

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

委託者 中部経済産業局
委託先 財団法人名古屋産業科学研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	
1-3 成果概要	
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	
第2章 工具材質の高度化および超硬合金成形体の評価	7
2-1 研究目的及び目標	
2-2 実験方法	
2-3 研究成果	
第3章 刃具の加工、研磨	12
3-1 研究目的及び目標	
3-2 実験方法	
3-3 研究成果	
第4章 開発工具における工具変形と応力のシミュレーション解析	21
4-1 研究目的及び目標	
4-2 解析における設定条件	
4-3 結果	
4-4 結論	
第5章 穿孔装置の開発および穿孔データ収集	27
5-1 研究目的及び目標	
5-2 実施内容および結果	
5-3 研究成果	
第6章 ドリル加工における切りくず生成機構の解析	44
6-1 研究目的及び目標	
6-2 実験方法	
6-3 研究成果	
第7章 ラマン散乱を用いたドリル穴周辺の損傷評価	48
7-1 研究目的及び目標	
7-2 実施内容および結果	
7-3 研究成果	
第8章 吸塵装置の開発および吸塵データ収集	53
8-1 研究目的及び目標	
8-2 実施内容および結果	
8-3 研究成果	
第9章 穿孔ロボットに関する調査	57
9-1 研究目的及び目標	
9-2 実施内容および結果	
9-3 研究成果	
第10章 全体総括	58
10-1 成果の総括	
10-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況	
10-3 今後の事業化に向けた取組み	

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

次世代航空機には軽量化による燃費向上を目的にCFRPが使用されるが、このCFRPと他部材との接合にはリベット接合しかなく、CFRPの穴あけ加工が必要不可欠である。しかし、CFRPは炭素繊維の引張り強度が高く、それを布状にする際の織り込み密度も高いため、穿孔加工が難しい材料であり、穿孔工具（ドリル）の寿命が短いこと、その切れ味が悪化すると積層炭素繊維の剥離、仕上げ面のケバ立ちが発生する。表面性状の悪化や加工表面の変質層は材料の強度不足などの原因となり、航空機では致命的な問題となる。

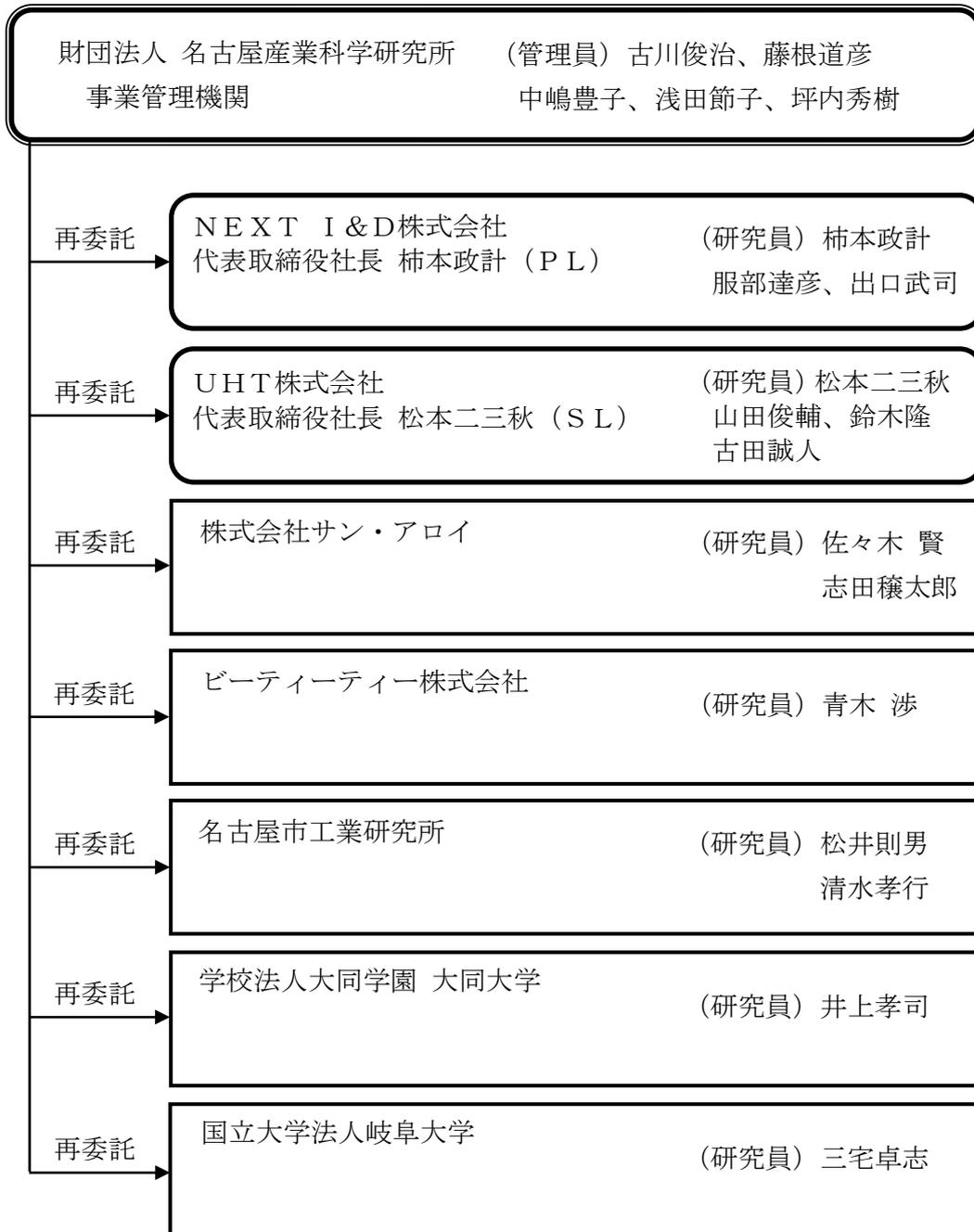
また、穿孔の際、従来の技術では切削体積のおよそ10倍にもおよぶ雲状の粉塵が発生し、作業環境を悪化させている。作業者の健康問題や電気機器の防爆対策の必要性が指摘されている。

これら問題を解決するため、本研究開発では芯部が中空の新規形状ドリルの開発、ドリル先端に冷気を送気するとともに、切削した粉塵を吸引・捕集することが出来る回転軸が中空のモータを備えた穿孔装置並びに粉塵捕集装置の開発を行い、CFRPの革新的穿孔加工システムを創造すること目的としている。

本研究開発の技術的目標値は以下のとおりとする。

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">(1) 最大穿孔数：1000孔／本(2) 加工形状精度誤差：ドリル径 +0.07 (mm) 以下(3) 最大切削速度：200 (mm/min) 以上(4) 切りくず捕集率：生成切りくず99%以上（粉塵捕集径3μmを可能とする）(5) リベット面取り用ドリル工具の開発 |
|---|

1 - 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）



1-3 成果概要

1-3-1 工具材質の高度化および超硬合金成形体の評価

従来、切削工具用超硬合金には、平均粒径 $1\mu\text{m}$ ($0.5\sim 1.5\mu\text{m}$)のWC (炭化タングステン)粉末を用いてきたが、それより微細な平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 以下のWC粉末を用いることにより、耐摩耗性や刃立ち性を向上させることを目指し、その材料特性として、硬さHRA:92.0以上、抗折力:3.0GPa以上を目標とした。

成形方法は第2章に詳しく記述しておりここでは省略するが、Coを10%含む素材(S1002材)とCoを5%含む素材(S1101材)の2種類の焼結体を名古屋市工業研究所で評価した結果、何れも当初の目標を上回り、硬さと靱性を両立させた材料と判断出来る。

型番	密度 (g/cm^3)	硬さ (HRA)	抗折力 (GPa)
S1002	14.23	93.4	3.2
S1101	14.62	93.9	3.1

本研究開発で作製するドリル形状は、パイプ形状ドリル、刃先交換型ドリルおよび新たに開発することになった中空段付き形状ドリルと種々の形状のドリル用素材を提供する必要がある、後工程の負荷を減ずるために可能な限り最終製品の形状に近づける必要がある。金型の工夫や成形方法の検討により、夫々作製することが出来た。

刃先交換型ドリルは微振動プレス装置に原料粉末自動供給装置を新たに設け、原料充填→加圧成形→成形体抜出一連の工程を連続的に行えるようにした。

第3章で記載するが、平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 以下のWC粉末を用いた成形法の開発により、ドリル工具の刃先エッジ部を鋭利に研削加工出来ることも分かり、工具材質の高度化については、目的を達成することが出来たと評価する。

今後は原料粉末組成の最適化、成形体製造の歩留まり向上、量産化やコストダウンの検討など補完研究を実施し、実用化を目指す。

1-3-2 刃具の加工、研磨

CFRPの穿孔加工において大量に発生する切りくずをドリル工具内部より吸引出来る中空ドリル、刃先交換型ドリルおよび面取り用ドリルを開発し、試作品を製造することを目的とし、且つ、1-1に示した技術目標を達成出来る刃具を開発することを目標に本課題に取り組んだ。

株式会社サン・アロイで成形・焼結された素材をダイヤモンド砥石で、外周、溝および先端刃の研削を行い、刃先先端部を電子顕微鏡(SEM)で、1000~10000倍に拡大し、その刃先稜線を観察した。

WCの平均粒径 $1\mu\text{m}$ ($0.5\sim 1.5\mu\text{m}$)の素材を研削した結果、刃先丸みは $2\sim 3\mu\text{m}$ であったが、平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 以下で作製した素材では、 $1\sim 2\mu\text{m}$ と鋭利さが

増す結果が得られ、粒径を微細にした効果を立証することが出来た。

更に電子線マイクロアナライザー（EDS）により、研削表面を観察した結果、研削条件（特に研削速度）の違いで、WC、Coなどの表面濃度が変化することを見出した。表面のWC濃度がより高くなる方向で、研削速度、研削移動方向などの条件を改善することにより、また使用が難しいダイヤモンド砥石#1000（ダイヤ粒径10 μ m）を用いることで、刃先丸みが0.5 μ mと極めて鋭利な刃先が得られた。

CFRP材用で、切りくずの吸引が可能な、パイプ形状ドリル、中空段付ドリル、刃先交換型ドリル、中空面取りドリル更にはPCD/cBNのチップを搭載したパイプ形状ドリル、中空段付ドリルを夫々開発し、試作品を製造した。

1-1項（5）の技術目標に示したリベット面取り用ドリル工具の開発も製作出来ており、切りくずの吸塵も可能である。

ハードルの高かった最大穿孔数：1000孔/本の目標も刃先交換型ドリルにPCDコーティングを施すことにより達成出来ている。

1-3-3 開発工具における工具変形と応力のシミュレーション解析

偏心中空形状工具における切削抵抗（スラスト荷重・ラジアル荷重）が及ぼす工具変形と切れ刃に作用する応力状態と変形状態をシミュレーション解析し、開発工具形状の妥当性について評価した。

パイプ形状ドリルの偏芯量、切り刃高さにより、応力や工具の変形度合いに影響を及ぼすことが示された。

1-3-4 穿孔装置の開発および穿孔データ収集

回転軸が中空のモータ、送り機構を備え、ドリル回転数、加工速度等の各種加工条件を制御可能な穿孔装置を開発し、且つ第7章に記載する吸塵装置と合わせて、1-1に掲げた技術目標を達成することを目的とした。

出力100Wおよび300Wの標準タイプ（回転数 \sim 5,000rpm）と出力200Wの高速タイプ（回転数10,000rpm以上）の中空モータを製作した。

中空モータ、送り機構および冷却用のエア吹き込み口、吸塵のための吸引口を備えた穿孔装置、各種条件設定が可能なコントローラ（ドリル回転数、加工速度、吸塵・冷却エアとの連動が可能）を設計、製作した。

穿孔試験は連続的に穿孔加工が可能なテスト架台を製作し、簡易なクリーンブース内で、穿孔装置に吸塵装置をつけて実施した。

詳細は第5章、第8章に記載したが、全ての技術目標を達成することが出来、画期的な成果を上げることが出来た。

最も苦労したのは、最大穿孔数：1000孔/本の目標であり、現状市販されているドリルと同様、数十穴でバリが出る状況が続いたが、その中で比較的安定した穿孔性能を示した刃先交換型ドリルの表面にPCDコーティングを施したところ、格段に耐摩耗性が向上し、1000孔/本の目標の目標を達成することが出来た。

加工形状精度誤差：ドリル径 $+0.07$ （mm）以下および最大切削速度：200

(mm/min) 以上の目標も達成している。

1-3-5 ドリル加工における切りくず生成機構の解析

パイプ形状型ドリルは中空偏芯形状の切削工具であり、この工具により生成される切りくずは汎用型ストレートシャンクドリル工具とは異なる形状となることが考えられる。切りくずの捕集率を高めるための基礎データとして、切りくず形状、寸法を的確に把握することが必要である。

パイプ形状型ドリルでの切りくずは総じて長い形状のものが多いのに対して、ストレートシャンクドリルの形状は細かく、短い形状のものが多かった。

その寸法の度数分布を画像解析により調べ、パイプ形状型ドリルでの切りくずの寸法は1.25~2.5 μ mのものが多く、ストレートシャンクドリルでは、0.5 μ m以下のものが多かった。

1-3-6 ラマン散乱を用いたドリル穴周辺の損傷評価

CFRPのドリル加工においては、ドリルの劣化などによりバリやむしれなど目視可能な巨視的な損傷が発生し、その有無が評価指標として用いられている。しかし、その巨視的な損傷の前に、炭素繊維とマトリックス樹脂の剥離など微視的な損傷が発生するはずであり、その損傷を定量的に評価できればより精密な評価が可能である。

そのため樹脂中に埋め込まれている炭素繊維のラマン散乱光の測定が可能な透明で光透過性の良いマトリックス樹脂を選定し、それを用いた試験用CFRPを作製した。顕微ラマン分光法で、炭素繊維が応力を受け変形することにより、結合エネルギーが変化するため、散乱光のスペクトルのピークがそれに応じてシフトするという原理を利用して、穿孔穴周辺の炭素繊維に発生する応力分布を測定し、負荷を掛ける前と後の繊維応力の発生状況から繊維/マトリックス間の剥離などの加工損傷を評価した。

この測定法により微視的な加工損傷を定量的に評価出来る可能性が示された。

1-3-7 吸塵装置の開発および吸塵データ収集

CFRPの穿孔作業においては、生成した切りくずが作業環境を悪化させ、作業者の健康問題や電気機器の防爆対策の必要性が指摘されるなど大きな問題となっている。

その為、第5章に記載する穿孔システムの開発と合わせて、サイクロン方式の吸塵装置に高性能のフィルタを設置し、粒径3 μ m以下の微細粉塵を効率良く捕集出来る吸塵システムを開発した。生成切りくずの捕集率99%以上を目標とする。吸塵の試験は簡易なクリーンブースの中で、パーティクルカウンタにて環境データを測定しながら、また高速度カメラにて粉塵の飛散状況を確認しながら、一連の穿孔作業を行うことにより吸塵データを収集した。この吸塵システムでは、クリーンブース内の環境データがクラス1,000付近で安定した状態から吸塵機をON、穿孔作業を2時間近く継続しても、クラス1,000付近で安定した状態で推移することが分かり、また切りくず捕集率も加工前と後の材料の重量差と粉塵捕集量を測定し、目標を上回る99.5%の捕集率が達成出来ている。そのシステムを利用することにより、作業環境への影響は大幅に改善

できることが検証できた。

1-3-8 穿孔ロボットに関する調査

平面あるいは曲面の穿孔に対応可能なロボットを開発するに当たっては、実際の航空機製造現場の情勢を知る必要があるが、航空機製造現場に立ち入る事は非常に難しい。その為、主に加工機（穿孔装置）メーカー等のウェブサイトから情報を得るべく、インターネット上で、また公開されている特許情報から、装置開発の方向性を検討した。

その結果、翼の加工、胴体の加工、胴体の結合、フラップ・ハッチ等の小部品等に分類される各加工部位において、既に独自の自動化装置が使用されている事が判った。

当研究開発の穿孔装置は集塵問題に着目した点において優れており、集塵効率に関しては当初目標を超える99.5%以上を達成する事ができた。その小型軽量の装置の特長から考えると、翼・胴体等の大型部品に対応する穿孔装置への適用は優位性が低いと思われる。むしろより小型な、例えば可動範囲が数m程度の多関節ロボット用の穿孔専用エンドエフェクターとして、先進各社と共同開発をする事で、小型軽量・高集塵効率等の性能を発揮して航空機製造業界に貢献できると考えられる。

また、多元的曲面を持つ加工部位に対して、独自の構想に基づいて研究中的の面直位置合わせ機構を完成させる事が出来れば、ロボットメーカーを問わず搭載可能になり、航空機業界はもとより、今後CFRPの導入が想定される自動車業界にも参入出来る。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人名古屋産業科学研究所 中部ハイテクセンター

産学連携支援部門 担当部長 古川 俊治

TEL: 052-223-5694 FAX: 052-211-6224

E-mail: furukawa@nisri.jp

第2章 工具材質の高度化および超硬合金焼結体の評価

2-1 研究目的及び目標

従来、切削工具用超硬合金に用いられるWC（炭化タングステン）の平均粒子径は $0.5\mu\text{m}$ ～ $1.5\mu\text{m}$ が使用されるが、耐摩耗性や刃立ち性を向上させるためには、平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ 以下（WC02材）のWC粉末を用いて、硬さと靱性を向上させる必要がある。研磨加工時のチッピングや割れ等を考慮すると材料特性としては『硬さHRA 92.0以上、抗折力 3.0GPa 以上』が必要となる。

一方、工具素材の作製にあたっては、後工程の負荷を減ずるために可能な限り最終製品の形状に近づける必要がある。本研究で作製するドリル形状は、パイプ形状ドリル、刃先交換型ドリルの2種に大別される。それぞれの超硬合金成形体（ドリル素材）におけるニアネット成形技術を確立する。

2-2 実験方法

2-2-1 超硬合金成形体（パイプ形状ドリル素材）の作製

まず、粉末プレス金型を作製し、粉末プレス法を用いてパイプ形状成形体のニアネット成形を試みた。成形方法の概略を図201に示す。この手法では成形体を横方法から加圧し、内部に任意の形状の内径ピンを配することでパイプ形状の成形体を得ることが出来る。

次に、自動化、省力化を実現するため、DRY-CIP（乾式等方加圧）法による成形を試みた。本手法は図202の概略図に示す通り、内径ピンを配したゴム型内部に原料粉末を封入し、圧力容器内で加圧、成形するものである。本研究では、先に各所寸法に余裕を持たせたCIP型（パイプ形状1）を作製し、試作品を焼結した。この試作品の寸法測定を実施し、目的の寸法が得られるようCIP型（パイプ形状2）を再設計した。

