部に接していなければならないのですが画像側面に接してはいません。

この画像は超音波振動波を発生させる振動子の周波数を変化させても試料境界面付近ではぼやけた画像となります。この結果、このままの方法で観察する限り、試料端から離れた試料内部の損傷の観察としては最適かもしれませんが、今回の目的である切断端部付近の損傷の観察に関してはその存在を確認することは可能であるが、正確な大きさや形状を特定するためには適していないように思われました。今後この試料外周部のぼやけた部分をゴーストと呼ぶことにします。試料の外周部を正確に把握するためにはゴーストを抑制することが必要であり、以下、それについて検討した内容を示します。

4－4．問題点の解消方法の検討

写真 5 に見られる試料周りのゴースト画像について検討するために超音波探傷測定方法と光学的な測定方法との違いを考えてみることにしました。

光学的な画像測定方法：光学レンズを使用して観察部分からの画像を画面上に集光させることによって観察物の各位置における正確な画像を捉えることができます。このため得られる画像は使用する光学レンズの倍率に相当する鮮明な画像が得られます。さらに測定精度としては μm 以上の精度での測定も可能です。

超音波探傷測定法：超音波探傷子から発生した超音波振動波を試料に当て、試料表面、試料底面、試料内部の異物又は亀裂面からの反射波を同じ超音波振動子の端子表面で捉え、その反射振動エネルギーの大小で傷が存在するかどうかを判断します。このため超音波振動子の端子端面の大きさに依

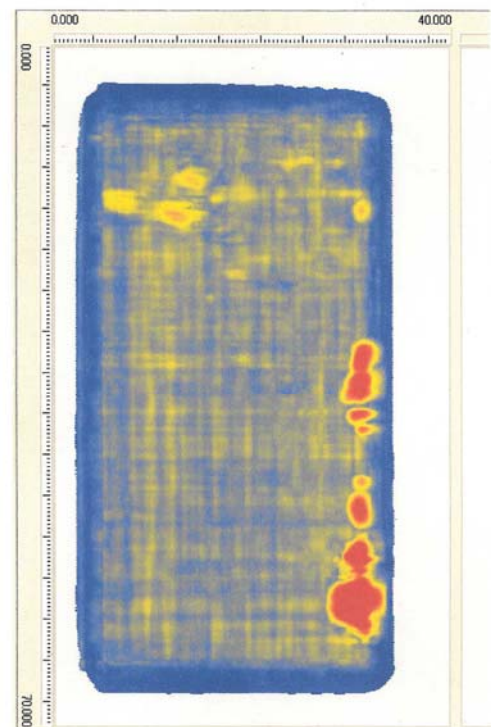


写真 5. 単独試料の超音波画像

存して反射振動エネルギーが捉えられるため、光学的な方法のように焦点を絞ることが出来ません。ただ超音波振動子にはフォーカス型とノンフォーカス型とがあり、フォーカス型の場合は超音波振動子の発生する超音波振動波をある焦点距離の位置に集中させることが出来ます。これによって材料内部に存在する損傷部分に超音波振動を集中させて照射させることが出来ます。この結果、損傷部からの反射超音波振動の振動エネルギーを増加させることが出来ます。しかし反射波の捕え方は超音波振動子の端面で捕えたすべての振動エネルギーの合計として反応するため、光学的な方法のように試料端部における鮮明な画像を得ることが困難です。

以上のことより、まず、試料表面に対して垂直的な傷がある場合、どの程度まで判定できるかの実験を行いました。これ用の試料としては厚さ 10mm の CFRP 積層板をアブレイシブ・ウォータージェットで切断加工した試料を用いました。その切断幅は約 1 mm 程度です。

