

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「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 22 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
1．2	研究開発体制	2
1．3	成果の概要	4
1．4	プロジェクトの管理及び連絡窓口	5

2．研究開発報告

2．1	超音波回転振動装置の適用	6
2．2	ドリル、エンドミルの開発	7
2．3	合理的なサイクロン方式の開発	11

3．研究開発報告のまとめ

		16
--	--	----

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

軽量化を目指す航空機機体技術における炭素繊維強化エポキシ樹脂（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残している。Boeing787の開発プロジェクトが遅れている事実も解決すべき問題が多岐にわたるためである。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。製造コストの定義とは、消耗品コストの削減と製作時間の短縮が主な問題に分類でき、その先には品質問題としての歩留まりなどがコスト問題に取り上げられる。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ねじり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とは単体で成型され、接着もしくはリベット、ネジ結合によって組み立てられている。リベット、ネジ結合は穴加工を行い、成型後の機械加工である。その数、飛行機主翼にして1機あたり10万穴以上であり、穴加工に使用されるドリルは現在最も有効である高価なダイヤモンドコーティングドリルを使用しても10箇所もあけることができず、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、通常の切削回転で加工を進めつつ、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ることができる超音波ねじり振動加工が有効であることを、本事業の事業認定を受けた1年前から開発を進め証明している（富士工業）。この技術が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で、振動装置から発生するであろう問題を抽出、研究し実用化を目指すこととした。

また、汎用複合機械（NCマシニング）による同時5軸加工を活用することで、ドリルに限らずエンドミルによる効率的な振動穴加工を研究し、ドリル加工との工具の合理性、品質の優位性、品質安定性の比較を研究するものとした。

穴加工を追及すると同時に、CFRP切削加工では繊維質の粉体状切り屑が発生し、人体ならびに環境面にも悪影響を及ぼすことから、集塵に関する研究を行い、集塵装置を開発することで一般的な環境下でもすぐに活用できるCFRP加工が実現できることを目指している。

1.1.2 研究の概要

本研究開発では、次の4項目に分け実施した。

1) 超音波ねじり振動装置の適用の評価（2.1項参照）

超音波ねじり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、環境維持の研究を行う。そのため、富士工業製の超音波ねじり振動装置を改造し、同時5軸加工が可能な汎用工作機械に取り付け可能とする。

2) ドリル・エンドミルの開発(2.2項参照)

6 から 12 程度の穴を狙い寸法とし、超硬素材における各種形状ドリルを製作し、機械加工を行う。また、同時5軸加工を活用しエンドミルによる穴加工も行いエンドミル形状、加工パスを研究する。

これらの各種条件によりあけられた穴について品質的優位性や問題の有無を検討し、かつ工具寿命についての比較を行う。比較対象は現在最も有効とされる高価なダイヤモンドコーティングドリルとする。

3) 集塵システムの検討・評価(2.3項参照)

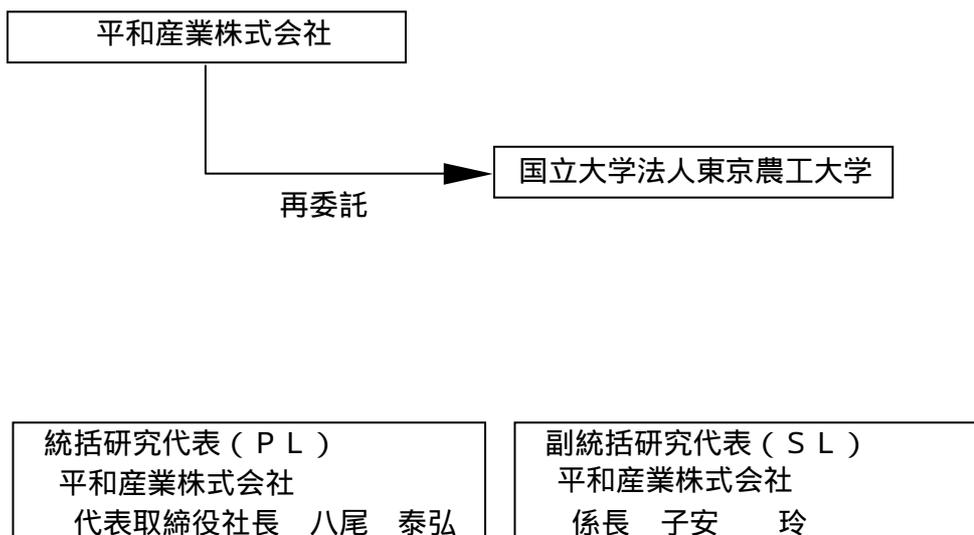
穴加工を追及すると同時に集塵に関する機器開発、条件研究を行う。主要な工法としてドリルやエンドミルの軸心に穴をあけ軸中心から吸引する仕組みを開発する。

4) 合理的なサイクロン方式の調査(2.4項参照)