使用する原料粉末は所定の組成に調合し、且つプレス時の潤滑性、保形性を向上させるためにパラフィンワックスを適量添加した。また金型への充填性を改善するために造粒装置にて造粒して用いた。

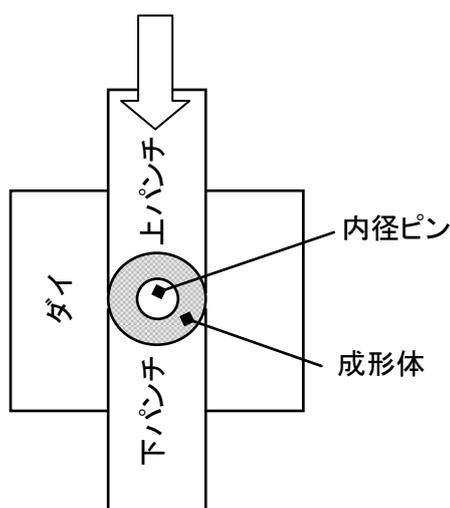


図201 パイプ形状ドリル素材の金型
プレス方法の概略

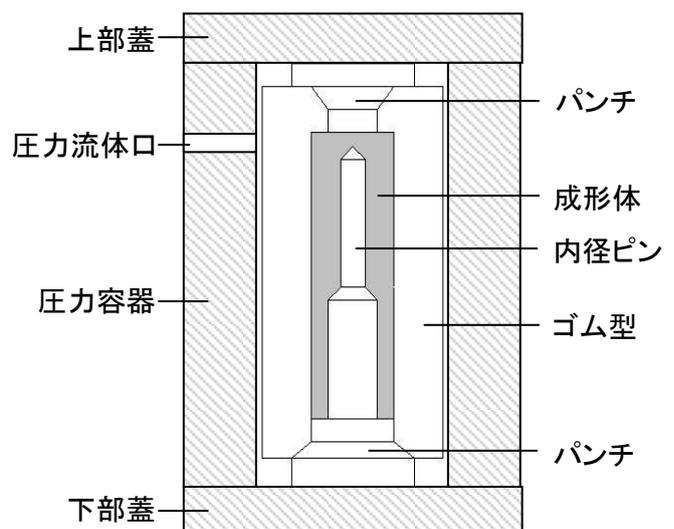


図202 DRY-CIP法の概略

2-2-2 超合金成形体（刃先交換型ドリル素材）の作製

刃先交換型ドリル素材は、粉末プレス法にて一発成形し、素材の焼結前に切削や穿孔等の機械加工は行わない。成形方法の概略図を図203に示す。また、量産化を考慮し、成形機に原料粉末自動供給装置を新たに設け、原料充填→加圧成形→成形体抜出までの一連の工程を連続して行えるようにした。

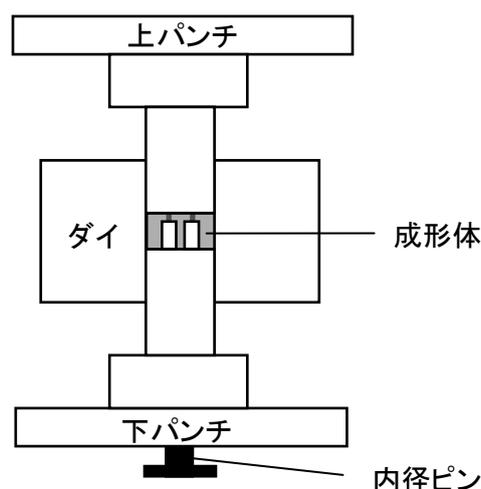


図203 刃先交換型ドリル素材のプレス方法

2-2-3 超合金焼結体の作製

焼結体は成形体を真空焼結炉で焼結して作製した。なお、前述の通り開発材は0.2 μ mの超々微粒合金であるため、焼結体中に気孔（空孔）を生じる可能性がある。真空焼結後にHIP（熱間等方加圧）処理を行い気孔を消滅させた。

2-2-4 密度測定

試験片には、平均粒径0.2 μ m以下のWC粉末（WC02材）を用いた開発材であるS1002材（10%Co（コバルト））ならびにS1101材（5%Co）を作製した。ベンチマーク材として平均粒径0.5~1.5 μ mのRD20材（9%Co）およびFD25材（14%Co）を使用した。

各型番とも、試料数は2個である。便宜上、S1002材を試料AおよびB、S1101材を試料CおよびD、RD20材を試料EおよびF、そしてFD25材を試料GおよびHとした。

まず、自動研磨装置を使用して、直方体形状をした超合金焼結体の全表面を、鏡面まで研磨した。次に、精密電子天秤に簡易型密度測定装置を装着して、アルキメデス法にて、超合金焼結体の密度を測定した。1試料につき3回計測し、その平均値を密度とした。

2-2-4 硬さ試験

試験機は、ロックウェル硬さ試験機を用いた。試験条件として、ダイヤモンド製円錐形状の圧子を使用し、荷重は588N（60kgf）、荷重保持時間は15秒とした。硬さの表記はHRAになる。

硬さ測定の試験片には、上記の密度測定に使用した超合金焼結体を用いた。各試験片とも7点測定して、最大値と最小値の2点を削除した5点の平均値を硬度値とした。

2-2-5 抗折力試験

抗折力は超硬工具協会が定める『超硬合金の曲げ強さ（抗折力）試験方法（CIS 026-1983）』に準じ、4.0×8.0×25.0mmの試験片を作製し、スパン20mmで3点曲げ試験を実施した。

2-3 研究成果

2-3-1 超硬合金成形体（パイプ形状ドリル素材）の作製

金型を用いた粉末プレス法で作製した成形体（焼結後）の外観を図204に示す。本手法により、パイプ形状の成形体を作製可能であることがわかった。

次に、DRY-CIP法により試作した成形体（パイプ形状1）の外観を図205に示す。成形体はクラックや割れ等発生せず良好であり、所望の形状を得ることが出来た。パイプ形状2ではさらに製品の最終形状に近い形状の成形体の作製を狙い、上述のパイプ形状1の結果を設計に反映させた。パイプ形状2により作製した成形体を図206に示す。結果より、パイプ形状ドリル素材のニアネット成形、自動化実現が可能であることがわかった。



図204 成形体（焼結後）の外観



図205 パイプ形状1成形体の外観

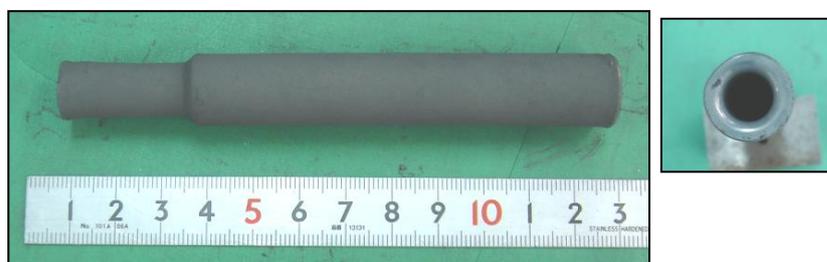


図206 パイプ形状2成形体の外観

2-3-2 超硬合金成形体（刃先交換型ドリル素材）の作製

粉末プレス法により作製した成形体の外観を図207に示す。本手法により、刃先交

換型ドリル素材のニアネット成形が可能となった。



図207 刃先交換型成形体（左）と焼結体（右）の外観

また、微振動プレス装置に原料粉末自動供給装置を組み込んだ状態が図208である。成形スピードは、組み込み前の20個/時間から40個/時間となり、生産性を2倍に上げることができ半自動化を達成した。

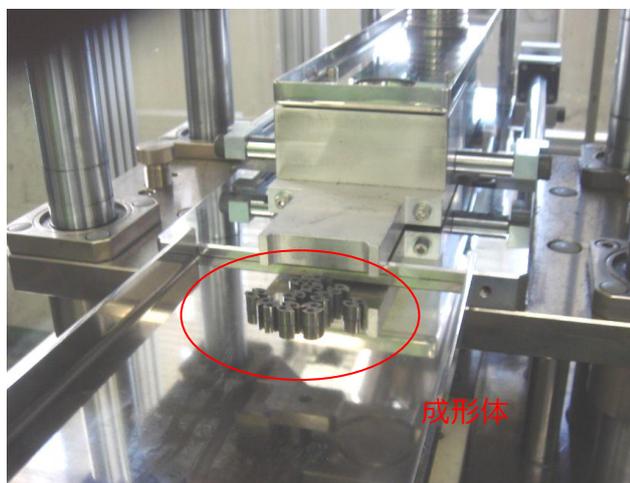


図208 粉末自動供給装置を用いたプレスの様子

2-3-3 密度測定

各型番とも2個の試料に大きな差異は認められず、ほぼ均質な焼結体が作製できた。具体的には、S1002材が 14.23 g/cm^3 、S1101材が 14.62 g/cm^3 、RD20材が 14.79 g/cm^3 およびFD25材が 13.89 g/cm^3 である。同じ超硬合金でも、型番により密度に重軽差が生じているのは、素材を構成する組成成分の割合が異なるためである。

この組成成分単体の密度と含有割合から算出した理論真密度と、今回測定した実測密度がほぼ一致したため、各型番の焼結体内部には気孔（空孔）は存在しないと推察される。

2-3-4 硬さ試験

硬さ試験の結果は、S1002材がHRA 93.4、S1101材がHRA 93.9、RD20材がHRA 91.7およびFD25材がHRA 92.2である。上記の密度の傾向と硬さの傾向とは一致しないが、

これは使用されたWCの粒子径の差、並びに添加炭化物の差により、焼結後のWC粒子径に違いが生じるためである。密度と硬度の結果から、4材種ともに切削工具に適した材料と言える。

2-3-5 抗折力試験（3点曲げ試験）

抗折力試験結果は、S1002材が3.2GPa、S1002材が3.1GPa、RD20材が3.1GPaおよびFD25材が3.9GPaである。何れの材料についても目標値の3.0GPaを上回っていることが確認された。

特に、本事業での開発材であるS1002材、S1101材は硬さが高く、抗折力も他の材料と同等であり、硬さと靱性を両立させた材料と判断できる。

2-3-6 工具材質の高度化及び超硬合金焼結体の評価の成果

1. 平均粒径0.2 μ m以下のWC粉末を用いた2種の超硬合金焼結体を開発し、S1002材では硬度はHRA 93.4、抗折力は3.2GPaを示し、S1101材では硬度はHRA 93.9、抗折力は3.1GPaを示した。
2. パイプ形状ドリル素材（中空段付きドリルD-001型～D-003型）の、金型とDRY-CIP法によるニアネット成形方法を開発し、試作品を製造した。
3. 刃先交換型ドリル素材のニアネット成形方法を開発し、試作品を製造した。
4. 刃先交換型ドリル素材の量産化と作業の省人化のために原料粉末自動供給装置を新たに設計、製作し半自動運転を実現した。

第3章 刃具の加工、研磨

3-1 研究目的及び目標

3-1-1 研究目的

CFRPの穿孔加工において大量に発生する切りくずをドリル工具内部より吸引出来る中空ドリルの形状開発、及び冷気を外部注入できる事で切れ刃先端部周辺の温度上昇を抑制でき、排気穴を活用して粉塵の吸引捕集も行える刃先交換型ドリル工具の試作品を製造する。さらに吸引型面取り専用工具を開発し試作品を製造する。

3-1-2 研究目標

粉塵が吸引可能な高精度で長寿命な新形状のドリルを開発する。技術目標は最大穿孔数1000孔/本、加工形状精度誤差：ドリル径 +0.07 (mm) 以下、切りくず捕集率：生成切りくず99%以上（粉塵捕集径3 μ mを可能とする）。以上の目標が達成できる刃具を開発する。

3-2 実験方法

3-2-1 切れ刃先稜線の解析

CFRP材の穿孔加工では切削時の発熱により結合層である樹脂が昇華（気化）するため分断され微細化した炭素繊維は切削体積（穴体積）の数十倍に膨張し、加工部近傍から空气中に散乱する。切削抵抗が大きいほど発熱が高くなる事は過去の実験により明らかにされている。本実験では切削抵抗の大きさを左右する因子が切削工具の刃先丸みにあると考えられるため、工具材質の違いによる切れ刃稜線部の鋭利さを解析した。

実験方法は成形したパイプ形状ドリル工具の刃先稜線部分を電子顕微鏡（SEM）により1000倍～10000倍に拡大し、その形状を観察、刃先丸みを測定した。

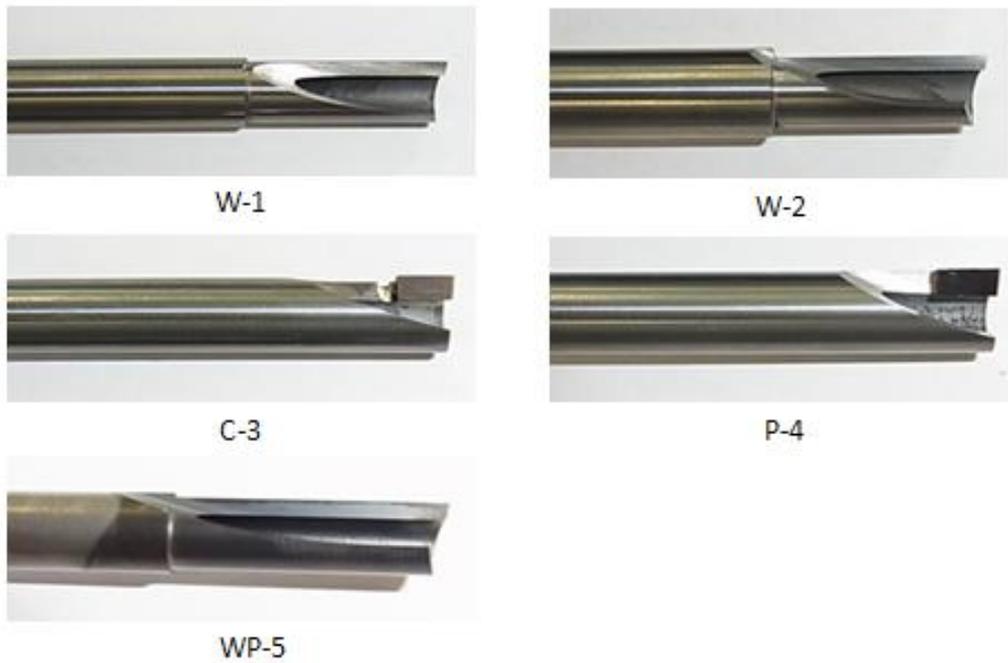
更に電子線マイクロアナライザー（EDS）により、表面を観察、工具材料の刃先表面の定性分析し研削条件の違いによるWCとCoなどの析出状態を明らかにした。

実験 1-1 切れ刃先稜線の解析用、パイプ形状ドリル工具の試作

共同研究者のサンアロイ社で焼結製造された素材（パイプ形状）をダイヤモンド砥石で外周、溝及び先端刃の成型研削を行った。

試作した工具は5種類で以下にその種類と写真を示す。

1. 試作工具① WC（超硬）－WC粒径1 μ m/10wt%Co－#600仕上－写真W-1
2. 試作工具② WC（超硬）－WC粒径0.2 μ m/10wt%Co－#1000仕上－写真W-2
3. 試作工具③ cBN（立方晶窒化ホウ素）－cBN粒径1 μ m－写真C-3
4. 試作工具④ PCD（多結晶ダイヤモンド）－PCD粒径1 μ m－写真P-4
5. 試作工具⑤ WC（超硬）－WC粒径0.2 μ m/5wt%Co+PCDコート－写真WP-5



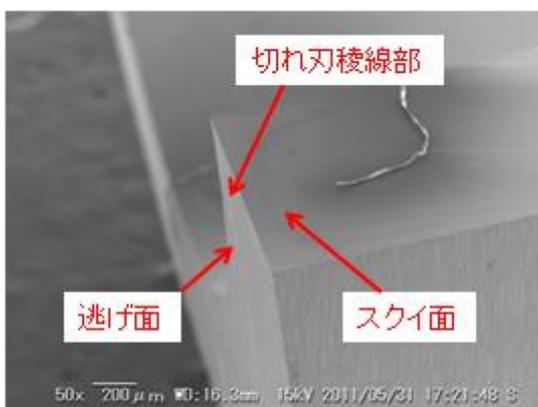
実験 1-2 解析用試作ドリルの電子顕微鏡 (SEM) による切れ刃先稜線部の解析

1. 試作工具① WC (超硬) - WC 粒径 $1\mu\text{m}$ / 10wt% Co - #600 仕上

写真①-A、①-Cは主原料のWC (平均粒径 $1\mu\text{m}$) と結合剤のCo (重量比 10%) で構成され、ダイヤモンド砥粒#600 で研削した超硬工具の切れ刃稜線部である。この材料は現在、CFRP切削用の超硬工具に多く使用されている。

①-Aはパイプ形状ドリルの切れ刃稜線部を 50 倍に拡大したもので図中に切れ刃を構成するスクイ面及び逃げ面を示す。

①-Cは 5000 倍に拡大した刃先である切れ刃稜線の丸みを数値化し表示した。本材料を使用した切れ刃稜線部の刃先丸みは $2\sim 3\mu\text{m}$ になっている。



①-A



①-C

2. 試作工具② WC（超硬）－WC粒径 0.2 μ m/10wt%Co－#1000 仕上

写真②－A、②－Cは主原料のWC（平均粒径 0.2 μ m）と結合剤のCo（重量比 10%）で構成され、ダイヤモンド砥粒#1000 で研削した超硬工具の切れ刃稜線部である。

②－Aはパイプ形状ドリルの切れ刃稜線部を 50 倍に拡大したもので図中に切れ刃を構成するスキイ面及び逃げ面を示す。

②－Cは 5000 倍に拡大した刃先である切れ刃稜線の丸みを数値化し表示した。本材料を使用した切れ刃稜線部の刃先丸みは 1～2 μ m になっている。WC 粒径が試作工具①の 1/5 になり研削砥石の粒径を試作工具①の 1/3 と小さくしたことで、刃先が試作工具①より鋭利化したものと思われる。



