

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

事業名「超音波切削加工技術を用いた

航空機機体用複合材

穴あけ加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局  
委託先 平和産業株式会社

## 目 次

1	研究開発の概要	
1-1	研究の目的、概要	
1-1-1	研究の目的	3
1-1-2	研究の概要	4
1-2	研究開発体制	5
1-3	成果の概要	7
1-4	プロジェクトの管理及び連絡窓口	9
2	研究開発報告	
2-1	CFRPの仕様	10
2-2	CFRP+Ti重ね板の仕様	10
2-3	超音波回転振動装置	10
2-4	加工用工具の開発(1) CFRP板材に対する穴あけ加工(1)	11
2-5	加工用工具の開発(2) CFRP板材に対する穴あけ加工(2)	13
2-6	加工用工具の開発(3) CFRP+Ti重ね板材に対する穴あけ加工(2)	14
2-7	集塵装置の試作機開発	16
3	全体総括	18

## 1 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の目的、概要

#### 1-1-1 研究の目的

本研究開発の目的は、軽量化を目指す航空機機体技術における CFRP 活用は有効な手段である反面、製造段階において技術的、コスト的に多くの問題を有しているため、その問題解決を目指す。製造段階においては性能的課題を除くと、製造コストと環境問題に集約される。製造コストの定義は、消耗品コスト削減と製作時間の短縮が主な問題に分類できる。その先には品質問題としての歩留まり等がコスト問題として取り上げられる。この消耗品の合理化と品質安定技術への貢献として、本件テーマの超音波振動切削による穴加工が問題解決手段としてあげられる。

CFRP は単体で成型され、接着もしくはリベット、ネジ結合によって組み立てられる。リベット、ネジ結合には穴加工は必ず存在し、成型後の機械加工である。その数は飛行機主翼にして 1 機あたり 10 万穴以上である。しかしながら、最も高価であるダイヤモンドコーティングドリルを使用しても 10 箇所も空けることができず、消耗品コストを増大させているのが現状である。この問題に対して、超音波回転振動を与えながら瞬間的な衝撃で穴加工を進めつつ、通常の切削回転で加工を進める超音波振動切削が有効であることが、昨年度の研究開発により明らかとなった。この技術を用いて実際の加工機械や現場で利用されるボール盤で実用化実験を行うことにより、振動装置から発生する問題を抽出・研究し実用化を目指す。

また、工具としての合理性、品質の優位性、品質安定性についてドリル加工と比較しつつ、NC による 5 軸加工手法を活用した、エンドミルによる効率的な振動穴加工も研究する。

さらに、環境面においては、CFRP 切削加工では繊維質の粉体状切屑が発生し、人体にも環境にも悪影響を及ぼす。集塵に関する研究を同時に行い、装置を開発することにより、一般的な環境で CFRP 加工が実現できることを目指す。

## 1-1-2 研究の概要

本研究開発では、昨年度の研究成果を踏まえ、超音波回転振動装置を一般的な汎用複合機械(NC マシニング)に取り付け、機器への影響、加工の品質、工具の開発、環境維持の研究を進める。

### ① 工具と最適加工条件

今回の実験では、航空機機体用複合材穴あけ加工において、スラスト力、切削温度、加工面品位(表面粗さ、デラミネーション)の観点から超音波振動切削加工の評価を行う。最終目標は超音波回転振動技術を用いて、被削性が著しく異なる CFRP と Ti-6Al-4V 板材を重ねて穴あけを行う。そして各材料における加工メカニズム、効果を明らかにした上で最適加工条件を明確にすることを目標とする。

### ② 加工環境を悪化させないための集塵に加えて、切屑を素材毎に分別回収して再資源化出来る集塵装置の試作機の開発

2段式サイクロン集塵装置を改良することにより、振動加工で微細化された CFRP 粉塵と、接合されるべき金属(チタン、アルミ)の同時加工で混ざり合った粉塵を、吸引と同時に分別する仕組みを計画し、再利用、再資源化可能なレベルまで分別するための研究を行う。また、排気を外部環境以上のレベルとする集塵率を達成するための研究を行う。