メッシュによるフィルターは最終工程とし、可能な限りサイクロン方式の集塵効果を追求し、どのような組み合わせが有効であるかを研究する。判断要素として塵の単位あたりの存在密度分布で判断をする。

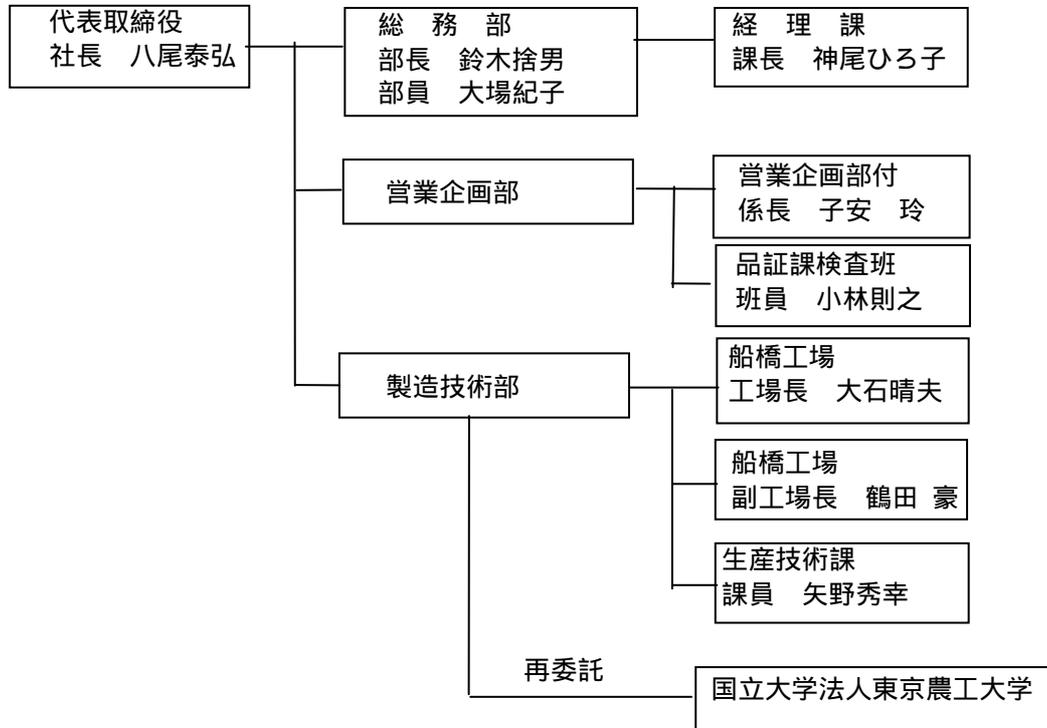
1.2 研究開発体制

1.2.1 研究組織(全体)

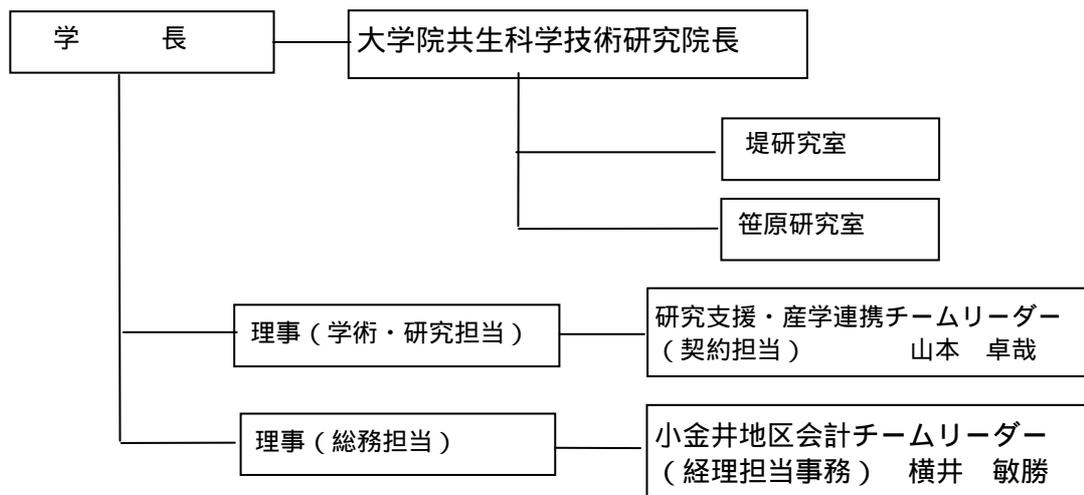


1.2.2 管理体制

1) 事業管理者
平和産業株式会社



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 超音波ねじり振動装置

超音波ねじり振動装置の汎用複合機械(NC マシニング)への組込と工具取付は振動装置製造会社を実施し、特に問題なく設置ができ加工することができた。

1.3.2 ドリル・エンドミルの開発

1)板表面穴縁仕上り

単一形状ドリル、複合形状ドリルともに良好な結果を得られた。

2)板裏面穴縁仕上り

複合形状ドリルA型(140-85度)の切削速度20m/分、振動ありの条件にだけ良好な結果を得られ、市販のCFRPドリルでは良好な加工条件が見つからなかった。

3)工具摩耗

単一形状ドリルと複合形状ドリルを比較した場合、複合形状ドリルの方が摩耗の少ない結果を得られた。ドリル形状に依らず切削速度に影響を受け、20m/分の低速は100-150m/分の高速と比べ摩耗が多い傾向を得られた。