②－A



②－C

3. 試作工具③ cBN－cBN粒径 1 μ m

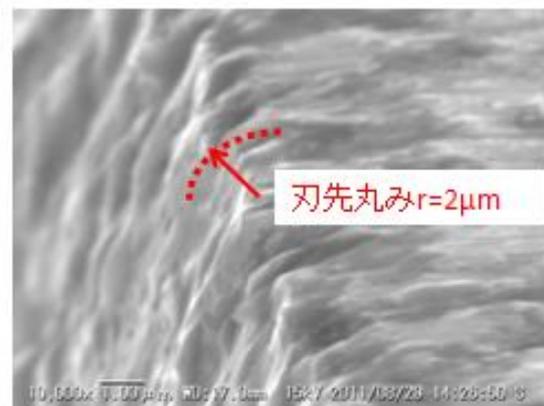
写真③－A、③－DはcBNを高温高压で焼結したチップの切れ刃稜線部である。

③－Aは切れ刃部を 50 倍に拡大したもので図中に切れ刃を構成するスキイ面及び逃げ面を示す。

③－Dは 10000 倍に拡大した写真、刃先の丸みを数値化し表示した。本材料を使用した切れ刃稜線部の刃先丸みは約 2 μ m になっている。稜線部に cBN 粒子が確認できる。



③－A



③－D

4. 試作工具④ PCD-PCD粒径 1 μ m

写真④-A、④-CはPCDを高温高压で焼結したチップの切れ刃稜線部である。

④-Aは切れ刃稜線部を50倍に拡大したもので、図中に切れ刃を構成するスクイ面及び逃げ面を示す。

④-Cは5000倍に拡大した切れ刃稜線である刃先の丸みを数値化し表示した。本材料を使用した切れ刃稜線部の刃先丸みは約3~4 μ mになっていた。



④-A



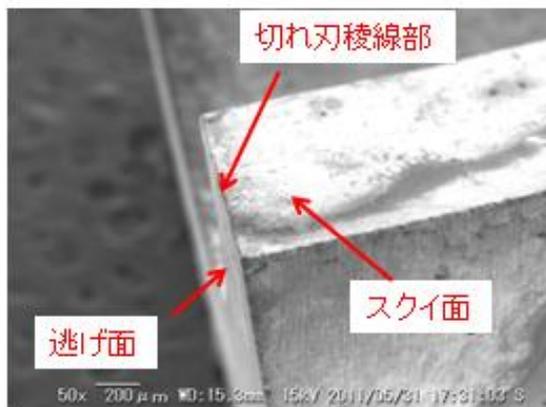
④-C

5. 試作工具⑤ WC (超硬) -WC粒径 0.2 μ m/5wt%Co +PCDコーティング

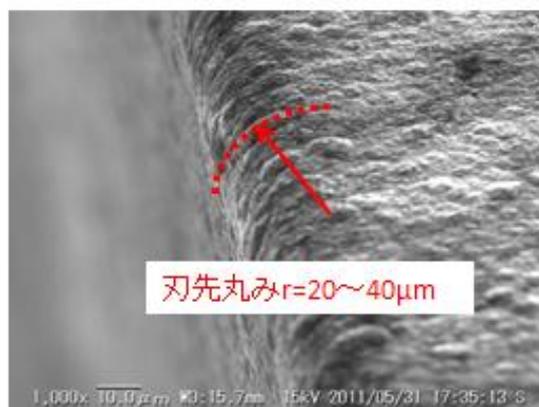
写真⑤-A、⑤-Bは主原料のWC (平均粒径 0.2 μ m) と結合剤のCo (重量比 5%) で構成された超硬工具にCVD法により多結晶ダイヤモンド (PCD) をコーティングした切れ刃稜線部である。

⑤-Aはパイプ形状ドリルの切れ刃稜線部を50倍に拡大したもので図中に切れ刃を構成するスクイ面及び逃げ面を示す。

⑤-Bは1000倍に拡大した切れ刃稜線である刃先の丸みを数値化し表示した。試作工具①や②と比較にならないほど刃先丸みが大きい。



⑤-A



⑤-B

実験 1 - 3 電子線マイクロアナライザー (EDS) による刃先部表面の定性、定量分析、
二次元元素マップ分析。

超硬工具材料 (WC) の刃先表面の構成元素を分析し、研削条件の違いによる WC と Co などの析出状態を観察した。EDS は試料から放出された構成元素の特性 X 線を Si 半導体検出器で検出し、アナライザーで捉えた特性 X 線を分別して構成元素毎のスペクトルとして表示する。スペクトルのエネルギー位置から定性分析を、特性 X 線の強度 (カウント数) から定量分析を行った。工具研削条件を変化させて製作した WC 超硬工具の刃先近傍を 5000 倍に拡大した SEM 画像を観察し任意に選んだ数カ所をそれぞれ、スペクトル 1 ~ 4 とし表面の元素分布状況を分析した。

工具研削条件

研削速度 5m/S, 10m/S, 15m/S, 20m/S

送り速度 0.01m/S

研削砥石 直径 100mm ダイヤ粒径 10 μ m

工具材質

試作工具 NO. ② WC (超硬) - WC 粒径 0.2 μ m/10wt%Co

図 3 - 1 に工具研削方法と測定箇所 S 1 ~ S 4 を示す。

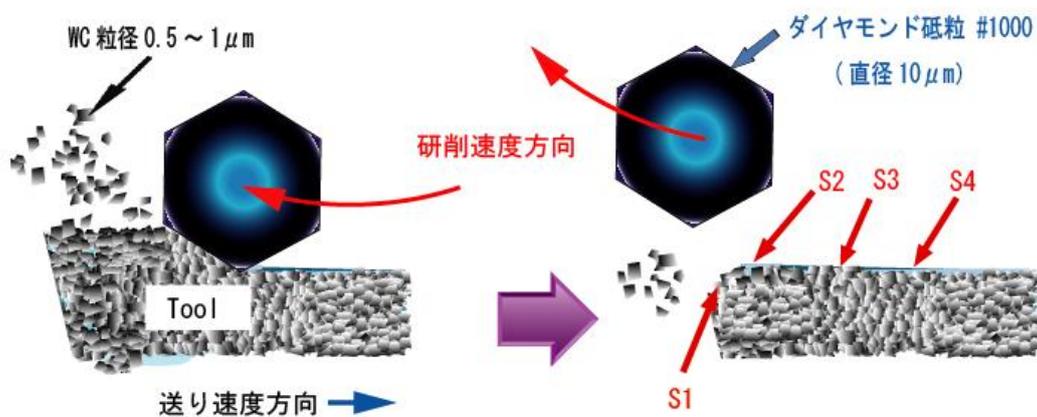


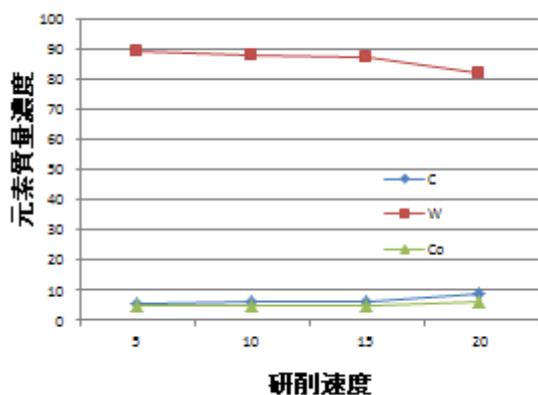
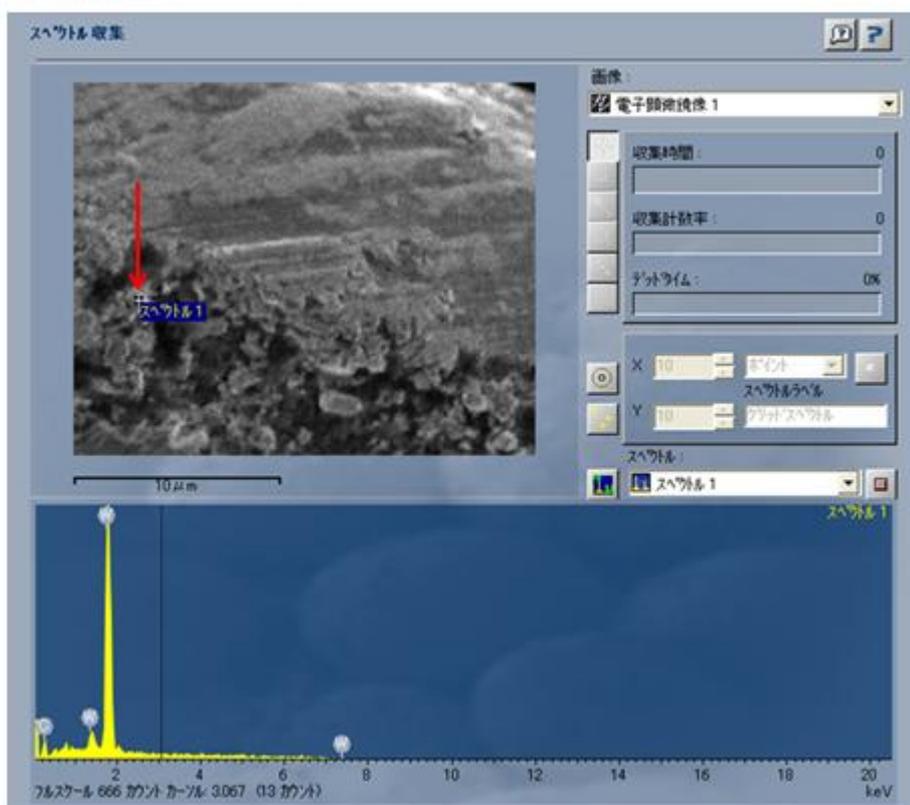
図 3 - 1

1. スペクトル 1 (S 1) - SEM 画像より切れ刃先端部の WC 粒子と思われる位置。
2. スペクトル 2 (S 2) - SEM 画像より刃先近傍の WC 粒子の粉砕固着と思われる部分。
3. スペクトル 3 (S 3) - SEM 画像より刃先近傍の白濁部分。
4. スペクトル 4 (S 4) - SEM 画像より平坦部の Co と思われる部分。

1. スペクトル1 (S1)

研削速度 5m/S で加工したS 1 部のW (タングステン) 質量濃度は 90%、原子数濃度 40%であり、研削速度を上げるほどW質量、原子数濃度ともに少なくなり研削速度 20m/S ではW質量濃度は 82%、原子数濃度 32% と減少した。一方、C o の質量濃度は 5%、原子数濃度 7% で研削速度を上げて質量、原子数共に変化はない。またこの部分のC (炭素) 質量濃度は 6%、原子数濃度は 44%と少なく研削速度に対する変化も少ない事から研削速度 10m/S 以下においてWCが安定している事が判った。

Spectrum 1



結果概要:

元素	質量濃度[%]	原子数濃度[%]
C	6.35 +/- 1.15	44.32
W	87.13 +/- 2.08	39.74
O	1.75 +/- 0.75	9.15
Co	4.78 +/- 1.78	6.79
トータル	100.00	100.00

研削速度 15 m/s の時の数値

2. スペクトル2 (S2)

研削速度 5m/S で加工した S 2 部の W 質量濃度は 82%、原子数濃度 32% であり、研削速度を上げるほど W 質量、原子数濃度ともに少なくなり研削速度 20m/S では W 質量濃度は 73%、原子数濃度 20% と減少した。一方、C o の質量濃度は 7%、原子数濃度 7% で研削速度を上げて質量、原子数共に変化はない。またこの部分の C 質量濃度は 11%、原子数濃度は 63% で研削速度が 20m/S では質量濃度が 15%、原子数濃度は 68% と増大していることから研削速度が 15m/S 以上で WC の変質が見られた。

3. スペクトル3 (S3)

研削速度 5m/S で加工した S 3 部の W 質量濃度は 79%、原子数濃度 30% であり、研削速度を変化させて研削速度 20m/S でも質量濃度は 77%、原子数濃度 26% と大きな変化は見られず。C o の質量濃度は 13%、原子数濃度 14% と多く、研削速度を速くしても質量、原子数共に大きな変化はない。この部分の C 質量濃度は 12%、原子数濃度は 61% で、研削速度が速くなっても大きな変化はない。

4. スペクトル4 (S4)

研削速度 5m/S で加工した S 4 部の W 質量濃度は 75%、原子数濃度 30% であり、研削速度を上げるほど W 質量、原子数濃度ともに少なくなり研削速度 20m/S では W 質量濃度は 68%、原子数濃度 20% と減少した。一方、C o の質量濃度は研削速度 20m/S で 16%、原子数濃度 20% と増加した。またこの部分の C 質量濃度も 13%、原子数濃度は 60% と多く刃先から数 μm 下がった部分は C o が多く検出された。

3-3 研究成果

3-3-1 切れ刃先稜線の解析による研究成果

研削条件と WC 粒径を改良した WC 切れ刃 - WC 粒径 $0.2\mu\text{m}/10\text{wt}\% \text{C o}$

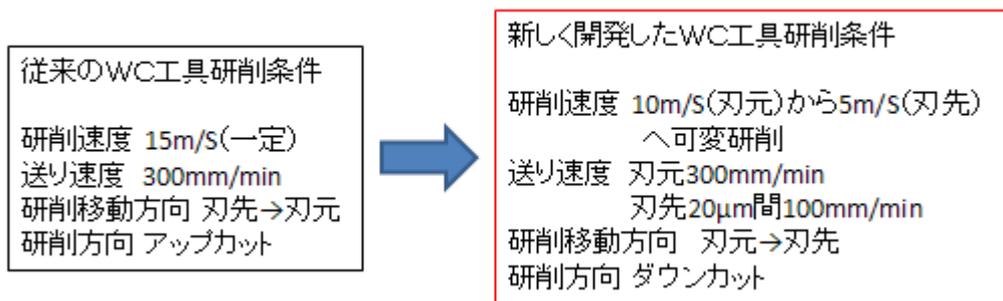
写真⑥-A、⑥-D は試作工具①及び②の主原料の WC (平均粒径 $1\mu\text{m}$) から WC 平均粒径 $0.2\mu\text{m}$ に改良した材料を、実験 1-1 ~ 1-3 の結果より考察した刃先研削条件で研削加工した切れ刃稜線部である。砥石の研削痕は消え、切れ刃稜線部は非常に鋭利になり、刃先丸みは $0.5\mu\text{m}$ 以下になった。



⑥-A



⑥-D



新しく見出した工具研削条件

3-3-2 切れ刃先稜線の解析のまとめ

実験1-1に於いて、試作工具①～⑤の筒状ドリル形状を実験1-2で刃先先端部を電子顕微鏡（SEM）により1000倍～10000倍に拡大しその形状を観察した。刃先丸みを測定した結果、試作工具②のWC粒径0.2μm/10wt%Co材料をダイヤモンド砥石#1000（ダイヤ粒径10μm）で仕上研削した試作工具の稜線部が一番鋭く、刃先丸みは1～2μmで砥石の研削痕は細かく鋭利化できている事がわかった。

実験1-3で電子線マイクロアナライザー（EDS）による刃先部分の分析により、刃先近傍に点在したWC元素とCo元素の質量濃度を検出し、粒形状と平坦部の元素質量濃度を明らかにした。更に刃先研削工程での研削速度の変化により、任意位置での各元素の析出状態の変化を明らかにした。

従来の超硬工具の研削加工において使用する砥石は通常の粒度は#280～#600であり、#1000のダイヤモンド砥粒で研削する場合、砥石の目詰まりや研削温度の上昇による稜線部のチッピングなど、多くの問題があり、最適研削条件を設定するのが非常に困難であった。

本実験の結果から超硬工具の刃先の鋭利化を可能できる最適研削条件、及び研削方法を開発し、刃先丸みを0.5μm以下に鋭利化できた。

3-3-3 CFRP材用、粉塵吸引が可能なドリル工具形状の開発

CFRPの粉塵が吸引可能な高精度で長寿命な新形状のドリル形状を開発した。工具素材は超硬(WC)及び刃先部にPCD(多結晶ダイヤモンド)やcBN(立方晶窒化ホウ素)などの素材を使用したドリルも考案した。

実験2 粉塵吸引が可能なドリルの設計と試作

① 中空段付ドリルの設計、製造

CFRP材の穿孔加工に於ける実用工具として穿孔部入り口の皿もみ加工を可能にしたドリルを2種、開発し製造した。

② PCD/cBNドリルの設計、製造

ドリル工具の長寿命化(対磨耗性)を目指し、開発したパイプ形状及び中空段付きドリルの切れ刃部にセラミック材料(PCD/cBN)を搭載した工具を考案し製造した。

③ 刃先交換型ドリルの設計と製造

超硬材料の使用量を少なくするため刃先交換型ドリルを設計、刃先形状を考案し、試作品を製造した。

④ 中空面取りドリルの開発と製造

CFRP穿孔加工後に使用する中空面取り工具を考案し試作した。

3-3-4 CFRP材用、粉塵吸引が可能なドリル工具形状の開発の成果

1. 中空段付ドリルD-001型、D-002型を開発、試作品を製造した。
2. PCD/cBNのチップを搭載したパイプ形状ドリルを考案し試作品を製造した。
3. PCD/cBNのチップを搭載した中空段付ドリルD-003型を考案し試作品を製造した。
4. 刃先交換型ドリルの刃先形状を考案し、試作品を製造した。
5. 中空面取りドリルを開発し試作品を製造した。

第4章 開発工具における工具変形と応力のシミュレーション解析

4-1 研究目的

偏心中空形状工具における切削抵抗（スラスト荷重・ラジアル荷重）が及ぼす工具変形と切れ刃に作用する応力状態と変形状態をシミュレーション解析し、開発工具形状の妥当性について評価する。