大手川下製造業者でもある MHI 他アドバイザーの助言を反映し、評価、改良を進める。

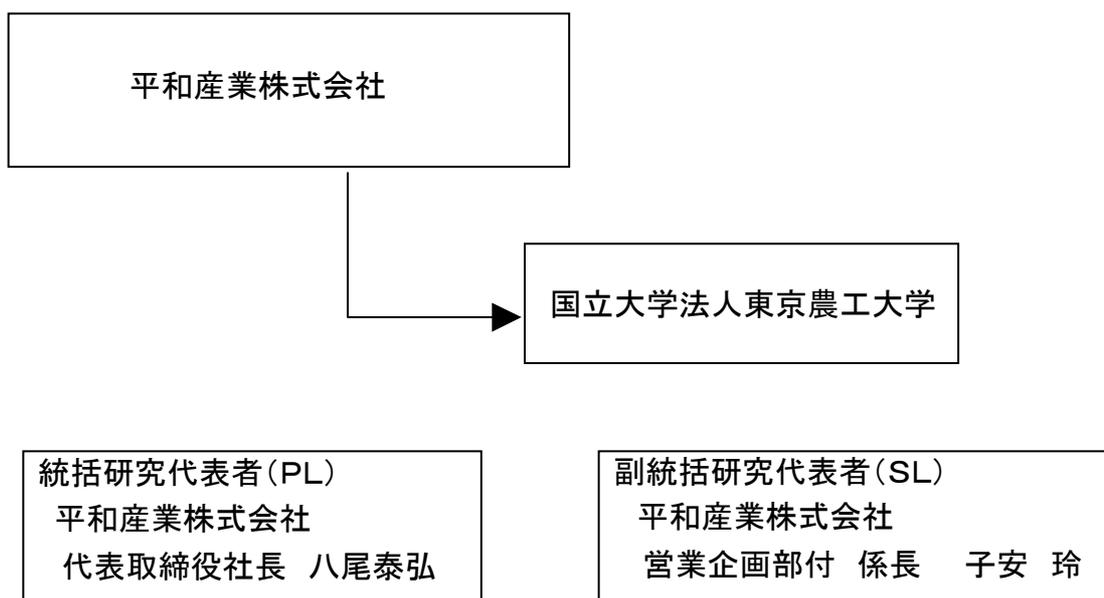
### ③ 解析理論値の検証(実施:国立大学法人東京農工大学)

加工時に発生する粉体状の塵を吸引するにあたり、サイクロン集塵機の組み合わせの最適化を研究する。そこから採取した単位あたり容積で粉塵の量を測定し、内容を分析することにより、環境に与える問題を検証する。

また 積層により作られている CFRP が剥離していないか等、CFRP 製品品質上の問題を検証する。

## 1-2 研究開発体制

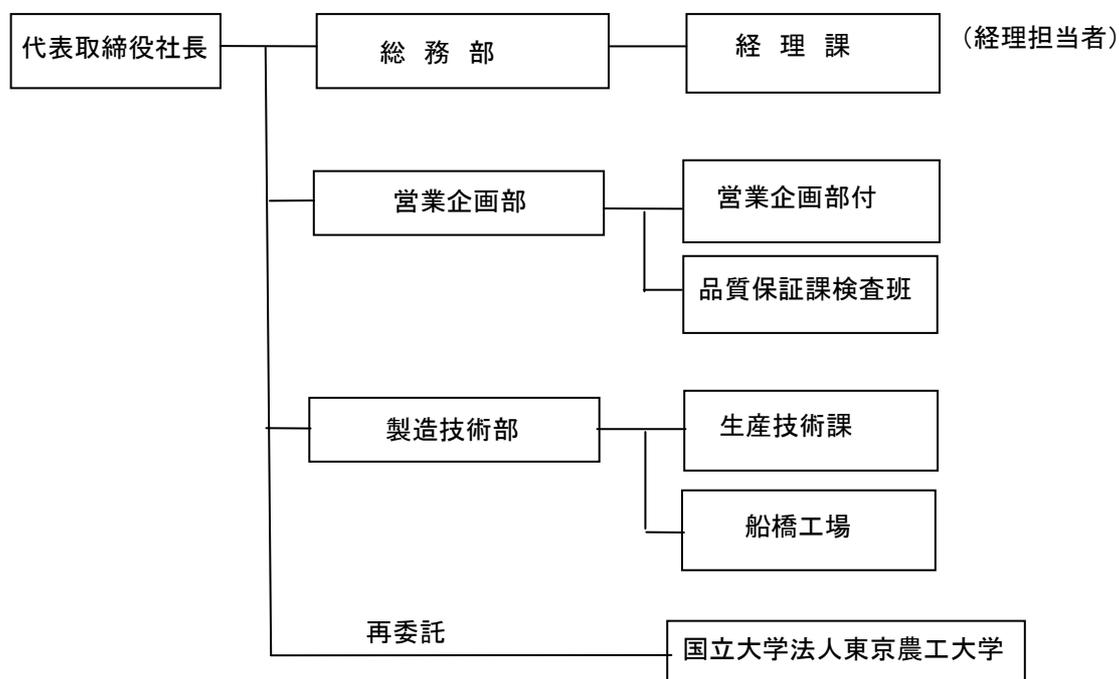
### 1-2-1 研究組織(全体)