4)穴径の精度

各条件で58穴の加工を行い、精度の良い加工を行うことができた。

5)穴内面の粗さ(面粗度)

単一形状ドリルでは穴あけ回数に比例して粗さが増していった。複合形状ドリルでも航空機用一般的要求加工面粗さの4.8 μ mRa内を満たしており、複合形状ドリルB型(140-90度)振動ありの条件が最も良好な加工面であった。しかし、同一の穴でもCFRPの繊維配向方向により面粗度に差が表れることが判明した。

1.3.3 集塵システム

良好な集塵部(吸気口)形状を確立できた。

集塵能力とメンテナンス面からフィルター式よりもサイクロン式の方が優れていることが確認できた。

1.3.4 合理的なサイクロン方式の調査

2段式サイクロン集塵方式は集塵部流速が複数となるため流速に対応した粒子サイズ(重量)に選別できる効果があり、加工対象の分別集塵ができる可能性があることを確認できた。

1.4 プロジェクトの管理及び連絡窓口

事業管理者

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
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. 研究開発報告

2.1 超音波ねじり振動装置の適用

2.1.1 超音波ねじり振動装置の仕様を以下に示す。

製造会社：富士工業株式会社

装置名称：超音波ねじり振動切削装置 ダクテュロイ FUM-1 Model-1002
S-S5001ERH(C)/S-M1002DH

装置型番：UT5889/UE6499

本装置は弊社仕様を次の加工機械に設置することとし、機械への組込要領および工具の取付条件を満足する仕様として選定したものである。

加工機械仕様

製造会社：OKK 社

機械名称：マシニングセンタ

機械型番：VM4-

超音波ねじり振動装置の機械への組込、工具取付については弊社工場において振動装置製造会社が実施し、特に問題なく設置ができ加工に供することができた。

超音波ねじり振動装置の写真を図-2.1-1 に示す。

同装置の機械への組込状態の写真を図-2.1-2 に示す。

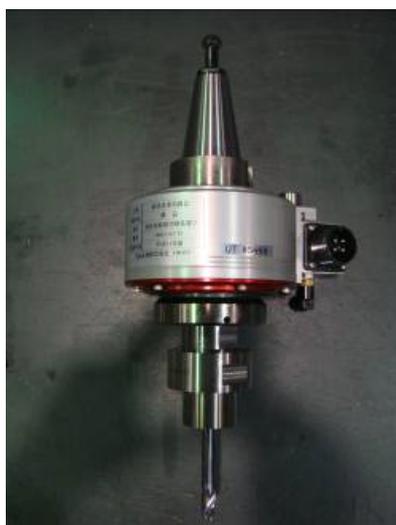


図-2.1-1



図-2.1-2

2.2 ドリル・エンドミルの開発

ドリル・エンドミルの開発は概略以下の項目・手順で実施した。

- 1) CFRP 用ドリル、エンドミルの形状調査と開発形状の設定
- 2) 各ドリル、エンドミルによる試験板への穴加工の実施と調査、計測
試験パラメータを以下とした。
 - ・ドリル径
 - ・先端形状
 - ・加工速度
 - ・超音波ねじり振動の有無
- 3) 試験結果データの整理・評価
評価項目を以下とした。
 - ・板表面穴縁仕上がり
 - ・板裏面穴縁仕上がり
 - ・工具摩耗位置と摩耗量
 - ・穴径の精度
 - ・穴内面の粗さ（面粗度）
- 4) 各項目の評価 まとめ

2.2.1 開発形状ドリルの設定

CFRP 加工工具の開発における基本的要件を以下に示す。

CFRP は積層材であるため、加工入口（表面）出口（裏面）でバリ、デラミネーション^{*1}（デラミ）、スプリングリング^{*2}が起きにくいこと。

加工穴の寸法にばらつきが少ない（真円に近い）こと。

加工面粗度が航空機用一般的要求加工面粗さ $4.8\mu\text{mRa}$ 以下であること。

従来品より摩耗が少ない（寿命が長い）こと。

注*1：多層構造で層が剥がれること、層間剥離

*2：繊維が切断されず穴の周りに残っている状態のこと

2.2.2 試験パラメータと試験実施

前項に記したドリル形状の試験条件に加え、加工時の条件、パラメータについて前項同様に CFRP 用市販工具の加工条件を参考に次の如く範囲を定め設定した。

1) 切削速度

最大 150m/分とし

20m/分 100m/分 150m/分 の 3 条件とした。

2) 送り

最大 0.1mm/1 回転 (rev) とし

0.05 mm/rev 0.1 mm/rev の 2 条件とした。

3) 超音波ねじり振動

有 無 の 2 条件とした。

4) 試験板・加工厚さ

加工としては共通のものとなるが以下に示す。

種類 : CFRP(汎用プリプレグ)

