

博士学位論文

「航空機用 CFRP に対する
ブラストを用いた高効率孔あけ技術の開発」

Development of high efficiency hole-preparation technology
using blast for aircraft CFRP



平成 27 年 9 月 30 日

Sep.30. 2015

国立大学法人 岐阜大学 大学院工学研究科
生産開発システム工学課程

深川 仁

Gifu University, Graduate School of Engineering
Hitoshi Fukagawa

目 次

	頁
1 章 諸 論	
1.1 CFRP について	4
1.2 国内外の研究動向	6
1.3 CFRP 加工法の比較概略	7
1.4 本研究の目的	15
2 章 航空機用 CFRP の孔あけ加工の現状とその改良手法の考察	
2.1 はじめに	22
2.2 CFRP の孔加工上の課題	22
2.3 CFRP 加工の分析	24
2.4 まとめ	34
2.5 今後の課題と展望	35
3 章 ブラストによる孔加工の基礎研究	
3.1 はじめに	36
3.2 基本理論および実験方法	36
3.3 実験結果および考察	40
3.4 まとめ	50
4 章 ブラスト加工の一般性と発展	
4.1 はじめに	52
4.2 実験装置・方法および試料	52
4.3 結果と考察	56
4.4 エロージョン摩耗モデルに基づく考察	65
4.5 まとめ	70
5 章 CFRP 板への小径孔加工におけるブラスト砥粒条件の影響	
5.1 はじめに	72
5.2 実験方法	72

5.3	実験結果	75
5.4	考察	80
5.5	結言	87
6 章	ブラストによる CFRP 複合材への小径孔加工用マスク材料の比較研究	
6.1	はじめに	89
6.2	実験方法	89
6.3	実験結果	92
6.4	考察	96
6.5	結言	100
7 章	全体まとめ	
7.1	ケーススタディ	102
7.2	ブラスト加工法と AWJ 加工法との比較	102
7.3	ブラスト加工法の工程設計への検討	108
7.4	結言	109
	謝 辞	112

1 章 諸 論

1.1 CFRPについて

航空機を中心に適用拡大が進む CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 炭素繊維強化プラスチック,) は, 軽量部材として優れた性能を有する. 今日その優れた性能を活かして, 航空機や高級車の部品, 風力発電のブレードなどにその用途は広がりつつある (図 1.1, 1.2).

しかし, その優れた材料性質とは裏腹に, 非常に難削材であることから, 切断や孔あけ加工には, 特殊な機械加工装置や刃物が必要となる. そのため, 材料費が高い上に, 加工コストも非常に高くなり, またその加工法が一般に十分普及していないこともあって, 製品が普及する上でのネックとなっている.

航空機用の CFRP の大半は, 180°C硬化のエポキシ樹脂を用いた熱硬化性 CFRP であり, 一般産業用で多く使われるものである 130°C硬化系 CFRP に比べて, 繊維や樹脂の種類が異なり, 比強度や比弾性率が一般的に高いものが使われているため, より難削材であると考えられる.

また, 航空機部品の孔の多くはファスナ結合に使われ, 品質要求も厳しい. そして, 孔加工の多くは組立作業を伴うことから, CFRP 単体ばかりでなく CFRP と金属との共孔あけ加工や, 狭い部分へのアクセスが必要な場合もあることなどから, 孔加工には, 品質, 加工コスト, そして作業性の面で, 多くの課題が存在する.

現在の一般的な CFRP の孔明けに用いる機械加工法には, 超硬やダイヤモンドなどの硬質材質を刃先に用いたエンドミル, ルータービット, ドリル, リーマなどの切削工具が主に使われるが, 価格, 工具摩耗, 切屑 (粉塵) 処理などで, まだまだ課題が多い.

一方, 切断にはダイヤモンドディスクやバンドソーなどが一般的に使われるが, 直線切りには効果的である反面, 曲線など加工形状の点で限界がある. 最近では, アブレーション・ウォータージェット (以下 AWJ と記す) が普及してきたが, 平坦面には適している反面, 複雑形状や小径孔加工にはまだ限界があるなどの課題がある. また, AWJ は切断には効率が良いが, 小径の孔明けには効率が悪い. さらに, レーザ加工, 放電加工, ブラスト加工などが現われてきたが, まだ研究段階で, それぞれ技術的な課題があり, 実用化に至っていない. いずれの加工法も, 加工効率・コスト・品質等において, それぞれ一長一短があり, 万能ではなく使用目的に応じて使い分ける事が必要と考える.



Fig. 1.1 Examples of CFRP applications for aircrafts

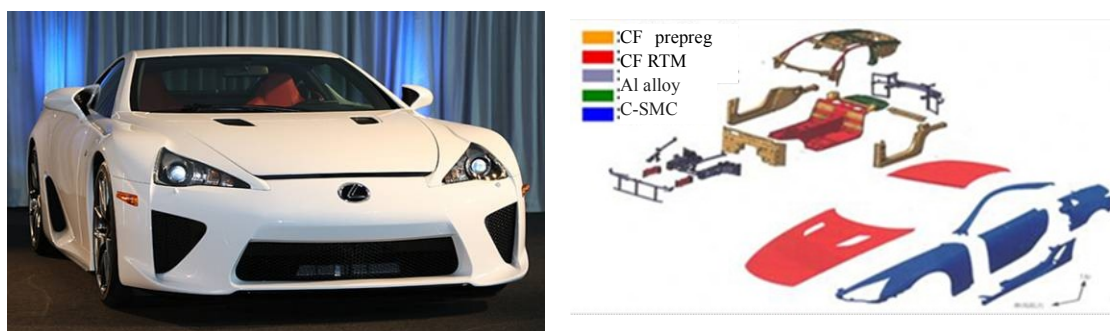


Fig. 1.2 Examples of CFRP applications for automobiles (LFA) [1]

なお、CFRP には熱硬化性（Carbon Fiber Reinforced Thermo Set : CFRTS）と熱可塑性（Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics : CFRTTP）がある。CFRTS はすでに航空機を中心に多くの部品で適用され、材料特性や加工技術の蓄積がある程度進んできている。一方で、近年 CFRTTP が注目され、その成形性が量産性に向いている点などの理由から、自動車などに適用される可能性を秘めている。ただし、現時点では国内で CFRTTP の材料コストは CFRTS より高価であり、種類も非常に多く、進化の途上であり、その性能や加工技術もまだ研究中で、十分整備されていない。そのために、材料や工程を変えることに対して、慎重である航空機産業では、近年 CFRP を多く採用しているが、その大半（95%以上）はエポキシ樹脂を用いた CFRTS である。

筆者は、航空機産業で長年、航空機で用いる軽量材料として、アルミ合金、チタン合金、そして CFRP の加工の研究を行ってきた。岐阜大学では、CFRTTP の加工の研究も行っているが、総じて CFRTTP のほうの課題が多く、現在まだその研究途上である。

本報告では、航空機産業で主に用いられる CFRTS に基本的に的を絞って論述する。従って以下、CFRP とだけ記す場合は、CFRTS のことを指すものとする。

1.2 国内外の研究動向

CFRP の物性に関する論文や研究事例は国内外を問わず多いが、孔加工に焦点を絞った研究は国内よりも航空宇宙産業が発展している欧米で非常に多い [2]~[6]。ほんの一例ではあるが、例えば、引用文献[2]，[3]では CFRP だけでなく、広く FRP のような積層材料に孔加工を行った場合に、起きやすい剥離についての分析を行っている。また、[4]，[5]では、工具の刃先形状が孔加工時に起きる剥離に及ぼす影響について、詳しく分析している。[6]は、CFRP に生じた内部欠陥を X 線で分析する非破壊検査法について論じている。このような論文が実に多く、範囲も広い。

一方で、国内では、強度や物性に関する論文は多く見受けられるが、生産技術的な加工に焦点を当てた論文は少ない。これは、生産技術的研究は現場ノウハウとして学術的分析があまり行われておらず、企業もまた生産性に関わる事項のために外部にあまり情報を公開して来なかったためではないかと考える。また、CFRP 自体の加工に関しては、航空宇宙産業以外の分野では、国内ではまだ歴史が比較的浅いためではないかと考えられる。

しかし最近では、日本航空宇宙学会の飛行機シンポジウムで行われる生産技術部会、日本機械学会や精密工学会、砥粒加工学会、レーザ加工学会などでも、CFRP の加工に関するテーマが取り上げられるようになってきている。また、大学ばかりでなく各地の公設試験場や企業でも、研究事例が増加しており、最新の研究開発動向を注視する必要がある。さらに「ツールエンジニア」や「機械技術」などの雑誌などにも、CFRP に関する特集が多く組まれるようになってきている[7]~[10]。

一方、欧米では航空宇宙産業が発達している米国と欧州での研究事例が多く、SAMPE（先端材料技術協会）や、SAE（Society of Automotive Engineering Inc.）主催の“AeroFast”（航空機用ファスナや孔加工など生産技術の専門部会）や Aerospace Manufacturing and Automated Fastening (AMAF) Conference & Exhibition などでは、すでに 30 年近く前から、かなり実用的な研究報告や装置の開発事例などが発表されてきており、大手企業の参加もあり、研究規模も組織的で大きなものである。これらに比べると、残念ながら、国内の CFRP 加工に関する研究は相当な遅れと、研究規模の差が生じていることは否めない。筆者は、このように欧米にやや遅れを取っている日本の CFRP の加工技術の中から、今まで難しいとして、あまり研究されて来なかった、ブラスト加工やレーザ加工を CFRP の孔加工に適用し、従来の加工技術と比較しつつ、それら新技術を使った加工法の研究を発展させる。

1.3 CFRP 加工法の比較概略

CFRP の切断や孔あけの主な加工方法として、従来 CFRP の加工には超硬工具やダイヤモンド工具による機械加工、最近では AWJ などが用いられているが、レーザを用いる加工や、放電加工 (EDM) を用いる研究もなされている。また、筆者はブラストにより、小径の孔を大量に同時加工する技術を開発してきた。

しかし、どの加工法においても、加工効率・コスト・品質などにおいて、それぞれ一長一短があり、使用目的に応じて使い分けることが必要である。

例えば、孔あけに関してはドリル加工が最も一般的な方法であり、改良もされてきているが、CFRP に対しては、工具寿命や、孔出口側の剥離発生などが起きやすいという点から、課題も多くある。以下それらについて順に述べる。

1.3.1 CFRP のドリル加工の課題

CFRP の孔加工に関してはドリル加工が一般的に用いられるが、工具は金属用ドリルより先端をシャープにしたり、ねじれ角を小さめにしたり、超硬や PCD(多結晶ダイヤモンド)などの高硬度材を用いたりするなど、一般産業用とは異なる仕様が求められることが多い。

さらに、航空機産業は自動車や家電といった量産ではなく、多品種少量生産の傾向から、注文数も少ない。これらの結果、工具代が一般用よりも高価な特注品になる傾向にある。

また、多くの試験結果から、孔径に応じて適切な回転数の範囲があり、中でも送りを一定にしないと、孔内面粗度が悪化しやすく、孔出口側で剥離が非常に起きやすいことが知られている。

一般に、複合材料以外にも言えることではあるが、工具摩耗が起きると刃先が次第に鈍角になり、加工時に発熱を引き起こし、複合材料では特に、孔出口側での剥離 (fuzz) や削り残し (uncut fiber) が発生しやすいという結果をもたらす。

従って、CFRP のドリル加工では品質保持上の理由から、工具選定、工具管理、加工条件選定という、それぞれの条件が非常に重要な要素である。

孔加工は、部品単体で行う場合もあるが、8割以上が組立に必要な部品どうしの共孔加工であり、組立現場にてブッシング付きドリルガイドという治工具にドリルを付けた自動送り機構付きモータなどを使う作業となる。しかし、複雑形状部位では使用可能な

工具にアクセス性の面で制約が生じ、モータとドリルガイドをセットで考える工程計画が極めて重要である。

そして、孔加工は CFRP 同士ばかりではなく、アルミ合金やチタン合金との共孔加工の箇所も増加し、下孔とフルサイズで工具を使い分けるなど複雑な作業が生じている。

近年、航空機の性能向上とともに、チタン合金の適用が急増している。CFRP とチタン合金とは、比強度や腐食の面で相性が良いとされるが、切削条件は全く異なるため、共孔加工が非常に困難である。

すなわち、CFRP は高速で油なしで硬い材質の刃物での加工に適する材料であるが、チタン合金は逆に低速で、油をかけて、粘り強い材質の刃物での加工に適する材料である。

さらに、高精度の孔（孔径、孔内面粗度）が求められる部位に対しては、ドリルだけでなく、孔の内面粗度を高めるためにリーマ仕上げが求められ、ドリルとリーマを 2 ステップで行なうか、あるいはドリルとリーマを一体化した特殊刃具を開発して、1 ステップで加工するか、という選択も、生産性と品質を両立させる理由から、生産技術者が悩むところの重要な課題になっている。

これらドリル加工に関しては、航空機メーカーだけでなく、工具メーカーや工作機械メーカー、そして大学などの研究機関により多くの研究が行われてきており、CFRP 単体の加工に関してはかなり研究がしつくされてきた感がある。ただし、チタンなどの金属との共孔加工に関しては、まだ残された課題も多い[11]～[12]。

1.3.2 CFRP のドリル加工の派生技術の課題

CFRP を切削により加工手段として、従来のドリル加工だけではなく、そこに付加的機能を設け、あるいは切削刃物を用いるが、別の加工手段で孔を加工するような手段が次々と開発されている。しかし、これらも万能の加工法ではなく、さまざまな課題を抱えている。

超音波援用加工法：ドリル加工時に、超音波を発信して、刃先の微小振動で、CFRP の加工を支援し、刃具寿命ならびに加工品質を大幅に向上させる優れた技術である。しかし、ドリルのような小径の工具の刃先に、強力な超音波を与えるには、工具の固定方法や工具交換に際しての制約があり、機構が複雑になり、高価となって十分な費用対効果が得られるかなど課題もある。

なお、本件は特許出願されており、装置の説明を図 1.3 に示す[13]。

オービタル（ヘリカル）運動による加工法：ノルウェーのノベータ(Novator)社が開発した加工法で、特殊形状のドリル（エンドミルとドリルを合成したような刃物）をヘリカル（スパイラル）運動させながら加工する方法で、制御機構付きの専用のユニットモータを用いている。この方法は、加工する直径よりも、小さい径の刃物を用いることで、切りくずの排出を改善することができるので、例えば CFRP 単体だけでなく、チタン合金との共孔加工のような作業も行うことができる点が特徴である。ただし、専用の加工装置が高価であること（約 1000 万円）や、工具重量とサイズが大きいことなどが課題であり、用途が高付加価値のある、あるいは従来法では困難な箇所に対する、特殊な孔加工に限られている[14]～[19]。また、類似の運動をマシニングセンタ上にエンドミル工具を取り付け、比較的簡単なプログラムを組んで行わせる方法は、ヘリカル運動としてすでにいろいろな材料の孔加工に用いられている。

なお、この方法をさらに改善した派生型の技術として、軸を傾けたプラネタリ運動により孔加工する方法が研究されており、こちらも特許出願されている。これら類似技術を比較したものを図 1.4 に示す[20]～[23]。

ジャイロ式孔あけ機構：ドリルではなく小径の砥石を刃先に取り付け、自転と公転運動により孔をあける方法であり、岐阜県工業技術研究所などにて開発された。この方法では、ケバ・剥離をなくし、優れた品質の孔をあけることができるが、機構が複雑な点と、小径（10mm 以下）の対応が難しいこと、加工に時間がかかる点などが課題である。装置は、まだ開発直後であり、市販までされていないが、おそらく上記のオービタル運動による装置と、類似の課題を持つものと思われる。装置概略を図 1.5, 1.6 に示す[24]～[27]。

切屑の軸心吸引機構：パイプ形状のホールソーのような形状のドリルを用い、軸の中心から切屑を吸引して排出する機構を持たせたドリルユニットで、吸引時の気流により、刃先を同時に冷却する機能を持たせているもので、切屑による刃物の摩耗を減らすことが期待できることから、一定の効果が表れている。この方法は、モータ側の軸に吸引機構を組み込む必要があり、またドリルの軸に孔をあける必要があることから、直径の制約や、モータユニットの重量・サイズの点で課題がある。なお、類似の考え方のものに、工作機械のホルダに、吸引機構を取り付けて、エンドミルの軸中心に切りくず吸引機構を持たせたものが開発されている。これらは共に、経済産業省の進める戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン事業）にて開発されている（図 1.7）[28]～[29]。

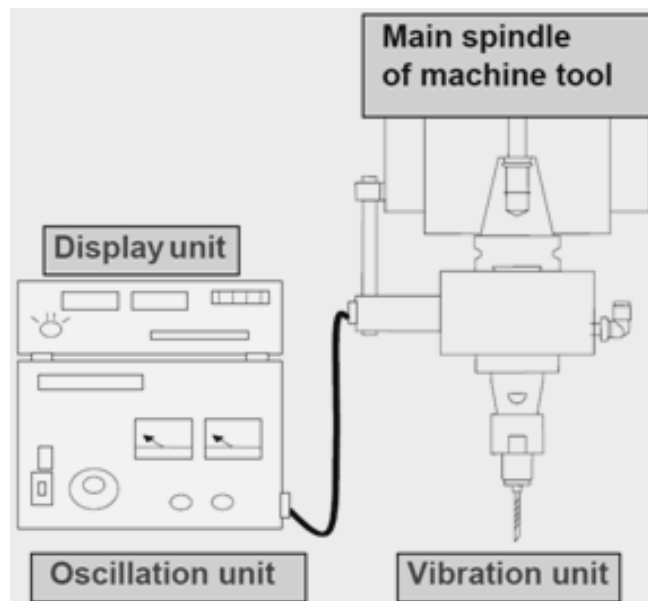


Fig.1.3 Examples of ultrasonic vibration unit for CFRP drilling[12]



Fig.1.4 Examples of CFRP applications for aircrafts and automobiles[19]

<http://jstshingi.jp/abst/p/11/1141/kosen-nt4.pdf>

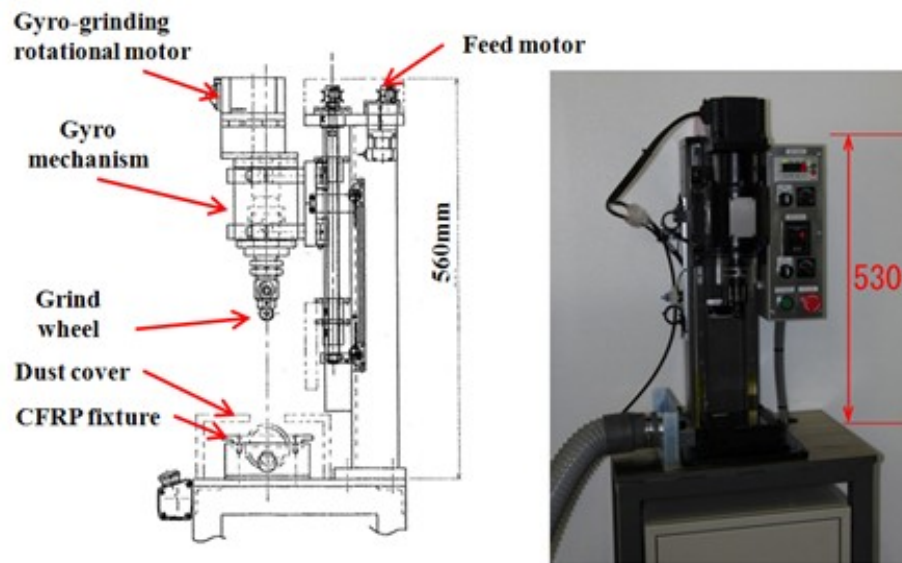


Fig.1.5 Examples of gyro grinding type drill equipment system for CFRP

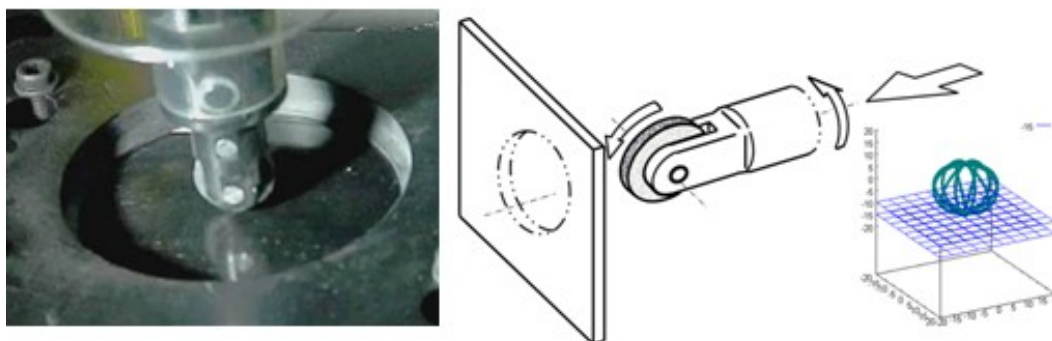


Fig.1.6 Grinding head of the gyro grinding type drill and it's movement

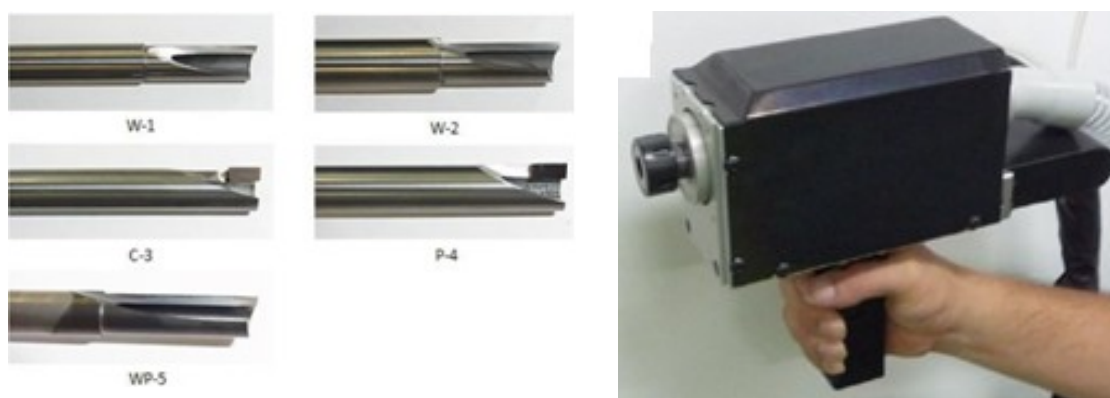


Fig.1.7 Examples of center vacuum drills and drill motor with vacuum system for CFRP[29]

1.3.3 CFRP の特殊加工法の課題

AWJ は近年、圧力や制御方法、周辺装置の改良などで格段に性能が向上し、品質も非常に向上されてきている。しかし、加工面に微小なテーパができることと、送りや板厚の変化で切断面の面粗度がわずかに変化すること、水に濡れるため乾燥工程が必要であること、ノズルとキャッチャーが連動するので部品形状で制約が生じること、加工開始と終了点で砥粒と水圧のバランスが不安定になると、層間剥離のリスクがあるなどの課題がある。また、孔加工では、装置仕様にもよるが、一般には直径 2mm 以下の小径に対しては、機構的に加工が難しい[30]～[34]。

レーザ加工では、加工面にできる熱影響層（Heat Affected Zone: HAZ）が発生する為に、これの除去や、HAZ を減らすためには加工時間が増加することなどが課題となっている。しかし、レーザの技術的進歩は著しく、例えば、ファイバーレーザでは、ある程度 HAZ を減らし、加工速度を保持する条件設定も可能で、切断面の精度要求がそれほど高くない部位には適用の可能性があるが、ファスナ孔のような精度を要求される部位への適用は現在のところ難しい。最近では、短波長レーザをパルス発信し、熱影響を抑えた Q スイッチ YAG レーザによる加工法が開発され、高精度な加工が可能となってきたが、加工時間が長い点が課題である[35]～[42]。

放電加工（EDM）は、優れた加工面品質が得られるものの、ワークを必ず液中に入れる必要があることや、形状的な制約があること、加工時間が非常に長いことなどの点で課題がある。この技術は、高精度を求められる高付加価値の精密部品に向いているものと考えられる[43]～[45]。

せん断（パンチ）による打ち抜き加工も考えられるが、筆者が以前テストした経験から、CFRTS の 1mm 以下の薄板にはある程度可能であったが、数個加工すると工具が摩耗あるいは破損し、加工し続けると材料に割れや剥離が発生し、実用に至らなかった。しかし、CFRTS であってもプリプレグの段階、あるいは CFRTP の薄板 1mm 程度であれば、十分加工できる。残念ながら、現時点では研究事例が少なく、一方で CFRTP は種類が多く、どの種類のどれだけの板厚まで加工できるか不明で、今後の研究が期待される[46]。

ブラスト加工法は、現在筆者が研究中であるが、大量の小径孔を効率良くあけられる点では、優れているものの、切断面にテーパが出来るために、高精度が要求される航空機ファスナ孔のような部位には適用できず、適用用途が限定される。たとえば、吸音パネルのようなファスナ孔ほどの精度は要さず、大量に狭い範囲に孔を密集してあける

目的に適しており、比較的安価な方法であると考え[47][48].

その他、ブラスト加工全般については、砥粒加工学会誌に「特集 2004 年砥粒加工の最新動向を探る」において「マイクロブラスト加工全般に関して」などの概説[49]や、福井大学で「ウェットブラスト加工に関する基礎的研究」として「単結晶 Si ウエハに対するマイクロスラリージェット加工について」にてアルミナ微細粒を用いた幅広い研究を行っている例[50]や、「マイクロサポートピンのためのサンドブラスト加工シミュレーション法の開発」として、サンドブラスト加工に対するシミュレーションの試みを行った数少ない論文[51]などが見られる。しかし、ブラストを孔加工について扱った論文はほとんど無く、全般的に見ても、ショットピーニングに関する論文は多いが、サンドブラスト自体の研究事例は少ない傾向であった。



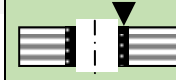


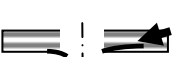
その他、さらに、材料成形段階から、剣山のような治具を使って、繊維を切断することなく、孔位置を空洞にして材料を積層・硬化するという方法も考えられるが、この方法は、任意の場所に孔位置を移動することは難しく、孔精度や製造工程上、材料硬化から型の脱型などのプロセスがまだ確立されていない状況である。

なお、ブラスト加工とレーザ加工についての詳細は、3 章以降で詳しく述べる。

以上、考えられる主な加工法をまとめると表 1.1 のようになる。

これらの加工法の中から孔径や加工能率などを考慮しながら加工法を選択する訳であるが、さらにこれらの複数の方法を組合せた複合加工法も考えられており、一種の組み合わせ最適化問題になる。しかしながら、孔径や加工能率などから、戦略的に加工法を選択するための体系的な研究報告がないのが現状である。

Table 1.1 Comparison of CFRP machining (drilling) method [1], [2] [4]~[7]

Method 孔加工 方法	Drill ドリル加工	AWJ AWJ 加工	Laser レーザ加工	EDM 放電加工	Blast ブラスト加工	P u n c h パンチ（打抜き） 加工
Time 孔加工 時間	A little fast 4-5sec やや速い 4-5 秒	Fast 2-3sec 速い 2-3 秒	A little fast 3-5sec やや速い 3-5 秒	Slow over 1 min. 遅い 1 分以上	A little fast 4-5sec やや速い 4-5 秒	Fast 0.5sec 速い 0.5 秒
Running Cost ランニ ングコ ストな ど	Tooling cost (such as carbide, diamond) is expensive by the tool wear 工具摩耗に より工具費 （超硬・ダイ ヤなど）が高 価	Drying process necessary, maintenance expensive for nozzle wear, media exchange ノズ ル摩耗, メデ ィア交換など あり, メンテ ナンス費用が かかり, 乾燥 工程も必要	Maintenance costs, such as wear of the transmitter or lamp, smoke occurs 発信部の損耗 などメンテナ ンス費用がか かる 煙が発生	Need dry and wash process by water processing and wear of the wire or tools ワイヤや治具 の損耗や, 水中 加工のために, 後で乾燥洗浄 工程が必要	Low, but dust generation media and mask costs are somewhat worn 低い, マスク 費用やメディ アがやや損耗 する, 粉塵発生	Inexpensive, limited to thin material Tool life is short 安価だが, 薄い材 料に限定され, 工 具寿命が短い
Equipment 装置コス ト	Low price 低価格	Expensive 高価格	Expensive 高価格	A little expensive 中価格	A little expensive やや高価格	Low price 低価格
Quality	Delamination & fuzz is easy to generate to the hole exit side 孔出口にデ ラミネーシ ョンやケバ が出やすい	Become tapered hole. delamination likely to occur, surface roughness is somewhat rough テーパ孔に なる, デラミ ネーション のリスクあ り, 面粗度が やや荒い	Fiber or YAG laser cause heat-affected zone (HAZ) 熱影響層がで る (YAG やファ イバーレーザ の場合)	Good surface roughness 面粗度良好	Become a tapered hole. Possible to generate dense holes, not occur delamination テーパ孔に なる. デラミ ネーションが 起きない, 密集した 孔加工が可能	Deformation in the outermost layer cracks in the material due to deterioration of the punch パンチの劣化に より材料にひび 割れや最外層に “ダレ” (変形) が 起こる場合あり
Cut figure						
	Practically used 実用化		Under development or specially used 開発中 特別な用途			

1.4 本研究の目的

なお、1.1-1.3 項の検討・調査・予備実験などを踏まえて、従来のドリル加工による方法は、最もオーソドックスな方法であり、さまざまな工夫が多くの研究者や企業によりなされてきており、研究も進んでいる。一方で、ドリルを使わない革新的な方法は、まだ研究が不十分であることがわかった。そこで、本研究は下記を目的として実施した。

難削材料として知られる、航空機用炭素繊維強化複合材料(以下、CFRP と記す)の孔加工における課題を明らかにし、孔加工に必要な各種手法の特徴を把握し、比較評価することで、目的に応じて最適な手法が選択できるような指針を構築するために、研究を実施した。この目的を達成する上で、ドリルを使わないで CFRP を加工する技術として、主としてブラスト加工という特殊加工技術を提案し、これを研究開発し、発展させることで、加工法選択の幅を広げる。

本論文の各章の構成は以下のとおりである。

(1) 緒言

現状の国内外の最新研究技術の調査と分析を行ない、研究を進める上での課題が何であるかを把握確認した。この中で、ドリルによる加工方法とその派生技術、ならびにドリルを使わない特殊な加工法について、それぞれ調査した。(第1章)

(2) 航空機用CFRPの孔あけ加工の現状とその改良手法の考察

上記の課題を分析し考察する。さらに、ドリル、AWJ、レーザ、EDM、ブラストについての特徴や長所短所について整理し、孔加工の戦略的な選択法について述べた。(第2章)

(3) ドリル以外の加工法の開発(ブラスト加工)

ドリル以外の加工法として、CFRPにブラスト技術を用いて孔加工するという特殊な方法を提案し、基礎的なエロージョン摩耗による孔加工メカニズムの分析を行なった。この結果、CFRPに対して小径の孔を同時に多数、効率良く加工することが可能であること、また基本的な加工条件として、マスク材の板厚、砥粒、噴射圧力、送り速度、加工回数(パス数)などを把握し、設定した。(第3章)

(4) ブラスト加工の一般性と発展

ブラスト加工法を実用化するために、その研究の発展を図り、より詳細な加工実験を進めた。ブラストによる孔あけ過程には、材料の違いによるエロージョン過程の進展の差などの面でまだ不明な点が多く、加工する材料や砥粒などの条件を変えて、ブラスト加工

の一般性を高めるため、エロージョン体積の実験値と理論的な計算値との比較などの分析や検討作業を進めた。(第4章)

(5) CFRP板への小径孔加工におけるブラスト砥粒条件の影響

径の異なる孔に対して使用する最適な砥粒を検討するため、加工孔径および砥粒の種類・サイズなどを変更し、孔精度と加工効率を観察した。その結果、異なる孔径に対して各種砥粒による孔精度および加工効率の影響が明らかとなり、この傾向から孔径による砥粒の選定を比較評価した。(第5章)

(6) ブラストによるCFRP複合材への小径孔加工用マスク材料の比較研究

CFRPの小径孔加工にブラストが適用可能であるが、孔はテーパ形状を呈する。そこで、加工領域と形状を決定するマスクの板厚及びマスクの材質を変えることで孔精度の向上を目的として、CFRPを加工し孔精度とマスクの耐摩耗性を比較観察した。この結果、マスク厚の孔精度への影響及び、耐摩耗性と機械的特性との相関が明らかとなり、孔精度は改善され、より高性能なマスク材料の選定を行った。(第6章)

(7) 全体まとめ

具体的な航空機部品(エンジンカウルに用いる吸音パネルの構成部品)を選び、そこに適用するためのケーススタディならびに、加工工程の検討を行った。

また、まとめとして、航空機用CFRPに対する最適孔加工技術とブラストによる孔加工方法について述べ、将来の見通しと課題を述べた。(第7章)

以上の研究の結果、目的に応じた CFRP 孔加工法が選択できるような指針を設けることができた。

また、これら成果を、学術面だけでなく、広く企業など社会に還元することにより、国内における CFRP 加工技術の発展に大きく寄与することができるものと確信する。

参考文献

[1]トヨタ自動車 75 年史 URL :

http://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/body/details.html

<CFRP加工,ドリル加工全般>

[2]D. Liu, Y. Tang, W.L. Cong: A review of mechanical drilling for composite laminates, Composite Structures, 94 (2011), pp. 1265–1279 2012.

[3]J.P. Davim, J.C. Rubio, A.M. Abrao: A Novel Approach Based on Digital Image Analysis to Evaluate the Delamination Factor After Drilling Composite Laminates, Composite Science Technology, 67 (2007), pp. 1939–1945.

[4]H. Hocheng, C.C. Tsao: The path towards delamination-free drilling of composite materials, Journal of materials processing technology, 167 (2005), pp. 251–264.

[5]T. Beno, L. Pejryd, U. Hulling, M. Rashid, P. Ydresjö: Effects of Drill Geometry and Cutting data on Hole Surface Integrity in Drilling of Carbon Fibre Composites, Submitted (2013), pp. 10–21.

[6]Lars Pejryda, Tomas Benob, Simone Carmignatoc: Computed Tomography as a Tool for Examining Surface Integrity in Drilled Holes in CFRP Composites, Procedia CIRP 13 (2014), pp.43–48.

[7] 坂本重彦:CFRP の穴あけ加工について, 砥粒加工学会誌, 57(4), 219-222, 2013-04-01.