光学的な方法で撮影した画像を写真 6 に示します。この試料は切削速度を変えて幅約 10mm の試料を切削速度を変化させて切断したものです。

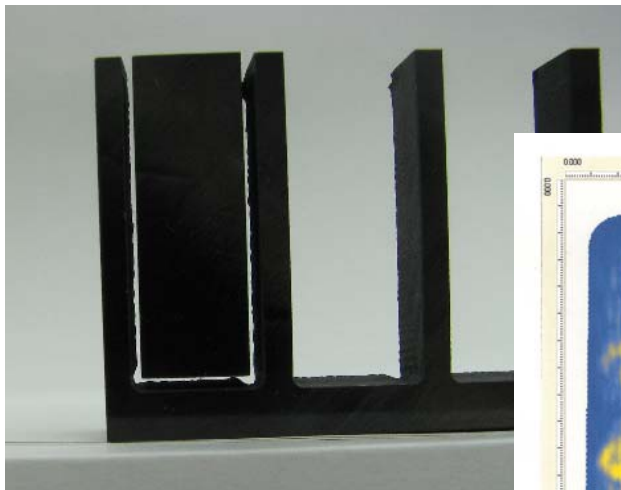


写真 6. 光学的に見た切断された

CFRP 試料

左端の試料はたまたま今回の切削速度で完全に切断されずに写真の右上の部分少し切れ残ったため分離されていないものです。

18

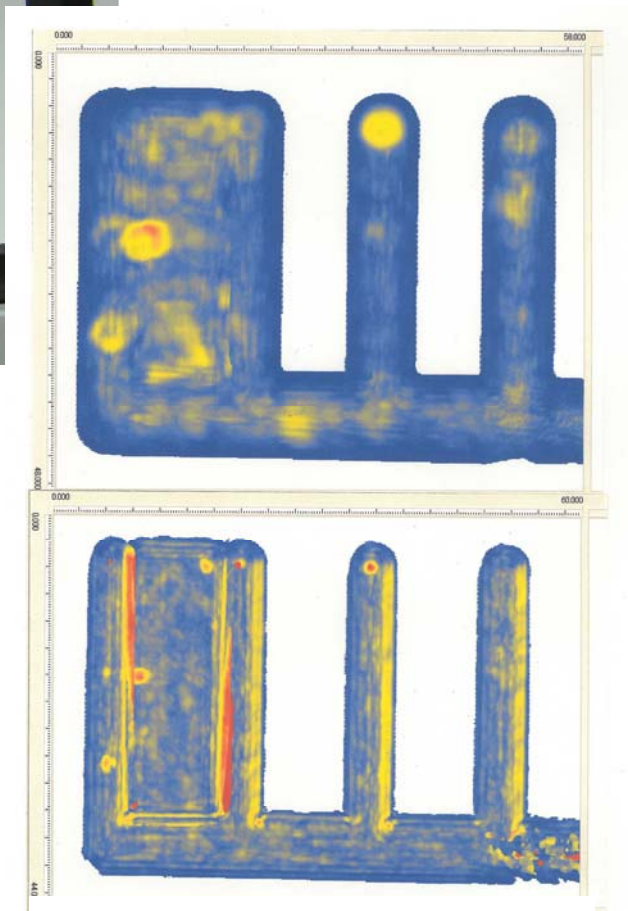


写真 7. 写真 2 の試料の超音波探傷画像（振動子周波数は 5MHz）

上段：ノンフォーカス

下段：0.25 インチフォーカス

写真 5 の試料の超音波探傷器によって捕らえた画像を写真 7 に示します。

写真 7 の上段の画像はノンフォーカス型の超音波振動子を用いて観察したものです。この場合、幅約 1mm の溝を判別することが出来ませんでした。

下段の画像は同じ周波数で 0.25 インチフォーカス型の超音波振動子で観察したもので、この場合は溝らしきものがあることが判別できました。この画像で溝の部分が赤く損傷があるように見られますがこれは超音波振動波の切断面からの反射が加わって生じたものと考えられます。

写真 7 下段の超音波画像において、切断溝の両側に相当する部分の画像を観察してみると、溝の回りの試料部分の画像は稍鮮明な画像が得られています。

以上のことより超音波探傷による観察においては試料表面に対して垂直な狭い亀裂が観察されにくいことが確認されました。

以上のことより、超音波探傷観察において試料表面に対して垂直方向の傷はほとんど観察されないという欠点を今回の新しい観察方法に応用することにしました。

4-5. 新しい観察方法の提案

ここで考えた方法とは試料表面に対して垂直な細い溝は超音波探傷法では判別し難いという点を利用するのである。すなわち溝幅が小さければ小さいほど判別することが困難であることです。このことより非常に小さな隙間を持った試料においてはこの隙間が判別されないということです。

(1) 同じ材質で同じ厚さの CFRP 材を接触させた場合

これは 2 枚の試料を接触させることによって両試料間の溝幅を小さくしたことになる。この場合に片方の試料の切断面にはカッターナイフの先端を打ち込むという方法で試料表面に平行な傷をつけておく。その後、超音波探傷法による両試料全体の超音波画像を捕らえることである。この画像を写真 8 に示す。

写真 8 の画像より二つの合わさった試料全体の画像は合わさった部分においても鮮明な画像を呈し、その接触面付近の画像には明確かつ異なった画像が観察されることが分かった。すなわち、両試料の外側の状態は写真 1 と同じであるが、両試料の合わさった面だけに注目すると画像の違いから両者の境界を判読することは可能である。

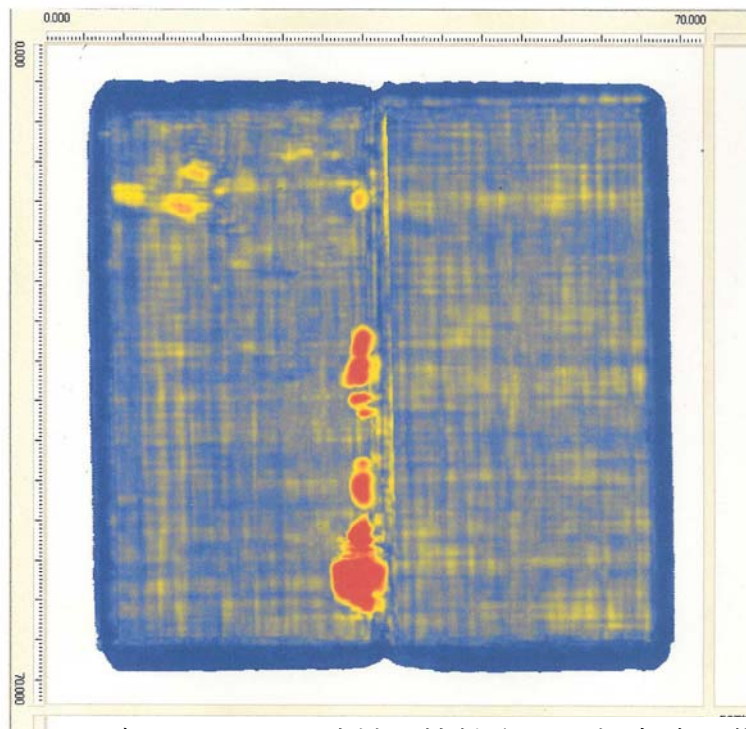


写真 8. 2 つの試料を接触させた超音波画像

また、傷をつけた試料の傷も明確に捉えることができた。しかし赤く見える内部損傷の形状は写真 4 と写真 8 とではほとんど変わらない。ここでは内部損傷については後で触れることにする。

これは、同じ材質（CFRP）、同じ厚さ(20mm)の試料を接触させた状態で観察した結果、超音波干渉のための初期設定が両試料とも同じになったからである。すなわち、超音波探傷を行うための設定条件として決めなければならない事項は、①測定する試料の弾性率などから決まる試料内を伝播する超音波の伝播速度(今回の CFRP 材の音速は 2860m/s と設定して測定)、②試料表面および試料底面からの反射波の確認の両事項が同じ試料を使用したので得られた超音波画像に相違が表れなく、両試料とも同じ精度の超音波画像が得られた。

（２）同じ材質、形状の試料を 3 枚接触させた場合

次に試料内に発生した内部損傷の大きさを測定するために、写真 8 の左側の内部損傷を持った試料の両側に同じ寸法、同じ材質の試料を接触させて超音波探傷画像を撮影した。その結果を写真 9 に示す。

写真 9 の超音波画像より、中央の試料の両境界がはっきり区別できるので、この両境界間の長さを 50mm として、後は損傷幅に対して比例配分すれば損傷の大きさが推定できる。

（３）厚さの異なる同じ材質、形状の試料を接触させた場合

これまで比較の試料として同じ材質で同じ厚さの試料を接触させてきたが、同じ厚さの比較試料がない場合の測定を行った。

比較試料として同じ材質(CFRP)で厚さが 5mm の試料と前回用いた内部損傷のある厚さ 20mm の試料とを接触させた。この場合、最初の設定である試料表面からの超音波振動の反射波の位置を測定画面上で同じにするために両試料の上部表面高さが同じになるように設定した。このとき得られた超音波画像を写真 10 に示す。