4-2 解析における設定条件

工具に発生する座屈を考慮しない。

切削抵抗は実機モデルを使い実測した数値を使用する。

4-2-1 工具形状

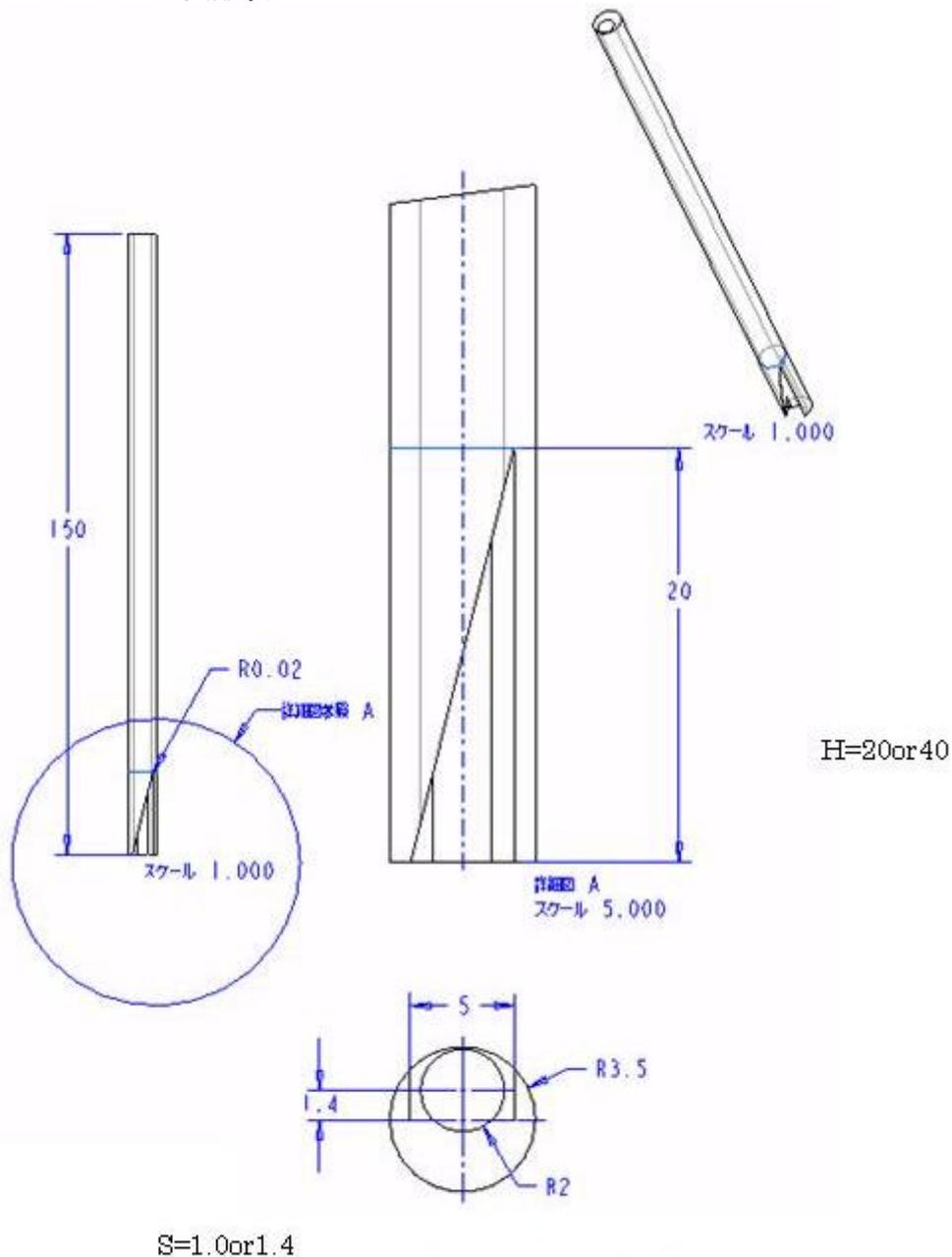


図401 工具形状詳細

切れ刃は三角形状で工具先端部に位置している

4-2-2 解析モデル仕様

1) 物性値：

- ・材料 SKH9
- ・ $E=2.19 \times 10^5$ MPa $\nu=0.28$

2) 拘束、荷重条件：

- 根元側を完全固定し、他端先端に(1)スラスト荷重 20N
- (2)ラジアル荷重 20or30Ncm(200or300Nmm)

3) 収束判定：P法解析ソフト Pro/Mechanica

最大変位収束 5%以内

4-2-3 工具形状パラメータ：

表 4 0 1 各パラメータ値(表内の記載は組み合わせを示していない)

	三角高さ H(mm)	偏芯量 S(mm)	スラスト荷重 F(N)	ラジアル荷重 T(Ncm)
パラメータ	20	1.0	20	20
	40	1.4		30

ここで単位を統一する為、Tを単位換算する。

$$T=20(\text{Ncm})=200(\text{Nmm}) \quad \text{AND} \quad T=300(\text{Nmm})$$

また、ラジアル荷重とスラスト荷重のモデルでの付加方向については、図 403-1 と 403-2 参照。

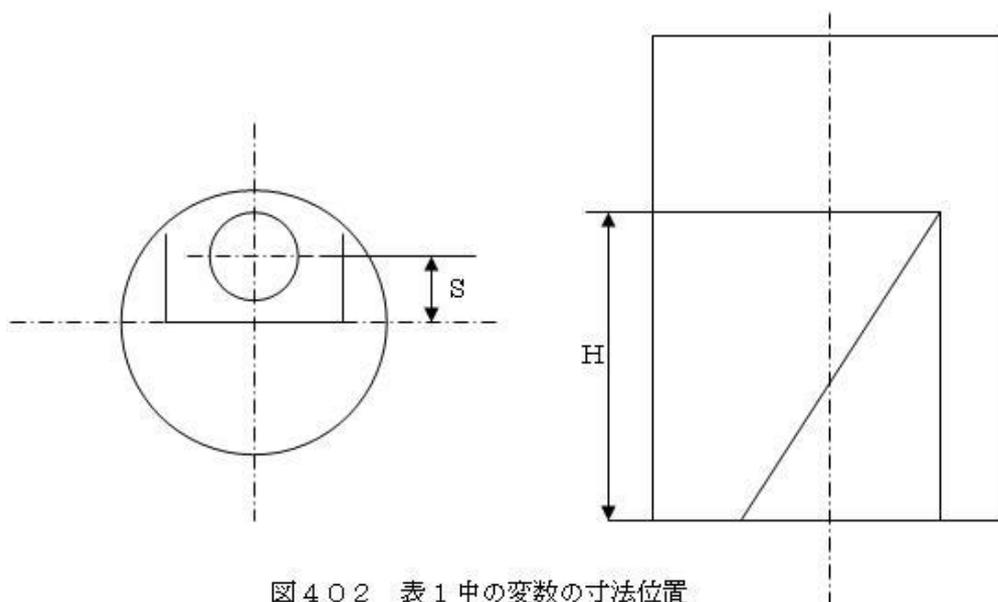


図 4 0 2 表 1 中の変数の寸法位置

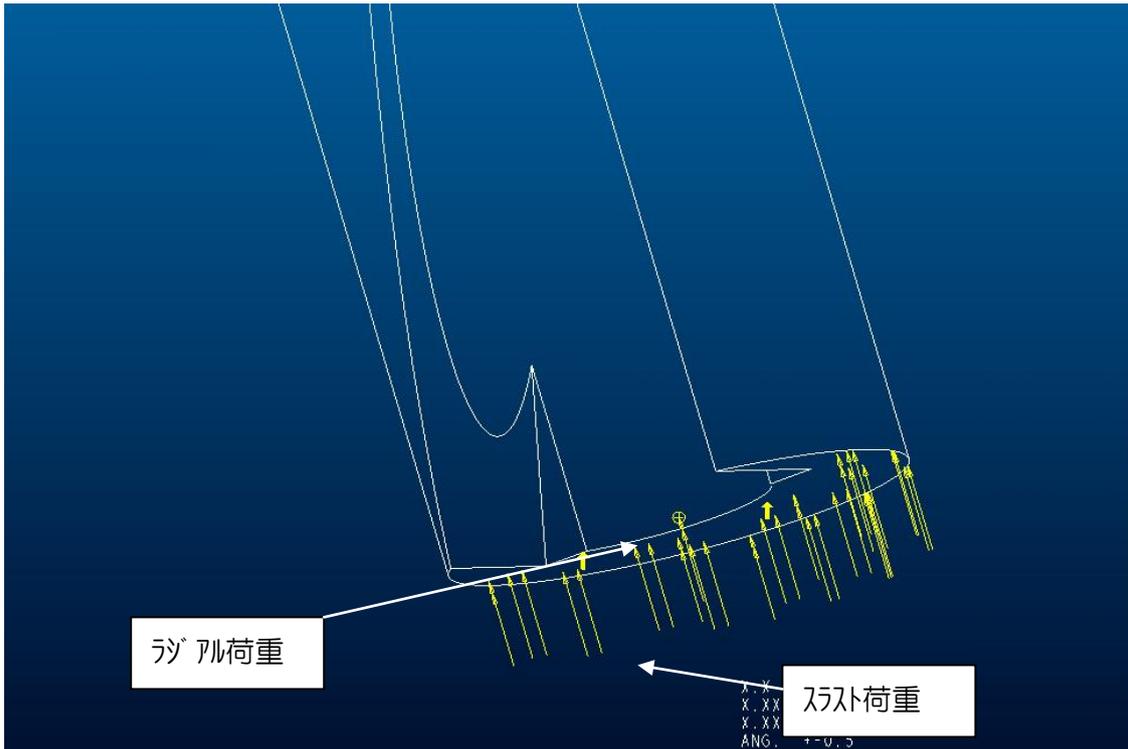
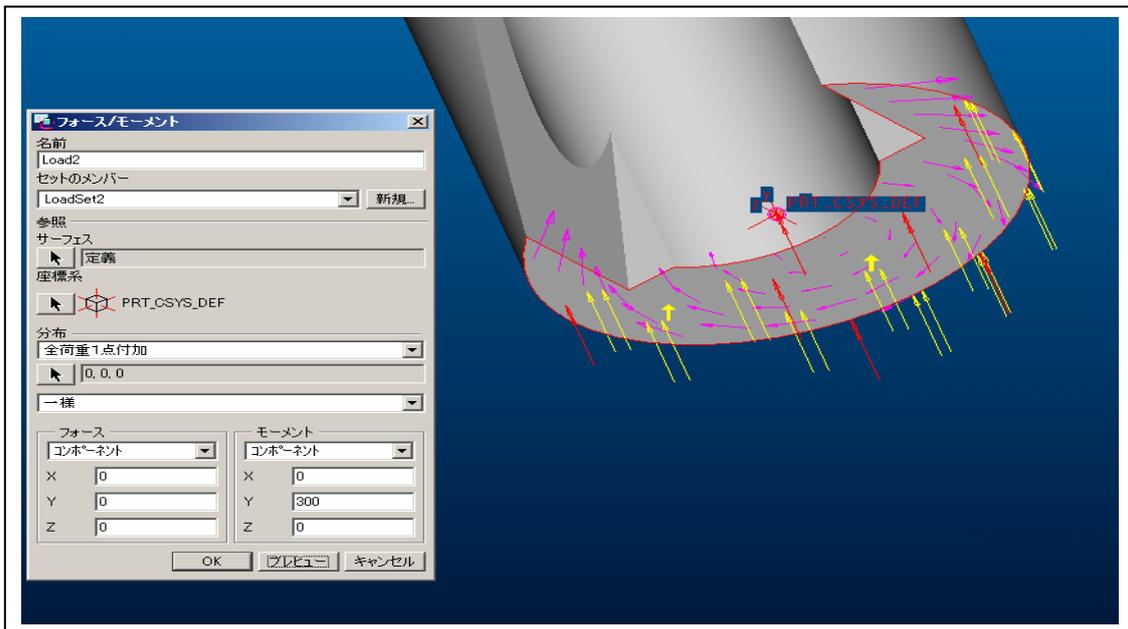


図 4 0 3-1 Pro/Mechanica モデル拘束条件と荷重条件。他端を完全拘束。
 下図刃先部は 2 重矢印：ラジアル荷重で座標中心への集中荷重。
 ただの矢印：スラスト荷重