[8] 秋山忠弘:工具編 CFRP 板材の穴あけ加工とトリム加工 (特集 CFRP の最新加工技術 : 次世代軽量化技術のキーマテリアル), 機械技術 Vol.61No.1 (2013)pp.66-69.

[9]斎藤学, CFRP 構造の高速高効率穿孔技術, 特集民間旅客機製造と機械加工:ツールエンジニア, 大河出版 No.1 (2012).

[10]有澤秀彰, 赤間知, 二井谷春彦, 炭素繊維複合材(CFRP)の高効率加工技術, 三菱重工技報 工作機械特集, Vol49.No.3(2012)pp.4-10.

<CFRP, チタン共孔加工>

[11] 田代徹也, 藤原順介, 稲田 景子, CFRP/Ti-6Al-4V スタック材の穴加工:砥粒加工学会誌 56(9), 606-611, 2012 .

- [12]田村昌一, 松村隆. 田村昌一, CFRP/Ti 合金積層材に対する穴加工の切削シミュレーション:2013 年精密工学会秋季学術講演会講演論文集(2013) pp471-472.

<超音波振動切削>

- [13] 柳下福蔵, 超音波振動切削による CFRP 積層体の高精度穴あけ加工, 特願 2005-340945 特願 2007-132689, 平成 19 年度特許ビジネス市 社団法人発明協会 2007. 10. 17 <http://www.inpit.go.jp/blob/katsuyo/pdf/business/19o2-4.pdf>.

< オービタル加工, ヘリカル加工>

- [14] E. Brinksmeier, S. Fangmann, A. Walter: High Speed Machining of Multilayer Composite Materials by Orbital Drilling, Proceedings of the Sixth International Conference on High Speed Machining 2007, San Sebastian (2007).
- [15] B. Denkena, J. Dege: Zirkularfräsen von Schichtverbunden aus CFK, Titan und Aluminium, Seminar Neue Fertigungstechnologien in der Luft- und Raumfahrt, Hannover (2007).
- [16] K. Weinert, C. Kempmann: Comparing Drilling and Circular Milling for the Drill Hole Manufacture of Fiber Reinforced Composites, Production Engineering. Research and Development, 12 (2) (2005), pp. 1-4.
- [17] 坂本 重彦, 岩佐 拓紀:CFRP(炭素繊維強化プラスチック)のヘリカル穴あけにおける工具形状の影響, 精密工学会学術講演会講演論文集 2012A(0), 181-182, 2012.
- [18] 坂本 重彦, 村上 大介, 沖田 淳也:CFRP(炭素繊維強化プラスチック)のヘリカル加工用工具に関する研究, 精密工学会学術講演会講演論文集 2011A(0), 219-220, 2011.
- [19] 坂本 重彦:穴加工編 ヘリカル加工による CFRP の高精度穴あけ加工技術 (特集 CFRP の最新加工技術 : 次世代軽量化技術のキーマテリアル), 機械技術 61(1), 34-38, 2013-01.

<プラネタリ孔あけ加工装置>

- [20]特開 2013-027943 (P2013-027943A), 田中 秀岳, 穴あけ加工装置.
- [21] 太田 和樹, 田中 秀岳, 柳 和久, 滝澤 亮:傾斜プラネタリ加工装置の開発, 精密工学会学術講演会講演論文集 2012A(0), 505-506, 2012.
- [22]田中 秀岳, 清水 和也, 小幡 慎司, 滝澤 亮, 柳 和久:炭素繊維強化プラスチックを対象としたプラネタリ機構による孔あけ加工に関する研究 (第 1 報)-工具形状の影響

響と CFRP の切削特性-, 精密工学会誌 Vol.80.No.3.2014.

- [23] 田中 秀岳 , 太田 和樹 , 武田 広貴 , 滝澤 亮 , 柳 和久:炭繊維強化プラスチックを対象としたプラネタリ機構による穴あけ加工に関する研究 (第 2 報):—傾斜プラネタリ加工用スピンドルの開発—精密工学会誌 80(3), 297-301, 2014.

<ジャイロ式穴あけ装置>

- [24] 佐藤 尚 , 水野 亮 , 渡辺 義見 [他]:遠心力混合粉末法にて作製した Cu 基メタルボンド砥石による CFRP 穴あけ加工技術の開発, コンバーテック 41(11), 118-121, 2013-11.
- [25] 渡辺 義見 , 佐藤 尚 , 柘植 英明 [他] :ダイヤモンドを砥粒としたメタルボンド砥石による CFRP への穴あけ加工 (加工特集), New diamond 29(4), 5-11, 2013-10.
- [26] 柘植 英明 , 竹腰 久仁雄 , 山神 成正 , 加賀 忠士 , 坂東 直行 , 小川 大介 , 渡辺 義見 :2軸回転砥石を用いた CFRP の穴あけ加工法における SiC 砥石の耐久性... 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の穴あけ加工において, 2 軸回転砥石による新規穴あけ加工法, 砥粒加工学会誌 57(5), 314-319, 2013
- [27] 渡辺 義見 , 佐藤 尚 , 柘植 英明:CFRP の新規穴あけ加工技術: 傾斜機能砥石を用いたジャイロ式穴あけ加工(トピックス), 日本機械学会誌 115(1118), 61, 2012-01-05.

<中空切屑吸引ドリル>

- [28] 羽賀 大介 , 井上 孝司 , 柿本 政計 , 松本 二三秋 , 青木 渉:内部吸引式中空型ドリルの穴あけ加工における CFRP 切りくずの排出特性, 精密工学会学術講演会講演論文集 2011A(0), 419-420, 2011.
- [29] 財団法人名古屋産業科学研究所:平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業「CFRP穿孔加工の作業環境改善に対応する冷却・吸塵機能を備えたシステムの開発」, 研究開発成果等報告書概要版 平成23年9月.

<AWJ 切断 >

- [30] A. Alberdia, A. Suáreza, T. Artazaa, G. A. Escobar-Palafoxb, K. Ridgwayb: Composite Cutting with Abrasive Water Jet, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013.
- [31]J. Wang:A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology, Journal of materials processing technology, 94 (1999), pp. 30–35
- [32]Folkes, J.: Waterjet—An innovative tool for manufacturing. Journal of Materials

Processing Technology 209 (2009) 20, pp. 6181-6189.

[33]株式会社三菱化学テクノロジー:平成24 年度中小企業支援調査－炭素繊維複合材料の加工技術に関する実態調査－, 調査報告書, (2013), pp60.

[34] 財団法人三重県産業支援センター, 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.

<レーザ加工, HAZ>

[35]R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, T. Graf, Minimum damage in CFRP laser processing, Proceeding Lasers in Manufacturing 2011, Munich.

[36]R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, P. Mucha, T. Graf, Analysis of thermal damage in laser processing of CFRP, Proceedings 30th ICALEO 2011, Orlando.

[37]C. Freitag, M. Hafner, V. Onuseit, A. Michalowski, R. Weber, T. Graf, Diagnostics of Basic Effects in Laser Processing of CFRP, Proceeding of International Symposium on Laser Processing of CFRP and Composites 2012, Yokohama.

[38]藤田 雅之:マイクロ加工 (特集 次世代新材料レーザ加工の新たな挑戦) - (CFRP の切断・穴あけ・トリミング), オプトロニクス 32(1), 104-106, 2013-01.

[39]杓名 春泰, 井上裕喜:マクロ加工 (特集 次世代新材料レーザ加工の新たな挑戦) -- (CFRP の切断・穴あけ・トリミング), オプトロニクス 32(1), 98-103, 2013-01. [40]新納 弘之:産業用高速加工 (特集 次世代新材料レーザ加工の新たな挑戦) - (CFRP の切断・穴あけ・トリミング), オプトロニクス 32(1), 95-97, 2013-01.

[41]杓名 春泰, 井上裕喜:炭素繊維強化複合材料(CFRP)の最新レーザ加工技術:超短パルスレーザおよび SM ファイバーレーザによる切断, 穴あけ, レーザ学会研究会報告 = Reports on the Topical meeting of the Laser Society of Japan 419, 19-24, 2011-10-17.

[42]深川仁, 廣垣俊樹, 吉田弘樹 [他]:航空機用 CFRP のファイバーレーザによる切断と穴あけ:レーザ熱影響部の極小化, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集 ABTEC, 413-418, 2012.

<EDM 放電加工>

[43]F. Fischer, L. Romoli, R. Kling, Laser-based Repair of Carbon Fiber Reinforced Plastics, CIRP Annals Manufacturing Technology 59, (2010)203-206.

[44]伊藤智泰, 早川伸哉, 糸魚川文広, 中村隆, 放電加工による炭素繊維強化樹脂 (CFRP) 加工の試み, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2010)577-578.

- [45] HaiWang, SamehHabib, Akira Okada, Yoshiyuki Uno, EDM Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic, Proc, ISEM-16, (2010)65-68.

<パンチ せん断加工>

- [46] 四国経済産業局委託先公益財団法人えひめ産業振興財団, H23年度第3次補正 戦略的基盤技術高度化支援事業「炭素繊維強化プラスチック用三次元形状のプレス切断金型および成形／切断金型の開発」研究開発成果等報告書, 平成24年12月.

<ブラスト加工>

- [47] 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄:ブラストによる CFRP の穴あけ加工技術の開発, 砥粒加工学会誌 56(4), 262-267, 2012-04-01.
- [48] 加藤敦司, 深川仁, 清水啓祐, 山田伊久子, 加藤隆雄:ブラスト加工によるCFRP 板の複数同時孔あけ工程の分析, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2012)C12.
- [49]伊澤守康, 高機能ブラスト加工の動向;砥粒加工学会, vol.48 (2004)pp12-16.
- [50]Boyu DONG, ウェットブラスト加工に関する基礎的研究, 福井大学博士論文(2010).
- [51]河野真也, 新井孝史, 内芝栄士郎, 村上亮, 佐柄隆久, 青山藤詞郎, マイクロサポートピンのためのサンドブラスト加工シミュレーション法の開発, 2012 年度精密工学会春季大会, セッション ID: N44.

2章 航空機用 CFRP の孔あけ加工の現状とその改良手法の考察

2.1 はじめに

本章は、航空機用 CFRP を対象に、戦略的な加工法選択の視点から、ドリル、ブラスト、レーザー加工法について、加工能力と孔径と加工効率の面から加工法の選択について考察することを目的とする。

このため、航空機用 CFRP を対象として、戦略的な加工法の選択の視点から、ドリル、ブラスト、レーザーの各加工法について、予備的な加工実験を行った結果にもとづいて、最新技術の加工能力の比較評価を行なう。その結果に基づき、航空機用としての品質確保を条件として、孔径と加工効率の面から加工法の選択について考察する。さらに、各種加工法の中から、最適な方法を戦略的に選択する方法についてマップを作製し、CFRP がなぜ難削材料であるか、また CFRP の加工がなぜ難しいのか、といった根本原因の理解を深めるために、ロジックツリーアナリシスを用いて分析する。[1]～[3]。

2.2 CFRP の孔加工上の課題

2.2.1 CFRP の種類 と共通課題

CFRP の種類として、繊維の形態が一方向材かクロス材(織物)か、樹脂が熱硬化性か熱可塑性かで、機械特性や最適加工条件が変わり、その板厚(積層枚数)や、加工する孔径の違いでも、加工条件が大きく変わる。また、前述の理由から一般産業用 CFRP で良い結果が得られた加工法であっても、航空機用で用いると、異なる結果が出るものがしばしば起きている。

さらに、航空機用 CFRP は一般には入手が困難であることと、孔品質要求が厳しいこと、孔のサイズにインチ系が多く用いられていることも、国内で一般の企業や研究機関が、研究を実施する上での障壁となっている。

また、加工時には、例えばボーイング社の認定品(ボーリューベなど)を除いて、切削油がほぼ全面的に禁止されており、これが切削加工をより難しくしている大きな要因である。この理由は、FRP に油脂成分が付着すると、後工程で十分除去できず、機体外表面の塗装時に剥離を起こし、接着の強度低下を招く恐れがあるからと言われている。

このために、冷却や切屑除去目的で、ドライ加工を行うと、今度は黒い粉塵が舞い散る結果となり、人体ばかりでなく、電子回路の短絡など、人体にも機械にも悪影響を及ぼす恐れがあり、防塵マスクの使用、吸塵装置の設置、加工区域の区分けといったさまざまな対策が求められる。

本章では航空機用 CFRP を対象として、戦略的な加工法の選択の視点から、ドリルとブラストとレーザ加工法について最新技術の加工能力の評価試験を行った。その結果に基づき、航空機用としての品質確保を拘束条件として、孔径と加工効率の面から加工法の選択についても考察を行った。さらに、各種加工法の中から、最適な方法を戦略的に選択する方法についても考察したので、それらについての詳細を論じる。

2.2.2 航空機部品に求められる一般的な要求事項

航空機部品の加工に用いられる孔に対する、一般的な品質要求事項を表 2.1 と図 2.1 に示す[1]。これら要求事項や数値は航空機メーカーごとで少しずつ異なるため、平均的な目安として作成した値である。例えば、欧米ではボーイング社とエアバス社とは異なり、国内の航空機メーカーである三菱重工業、川崎重工業、富士重工業でもそれぞれ社内 SPEC(工程仕様書や製造する機体ごとの品質基準など)を設けており、少しずつ異なる項目がある。これら基準ではファスナ孔に対する孔径だけでなく、孔入口と出口側の角部の欠損に対する要求や剥離に対する限界基準は、面内と面外寸法で決められている。特に、素材が織物材と一方向材では欠損や剥離の基準が少し異なり、クロス材料の方が厳しい値になっている。

これは、一方向材料ではクロス材料よりも剥離が起きやすいために、便宜的な理由から、一方向材の方の要求基準を緩和したものである。また、孔内面粗度の要求も求められているが、実際、小径孔の場合は孔加工後に孔内面粗さを直接計測することは困難であり、試験片などを同じ条件で加工して、間接的に検証するか、あるいは目視検査などによって、検査している。これら要求を孔一つ一つに対し行うことは、組立や部品製造の部門にとり、大変時間と労力を要する要求である。本研究では、この基準を用いて実験を行った。

Table 2.1 Quality requirements reference example of the fastener hole for the aircraft parts

(Note) These values are different from the SPEC, operated in the aircraft manufacturers

Evaluation Item		CFRP (cloth fabric)	CFRP (UD)
Lack or delamination	Max height A	0.2mm	0.4mm
	Max width B	0.8mm	2.5mm
Surface roughness		Ra=12.5μm	
Holes diameter		-0 / +0.076mm (.003 inch)	

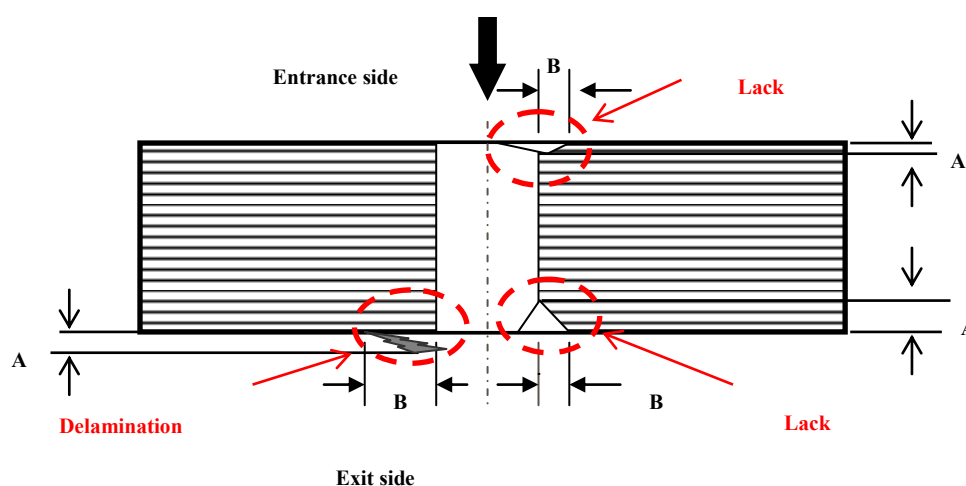


Fig 2.1 Reference example of the quality requirements of the fastener hole of aircraft parts

(A and B indicate the maximum width and maximum height of the table 2.1)

2.3 CFRP 加工の分析

2.3.1 CFRP が難削材料である理由

ここで、CFRP がなぜ難削材料であるか改めて考える。複合材料は金属のような共有結合の単一材でなく、複数の材料で構成され、FRP はプラスチックが繊維で強化された材料である。繊維がカーボンであると、引張強度が非常に高いが、折れやすくそのままでは圧縮強度が低い。一方、エポキシ樹脂は CF (カーボンファイバー) との接着力が非常に強いが、引張強度は低く、熱に対しても弱い。これらが補完し合い CFRP の優れた強度特性が得られる。しかし、これらの特性が逆に難削材料としての因子となる。

ここで改めて、難削材を考えると、表 2.2 の①～⑥のような定義がなされている[4]。筆者はさ

らに、①には①-1 材料自体が硬く強く刃物が負ける、①-2 加工可だが、変形して思う形に削れない、①-3 加工時にバリ(ケバ)等が発生し易く、仕上げが大変、などの細目を加えたが、CFRP の場合、これら①-1/-2/-3 の要因が全て含まれる。

さらに②の要因も大きく、CFRP の加工技術はノウハウを含めて浸透が不十分で、生産技術者や現場作業者がトライ・アンド・エラーで条件を見出し加工するケースが多く、種類も非常に多いため、被削性が厳密には不明といえる。

③の定義自体は複合材に当てはまり、⑥の定義以外に、「粉塵が発生し易い」を追加した。CFRP は乾式加工が多く、金属のように切屑にならず、脆性材料としてセラミックスのように粉塵が発生し、電気回路のショートや、工作機械の摺動面摩耗を引き起こす。

以上から、CFRP は、これら①②③⑥の要因を全て持つ典型的な難削材料と言える。

2.3.2 CFRP の孔加工が難しい理由

CFRP の孔加工が難しい理由を、ロジックツリー[5]で考える。この手法は、トヨタの現場改善として **TQM(総合的品質管理)**などで用いられ、事象に対し“なぜ”を数回繰り返して原因追及する手法である[6]。

現在は航空機メーカーでも不具合発生時の原因分析や対策立案に役立てられている。考え方は **FTA(Fault tree analysis)**とも類似している。現象は「CFRP の孔加工が難しい」から始め、**図 2.2** に示す「なぜ①(原因)」として、「CFRP は難削材料であるから」という具合で分析し、それらへの対策例を示した。

2.3.3 熱可塑性 CFRP の課題

上記は熱硬化性 CFRP の加工経験から分析したが、熱可塑性 CFRP では、樹脂の違いから切削加工性が異なる。加熱による樹脂軟化と再溶着という課題があり、ドリルなどの刃先に、溶着による構成刃先ができやすく、切削加工が阻害される。レーザ加工では、ドロスという溶融物が加工面に付着しやすい。したがって、刃物形状の変更や冷却方法の改良などの課題が重要となる。熱可塑性材料は、国内では普及が少ないため、表 2.2 でいう②被削性の不明な材料に相当する課題が大きいと考える。

Table 2.2 Relation to CFRP and the definition of the difficult-to-cut materials

Characteristics of difficult-to-cut material 難削材料の特徴	Typical materials 代表的な材料	The features in CFRP CFRP における特徴
Material itself is a difficult to cut material ①被加工物の材質そのものが削りにくい材料	Stainless steel, titanium, and super alloys ステンレス, チタン, 超耐熱合金など	
Material itself is harder than cutting tool or the tool wear appears fast even the material is machinable ①-1 材料自体硬く強く刃物が負ける, 削れても刃物の摩耗が早い	Titanium alloy and Inconel alloy インコネルやチタン合金	Wear progresses by the direction of the CF CF の方向により摩耗が進む
Possible to cut, but difficult to cut by the deformation, and to destroy the material inside if cut it by force. ①-2 加工可だが, 変形して思う形に削れない, 無理に削ると材料内部が破壊する	Pure aluminum and copper, 銅や純アルミ	Delamination is likely to occur 層間剥離が起きやすい
It is easy and burrs (fuzz) are easily generated during machining, and finishing becomes a hard work. ①-3 加工時にバリ(ケバ)などが発生し易く, 仕上げが大変	Titanium alloy, and stainless steel チタン合金, ステンレスなど	Fuzz (uncut fiber) occurs, leaving the cutting of fiber 繊維の削残し(切残し)によるケバが発生
Unknown material of machinability ②被削性の不明な材料	Such as new materials mainly, without cutting data 主に切削データのない新素材など	Optimum processing conditions of each material is not spread 材料ごとの最適加工条件が未普及
Two or more materials in the processing of co-machining ③共削り加工における2つ以上の材料	Cast iron and aluminum alloy アルミ合金と鋳鉄など	The nature of the epoxy and CF are different CF とエポキシの性質が異なる
Difficult material of cutting to shape and structural ④形状的・構造的に切削加工の困難な材料 (びびり振動が起きやすい, 深孔加工など)	Titanium alloy (such as thin-thick plate) チタン合金など(薄板・厚板など)	Thin plate shape is easy to cause chatter frequently 多くは薄板形状が多くびびりやすい
Required high accuracy and hard to achieve in the machine tools and existing equipment ⑤現存設備や工作機械で実現しにくい高精度なもの	Process to keep the transparent acrylic cutting 切削で透明を保つ加工など	
Materials easy to fire, flammable or cause dust generation ⑥発火・引火(粉じん発生)しやすい材料	And magnesium マグネシウムなど	Dust occurs 粉塵が発生する

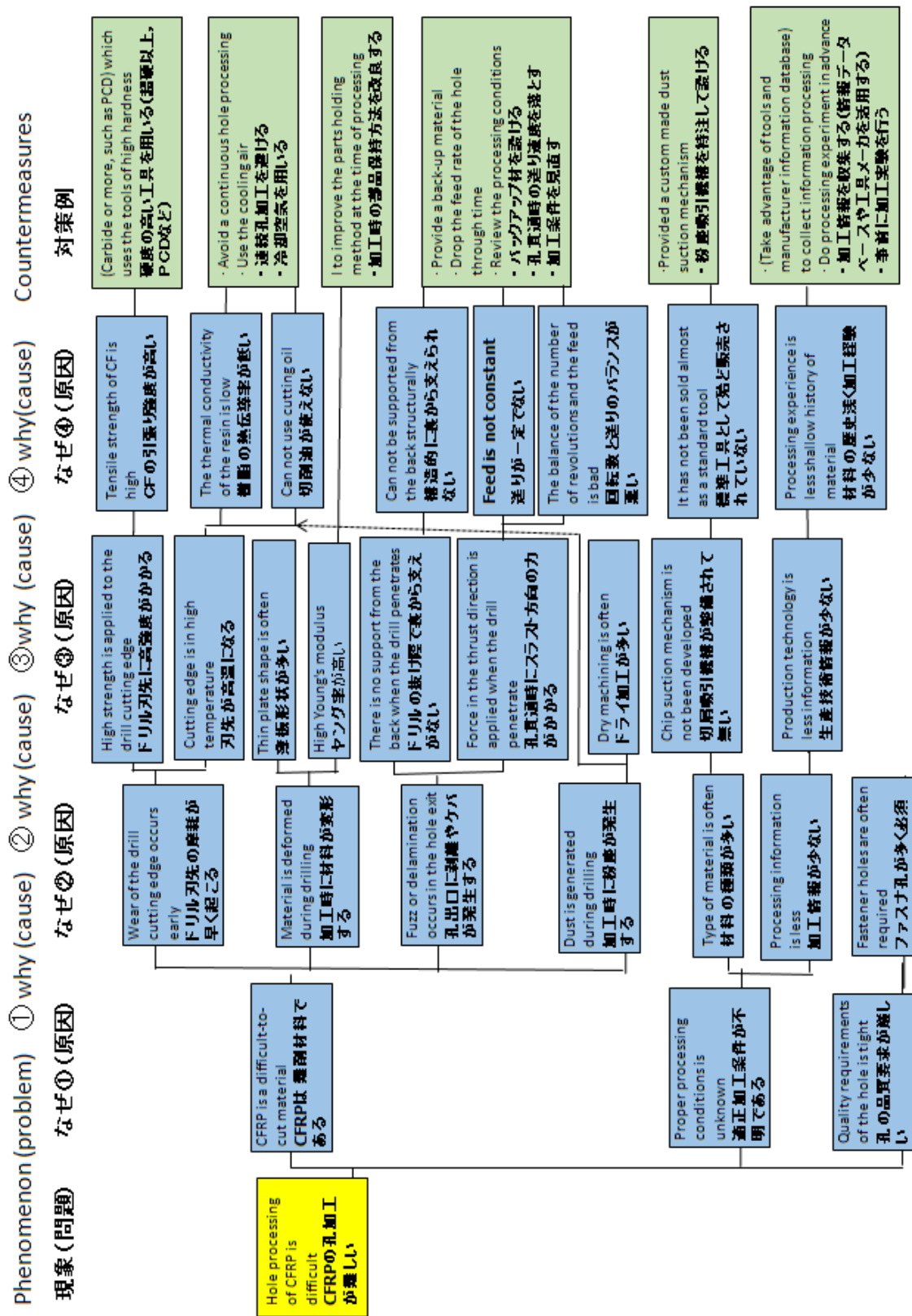


Fig. 2.2 Case of logic tree analysis (why-why analysis) of the reason that hole processing of CFRP is difficult.

2.3.4 各種孔加工方法の試験結果および考察

(1)ドリル加工の試験結果と考察

各種ドリルの加工特性として、CFRP 板の耐久性実験に基づき、まとめた結果を表 2.3 に示す。試験では、超硬ドリル、超硬ドリルリーマ(ドリルとリーマ機能を合わせた特殊刃型)、ダイヤモンドコーティングした超硬ドリル、PCD ドリル(多結晶ダイヤモンドを刃先に付けたもの)、セラミックスドリル(特殊なセラミックス材料を用いたドリル)の 5 種類を用いて、ドリルの CFRP に対する加工性能を調べた。

この試験の結果、高硬度材種であるほど(超硬 < 超硬ダイヤモンド < PCD の順に)、CFRP に対し刃具寿命が延び、加工品質が向上する傾向が確認された。

すなわち、航空機用の品質基準によると、L/D(材料板厚と孔径の比)が 1 に近い条件下で、超硬ドリルは 100 孔/工具 1 本、ダイヤモンドコートドリルおよび PCD ドリルは 100~500 孔/工具 1 本という結果であった。これにより、最新のダイヤモンドコートドリルや PCD ドリルを採用すれば、孔品質は改善するが、コストが従来の 10~100 倍増大することがわかった。

なお、ドリル加工は、一般に幅広い径に対応できるが、1mm 以下の小径になると、硬い材質ほど折損しやすく、20mm 以上の大径では刃具素材のコストが高くなり、そこには最適領域があると考えられる。

(2)ブラスト加工について

ブラスト加工については 3 章で詳しく述べるが、ブラスト加工は材料厚さ $L=1\sim 2\text{mm}$ 、径 $D=1\sim 2\text{mm}$ の小径孔加工が可能で、密集して近接した孔に対し、同時に多数孔を効率的にあげることができる。ただし、孔加工後に、孔出口側の剥離は発生しないが、わずかなテーパができる。すなわち、最新のブラスト加工を用いれば、多数の孔の場合は十分な加工効率が確保できるが、孔品質には課題が残る。なお、効率的な加工の観点から考えると孔径は、直径 0.25mm 以上が適当であることがわかっている。

(3)レーザ加工について

レーザ加工について、研究で用いたファイバーレーザ(最大出力 1kW)では、条件例として、連続発振(CW)で出力 0.75kW、送り 1000mm/min で最も熱影響が少なく良好な結果であった。加工を数パスに分け、少しずつ何度も掘り下げる加工を繰り返すと、加工時間は増加するが、逆に HAZ を減らすことがわかった。

なお、トレパニング加工という、円を描く軌跡を形成する加工法で、孔センタから入り円周を 1 回転あるいは 2 回転すると、良好な品質が得られることがわかった。熱影響層は目視による評価以外に、超音波探傷や X 線 CT などの非破壊検査を使って加工面内部の剥離状態を調べた結果、内部欠陥が立体的に高精度に検出できることが判明した。そこで孔品質の評価法として非破壊検査を採用した結果、2mm 程度の熱変質層が残ることも判明した。したがって、最新のレーザ加工法を用いれば、加工能率を十分に確保できるが、設備投資コストが高いことと、孔品質に課題が残ることもわかった。なお、効率面と熱影響を考慮すると、小径の孔では非効率で、φ3.0mm 以上が適するものとする。

2.3.5 各種孔加工方法の選択

前項ではドリル加工だけでなく、最近の新しい加工手法を含め、それらの特徴を述べたが、それらパフォーマンスを総合的に数値評価する手段を考察する[3]。ここで、孔評価関数を F とする。加工速度 f 、孔径の範囲を d 、また孔品質の評価関数を Q 、装置費や加工可能な孔数 n を考慮したコストを C と定義し、 Q の構成要素として内面粗度 sr 、孔欠陥(欠け、剥離) rd 、孔径公差 fe 、孔形状 hs を盛り込んだ式を次のように定義する。

$$F = f \times d \times Q(sr, rd, fe, hs) / C \quad (2.1)$$

これらの結果をまとめたものを表 2.4 に示す。なお、これら数値はすべて 1～5 の 5 段階評価、すなわち 5 が良好あるいは大きい、1 が乏しいあるいは小さいとして、便宜上表わすものであり、すべて無次元数とする。

Table 2.3 Comparison of many drill materials and characteristics [3]

Tool materials	Material hardness	Tool life, rough number of Holes	Hole quality and typical futures	Use for stuck with metal	Price
Solid Carbide Standard twist	HRA 85~95	good 60~150	Most common tools. Along the progress of tool wear, easy to occur delamination at the outlet side of the holes.	Suitable	Standard
Solid Carbide Drill reamer	HRA 85~95	Good 60~150	Designed for hand feed use, even can use for machine feed. Roughness of holes is good and delamination is hard to occur.	Not suitable	A little expensive
Diamond coated Carbide Standard twist	Hv8000~10000	Very good 100~300	Same tendency with the carbide tools, but the tool life is much improved	Not suitable	A little expensive
PCD Standard twist	Hk70~85GPa	Very good 200~500	Excellent tool life and surface roughness is good, but very weak by the impact so easy to occur chipping.	Not suitable	Very Expensive
Solid Ceramic Standard twist	Hmv 30GPa 3300kg/mm ²	Very good 100~300	Same performance with carbide tools, but tool wear speed seems much higher and easy to occur chipping like PCD.	Possible	Expensive (Note)

(Note) There is a possibility to become cheaper if they will be on a mass production line.