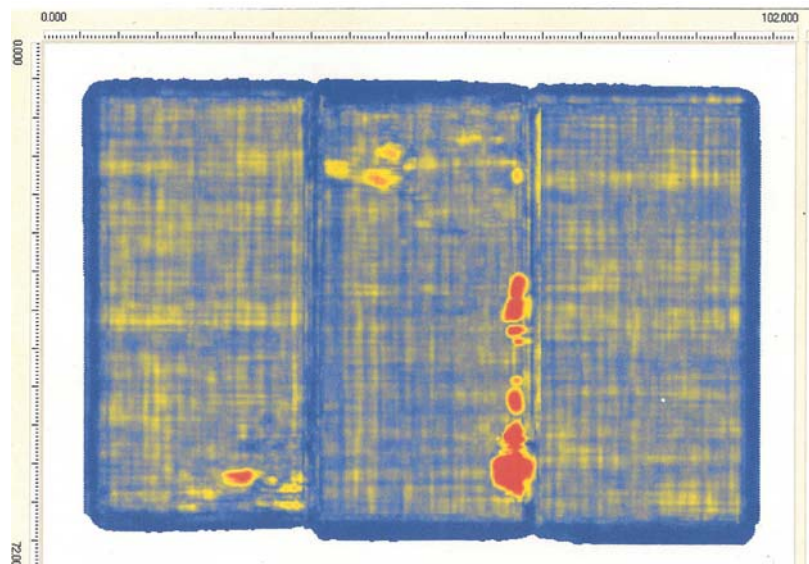


写真 9. 3 枚の試料を接触させた場合の超音波画像

写真 10 と写真 8 とを比較した場合、両写真とも得られた超音波画像は鮮明な状態で、両試料の境界を捉えることができた。この結果より比較する試料厚さが異なっても試料間の境界を捉えることができることがわかった。ただこの場合の試料の設置方法としては、両試料の表面高さを同じにする。次に試料底面からの反射波の選定として板厚の厚いほうからの反射波を基準とすることが必要である。これは板厚の厚い試料の超音波画像を正確に捉えれば、同時に板厚の薄い試料の超音波画像も正確に捕らえられるからである。

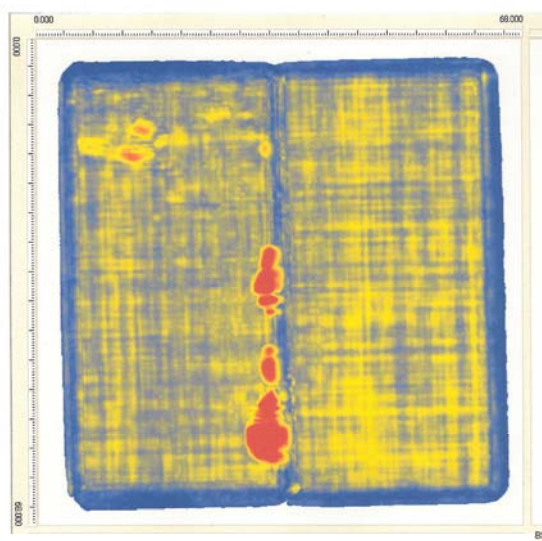


写真 10. 板厚の異なる試料を接触させた場合の超音波画像

以上の結果、試料切断端部付近に発生する内部損傷の観察方法としては、同じ材質の試料を接触させて超音波探傷すれば、試料端部付近の超音波画像を明確にすることが出来ることが分かった。

この結果を元に今回の本来の目的であるアブレイシブ・ウォータージェット切断加工によって切断された試料端部にこの切断方法によって発生する損傷があるかどうかの観察が出来ることがわかった。

この解析は直線状に切断したものの観察方法が基本となるので曲線の切断加工においては更なる追求が必要とおもわれる。

4-6. 損傷部の大きさを決める際の問題点（2）

写真 8,9,10 においてカッターナイフによってつけられた試料表面に水平な損傷部分は赤く判定されて損傷が存在することが確認された。しかしこの損傷部分をもう少し詳しく観察すると、この赤くなった損傷部分にもゴーストが存在することがわかった。これは 2 つの試料の境界線を引いてみると、赤い損傷部分がこの境界線を越えて、損傷のないし両側にも広がっていることから確認できた。この原因は超音波探傷子の反射超音波振動波を捉える部分がある断面積を持ったもので、その面に入ってくる振動エネルギーの総和として捕えているからである。このため今後の課題として、超音波探傷法によって捕えられる損傷部にはゴースト画像が伴ったものとなり、実際の損傷より大きくなる傾向にある。またこのゴースト画像は損傷部の形状によってその広がりやの程度は異なる。然し、ゴーストがあっても損傷の存在を確認することはできるので活用は可能と考えられる。この問題を解決するためにはもう少しの追求が必要となる。

4－7．切断加工した試験片切断部付近に発生する可能性のある内部損傷の観察結果について。

切断加工したCFRP試験片のすべてを完全に調査することは出来ていませんでしたが現在までに検査して結果について報告します。

超音波探傷法で観察した結果の一部を写真11、写真12、写真13に示します。

これらの写真は切断条件を変化させて加工した試料を同じグループごとにすべて接触させた状態で固定し、超音波探傷器で探傷観察を行ったものの超音波探傷画像です。

個々の試料間に損傷を示す赤色の線が見えますが、これらは試料内部への損傷ではなく、試料間の隙間の部分の画像と判断されます。

ここに示しました画像は観察した超音波画像の一部です。今回観察した超音波画像は、振動子の周波数を代えても大きな変化は見られませんでした。これらの画像解析から、切断面端部付近に大きな層間剥離などが発生していないと思われます。