## 1-2-2 管理体制

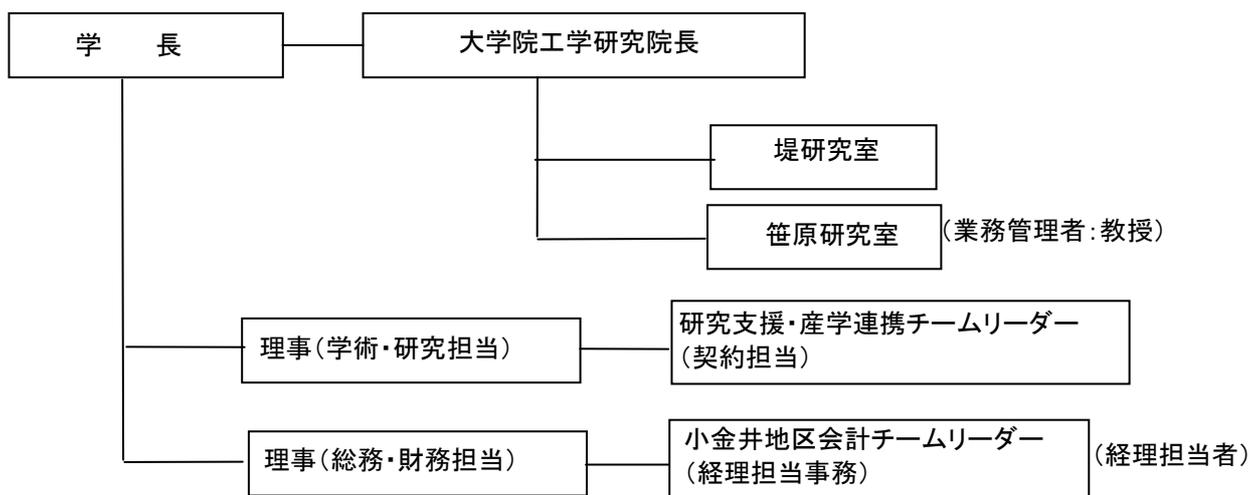
### ① 事業管理機関

[平和産業株式会社] (業務管理者:総務部長、総務部員)



### ②再委託先

[国立大学法人 東京農工大学]



### 1-3 成果の概要

#### 1-3-1 加工用工具の開発(1) CFRP板材に対する穴あけ加工(1)

2段角ドリル4種類、1段角ドリル3種類、計7種類の異なるドリルを用いて、CFRP 板材に対して穴あけ加工を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) スラスト力は一刃送り条件が一定の場合において切削速度が速くなるにつれて小さくなる。また金属切削ほど顕著ではないが一刃送りは小さいほうがスラスト力は小さい。2段角ドリルは小さいスラスト力となるドリル形状である。
- (2) 推奨回転数は低いが超音波回転振動を付加することによって、スラスト力は低くなることが示された。
- (3) ドリル抜け際の温度を測定した結果、CFRP は熱伝導率が低く一刃送りが大きいほど温度は低くなる傾向を示す。
- (4) デラミネーションは一刃送りに依存しており、一刃送りが小さいほどデラミネーションは小さくなり、スラスト力と同じ傾向を示した。また2段角ドリルを用いることによって不良穴の発生を防ぐことができる。

#### 1-3-2 加工用工具の開発(2) CFRP板材に対する穴あけ加工(2)

2段角ドリル「85° —270°」を使用して、切削速度を 200、250、300m/min、送りを 0.1、0.2、0.3mm/rev とそれぞれ 3 種類設定し、それらを組み合わせて9種類の切削条件で、加工実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) スラスト力は、切削速度 300m/min、送り 0.1mm/rev、または、0.2mm/rev の時に小さくなる。
- (2) 穿孔評価の結果、切削速度 300m/min、送り 0.1mm/rev では出入口共にバリ、デラミが発生せず、良好な穿孔ができていた。
- (3) 穴径、穴面粗度は、どの条件でも穴径公差内と航空機用一般的要求加工面粗さ Ra4.8  $\mu$ m 以下を満たすことができた。
- (4) 工具磨耗は切削速度 300m/min、送り 0.1mm/rev が最も少なくなった。(送り 0.3mm/rev では各切削速度とも刃先が破損した。)
- (5) 加工温度は、2段角ドリル「85°-270°」、切削速度 300m/min、送り速度 0.1mm/rev での加工中の温度を計測し、従来データと比較した。昨年度結果の 172.2°Cから 105.4°Cに低減された。
- (6) 工具寿命は、従来データの 20 穴から 100 穴以上へと向上させることができた。

### 1-3-3 加工用工具の開発(3) CFRP+Ti 重ね板に対する穴あけ加工

先端角  $100^{\circ}$  ~  $160^{\circ}$  ( $10^{\circ}$  ピッチ)の7種類の2段角ドリルを用いて、CFRP+Ti 重ね板に対して穴あけ加工を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) スラスト力は、切削速度 25m/min、回転送り 0.01mm/rev の条件の時に最も小さくなった。
- (2) 穴径、穴径差は、先端角  $150^{\circ}$ 、切削速度 25m/min、回転送り 0.01mm/rev の条件の時に良好な結果であった。
- (3) 穴面粗度は、どの切削条件、先端角でも「Ra4.8  $\mu$ m 以内」を達成することができた。
- (4) ドリル磨耗は、先端角  $140^{\circ}$  及び  $150^{\circ}$  で、切削速度 25m/min、回転送り 0.01mm/rev の条件の時に最も少なかった。
- (5) ドリル寿命は、60 穴加工後においても、穴面粗度、穴径、穴径差共良好な状況であり、60 穴以上の加工寿命が確認出来た。
- (6) CFRP+Ti 重ね板加工において、切削速度が回転振動装置の有効活用領域に入るため、特にチタン部の加工において、スラスト力の低減により工具磨耗を大幅に抑制することが出来る。