尚、本解析では応力判断に脆性材料に使用される最大主応力を使用した。最大主応力図は応力図引張りと同時に圧縮応力もマイナス値で確認可能である事が挙げられる。

図 4 0 3-2 ラジアル荷重(トルク) ピンク色の円周方向矢印

4-3 結果

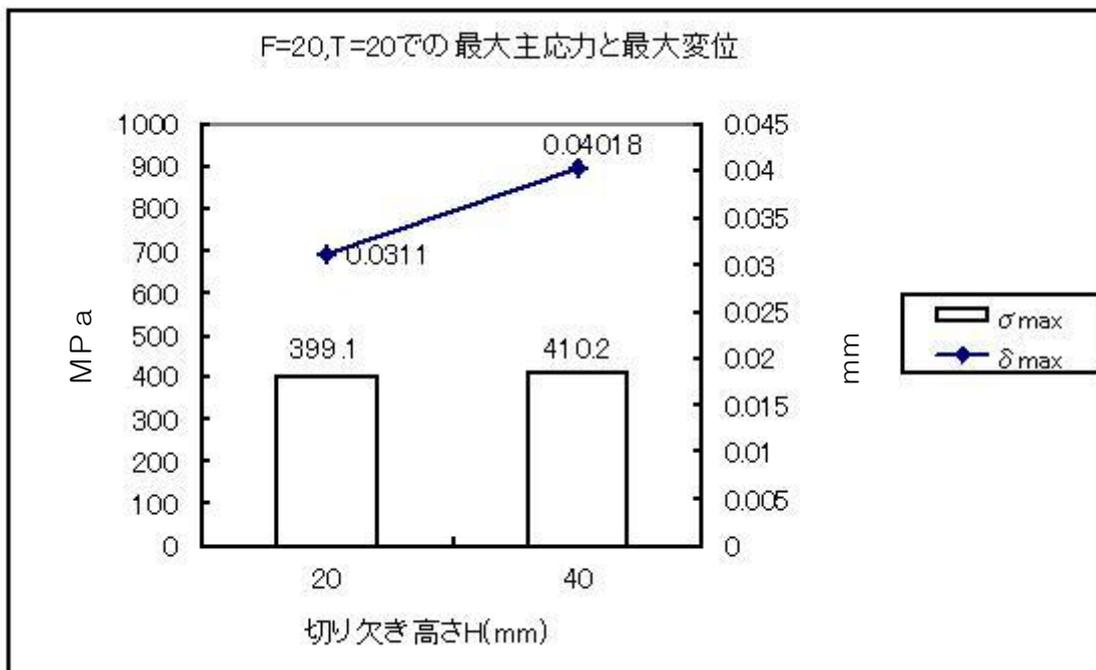


図404 S=1mm 低荷重条件での各切り欠き高さHでの応力と変位

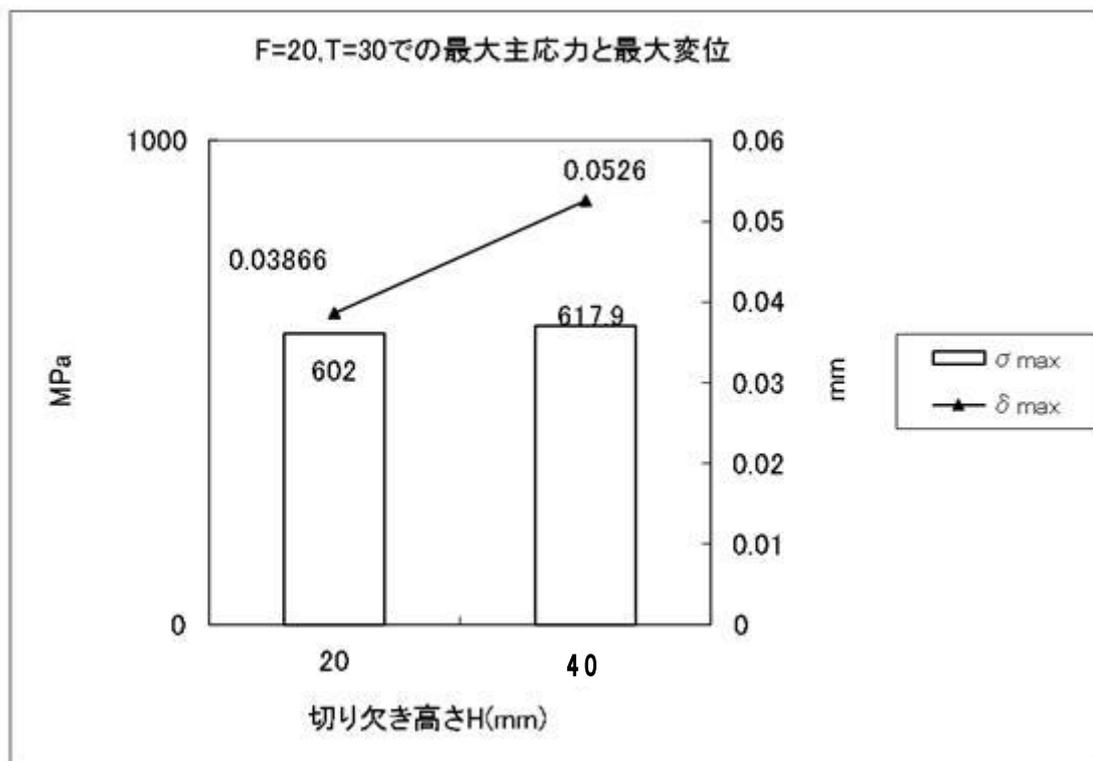


図405 S=1mm 高荷重条件での各切り欠き高さHでの応力と変位

表 404 低荷重時の応力比

F=20N	T=20Ncm	
Hmm	20	40
σ_{max}/E (%)	1.822E-3	1.87E-3

表 405 高荷重時の応力比

F=20N	T=30Ncm	
Hmm	20	40
σ_{max}/E (%)	2.74E-3	2.82E-3

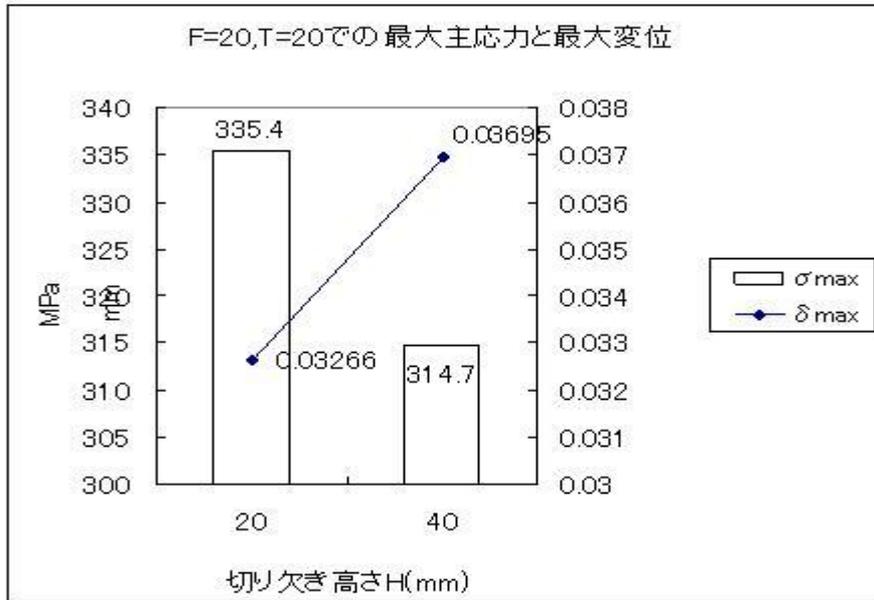


図 4 0 6 S=1.4mm 低荷重条件での各切り欠き高さ H での応力と変位

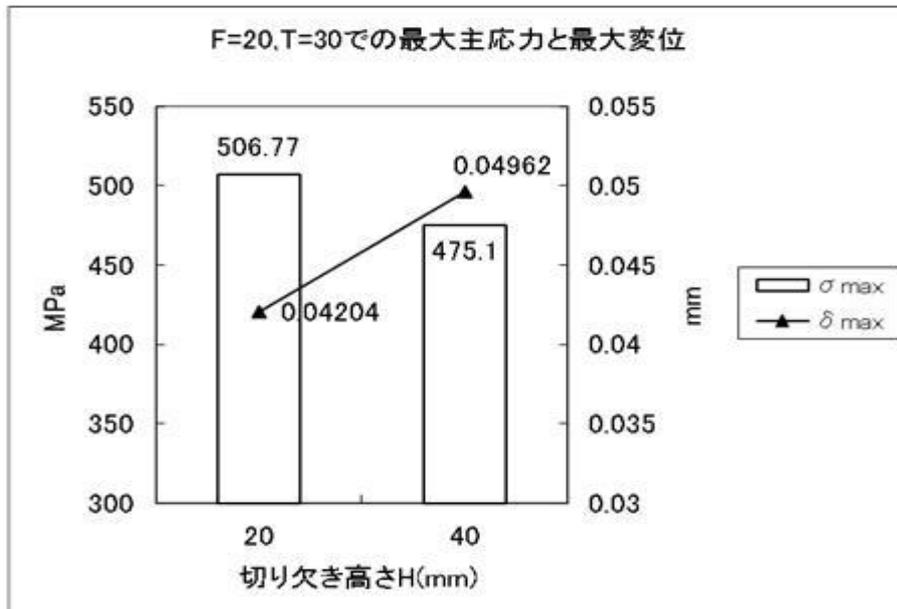


図 4 0 7 S=1.4mm 高荷重条件での各切り欠き高さ H での応力と変位

表 408 低荷重時の応力比

F=20N	T=20Ncm	
Hmm	20	40
σ_{max}/E (%)	2.75E-3	2.82E-3

表 409 高荷重時の応力比

F=20N	T=30Ncm	
Hmm	20	40
σ_{max}/E (%)	2.31E-3	2.17E-3

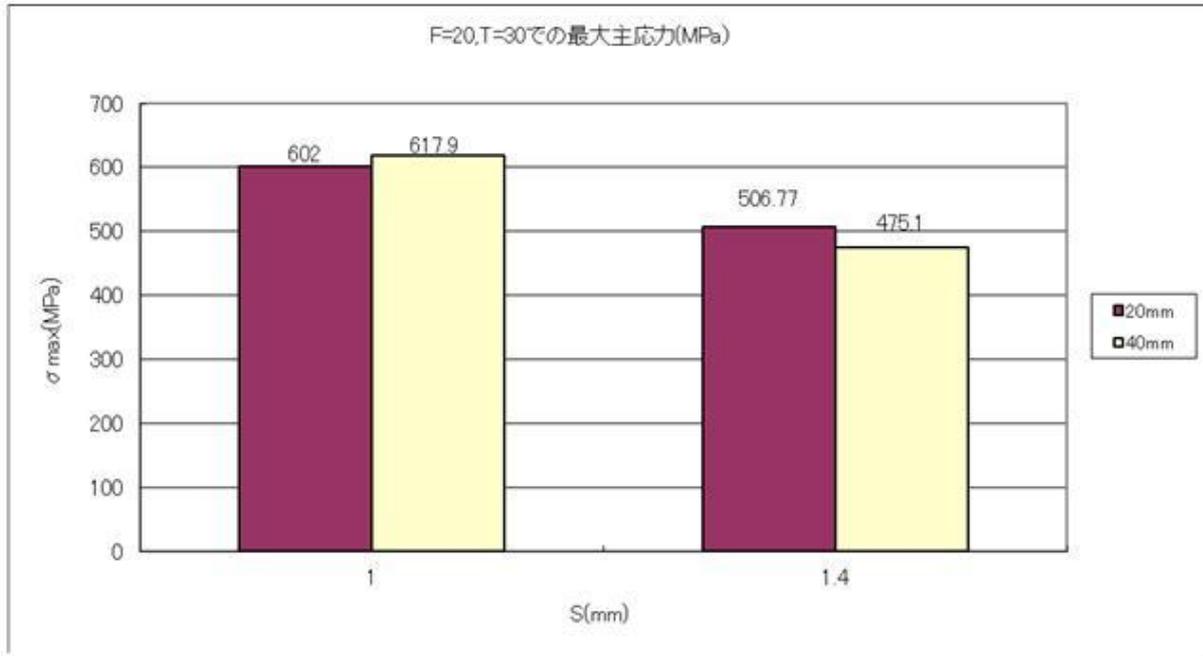


図 4 0 8 偏芯による最大応力比較

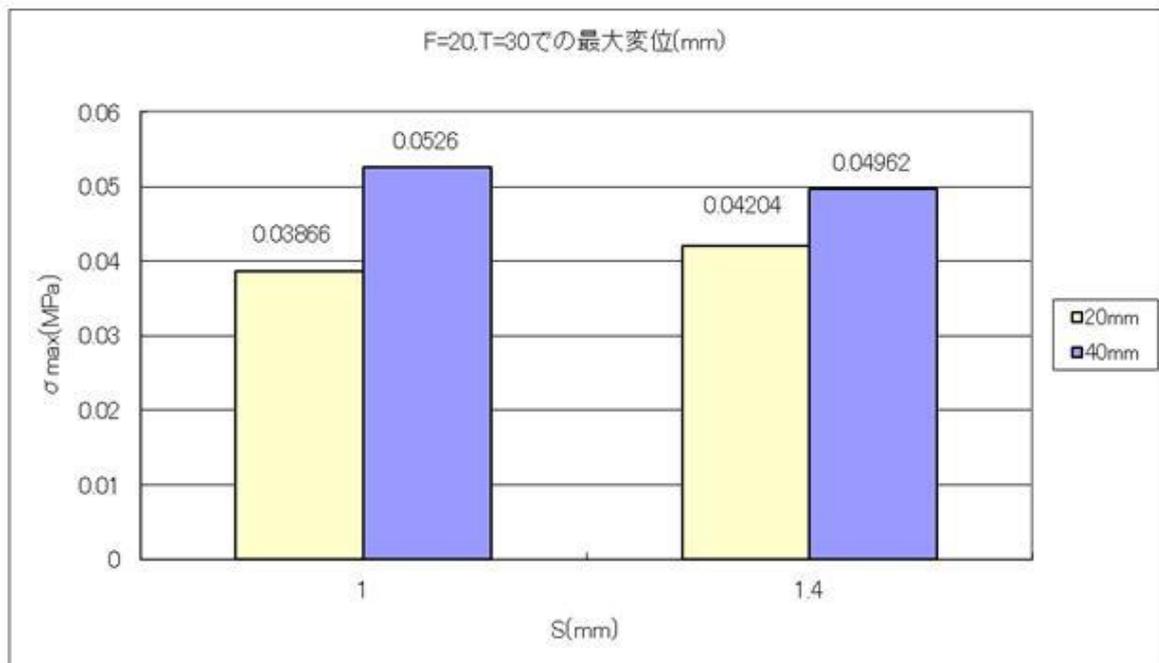


図 4 0 9 偏芯による最大変位比較

4-4 結論

- (1) 開発工具は加工時の捻り剛性に十分対応できる。
- (2) 中空の偏心量が大きく、トルク荷重が大きい場合、切れ刃部には変形が認められる。
- (3) 中空の偏心量(S)は工具外径に対して70%以内が良好な数値である。

第5章 穿孔装置の開発および穿孔データ収集

5-1 研究目的及び目標

芯部が中空の新規形状ドリルには、粉塵を吸引・捕集するための「パイプ形状型ドリル」、加工熱抑制のため冷気の送気が可能な「刃先交換型ドリル」があり、それらを効果的に利用するため、回転軸が中空のモータ、且つドリル回転数、加工速度等の各種加工条件を制御可能な穿孔装置を開発し、それにより最大穿孔数が1000孔/本、加工形状精度誤差がドリル径+0.07mm以下、最大切削速度が200mm/min以上の達成を目標とする。

5-2 実施内容および結果

5-2-2 穿孔装置の開発

1. 中空モータ

- ・ 中空モータは各種能力別に製作〈写真501参照〉
- ・ 高速タイプでは中空ロータ部品の高精度化を図り、回転数25,000rpmを実現〈写真502参照〉

標準タイプ



出力 100W (軽量タイプ)
回転数 5,000rpm

高速タイプ



出力 200W
回転数 10,000rpm 以上



出力 300W (ハイパワータイプ)
回転数 5,000rpm

写真501：中空モータシリーズ



写真502：動釣り合い試験機による中空ロータのバランス調整

2. 穿孔装置

中空モータに送り機構と各種条件設定が可能なコントローラを備えた穿孔加工システム製作（写真503参照）



吸塵装置

制御機器

操作画面



- ・ 6段階の設定位置ごとにドリル回転数、送り速度の変更が可能
- ・ 分割にて指定数のステップ加工が可能
- ・ 穿孔加工時は吸塵・加工用冷却エアと連動動作

ドリルユニット



写真503：穿孔装置

5-2-2 テスト架台の開発

各種ドリルによる様々な条件下での穿孔テストが容易に出来るよう、任意の位置に自動位置決めし連続的に穿孔加工することが可能なテスト架台を製作(写真504参照)

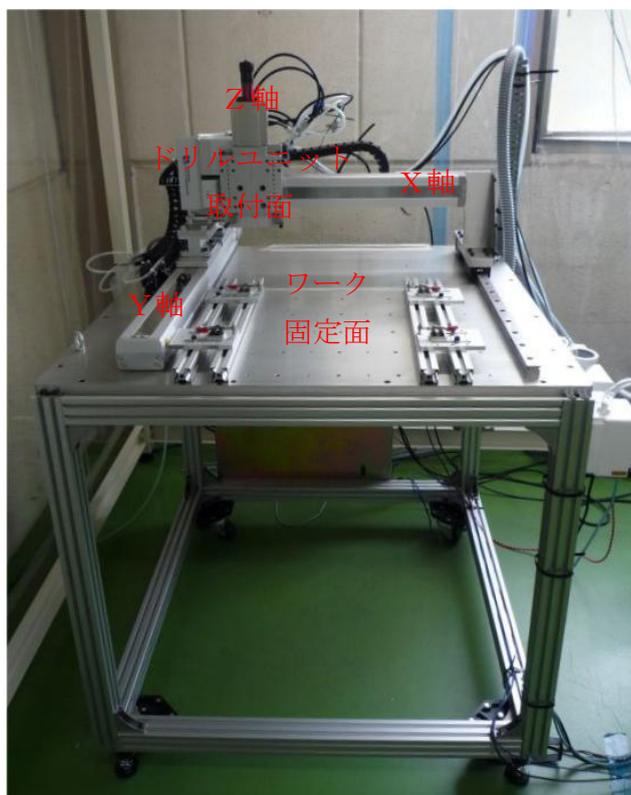


写真504：テスト架台

5-2-3 穿孔データ収集

クリーンブース内に穿孔装置、吸塵装置、高速度カメラ、及びサーモレーサーを設置し、テスト架台を使って各種穿孔データを収集する。(写真505参照)

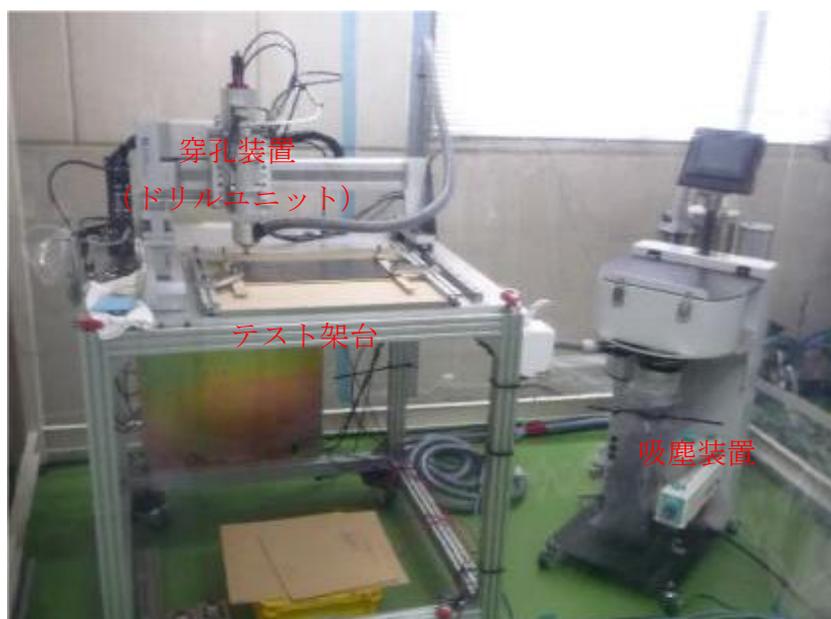


写真505：穿孔テスト環境

3. 各種ドリルによる穿孔テスト

※以降の各種テストに使用するワークは、東レ株式会社 A&Aセンターより航空機用CFRP材を無償提供して頂いた。

① パイプ形状型ドリル（刃先PCD、cBNロー付）〈写真506参照〉



写真506：ドリル外観

[試験要領]

パイプ形状ドリルの先端切れ刃部にPCD、cBNをロー付したドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

[試験結果]

パイプ形状型ドリルは切削体積が少なく、中心部がペレット状に残ることから、切りくず発生量が少なく作業環境にやさしいドリルとなることを期待した。しかしながら、裏面で切りきれないCFRP繊維が残りパイプ内に詰まる為、吸塵することが出来なかった。〈写真507参照〉

効率良く連続的な加工が出来ないため、吸塵機能が有効となる刃先形状に改め、連続穿孔加工テストを実施する。(後述の③、④項参照)



写真507：詰まる要因の抜けカス

② 刃先交換型ドリル（PCDコーティング無し）〈写真508参照〉



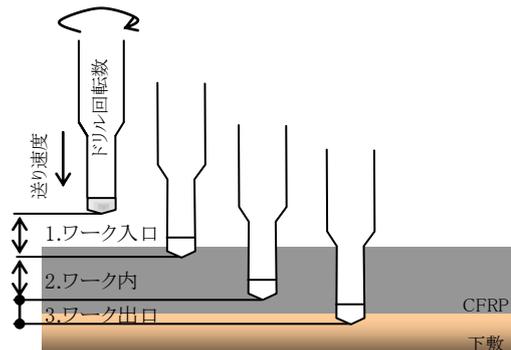
写真508：ドリル外観

[試験要領]

本研究にて新規開発の超硬S1102材（Co10%）使用の刃先交換型ドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

・加工条件

	ドリル回転数 [rpm]	送り速度 [mm/s]
1. ワーク入口	3,000	1
2. ワーク内	3,000	5
3. ワーク出口	3,000	1



[試験結果]

始めの数十穴は非常にきれいな穿孔が可能だが、100～200穴にて表面の状態が悪化、裏面はワークを確実に押さえることでバリはある程度抑えられるが、表面は逆に押さえられず裏面よりバリが大きくなる。〈表501、写真509参照〉

	ドリル		ワーク	
	平面	斜視	表面	裏面
1穴目 ドリルは加工前				
232穴目				
551穴目				

表501：各穴毎のドリル、ワーク状況

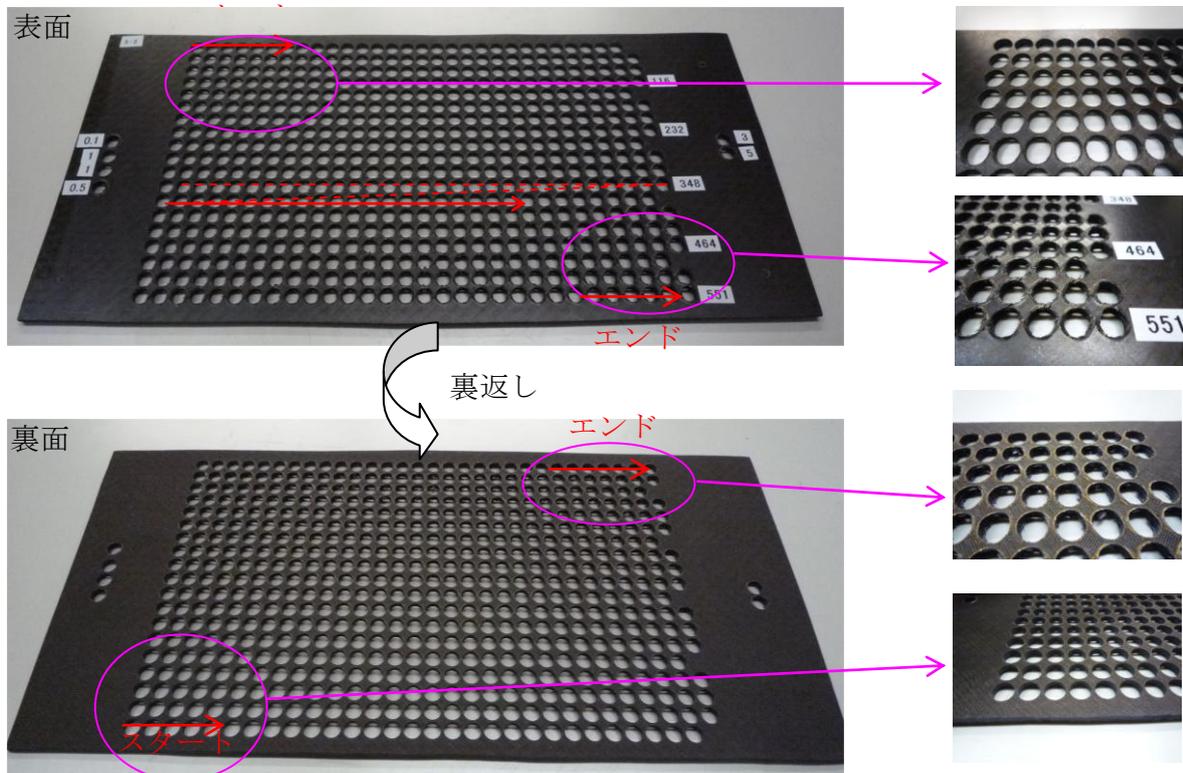


写真509：約500穴連続加工後のワーク全体状況

③ 中空面取りドリル 〈写真510参照〉

秘匿情報につき写真の掲載を省略する

写真510：ドリル外観

[試験要領]