これまでの測定結果をまとめると今回のアブレイシブ・ウォータージェットによるCFRP材の切断加工においては切断部に層間剥離などの損傷は発生していないと思われます。

切断部付近に発生すると考えられる層間剥離の精密な観察に関しては、もう少し時間をかけて観察方法の検討をする必要があると思われます。

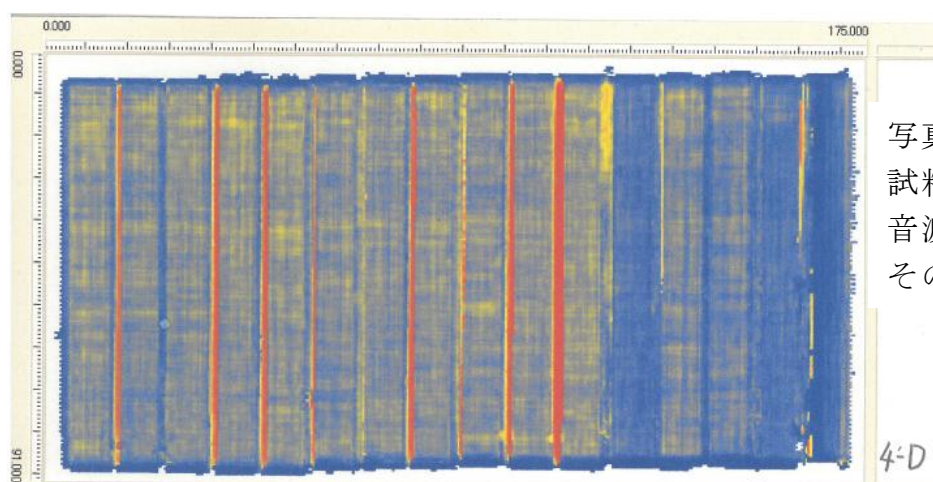


写真11. CFRP材
試料の切断後の超
音波探傷画像
その1

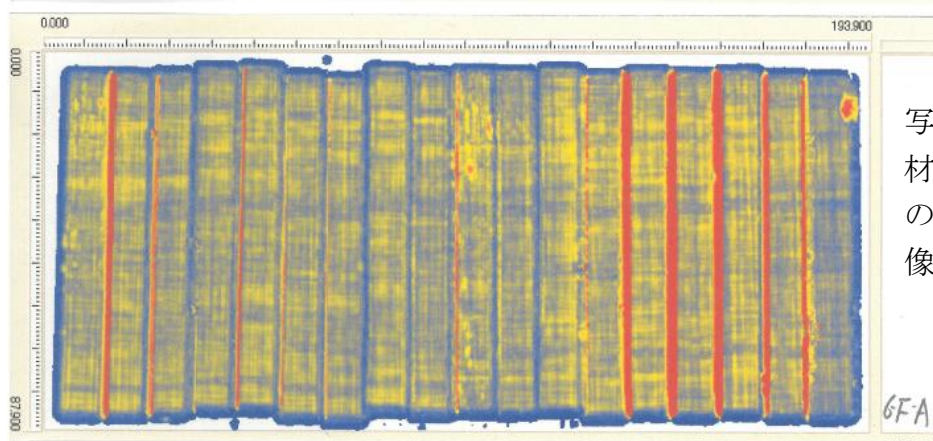


写真.12 CFRP
材試料の切断後
の超音波探傷画
像 その2

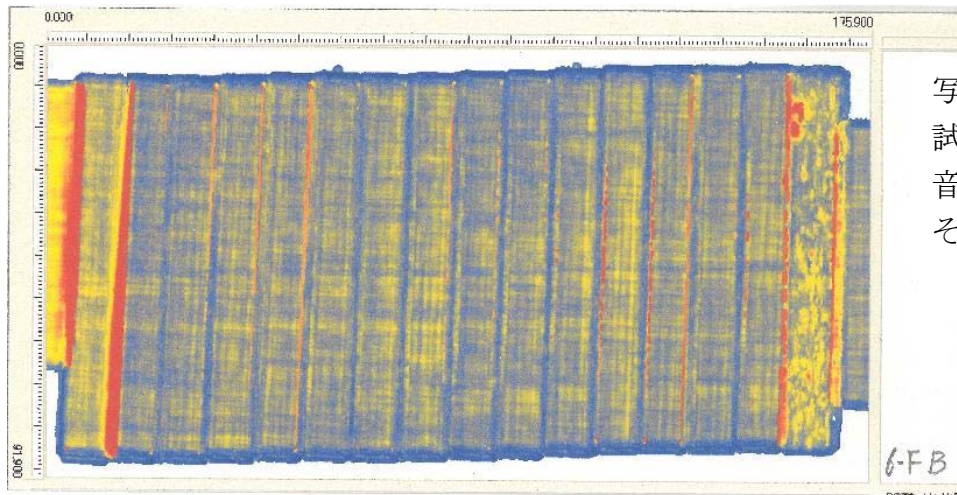


写真 13 CFRP 材
試料の切断後の超
音波探傷画像
その 3

第5章 刃形、すくい角等の切削状況について (加工の高能率化及び工具等の高寿命化)

研究 I

概要：本研究開発は、CFRP の穴あけ加工工程として、アブレイシブウォータージェットにより内径加工した後に、ダイヤモンド工具による仕上げ加工を湿式で行うというものである。前年度、ドリル本体の固定箇所にて緩みが生じるなど、装置上の問題が取り上げられた。本年度は、ドリル本体及び固定部の補強を行った上で、再度、ダイヤモンド工具による仕上げ加工で、面粗度及び加工精度維持のため最適値を把握する。

研究目標：ドリル本体及び固定部の補強を行った後なので、ダイヤモンドグリッター（人口ダイヤφ8 #100）を使用し加工精度で改善状況を把握する。

使用した道具と材料及び条件：

道具：アブレイシブウォータージェット（角度補正プログラム使用）及びドリルユニットシステム（人口ダイヤφ8 #100）を使用し加工精度で改善状況を把握する。

材料：CFRP 板厚 2mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 15.0 カーボンファイバー
オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 1120mm (20%)
ドリルユニットシステム 切削速度 56mm/min 回転数 10000rpm

加工手順：①AWJ（バキュームアシスト）を使用し、下孔をあける。

②AWJ で内径を加工し、ダイヤモンドグリッターで仕上げ、外形を AWJ で加工する。

測定方法：図 1 の測定箇所①と③（Y 方向）の幅、

②と④（X 方向）の幅を、それぞれノギスで測定し、ノズルとドリルユニットにつけられているダイヤモンドグリッターの中心(①基準座標

X-305.919、Y-146.413) が正しい位置（オフセット量）であるかを測定する。

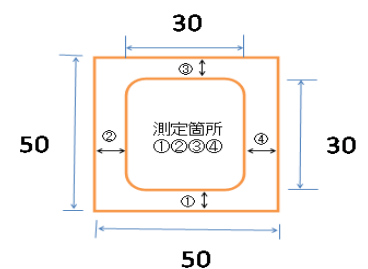


図 1 加工寸法と測定箇所



CFRP2 t 人口ダイヤφ8 #100

座標値	オフセット量
①X-305.919	0
Y-146.413	0
②X-305.969	-0.05
Y-146.563	-0.15
③X-305.939	-0.02
Y-146.553	-0.14
④X-305.919	0
Y146.553	-0.14
⑤X-305.939	-0.02
Y-146.553	-0.14