### 1-3-4 集塵装置の試作機開発

- (1) 相似形状のサイクロン集塵装置を試作し CFRP を集塵した結果、円筒径  $\phi 100$  で二つを並列に接続したマルチサイクロンシステムで集塵能力が高い。また、円筒径が大きい  $\phi 200$  を1段目に通し、円筒径  $\phi 50$  で四つを並列に接続したマルチサイクロンシステムで細かい粉塵を集塵することで実験環境の2倍程度の粉塵密度まで集塵ができ、効果的な2段式サイクロンシステムを構成できる。
- (2) 円筒径  $\phi 100$  を二つ並列に接続したマルチサイクロンシステムを2セット直列に接続した2段式サイクロン集塵装置を構成することにより、排気の粉塵密度が  $0.36\text{mg}/\text{m}^3$  となり、室内環境基準 ( $0.15\text{mg}/\text{m}^3$  以下) を達成することが出来た。
- (3) 比重の違いを利用した材質毎の分別を目標に研究を行ったが、材質毎に分別することは出来なかった。

#### 1-4 プロジェクトの管理及び連絡窓口

##### 事業管理機関

平和産業株式会社 船橋工場 (TEL 047-435-2430 FAX 047-432-0787)  
(最寄り駅: JR 総武線 西船橋駅、京成線 海神駅)  
〒273-0024 千葉県船橋市海神南 1-1544-10  
総務部長 鈴木捨男 (s-suzuki@heiwasangyo.co.jp)

##### 研究者

平和産業株式会社 船橋工場 (TEL 047-435-2430 FAX 047-432-0787)  
(最寄り駅: JR 総武線 西船橋駅、京成線 海神駅)  
〒273-0024 千葉県船橋市海神南 1-1544-10  
社長 八尾泰弘 (y-yao@heiwasangyo.co.jp)

##### 国立大学法人東京農工大学 笹原研究室

(TEL 042-388-7240 FAX 042-388-7417)  
(最寄り駅: JR 中央線 東小金井駅)  
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16  
教授 笹原弘之 (sasahara@cc.tuat.ac.jp)

## 2 研究開発の概要

### 2-1 CFRPの仕様

本試験で使用した複合材 CFRP の仕様を下表に示す。

項 目	単 位	内 容
ワーク板厚	mm	7.6
炭素繊維 種類		Unidirectional prepregs , KMS QU 135-137A UTS50 12K
繊維目付	g/m <sup>2</sup>	190
樹脂型番、硬化温度	°C	#135 180 °C
Prepreg thickness/ply	mm	0.187
積層数	ply	40
引張強さ	MPa	460
ヤング率	GPa	60.56

### 2-2 CFRP+Ti重ね板の仕様

CFRP材(T=7.6mm:CFRP単体実験のものと同じ材料)とチタン材(T=4.85mm:TI-6AL-4V(ASTM B265 Gr.5))を接着剤で接着したもの。

### 2-3 超音波回転振動装置

本実験では図1に示す富士工業社製ダクテュロイを用いて超音波回転振動を付加した。27kHzの超音波回転振動によって、穴あけ加工時には切削と離脱を繰り返すことにより断続切削を行う。平均的に切削抵抗を減らし工具寿命に効果があるとされている。本研究では超音波回転振動の有無によるCFRP被削性、加工面品位について検証を行う。最大の振幅を得るためにはドリルに合った全長、突き出し長さ、回転数が重要となる。特に回転数は高くすると断続切削が行われなくなる可能性がある。

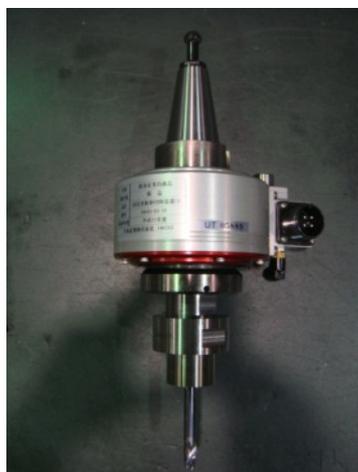


図1 超音波回転振動装置

## 2-4 加工用工具の開発(1) CFRP板材に対する穴あけ加工(1)

### 2-4-1 ドリル

2段角ドリルが4種類、1段角ドリルが3種類の計7種類のドリルを使用した。

### 2-4-2 実験条件

一つのドリルに対して切削速度 50、100、150m/min の三種類、回転送りを 0.010、0.025、0.050mm/rev の三種類を選定し計 9 条件で加工を行った。しかし超音波回転振動装置を使用する際は、推奨回転数を遵守しなければ回転振動がドリル先端まで効率的に伝播しないことや、高速回転によって断続切削が行われなくなるために、切削速度は推奨の 20m/min のみで行った。送り速度は 0.010、0.025、0.050mm/min の 3 条件を用いた。ドリルには2段角ドリルを使用した。