面取り用の中空ドリルによるCFRP材への面取り加工テスト

下穴径 $\phi 6\text{mm}$ に対し、面取り径 $\phi 8\text{mm}$ （深さ 1mm ）の加工

- ・ 加工条件：ドリル回転数 $3,000\text{rpm}$ 、送り速度 1mm/s

[試験結果]

- ・ 面取り加工の実現（写真511参照）
- ・ 吸塵有りにより粉塵発生量が極めて少なくなる（写真512参照）

本件は上記の確認に留め、研究開発の最中に考案された穴あけと面取りを同時に加工可能なドリル形状にて研究開発を追求する。（後述の④項参照）



写真511：面取り加工状況

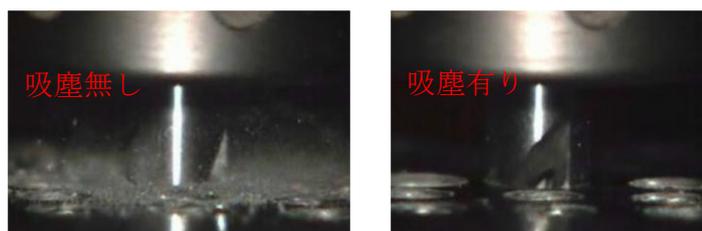


写真512：吸塵有無による粉塵状況

④ 中空段付きドリル 〈写真5 1 3 参照〉

秘匿情報につき写真の掲載を省略する

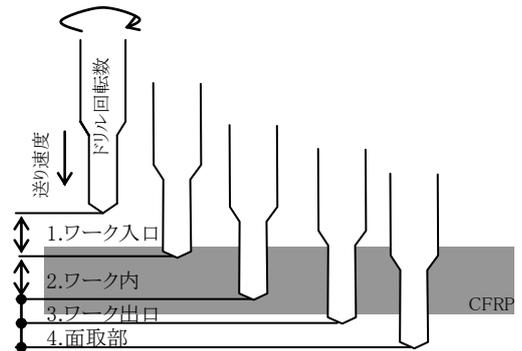
写真5 1 3 : ドリル外観

〔試験要領〕

穴あけと面取りを同時に加工可能な中空ドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

・加工条件

	ドリル回転数 [rpm]	送り速度 [mm/s]
1. ワーク入口	3, 000	1
2. ワーク内	3, 000	3
3. ワーク出口	3, 000	1
4. 面取り部	3, 000	1



〔試験結果〕

はじめの数穴はきれいな穿孔が可能だが、わずか10穴程度で面取り部に小さなバリ発生、その後の連続加工でバリはどんどんお大きくなる。(裏面は下敷きが無いので加工初めからバリ発生) 〈表5 0 2、写真5 1 4 参照〉

		ドリル		ワーク	
		平面	斜視	表面	裏面
1 穴目 ドリルは加工前	先端部	秘匿情報につき写真の 掲載を省略する			
	面取り部				
2 4 0 穴目	先端部				
	面取り部				

表5 0 2 : 約300穴加工前後のドリル、ワーク状況

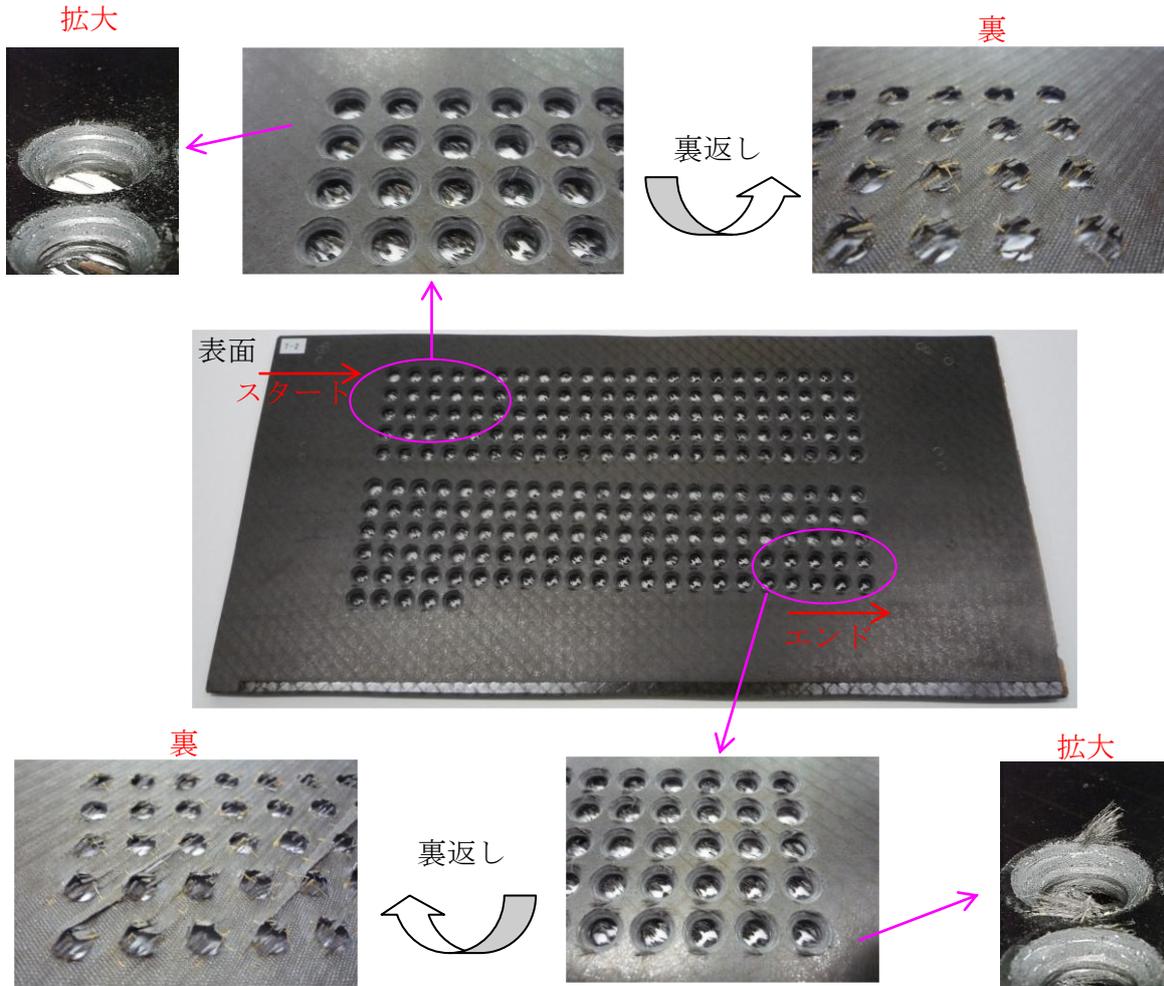


写真514：約300穴連続加工後のワーク全体状況

⑤ 中空段付きドリルPCDロー付〈写真515参照〉

秘匿情報につき写真の掲載を省略する

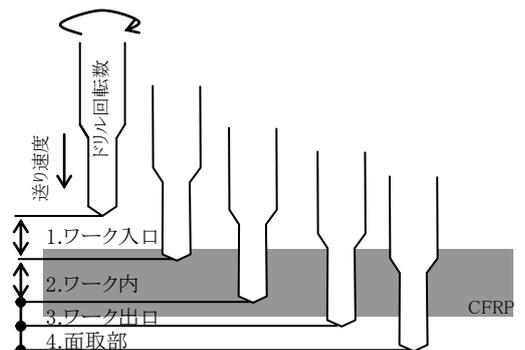
写真515：ドリル外観

[試験要領]

刃先がPCDロー付タイプの中空段付きドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

・加工条件

	ドリル回転数 [rpm]	送り速度 [mm/s]
1. ワーク入口	3,000	4
2. ワーク内	3,000	4
3. ワーク出口	3,000	1
4. 面取り部	3,000	1



[試験結果]

始めの数穴はきれいな穿孔が可能だが、数十穴程度で面取り部に小さなバリ発生、その後もバリはどんどんお大きくなり、④の超硬タイプと大きな差は無し。(裏面は下敷きが無いので加工初めからバリ発生)〈表503、写真516参照〉

		ドリル		ワーク	
		平面	斜視	表面	裏面
1穴目 ドリルは加工前	先端部	秘匿情報につき写真の 掲載を省略する			
	面取り部				
510穴目	先端部				
	面取り部				

表503：各穴ごとのドリル、ワーク状況

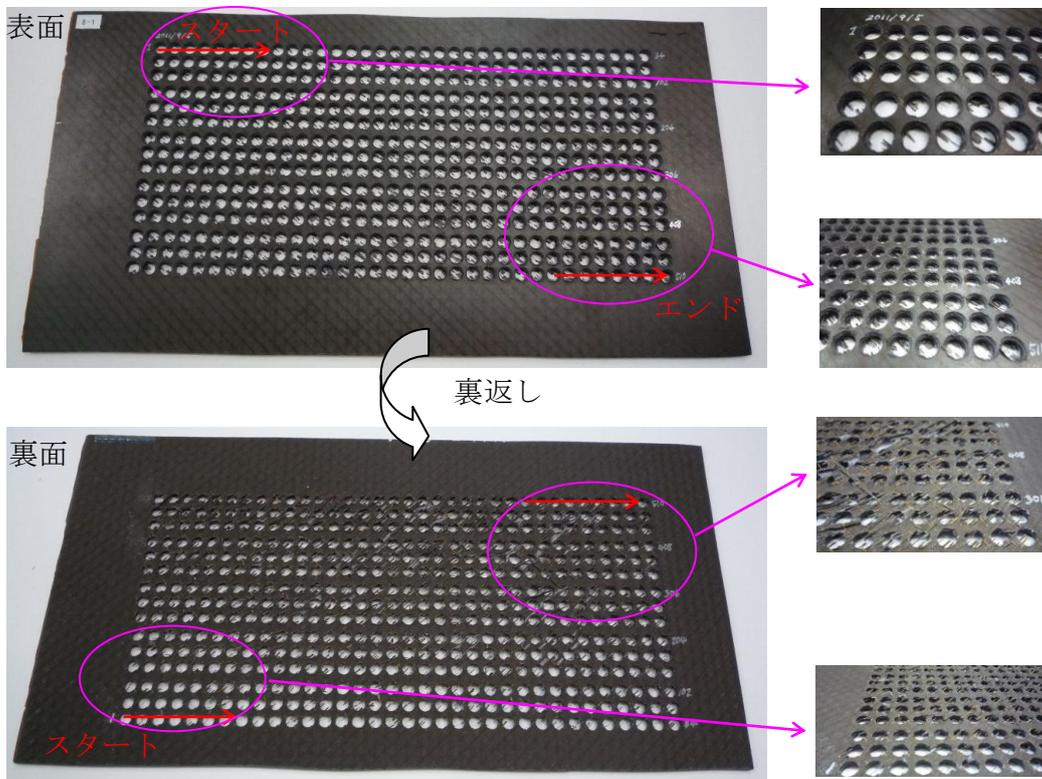


写真516：約500穴連続加工後のワーク全体状況

⑥ 中空段付きドリル cBNロー付 〈写真519参照〉

秘匿情報につき写真の掲載を省略する

写真519：ドリル外観

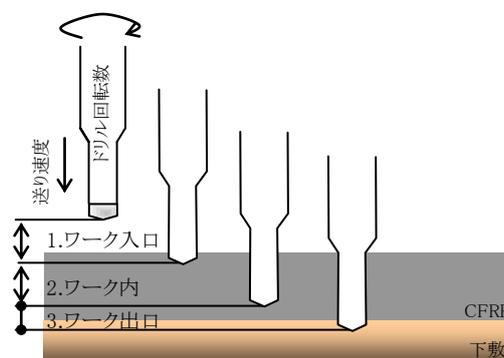
〔試験要領〕

刃先がcBNロー付タイプの中空段付きドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

(面取り加工は省略)

・加工条件

	ドリル回転数 [rpm]	送り速度 [mm/s]
1. ワーク入口	3,000	1
2. ワーク内	3,000	4
3. ワーク出口	3,000	1



〔試験結果〕

はじめの数穴はきれいな穿孔が可能だが、数十穴程度でバリ発生、100穴未満で大きなバリが発生。その後もバリはどんどんお大きくなり、下敷きがあるにも関わらず裏面は切れ味悪くバリがひどい。⑤のPCDタイプと比べ劣る。〈表504、写真520参照〉

	ドリル		ワーク	
	平面	斜視	表面	裏面
1穴目 ドリルは加工前	秘匿情報につき写真の掲載を省略する			
114穴目				
228穴目				

表504：各穴ごとのドリル、ワーク状況

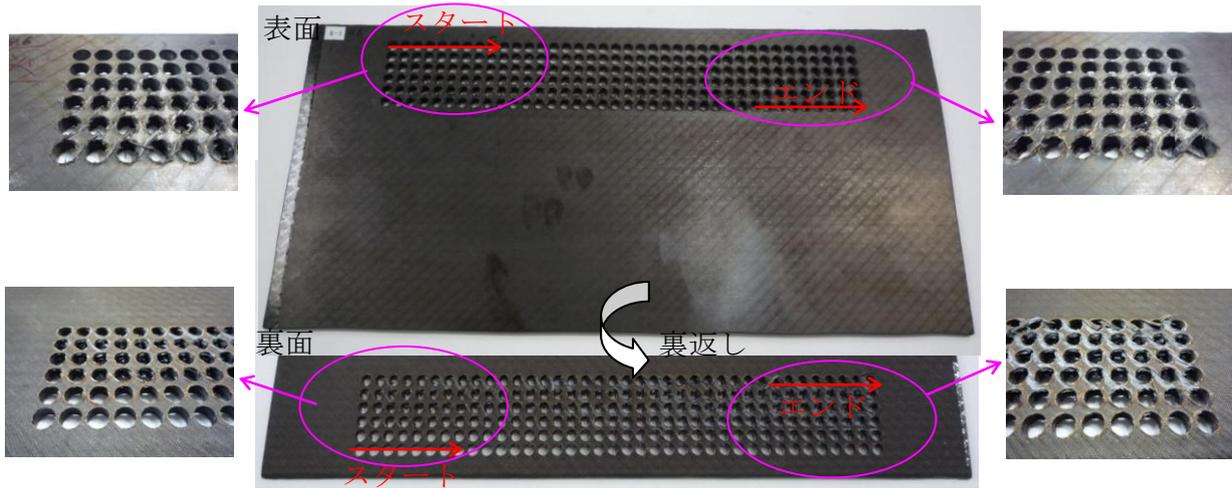


写真 5 2 0 : 約 2 0 0 穴連続加工後のワーク全体状況

⑦ 刃先交換型ドリル (P C Dコーティング有) 〈写真 5 2 1 参照〉



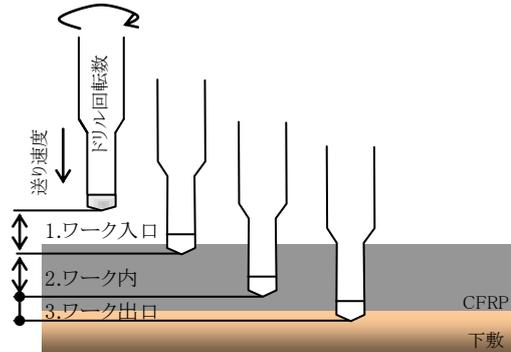
写真 5 2 1 : ドリル外観

〔試験要領〕

本研究にて新規開発の超硬 S 1 1 0 1 材 (C o 5 %) 使用の刃先交換型ドリル (P C Dコーティング有) による C F R P 材への連続穿孔加工テスト

・加工条件

	ドリル回転数 [r p m]	送り速度 [m m / s]
1. ワーク入口	3, 0 0 0	1
2. ワーク内	3, 0 0 0	4
3. ワーク出口	3, 0 0 0	1