基準座標からオフセットした座標位置とオフセット量 表 1

条件と測定箇所 表 2

	板厚	切削速度	回転数	測定箇所			
		mm/min	rpm	①	②	③	④
①	2t	56	10000	10.14	10.1	9.88	10.02
②	2t	56	10000	10.01	9.98	10.03	10.08
③	2t	56	10000	10.04	10.01	10.02	10.07
④	2t	56	10000	10.04	10.07	10.03	10.03
⑤	2t	56	10000	10.03	10.04	10.01	10.02

加工精度 (mm) (目標値 0.05 以内) 表 3

	X 方向 (測定箇所②と④ の差)	Y 方向 (測定箇所①と③ の差)
①	0.08	0.26
②	0.1	0.02
③	0.06	0.02
④	0.04	0.01
⑤	0.02	0.02

考察

オフセット量をノギスで測定しながら、調整したところ (表 1)、X は、0 か-0.02 Y は、-0.14 移動させたところで目標値の±0.05 を達成する事が出来た。

研究 II

概要：ダイヤモンドグリッターの粒の粗さを変え、仕上げ加工を行い、加工精度維持のための最適値を把握する。

研究目標：ダイヤモンドグリッター (人口ダイヤφ8 #60) を使用し、ドリル本体及び固定部補強後の加工精度の改善状況を把握する。

使用した道具と材料及び条件：

道具：アブレイシブウォータージェット (角度補正プログラム使用) 及びドリルユニットシステム、ダイヤモンドグリッター 人口ダイヤφ8 #60

材料：CFRP 板厚 2mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 15.0 カーボンファイバー
オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 1120mm (20%)

ドリルユニットシステム 切削速度 56mm/min 回転数 10000rpm

加工手順：①AWJ (バキュームアシスト) を使用し、下孔をあける。

②AWJ で内径を加工し、ダイヤモンドグリッターで、仕上げ、外形を AWJ で加工する。

測定方法：図1の測定箇所①と③（Y方向）の幅、
②と④（X方向）の幅を、それぞれ
ノギスで測定し、ノズルとドリルユニット
につけられているダイヤモンドグリッター
の中心(基準座標 X-305.919、Y-146.413) の
正しい位置（オフセット量）を検討する。

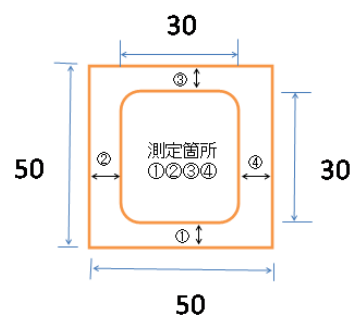
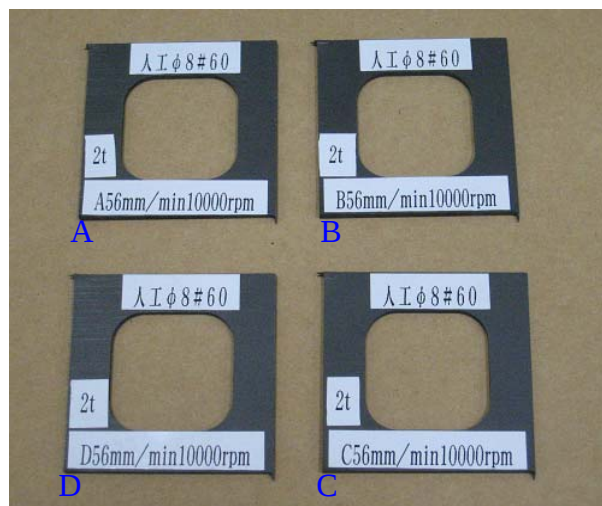


図1 加工寸法と測定箇所



CFRP2t 人口ダイヤφ8 #60

座標値	オフセット量
A X-305.939	-0.02
Y-146.553	-0.14
B X-305.939	-0.02
Y-146.513	-0.1
C X-305.969	-0.05
Y-146.513	-0.1
D X-305.913	-0.02
Y146.513	-0.1

基準座標からオフセットした
座標位置とオフセット量

条件と測定箇所 表 5

	板厚	切削速度	回転数	測定箇所			
		mm/min	rpm	①	②	③	④
A	2t	56	10000	9.97	10.05	10.06	10.03
B	2t	56	10000	10.05	10.07	10.02	10.02
C	2t	56	10000	10.03	10	10.02	10.06
D	2t	56	10000	10.04	10.03	10.02	10.04

加工精度(mm)(目標値 0.05 以内) 表 6

	X 方向(測定箇所②と④の差)	Y 方向(測定箇所①と③の差)
A	0.02	0.09
B	0.05	0.03
C	0.06	0.01
D	0.01	0.02

考 察：研究 I ⑤ の
X-0.02Y-0.14 のオフセット
量から加工したところ、Y が
0.09 と目標値から外れた。さ
らに、調整を続け、D の
X-0.02Y-0.1 のオフセット量
で目標値の±0.05 を達成し
た。

研究Ⅲ

概要：板厚とダイヤモンドグリッターの粒の粗さを変え、仕上げ加工を行い、加工精度維持のための最適値を把握する。

研究目標：ダイヤモンドグリッター（人口ダイヤφ8 #60）を使用し、板厚と回転数を変え、ドリル本体及び固定部補強後の加工精度の改善状況を把握し、±0.05を目指す。

使用した道具と材料及び条件：

道具：アブレイシブウォータージェット（角度補正プログラム使用）及びドリルユニットシステム、ダイヤモンドグリッター 人口ダイヤφ8 #60

材料：CFRP 板厚 8mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 31.0 カーボングラファイト、オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 443.94mm (10%)
ドリルユニットシステム 切削速度 10.21mm/min