Table 2.4 Summary of hole evaluation item and result

Method of hole preparation	Speed (f)	Range of hole size (d)	Quality of Holes $Q=(sp+rd+ht+hs)/4$	Tool & Equipment cost (C)	$F = \pi r^2 \cdot n \times f \times d \times Q / C$	r	A	B
Drill (Average)	(3.5)	(3)	(4.0)	(2.8)	(15.8)	(2.2)	2.2	3
- Solid Carbide	3	3	3.75: (4, 3, 4, 4)	2	16.8	2.1		
- Diamond coated carbide	4	3	4.0: (4, 4, 4, 4)	3	16	2.3		
- PCD	4	3	4.5: (4, 5, 4, 5)	4	13.5	2.1		
- Solid Ceramic	3	3	3.75: (4, 3, 4, 4)	2	16.8	2.3		
2 AWJ	4	4	2.75 : (3, 4, 2, 2)	5	8.8	0.8	0.8	2
3 Laser	2	4	2.25 : (2, 2, 2, 3)	4	4.5	1.2	1.2	2
4 EDM	1	3	4.0 : (4, 4, 4, 4)	3	4.0	1.1	1.1	2
5 Blast	2	2	2.25 : (2, 4, 2, 2)	3	3	1.0	1.0	1.5

Evaluate : 5—point scale. 5:very good 4:good 3: normal 2: a little poor 1:poor
 Surface roughness: sr, Rack of delamination: rd, Hole tolerance: ht, Hole shape: hs

つぎに表 2.4 から得られた孔径－能率の関係で各孔加工手法の特徴から，加工に適した領域を考察する．すなわち，横軸に加工速度(すなわち加工能率に相当)を，縦軸に最適な孔径を示した領域図を表わした(図 2.3)．ここで，X 軸＝加工能率，Y 軸＝孔径，平均的な加工スピード（効率） f とその横軸の範囲 A' を縦方向の径，平均的な加工領域 d とその縦軸の範囲 B' を横幅の径，加工可能な範囲(半径を) r とすると，

$$(X-f)^2 + (Y-d)^2 = \pi r^2 \quad (2.2)$$

$$X^2/A'^2 + Y^2/B'^2 = 1 \quad (2.3)$$

の関係を仮定して作画したもので，各加工法のサークル範囲は，それぞれの加工法が最も効率的な領域を示す．なお，加工速度，加工効率，コストは，年々技術の進歩で向上するので，現時点の比較の目安を示すものである．

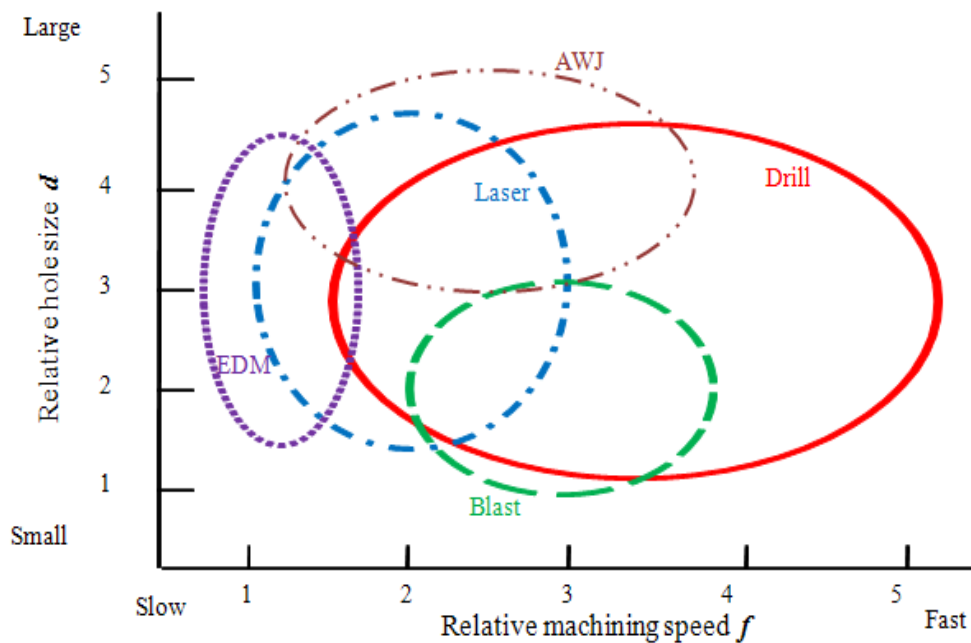


Fig. 2.3 Suitable zone of various method of prepare holes for CFRP

2.3.6 孔径と板厚に応じた加工上の考察

航空機では、構造部位に応じて、用いられる CFRP の板厚や必要な孔のサイズ、ファスナの種類まで、かなり異なることが知られている。大きく分類すると、たとえば、主翼では非常に厚い構造と太いファスナが、尾翼や動翼では構造が薄く細いファスナが、胴体はその中間のものがという具合である。この結果、用いる工具類や平均的に使われる孔あけ条件も異なってくるため、それぞれの加工部位ごとの課題も異なってくる。その結果、製造工程設計における工具選択も戦略的に異なってくるものと考える。これを整理したものを次ページの表 2.5 に示す。

Table 2.5 Subjects of the hole machining in accordance with the thickness and hole sizes

Thickness and hole size of processing holes, and features 孔加工のサイズと板厚, 特徴など	Rotational tools and rotation speed of mainly used 使われる主な工具類と回転数	Typical parts 代表的な部位	Subjects of processing holes 孔加工上の課題
1. Special large size holes and large size thickness 1/2 to 1", 15 to 30 mm thickness (Drilled separately) often fastening with metal parts 特大孔・板厚特大 1/2-1", 板厚 15-30 mm 金属との締結部が多い(別個に加工)	Machining Center (Jig boring), such as a power feed only (case for precision machining alone often) revolutions: 100-500 mm ⁻¹ マシニングセンタ(ジグボーラ), 専用のパワーフィードなど(単体で精密加工するケースが多い)回転数: 100-500mm ⁻¹	Wing-body joining, link unit of landing gear structure, etc. 翼胴結合部, 脚構造リンク部等	<ul style="list-style-type: none"> Special tools. Expensive special equipment Careful work the steps of processing quality stable failure is not allowed absolutely is required 特殊工具. 特殊設備で高価 絶対に失敗が許されない安定した加工品質が要求される工程と慎重な作業
2. Large size diameter-Large thickness 5/16 to 1/2 "diameter plate 5 to 25mm thickness CF + CF, CF + Al, such as CF + Ti 大径・板厚大 直径 5/16-1/2" 板厚 5-25mm CF +CF, CF +Al, CF +Ti など	There are many cases to introduce automatic feed function with a special tool such as a power feed, or a programmable function tools. Revolution speed: 500-20000mm ⁻¹ パワーフィードなど専用の自動送り機能付き工具, 一部プログラム機能付き工具の導入が多い. 回転数: 500-20000mm ⁻¹	Wing structure High rigidity parts 主翼構造 部品剛性高い	Drilling work efficiently for a large diameter hole large number of training tool management and handling of the power feed, suction of chips, tool holding attitude, and training of skilled workers 多数の大径孔を効率良くあける, パワーフィードのハンドリングや工具管理, 切屑の吸引, 工具保持姿勢, 技能工の養成.
3. Middle size diameter and middle size thickness 3/16 to 5/16 diameter 2 to 50 10mm "thickness CF + CF center, some CF + Al, there are CF + Ti 中径・板厚中 直径 3/16-5/16" 板厚 2-10mm CF +CF が中心, 一部 CF +Al, CF +Ti あり	Air ball with stopper and part guide (rotary tool), tools automatic feed function with power feed, such as power assist, Revolution speed: 500-3000mm ⁻¹ パワーフィード, パワーアシストなど自動送り機能付きの工具, 一部ガイドとストッパ付きだけのエアボール(回転工具). 回転数: 500-3000mm ⁻¹	Fuselage structures, tail structures, Rather low rigidity parts 胴体構造・尾翼構造 部品剛性やや低い	Improvement of hole processing speed, improve the tool exchange rate, countermeasures of insufficient rigidity parts 孔加工速度の向上, 工具交換速度の向上, 部品剛性不足への対策
4. Small-diameter- small thickness 1/8 to 1/4 "thickness 1 to 5mm diameter CF + CF, partially CF + Al, and also GFRP 小径・板厚小 直径 1/8-1/4" 板厚 1-5mm CF +CF, 一部 CF +Al, GFRP もあり	In some cases, guided air ball mainstream, sometimes power feed, power assist are used ガイド付きエアボールが主流, 一部パワーフィード, パワーアシストが使われる場合もある	Controlled wing parts, Fairings, Low rigid parts 動翼類, フェアリング, 部品剛性低い	
5. Special site and other Holes are not for fasteners, sound absorption holes (1 to 2 mm), lightening holes (such as 30 mm or more) その他特殊部位 ファスナ締結用でない孔, 吸音孔(1-2 mm), 軽減孔(30mm 以上など)	Method other than drilling has been investigated, and also end milling ドリル加工法以外の方法も検討されている, エンドミル加工などもあり	Engine cowls, spars, and ribs etc. エンジンカウル, スパー・リブ等	Individually, need to consider selection and processing method 個々に加工法の選択や検討が必要

2.4 まとめ

航空機用 CFRP 材の孔加工において、最近開発された新しい加工法も含めて各種加工法の比較を行った。この中で CFRP が難削材料である理由を整理し、ロジックツリーを使って、孔加工が難しい理由を分析した。さらに、各種加工法を戦略的に選択するための基礎研究を行った結果、各加工法の能力の定量化のために孔評価関数を提案し、孔径－能率図を導入した比較を試みた。これらの手法を用いることで、孔加工法の選定や加工法の改善を行なう上の指針が得られるものと考ええる。

加工要素ごとの結論をまとめると以下のようなになる。

- (1)ドリル加工は、工具材質の選定が最も重要で、適切な材質選定で、広い範囲に対応可能であるが、工具摩耗に起因する品質のばらつきを避けることはできない。
- (2) AWJ は部品切断や大径の孔加工には適する。しかしファスナ孔のような小径の高精度孔には適さない。
- (3)ブラスト加工は、近接する小径孔を多数あけるような特殊加工に適するが、孔形状品質面から、航空機のファスナ孔には適さない。しかし、航空機の吸音パネルのような、孔精度がファスナ孔ほど高くない部位には、有効な加工法である。
- (4)レーザ加工は、加工面に熱影響による剥離など残るため、ファスナ孔には使えず、下孔加工や軽減孔などの加工には適する。しかし今後、レーザ技術の改良により、用途が拡大する可能性がある。
- (5)EDM は未知数、高精度で小型部品の加工には適するが、現時点では加工速度に課題がある。
- (6)打ち抜き加工は、薄板以外は適さない
- (7)熱可塑性 CFRP は溶着の課題があり、熱硬化性 CFRP 以上に難削材料である。

2.5 今後の課題と展望

複合材料の中でも CFRP の歴史は浅く, 材料も加工法も今後さらに進化するものとする。また, 加工のデータベース化が十分追いついておらず, CFRP 特有の難しさもあり, 今後一般産業に普及していくためには, さらなる研究データの蓄積が必要であるとする。中でも, 自動車だけでなく, 航空機においても熱可塑性 CFRP が注目されており, 熱硬化性 CFRP 以上に加工データベースの整備普及が求められる。

以上各種の孔加工技術の中でも, 本論文では多数の小径孔を効率的に加工できる方法として, ブラスト加工に注目し, 以降の章で詳細に述べる。

参考文献

- [1]深川仁:CFRP 等次世代新材料の加工技術の現状とその問題点, 月刊オプトロニクス, 373 (2013)pp.90-94.
- [2]深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄: ブラストによる CFRP の孔加工技術の開発, 砥粒加工学会誌, 56(2012-4)pp.50-55.
- [3]H.FUKAGAWA, T.HIROGAKI, T.KATO: Development of Hole Generation Technologies for Aircraft CFRP Parts, Key Engineering Materials.vols.523-524 (2012) pp.226-231.
- [4]狩野勝義 :難削材・新素材の切削加工ハンドブック, 工業調査会, (2007)pp.11-12.
- [5]石坂英男:ロジカルシンキング研修.com :
<http://www.ltkensyu.com/logicalthinking4.html#link4> 2014.8.20 アクセス
- [6]小倉仁志: なぜなぜ分析 徹底活用術-「なぜ?」から始まる職場の改善, JIPM ソリューション, (1997) pp.16-17.

3 章 ブラストによる孔加工の基礎研究

3.1 はじめに

ブラスト加工は従来からバリ取り・塗装剥離・下地処理・錆取り・美術工芸品の製作などに利用されており、最近では電子基板やセラミックスなどの工業製品の精密加工にも使われているが、CFRP 材料の加工に適用された例はほとんど見当たらない。

そこで、本ブラスト技術を使えば、航空機部品用の CFRP に対しても、安価で大量の孔をあける事が可能ではないかと考え、その適用を試みた。また、過去に FRP のエロージョン特性やエロージョン摩耗(固気2層流や、固液2層流において、気流や液流中の粉体の粒子が対象物に衝突することによって生じる摩耗現象)についての報告例が僅かながらあるが[1]～[3]、ブラスト加工と、CFRP のエロージョン摩耗に着目して、航空機部品の孔あけに適用した例は見当たらない。

本章では、ドリル(切削加工)以外の加工法の一つとして、従来にない全く新しい手法としてブラストによる効率的な孔あけ方法を提唱しその加工方法、加工効率、品質の向上を比較評価することを目的とする。そして、CFRP 材料の除去加工のメカニズムを明らかにし、CFRP に効率よく多数の小径孔を施すために、微細砥粒を用いて直圧式ブラスト加工による孔あけ加工実験を試みる。また、CFRP の板厚、孔径などブラスト加工条件の変更によって孔精度・品質への影響の追及を行なう。

3.2 基本理論および実験方法

3.2.1 ブラスト加工の基本理論

ブラストによる孔あけ加工では、加工箇所と保護する面とを区分けするため、孔あけしたマスク材を作り、被加工材である CFRP 表面に粘着剤で貼り付けてから加工する。したがって、ブラストによりマスク材はエロージョン摩耗する量が少ないのに対し、CFRP はエロージョン摩耗が進む条件設定が前提となる。

ブラストによる孔あけのモデルとテーパの説明を図 3.1 に示す。ここで板厚を $t(\text{mm})$ 、マスク材の孔径を $D_0(\text{mm})$ 、孔入口径を $D_1(\text{mm})$ 、孔出口径を $D_2(\text{mm})$ とし、テーパ角 $\theta(^{\circ})$ は、 $\tan^{-1}\{(D_1-D_2)/2t\}$ とする。孔 1 個当りの CFRP 除去重量 $\Delta w(\text{g})$ は、孔径を $d(\text{mm})$ 、板厚(孔深さ)を $t(\text{mm})$ 、CFRP の比重を ρ (平均 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$)、1 孔加工中に投射される砥粒数を n 、1 ケの砥粒が除去する平均重量(エロージョン重量)を Δm (ここで、 Δm は流速 v に比例する[4]ものとする)とすると

$$\Delta w = d^2 \cdot t \cdot \rho / 4 = n \cdot \Delta m \propto n \cdot v \quad (3.1)$$

さらに、投射される砥粒数 n はノズルから出る単位時間当たりの粒子数 N に比例し、ノズルの送り F (mm/sec)に反比例し、次の関係にある。

$$n \propto N/F \quad (3.2)$$

以上から考察すると、1 孔加工あたりの CFRP 除去量を多くするには、流速 v が大きく、単位時間当たりに出る砥粒数 n が多いほど、あるいは送り速度を遅くして、暴露時間、すなわち加工時間を増やす方が良い事がわかる。

一方、エロージョン摩耗は粒子が衝突しても、ほとんど摩耗が進行しない潜伏期と、衝突粒子の重量に比例して摩耗が進行する定常期が存在する[5]。圧力を上げて流速が大きくなりすぎた状態で送り速度を下げると、マスク材が潜伏期より定常期に移行し、先に摩耗して孔品質が保てなくなるので、最適な加工条件の範囲が存在すると予測される。

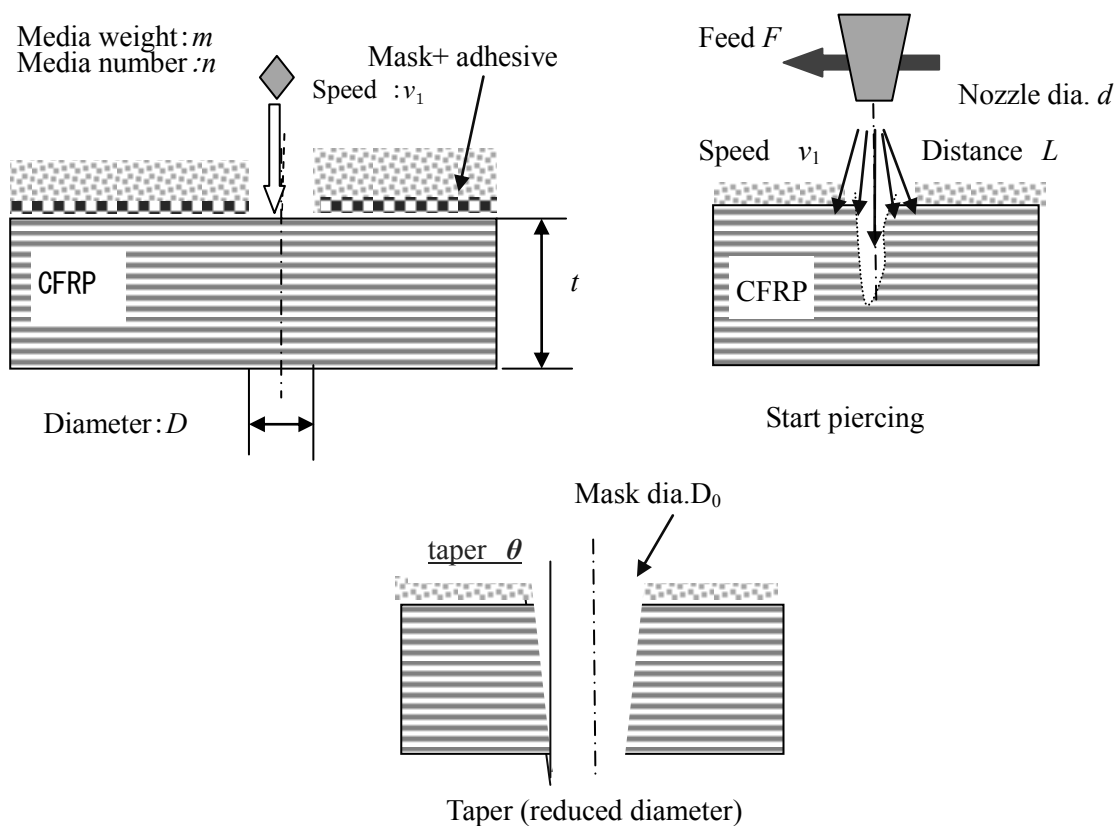


Fig.3.1 Explanatory image model of holes preparation by blast and taper shaped holes

3.2.2 実験方法

使用設備として、従来のサクション式ブラスト装置と比較して、加工能力が高い(式(3.2)中の n を向上した)直圧式サンドブラスト装置を用いた(図 3.2, 3.3). これは砥粒(研磨材)噴射量を任意にコントロールでき、最適噴射量で精度の高い微細サンドブラスト加工を安定して実現するためである.

ノズル及び被削材は NC により一定速度(ノズルは高速送り, コンベアは極低速送り)で送られる構造(図 3.2 中の加工室を参照)で, ノズルの往復運動で一か所に数回パスが通る. マスク材には, あらかじめ 0.5~2.0mm の孔が形成される. なお, 当初予備実験でサクション式ブラストを用いたが, テーパー角が大きく, 孔として良好な形状が得られなかったので, 直噴式に変更した. 実験条件を表 3.1 に示す. 被削材は熱可塑性 CFRP (ポリウレタン樹脂, クロス材, 板厚 0.25mm, 0.5mm の 2 種類) および熱硬化性 CFRP (エポキシ樹脂, クロス材, 板厚は 1.5mm, 1.7mm, 2.7mm の 3 種類), マスク材はドライフィルムレジスト(アクリル製ポリマー樹脂フィルム, 0.1mm 厚を 1 枚重ね, 三菱製紙株式会社), 砥粒は酸化アルミニウム(ホワイトアランダム WA#320, 平均粒径 40 μ m)を使用した. また, ノズル圧力を 0.36MPa, ノズル速度(X 軸)を 8m/min, コンベア速度(Y 軸)を 20mm/min, ノズル径を ϕ 10mm, ノズルから被削材までの距離を 100mm とした.

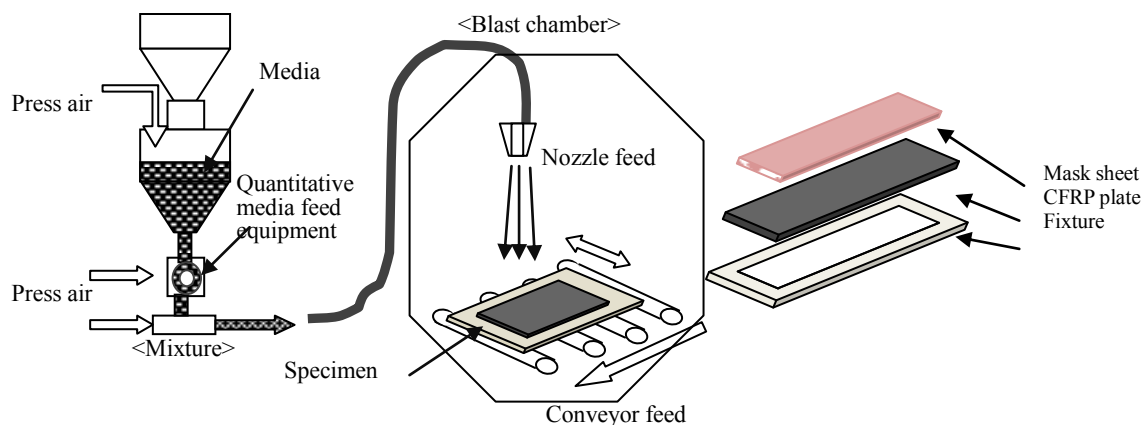


Fig.3.2 Schematic diagram of direct injection type blast machine & specimen



Fig.3.3 Picture of a blast machine (Elfo-blaster ELP-3TR)

Tble3.1 Blast test conditions


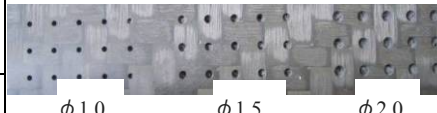

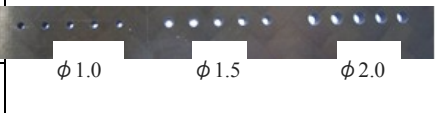
Work piece materials	Thermo plastic CFRP	Pori-urethane (TPU) matrix, cloth, Thickness 0.25, 0.5mm
	Thermo setting CFRP	Epoxy matrix, cloth, Thickness 1.5, 1.7, 2.7mm
Mask material	Dry Film Resist	Acrylic polymer film, Thickness 0.1mm 2ply, Mitsubishi plastics, Inc.
Abrasive medias	White alundum	Oxide aluminum, WA # 320, average particle size 40 μ m
Pressure	At nozzle	0.36MPa
Feed speed	X axis	Nozzle feed 8m/min (reciprocating motion)
	Y axis	Conveyer feed 20mm/min
Nozzle	Diameter	ϕ 10mm
	Distance	100mm (distance from the work piece)

3.3 実験結果および考察

3.3.1 加工実験結果

材種と板厚の異なる CFRP に孔径 0.5～2.0mm までの加工を行った。結果を表 3.2 に示す。

Table 3.2 Experimental result of blast for each material specimens

Materials	Thickness (ply Number)	Paths number	Hole dia. off mask	results	Picture of test pieces
Thermo plastic CFRP TPU matrix	0.25mm (1ply)	Hand feed	0.5, 1.0, 2.0	Pierced	
	0.5mm (2ply)	10paths	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	Not pierced completely (right picture)	
Thermo setting CFRP Epoxy matrix	1.5mm (4ply)	1 path	1.0, 1.5, 2.0	<u>Not pierced</u>	
	1.5mm (4ply)	3 paths	1.0, 1.5, 2.0	<u>Just pierced</u> (right picture)	
	1.5mm (4ply)	10 paths	1.0, 1.5, 2.0	Pierced (right picture)	
	1.7mm (4ply)	10 paths	1.0, 1.5, 2.0	Pierced	
	2.7mm (7ply)	17 paths	1.0, 1.5, 2.0	Pierced	
	2.7mm (7ply)	20 paths	1.0, 1.5, 2.0	Pierced (right picture)	

3.3.2 熱可塑性CFRPと熱硬化性CFRPの違い

表3.2より熱可塑性CFRPは、板厚0.25mmの薄い材料は加工できたが、板厚0.5mmと厚くなると、貫通する前にマスク材が摩耗した結果となり、ブラスト加工では難加工性であった。これに対し熱硬化性CFRPは板厚1.5mm, 1.7mm, 2.7mmにおいてすべて貫通が認められる結果となり、加工性が良く孔あけが可能であった。

熱可塑性材料のブラストによる加工性が悪い(加工時間が長くなる)のは、図3.4に示すように、一般的に衝撃吸収性能が熱硬化性より高いため、材料の弾性が大きく(すなわちヤング率が小さく)、砥粒を跳ね返しやすいため、中でもポリウレタン樹脂は耐摩耗性に優れた性質を持つことなどから、エロージョン摩耗が進みにくいことなどの影響ではないかと考える。

なお、表3.2の中でply数(プライ数)は、積層板をつくる際の強化繊維の織物クロス(プリプレグ)の積層枚数を示す。また、加工パスは、装置上でノズルが孔位置の上をブラスト噴射しながら通過した回数を示す(ノズルが面全体をスキャンする行程を1パスと定義する)。

一方、熱硬化性CFRPでは次のような結果であった。マスク孔径1.0, 1.5, 2.0mm, 板厚1.5mm(4ply)で1パス, 板厚1.5mm(4ply)で3パス, 板厚1.5mm(4ply)で10パス, 板厚1.7mm(4ply)で10パス, 板厚2.7mm(4ply)で17パス, 板厚2.7mm(4ply)で20パスで実験を遂行した。その孔貫通の有無の結果を図3.5に示す。なお、図中の○印は孔が局所的に貫通した後、出口径が入口径と同程度に広がったことを示し、△印は孔が局所的に貫通した貫通直後、×は孔が貫通していないことを示している。図3.5より、あまり孔径に関係なく板厚に対して十分なパス数を確保すれば問題なく貫通孔を加工できることがわかる。

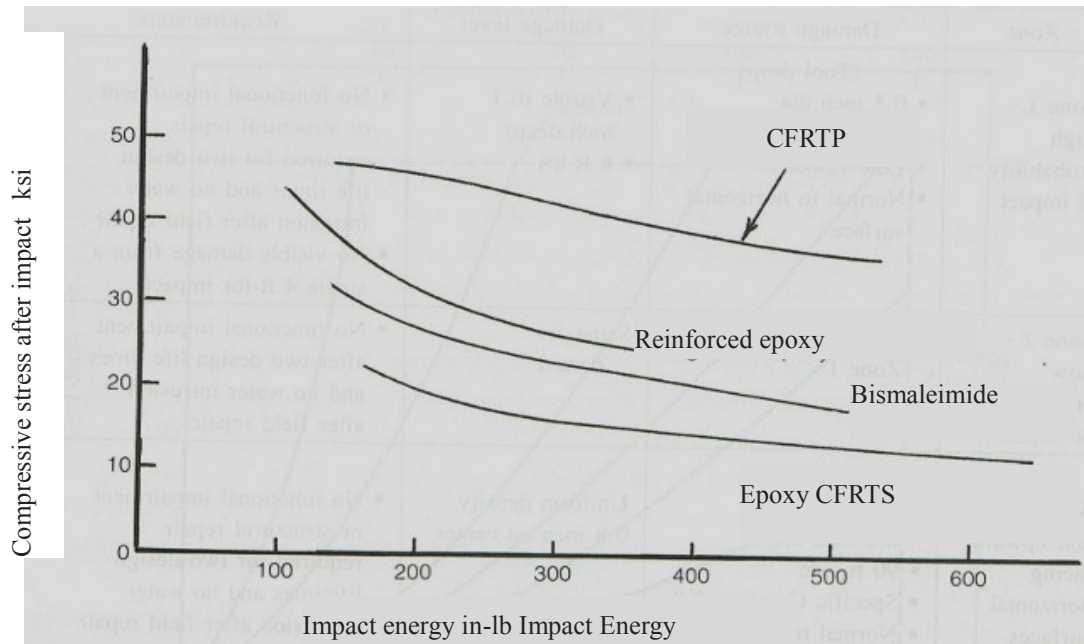


Fig. 3.4 Comparison of the impact resistance due to the difference in CFRP resin[5]

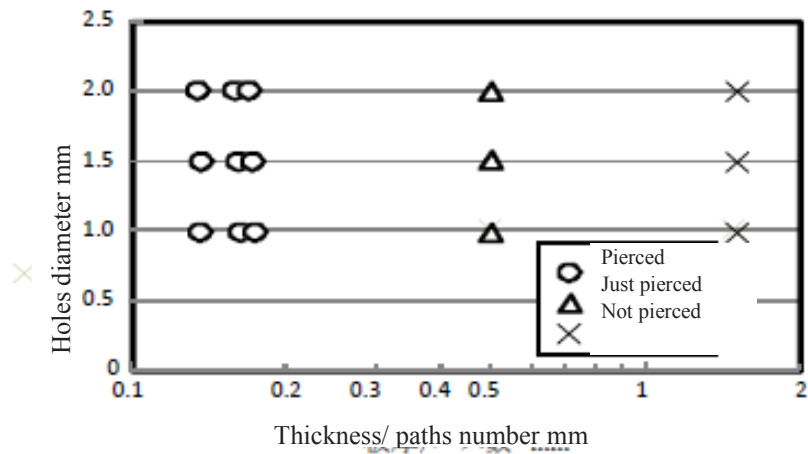


Fig. 3.5 Result of the hole through the plate/ number of paths

3.3.3 熱硬化性の孔加工状況とテーパの発生

熱硬化性CFRPの板厚1.5mmでは3パスで孔が貫通直前、4パス以降に孔が貫通し広がることが観察された(図3.6, 3.7). ただし, 材料が厚くなると, 貫通しても孔がテーパ状になる傾向があった(図3.8の断面図参照). 例えば板厚1.5mmと2.7mmのもので, テーパ角 $\theta=3.7^\circ$, $\theta=5.7^\circ$ 程度の出口入口の寸法差が出た(テーパ角は図3.1参照). これは鉛直管内の固気二層流において, 気体の流速が早い場合は, 固体粒子の壁面衝突の影響が無視できなくなるため[6]と考えられる. したがって, 貫通後さらに加工を続ける間に, マスク材の孔側面が先に摩耗し, 図3.1に示すマスクの孔径 D_0 (mm)が広がるためと考えられる(図3.8).

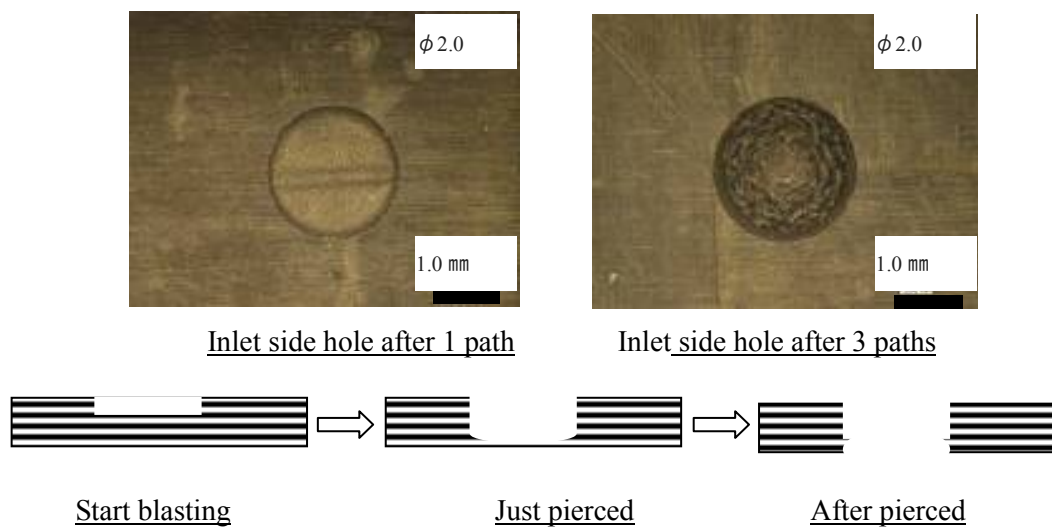


Fig. 3.6 Picture of holes and cut image of holes during blast process

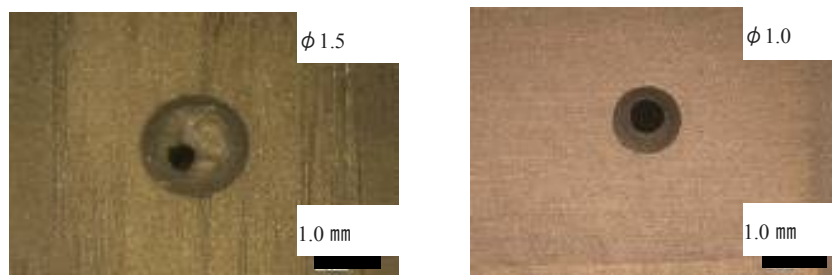


Fig.3.7 Picture of holes during blast process after 3 paths (partially start piercing)

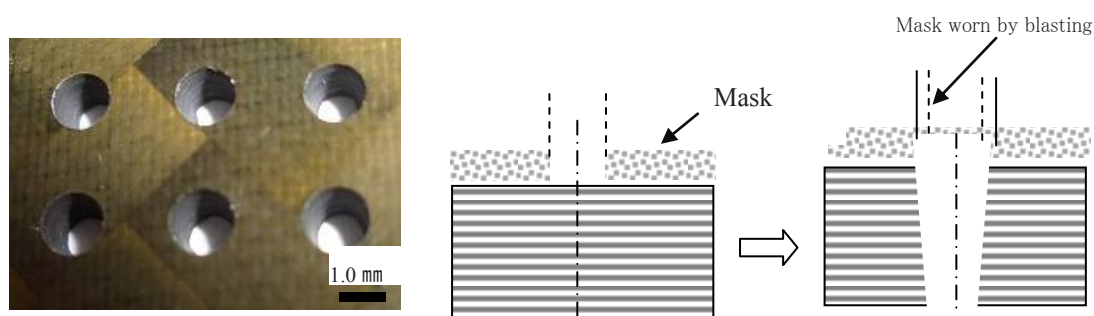


Fig.3.8 Holes photos and tapered hole and explanation to become taper hole

(By the blast stage, the side hole of the mask material is worn a little. Hole diameter was slightly enlarged at inlet side as a taper shape (plate thickness 2.7mm)

3.3.4 加工孔の形状

加工前のマスク径(ノミナル径で1.0, 1.5, 2.0mmの各孔)と、ブラスト加工後のCFRPの入り口側孔径を、比較したものであるが、孔入口側では全体的にマスク径より、孔径がわずかに大きくなることがわかった(図3.9)。この時、1パス加工後と3パス加工後では、その差がわずかに大きくなっており、加工が進むにつれ、マスク径に対してCFRPの孔径が大きくなることがわかる。これは、パスを重ねるとブラストの暴露時間が長くなるので、マスク材の孔側面のエロージョン摩耗が発生し、その結果CFRPの入り口側がわずかに拡大して行くものと考えられる。図3.10は、1パスと10パス加工後の、孔入口側と出口側の径と加工前のマスク径を比較したものであるが、CFRPの入口側は、加工が進むにつれ孔径がわずかに拡大していくが、出口側では、孔径がマスク孔径よりも小さい、すなわち、孔の拡大が十分起きていないことがわかる。

図3.11は、マスクの孔径とCFRPの孔径の差($=D_1-D_0$)とパスの関係を示す。1mm径では加工パスに応じて徐々に孔径が広がるのに対し、2mm径では3パスまでに孔が広がり、その後の孔径拡大は少ない。これは、孔径が大きい程、砥粒が入る量が多いので、小径より早めに摩耗が進展する傾向にあるのではないかと推定される。また孔貫通後(10パス目)の孔入口と出口の径を調べると、CFRPの出口孔 D_2 がCFRPの入口孔 D_1 に対し、約12~22%小さく、テーパ状の孔になることがわかる(図3.12)。なお、図の横軸は入口径で、縦軸は $\{(入口径 D_1 - 出口径 D_2) / 入口径 D_1\} \times 100$ で表す、出口と入口の差を意味した比率である。

テーパ角 θ (図3.12は比率で示してあるがテーパ角の θ と比例関係にある)は、1, 1.5, 2.0mm径の順で大きく、小径であるほど、出口側のエロージョンが不十分になるものと考えられる。3.3.3節で述べたマスク孔の径の拡大に加えて、孔径が小さいほど、孔内側を通る砥粒の数が少ないため、出口側のエロージョンが進みにくいことによるのではないかと考えられる。これ

は、孔の面積は直径の2乗に比例するので、孔を通過する粒子数が、1mm、2mm径では、おおよそ4倍異なることで、エロージョンの進行速度が変わるためと考えられる。

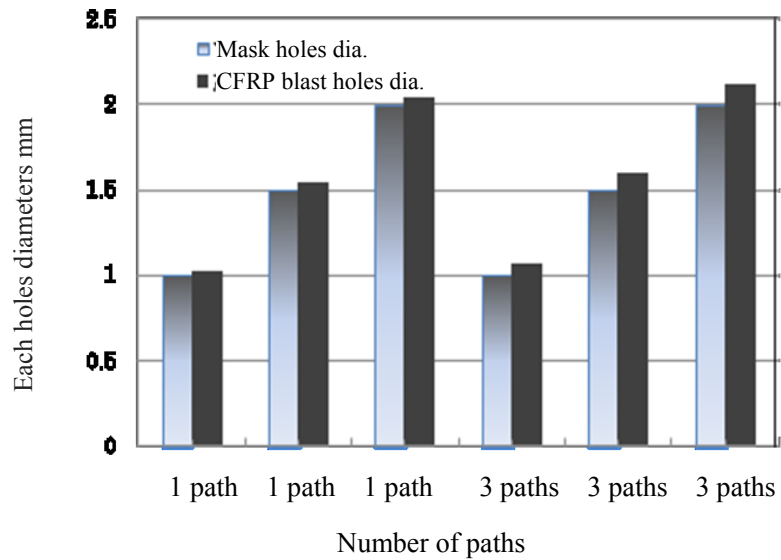


Fig.3.9 Relationship of holes size and number of path (1)