〔試験結果〕

1 0 0 0 穴以上加工してもワーク表面に繊維状のバリは発生しない。〈表 5 0 5、写真 5 2 2 参照〉

	ドリル		ワーク	
	平面	斜視	表面	裏面
1 穴目 ドリルは加工前				

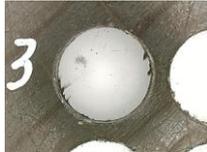
600穴目				
1200穴目				

表505：各穴ごとのドリル、ワーク状況

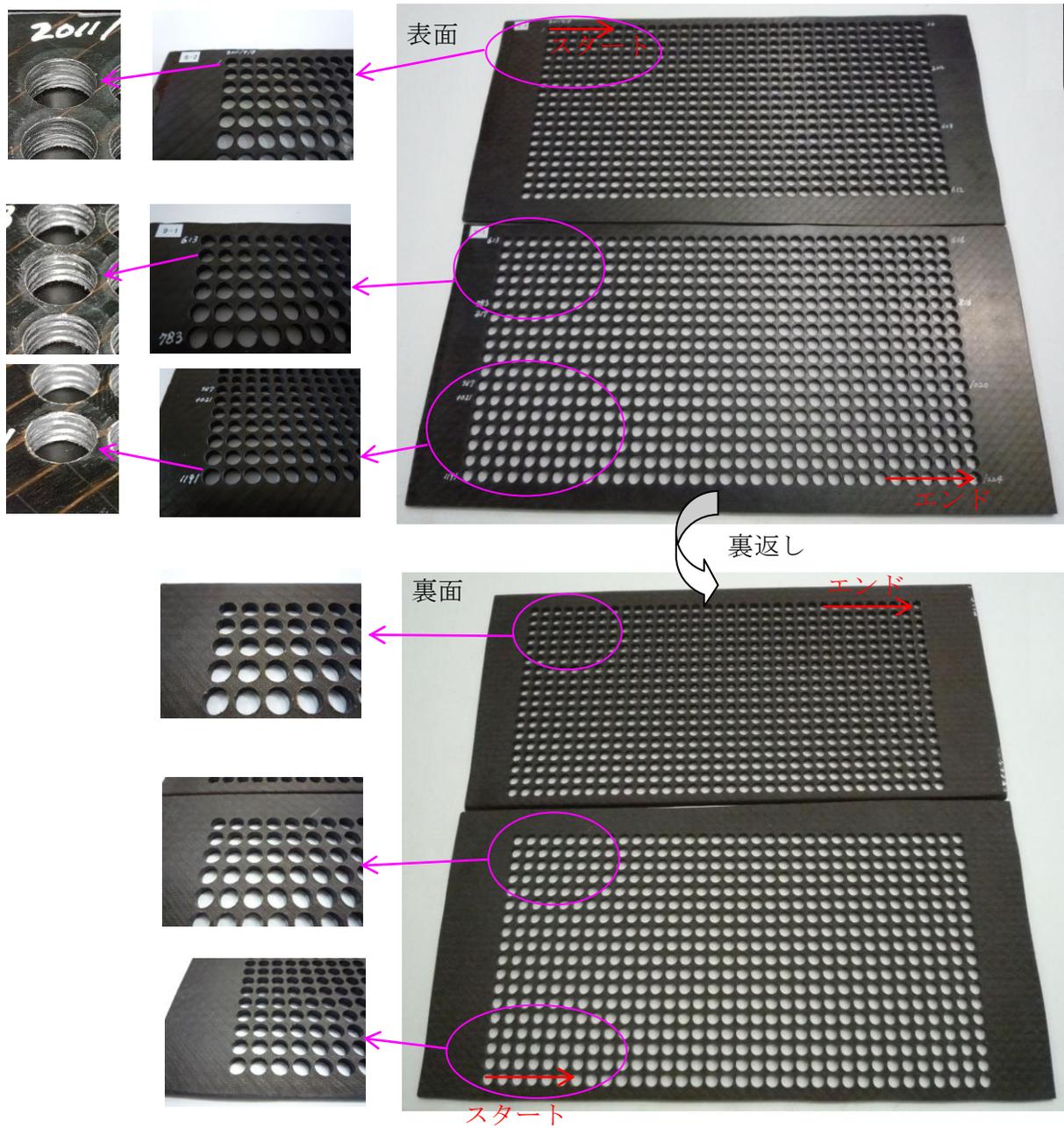


写真522：約1200穴連続加工後のワーク全体状況

⑧ 市販ダイヤコーティングドリル（超硬・PCDコーティング）〈写真523参照〉



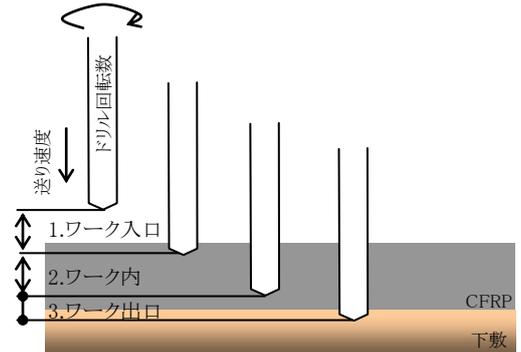
写真523：ドリル外観

〔試験要領〕

市販の超硬PCDコーティングドリルによるCFRP材への連続穿孔加工テスト

・加工条件

	ドリル回転数 [rpm]	送り速度 [mm/s]
1. ワーク入口	3,000	4
2. ワーク内	3,000	4
3. ワーク出口	3,000	4



〔試験結果〕

加工初期より表面に小さなバリ発生、その後の連続加工でもさほど大きなバリにならないものの小さなバリが出続ける。〈表506、写真524参照〉

	ドリル		ワーク	
	平面	斜視	表面	裏面
1穴目 ドリルは加工前				
600穴目				
1000穴目				

表506：各穴毎のドリル、ワーク状況

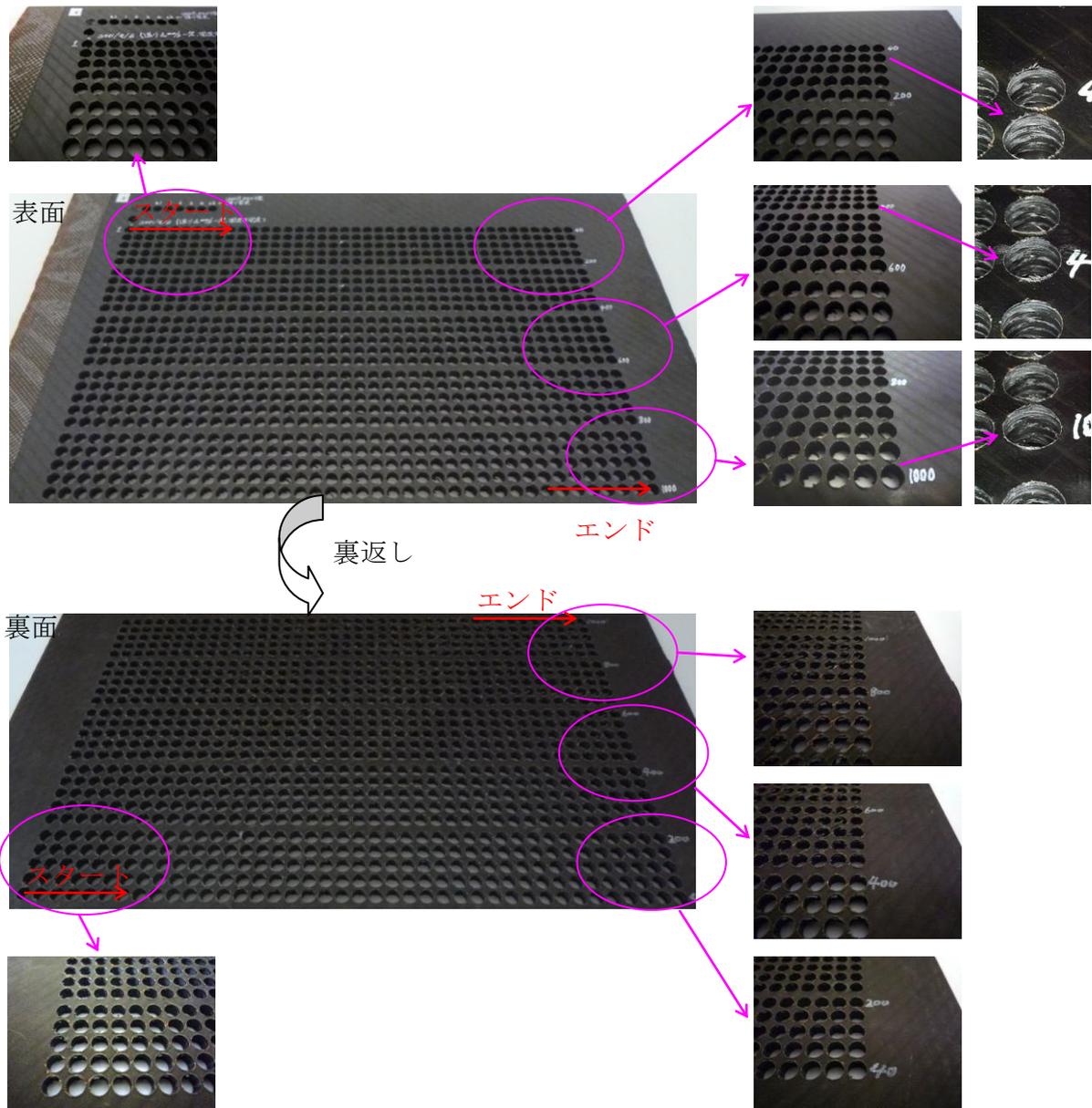


写真524：約1000穴連続加工後のワーク全体状況

2. 内径面表面粗さ

[試験要領]

- ・ CFRP材の穿孔加工による内径面の粗さを触針式表面粗さ測定機にて測定
〈写真525参照〉
- ・ 測定粗さは JIS B0601 にて規定される表面粗さで評価した算術平均粗さ R_a
(測定長さ4.0mm、カットオフ波長0.8mm)
- ・ 測定対象ワークは、⑦刃先交換型ドリル(コーティング有)、⑧市販ドリルによる1000穴加工ワークを確認

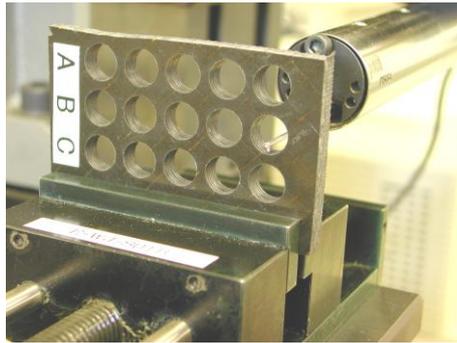


写真 5 2 5 : 触針式表面粗さ測定機による測定環境
(東京精密製 サーフコム 1 8 0 0 D)

[試験結果]

- ・ 刃先交換型ドリル、市販ドリルともに $R a$ 約 $2 \sim 5 \mu m$
但し、粗さプロファイルからは、いずれも CFRP 材特有と考えられる繊維のむしれによる大きな傷のようなものが見られ、それにより平均粗さの値は大きくなる。
- ・ 刃先交換式ドリルと市販ダイヤモンドコーティングドリルの算術平均粗さ $R a$ の平均値はそれぞれ 2.86 と 3.06 であり、本研究で開発した刃先交換型ドリルの方が切れ味が良い結果となった。
- ・ 穿孔初期から 1000 穴までの粗さプロファイルでは、ドリル磨耗による大きな変動や、ドリルの差による違い等、特別な傾向は見られない。

〈表 5 0 7 参照〉

測定穴	⑦刃先交換型ドリル		⑧市販ドリル	
	粗さプロファイル	$R a$ [μm]	粗さプロファイル	$R a$ [μm]
1 穴目		2.1		3.5
400 穴目		1.7		2.6
600 穴目		4.5		3.0
1000 穴目		3.5		3.8

表 5 0 7 : 内径面表面粗さ

3. 穿孔形状精度誤差

[試験要領]

- 連続穿孔加工にて任意の穿孔時におけるドリル径と穿孔穴をマイクロメータ及びノギスにて測定し、目標値の穿孔形状精度誤差「ドリル径+0.07mm以下」を確認

但し、測定精度が悪く数10μm以上の誤差が考えられるため目安と捉える。

[試験結果]

- ドリル径に対し穿孔穴径は小さくなる傾向〈表508参照〉
ゆえに目標値の穿孔形状精度誤差「ドリル径+0.07mm以下」クリア

測定値	ドリル径 [mm]	穴径 [mm]
1穴目	φ7.703	φ7.69
600穴目	φ7.695	φ7.68
1200穴目	φ7.694	φ7.63

表508：穿孔形状精度誤差

4. 刃先交換型ドリルによる穿孔温度状況

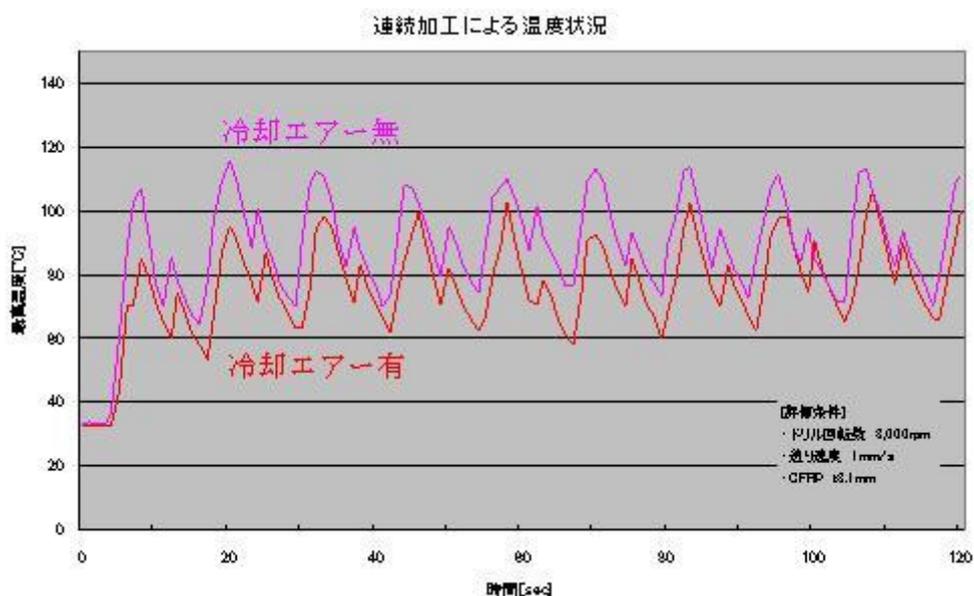
[試験要領]

刃先交換型ドリル（新品）でCFRPを連続穿孔、サーモトレーサーにてその状況を観察し、冷却エア有・無による最高温度の差異を確認

[試験結果]

冷却エア有で約100℃、冷却エア無で約120℃、温度差は約20℃を示す。
〈グラフ501参照〉

エアを導入することにより、より低温で加工が出来るようになるため、CFRPのマトリックス樹脂への熱による影響が少なくなる。同様にドリルへの悪影響も抑制され長寿命化にも効果があると考えられる。



グラフ501：冷却エア有・無による穿孔温度状況

5-3 研究成果

穿孔加工システムとテスト環境整え、開発した各種ドリルの穿孔テスト実施

① パイプ形状型ドリル

粉塵の吸塵機能が働かず刃先形状を改善

⇒③～⑥にて改善

② 刃先交換型ドリル

数十穴は非常にきれいな穿孔、100～200穴にて表面状態が悪化

⇒⑦にて改善

③ 中空ドリル（面取）

面取り用ドリル工具の開発完了

⇒④～⑥にて穿孔効率、品質、耐久性を追求

④ 中空ドリル（二段面取）

数穴は非常にきれいな穿孔、10穴程度で面取り部に小さなバリ発生

⇒⑤～⑦にて耐久性追求

⑤ 中空ドリルPCDロー付（二段面取）

耐久性に関して④と大きな差は無し

⑥ 中空ドリルcBNロー付（二段面取）

耐久性悪く⑤に比べても劣る

⑦ 刃先交換型ドリル（コーティング有）

目標の最大穿孔数：1000孔／本、穿孔形状精度誤差：ドリル径+0.07mm以下、最大送り速度200mm/min以上を実現

⇒本研究開発での最適刃物

⑧ 市販ドリル（超硬ダイヤコート）

加工初期より表面に小さなバリ発生、その後の1000穴連続穿孔でもさほど大きなバリにならないものの小さなバリが出続ける。

⇒耐久性はあるが⑦に比べ穿孔品質は劣る

以上より、⑦刃先交換型ドリル（PCDコーティング有）にて当初の目標値は全てクリア出来た。

但し他の形状のドリルにおいても、刃先形状の改善、PCDコーティングを行うこと等により穿孔性能の向上や長寿命化を図れる可能性があり、今後の補完研究にて、更なる検討を行う。

第6章 ドリル加工における切りくず生成機構の解析

6-1 研究目的

切りくず吸引式切削工具では中空偏芯形状の切削工具を使用する。この工具により生成される切りくずは汎用型ストレートシャンクドリル工具とは異なる形状となることが考えられる。その主な要因には工具内径部分には切れ刃が無く、分断された切りくずを生成する事が難しい工具形状であることが挙げられる。従って切りくずの回収率を効果的にする為の基礎的データとして中空型工具における切りくず形状を的確に把握する事は開発した切りくず吸引型切削加工機を高品位な技術とする上で重要となる。

6-2 実験方法および実験条件

6-2-1 切削工具

開発した中空型工具と市販工具であるストレートシャンク型ドリルを使い切りくずの形状の違いについて調べた。市販工具の工具径は開発工具と同じとなる直径(φ)8(mm)でTiAl coating ハイス工具とした。2種類の工具形状を図1、図2に示す。



図601 パイプ形状ドリル



図602 ストレートシャンクドリル

6-2-2 切削条件

切りくず形状の解析実験には表1で示す切削条件を使用する。

表601 切削条件

刃先周速度(m/min)	20	60	100
送り速度(mm/min)	45、90		

6-2-3 被削材

実験に使用する被削材は炭素繊維を擬似等方型に配置し積層数 23 層の構造材で厚さ 4 (mm) のものを使用する。

炭素繊維配向： 0° / 45° / 90° / -45° （繰返し）

積層数：23層

厚さ：4（mm）

6-2-4 切りくず形状解析

切りくず形状の解析には中空型工具を開発した吸塵型加工装置を使い切り、被削材に対して表601で示す切削条件で実験を行い回収された切りくずを画像解析により形状を分析した。実験装置の概要を図603に示す。

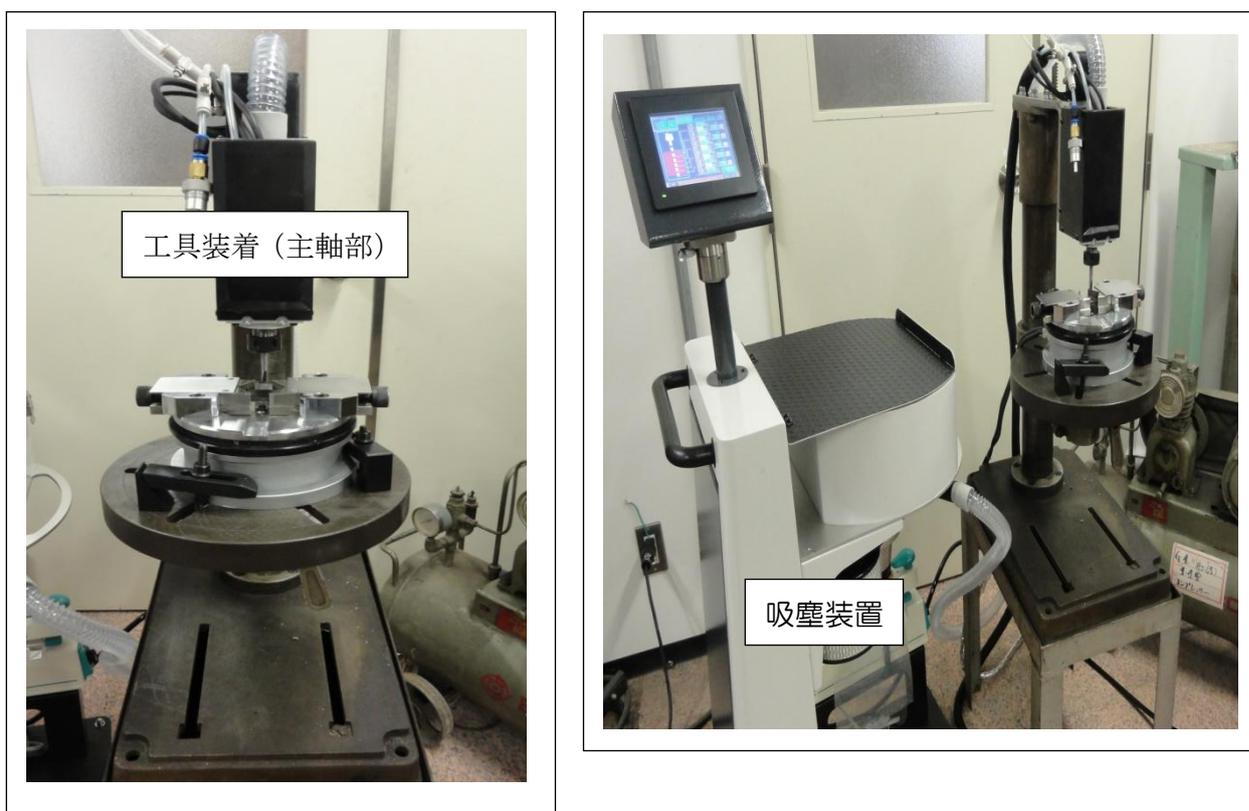


図603 切りくず形状解析実験装置

6-3 実験結果

6-3-1 切りくず形状比較

中空型工具とストレートシャンクドリルで得た工具形状を図604、図605に示す。
中空型工具での切りくずは総じて長い形状のものが多い。一方ストレート型での切りくずは短い形状のものが多い。工具形状により切りくずに違いが有ることが認められた。