回転数 10000rpm 5000rpm 2000rpm

加工手順：①AWJ（バキュームアシスト）を使用し、下孔をあける。

②AWJ で内径を加工し、ダイヤモンドグリッターで仕上げ、外形をAWJで加工する。

測定方法：図1の測定箇所①と③（Y方向）の幅、②と④（X方向）の幅を、それぞれノギスで測定し、ノズルとドリルユニットにつけられている。

ダイヤモンドグリッターの中心(基準座標 X-305.919

Y-146.413) の正しい位置（オフセット量）を検討する。

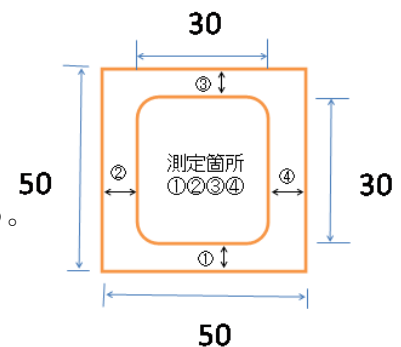
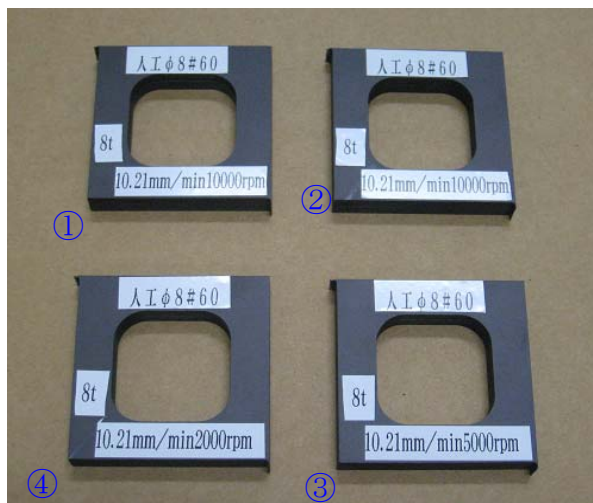


図1 加工寸法と測定箇所



CFRP8t 人口ダイヤφ8 #60

座標値	オフセット量
①X-305.939	-0.02
Y-146.513	-0.1
②X-305.969	-0.05
Y-146.563	-0.15
③X-305.969	-0.05
Y-146.563	-0.15
④X-305.969	-0.05
Y146.563	-0.15

基準座標からオフセットした座標位置とオフセット量

表7

条件と測定箇所 表 8

	板厚	切削速度	回転数	測定箇所			
		mm/min	rpm	①	②	③	④
①	8t	10.21	10000	10.12	10.11	10.06	10.03
②	8t	10.21	10000	10.03	10.03	10.03	10.03
③	8t	10.21	5000	9.99	10.03	10.07	10.03
④	8t	10.21	2000	10.01	10.03	10.06	10.05

加工精度(mm)(目標値 0.05 以内) 表 9

	X 方向(測定箇所②と④の差)	Y 方向(測定箇所①と③の差)
①	0.07	0.06
②	0	0
③	0	0.08
④	0.02	0.05

考察：①が目標値を外れる傾向にある。ダイヤモンドグリッターの取替え時に、若干のズレが生じている可能性がある。②→③→④と調整し、④で±0.05 を達成する事が出来た。

研究Ⅳ

概要：ダイヤモンドグリッターの切削速度を変え、仕上げ加工を行い、加工精度維持のための最適値を把握する。

研究目標：ダイヤモンドグリッター（人口ダイヤφ8 #60）を使用し、切削速度のみ変化させ、ドリル本体及び固定部補強後の加工精度の改善状況を把握し、±0.05 を目指す。

使用した道具と材料及び条件

道具：アブレイシブウォータージェット（角度補正プログラム使用）及びドリルユニットシステム

ダイヤモンドグリッター 人工ダイヤφ8 #60

材料：CFRP 板厚 8mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 31.0 カーボングラファイト
オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 443.94mm (10%)

ドリルユニットシステム 切削速度 10.21mm/min 4.88mm/min

回転数 2000rpm

加工手順

①AWJ（バキュームアシスト）を使用し、下孔をあける。

②AWJ で内径を加工し、ダイヤモンドグリッターで仕上げ、外形を AWJ で加工する。

測定方法

図 1 の測定箇所①と③（Y 方向）の幅、
②と④（X 方向）の幅を、それぞれノギスで測定し、
ノズルとドリルユニットにつけられている

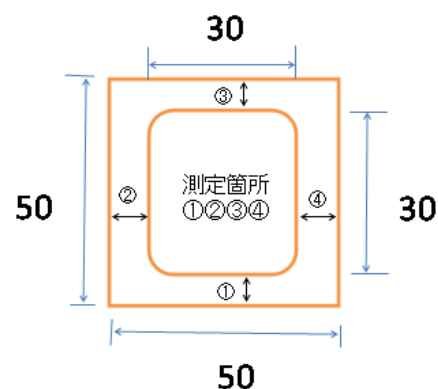
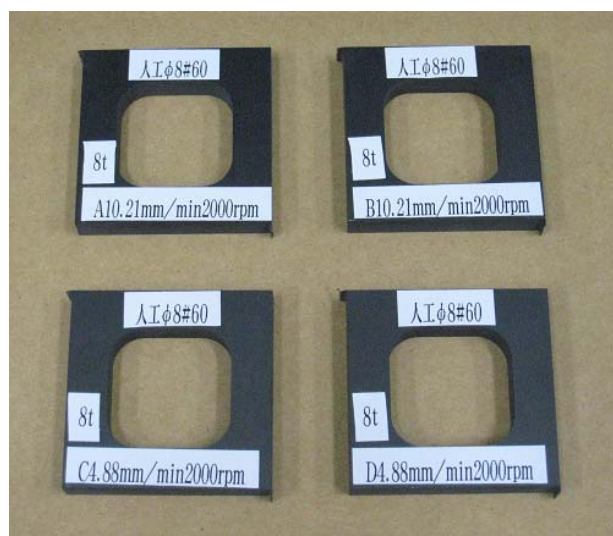


図 1 加工寸法と測定箇所

ダイヤモンドグリッターの中心(基準座標 X-305.919
Y-146.413) の正しい位置 (オフセット量) を検討する。



CFRP8t 人工ダイヤφ8 #60

座標値	オフセット量
A X-305.969	-0.05
Y-146.563	-0.15
B X-305.919	0
Y-146.513	-0.1
C X-305.919	0
Y-146.513	-0.1
D X-305.919	0
Y146.493	-0.08

基準座標からオフセット
した座標位置とオフセット量
表 10

条件と測定箇所 表 11

	板厚	切削速度	回転数	測定箇所			
		mm/min	rpm	①	②	③	④
A	8t	10.21	2000	9.98	10.01	10.11	10.09
B	8t	10.21	2000	10.06	10.06	10.07	10.06
C	8t	4.88	2000	10.05	10.07	10.08	10.06
D	8t	4.88	2000	10.06	10.08	10.06	10.06