### 2-4-3 実験結果

#### 2-4-3-1 CFRP 穴あけ時のスラスト力の傾向

アルミ合金を穴あけした際には一定周期がない振動が観測される。しかし CFRP を穴あけした際には、周期的に推移するスラスト力が観測される。なおドリルが 360° 回転する間に2回のピークが発生する。被削材は一方向材を擬似等方に積層しており切削を行う際外周刃は、ある一定配向方向の層を切削しているために、繊維を切断する際にスラスト力が変化していると考えられる。切削温度測定の際における穴抜け際の熱動画から穴あけ加工時に、創成する円が対角の二点で温度が高くなっていることが確認できており、複合材特有の繊維配向方向の影響だと考えられる。

#### 2-4-3-2 スラスト力

一つの条件につき 3 穴の加工を行い平均したものをスラスト力とした。いずれの条件においてもグラフは右肩下がりになっており、切削速度は速い方がスラスト力は小さくなる傾向があることがわかる。また回転送りは少ない方がスラスト力は小さくなる。しかし、2段角ドリルを用いた場合、あまり回転送りの影響は見られない。

スラスト力が小さくなる最適なドリル形状は2段角ドリルである。スラスト力は切削速度 150m/min、送り 0.010mm/rev の条件で最も小さい。先端角が同じ角度である1段角ドリルと比べても、スラスト力は小さくなっている。外周角が 270°の2段角ドリルは、加工力を相殺することによってスラスト力を軽減していると考えられる。

### 2-4-3-3 超音波回転振動の効果の検証

超音波回転振動を付加した際のスラスト力は、回転送りが大きくなるにつれて、低下傾向を示す。また、いずれのドリルにおいても、回転振動を付加することによってスラスト力は低下している。

通常の穴あけ加工に比べて回転速度を高くできないために加工時間を短くすることはできないが、高精度かつ製品不良が許されないような加工が求められる場合には有用な加工方法となる可能性がある。

### 2-4-3-4 切削温度測定

各ドリルにおける抜け際の切削温度と切削速度の関係は、いずれのドリルにおいても回転送りが大きいほど、切削温度は低くなっている。通常の金属切削では、塑性変形を伴う切屑生成がなされ、熱エネルギーへと変わる。このひずみ速度が速いほど温度は上昇するために回転送りが大きい条件では切削温度が高くなるのが一般的である。しかし CFRP を被削材とした場合では全く異なる傾向を示す。炭素繊維は破断による破壊が支配的であり塑性変形を伴わない可能性があり、塑性変形エネルギーが小さいことが要因として考えられる。また、外周角が  $190^\circ$  の 2 段角ドリルなど切削速度を高くしても温度が低下している結果も見られる。これは CFRP の熱伝導率の低さ ( $1.0\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) と送り速度が関係していると考えられる。送り速度が高くなると十分に熱伝導される前に切削が行われ、熱は排出性の良い切り屑と一緒に排出される。回転送りを一定とした場合、切削速度を速くすると、送り速度も速く設定するために、切削速度を速くしても切削温度は横ばいもしくは低下していると考えられる。加えて CFRP は切り屑排出性が良く切削によって生じた摩擦エネルギーや変形エネルギーは切屑と一緒に排出され、工具への熱伝導は少なくなっている可能性がある。

### 2-4-3-5 デラミネーションの評価

複合材で問題とされるデラミネーション(層間剥離)の評価について述べる。デラミネーションは層と層の間の接着力よりも加工する際のスラスト力が上回った際に層間に剥離が生じる。剥離の他にも繊維の突出や、繊維の突出にともなう欠けが加工面品位として問題とされている。穴あけに発生するデラミネーションの生成機構は、入口側では主にねじれ角の影響で少なからず層を持ち上げる力が存在する。上面層ではバックアップ材がないために入口側に、欠けが生じやすい。また出口側ではさらにデラミネーションが発生しやすく、

スラスト力により最下層が押し出されることにより発生するものである。これらの欠陥を Deramination factor  $F_d$ , 面積を式に考慮した  $F_{ad}$  から評価を行う。式 3.1 に Delamination factor を式 3.2 に Adjusted delamination factor を評価するため式を示す。

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D} \quad (\text{式 3.1})$$

$$F_{ad} = F_d + \frac{A_d}{A_{\max} - A_0} (F_d^2 - F_d) \quad (\text{式 3.2})$$

$D_{\max}$ :欠陥最大半径,  $A_{\max}$ :欠陥最大円面積,  
 $D_0$ :穿孔の実測径,  $A_0$ :穿孔の実測面積,  $A_d$ :欠陥面積

いずれの条件においても回転送りが大きく切削速度が速い方が  $F_d$ ,  $F_{ad}$  は大きい。スラスト力は切削速度、回転送りを大きくしても、横ばいもしくはやや下降傾向であった。1段角ドリルにおいては他の2段角ドリルに比べて大きい  $F_d$  を示した。Φ6 に対してΦ8 までの最大欠陥半径を評価した際に  $F_d=1.33$  となり、不良穴となる。その他のドリルに対してはいずれの条件に対しても不良穴とはならない。中でも外周角が 190°の2段角ドリルは、送り、切削速度が共に速い条件においても  $F_d$ ,  $F_{ad}$  は上昇せず穴は良好であり、適正なドリル形状をしている。外周角が 190°の2段角ドリルは外周角が 180°以上であり半径方向、外周側への分力が少なく、また先端角と外周角で切削力を相殺していることが考えられる。