(1 path is just start blasting, 3 path is a started timing of piercing)

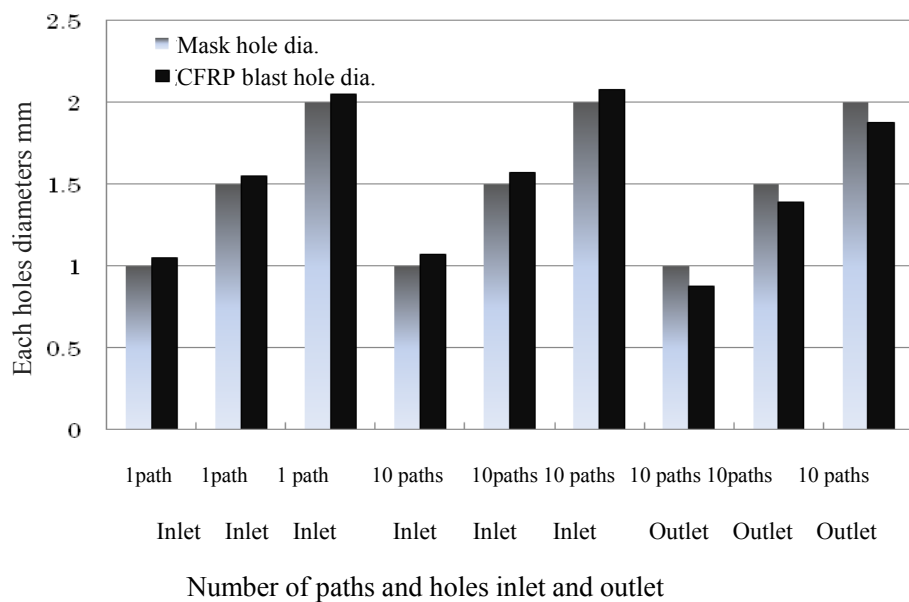


Fig.3.10 Relationship of holes size and number of paths (2)

(1 path is just start blasting, 10 path is a finished blasting)

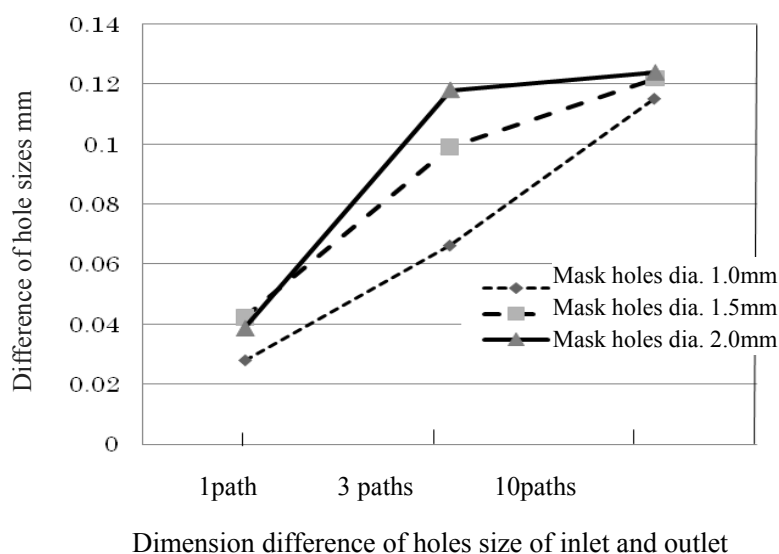


Fig.3.11 Relationship of difference of holes sizes and number of paths

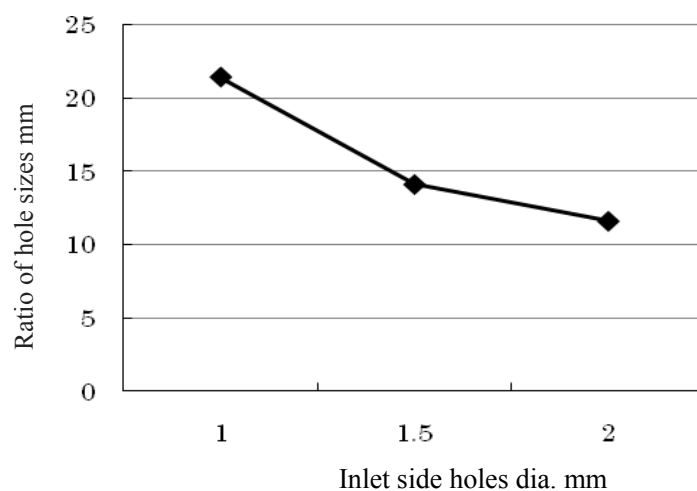


Fig.3.12 Relationship of inlet holes diameter and inlet/ outlet holes sizes ratio

$$\{ (\text{Inlet dia. } D_1 - \text{Outlet dia. } D_2) / \text{Inlet dia. } D_1 \} \times 100$$

3.3.5 加工速度の考察

ノズル往復幅 100mm コンベア送り 15mm の範囲に 45 ケ (15×3 列) の孔をあけたが、コンベアの送り 20mm/min に対し、ノズル送りは 8m/min と 400 倍早いことから、短時間で加工に必要な加工パスを十二分に走ることができ、加工に要する時間はコンベア送りにほとんど左右される。すなわち、 $15(\text{mm}) / 20(\text{mm}/\text{min}) = 0.75\text{min} = 45\text{sec}$ でカバーされ、45 秒/45 ケ = 1 秒/孔で加工できる計算となる。すなわち、CFRP の除去速度(すなわちエロージョン速度)は、板厚 1.5 mm であれば深さ方向に換算して 1.5mm/s である(図 3.13)。

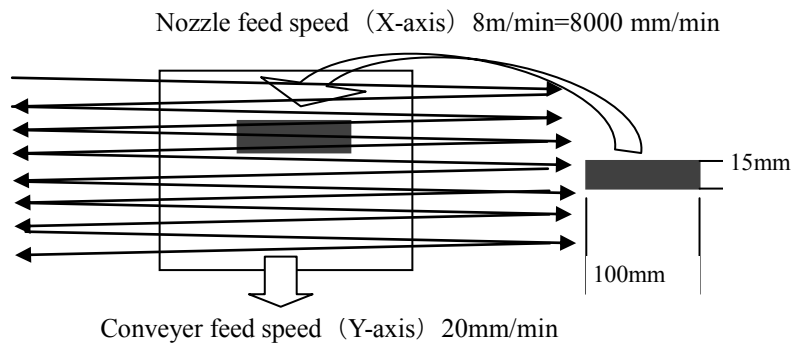


Fig. 3.13 Description of hole machining time (calculated) and relationship of the conveyor and feed nozzle

本結果は基礎実験として広い面積に連続して加工したものではなく、限定範囲だけ加工した事から、加工時間は計算上約1秒／孔であった。しかし、マスクの用意、貼り付け、剥がし、など前後工程をトータルで考えれば、加工時間は 4～5 秒に長くなる可能性がある。ただし、孔の密集度にも応じて、実加工では広範囲に連続して孔をあけて行く場合、ノズル往復運動の減速・停止・加速に要する時間の実加工時間に対する割合が減少し、孔当りの加工時間を短縮できる可能性がある。したがって、1章の表1.1に目安として示した加工時間(段取りを除く正味加工時間)としては、ドリルの4～5秒やAWJの2～3秒に比べて、加工目的によっては、遜色のない加工法である事がわかる。

念のため、これら数値は、導入する装置の規模や性能、部品形状や製造数に大きく依存するので、参考までとする。

3.3.6 孔内面粗度・ケバ・バリなどの品質評価

孔内面を光学顕微鏡で観察した結果、ドリル加工と比べてほぼ同等の面粗さ(航空機部品の一般的な切断面の粗さ基準である中心線平均粗さ $Ra = 12.5\mu m$)であった。また、孔入口出口に、バリやケバといった、削り残しや損傷は観測されず、外観の品質面も十分に高いレベルである。ドリル加工等では、出口側の削り残し、ケバ、剥離といった不具合が発生しないよう注意する必要があるが、エロージョン摩耗による微小な除去作用の積算による本加工では、それらを考慮する必要はないことがわかる。しかし、孔側面を肉眼で見えないが顕微鏡観察では、砥粒の破片が側壁に付着していることが観測された(図3.14)。したがって、使用目的によっては何らかの方法でわずかに残存する砥粒を除去する必要があることもわかる。

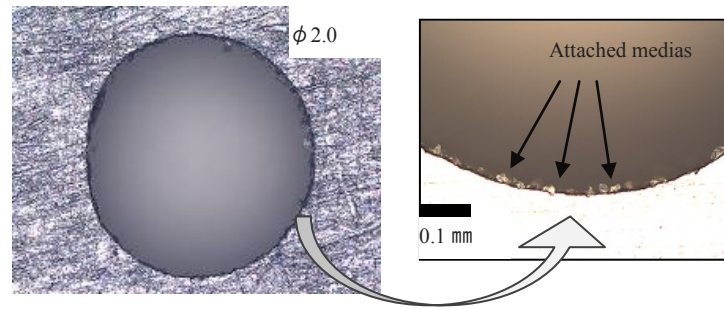


Fig.3.14 Hole inside surface and attached media particles

図3.15, 3.16は、熱硬化性および熱可塑性CFRPの吸音パネルの模擬形状を加工した例である。当該箇所の板厚はそれぞれ 1.7mm, 0.5mm であり、母材の樹脂は表 3.1 と同じである。

熱硬化性では、孔貫通前後にパス数に応じて孔貫通の良否が明確に分かれるが(図 3.15), 熱可塑性では貫通したものとししないもののばらつきが観察される(図 3.16). 孔を観察すると、最外層(一番裏側)のプリプレグの繊維が繊維方向に沿って、摩耗しきらずに残るケースが多く、熱可塑性では加工パスを重ねても、エロージョン摩耗の進展が遅いため、強化繊維の織目の場所に応じて削り残しの発生に、ばらつきが生じやすいと考えられる。

次に出口側の孔を観察すると、場所により真円になっていないものが見られる(図 3.17, 3.18). なお、これは小径になるほど、多く現われる傾向にあったが、原因はCFRP表面の僅かな凹凸によるもので、加工進展速度のばらつきが生じるためではないかと考える(図 3.16 の写真の表面の例)。

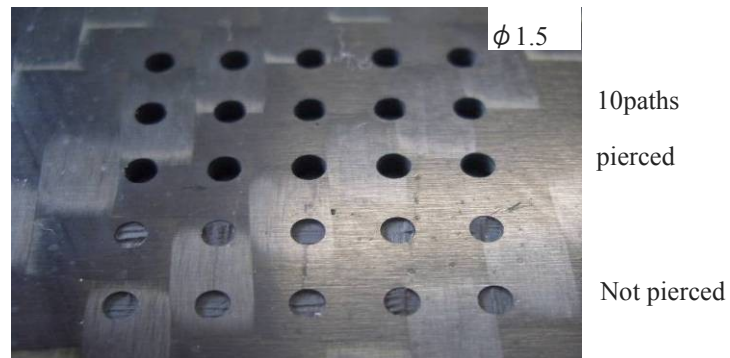


Fig. 3.15 Example of before piercing and after piercing
(CFRTS thickness 1.75mm, 1.5mm dia., after 10 path)



Fig.3.16 Example of before piercing and after piercing
(CFRTP thickness 0.5mm, 1.5mm dia., after 10 paths)

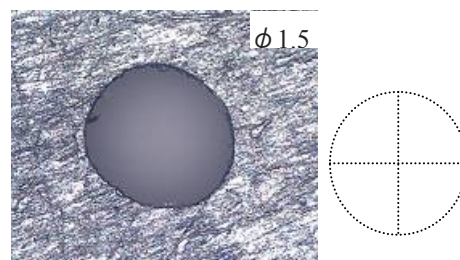


Fig.3.17 Case of the outlet hole shape not a true circle (1.5mm dia.)

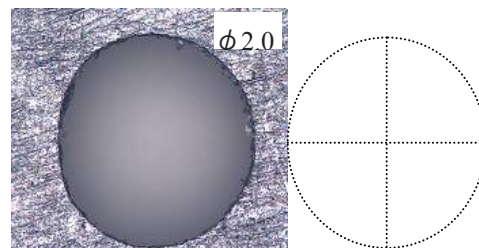


Fig. 3.18 Case close to a perfect circle (2.0mm dia.)

3.4 まとめ

微細砥粒を用いて直噴式ブラスト加工による孔あけ実験を試み、比較的良好な加工ができることがわかり、ブラストの各種条件を変更して、孔精度や品質への影響を調べ基礎的な、加工に必要な条件を見いだすことができた。すなわち、直噴式のブラスト加工において、微細砥粒(酸化アルミナ、平均粒径 40 μ m)を用いることで、航空機のエンジンカウルの吸音パネルを想定した CFRP に対し、1~2mm(孔径)/(板厚)=0.67~2.7 の範囲においての小径の孔あけ加工が十分に可能であることがわかった。

ただし、CFRP 材料の除去加工メカニズムについては、次章にて、より詳しく分析する。

- (1)熱硬化性 CFRP に対しては、特に良好な加工が可能である一方、母材樹脂の弾性が大きな熱可塑性 CFRP に対しては(孔径)/(板厚)=2.0 程度が限界であり、(孔径)/(板厚)=1.0 は加工できなかった。
- (2)熱硬化性 CFRP で 1.5mm 程度の薄板であれば、テーパが比較的少なく、孔径公差内に収まり、孔面粗度や孔出口入口にケバ、剥離のない孔明けが可能である。しかし、2mmを超える厚板になると、孔のテーパ度が強くなり、孔入口に比べ、出口径が約 20%小さくなり、孔径公差を外れた。
- (3)孔内面粗度は良好で、またドリル加工時に問題となる、孔出口部のケバ、剥離などもほとんど起こらない。ただし、砥粒が付着するので、清掃が必要に応じて求められる。
- (4)板厚 1.5mm の CFRP では 3 パスで孔貫通直前、10 パス程度で、良好な孔が得られる。すなわち孔加工(正味加工)時間は、平均 1 秒で、除去速度は 1.5mm/s であった。

参考文献

- [1]宮崎則幸, 重國智文, 宗像健, 武田展雄, FRPのエロージョン特性 Society of Material Science, Japan **40** .449 (1991).
- [2]清水一道, 野口徹, エロージョン摩耗における衝突粒子の諸因子の影響 The Japan Society of Mechanical Engineers **69**, 683 (2003).
- [3]岡崎章三, 長谷川潔, 高森誠, 清重正典, サンドエロージョンによる材料の摩耗特性と摩耗量の推定, The Japan Society of Mechanical Engineers **56**, 527 (1990).
- [4]厨川常元, 吉田典夫, 庄司克雄, アブレイシブジェット加工の加工特性, The Japan Society for Precision Engineering, **6**, 64 (1998).
- [5] Michael C.Y.Niu, Composite Airframe Structures, 427 (1992).
- [6]前田昌信, 猪飼茂, 右近厚雄, 固気二層流の研究, The Japan Society of Mechanical Engineers **39**, 326 (1973).

4章 ブラスト加工の一般性と発展

4.1 はじめに

CFRP の孔加工にブラスト加工を用いる技術について、3章で述べた研究の結果、1～2mm の小径で、ファスナ孔のような高精度な場所でない限りは、効率的に大量に加工する手段として適していることが明らかとなった[1]～[3]。本研究の具体的産業への適用目標は、航空機部品用 CFRP に対し、安価で大量の孔を加工することである。例えば、航空機エンジンのカウル(カバー)には吸音部材として、現状では主に板厚 1～2mm のアルミ合金板に大量の小径孔(直径 1～2mm, 精度 $\pm 0.2\text{mm}$)がドリル加工されているが、その部材を CFRP 板に置き換え、孔加工手段にブラスト加工を用いることである[4]。

しかし、ブラストによる孔あけ過程には、材料の違いによるエロージョン過程の進展の差などの面でまだ不明な点が多く、この章では、ブラスト加工法を実用化するために、その研究の発展を図り、一般性を高めるため、実験値と理論的な計算値との比較などの分析や検討作業を進めることを目的とする。

また、具体的な航空機部品(エンジンカウルに用いる吸音パネルの構成部品)を選び、ここに適用するためのケーススタディならびに、加工工程の検討を行なう。

4.2 実験方法

4.2.1 実験装置・方法および試料

使用設備は、サクシオン式ブラスト装置と比べ加工能力が高い直圧式サンドブラスト装置(ELP-1TR, (株)エルフォテック)を用いた。これは研磨材噴射量をコントロールでき、一定の噴射量で精度の高い微細サンドブラスト加工が可能となる。ノズルおよび被削材は一定速度で送る構造である(図 4.1)。被削材である CFRP などは治具上に固定して、装置の内部のコンベアに乗せて送る一方で、ノズルが左右に往復運動する構造で、板全体を噴射がスキャンする仕組みである。また、送りを止めて一ヶ所に連続集中して噴射する実験方法も採用している。

また、被削材には、事前に孔加工したフィルム状のマスク材を貼り付けておく。このマスクは、あらかじめ直径 0.5～2.0mm の孔などのパターンをフィルムに印刷したネガからフォトエッチング技術を用いて加工部のみに孔をあけたフィルム状の材料である。マスクの製造プロセスを図 4.2 に示す。なお、孔精度は、ネガ 2.0, 1.0, 0.5mm の孔に対して、現像されたそれらのマスクはエッチング時の光散乱等により -0.018mm 、ネガ 3.0mm の角孔では -0.075mm にできたものを使用した。

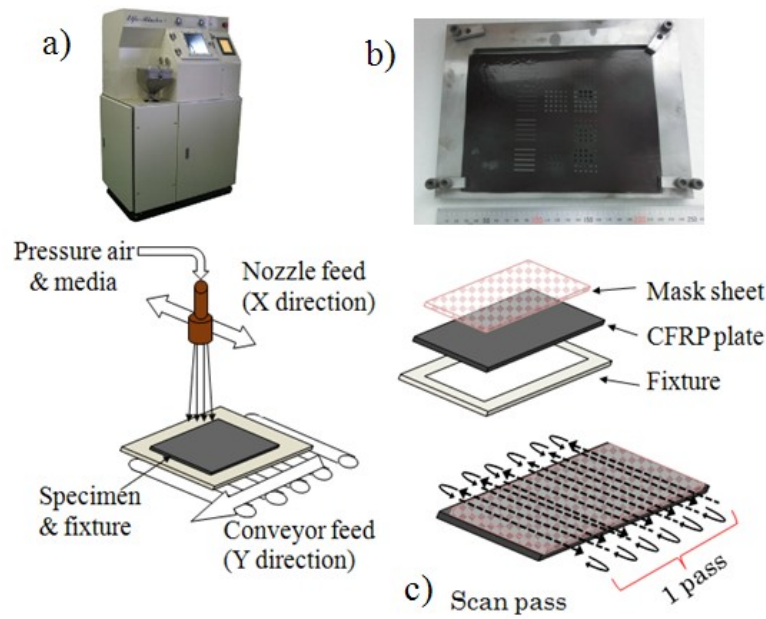


Fig.4.1 Photograph and schematic illustration of a) test equipment, b) specimen and c) scan passes

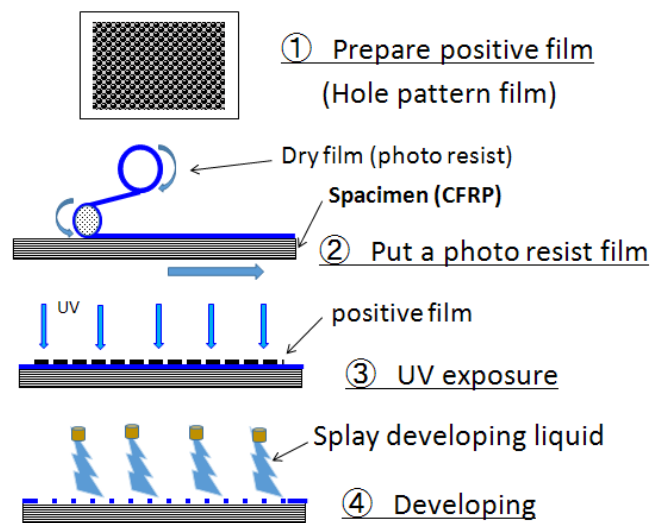


Fig.4.2 Fabrication process of the mask on the specimen

被削材のCFRPには主に、複合材料メーカーが積層硬化して販売している材料(東邦テナックス CF-3K-W3101)で $0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ$ の構成で4枚積層し板厚約1mm(正確には0.95mm)のものと, $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_2$ ($0/90/90/0$ 度方向の2回繰返し積層を示す)構成で板厚約1.8mmのものを用いた. また, 一部の実験では, 航空機用のエポキシ系クロス材(織物材)プリプレグ(東邦テナックス製, TR3110 T853EMW を $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_2$ と8枚積層し板厚約2mmのものを製

作して用いた. さらに, 比較用に UD(一方向)材の積層板, GFRP の積層板, プリプレグの樹脂成分と同じエポキシ樹脂単体の板を製作し用いた. ブラストの実験条件を表 4.1 に, また, 被削材の特性を表 4.2 に示す. なお, CFRP は 1.8mm 板厚を中心に加工評価し, GFRP とエポキシ樹脂(Epoxy と記す)板は比較評価用として用いた. さらに, 加工条件としてノズル圧力と砥粒を変更して比較を行った.

Table4.1 Blast test conditions, mask and abrasive materials

Item	Description	
Mask material	Dry film resist	Acrylic polymer resin film, Thickness 0.1mm, 2 sheets,
Abrasive (Media)	White alundum	WA #320, #600 Density 3.9g/cm ³
	Oxide aluminum	Grain dia. 40μm, 20μm
	Carborundum Silicon carbide	SiC #320 Density 3.2 g/cm ³ Grain dia. 40μm,
Pressure	At nozzle	0.10 MPa, 0.15MPa
Feed speed	X axis	Nozzle feed 8m/min
	Y axis	Conveyer feed 20mm/min
Nozzle	Diameter & nozzle distance	φ5mm, 120mm (between nozzle and specimen)

Table 4.2 Material properties of specimens[3][5]

CF: Carbon fiber GF: Glass Fiber Vf: Volume of fiber, Sample board thickness 1-2mm

	Vf (%)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Hardness (Hv)	Fracture toughness ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
CF	100	230	4000	1235	0.80
CFRP (cloth)	60	137	2060	606	0.63
	Fabric CF-3K-W3101(Toho Tenax) prepreg laminate 4-ply [0/45/45/0] 1mm , 8-ply [0/90/90/0] ₂ 1.8mm				
CFRP (UD)	58	70	1400	4102	0.34
GF	100	55~67	1930~ 2780	-	-
GFRP	67~72	21~24	290~ 390	115	1.04
Epoxy plate	0	3.5	75	22.1	0.50

4.2.2 計測方法

孔断面の形状と体積測定にはレーザ顕微鏡(VF-9700 キーエンス製)を用いた。また、超高速撮影装置(ILS NAC 製)を用いて図 4.3 に示す様なセッティングにて、接写で撮影した。

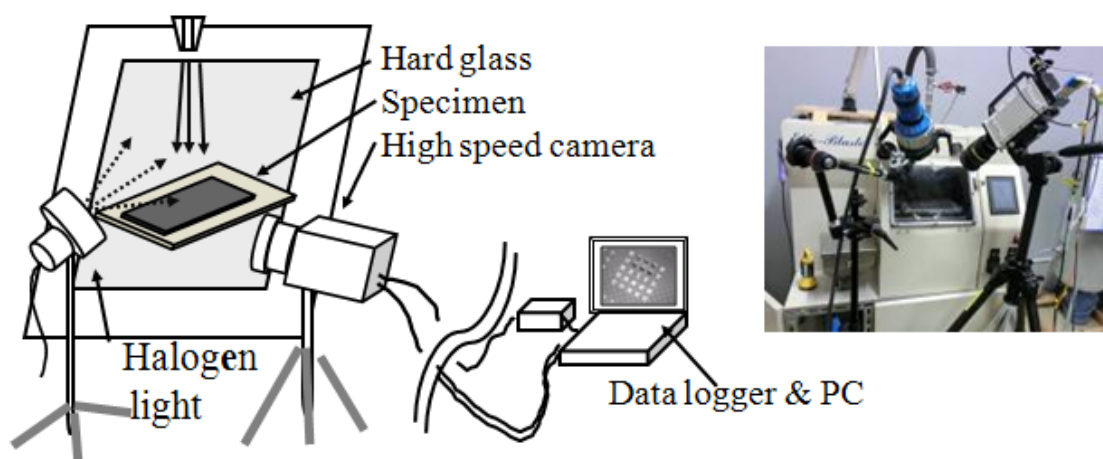


Fig. 4.3 Schematic diagram of photography kit using a high speed camera

4.3 結果と考察

4.3.1 レーザ顕微鏡による孔断面観測

板厚 1.8mm の CFRP (クロス材) に対して、砥粒 WA#320 を使い、表 4.1 に示す加工条件で 1～10 パスの加工ごとに加工断面を観察した。孔径と断面の代表事例を図 4.4, 4.5, 4.6 に示す。これら図の縦軸は加工した孔の深さを、横軸は孔中心軸からの距離、すなわち半径を表している。なお、表面から 0.2mm 分はマスク材料の厚みであり、CFRP はその下から加工が始まる。各図中の 10 本の曲線は、1 パス加工した直後に、孔の形状をレーザ顕微鏡で測定した結果を合わせて同時に示しており、エロージョン摩耗が進展していく模様を表している。

図 4.4 と 4.5 は直径 1mm の孔を、図 4.6 は直径 0.5mm の孔である。図 4.4 と 4.6 では、噴射圧力が 0.10MPa であり、孔が貫通していない。これに対して、図 4.5 は噴射圧力が 0.15MPa であり、孔が貫通している。なお、噴射圧力が 0.1MPa の場合は、ブラスト照射が 1～5 パスではエロージョン摩耗の進展が遅いのに対し、6～10 パスでは進展の速度が速くなった。これは、積層成形の CFRP 板の表面には、素材となるプリプレグの状態や成形するときのわずかな条件の違いにより、材料の片面に僅かながら強化繊維が存在しない樹脂リッチ層が局部的に形成されることがあり、当該層のために加工進展が遅かったのではないかと考えられる。

なお、この現象は起こる場合と起こらない場合が観察されており、CFRP 板の製造ロットによる違いがあるか、入荷する素材の断面マイクロ写真を取って、確認する考えである。一方で、(後述の図 4.17 で示すように)ブラスト加工の進展速度には潜伏期があるという説があり、CFRP ではどの程度起こるかを同時に検証したいと考えている。

次に、噴出圧力を 0.15MPa に高めると(図 4.5)、パスごとの加工深さが約 1.7～2 倍となった。なお、孔径、噴射圧力に関わらず、孔の底面を光学顕微鏡で観察すると、CF の織目模様に沿って、摩耗した深さにばらつきが見られた。このばらつきは、常にクロス材の繊維束の織り目に沿って現れ、CF が存在したと思われる部分の摩耗の進展が速く、すなわち CF 部分が先に深く掘られる傾向であり、CFRP のマトリックスと炭素繊維の材料特性の差に起因して、織り目模様が浮き出るように観察される。なお、この分析については 4.3.3 項で再度述べる。

4.3.2 高速度カメラによる孔加工の進展状況を観測した結果

CFRP 板にマスク無しで直接ブラスト加工した場合と、マスクを貼って加工した場合の比較実験を行った。この時、同時に加工状況を高速度カメラにて撮影し、途中経過を静止画像に落としたものを図 4.7(マスク無し)および図 4.8(比較のために 2mm 角のマスク有)として示す。なお、観測時の経

過時間をストップウォッチで計測した結果から、約 10 秒で目視にて観察できるエロージョン摩耗が進展し、孔が貫通するまでを確認できた。マスク無の状態では、最初に積層 1 層目の縦横の織模様に沿って、積層の 0°方向の網目状稜線が現われ(図 4.7a) (図中に付した青色の点線参照)、次に 1 層目に対して 45°方向に積層した 2 層目の網目が現れ、続いて 3 層目の網目が順に現われ(図 4.7b)、最後に再び 0°方向の 4 層目に達して、小さな孔が形成され貫通する(図 4.7c)ことが確認された。なお、さらに加工を続けると、その小さな孔どうしがつながり、大きな孔に進展する様子が観察された(図 4.7d)。

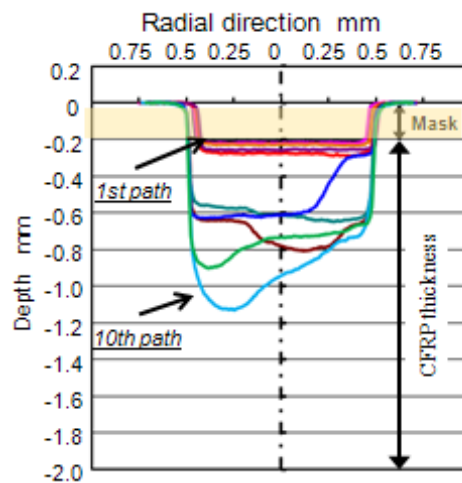


Fig.4.4 Cross sectional profile of 1mm diameter holes for each 1 to 10th blast pass at 0.1MPa, CFRP (cloth)1.8mm, WA#320

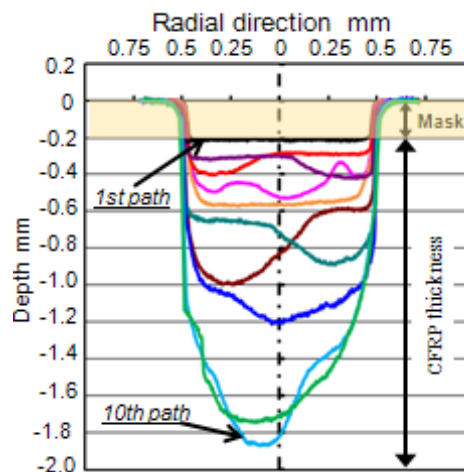


Fig.4.5 Cross sectional profile of 1mm diameter holes for each 1 to 10th blast pass at 0.15MPa , CFRP (cloth)1.8mm, WA#320

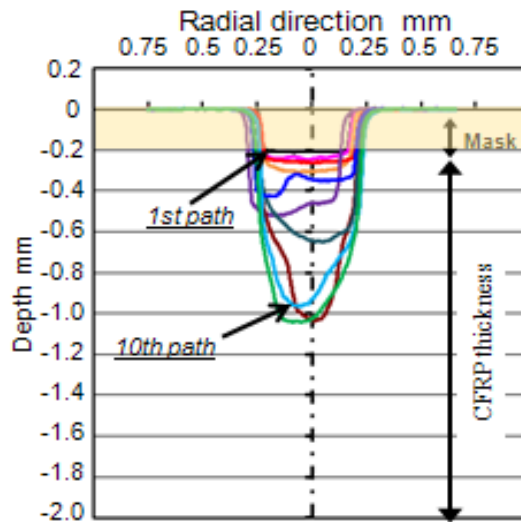


Fig.4.6 Cross sectional profile of 0.5mm diameter holes for each 1 to 10th blast pass at 0.10MPa, CFRP (cloth)1.8mm, WA#320

また、加工中の CFRP 板表面を顕微鏡で分析した結果、先に強化繊維である CF (カーボンファイバー) 部分の摩耗が進み、マトリックス(エポキシ樹脂)が多い部位の加工が遅れる状況が図 4.7c, dの形状より観察された。一方、マスク有の加工では、孔内部でマスク無の場合と同様に、エポキシ樹脂が多い部位の加工が遅れる現象が起きたが、孔の外周部や四角孔では、孔の隅が先に摩耗するケース(図 4.8b)があることや、最後にマトリックスだけが薄皮となってバリ状に残るケースも観測された(図 4.8c)。これは図 4.8c, 4.8e の孔貫通した所の隣の孔を観察した結果から、孔の底に薄い透明の樹脂層ができていたことからわかった。すなわち、CF に比べてマトリックスのエポキシ樹脂部の摩耗進展が遅いことがわかる。

次に、動画観察から(図 4.7 と図 4.9a に静止画の一部を示す)、砥粒は噴射流が被削材に当たる中心点から放射状に飛散するが、水平方向の角度はばらつくことがわかった(図 4.9)。空気流は被削材に沿って流れると推測するが、図 4.9b では、孔加工が進展する前の状態で、図 4.9c は、孔加工が進んだ状態(貫通前)の状態での、それぞれの気流の流れの予想図を示す。噴射流内のブラスト粒子は、固気二層流の噴射流としての特徴として流線(軸方向成分)だけでなく、半径方向や円周方向の速度成分を有していると考ええる。なお、ブラスト流の影響範囲について、被削材にマスク無し状態でブラストを当て、送りを一軸方向だけ往復運動させた部分の加工範囲を確認した所、使用した装置では28mmの幅に影響が見られた(図4.10)。なお、このブラストの気流は強力であるために、その影響範囲は、材料が移動しても、また材料に孔があく前も後も、大きくは変化しないものと考ええる。