厚さ : 14 mm(0.25mm/Ply*60Ply 層)

幅、長さ : 500×500 mm

積層方向 : 0 度 90 度 交互

5) 加工形状・穴

6mm または 12mm ・ ・ 加工ドリル寸法による。

以上の試験条件 (ドリル形状、加工パラメータ) に基づき、同一加工条件にて 58 穴の穴加工を行ない、1 試験データ単位として収集、開始することとした。

2.2.3 試験結果データの整理・評価

2.2.3.1 穴表面の仕上り(表裏)

1)表(上面)

評価結果 (注 :良好 :ほぼ良好 x :不適 - :実施なし)

加工条件 切削速度(m/分)	超音波振動無し			超音波振動有り		
	150	100	20	150	100	20
6 単一形状ドリル 85°			-	-	-	
6 単一形状ドリル 140°	x	x	-	-	-	x
12 単一形状ドリル 85°			-	-	-	
12 単一形状ドリル 140°	x	x	-	-	-	x
6 複合形状ドリル A 型	x	x	x	-	-	x
6 複合形状ドリル B 型				-	-	

2)裏(下面)

評価結果 (注 :良好 :ほぼ良好 x :不適 - :実施なし)

加工条件 切削速度(m/分)	超音波振動無し			超音波振動有り		
	150	100	20	150	100	20
6 単一形状ドリル 85°	x	x	-	-	-	x
6 単一形状ドリル 140°	x	x	-	-	-	x
12 単一形状ドリル 85°	x	x	-	-	-	x
12 単一形状ドリル 140°	x	x	-	-	-	x
6 複合形状ドリル A 型			x	-	-	
6 複合形状ドリル B 型	x	x	x	-	-	x

注：超音波振動有りの切削速度 150m/分、100m/分は機械仕様の制約から実施不可。

3) 工具摩耗

1) 摩耗の評価要領

工具の摩耗評価は先端部、刃中央部、刃側面部の磨耗幅を測定し評価を行った。

2) 評価

6 と 12 の単一形状ドリルでの加工距離と摩耗量の関係はほぼ同じでだった。
複合形状ドリルのグラフ傾きは約 60% 低く、摩耗が少ない傾向が得られた。
計測位置では刃の中央部がいずれも摩耗が多かった。

刃の中央部で比較した場合、摩耗量が少ない条件は次の通りである

切削速度 : 高速 (100-150m/分)

先端角 : 85 度

ドリル形状 : 複合形状ドリル B 型 (140-90 度)