## 2-5 加工用工具の開発(2) CFRP板材に対する穴あけ加工(2)

### 2-5-1 ドリル

2-4の加工用工具の開発の実験結果より良好であった2段角ドリル「85°-270°」を使用した。

### 2-5-2 実験条件

切削速度を 200、250、300m/min、送りを 0.1、0.2、0.3mm/rev とそれぞれ 3 種類設定し、それらを組み合わせて9種類の切削条件で、加工実験をした。

### 2-5-3 実験結果

(1) スラスト力は、切削速度 300m/min、送り 0.1mm/rev、または、0.2mm/rev の時に小さくなる。

- (2) 穿孔評価の結果、300m/min、0.1mm/rev では出入口共にバリ、デラミが発生せず、良好な穿孔ができていた。
- (3) 穴径、穴面粗度は、どの条件でも穴径公差内と航空機用一般的要求加工面粗さ Ra4.8  $\mu$ m 以下を満たすことができた。
- (4) 工具磨耗は切削速度 300m/min、送り 0.1mm/rev が最も少なくなった。(送り 0.3mm/rev では各切削速度とも刃先が破損した)
- (5) 加工温度は、2段角ドリル「85°-270°」、切削速度 300m/min、送り速度 0.1mm/rev での加工中の温度を計測し、従来データと比較した。昨年度結果の 172.2°C から 105.4°C に低減された。
- (6) 工具寿命は、従来データの 20 穴から 100 穴以上と向上させることができた。

## 2-6 加工用工具の開発(3) CFRP+Ti重ね板に対する穴あけ加工

### 2-6-1 ドリル

2段角ドリルの先端角を 100° から 160° (10° ピッチ)まで変化させた7種類のドリルを使用した。

### 2-6-2 実験条件

切削速度を 25、50、75m/min、送りを 0.01、0.05、0.1mm/rev とそれぞれ 3 種類設定し、それらを組み合わせて9種類の切削条件で、加工実験をした。

### 2-6-3 実験結果

- (1) スラスト力は、CFRP 部の切削動力には大きな差は見られないが、チタン部の切削時において、先端角が大きくなるほど、小さくなる傾向があった。また、チタン部加工時は切削速度 25m/min、送り 0.01mm/rev の条件(速度最少、送り最少)の時に、最も小さくなった。
- (2) 穴径、穴径差は、全ての条件で「0.05mm」以内であった。先端角 150°、切削速度 25m/min、送り 0.01mm/rev の時に最も良好な結果であった。
- (3) 穴面粗度は、どの切削条件、先端角度でも目標値の「Ra 4.8  $\mu$ m 以内」を達成することができた。
- (4) ドリル磨耗は、比較的損傷が顕著に現れる肩の部分(図2参照)に着目し、5穴の加工後のデータで評価を行った。

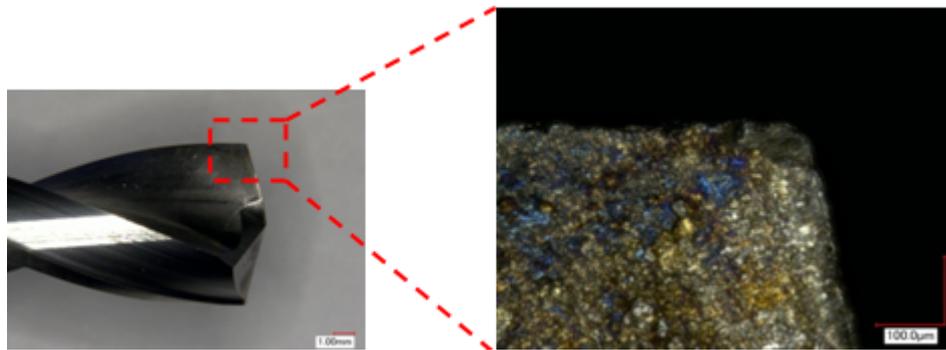


図2 ドリルの肩の部分

切削速度と、送りを上げると損傷が大きくなって行くことが確認できた。これは、どの先端角でも切削速度 25m/min、送り 0.01mm/rev の条件で、最も磨耗量が少なくなり、正常磨耗であった。その中でも 140°、150°での磨耗量が特に少なかった。

(5) ドリル寿命は、60 穴加工時において、十分な穴品位を保つことができ、60 穴以上の加工が可能であることが確認できた。

(6) 超音波回転振動の有効性

切削速度を 25m/min、送りを 0.01mm/rev、超音波回転振動付加の条件で、スラスト力を低減し、工具磨耗を抑制することができ、CFRP +Ti 重ね板加工には有効であることが確認された。