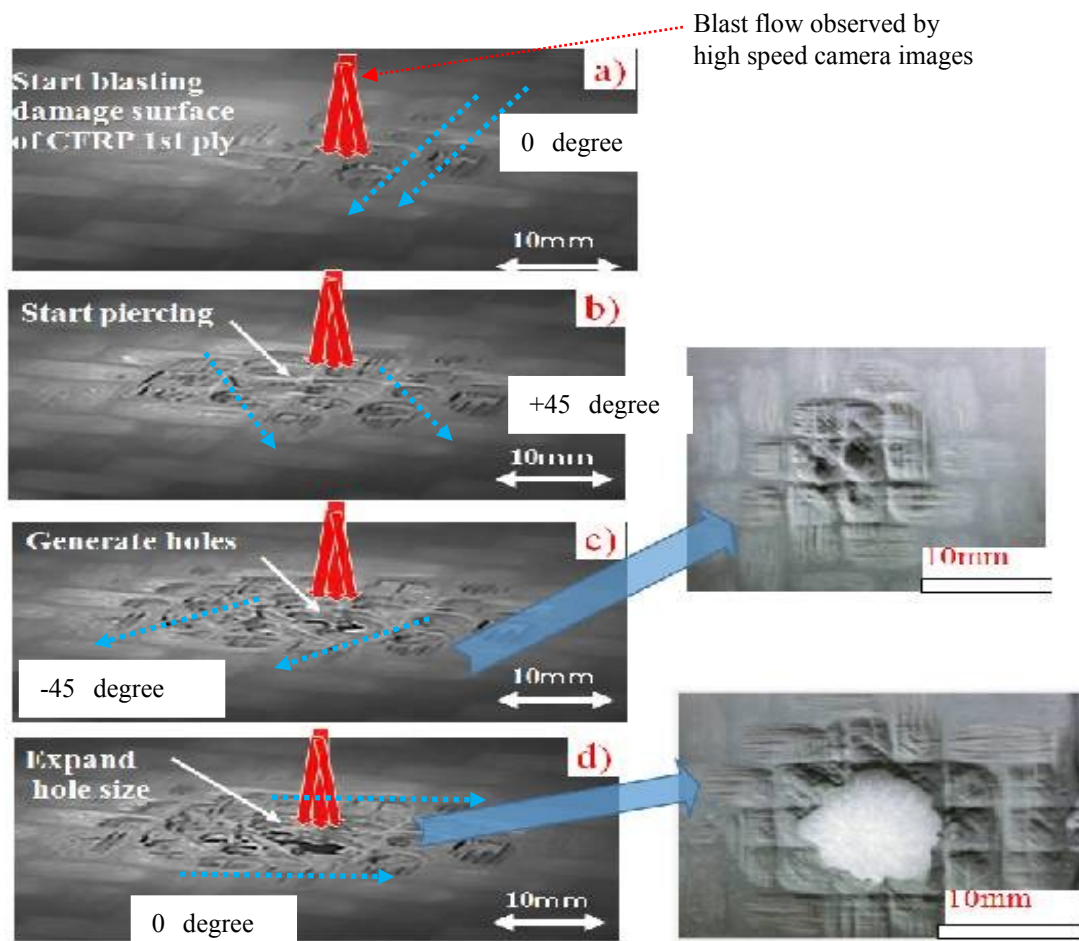


Fig.4.7 Piercing process of CFRP without masking and pictures of the surface of CFRP after blast
(used a CFRP $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]_2$ ply plate)

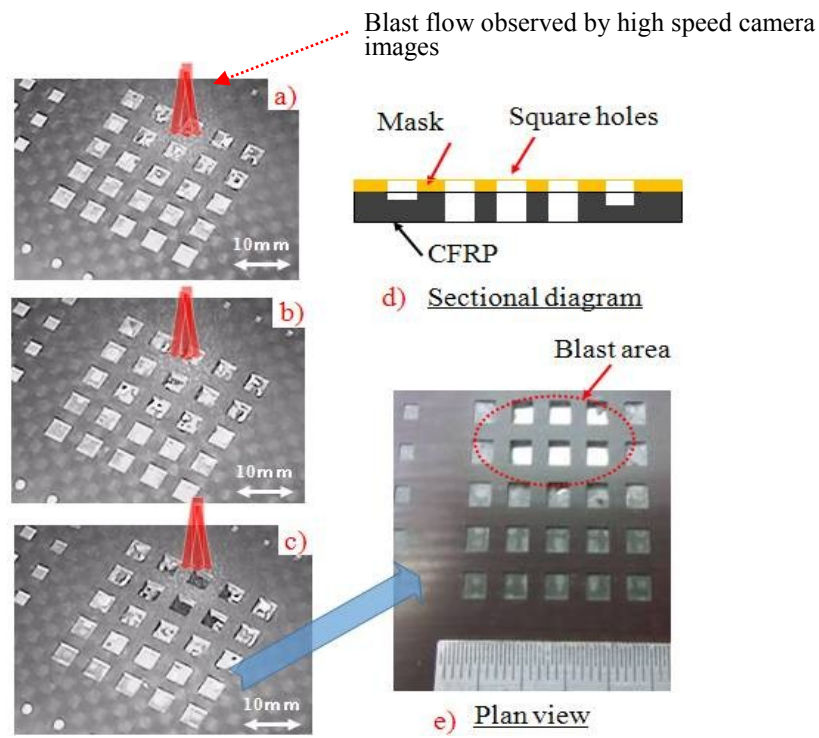


Fig.4.8 Piercing process of CFRP with masking (3mm square holes)

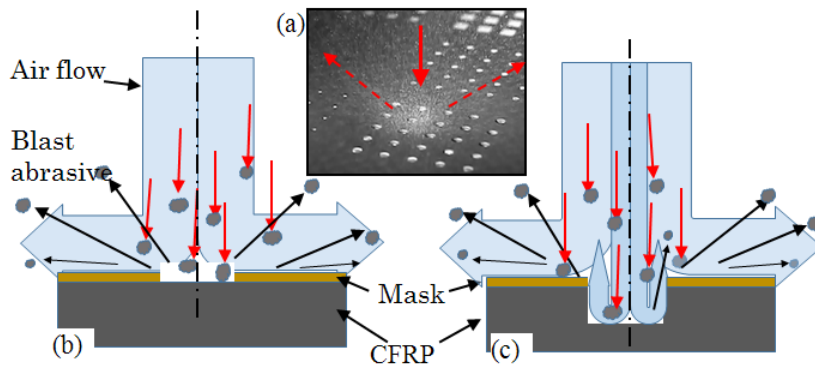


Fig. 4.9 Air flow and reflection direction of the blast abrasive

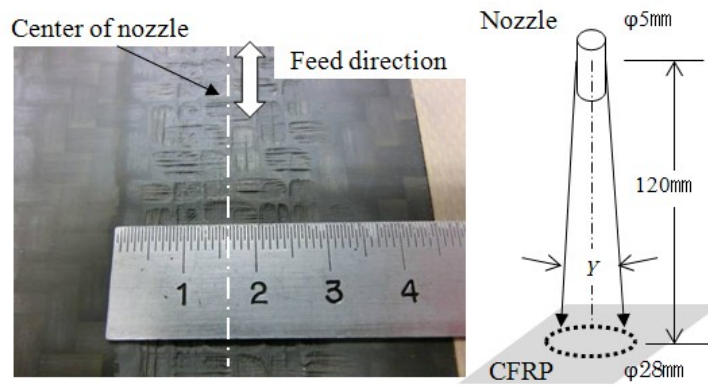


Fig. 4.10 Erosion area of the blast with 5mm dia. nozzle

4.3.3 被削材ごとの孔断面観察と摩耗体積の変化

板厚 1.8mm の CFRP (クロス材), CFRP(UD 材), GFRP, Epoxy 板に対して, 1~10 パスの加工ごとに加工断面を観察した結果を図 4.11 に示す. 図の縦軸は加工した孔の深さを, 横軸は孔中心軸からの距離, すなわち半径を表している. 各被削材において, パス数が増すごとに加工が進展する状況が観察された. なお, 加工回数が 10 パスまでは, CFRP (クロス材) のみが孔貫通したが, CFRP(UD 材), GFRP, Epoxy 板は貫通せず, GFRP の孔底面は, 織物繊維の目に沿って, 凹凸が観察されたのに対し, Epoxy の孔底面は平滑であった. さらに CFRP(UD 材)と Epoxy 板では, 孔底面の外周部が孔中心部より, 深くなる傾向が観察された. これは, 材料の特性で, 孔底面に垂直に砥粒が当たりエロージョン摩耗する体積よりも, 側面に沿って 0° の角度で当たる場合のエロージョン摩耗する体積の方が多いのではないかと推測する.

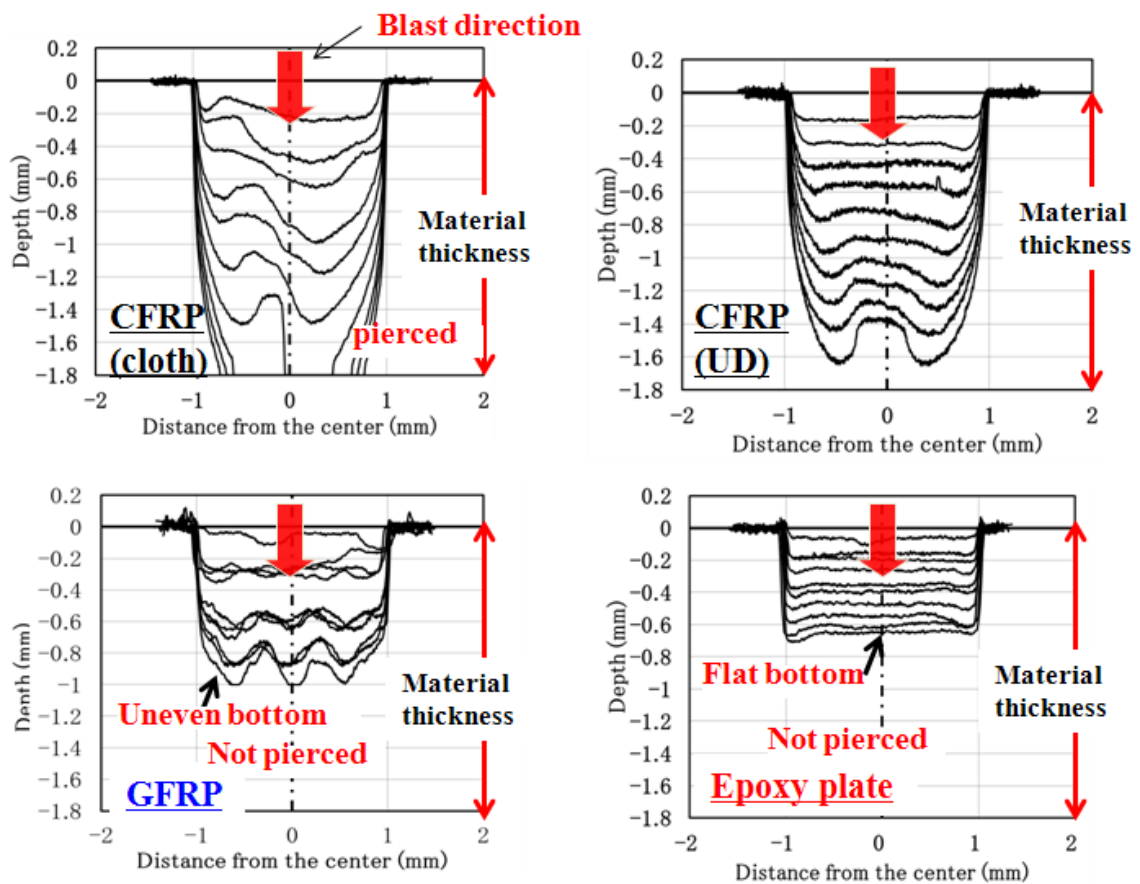


Fig.4.11 Processing section of every pass (laser microscope) [8]

次に、被削材の加工パスごとの摩耗体積を測定した結果を図 4.12 に示す。強化繊維の織り構造やその材質、およびその有無により大きく摩耗進展速度が異なることがわかる。図中の破線は、マスク径と板厚から完全な円筒状の孔ができる場合を仮定した理想孔体積とした ($\Phi 2\text{mm}$ で板厚 1.8mm の場合 5.6mm^3)。

図 4.12 から、各供試体の摩耗体積は加工パス数と正比例の関係にあるとわかる。なお、CFRP (クロス材)では孔底の一部が貫通した箇所(図中の Pierced 部分)から線の傾きが緩やかな曲線に変わることが観察された。この原因については、次章の 5.4.4 節にて考察を加える。

図 4.12 中で CFRP と Epoxy 板を比較すると、CFRP が Epoxy 板に比べ約 2 倍の速さの摩耗体積を示している。また GFRP と比べても 2 倍ほどの速さを示す。ここで、CFRP (クロス材)と GFRP のマトリックスが共にエポキシ材であることを考慮すると、摩耗量の差は CF の特性に基因すると考えられる。なお、同じ CFRP の中でも、クロス材と UD 材の結果が異なったのは、素材となる CF の仕様が異なるためではないかと考える。すなわちクロス材は東邦テナックスの平織プリプレグを積層したもので、UD 材は東レの材料を開織した材料であり、繊維束の厚みが異なるためではないかと考える。

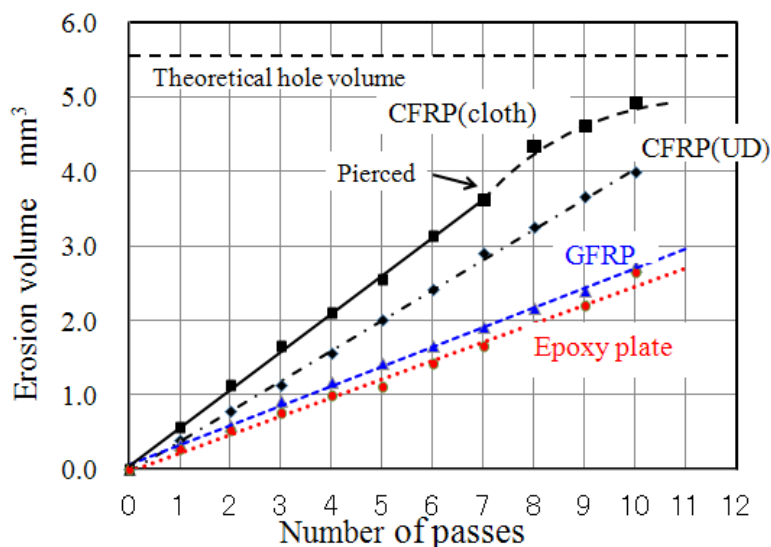


Fig.4.12 Erosion volume and the number of passes in changing test specimen (CFRP(cloth), CFRP(UD), GFRP, Epoxy) [8]

さらに、今回用いたマスク材の材料はアクリルポリマーであり、ゴムやエラストマーに近い弾性体であり、エポキシよりもさらに 1 桁小さなヤング率である。このために、ブラスト砥粒を弾き、摩耗の進展が更に遅いことがわかる。CF が 摩耗が早い現象は、CF 単体は固い脆性材料でヤング率が

230GPa であるのに対し、Epoxy は弾性材料でヤング率が 3.5GPa、GF も 60GPa であることなどに起因すると考える[5]。すなわち、エロージョン率 Q はヤング率 E が高いほど進展が早く、一般に式 (4.1) に示されるように $5/4$ 乗に比例するとされている[6]。なお、この式からは、 K_c に逆比例することが示されており、すなわち破壊靱性が高ければ、エロージョン率 Q は下がると示されている。

$$Q \propto \pi l_c^2 d_c \propto \frac{\rho_t E^{5/4}}{H^{17/12} K_c} \rho_p^{1/6} r_p^{1/2} v_p^{7/3} = \frac{\rho_t E^{5/4}}{H^{17/12} K_c} A \quad (4.1)$$

ここで、 l_c は砥粒が衝突する際に被削材側にできるクラックの長さ、 d_c はクラックの深さ、 ρ_t と ρ_p は基材と砥粒の密度、 γ_p 砥粒の平均粒径、 v_p は流速、 H は硬度、 K_c は破壊強度である。式の右項 $\rho_p^{1/6} \gamma_p^{1/2} v_p^{7/3}$ はブラスト装置と砥粒が一定であれば決まる項目で定数 A とし、この式の左項にそれぞれ値を代入すると CF とエポキシ樹脂とは (4.1) 式の分数部分が 1.02×10^{-5} と 4.09×10^{-6} なので、 Q の比が約 2.5 倍であった[8]。なお、ブラスト過程で、CFRP の繊維の織り方から格子模様が現れる原因は、マトリックスであるエポキシ樹脂が、カーボン繊維の隙間を埋めるように分布することで、エポキシ樹脂リッチ箇所と CF リッチ箇所が、後述の図 4.19 に示すクロス材の 1 ブロックの模式図の繰り返しパターンとして配列され则认为される。この現象は、クロス材プリプレグの積層方向に沿って目視で観察される。

4.3.4 砥粒(メディア)の違いによる摩耗体積の計測

これまで砥粒は主に、WA#320 (アルミナ、直径 40 μ m) を用いてきたが、砥粒特性が摩耗進展に与える影響を検討するために、粒度の異なる WA#600 (アルミナ、直径 20 μ m) と種類が異なる SiC#320 (炭化珪素、直径 40 μ m) を用いて実験した。被削材は CFRP (クロス材) で板厚 1.88mm、孔径 2mm に対しパスごと(横軸)の摩耗体積(縦軸)を図 4.13 に示す。この結果から、エロージョン摩耗の体積、すなわち加工進展の速さは、加工パス数にほぼ正比例しており、WA#320 > SiC#320 > WA#600 の順であった。この結果は、式 (4.1) から考えて、摩耗量は砥粒の径および密度の影響を受けること、すなわち、平均粒径 γ_p が大きいほど (WA # 320 が 40 μ m, WA # 600 が 20 μ m, SiC#320 が 40 μ m)、また密度 ρ_p が大きいほど (WA # 320 が 3.9g/cm³, WA # 600 が 3.9g/cm³, SiC が 3.2g/cm³)、摩耗量が大きくなるということと一致している。すなわち、WA#320 と SiC#320 を比べると、比重差で WA#320 の方が摩耗体積において大きく、WA#320 ならびに SiC#320 と WA#600 を比べると、砥粒径の影響の方が大きく、WA#320 ならびに SiC#320 の方が摩耗体積において大きい。

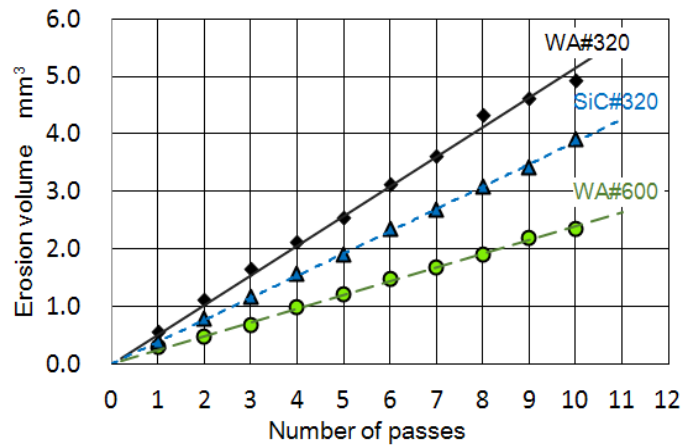


Fig.4.13 Erosion volume and the number of passes by various abrasive

4.3.5 噴射圧力と加工孔直径の違いによる摩耗深さの計測

ブラスト装置のノズル部(図 4.1)の砥粒噴射圧力を変え, その影響を検討した. 噴射圧力を 0.10MPa と 0.15MPa, 加工孔の直径を 1.0mm として実験したところ, 同じノズル径では約 2 倍のエロージョン深さの差が生じた. なお, 噴射圧力が同じ 0.10MPa の場合, 加工孔の直径が 0.5mm と 1.0mm では, 摩耗深さの差は小さかった. 結果を図 4.14 に示す(板厚 2mm). エロージョンの速度は加工する孔径が変わっても変化は殆ど無いが(図 4.14 の直径 1.0mm と 0.5mm), ノズルの圧力が 0.10MPa から 0.15MPa 変わると, その結果は大きく変わることが判明した. なお, 図 4.14 の 3 本の線に共通して, 4~5 パス目まで加工速度が比較的遅く, それ以降速くなる現象が見られた. 本実験で用いた CFRP 板は, メーカー購入品でなく研究室にて成形硬化した材料であり, 表面に樹脂層が厚めにできた可能性がある. この結果, 表面層での加工進展が遅く, 後述の 4.4.1 項の図 4.17 で述べる潜伏期に似た現象が表れたのではないかと推測する.

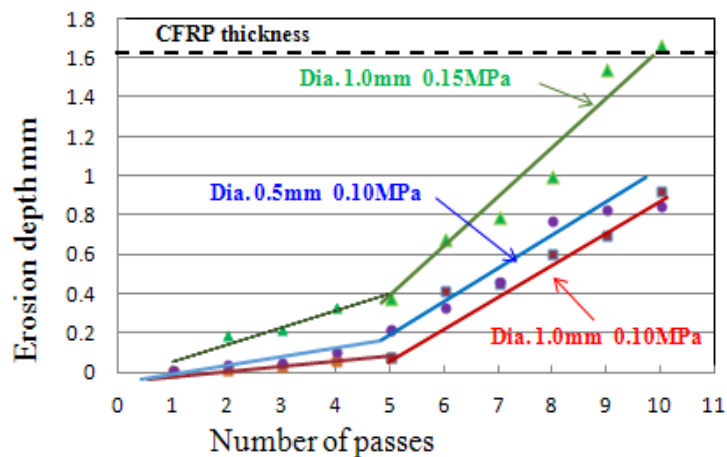


Fig. 4.14 Erosion depth and number of passes at 0.10MPa & 0.15MPa

4.3.6 加工孔寸法の測定と変化

1.8mm 厚の CFRP 板に、ノミナル(公称)径 2mm の孔を加工していく過程を、光学顕微鏡を用いて観察し、それぞれの孔入口径と出口径、ならびに孔断面形状を観察した。その結果、孔断面は(すり鉢形状に似て内側にカーブした)わずかな曲線をもつテーパ形状になる傾向にあり、加工パスが増えるに従って入口側の径は 2mm を越えて増加し、出口側の径は 0~2mm に近付くように広がるのが観察された(図 4.15)。なお、図中の赤の点線は孔径 2mm のノミナル値を示す。また、加工パスごとの主な断面写真をグラフ中に示した。

次に、レーザ顕微鏡で孔の体積算出機能を用いてエロージョン摩耗体積を計測した。計測の結果から、孔貫通前後でパス毎の体積変化率が変わることを確認した(図 4.16)。この原因については、次章の 5.4.4 節にて考察を加える。この時に、出口側の径を十分に大きくするため、充分な数のパスを通すと、入り口径の拡大により、理論孔体積より大きな孔を生成することもわかった。なお、図 4.15(孔径変化)と 4.16(体積変化)は同じ材料を用いた実験結果で、実験条件も他と同一である[8]。

4.4 エロージョン摩耗モデルに基づく考察

4.4.1 エロージョンの進展過程と潜伏期

ブラストによる CFRP の小径孔あけのプロセスを一連の試験で確認したが、加工開始時はエロージョンの進展がやや遅く、一定時間後に進み始めることが確認された。一方、エロージョンカーブに潜伏期間があるとする報告(図 4.17)[9]があるが、今回行なった実験では潜伏期間はなく、加工開始後数パスの間は摩耗進展が遅く、途中で速くなるケース(図 4.4, 4.5, 4.6, 4.14)と、最初から一定速度で摩耗進展するケース(図 4.11, 4.12, 4.13)の二つがあることが判明した。このことは、前述のように、素材表面の僅かなエポキシ樹脂の偏析によるもの考えられる。なお、図 4.14 では圧力を 0.10~0.15MPa に高めると、摩耗進展が速くなることが確認された。

4.4.2 エロージョンの偏析

孔加工の途中工程で、孔の外周部の摩耗が一時的に先に進むことが、加工途中の断面観察から一定の割合でみられたが、ブラスト噴流の中心が、孔の中心からずれている場合に起こる偏析であると推定する。これは、図 4.9 に示す粒子の運動観察から、噴流の中心が加工する孔中心から外れる場合、気流が孔内壁の片側に沿って流れ、孔の片側だけ反射する粒子とも重なって一時的に砥粒密度の差が生じて、部分的に摩耗進展するためと考える。図 4.18 の左図は孔中心とブラス

砥粒の中心軸が一致した場合、右図は中心軸がずれた場合を示し、この結果で、孔底面のエロージョンの偏析が生じるものと考える。

さらに、CF の織物の構造をマクロ的にみると、縦糸と横糸が一定間隔で交差し、その境目で局部的にマトリックスが格子状に偏析していることがわかる(図 4.19). 4.3.3 項からマトリックスであるエポキシ樹脂の摩耗速度は遅く、エポキシ樹脂が局部的に多い位置が、孔出口側の孔位置と重なると、加工の偏析(削り残し)を起こす。また、CFRP の織物の模様の位置と孔位置がどう来るかで、加工途中では加工進展具合に早い遅いの差が生じるが、孔が貫通するまでに、10 パス以上の十分なパス数を重ねることで、加工進展の途中の差は平準化されると考える。

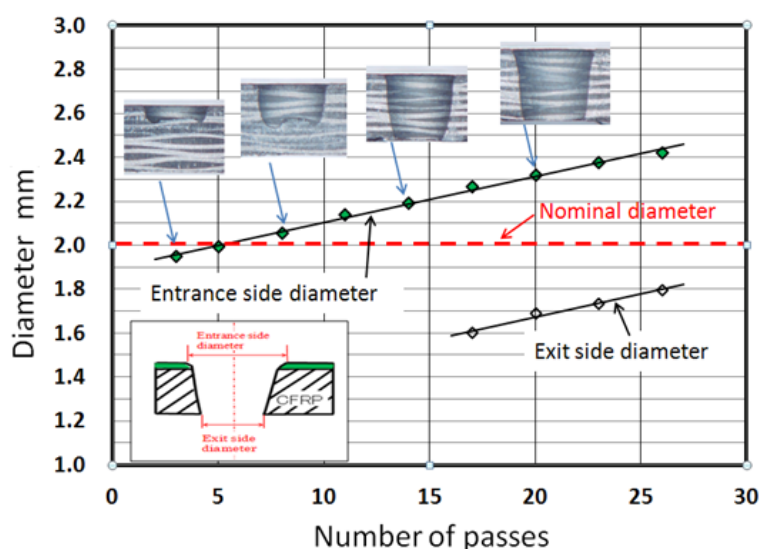


Fig. 4.15 Hole diameters and number of passes (CFRP thickness 1.8mm, nominal hole size 2.0mm)

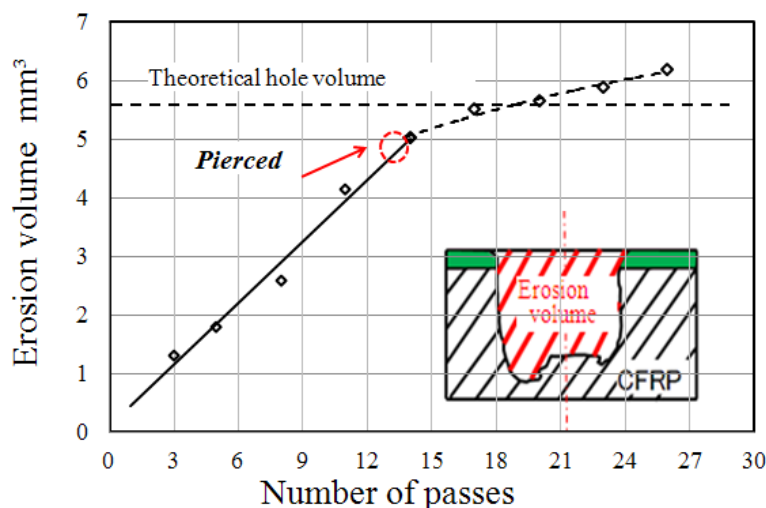


Fig. 4.16 Transition of erosion volume and number of passes (CFRP thickness 1.8mm, nominal hole size 2.0mm)

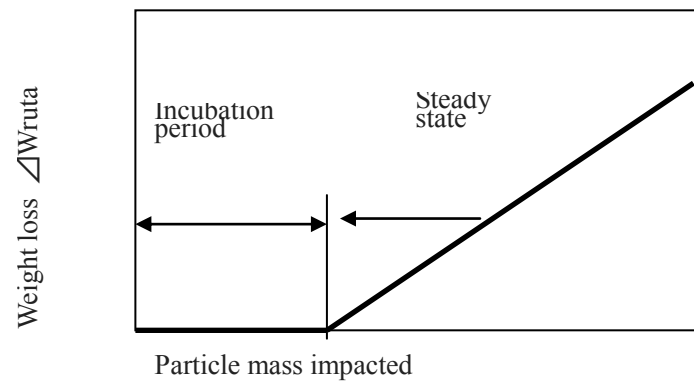


Fig. 4.17 Typical erosion curve by “Erosion Behavior of FRP’s” [9]

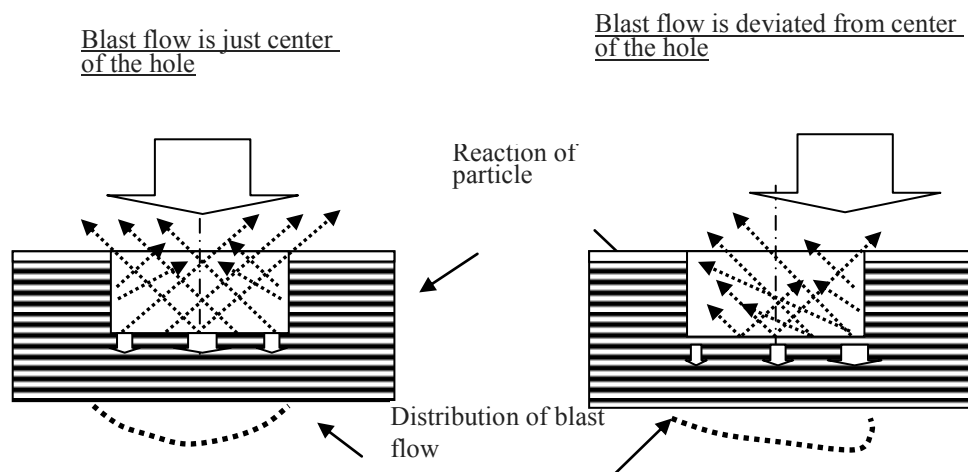


Fig.4.18 Image diagram of abrasive particle reaction and typical erosion curve by the deviation from a hole center of the blast flow

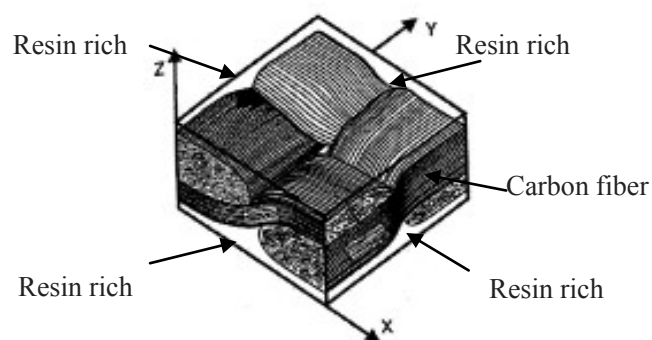


Fig. 4.19 Macro structures of CFRP consist of Carbon fiber and epoxy resin [10]

4.4.3 噴射圧力の影響の定量化

ショットピーニングにおいて、噴出圧力の変化の影響は、一般に流速 v_p が圧力 p の $3/4$ 乗に比例する(γ_p 砥粒の平均粒径, ρ_p は粒子の重量密度, K は定数)とされている[7]. ここで式(1)よりエロージョン率 Q は流速の $7/3$ 乗に比例する[6]ことを考慮して、流速 v_p は、式(4.2)のように示される.

$$v_p = K \cdot \gamma_p^{-1/3} \cdot \rho_p^{-1/2} \cdot p^{3/4} \quad (4.2)$$

式(4.1)と式(4.2)より、 Q は次の関係にある.

$$Q \propto v_p^{7/3} \propto (p^{3/4})^{7/3} = p^{7/4} \quad (4.3)$$

したがって式(4.3)に基づくと、ブラストの噴射圧力が 0.10 MPa から 0.15MPa に高まると、エロージョン量が 2.03 倍となる. これは実験結果からエロージョン深さが 1.7〜2 倍となったことと(図 4.4, 4.5), ほぼ一致する.

4.4.4 各種の変数の影響の定量化

図 4.13 より、砥粒の粒径および材質の違い(密度の差)がわかる. ここで表 4.1 における WA#320, 圧力 0.1MPa, 対象材 CFRP(cloth)を基本にして、式(4.3)より Q を考える. 基材と砥粒の密度, 砥粒の平均粒径などの条件を与えて、CFRP(cloth) , WA#320 などの基本条件をベースにしてエロージョン率に対する比を調べた結果を表 4.3 および図 4.20 に示す.

図 4.20 より加工条件である砥粒が変わると、式(4.1)による予想値と実験値が外れるものがあるが、FRP の供試体(被削材料)が変化しても、相関係数が 0.87 という強い相関性が見られた. 以上により、エロージョン摩耗を計算式で一定のレベルで、近似的に予想することができることがわかった.