2.2.3.2 穴径の精度

1) 評価

各条件で 58 穴の加工を行い、精度良い加工が確認できた。

切削速度 20m/分の低速、振動ありでは先端角 140 度 6、12 共に径の 50 μ 小さいものを使用したために穴径が小さくなってしまった。

通常のドリル加工と同じく穴数が増えるにつれ穴径が小さくなっていき、超音波ねじり振動装置を使用しても、その傾向は同様であった。

2) データ

6 単一ドリル : 図 2.2-3 に示す。

12 単一ドリル : 図 2.2-4 に示す。

6 複合ドリル : 図 2.2-5 A・B に示す。

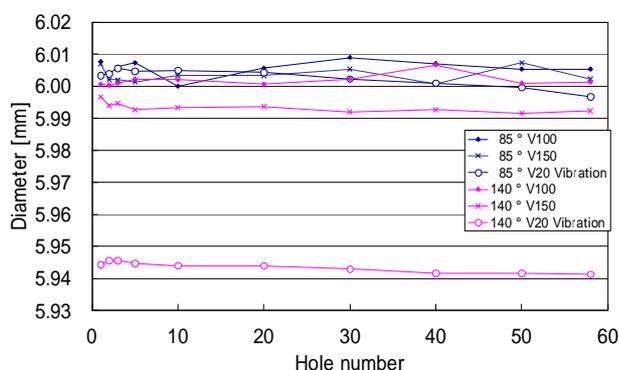


図 2.2-3 : 6 単一形状ドリル

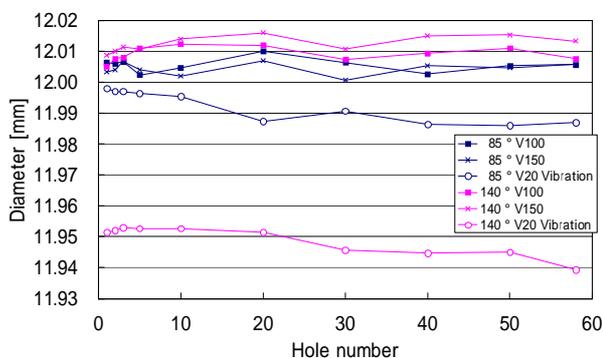


図 2.2-4 : 12 単一形状ドリル

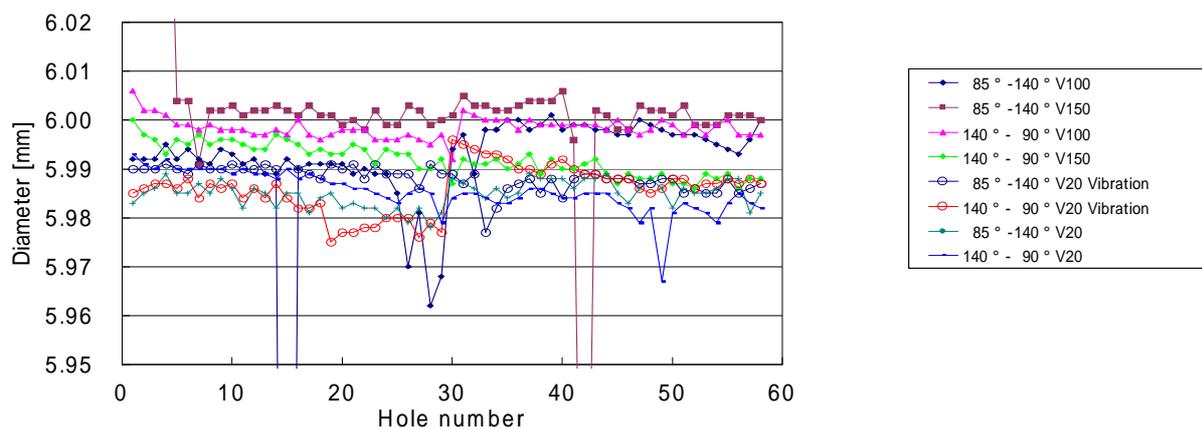


図 2.2-5A : 6 複合形状ドリル (入口側)

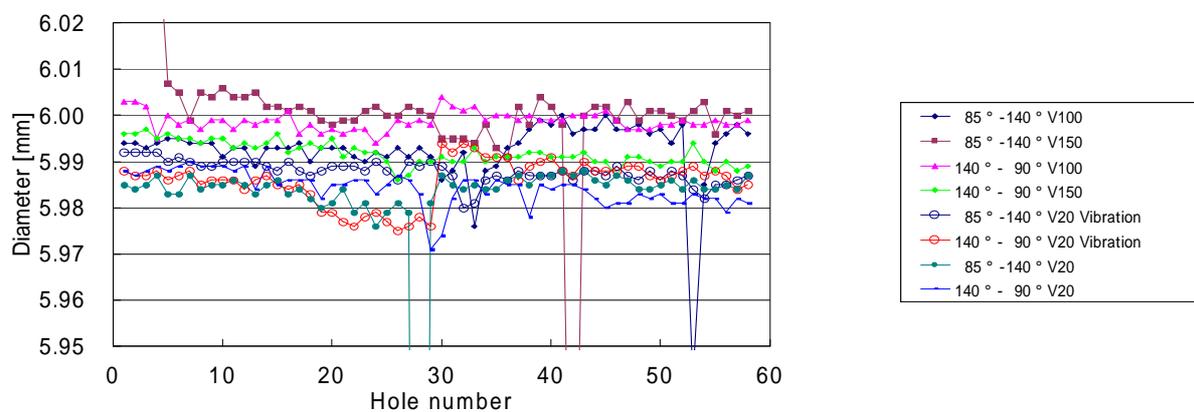


図 2.2-5B : 6 複合形状ドリル (出口側)

2.2.3.4 面粗度

1) 評価要領

穴内部の航空機用一般的要求加工面粗さ $4.8 \mu\text{mRa}$ 以下を評価の基準とする。

データは 5 回とり、最大・最小を取り除いた平均値を面粗度とした。

2) 評価

58 穴の加工において単一形状ドリルでは穴あけ回数が増えると粗さは増加していくことが確認できた。

同一の穴でも CFPR の繊維配向方向により粗さに差が表れることが確認できた。

複合形状ドリルでも航空機用一般的要求加工面粗さ $4.8 \mu\text{mRa}$ を満たした。

複合形状ドリル B 型 (140 - 90 度) 振動ありの条件がもっとも良好な加工面であった。

2.3 合理的なサイクロン方式の調査

2.3.1 概要および成果

1) 概要

本試験では 1 段式サイクロン集塵方式と 2 段式サイクロン集塵方式の集塵能力の比

較を行い評価した。

2) 成果

HEPA フィルターを使用せずとも 1 段式、2 段式どちらも室内環境基準は満たしており優れた効果を確認できた。

2 段式は集塵部流速が複数となるため流速に対応した粒子サイズ(重量)に選別できる効果があり、加工対象の分別集塵の可能性が期待できることを確認できた。

2.3.2 試験条件

1) 試験条件を以下に示す。

表 2.3-1 Experiment Conditions

Machining operation	Drilling (dry)
Cutting tool	2 flute solid carbide drill
Diameter (mm)	10
Point angle	140°
Helix angle	25°
Tool overhang (mm)	80
Cutting speed (m/min)	100
Feed rate (mm/rev)	0.05