## 2-7 集塵装置の試作機開発

### 2-7-1 概要

航空機用部材とする CFRP とチタン合金との組合せは電蝕が起こりにくく、その接合部では重ねあけの要求が高い。それにあわせ、穿孔加工時に集塵を行う際にはチタン合金と CFRP の切屑が混在する粉塵を効率よく集塵するとともに分別回収する必要がある。そこで、本研究ではサイクロン集塵方式を用いて集塵を行いながら異種素材を効率よく分別回収することを一つの目的としている。さらに、集塵効率を向上させるためサイクロンを直列に接続した2段式サイクロン集塵装置を構成し、効率良く集塵できる組み合わせを明らかにする。

### 2-7-2 2段式サイクロン集塵装置

図3に装置の概略図を示す。

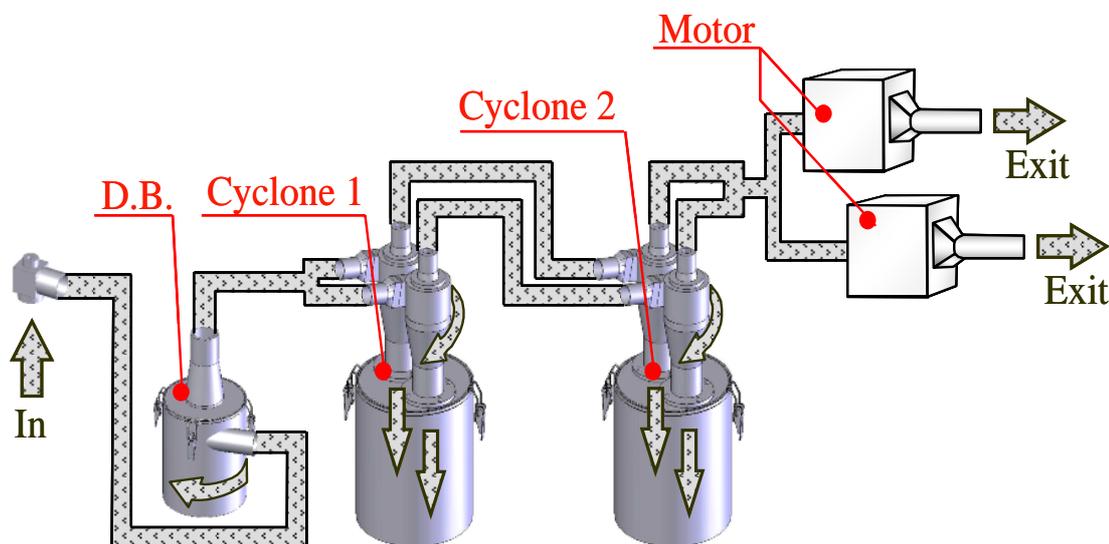


図3 2段式サイクロン集塵装置(概略図)

### 2-7-3 粉塵密度測定

集塵機の排気における粉塵密度を測定した。集塵機の排気を袋内に収集し、その袋内の空気を装置に吸引させることにより粉塵密度を測定した。1段式の集塵装置に比べ、2段式の集塵装置は大幅に粉塵密度を抑制できていることがわかった。粉塵密度について室内環境基準値は  $0.15 \text{ mg/m}^3$  であるが、2段式の集塵装置の排気は  $0.036 \text{ mg/m}^3$  であり、基準値をクリアすることができるという結果が得られた。

#### 2-7-4 切屑の観察

粒径分布および粉塵密度の測定結果より良好な結果が得られた2段式サイクロンを用いた条件において、ダストバンカ内、前方のサイクロン内、後方のサイクロン内の切屑の様子をそれぞれ観察した。

ダストバンカでは、チタンの切屑、大きな粒径の CFRP の切屑が収集できていることが分かる。前方のサイクロン及び後方のサイクロンでは、少量の CFRP の切屑しか見られないが、拡大した写真より、粒径の比較的大きなものほどダストバンカや前方のサイクロン等早い段階で収集できていることが分かる。

#### 2-7-5 実験結果

- (1) 2段方式サイクロン集塵装置を用いることで、粉塵密度が  $0.036 \text{ mg/m}^3$  となり、室内環境基準(「 $0.15 \text{ mg/m}^3$ 」以下)を満足させることが出来た。
- (2) 比重の違いを利用した分別を目標で研究を行ったが、今回の研究では分別することは出来なかった。
- (3) 集塵先端部は集塵効率 99%以上達成できたと考える
- (4) ダストバンカではチタンの切屑、大きな粒径の CFRP の切屑が収集できていることが分かる。前方のサイクロンおよび後方のサイクロンでは少量の CFRP の切屑しか見られないが、拡大撮影した写真より、粒径の比較的大きなものほどダストバンカや前方のサイクロンなど早い段階で収集できている