加工精度(mm)(目標値 0.05 以内) 表 12

	X 方向(測定箇所②と④の差)	Y 方向(測定箇所①と③の差)
A	0.08	0.13
B	0	0.01
C	0.01	0.03
D	0.02	0

考察：ここでも、ダイヤモンドグリッター取替え後の最初の A は目標値を大きく外れた。調整後は、問題なく、±0.05 を達成する事が出来た。速度を変えても加工精度は問題なかった。

研究 V

概要：ドリル本体及び固定部の補強後の加工精度においては、ダイヤモンドグリッター取替え時に若干のズレが生じ、調整が必要ではあるが、調整後の加工精度は目標値の±0.05 を達成する事が出来た。

次に、面粗度の目標値である $3.175Ra\mu m$ 以下を目指し、最適加工条件を検討する。人工ダイヤと天然ダイヤ、#60、#100、#140 の粒度の比較、回転数の変化で、面粗度がどのように違うか把握する。

研究目標：ダイヤモンドグリッターを使用し、面粗度 $3.175Ra\mu m$ 以下を目指す。

使用した道具と材料及び条件

道具：アブレイシブウォータージェット（角度補正プログラム使用）及びドリルユニットシステム

ダイヤモンドグリッター 人工ダイヤ $\phi 8$ #60 #100

天然ダイヤ $\phi 8$ #60 #100

材料：CFRP 板厚 8mm 板厚 10mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 31.0 カーボングラファイト
オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 8 t 443.94mm (10%)
10 t 349.1833 (10%)

ドリルユニットシステム 切削速度 8t 10.21mm/min

10 t 10.13mm/min

回転数 2000 r p m 4000 r p m 6000rpm 8000 r p m 10000 r p m

条件と面粗度 表 13

板厚	グリッター径	粒度	切削速度	回転数	面粗度
			mm/min	rpm	$Ra\mu m$
8t	人工 $\phi 8$	#60	10.21	10000	6.50
				8000	6.71
				6000	6.82
				4000	6.62
				2000	7.95
8t	人工 $\phi 8$	#100	10.21	10000	4.91
				8000	4.40
				6000	4.70
				4000	4.62
				2000	4.70
10t	人工 $\phi 8$	#100	10.13	10000	5.81
				8000	5.83
				6000	6.38
				4000	6.42
				2000	5.79
10t	人工 $\phi 8$	#60	10.13	10000	5.48
				8000	6.89
				6000	6.70

				4000	6.40
				2000	6.50
8t	天然 φ 8	#60	10.21	10000	13.6
				8000	12.8
				6000	14.1
				4000	13.9
				2000	13.2
8t	天然 φ 8	#100	10.21	10000	8.80
				8000	7.40
				6000	8.50
				4000	9.70
				2000	9.80

考察：人工、天然ダイヤモンドグリッターでは、粒度を変えても面粗度の目標値である $3.175\text{Ra}\mu\text{m}$ 以下を達成することは出来なかった。

研究VI

概要：人工ダイヤ、天然ダイヤの#60、#100 では目標値を達成できなかったため、ダイヤモンドグリッターを1周だけではなく、2周、3周する加工方法（2パス、3パス）、さらに粒度の細かい#140の天然ダイヤと超硬エンドミルを使用し、目標値を目指す。

研究目標：面粗度 $3.175\text{Ra}\mu\text{m}$ 以下を目指す。

使用した道具と材料及び条件

道具：アブレイシブウォータージェット（角度補正プログラム使用）及びドリルユニットシステム

ダイヤモンドグリッター 人工ダイヤ φ 8 # 60

天然ダイヤ φ 8 # 140

超硬エンドミル φ 5、φ 6、φ 8

材料：CFRP 板厚 5mm 板厚 8mm

条件：AWJ 圧力 311Mpa ガーネット 320 g 切削性 31.0 カーボングラファイト
オフセット 0.55 スタンドオフ 2.5mm 切削速度 8 t 443.94mm/min (10%)
5 t 640.3784mm/min (10%)

ドリルユニットシステム 切削速度 5t 超硬エンドミル 88mm/min

8 t ダイヤモンドグリッター 10.21mm/min

超硬エンドミル 44.394mm/min 88.7881mm/min

回転数 2000 r p m 4000 r p m 6000rpm 8000 r p m

条件と面粗度 表 14

板厚	グリッター径	粒度	切削速度	回転数	面粗度
			mm/min	rpm	Ra μ m
8t	人工 $\phi 8$	#60	10.21	2000 (2 パス)	6.60
				2000 (3 パス)	6.50
8t	天然 $\phi 8$	#140	10.21	8000	6.30
				6000	6.18
				4000	6.09
				2000	5.04
				2000 (2 パス)	5.23
				2000 (3 パス)	4.48
8t	超硬エンドミル $\phi 8$	44.394		80003	0.92
				6000	0.80
				4000	0.57
8t	超硬エンドミル $\phi 8$	88.7881		8000	0.73
				6000	0.59
				4000	0.81
				2000	0.82
5t	超硬エンドミル $\phi 6$	88		8000	0.69
				6000	0.74
				4000	0.78
				2000	0.71

考察：人工、天然ダイヤモンドグリッターで、2 パス、3 パス、#140 で加工を行ったが、目標値の面粗度は達成できなかった。超硬エンドミルの場合、面粗度は、1 以下となり、目標値の 3.175Ra μ m は達成することができたが、超硬は消耗が激しく、コストがかかる。今後、刃物の選定が課題となるであろう。

5-2 ダイヤモンド工具の切削状況について

加工状況より、天然ダイヤモンド砥粒 #140 のグリッターを新たに製作して人工ダイヤモンド砥粒 #60, #100、天然ダイヤモンド砥粒 #60、#100、#140 の5種類にて CFRP の最終加工精度（面粗さ）のテストをおこなった。

【 C F R P 仕上げ面粗さ結果 】

人工	# 6 0	6.5～7.0	Ra μ m	目標	3.15	Ra μ m
人工	# 1 0 0	4.4～4.9				
天然	# 6 0	12.8～14				
天然	# 1 0 0	7.4～9.8				
天然	# 1 4 0	4.5～6.3				
超硬エンドミル	φ 8	0.6～0.9				