Table 4.3 Difference between theoretical value and experimental value of each specimen

(A*is the constant value of equation (4.1))

Specimen	Erosion volume of theoretical value by one media (mm ³)	the ratio comparison with E_t theoretical	Erosion volume of experimental value in one hole(mm ³)	the ratio comparison with E_e experimental
CFRTS(cross) WA#320	$E_t = 4.44 \times 10^{-5} A^*$	1.00	$E_e = 0.511$	1.00
CFRTS(cross) WA#600	$0.881 \times 10^{-5} A^*$	0.198	0.233	0.456
CFRTS(cross) SiC#320	$4.30 \times 10^{-5} A^*$	0.968	0.391	0.765
CFRTS(UD)	$5.75 \times 10^{-5} A^*$	1.30	0.793	1.55
CFRTP(cross)	$0.578 \times 10^{-5} A^*$	0.130	0.116	0.227
GFRTS(cross)	$1.37 \times 10^{-5} A^*$	0.309	0.265	0.518
Epoxy Plate	$0.409 \times 10^{-5} A^*$	0.730	0.213	0.417

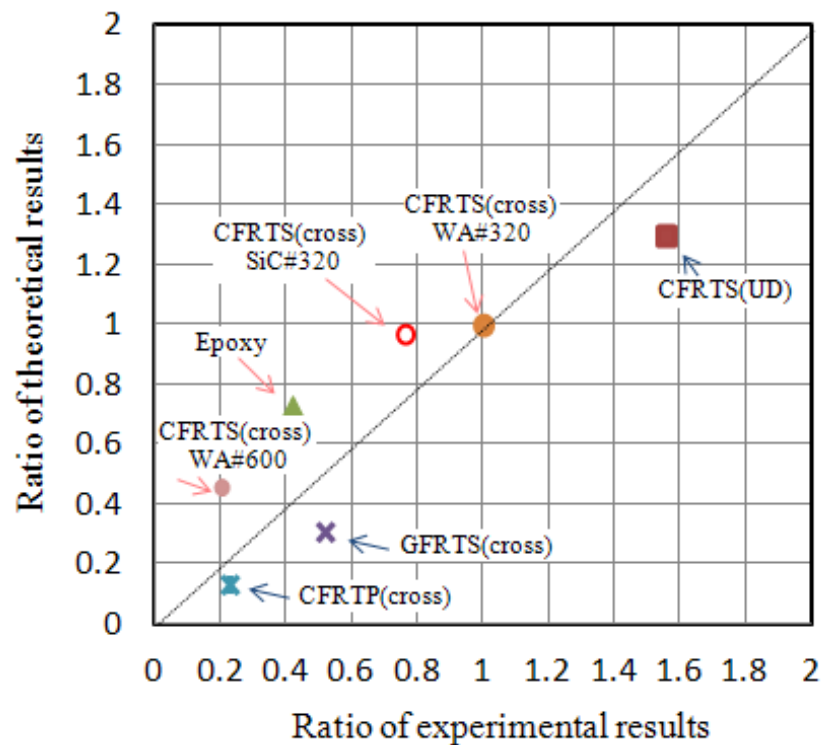


Fig.4. 20 Relationship between experimental results and theoretical results

4.4.5 繊維含有率(Vf)による影響 (補足)

本実験では、CFRP の繊維含有率(Vf: Volume of fiber)を意図的に変えて実験することまでは行っていないが、Vfが異なる複数の材料についての加工結果があるので、その差異から考察する。

Vfの異なる材料として、表 4.2 の物性値と図 4.12 の各材料のエロージョン体積の比較として、孔が貫通する直前までの 7 パス目を例に考えると、CFRP (cloth)(Vf=60%)では 3.7mm^3 、CFRP (UD)(Vf=58%)では 2.9mm^3 、Epoxy plate(Vf=0%)では 1.7mm^3 、という結果であり、Vf値が大きい程、すなわち樹脂が少ない程、エロージョン体積は大きくなる傾向が表れている。

さらに、図 4.17 で現れた潜伏期について考えると、CFRP プレート表面にわずかに樹脂が多い層ができていた試験片を用いた場合に、加工の出だしでエロージョン発生が遅れる現象が観察されている。これはすなわち、樹脂リッチ=Vf が小さい層、ということであり、加工が遅くなる上記現象と一致していると考えられる。

4.5 まとめ

航空機エンジンのCFRPカウル吸音部材などにおける大量の小径孔の加工に取り組み、次のことが明らかとなった。

- (1)ブラストによりCFRTS (厚さ1~2mm)に対して、1~2mmの小径孔加工が可能である。
- (2)ブラスト流れの中心と、孔中心とのずれにより、エロージョンの偏析が起こるが、孔が貫通するまで十分なパス数を確保することで、加工進展の差を平準化することができる。
- (3)エロージョン率を算出する式に基づけば、加工条件や被削材が変化しても、加工能率の予想は可能である。
- (4)Vf 値が大きい程、ブラストの進展が早まる傾向である。

以上より、CFRP に対してブラストによる微細なエロージョン過程としての材料除去メカニズムが観察され、孔加工のメカニズムが解明された。

参考文献

- [1] 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄: ブラストによる CFRP の孔明け加工技術の開発, 砥粒加工学会誌, 56, 4(2012)262.
- [2] 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄, 加藤敦司: ブラストによる航空機用 CFRP の小径孔あけ, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2012)B16.
- [3] 加藤敦司, 深川仁, 清水啓祐, 山田伊久子, 加藤隆雄: ブラスト加工による CFRP 板の複数同時孔あけ工程の分析, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2012)C12.
- [4] 深川仁: 航空機エンジンナセル吸音パネル用多孔板の孔明け方法製造方法, 日本国特許, 337094, (2002).
- [5] 日本金属学会編, 金属データブック, 丸善, 改定 3 版, (1993)203.
- [6] Dong Sam Park et al. : Effects of the impact angle variations on the erosion rate of glass in powder blasting process, Int. J Adv. Manuf. Tech. 23, (2004)444.
- [7] 小川一義, 浅野高司, 斎藤昭則, 川村清美, 浅野峯雄, 相原秀雄: 空気噴射式ショットピーニングにおける粒子速度の測定と解析, 日本機械学会誌, 60, 571, (1994)392.
- [8] 清水啓祐, 深川仁, 加藤敦司, 山田伊久子, 加藤隆雄: 各種ブラスト砥粒を用いた CFRP への同時多数小径孔加工の研究, 日本機械学会東海支部学術講演会講演論文集, (2013)414.
- [9] 宮崎則幸, 重國智文, 宗像健, 武田展雄: FRP のエロージョン特性, 材料, 40, 449, (1991)205.
- [10] 末益博志: 入門複合材料の力学, 倍風館, (2009)49, 86.

5 章 CFRP 板への小径孔加工におけるブラスト砥粒条件の影響

5.1 はじめに

本章では、径の異なる孔に対して使用する最適な砥粒を検討するため、加工孔径および砥粒の種類・サイズなどを変更し、孔精度と加工効率について考察することを目的とする。

前章までの研究では、事前に孔加工したフォトマスクを用いることにより、厚さ 1～2 mm の CFRP 板に直径 $1\sim 2\pm 0.2\text{mm}$ の小径孔を多数同時加工することに成功している[1]。また、CFRP や GFRP など機械特性・内部構造の異なる複合材料に対しては、加工の速度が異なることや[2]、砥粒の種類として比重 3.9 のアルミナ(ホワイトアラウンド:WA)の方が、比重 3.2 の炭化ケイ素(カーボランダム:SiC)より加工効率が良いことをなどが明らかになっている[3]。

前章まで、直径 1～2 mm の孔加工を中心に加工効率に重点を置き、砥粒のサイズは実験に用いるブラスト装置の最大砥粒径の制約から、WA#320(平均砥粒径 $40\mu\text{m}$)を主に使用してきた。実験結果から孔精度・加工効率に影響するパラメータには、ノズルの送り・加工圧力・マスク材の厚さなどがあげられる。しかし、さらに小径を加工するには、砥粒径が重要なパラメータと予想されたので、本章ではその影響を調べ、最適条件を見出すことを目的とする。

そこで、0.1～2.0 mm までの孔径を盛り込んだマスクパターンを作り、3 種類の径の砥粒を用意し、それぞれの加工進展状況を観察した。この中で、孔精度および加工効率に注目し、各孔径に対する最適な砥粒径の比較検討を行った。

5.2 実験方法

5.2.1 ブラスト砥粒

一般的にアルミナ(ホワイトアラウンド:WA)は被削材との耐拡散摩耗性、すなわち、高温下での被削材と工具の接触において、両材料を構成する元素が拡散せず、摩耗しづらい面で優れた材料として、砥粒加工の分野において幅広く使用されている。本実験で使用したブラスト砥粒(株式会社不二製作所)の仕様を表 5.1 に示す。また、電子顕微鏡(S-4800, 株式会社日立製作所)による写真を図 5.1 に示す。これらから、砥粒形状は球状ではなく、共に角張った形状であることがわかる。また微細になるほど、形状や大きさがさまざまであることがわかった。

Table 5.1 Specification of blast medias

Media	Media diameter (μm)	Material (purity)	Specific gravity	Hardness New Mohs	Manufacture
WA#320	40.0 ± 2.5	Al_2O_3 (99.7%)	3.9	12	Fuji Manufacturing Co.Ltd
WA#600	20.0 ± 1.5				
WA#1200	9.5 ± 0.8				
SiC#320	40.0 ± 2.5	SiC (98.7%)	3.2	13	

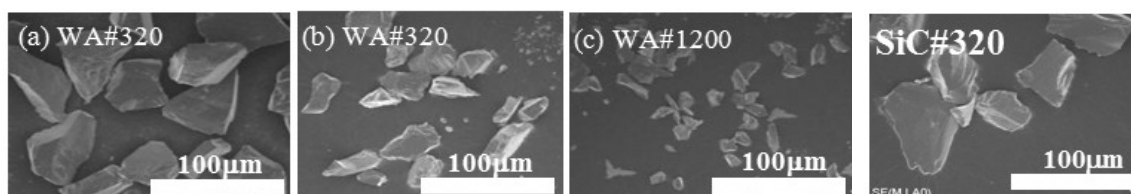


Fig.5.1 SEM images of medias (WA#320, WA#600, WA#1200 and SiC#320)

5.2.2 供試体の準備

本実験で使用した CFRP は、炭素繊維の織物シートに熱硬化性樹脂であるエポキシを含浸させたプリプレグを 8 枚積層し硬化したものである(表 5.2). CFRP の上面へ、あらかじめ用意した所定の孔径 5 種類(2.0, 1.0, 0.50, 0.25, 0.10 mm)を現象・焼き付けしたフォトマスクを粘着した⁴⁾.

Table 5.2 Specification of specimen

Specimen ; Constitution materials	CFRP(cloth) ; CF/EP
Size	250 × 148 (mm)
Diameter of carbon fiber	7.03 (μm) (measured value)
Prepreg / manufacturer	Fabric CF-3K-W3101 / Toho Tenax Co.Ltd.
Laminated structures / manufacturer	8ply(1.80mmt) [0 / 90 / 90 / 0] ₂ 2ply (0.45mmt)[0 / 90] /fabricated by GH Craft Ltd.

5.2.3 ブラスト装置と加工条件

本実験では、前章までと同様に砥粒噴射量を任意にコントロールすることができ、一定量を供給できる直圧式ブラスト装置(ELP-1TR; ㈱エルフォテック)を使用した。加工圧力は、過去に0.10～0.30MPaで行った実験結果から、マスクの耐久性と加工効率のバランスを考え、本実験では0.15MPa(ノズル噴出部で計測)に固定して行った。また、砥粒を噴射するノズルがCFRP板全体(63×148 mm)を走査し、加工する行程を1パスと定義し、同じ加工パスを複数回繰り返した(前章 図4.1, 4.2 参照)。送り速度はノズル速度(X方向)8 m/min, コンベア速度(Y方向)20 mm/minである。各種砥粒を用いて供試体に対し5パスごとに孔形状を計測し、30パスまで加工を行った。なお、加工の際に粉碎されて一定重量以下になった砥粒は、装置内でサイクロン分離器により分離・除去される。また、その後使用済みタンクに入った砥粒は切屑除去のため、ふるい(目開き 約0.6 mm)にかけ、再度砥粒として使用する。

5.2.4 孔精度・加工効率の評価法

加工孔の孔径測定は工具顕微鏡(MC-B1010C; 株式会社ミツトヨ)、孔断面形状、加工深さ、エロージョン摩耗量(削食量ともいう: 砥粒による材料の除去量)の観察・測定にはレーザ顕微鏡(VK-9700, 株式会社キーエンス)を用いた。

入口径における孔精度 d_p および加工効率 V_e は式(5.1)および(5.2)にて±10%以内を評価 A, ±10～20%を評価 B, ±20%以上を評価 C と定義した。孔精度は理想孔径(ノミナル径)に対する孔径増加分を表し、理想孔径 d_i , 加工孔の入口径 d_{en} を用いて、加工効率は理想孔体積に対するエロージョン摩耗量の割合を表し、理想孔体積 $V_i = \pi d_i^2 \cdot t / 4$, エロージョン摩耗量 V_m を用いた(図 5.1)。

$$d_p = \left(\frac{d_{en}}{d_i} - 1 \right) \times 100 \quad (5.1)$$

$$V_e = \left(\frac{V_m}{V_i} \right) \times 100 = \frac{V_m}{\pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \times t} \times 100 \quad (5.2)$$

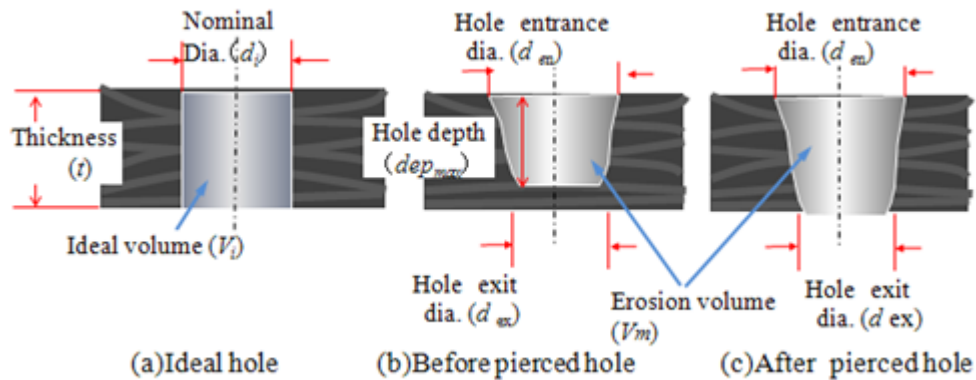


Fig.5.1 Cross sectional view of the holes and the explanation of dimensions

5.3 実験結果

5.3.1 加工孔の形状観察

図 5.2, 5.3 に試験に用いたマスクパターンおよび加工後の供試体の写真を示す. 次に, 図 5.4 に $\phi 2.0$ について WA#320 における 5, 10, 15, 20 パス後の加工孔の断面図を示す. 5 パスにおいて加工底面部に凹凸が認められ, 加工孔は貫通すると径方向に拡がりを見せた. 各種砥粒・マスク径についても加工進展具合に差はあるものの, 加工が進む際の孔断面形状の変遷は同様な傾向を示した.

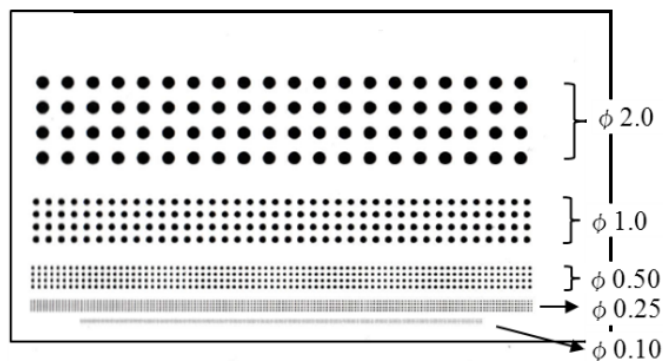


Fig.5.2 Mask patterns of 0.10 - 2.0 mm diameters

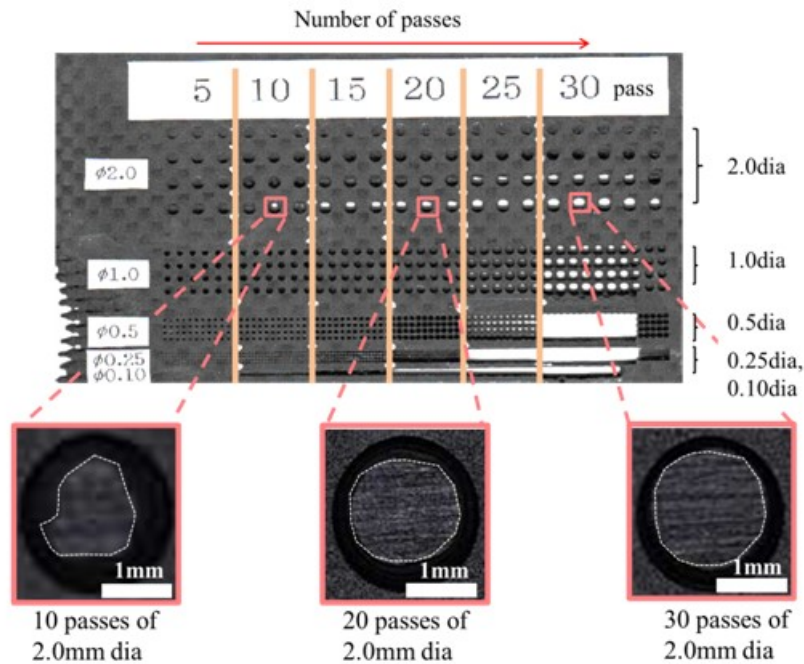


Fig.5.3 Picture of CFRP plate after blasting (WA#320)

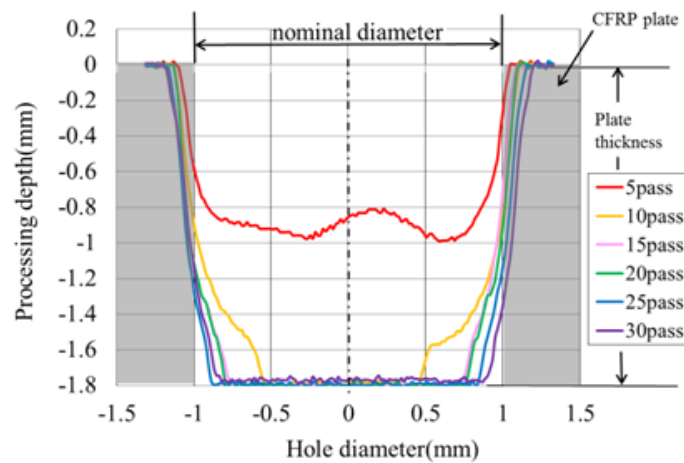
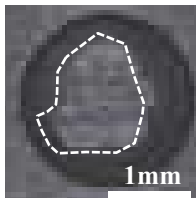



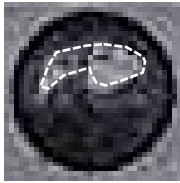
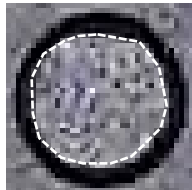
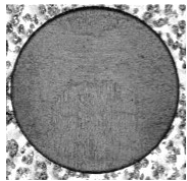
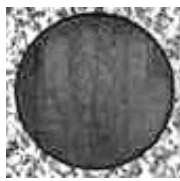
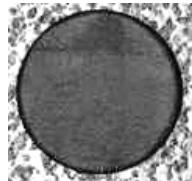


Fig.5.4 Blasted hole sections of each passes (2.0dia) by WA#320 blast media

前項の図5.1に加工孔出入口形状の観察方向および測定部を示したが、孔径は供試体の入口径(d_{en})および出口径(d_{ex})、加工深さ(dep_{max})は供試体表面から孔の最深部まで(貫通前)または板厚(貫通後)、エロージョン摩耗量は供試体が砥粒によって削られた体積(V_m)を測定した。表5.3は各種ブラスト砥粒を用いφ2.0のマスク径について、10, 20, 30パス加工した後の加工孔を入口側から観察したものである。観察の結果、砥粒サイズによって貫通までのパス数に差が生じることが明らかになった。WA#320は10パス以降、WA#600は20パス以降で貫通し、WA#1200

では貫通が起きなかった。また、局所的に貫通した後、パス数の増加に伴い、出口径が全体に拡大した。なお、図中には輪郭を強調して、白点線を引いて出口孔形状を示した。

Table 5.3 Observation result of 2.0 mm hole shapes

diameter2.0	10 passes	20 passes	30 passes
WA #320			
WA #600			
WA #1200			

5.3.2 加工孔の入口および出口径の測定

φ2.0 のマスク径について各種砥粒における入口径および出口径を 5 パスごとで 30 パスまでのデータを図 5.5 に示す。WA#1200 では 30 パス加工しても貫通が起きなかったため、入口径のみを表した。どの砥粒においてもパスごとに入口径および出口径は大きくなり、入口径は 1 次関数的に増加するのに対し、出口径において加工開始時は急激に増加し、加工パスが増えるごとに傾きが緩やかになる傾向を示した。また、WA#1200 では WA#320, WA#600 と比較して入口径の変化が小さいことが明らかになった。

次に、図 5.6 に WA#320 における各種マスク径の 5 パスごとで 30 パスまでの入口径を示す。なお、パス数の増加に伴い、マスクパターンの孔ピッチを超えたマスク破損が生じ、隣の孔とつながったためにデータが取得できなかった箇所が生じた(図 5.3)。なお、マスク径によって入口径の増加の傾きに大きな差異は認められなかった(図 5.6)。

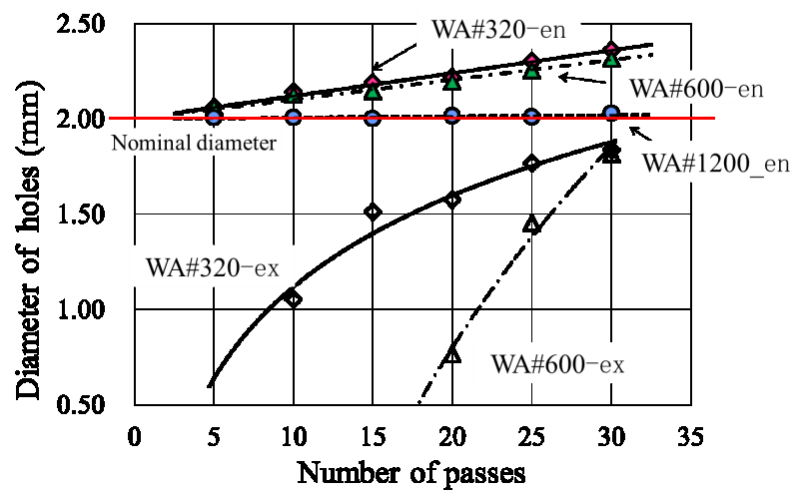


Fig.5.5 Diameter of holes and the number of passes of each medias 2.0mm dia

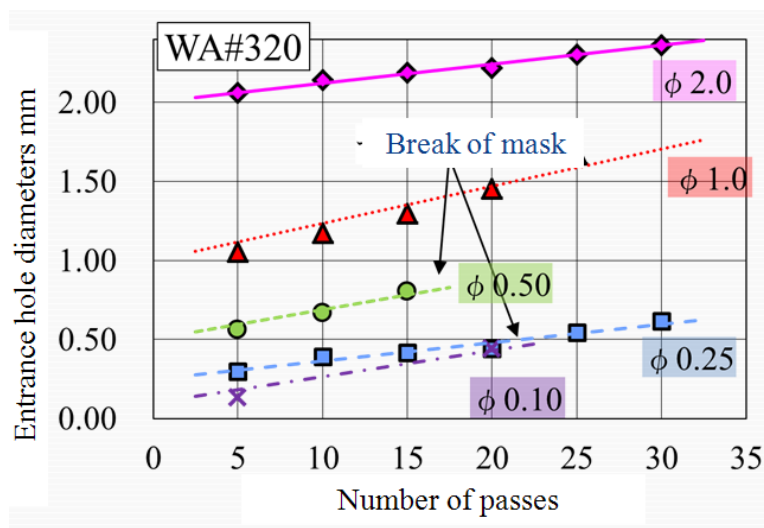


Fig.5.6 Entrance diameter of holes by each abrasive medias

5.3.3 加工深さ測定

図 5.7 に 10 パスにおける各種砥粒によるマスク径ごとの加工深さを示す。同じ砥粒を使用した際は孔径が大きいほど加工深さも大きくなった。また、各種砥粒間で加工深さを比較すると、WA#1200<WA#600<WA#320 の順になった。なお、WA#320 では孔貫通までの加工時間が短く、早く貫通して、深さが 1.8mm に達した所で、グラフは横線となっている。

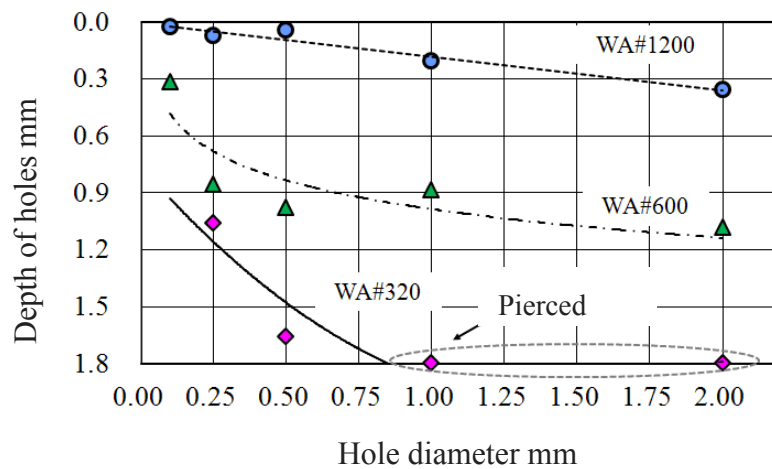


Fig. 5.7 Depth of holes for each mask diameters at 10passes

5.3.4 加工孔のエロージョン摩耗量測定

φ2.0 のマスク径について各種砥粒におけるパスごとのエロージョン摩耗量を図 5.8 に示す. どのマスク径においても摩耗体積は WA#320 > WA#600 > WA#1200 の順であった. また, 貫通前のエロージョン摩耗量の増分に対し, 貫通後の増分は小さくなり, 貫通の直後からはグラフの傾きが緩やかに変化し, 変曲点が認められた. 図 5.7, 図 5.8 から WA#320 は他の砥粒と比較するとグラフの傾きが大きく, エロージョン摩耗量が多いことが明らかになった.

また, 図 5.9 に WA#320 における各マスク径のパスごとのエロージョン摩耗量を示す. φ0.25 および φ0.10 では, 30 パスまでに孔が貫通せず, φ0.50 では孔貫通は認められたものの, 貫通直後にマスクが破損したため, 変曲点の有無は確認できなかった.

以上の結果より, 孔が貫通すると砥粒径, マスク径に関係なくパス数とエロージョン摩耗量のグラフに変曲点が現れる, すなわち, 変化が緩やかになることが明らかになった.

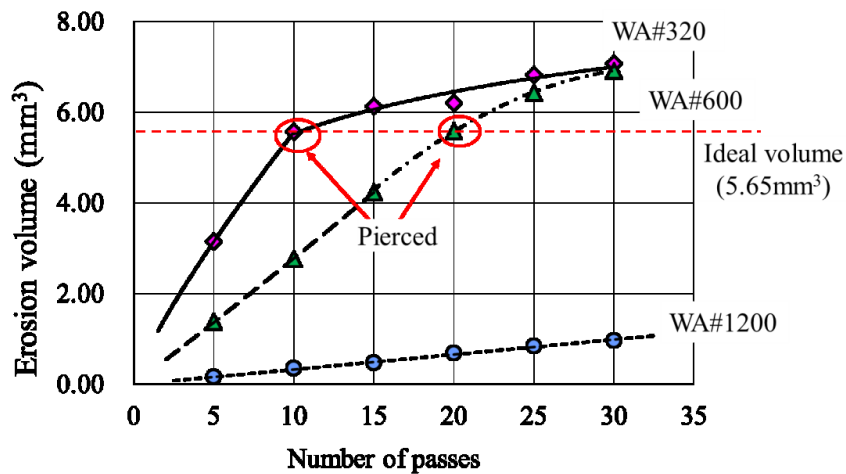


Fig.5.8 Erosion volume and the number of passes by each media of 2.0 dia

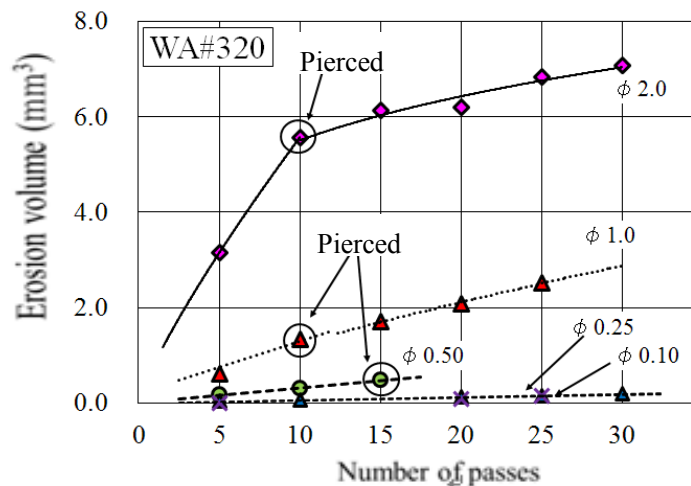


Fig.5.9 Erosion volume and the number of passes by each mask diameters of WA#320 media

5.4 考察

5.4.1 孔精度

図 5.10 に各種砥粒のマスク径 $\phi 0.25$ についてのパスごとの孔径の増加分を、図 5.11 に WA#320 の各種マスク径についてのパスごとの孔径の増加分を理想孔径との比(%)で表示したグラフを示す(式(5.1)参照).

その結果、図 5.10 より、WA#1200 は評価 A を満たしたが、WA#320, WA#600 はパスを重ねると評価 C に達する事が明らかになった。これは砥粒径が WA#1200 に比べ WA#600 は 2 倍、WA#320 は 4 倍大きく、体積比では 8 倍、64 倍大きくなり砥粒が有するエネルギーに差が生じ、その結果としてマスクが破損、マスク径が広がったため加工孔径の拡大が生じたと考えられる。また図 5.11 から、マスク径が小さいほど孔径増加分の傾きは大きい傾向を示した。マスク径の

最も大きい $\phi 2.0$ では 30 パス後は評価 B に入ったが、 $\phi 1.0$ 以下のマスク径はすべて評価 C 以下であった。これは同一砥粒を使用したときマスク損耗により、小さな孔になるほど理想孔径に対する入口径の拡がりの影響が大きくなるためと考えられる。

ここで、マスク摩耗のメカニズム加工の進展状況を 3 段階に分けて説明する[4] (図 5.12)。第 1 段階は、マスクの深さ方向の摩耗とともに砥粒の衝突で径方向の摩耗が発生する。第 2 段階でマスクの深さ方向の摩耗が CFRP に達する。第 3 段階ではマスク径の拡がりが CFRP に転写され、CFRP の入口径が拡がり始める。

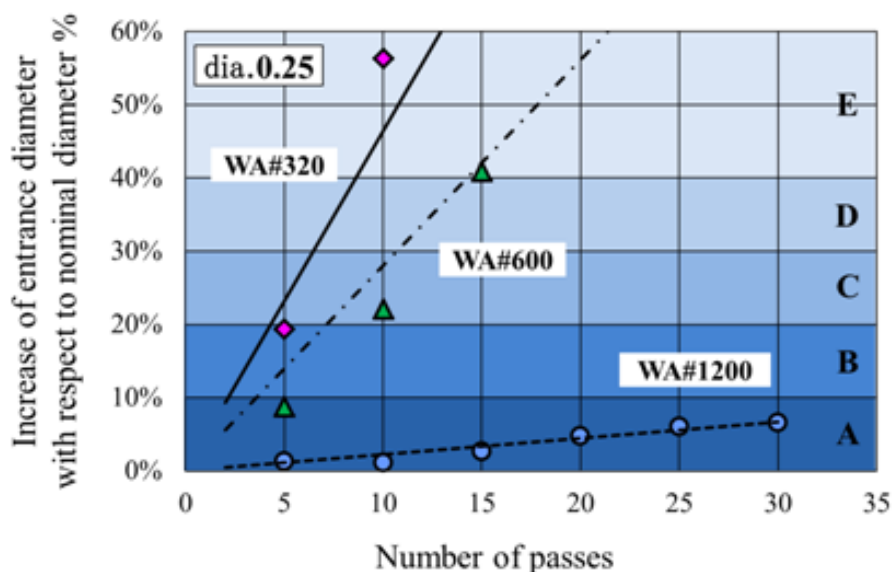


Fig.5.10 Increase of entrance diameter with respect to nominal diameter (dia.0.25)

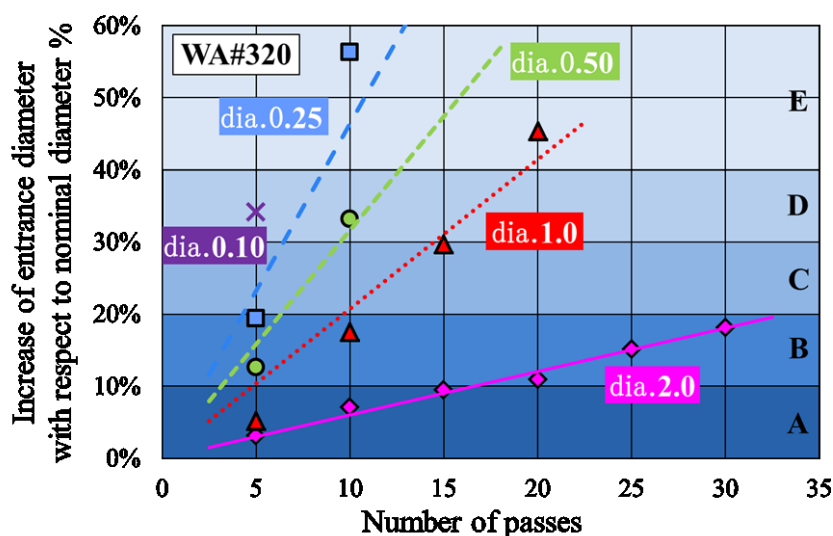


Fig.5.11 Increase of entrance diameter with respect to nominal diameter of WA#320, dia.2.0~dia.0.10

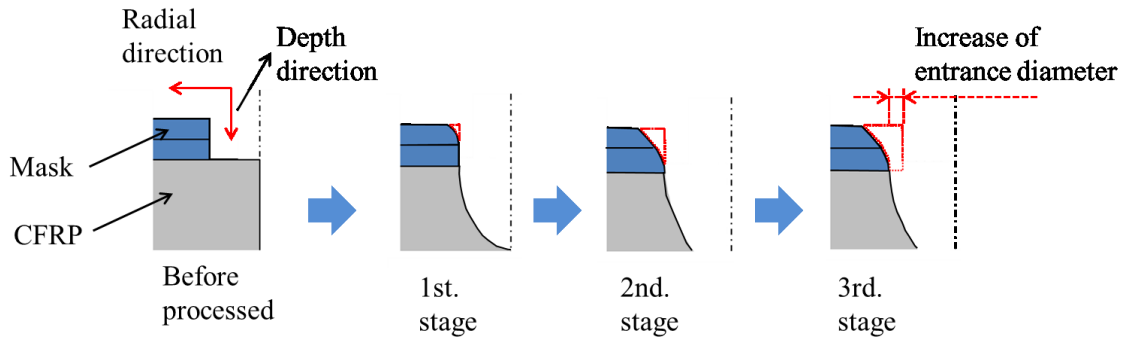


Fig.5.12 Abrasion process of photoresist mask (2ply)

今回の実験ではマスク積層枚数が1枚であったため、すぐに第3段階へ到達してしまった。そのため5パスの段階でマスクおよびCFRP入口径が拡大し、評価Aを満たせない結果であった。図5.11より、 $\phi 2.0$ のみが評価Bになる理由は、評価Bの基準が $\phi 2.0$ では $\pm 0.4\text{mm}$ であるのに対し、 $\phi 0.25$ では $\pm 0.05\text{mm}$ 、 $\phi 0.10$ では $\pm 0.02\text{mm}$ と数値的には孔径公差を孔径の20%に設定したため、より微細な加工精度が求められたためである。しかし、図5.12からわかるように、マスク積層枚数の増加させることでマスクの径方向の摩耗が供試体に与える影響を抑えられるので、積層枚数によっては評価Bになる入口径が増えるものとする。

5.4.2 エロージョン摩耗量からみた加工効率の検討

図5.13に $\phi 2.0$ での各種砥粒における理想孔体積に対するエロージョン摩耗量の割合(%)をパスごとで示す(式(5.2)参照)。WA#320, WA#600は一旦評価Aに入るが、パスの増加につれてマスク摩耗が発生、それに伴いエロージョン摩耗量も増加し、その結果評価Cに入る。WA#1200はエロージョン摩耗量が小さく、30パスでは評価Eにとどまった。WA#320, WA#600においてグラフに変曲点が存在するのは、図5.3の加工孔断面形状の観察結果と比較すると、孔の貫通以前は深さおよび孔径方向ともにエロージョン摩耗が進展するが、貫通後は径方向のみのエロージョン摩耗となり、エロージョン摩耗量の増加が小さくなるためと考えられる。