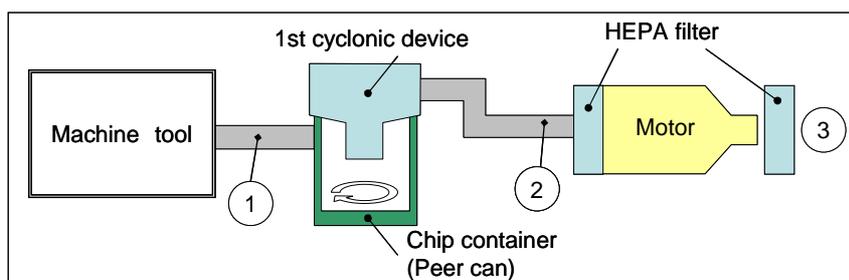


図 2.3-2 1 段式サイクロン集塵方式

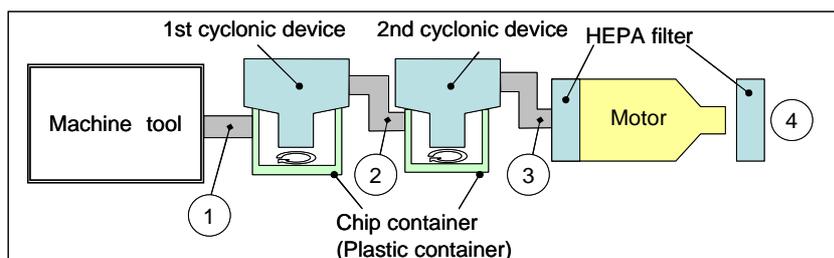


図 2.3-3 2 段式サイクロン集塵方式

サイクロン機構出口付近では流速が一定でないことから、サイクロン通過後の測定点は十分離れた流速が一定となる地点で測定した。

2) 装置

円筒状の切り屑入れには大きいサイズのペール缶と軽いプラスチック製の容器を用いている。容器は吸引開始と同時に容器内の気圧低下により密閉される仕組みになっている。2 段式サイクロン集塵方式を用いた場合、フロアから遠いサイクロン装置では圧力が損失するため、容積が大きいペール缶を用いると切削点付近の吸込口で流速が小さくなり性能評価ができないという問題が生じた。そのため図 2.3-4 に示す容積が小さいプラスチック製の容器を 2 つ用いた。