- 1, グリッターの回転数は 10,000、8,000、6,000、4,000、2,000rpm で行った。
結果として面粗さにはさほど影響しないことが判明した。
- 2, 粒度の大きさで面粗さには比例するが、同一粗さでは天然ダイヤモンドの方が粗くなる。
理由は、切削能力としては天然ダイヤモンドの方が優れているが、砥粒形状が人工は丸みをおびていて、天然は角ばってイレギュラーの形状の為、面粗さに影響したものと思われる。
- 3, ダイヤモンドグリッターでは、目標面粗さの 3.15 Ra μ m に到達しなかったが、超硬エンドミルでは、完全にクリアしている。
ただし寿命は十分で無いと思われる。
- 4, 超硬エンドミルの次の対策として、P C Dエンドミルが考えられる。
ただし寿命は数十倍に伸びるが、価格もそれに伴いアップすると考えられる。

5-3 ウォータージェット用ノズルについて

ウォータージェット加工に関しては、工具とともに水流噴射ノズルの先端部分の寿命もコストに大きな影響を与えることとなる。このためノズルの材質、水圧、研磨材の種類・量などと寿命との関係についてデータを蓄積し耐久性評価を行う必要があるが、これまでの研究開発期間中では、ポンプ使用時間が 116 時間、ノズル使用時間が 95 時間とノズルの寿命に達するに至らなかった。
ノズルの耐久性評価方法を検討したほうが良い。

第 6 章 ウォータージェット加工機に付加される制御装置等の検討について

本研究の目標は、アブレイシブウォータージェット方式とダイヤモンド工具による切断面の加工と併用した複合切削で、加工精度 ± 0.05 以内、1穴5分以内で60穴以上あける事である。本研究において、アブレイシブウォータージェットは、あくまでも前加工であり、加工精度の要求は必要ない。第3章で、加工能率を上げ、加工コストを抑えた切削条件を検討した結果、ノズル傾斜角度調整制御装置の設定条件の変更にも対応できる事が分かった。

第 7 章 工作機械の精度について（ブラケットによる剛性向上）

ブラケット取り付けにより剛性を上げ、振動計により共振点の測定を実施し、測定値が150Hz位置で小さいピークがあったが、共振の発生が少ないことが確認できた。

第8章 まとめ

平成20年度から始めました本研究開発の結果を下記に纏めます。

1, 計画について

- 1) 従来からあるウオータージェット加工機を利用して、複合的切削加工装置を開発した。
- 2) 被切削材は難加工材で知られている CFRP である。
- 3) 研究開発目標数値
 - (1) CFRP 厚さ ; 2.5 mm (2) 穴径 ; $\phi 20\text{mm}$ (3) 穴加工数 ; 60 以上
 - (4) 加工時間 ; 5 min/1 穴 以内 (5) 穴加工精度 ; 0.05mm 以下
- 4) 研究開発項目
 - (1) ウオータージェット加工機の切削条件（水圧、ガーネット量、切削速度、ドリルの回転数）と剥離性状、切削面の面粗度の関係の調査
 - (2) ダイヤモンドドリルの種類（天然、人工）と加工状態の調査
 - (3) 加工条件と CFRP の分析評価
 - (4) ウオータージェット加工機のノズルの角度制御と耐久性評価
 - (5) ウオータージェット加工機の振動の調査と対策

2, 研究開発の考察

- 1) 加工技術について
 - (1) 当初目標である $\phi 20$ の穴加工を実施する加工条件（切削速度、ドリルの回転数、ガーネット量 等）について最適条件の設定が出来た。
 - (2) ウオータージェット加工機にブラケットを介してドリルを取り付ける構造としたが加工位置、加工穴の精度が悪く、ブラケットの強度に原因があることをつきとめブラケットの強度を上げることで解決した。
- 2) 精度向上について
 - (1) 穴加工時の精度向上策を検討した結果、加工条件に加え水圧、ドリルの種類等が大きく影響を与え、特にドリルの種類が仕上がり精度に大きく寄与していることがわかった。
 - (2) 切削速度と水圧との関係では、最適な条件の確認が出来た。
- 3) 加工後の CFRP の分析評価について
 - (1) 加工面（上面、下面）は目視でも損傷の程度が判別出来るが、穴加工内面の損傷の判別は困難である。
観察方法として超音波探傷器を導入し、加工穴内面の損傷可視化に挑戦した。

- (2) その結果、現時点では損傷の有無の判別が可能となる程度の手法は確立出来たが、今後さらに工夫を凝らして可視化を目指したいと考える。
- 4) 刃形・すくい角度の切削状態について
 - (1) 製品の仕上がり精度、速度は加工条件だけではなく工具であるドリルに大きく左右される。
 - (2) ダイヤモンドドリルは、天然ダイヤと人工ダイヤの2通りを準備しそれぞれ加工をした結果、人工ダイヤの方が精度に良い結果となった。
この理由は、天然ダイヤは角が鋭角となっており切り込み部分にばらつきが出るため、加工面に深い傷が付き目標の精度が出ないためと考えられる。
 - (3) また穴径の大きい加工は、ダイヤモンドグリッターを使用して穴の内面を2～3周加工後、超硬エンドミルを併用することにより目標精度の確保が出来た。
- 5) ウォータージェット加工機に付加される制御装置等の検討について
 - (1) 目標値の加工精度を狙うには、水圧、ガーネット量、切削速度、等だけではなくウォータージェット加工機のノズル角度補正值及びノズル径補正值が重要な項目であることがわかった。
- 6) 工作機械の精度について
 - (1) 実験開始当初、加工精度の問題は加工条件等に起因していると考えていた。
 - (2) 原因はドリルを固定しているブラケットにあった。
 - (3) ブラケットの強度を上げることにより容易に加工精度の確保が出来るようになった。

3, 研究開発結果

研究開発を進める内に様々な問題が発生したが、都度委員会等を通じて問題点と解決方法を協議して進めた結果、目標値をクリアするとともに CFRP 材の最適加工条件を見いだすことができた。

4, 事業化について

3年間の研究開発の結果当初の目標は達成出来たと判断するが、事業化を推進するには、さらに下記3点の問題を解決する必要があると考える。

- 1) 穴加工内面の可視化を可能とする
- 2) ダイヤモンドドリルの使用耐久時間を伸ばす方法を探る
- 3) さらなる精度アップと加工時間の短縮を図る

以上により今回のサポイン事業は終了となるが、今後も工夫を重ねて事業化へ進める予定である。