また、図5.14にWA#320での理想孔体積(V_i)に対するエロージョン摩耗量(V_m)の割合をパスごとで示す。エロージョン摩耗量の割合は、10パスまではほぼマスク径の大きい順になり、増加量は直線的になった。それ以降のパスでは、貫通した $\phi 2.0$ はエロージョン摩耗量の増加が小さくなり、傾きが緩やかに変化した。

以上より、砥粒径や孔径が変化することにより、エロージョン摩耗に差が生じることが明らかになった。

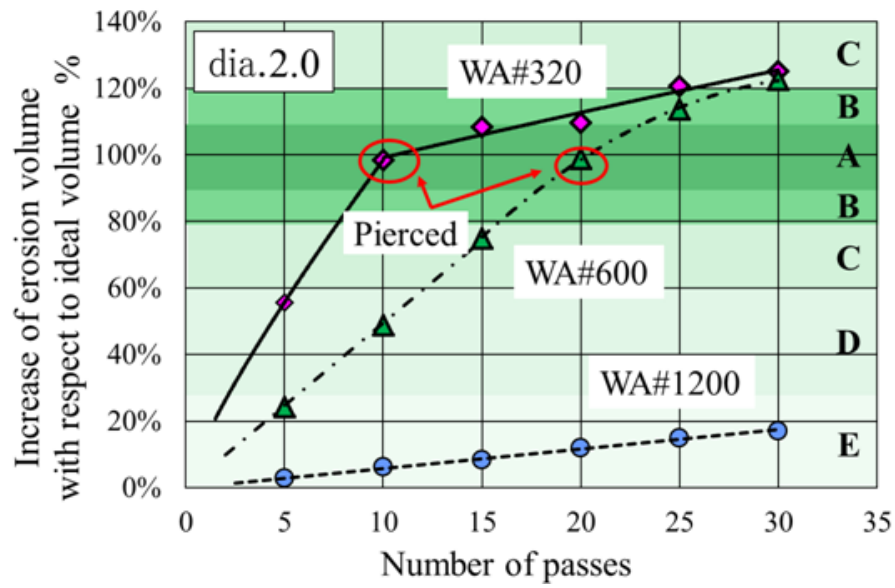


Fig.5.13 Increase of erosion volume with respect to ideal volume of WA#320, WA#600 and WA#1200

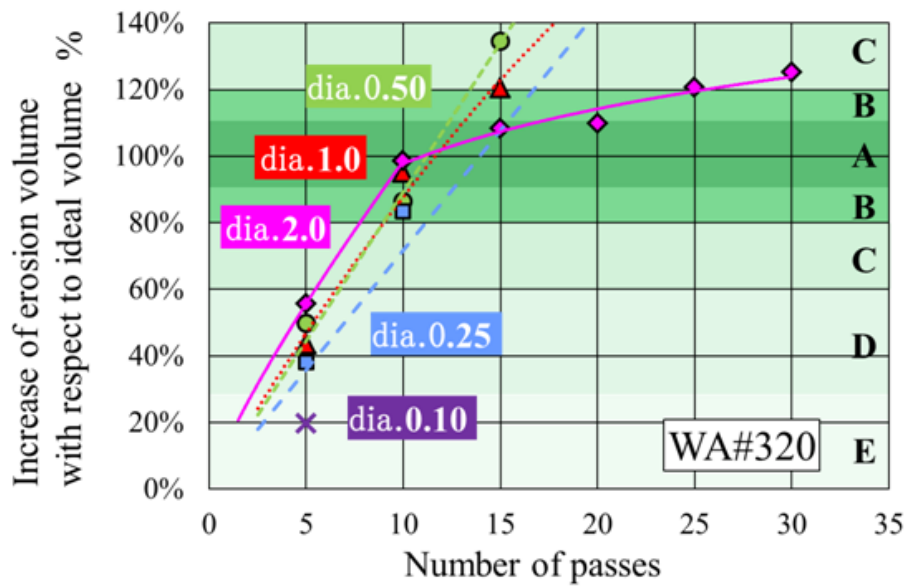


Fig.5.14 Increase of erosion volume with respect to ideal volume of WA#320, dia.2.0~dia.0.10 mm

Table 5.5 Relationships erosion volume and mechanical properties by WA#320, WA#600 and WA#1200

Media	Erosion volume (mm ³)		Specific gravity		Media diameter (μm)		Media mass (μg)	
	Measured value dia.2.0 10pass		Physical property		Physical property		Calculated value	
WA #320	5.77	100%	3.9	100%	40	100%	0.131	100%
WA #600	2.77		3.9	-	20	-	0.016	
WA #1200	0.351		3.9	-	10	-	0.003	

ここで、各種砥粒の密度、粒径から質量を算出し、エロージョン摩耗に影響を及ぼす一定時間当たりのエロージョン摩耗量の違いを考える。10パス加工後の加工孔のエロージョン摩耗量と各種砥粒の質量を表 5.5 に示す。砥粒の質量 $m(\text{g})$ は、砥粒形状を球と仮定し、砥粒径を $d(\text{cm})$ 、密度を $\rho(\text{g/cm}^3)$ としたとき、体積と密度の積として $m = 4/3 \times \pi (d/2)^3 \times \rho$ で求めた。

次に、表 5.5 の加工孔のエロージョン摩耗量(実測値)と砥粒の質量(計算値)の間に差が生じた原因を考察する。ここで、砥粒の運動エネルギーは $E = 1/2mv^2$ (m は砥粒質量、 v は砥粒速度)の式で表される。今回使用したブラスト装置(ELP-1TR)は、砥粒を初速 0 の状態から圧縮空気によって加速させるが、この際質量が小さい方が加速されやすいものと考えられる。よって各粒子の加速後の速度をそれぞれ v_{320} , v_{600} , v_{1200} とすると、 $v_{320} < v_{600} < v_{1200}$ であると考えられる。図 5.15 に示すように、 v は砥粒が単位時間に通過する深さ方向の距離 L に比例するとしたとき、一定時間にマスク径を通過する砥粒数 N は $N \propto v$ である。さらに、砥粒濃度を考えると、WA#320 と比較して平均粒径の小さい WA#600, WA#1200 の方が同じマスク径に対して衝突する単位面積あたりの砥粒数が多くなる(図 5.16)。各粒子の単位面積あたりの衝突砥粒数をそれぞれ A_{320} , A_{600} , A_{1200} とすると、単純計算で $A_{600} = 4 \times A_{320}$, $A_{1200} = 16 \times A_{320}$ となる。

以上より、各種砥粒における一定時間にマスク径を通過する砥粒数 N を式(5.4)~(5.6)に示す。

$$N_{320} = A_{320} \times L_{320} \propto A_{320} \times v_{320} \quad (5.4)$$

$$N_{600} = A_{600} \times L_{600} \propto 4A_{320} \times v_{600} > 4A_{320} \times v_{320} \quad (5.5)$$

$$N_{1200} = A_{1200} \times L_{1200} \propto 16A_{320} \times v_{1200} > 16A_{320} \times v_{320} \quad (5.6)$$

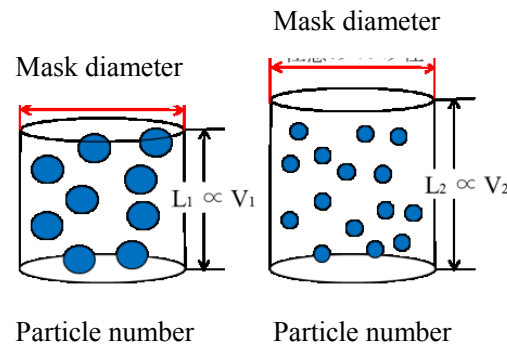


Fig. 5.15 The difference of the abrasive grains number N which passes through the same mask size by v

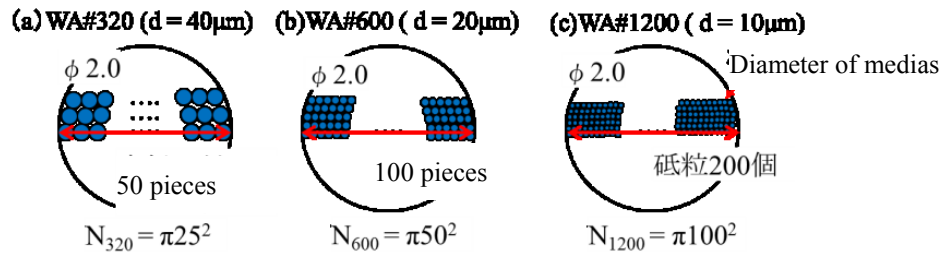


Fig.5.16 Density of blast medias

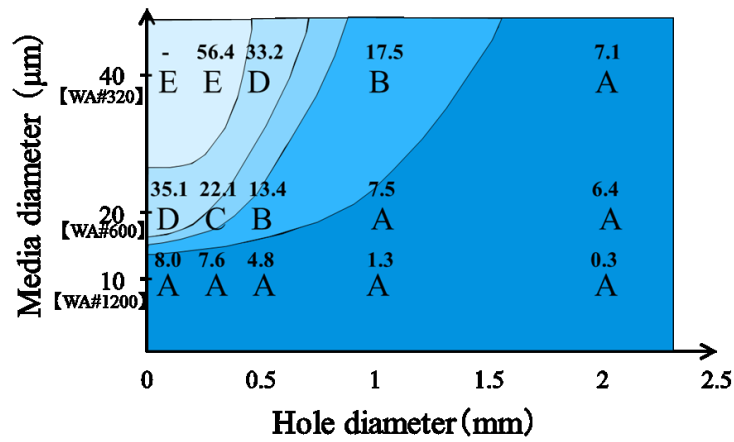


Fig.5.17 Evaluation of optimum medias in processing hole diameter about hole accuracy

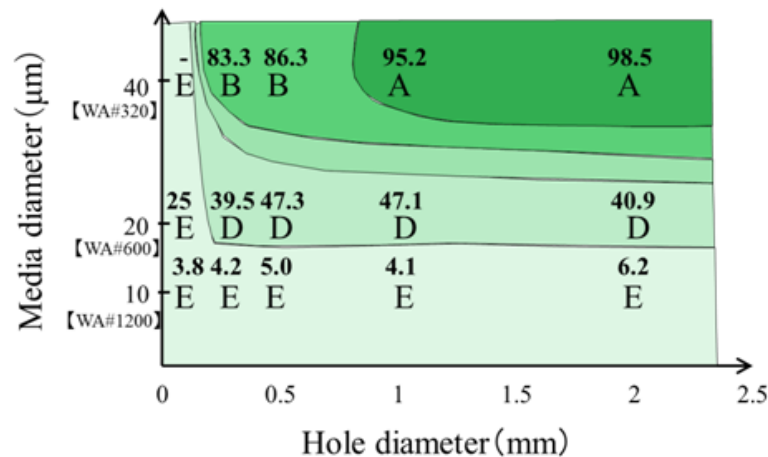


Fig.5.18 Evaluation of optimum medias in processing hole diameter about processing efficiency

これらの式より、一定時間に CFRP へ衝突する総砥粒数 $WA\#320 < WA\#600 < WA\#1200$ の順となり、 $WA\#600$, $WA\#1200$ のエロージョン摩耗量の比率の方が質量の比率と比較して大きくなったと考えられる。

5.4.3 最適砥粒の検討

マスク径に対する最適砥粒をこれまでの結果から孔精度および加工効率の観点から評価した。10パス後の孔精度の評価を図 5.17 に、加工効率の評価を図 5.18 に示す。なお、アルファベットの上の数値は評価の%を示す。

今回の実験は供試体の板厚を 1.8mm に揃えたため、 $\phi 0.25$ ではマスク径に対する加工深さの比 (L/D) が 7.2, $\phi 0.10$ では 18 というように高アスペクト比である小径孔となり、 $\phi 0.25$, $\phi 0.10$ では貫通が難しいものとする。 $\phi 2.0$ および $\phi 1.0$ は $WA\#320$ が精度、効率ともに結果が良好であり、 $\phi 0.25$, $\phi 0.10$ の小径孔ではエロージョン摩耗が大きく、マスクに与える影響の大きい $WA\#320$ では孔精度、効率ともに条件を満たさない。一方で、一定時間当たりのエロージョン摩耗量は小さいが、マスクに与える影響の小さい $WA\#1200$ においては評価 A が多く、 $\phi 0.25$, $\phi 0.10$ の小径孔ではこの砥粒条件が適切であることがわかった。今回の実験では同一の板厚で行った。 $\phi 2.0$, $\phi 1.0$ は $WA\#320$, $\phi 0.50$ は $WA\#600$, $\phi 0.25$, $\phi 0.10$ は $WA\#1200$ が最適砥粒であった。 今後は供試体の板厚を薄くし、アスペクト比を一定に抑えれば、更なる小径孔加工にも対応できると考えられる。

5.4.4 変曲点についての考察

さて、5.4.2 項にて、 $WA\#320$, $WA\#600$ においてグラフに変曲点が存在することを述べたが、この原

因について考える。孔の貫通以前は深さおよび孔径方向ともにエロージョン摩耗が進展するが、貫通後は径方向のみのエロージョン摩耗に変わることで、エロージョン摩耗量が小さくなることを述べた。さらに考えると、これは孔の貫通により、気流が変わり、貫通前は砥粒が孔の中で乱反射して、底面や側面を共に削っていたものが、底が無くなった途端に、噴流が通過してしまい、側面の加工が不要となり、側面のテーパ部のみを削る加工にモードが代わるため、加工効率が落ちるのではないかと考えられる。

さらに、孔に底がある間は、材料が両持ち梁の状態であつたものが、孔が貫通すると孔底が、突然片持ち梁に変わり、材料剛性が無くなるため(ヤング率が小さいほど弾性が高まり加工が遅くなることから)、加工効率が下がるのではないかと考えられる。なお、この件に関しては、非常に微細なエリアでの現象であり、さらなる解明が必要と考える。

5.5 結 言

今回、各条件でブラスト加工した結果、以下が判明した

- (1) パス数の増加に伴い加工孔径は増加するが、その増加量の差はマスク径によって大きな差異はない。1 パスあたりの加工孔の入口径の増加量は砥粒により異なり、WA#320(15 μ m) > WA#600(11 μ m) > WA#1200(1 μ m) の順である。
- (2) 加工孔が大きくなるほど深さ方向への加工進展は早くなる。φ2.0 での 10 パスにおける加工深さは各種砥粒ごとで WA#320(5.7mm) > WA#600(1.1mm) > WA#1200(0.4mm) の順である。
- (3) 貫通前はエロージョン摩耗量はほぼマスク径の順になり、貫通後は変曲点が現れ、傾きは小さくなる。φ2.0 での 10 パスにおける加工効率 V_e (=エロージョン摩耗量/理想孔体積)は、WA#320(99%) > WA#600(41%) > WA#1200(6%) の順である。
- (4) 今回の条件下では φ2.0 と φ1.0 は WA#320, φ0.50 は WA#600, φ0.25 と φ0.10 は WA#1200 が最適砥粒である。

参考文献

- [1] H.FUKAGAWA, T.HIROGAKI and T.KATO, Development of hole generation technology for CFRP parts using blast, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 56, 4(2012)262-267(in Japanese).
- [2] A. KATO, H. FUKAGAWA, K. SHIMIZU, I. YAMADA and T. KATO: Investigation of the multiple simultaneous holes preparation technology by blasting for the CFRP plates, Japan Society for Abrasive Technology Annual Conference Proceedings (ABTEC), (2013) 243-246 (in Japanese).
- [3] 清水啓祐, 深川仁, 加藤敦司, 山田伊久子, 加藤隆雄: 各種ブラスト砥粒を用いた CFRP への同時多数小径孔加工の研究, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会講演論文集, No.143-1, (2014) 236-237.
- [4] 西川幸佑, 加藤隆雄, 深川仁:ブラストによる小径穴加工に用いるマスク材料の比較評価, 日本機械学会東海学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 3(2014)282, 283.

6 章 航空機用 CFRP の孔あけ加工の現状とその改良手法の考察

6.1 はじめに

これまでの研究により、ブラスト加工によって加工領域を特定するために、フォトマスクを利用することで CFRP 薄板への小径孔加工が可能であることが分かっている[1]。しかし、加工孔がテーパ形状を呈することや、加工の際にマスク材料が摩耗すると、マスク孔が拡大することがあり[2]、これにより加工孔がテーパ形状になる原因であると予測した。

そこで本章では、加工孔を評価する上でマスク材料の摩耗に注目し、マスクの厚さがテーパ角と真円度に及ぼす影響を調べ、さらに従来のマスクよりも摩耗の小さいマスクを開発するために、各種材料の耐摩耗性を測定・評価することを目的とした。

6.2 実験方法

6.2.1 マスク厚を変更した孔加工実験

熱硬化性エポキシ樹脂をマトリクスとした CFRP 板(1.8mm)に厚さ 0.1mm の感光性のドライフィルムフォトレジスト(MS7100, 三菱製紙㈱)を 2~5 枚重ねて貼付け、孔パターンフィルム(以降、フォトマスク)を使用して 4mm ピッチで直径 2mm の孔パターン付きマスクを作成した(図 6.1)。4 種の厚さのマスクを CFRP 板に貼り付けた A5 サイズの供試体(表 6.1)を用意した。

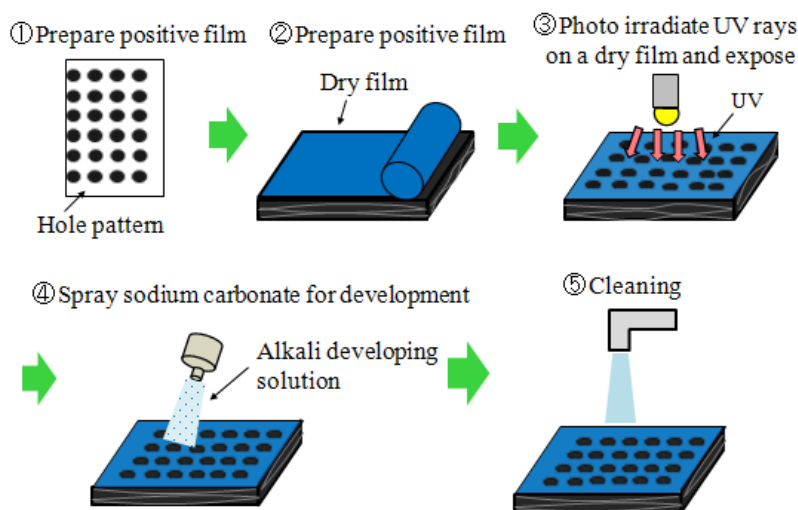
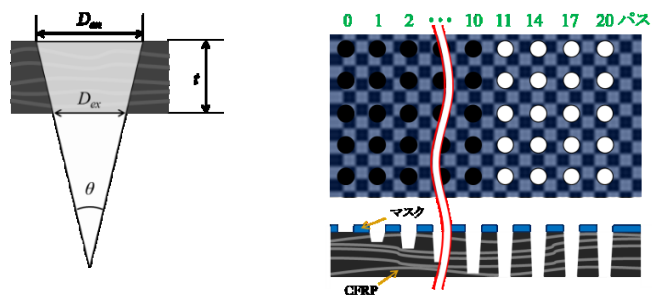


Fig.6.1 Fabrication process for masking the specimen



$$\theta = 2 \tan^{-1}((D_{en} - D_{ex})/2t)$$

Fig.6.2 Definition of taper shape holes

Table 6.1 Materials of test coupons

CFRP plate	Size 250 × 148 × 1.8 mm	Fabric CF-3K-W3101 (Toho Tenax) Prepreg laminate (8-ply) [0 / 90 / 90 / 0] ₂ (GH Craft Ltd.)
Mask material	Dry film resist	Acrylic polymer resin film MS7100 Thickness 0.1 mm, 2 sheets -5sheets (Elfo-Tech Co.Ltd.)

CFRP 供試体に対して 1~20 パスの加工を行い、各パスにおける加工孔の入口及び出口径と真円度を工具顕微鏡 (MF-B1010C, ミツトヨ(株)) で測定した。また、各パスにおける入口及び出口径からテーパ角を算出した。ここで図 6.2 の式で、 θ :テーパ角、 D_{en} :入口径、 D_{ex} :出口径、 t :板厚である。

6.2.2 マスク材に用いる各種板材へのブラスト加工実験

9 種類の材質の供試体に対して、加工部 (X 方向 84mm, Y 方向 43mm) を設け、非加工部にはゴムシート (SPR スーパー NP, 日東電工(株)) で覆って供試体に加工がなされないようにした。その後、5 パス毎にゴムシートを追加しながら 20 パスまでの加工を行い (図 6.3)、各パスにおける摩耗深さ (非加工面高度から加工面高度を引いた値) を非接触 3 次元測定装置 (NH-3N, 三鷹光器(株)) で測定した。なお、供試体として用いた各種材料とその機械的特性を表 6.2 に示す。

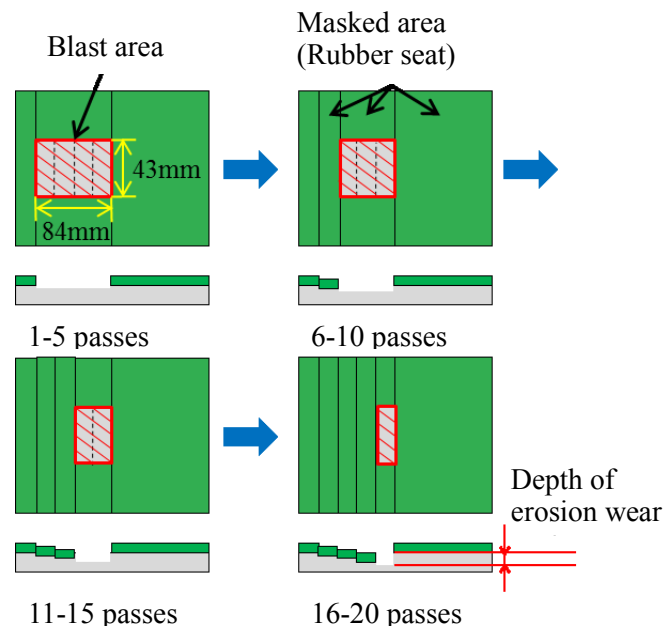


Fig.6.3 Procedure of masking for blasting test

Table 6.2 Mechanical properties of test coupons

Materials and Specification	Thickness (mm)	Commercial name Distributor Manufacturer	Specific Gravity	Young's Modulus (GPa)	Hardness [Hv][Hr]	Tensile Strength (MPa)	Breaking elongation (%)
Stainless steel SUS304(2B)	2.0	304(2B) Sawasho Co., Ltd. Nippon Steel & Sumitomo Metal Co.,Ltd	7.93	193	184Hv [※]	≥ 520	-
Aluminum alloy A7075P-T73	4.0	Fuji Industries Alcoa Co., Ltd.	2.8 ⁽¹⁰⁾	71 ⁽¹⁰⁾	159Hv [※]	505 ⁽¹⁰⁾	-
Aluminum alloy A5052P-H34	2.0	52S Sawasho Co., Ltd. Nippon Light Metal Co., Ltd.	2.68 ⁽¹⁰⁾	69.3 ⁽¹⁰⁾	78Hv [※]	260 ⁽¹⁰⁾	-
Copper alloy C5191P-H	2.0	Phosphor bronze Suntech steel Ltd. Ohki Brass & Copper Co.,Ltd.	8.83	105	197Hv [※]	620-640	-
Polyvinyl Chloride Rigid PVC	1.0	Sundaysheet Acrysunday Co., Ltd. Kasai Sangyo Co., Ltd.	1.4 ⁽¹¹⁾	3.2 ⁽¹¹⁾	123HrR ⁽¹¹⁾	34.3-61.8	40-80 ⁽¹³⁾
Polyethylene Terephthalate Glycol Modified PETG	1.0	Sunday PET Acrysunday Co., Ltd. Sumitomo Bakelite Co., Ltd.	1.27	2.0 ⁽¹¹⁾	115HrR ⁽¹²⁾	49	320 ⁽¹³⁾
Methacrylic Resin PMMA	1.0	Acrylight®E-IR Acrysunday Co., Ltd. Mitsubishi Rayon Co., Ltd.	1.16-1.19	1.7	124HrR ⁽¹²⁾	43	2-5 ⁽¹³⁾

6.2.3 加工条件と供試体

ブラストによる加工条件を表 6.3 に示す. また, 供試体の写真を図 6.4 に示す.

Table 6.3 Test conditions

Media	White alundum (aluminum oxide (Al_2O_3)) Density 3.9 g/cm^3 , WA #320 grain dia. $40 \pm 2.5 \mu\text{m}$, #600 grain dia. $20 \pm 1.5 \mu\text{m}$, #1200 grain dia. $9.5 \pm 0.8 \mu\text{m}$	
Pressure	At nozzle	0.15 MPa
Feed speed	X axis / Y axis	Nozzle feed 8m/min / Conveyer feed 20 mm/min
Nozzle	Diameter/ Nozzle distance	5 mm/116 mm (between nozzle and specimen)

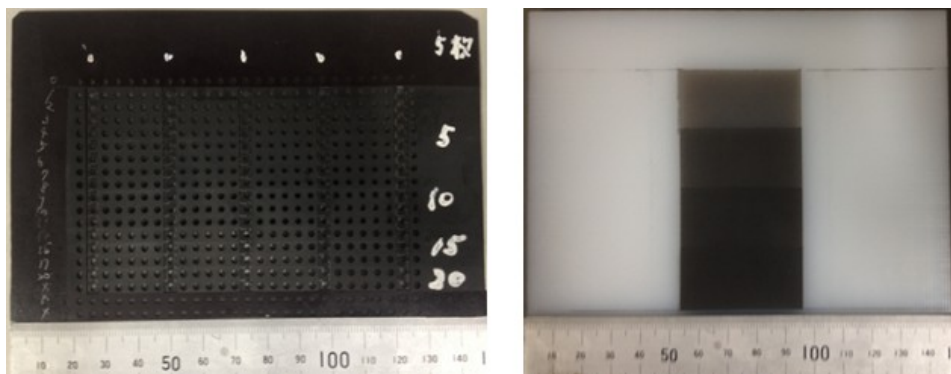


Fig.6.4 Pictures of test coupons after ballast test (left: CFRP, right: UHPE)

6.3 実験結果

6.3.1 異なる厚さのマスクによる孔加工実験

マスク(2枚)とマスク(5枚)の CFRP 供試体のマスクを除去した状態で, 任意パスの加工孔入口及び出口を光学顕微鏡(BX51M, オリンパス株)で観察した結果を表 6.4 に示す. この図から, 9・10 パスで貫通し, さらに加工を続けると, 徐々に出口径が広がることが確認される.

Table 6.4 Entrance side holes (left) and exit side holes (right) after processed

Number of passes	Entrance side		Number of passes	Exit side	
	Mask(2ply)	Mask(5ply)		Mask(2ply)	Mask(5ply)
1			9 (2ply) 10(5ply)		
10			14		
20			20		

図 6.5 に CFRP 加工孔径とパス数との関係をマスク厚別で比較して示す. 20 パス時点で, 全てのマスク厚で加工孔が $2.0 \pm 0.2\text{mm}$ の公差範囲に入り, 出口径はマスク厚が小さいものほど大きくなった. また, マスク(2 枚)の 15 パス以降の入口径の拡がり方が速くなったことが確認できた. また, 1.8mm 厚の CFRP に 2mm 径の孔で, 入口出口双方の孔径公差($\pm 0.2\text{mm}$)を満たすためには, 18-20 パスの加工が最適であることが判った.

図 6.6 に CFRP 加工孔入口および出口の真円度とパス数との関係をマスク厚別で比較して示した. 真円度は孔入口ではパス数に影響されずほぼ一定で, 孔出口では貫通後に増加傾向を示し, 17 パスから減少傾向を示した.

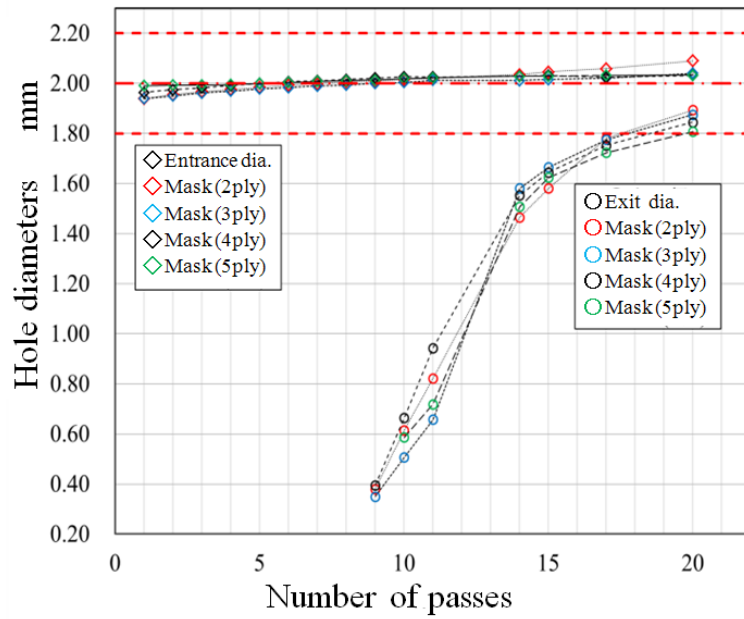


Fig. 6.5 Diameter of holes and number of passes for each mask ply numbers (2.0mm dia.)

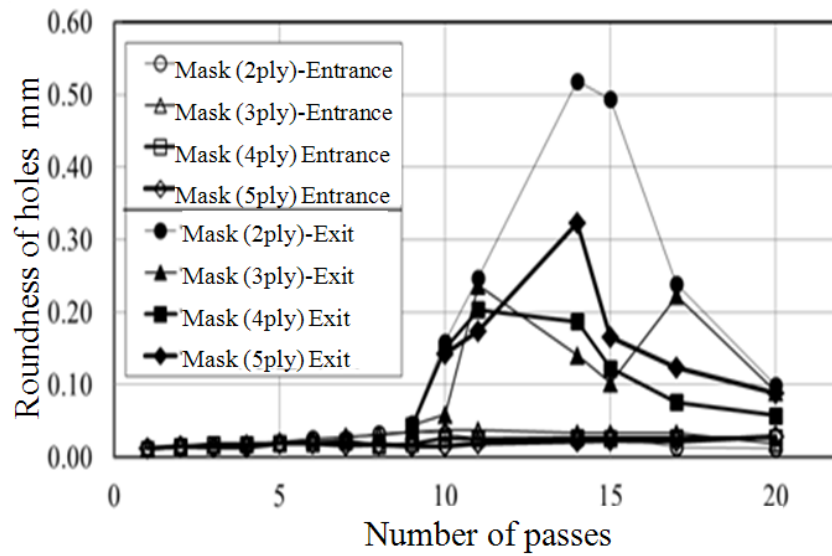


Fig. 6.6 Roundness of holes and number of passes for each mask ply numbers
(Nominal diameter 2.0mm),

6.3.2 マスク材に用いる各種板材へのブラスト加工実験

図 6.7 に摩耗深さとパス数の関係を、各供試体間で比較した。凡例は 20 パスでの摩耗深さが大きい順に示した。UHPE を除く板材では摩耗深さとパス数の間に比例関係が見られた。摩耗深さの大きさから各板材を PMMA／金属／プラスチックの 3 グループに大別される。

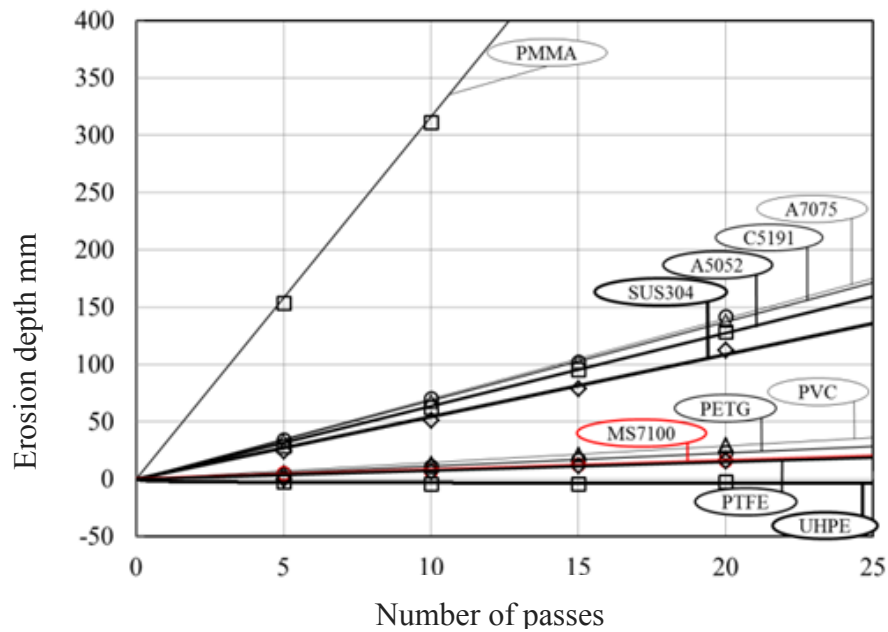


Fig. 6.7 Erosion depth and number of passes for each mask materials
(Nominal diameter 2.0mm)

6.4 考察

6.4.1 異なる厚さのマスクによる孔加工実験

図 6.8 に、全てのマスク厚において公差範囲を満足したパス数である 20 パス時点のテーパ角をマスク厚別で比較した。テーパ角はマスク(3 枚)で 5.26° と最小になった。マスク厚が小さいほど、テーパ角は減少する傾向が見られたが、マスク(2 枚)では増加した。これはマスク(2 枚)の入口径が他のマスク厚のものより大きいためであり、パス数が増加するに従いマスクが摩耗していくことで、マスク孔が広がったためと考える。