### 3 全体総括

CFRP に対する超音波回転振動加工の有効性を確認した上で、その有効性を有効に活用すべく工具形状追求と集塵システムの研究を行った。本委託研究が実施される 1 年前に富士工業(株)が自費開発した超音波回転振動装置により初年度には、CFRP の穴あけ加工において直径 8 ミリ以内の加工では、デラミネーション発生を著しく低下できる加工手法であることを確認できた。同時にアドバイザーの富士工業(株)は本成果を示しながら機械固定タイプでない、ハンディータイプの超音波回転振動穴あけ装置を機体組立て会社に売り込む営業活動を行う際に本研究成果がその一助となった。また、2、3 年目には超音波回転振動装置をより効果的に活用できるよう、数十種類の異なる先端形状のドリルを製作し、各種実験条件の下で、その有効性を研究開発してきた。本事業で入手した温度計、動力計、高速度カメラ、拡大カメラを駆使することで一見した工具磨耗や完成した穴からは判断できない合理性を確認でき、短時間で相当数の実験を同時に評価することができた。この成果から評価された適正と思われるドリルには、JAXA 様をはじめ複数の航空宇宙製品開発会社様からの共同研究の申し出を受けて、平成 24 年度の事業化を目指して準備を進めている。

研究 2 年目には航空機用高強度 CFRP 素材に 1000 穴以上の加工を行い、東京農工大様による評価から 2 件の論文、国際学会発表につながる成果を得た。内容は開発ドリルによる穴の貫通する瞬間に関する評価であり、デラミネーションの発生プロセスを丁寧に説明することができた。

研究 3 年目はより実用に近い、CFRP とチタン板同時穴あけ加工に最適な手法の研究として、開発した各種ドリルと超音波回転振動付加を含む加工条件を追及した。その結果、一般的な超硬素材で製作された特殊ドリルと超音波回転振動付加で異材の同時加工が問題なく行えることを確認、証明をした。

また、1 年目には超音波回転振動の評価と基本的な各種ドリル形状を数種類準備して研究の方向性を示したが、同時に CFRP の粉塵問題を解決すべく加工点から直接集塵する機構を開発した。2 年目以降には吸気集塵した粉塵をサイクロン方式による分別の可能性を探る研究を行った。室内環境基準を満足させる集塵は達成できたが、混在する異種材料の分別回収を追及した CFRP とチタンの分別には至っていない。

B787 の機体組立て会社を狙い、当時最大の問題であった穴あけドリルの長寿命化、コスト低減に対して具体的に、コーティング無しの超硬ドリルに振動を付加することで、ダイヤモンドコーティング工具と同等の加工寿命が得られることが確認された。しかし、この 3 年の間

に工具単価が格段に安くなり、再研磨技術の向上と穴あけ加工条件の開発で本研究との格差はほぼなくなっている。また、研削による穴あけ加工補助など新しい技術との競合となり、ハンディータイプの振動装置が高価であることもあって、この業界で本研究により開発されたドリルは、実用には至っていない。しかし、同業種であるロケット部品、衛星部品、エンジンカバー部分(ナセル)のメーカーから問い合わせと共同研究の申し出があった。こちらは 穴数は少ないが、種類が多く本研究の基礎データを利用することで試し作業の短縮など実用化に直結できている。本研究の基礎データを利用して、デラミネーションだけでなく、X線検査でしか判明できない剥離等を起こさない加工工程確立して、穴あけ加工工程として特殊工程化することにより、品質保証できることである。今後、工具販売ではなく、委託作業により品質保証システムとして実験データを基礎とする工程の明確化による品質、安心を提供できる商品となることを期待している。特に、本研究の基礎データに基づいて特定されたドリル形状や超音波回転振動付加による加工条件が、CFRP に熱による素材変質等の大きな付加を掛けずに品質の安定した穴あけ加工を可能にする。これが、大量生産を目指す製品加工工程における CFRP 加工の作業標準として、製品の強度を保証できることになると推察できる。

東京農工大様の研究室と研究を継続し、連続した成果を学会発表する素地が本事業により生まれたと評価できるため、航空機業界に限定しない委託作業を通じた開発工具の利用と、特殊工程化された委託作業の充実を業界下請けにもたすものと確信している。

集塵装置の開発に関して、サイクロン式分別を重ねることで CFRP の切屑回収は容易であり、ペーパーフィルターを必要としない事が確認された。混在する異種材料を比重で分別することは難しいが、サイクロン式集塵装置で切屑サイズの分別は容易であった。本装置はすぐに実用化可能であるが、混在する異種材料の分別回収を達成しないと意義が少ないためもう一段の研究を継続することになっている。

本研究の課題は、目まぐるしいほどに変化するアドバイザーの解決すべき課題の変化であった。それほどに CFRP の実用化は歴史が浅いために次々に問題が発生し、相当な速さで解決、改善がなされてゆくことは事業提案時には予想できなかった事である。新素材の新分野活用とはそのようなものであるが、今後自動車産業にむけた市場拡大は航空機産業以上の速度で変化に対応し、具現化しなくては技術の陳腐化も相当に早い。それに臨機応変に基礎データ積み上げて対応して行くことが、この 3 年間の成果を生かし続けることであると考えている。

注 本研究は、平成22年度、平成23年度の2カ年間の研究であるが、本研究に先行して実施した平成21年度補正予算による研究に引き続くものであるので、全体総括では平成21年度の研究も含めて記載している。