(a) ペール缶

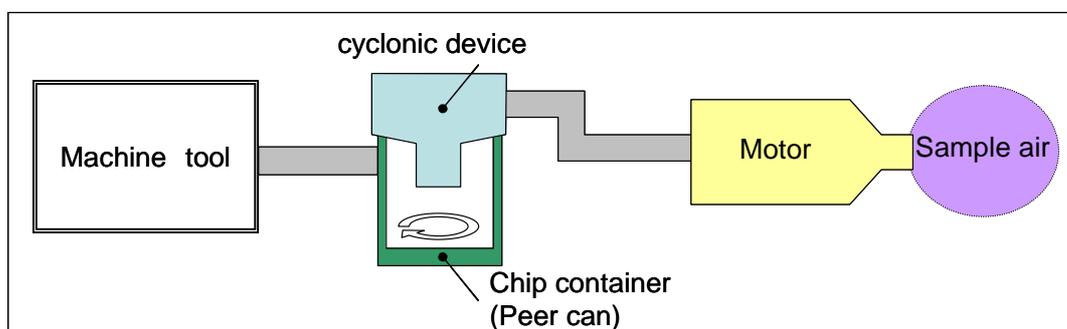
(b) プラスチック容器

図 2.3-4 切り屑入れ

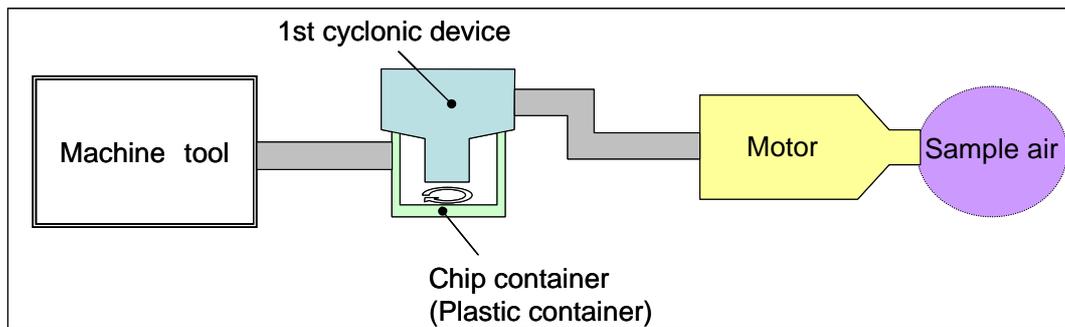
2.3.2 試験条件

1) 粉塵密度

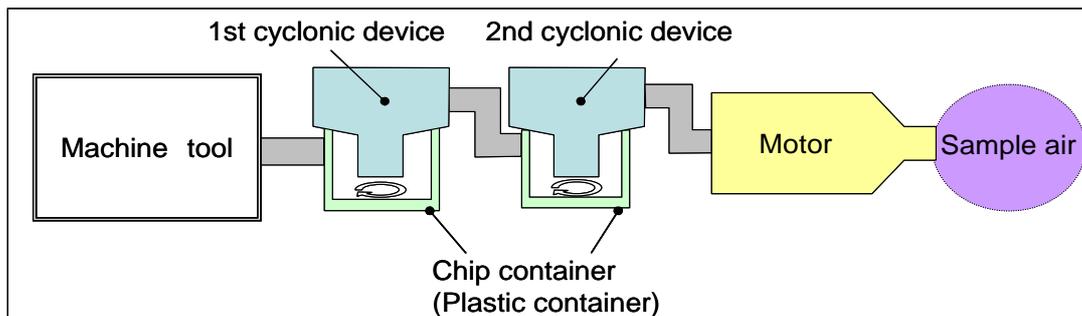
排気された空気を採取し、ピエゾバランス粉塵計を用いて空気中に排出された塵の密度の測定を行った。以下にセットアップを示す。なお、HEPA フィルターは使用していない。