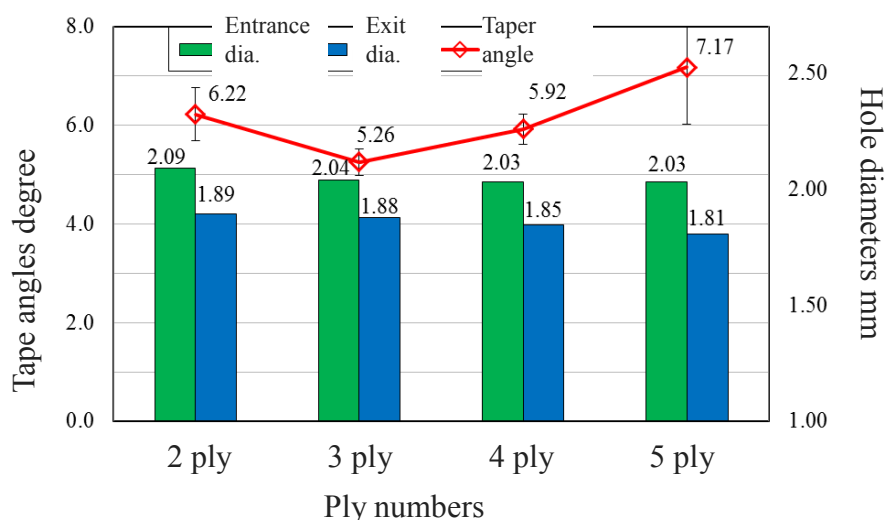
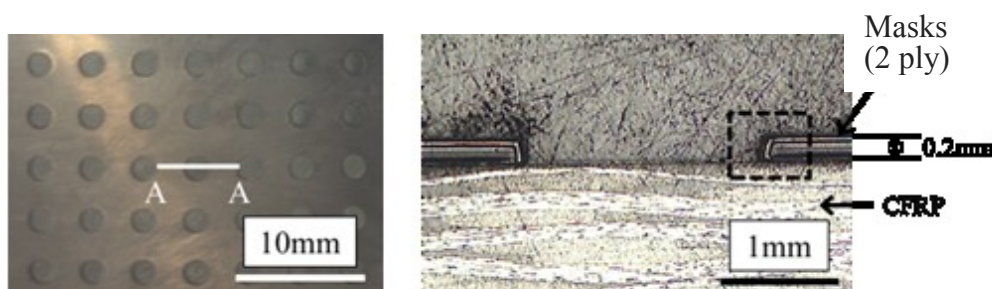
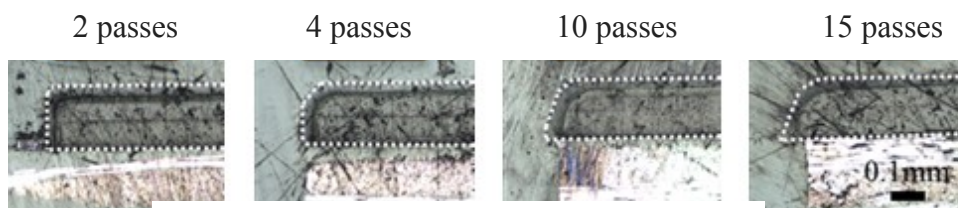


Fig 6.8 Calculation of taper angles for holes (at 20 passes)



(a) Picture of mask surface

(b) Sectional view of



(c) Catted surface of masks at hole edge

Fig.6.9 Pictures of mask surface and sectional view of cut surface of masks

図 6.9 にマスク(2 枚)の任意パスにおけるマスク孔断面の顕微鏡写真を示す。マスク孔エッジ部は 0 パスで直角だが、パス数が増加するに従い径方向と鉛直方向へ摩耗が進展していることが確認された。15 パス時に鉛直方向への摩耗が CFRP 孔端面まで到達し、それ以降は加工孔入口が径方向へ速く広がっていくと考えられる。

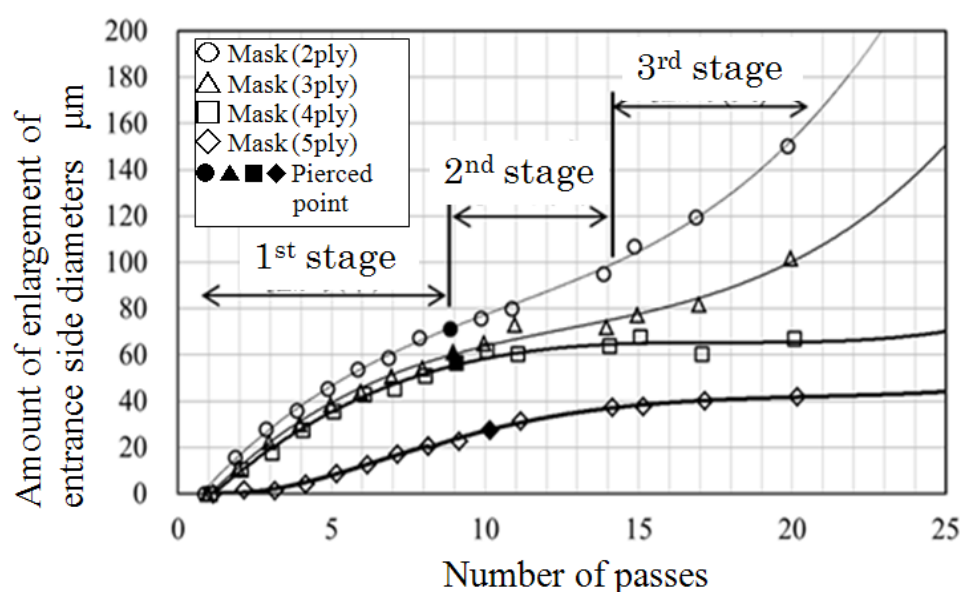


Fig. 6.10 Enlargement of hole diameters at entrance side by each number of passes

図 6.10 に各パスでの加工孔入口径の拡がり量を示す。拡がり量は、任意パスの孔入口径と 1パスの孔入口径との差を表す。グラフの傾きから、孔入口径の拡がり方は 3 ステージに分類できる。マスク(2 枚)に注目すると、貫通点までは $7.9\mu\text{m}/\text{パス}$ 、鉛直方向マスク摩耗の CFRP 孔端面到達点までは、 $4.8\mu\text{m}/\text{パス}$ 、それ以降は $9.2\mu\text{m}/\text{パス}$ となっており、順にステージ 1・2・3 とする。

摩耗工程の模式図を図 6.11 に示す。ステージ 1 では孔が非貫通のため砥粒が孔内部で乱反射し、マスク孔を拡げる。ステージ 2 では孔が貫通し、砥粒は乱反射せずに孔を通りすぎるためマスク孔がステージ 1 ほど拡がらない。ステージ 3 では前述の通り、鉛直方向のマスク摩耗が CFRP に到達しているため、どのステージよりも速くマスク孔が拡がると考える。

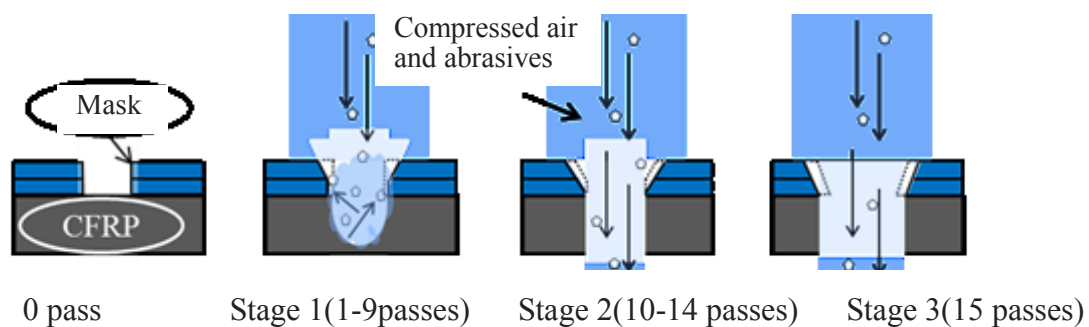


Fig. 6.11 Abrasion wears process of mask edge

これより、マスク(3枚)のテーパ角が 5.26° と一番小さくなったのは、マスク厚が大きい程出口径は小さくなること(図6.8)と、20パス直前までステージ2の状態だったため、入口径の拡がりが抑えられたためである。真円度について、孔入口はマスク孔の形状がそのまま転写されるため、パス数によらず一定である。孔出口は表6.3の14パスの出口写真のように円形でない形状となるものもあるため、真円度は大きくなるが、パス数が増加するに従いマスク孔と同じ形状の円形に近づき、 0.1mm 以内に収束する。これはCFRPが複合材で炭素繊維部と樹脂部で加工進展に差が生じる[3]ためであると考え。故に、孔出口真円度はマスク厚によらず、パス数を増加させることで小さくできる。

6.4.2 マスク材に用いる各種板材へのブラスト加工実験

図 6.12 に各種板材の摩耗速度を示した。摩耗速度は 1 パス当たりの摩耗深さ変化量を表す。

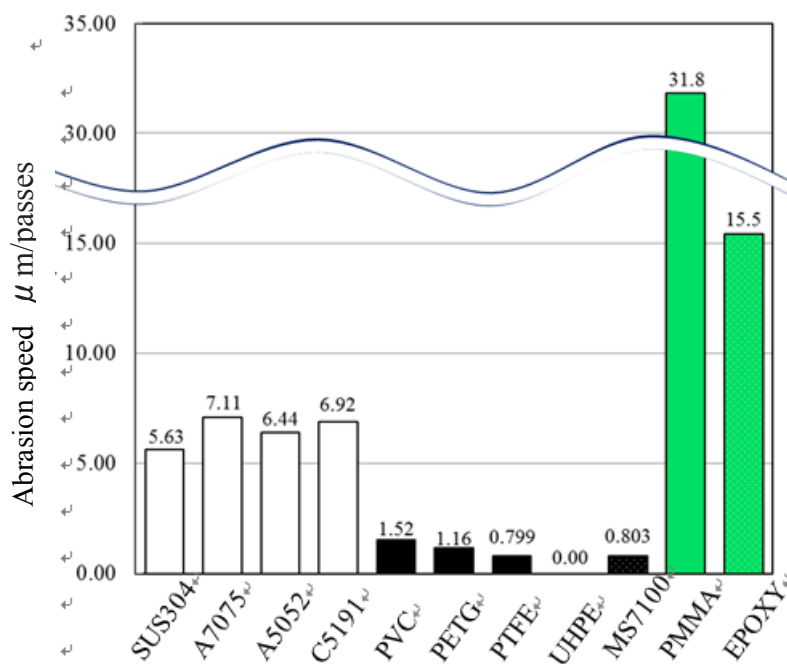


Fig. 6.12 Abrasion speed for each mask materials

定義から、摩耗速度が小さいほど耐摩耗性に優れる。本研究の目的は、従来のマスク MS7100 よりも摩耗の小さいマスクの開発のため、最も耐摩耗性に優れるプラスチックのグループに注目した。高分子材料において弾性係数が小さい材料ほど損傷量が少ないという報告 [4] から、弾性係数と摩耗速度の関係を調べたが、良い相関が認められなかった。そこで、引張特性の視点から破断伸びと摩耗速度の関係を調べたところ良い相関が得られた(図 6.13)。破断伸びが大きいほど摩耗速度は小さくなることが分かった。これは破断伸びが大きいほど、砥粒の衝突による材料の局部破壊に要するエネルギーが大きくなるためだと考える。最小の摩耗速度は UHPE の $-0.0001\mu\text{m}/\text{パス}$ で、全く摩耗しなかった。これは砥粒の持つ運動エネルギーが UHPE の破壊エネルギーにまで達していなかったためだと考える。これより、新マスクの材質には UHPE のような破断伸びが大きい(400%程度)材料が適するといえる。

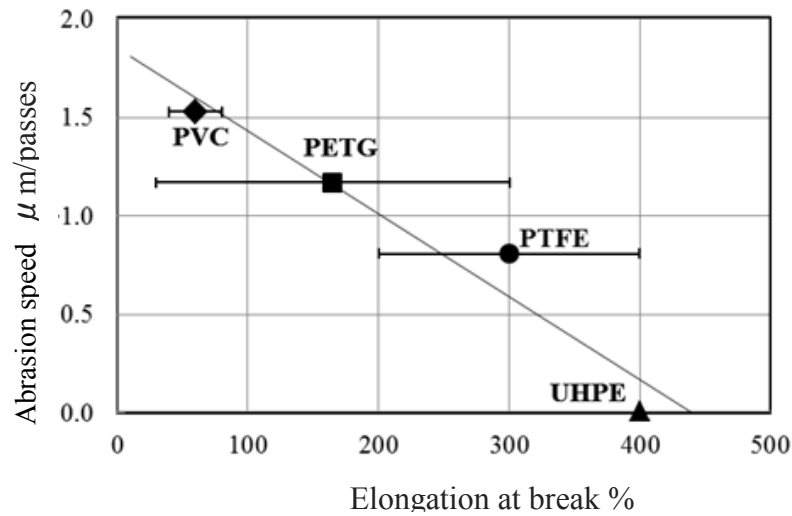


Fig. 6.13 Relationship between abrasion speed and elongation at break

6.5 結 言

以上の実験から次の結論が得られた

- (1) 従来のマスク (MS7100) では, マスク (3 枚重ね) のテーパ角が最小 (5.26°) となり従来の 2 枚重ねより約 1° 改善した.
- (2) 孔入口真円度はマスク孔形状にのみ依存し, 孔出口真円度はパス数の増加によりマスク孔形状に近づき収束する.
- (3) 破断伸びと耐摩耗性には比例関係がある.
- (4) UHPE のように破断伸びの大きい (400% 程度の) 材料が耐摩耗性に優れるため新マスクの材料として有望である.
- (5) 1.8mm 厚の CFRP に 2mm 径の孔で, 入口出口双方の孔径公差 ($\pm 0.2\text{mm}$) を満たすためには, 18-20 パスの加工が最適である.

参考文献

- [1] 加藤敦司, 加藤隆雄: ブラスト加工によるCFRP板の穴あけ, 第43回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, (2012).
- [2] 清水啓祐, 加藤隆雄, 深川 仁: ブラスト加工によるCFRP板への小径穴加工工程の検討, 第44回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, (2013) 130.
- [3] A.Kato, H. Fukagawa, K.Shimizu, I.Yamada and T.Kato: Investigation of the multiple simultaneous holes preparation technology by blasting for the CFRP plates, Japan Society for Abrasive Technology Annual Conference Proceedings (ABTEC) (2013) C12 (in Japanese).
- [4] A.Yabuki, K.Sugita, M.Matsumura, M.Hirashima and M.Tsunaga: Slurry Erosion Properties of Polyethylene, Zairyo-to-Kankyo, 48 (1999) 512 (in Japanese).

7章 全体まとめ

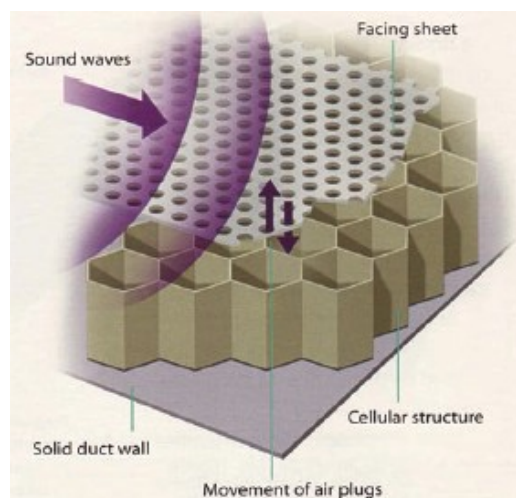
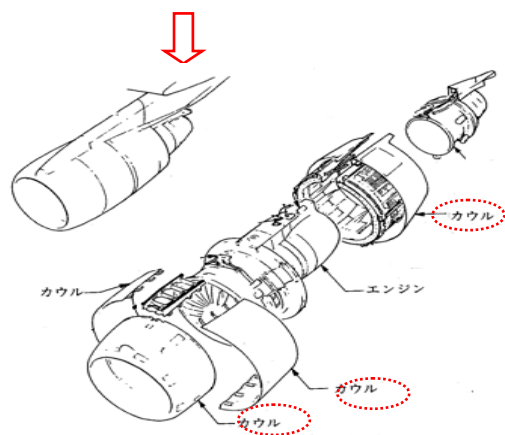
本章では、航空機用 CFRP に対する最適孔加工技術とブラストによる孔加工方法についてまとめる。また、具体的な航空機部品(エンジンカウルに用いる吸音パネル)を選び、そこに適用するためのケーススタディならびに加工工程の検討を行なう。さらに、ブラスト加工法を実際使う場合に必要な工程検討について述べる。

7.1 ケーススタディ

3 章, 4 章の結果より, 直圧式サンドブラスト装置を用い, 微細砥粒を高い圧力で噴射することで, 熱硬化系の CFRP に対して十分な能率での加工が可能であることが示された。本項では, 実際の航空機エンジンカウルに用いられている吸音パネル(図 7.1)に対する実加工を実施する。

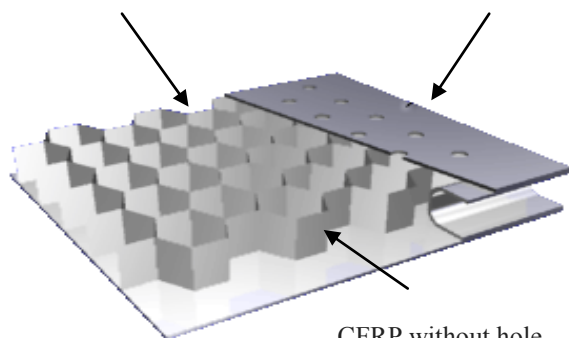
航空機のエンジンは高周波(1000-2000 Hz)の大騒音を発生するので, 乗客や空港周辺への騒音被害を最小限にするために, エンジン回りに吸音パネルでできたパネル(エンジンカウル)を設けて, 騒音を軽減している。多くはハニカムコアを用いたヘルムホルツ型共鳴器(消音器)を用いた吸音構造が採用されている。ヘルムホルツ型共鳴器とは, 共鳴器の外側にある音波が, 頸部の口に当たると, 内部の空気は音波の振動数に応じて振動し始め, これにより洞部の空気がスプリングのように圧縮と膨張運動を繰り返す。これにより, 減音される仕組みの消音器である(図 7.2, 7.3)。この箱がハニカムコアにより連続して並ぶ構造で, 航空機エンジンの場合は 1~2kHz の周波数を中心に消音させる。

なお, 対象とする板厚は機体の大きさ, 使用部位や吸音する対象周波数帯により異なるが, おおよそ厚さ 1.0~1.5mm, 孔径は 1.0~2.0mm 程度である。なお, 現在の航空機には, 強度的により優れた特性を有する熱硬化系 CFRP が使われるケースが大半である。そして, 前章の結果を参考にすると, 10 パス以内での加工が目標となる。



CFRP with holes

Engine side (inside of engine cowls)
 Honeycomb core aluminum
 Metal parts now



CFRP without hole
 Outside
 Metal parts now

Fig.7.1 Aircraft engine cowl and sound absorption panels[1]

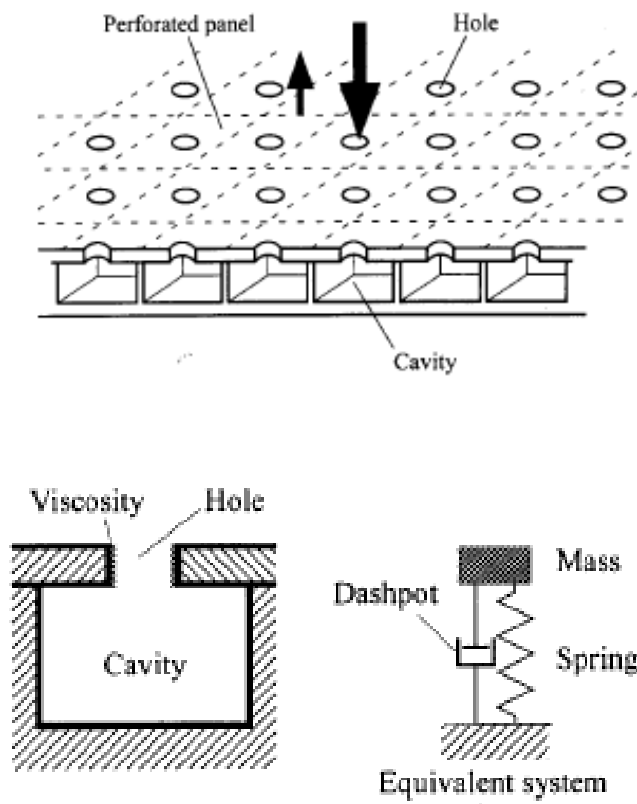


Fig.7.2 Structure and principle of sound absorber with conventional Helmholtz resonator [2]

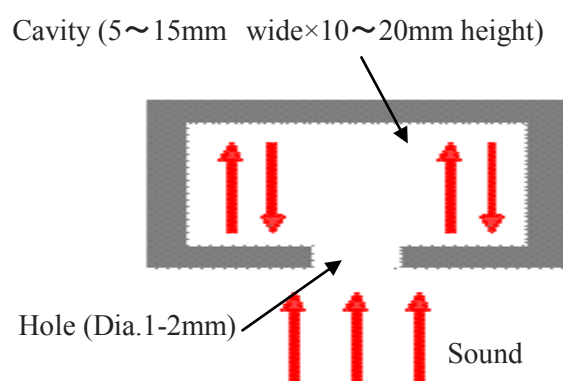


Fig.7.3 Explanation of the Helmholtz sound absorption unit

7.1.1 研究課題

①CFRP 製吸音パネルの試作:孔の出口・入口径 $2.0\pm0.2\text{mm}$ 以内, 開口率 10~20%のパネルを試作する. なお, 開口率とは, 一定の板材の面積と, その中にあけられた孔の面積の合計の比率を示す. ここで, 孔に僅かにできるテーパ形状をどこまで減らせるか(孔径 $2.0\pm0.2\text{mm}$ の確保)が課題であり, マスク材料やブラストの気流を改良して, 板厚に適した加工条件を設定し確認する.

②CFRP 製吸音パネルの製作工程の確立:ハニカムコアに CFRP 製パネルをどの段階で孔加工・接着するかの最適工程を確立するために, ハニカム接着後加工するケースと, 接着前加工するケースを比較検証し確認する(図 7.4).

なお, 参考までに, 特許提出時に考えた工程図を図 7.5 に示す

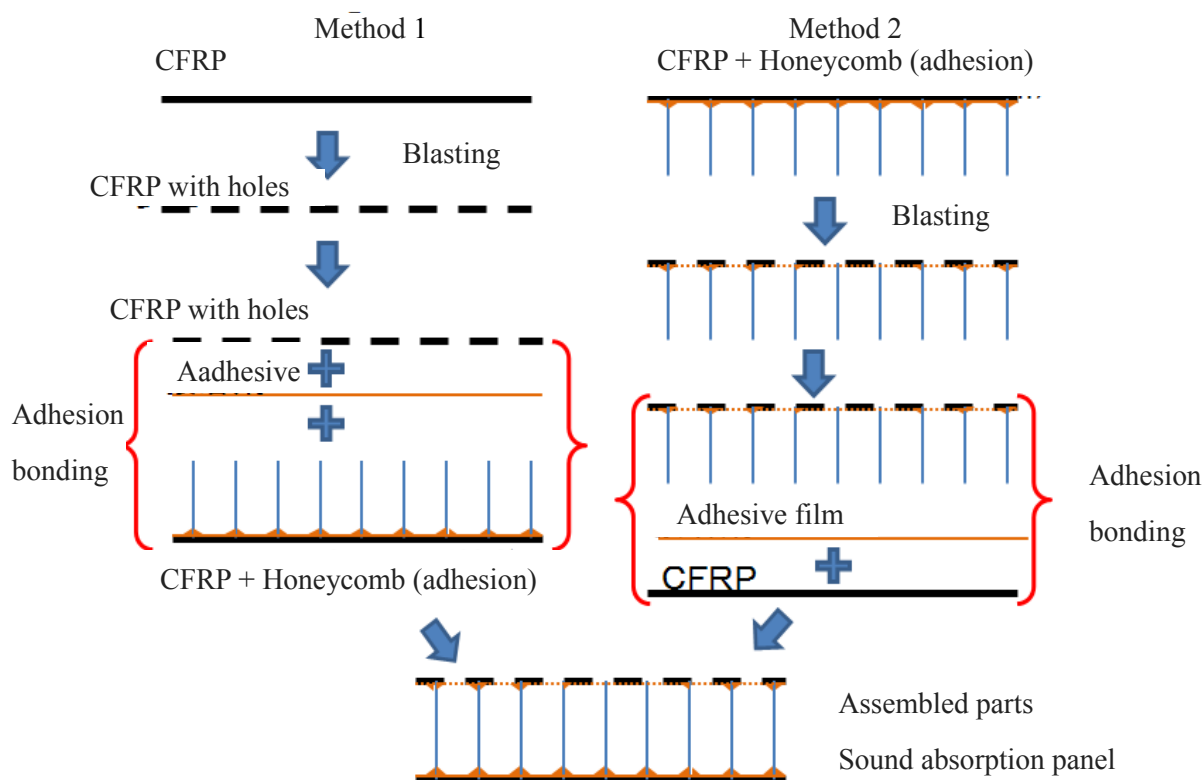


Fig.7.4 Manufacturing process of sound absorption panel

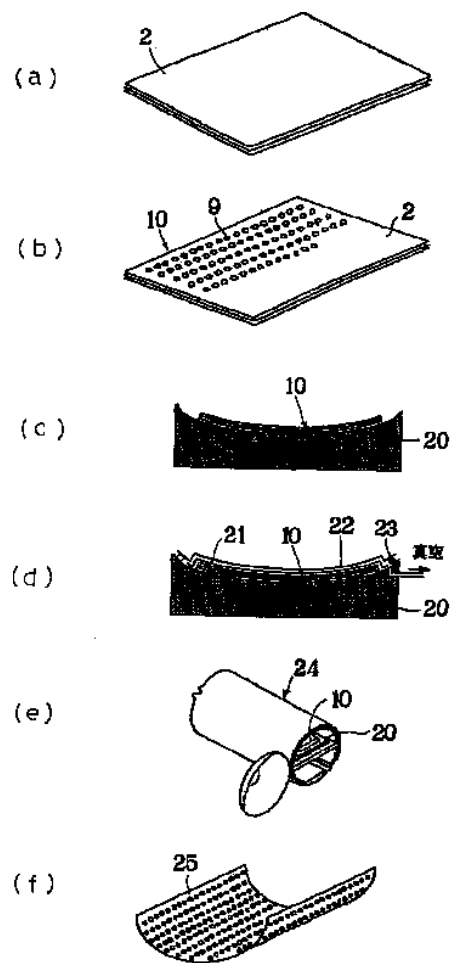


Fig.7.5 Manufacturing process of sound absorption panel (from the patent) [3] [4]

③吸音性能の評価:特殊音響設備にて、周波数に応じた吸音性能を測定評価する。

しかし、ハニカムのセルサイズ、板厚、孔径、開口率と低減できる騒音周波数の関係が不明であるため、特殊な音響設備を使い吸音性能評価試験を実施し、周波数に応じた吸音性能を測定確認する計画である。この時、航空機メーカーの空力専門家のアドバイスも受けて実験を進める計画である。

7.1.2 最終的に目指す工業製品

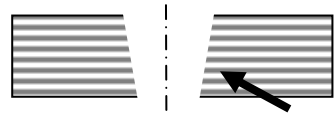

航空機エンジンカウルに多く用いられているアルミ製の吸音材料をCFRPに置換えることで、軽量化と同時に腐食による定期交換作業をなくすることができる。しかしCFRPは現状技術では孔加工コストがかかるため、本技術成果を生かしてブラストで安価に製造できるようにする。将来的には自動車、建築材料、風力発電、楽器等にも展開したい。

例えば、新幹線の床には、ディンプル補強アルミ防音室内床などが使われているが[5]、アルミ以上の軽量化を図るには、そのような場所にも適用できる可能性がある。その他、防音壁の構造では、複数の層からなる「吸音構造体」などが特許で出されているが[6]、このような部位にも、適用できる可能性がある。また、自動車ではエンジン回りや天井構造などに、多層防音構造など、さまざまな吸音材量が用いられており、解析技術も多く研究されており[7]、自動車のさらなる軽量化ニーズと共に、今後ますます活用の可能性が増えるものと期待される。

7.2 ブラスト加工法とAWJ加工法との比較

ブラスト加工は、原理的には AWJ と似ており、よく比較の対象になるため、改めて 1 章で述べた表 1.1 から、両加工法だけを取り出し、補足して対比した(表 7.1)。

Table 7.1 Comparison of AWJ method and blast method for CFRP

Method 孔加工方法	AWJ アブレッシブウォータージェット J 加工	Blast ブラスト加工
Time (Speed) 孔加工時間 (スピード)	Fast 2-3sec 速い 2-3 秒	A little fast 4-5sec やや速い 4-5 秒
Running Cost ランニングコストなど	Drying process necessary, maintenance expensive for nozzle wear, media exchange ノズル摩耗メディア交換等ありメンテナンス費用がかかり乾燥工程必要	Low, but dust generation media and mask costs are somewhat worn 低い、マスク費用やメディアがやや損耗する 粉塵発生
Equipment 装置コスト	Expensive 高価格(数千万～億)	A little expensive やや高価格(1 千万前後)
Quality 品質	Become slight tapered hole. Delamination risk, Surface roughness is somewhat rough. テーパ孔になる。 デラミネーションのリスク 面粗度が切削に比べてやや粗い	Become a tapered hole. Possible to generate dense holes, not occur delamination テーパ孔になる。 デラミネーションは起きない密集した孔加工が可能
Cut figure 断面形状		
Note 注記	Practically used Wet process (needs dryprocess) Not suitable for large number of small holes 実用化 水に濡れる(乾燥が必要) 多数の小径孔加工には適さない	Under development or specially used Attach brast sand (need air cleaning) Suitable for large number of small holes 開発中 特別な用途 砂埃が残る(エアー等で清掃が必要) 多数の小径孔加工に適する

7.3 ブラスト加工法の工程設計への検討

今研究により、ブラストによる孔加工技術の基礎データを取得することができたが、今後本技術を、工業的に実用化していくためには、生産技術的な工程設計に必要なデータを提供しておく必要がある。ここでは、そのために必要な項目を列記し、現状判明していることと、今後の実用化のための課題などを述べる。

① CFRP の種類と材料厚さ

CFRP は UD 材、織物材、積層方法などどのような構造でも構わないが、板厚は 1mm 前後が適している。2mm までの実験をしているが、板厚に応じて加工時間が増加する。

② 孔径と孔配列(パターン)

孔径は最小 0.25～2.0mm まで実験して確かめているが、サイズが大きくなる方向には原理的に問題ない。孔が密集している方が加工効率は向上する。開口率は約 50% まで確認済みである。

③ 孔品質

孔形状は、5 度前後のテーパが残る。孔径は 2mm 径の場合で、 2.0 ± 0.2 mm まで加工可能である。加工深さ L と孔径 D の関係の比として $L/D=1$ であることが理想であるが、18 程度までは加工可能であった。なお、ドリル加工や AWJH 加工で起きやすい、剥離は発生しない。また特徴として、円以外の異形状の孔も加工可能である。

④ 砥粒と圧力

2mm 径の場合アルミナ #320 で 0.15MPa の条件が適しているが、小径になれば、粒径を小さくする方が、孔品質は向上するが、加工効率は低下する。また圧力を高めると、加工効率は向上するが、マスク寿命が低下する場合があるので、0.15～0.30MPa 程度が最適である。なお、砥粒の寿命は、30 回程度まで再利用が可能であるが、加工効率は徐々に低下する。

⑤ 固定用治工具およびマスク材料

加工するワークが風圧で飛ばされないように、四隅にクランプを設けた治工具で、固定する。CFRP の裏面を保護したい場合は、裏面にも保護用フィルムを貼る。マスク材料は、事前に CFRP に貼り、規定の方法でネガ通りのパターンでフォトリソグして置く。

7.4 結言(全体)

航空機用 CFRP の孔加工に関して、以上の実験と考察を行った結果、次の結論を得ることができた。

- (1) CFRPの一般的な孔加工として用いられている、ドリルによる孔加工方法における現状の課題を把握することができ、各種ドリルと加工法に応じた、データベースを作ることができた。
- (2) ドリル以外の加工法としてのブラスト加工を提案し、CFRPの孔加工に適用することができた。また、孔加工のメカニズムをあきらかにすることができた。さらにブラスト加工法の一般性を高めた考察を行うことができ、航空機部品に適用する部位についての検討を進めることができた。また、このブラスト加工法は、今後さらに発展させることで、航空機部品の吸音パネルなどの製造に利用できるものとする。
- (3) 航空機用CFRPを対象として、戦略的な加工法の選択の視点から、ドリルとブラストとレーザ加工法について、最新技術の加工能力の評価試験を行なった。この結果、航空機用としての品質確保を条件として、孔径と加工効率の面から、各種加工法の中から、最適な方法を戦略的に選択する方法を提案することができた。

参考文献

- [1] 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄: プラストによる CFRP の孔明け加工技術の開発, 砥粒加工学会誌, 56, 4(2012)262.
- [2] 真田明, 田中信雄, 岩国信夫: 男性板の振動を利用した広帯域ヘルムホルツ共鳴器型吸音パネル, 日本機械学会, 71 巻 705 号(2005-5).
- [3] 「航空機エンジンナセル吸音パネル用多孔板の孔明け方法, 製造方法」特願 2001-141130, 出願日 2001/05/11.
- [4] 佐名俊一, 深川仁, 黒澤光久, 「航空機エンジンナセル吸音パネル用多孔板素材の製造装置」特願 2001-129269, 出願日 2001/4/26.
- [5] 杉本明男, 杵渕雅男, 中川知和, 片岡保人, 竹内久司: 新幹線向けデインプル補強アルミ防音室内床, 神戸製鋼技報, Vol. 54, No. 3(2004)85-90.
- [6] 山田隆博 他 7 名, 「吸音構造体」特願 2012-267269, 出願日 2012/12/6.
- [7] 学保泉寛彰, 正山口誉夫, 正黒沢良夫, 正榎本秀喜: 自動車用多層防音構造の三次元有限要素による高速減衰応答解析, 日本機械学会, No. 10-8, Dynamics and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集.

謝 辞

はじめに、本研究を実施するにあたり、指導教授としてご指導をいただきました、岐阜大学工学部の仲井朝美先生、ならびに論文審査時に助言戴いた王志剛先生、三宅卓志先生に感謝の意を表します。

同じく、研究開始当初から、論文発表に当たり多くのアドバイスをいただきました、同志社大学の廣垣俊樹先生に深く感謝の意を表します。

また、実験を支援戴いた岐阜大学の先生とスタッフの皆様(加藤孝雄先生、新川真一先生、山田伊久子氏、鷺見真弓氏、川島里美氏)、工学部機械システム工学科の学生諸君(加藤敦司君、清水啓祐君、西川幸佑君、千田一輝君)に感謝申し上げます。

なお、第2章の研究では、航空機部材研究会とその他研究活動を支援いただいた、岐阜県研究開発財団様に、第3章から第4章の研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究C(課題番号 23560118)の助成を用いた。研究を支援戴いた、(株)エルフォテックの神田社長ならびに関係者の皆様方に深く感謝申し上げます。

以上