A-1 ペール缶を用いた 1 段式サイクロン集塵方式



A-2 プラスチック容器を用いた1段階サイクロン集塵方式



A-3 プラスチック容器を用いた2段階サイクロン集塵方式

図 2.3-5 配置図

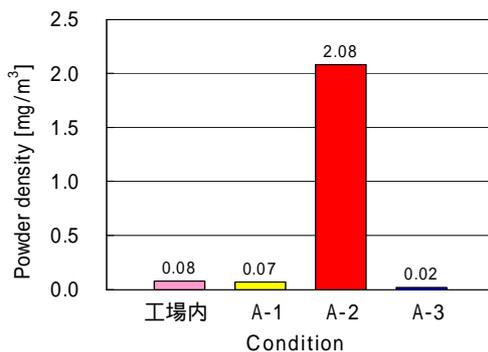


図 2.3-6 粉塵密度

2) 粒径

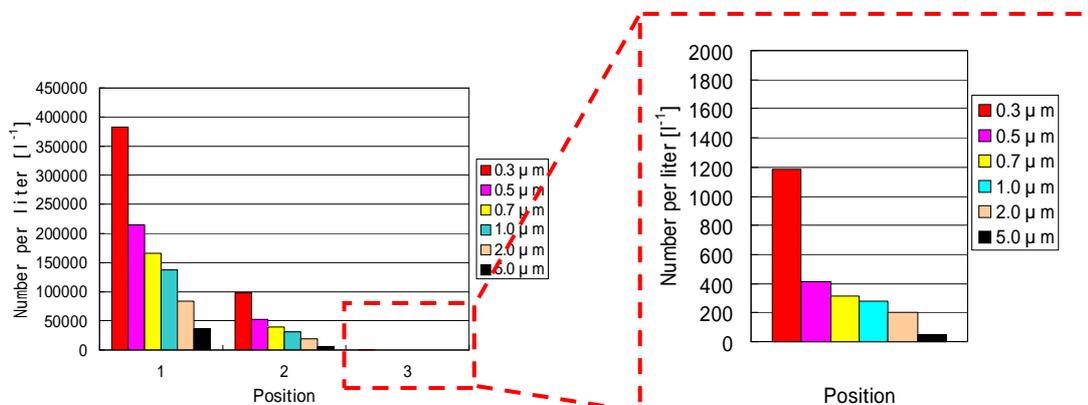


図 2.3-7 1段階サイクロン集塵方式

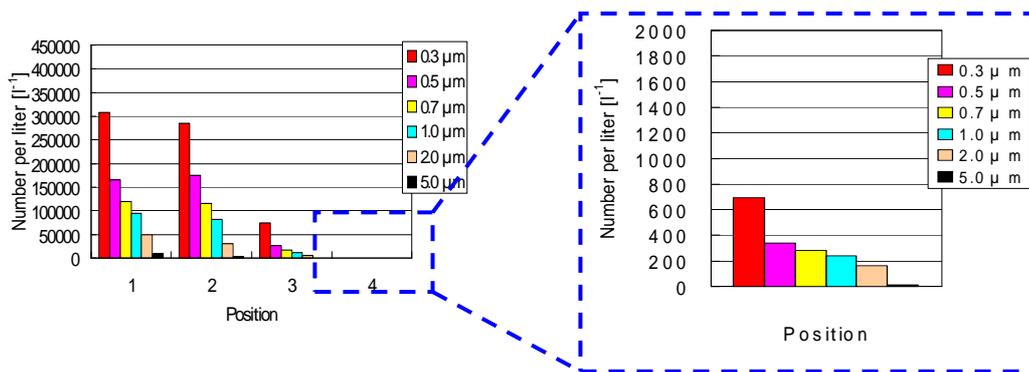


図 2.3-8 多段フィルター式集塵方式

2.3.4 考察

1 段式サイクロン集塵方式から 2 段式サイクロン集塵方式にした場合、サイクロン機構部の円筒容器(ペール缶)に同じ容積のものを単純に 2 つ用いると、流速が低下してしまうことが判明した。1 段式と 2 段式で容積が異なる容器を使用したために一概に比較することはできないが、図 2.3-6 の排気された空気中の粉塵密度の結果から、1 段式よりも 2 段式の方が粉塵を取り除けていることがわかった。また、容器は適度な大きさでないと取り除けないことも明らかになった。

2 段式を用いた場合、最初に粉塵が入るサイクロン機構で大きな粒子を取り除くことができ、2 つ目に入るサイクロン機構では細かい粒子の粉塵まで取り除くことができた。今回ペール缶を用いたように、1 段式で集塵を行う場合には 2 段式よりも大きい容器を使用することでより効果を発揮することがわかった。また 2 段式を用いた場合アルミと CFRP、チタンと CFRP といった異種材料の加工を行った場合に切り屑の重さの違いを利用して分別集塵ができる可能性が確認できた。

図 2.3-7, 図 2.3-8 より, HEPA フィルターを通すことによって排気される空气に粉塵は全く含まれない事は既知であるが、測定結果の数値は周辺の空气を巻き込んだためと思われる。HEPA フィルターを使用せずとも 1 段式、2 段式どちらも室内環境基準は満たしており、優れた効果を発揮した。ただし容器の大きさ、形状などを考慮する必要がある。

3. 研究開発報告のまとめ

本報告での成果をまとめ以下に示す。

3.1 超音波ねじり振動装置の適用

超音波ねじり振動装置の機械への組込、工具取付については弊社工場において振動装置製造会社が実施したが、問題なく設置ができ加工に供することができた。

3.2 ドリル、エンドミルの開発

1) 板表面穴縁仕上がり

単一形状ドリル、複合形状ドリルともに先端角の鋭い場合に良好な結果が得られ、裏面穴縁仕上りと比べ良好な加工条件範囲が広いといえる。

超音波ねじり振動付加による効果は少ないことが確認できた。

2) 板裏面穴縁仕上がり

良好な加工条件範囲は狭かった。

複合形状ドリル A 型 (140-85 度)、切削速度 20m/分の低速、振動ありの条件にのみ良好な結果が得られた。

市販 CFRP ドリルでは良好な加工条件は見つからなかった。

3) 工具摩耗

単一形状ドリルと複合形状ドリルを比較した場合、複合形状ドリルの方が摩耗の少ない結果を得られた。

ドリル形状に依らず切削速度に影響を受け、20m/分の低速は 100-150m/分の高速と比べ摩耗が多い傾向が得られた。また、摩耗箇所は先端、肩と比べ中間部が大きかった。

4) 穴径の精度

各条件で 58 穴の加工を行い、精度良い加工が確認できた。

図 2.2-3 及び図 2.2-4 から切削速度 20m/分の低速、振動ありの際、先端角 140 度 6、12 共に径が 50 μ 小さいものを使用したために穴径が小さくなってしまった。傾向として、通常のドリル加工と同様穴数が増えるにつれ穴径が小さくなっていき、超音波ねじり振動を使用しても、その傾向は同様であった。

5) 穴内面の粗さ (面粗度)

58 穴の加工において単一形状ドリルでは穴あけ回数と共に粗さが増加していくことが確認できた。

同一の穴でも CFRP の繊維配向方向により粗さに差が表れるが確認できた。

複合形状ドリルでも航空機用一般的要求加工面粗さ 4.8 μ mRa を満たしていた。

複合形状ドリルB型(140 - 90 度)振動ありの条件がもっとも良好な加工面であった。

3.3 集塵システムの検討・評価

- 1)比較検討のため集塵部の試験を行ない、良好な集塵部(吸気口)形状を確立できた。
- 2)多段フィルター式は最終段に HEPA フィルターを配置しないと環境基準を満たさないことから、サイクロン式の方が優れていることが確認できた。この結果は集塵能力、メンテナンス性ともにサイクロン方式が優れているとして再評価できた。

3.4 合理的なサイクロン方式の調査

- 1)HEPA フィルターを使用せずとも 1 段式、2 段式どちらも室内環境基準は満たしており優れた効果を確認できた。
- 2) 2 段式は集塵部流速が複数となるため流速に対応した粒子サイズ(重量)に選別できる効果があり、加工対象の分別集塵が出来る可能性があることを確認できた。