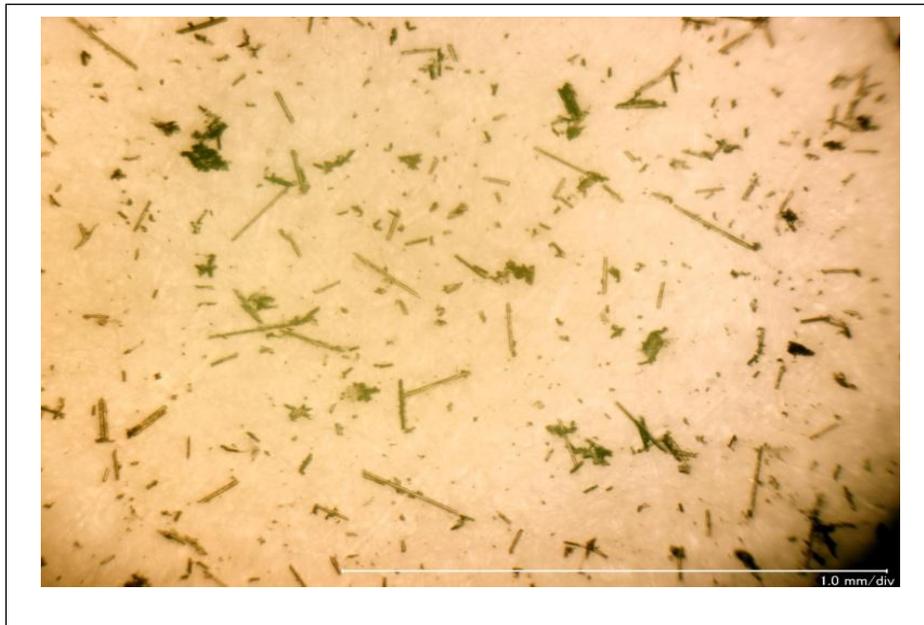


図604 中空型工具による切りくず形状

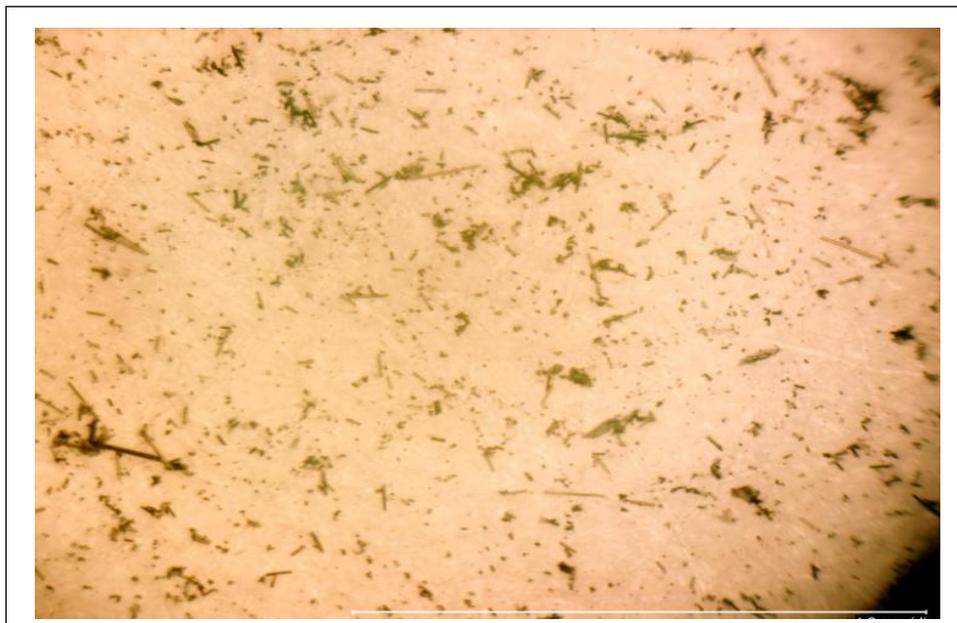


図605 ストレートシャンク型工具による切りくず形状

6-3-2 切り形状度数分布

中空型工具で生成された切りくずに対して、寸法の度数分布を画像解析で調べた。調査の対象数は5視野としランダムサンプリングしその平均値を求め中空工具とストレートシャンク工具の違いを調べた。図6に中空型ドリル、図7にストレートシャンクドリルの結果を示す。図6より中空型工具での切りくずの多くは1.25 μm ~2.5 μm の寸法範囲である。また図7よりストレートシャンクドリルでの切りくずは0.5 μm 以下のものが最も多く次いで1.5 μm ~2.5 μm の寸法範囲が多い順となっている。

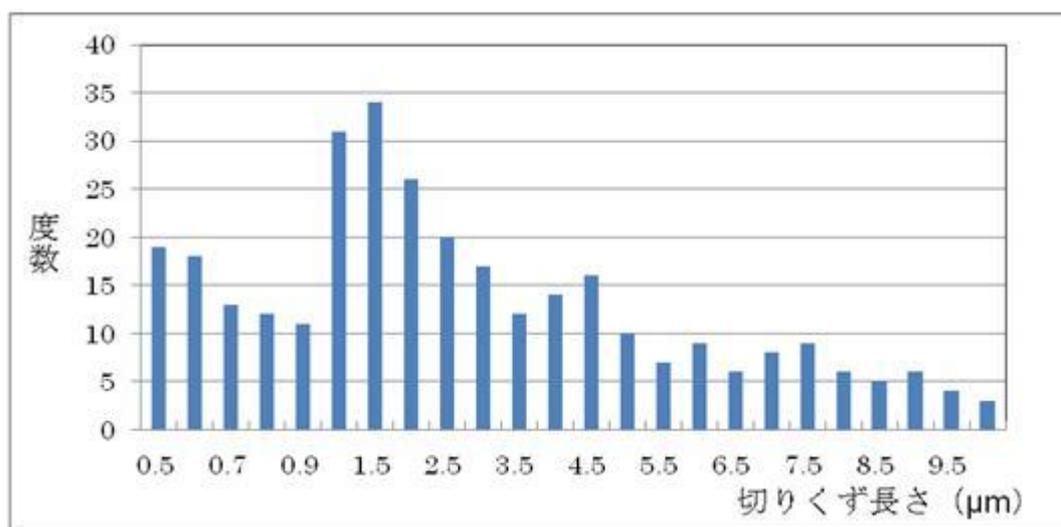


図6 切りくず寸法 (中空型ドリル)

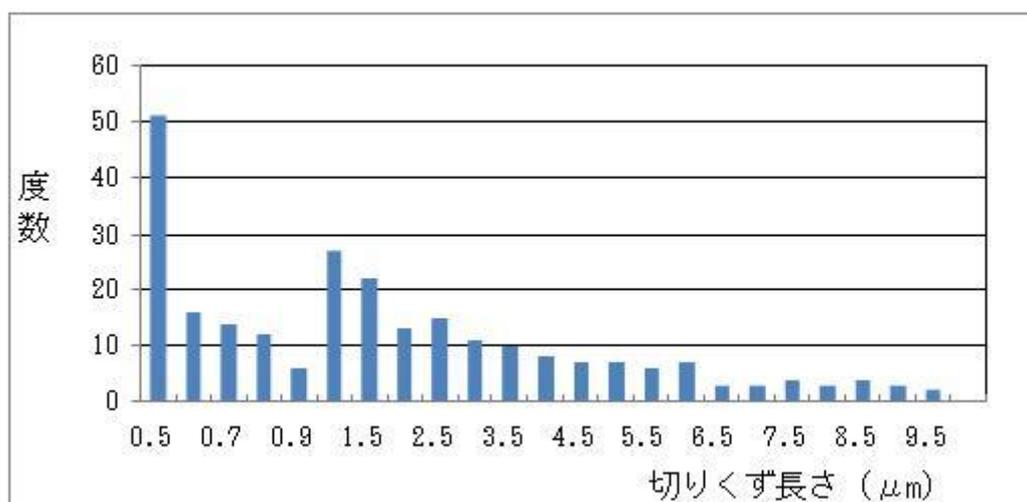


図7 切りくず寸法 (ストレートシャンクドリル)

6-4 まとめ

- (1) パイプ形状ドリルにおける切りくずの形状寸法は1.25~2.5 μm のものが多く。
- (2) ストレートシャンクドリルにおける切りくずの形状寸法は0.5 μm が最も多い。

第7章 ラマン散乱を用いたドリル穴周辺の損傷評価

7-1 研究目的及び目標

CFRPのドリル加工においては、ドリルの使用に伴う劣化により、バリやむしれなど目視できる巨視的な損傷が発生する。ドリルの形状の決定や加工条件の最適化において、このような巨視的な加工損傷の発生の有無が評価指標として用いられている。しかし、巨視的な損傷であるバリやむしれは、発生するか、しないかの二値の評価指標であって、巨視的な損傷の発生に先立ち微視的な損傷が発生するから、微視的な損傷を定量的に評価できれば、評価指標としてより精密な評価が可能である。

このような背景から、加工により引起される微視的な損傷を定量的に評価できる方法の開発を目的とし、微視的な加工損傷のうち、加工時に発生する繊維とマトリックス樹脂間の剥離を対象とし、穴加工後の試験片における繊維とマトリックス樹脂の剥離部と非剥離部を検出できること開発目標とする。

7-2 実施内容および結果

7-2-1 実験方法

加工により発生する繊維/マトリックス樹脂間の剥離は、図701のように、繊維に発生する応力により検出する。すなわち、CFRPに引張負荷を加えたとき、マトリックスから界面を介して繊維に応力が伝達されるから、界面が完全に剥離している場合には繊維に応力が発生しない。したがって、繊維の応力発生状況から剥離部分を特定することができる。また、完全接着の場合に発生する繊維応力と完全剥離の際の発生応力の中間の応力が発生する場合には、部分的な剥離として、発生する応力の大きさから、剥離の程度が定量的に評価可能である。

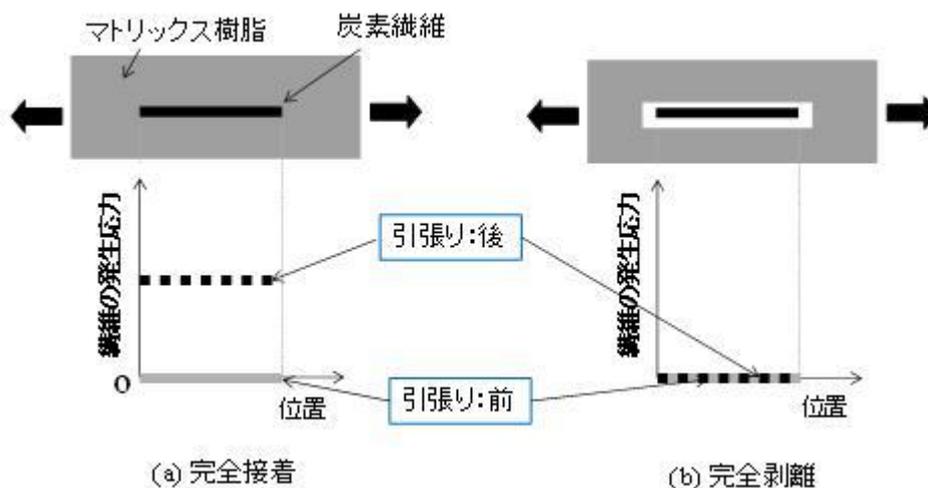


図701 加工損傷（界面剥離）の定量的評価方法

CFRPに使用される炭素繊維の直径は約 $5\mu\text{m}$ と非常に細く、この繊維に発生する応力の分布を測定することは通常の応力測定法では不可能である。このため、ラマン散乱という方法を使用した。この方法は、光を用いることから、顕微鏡の光学系を用いて照

射光の焦点を絞ることが可能である。100倍の対物レンズを用いることにより、対象物面で直径1 μm のスポットに絞ることができ、 μm の空間分解能での評価が可能である。したがって、穴穿孔による加工損傷を繊維に発生する応力から評価するためには、図702に示すように顕微鏡下で、試験片に引張負荷を加えながら、ラマン散乱光を測定することが必要となる。このため、顕微鏡試料台に載せることが可能な小型負荷試験治具を製作した(写真701)。

また、応力評価に用いたラマン分光装置は、顕微レーザーラマン分光測定装置(LabRAM300(株)針場製作所)であり、その外観と構造および測定条件を写真702および表701に示す。本研究では、応力を受け変形することにより結合エネルギーが変化するため、散乱光のスペクトルのピークがそれに応じて移動するという原理を利用して、繊維に発生する応力を検出している。

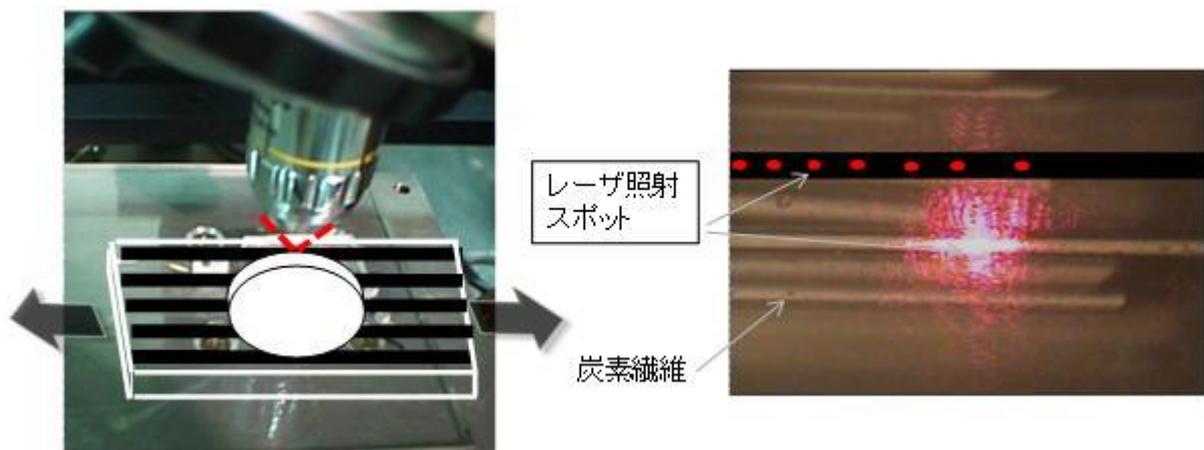


図702 CFRP加工損傷評価のための顕微ラマン散乱測定レイアウト

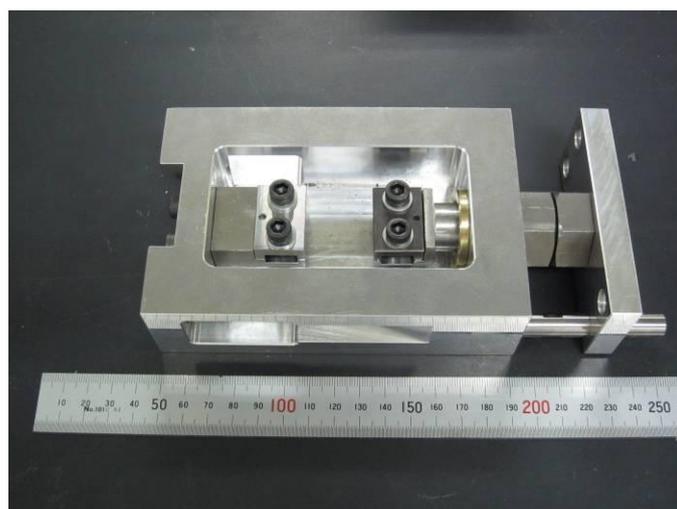


写真701 小型負荷試験治具

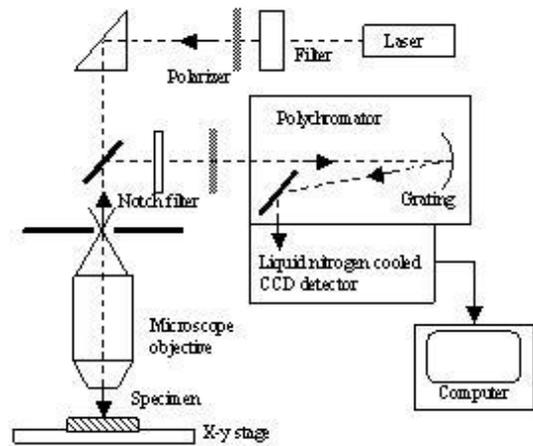


写真702 顕微ラマン分光器

表701 ラマン分光測定条件

温度 相対湿度	23℃ 50%
対物レンズ	×100
レーザ光源	He-Ne 633nm
レーザパワー	試料上で<1mW
露光時間	20~30sec.

7-2-2 試料および試験片

穿孔加工損傷評価には図703に示す穴あき試験片を、また予備試験には同寸法の穴なし試験片を用いた。穿孔穴径はφ8mmとし、穴あけには本事業で開発した刃先交換型ドリルを用いた（表面コーティング無）。加工条件は、回転数 3,000rpm、送り速度 1mm/sec である。

穴あけ数の増加に伴う刃先劣化による加工損傷の変化を評価するため、写真703に示すように、それぞれ新品のドリルと約500穴穿孔後のドリルで穴あけした試験片を準備した。試験片は、同じ使用回数ドリルに対し、評価面（光沢面）がそれぞれドリル入側および出側となるように2枚準備した。

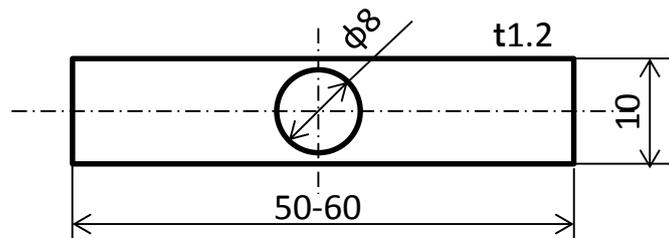


図703 試験片形状

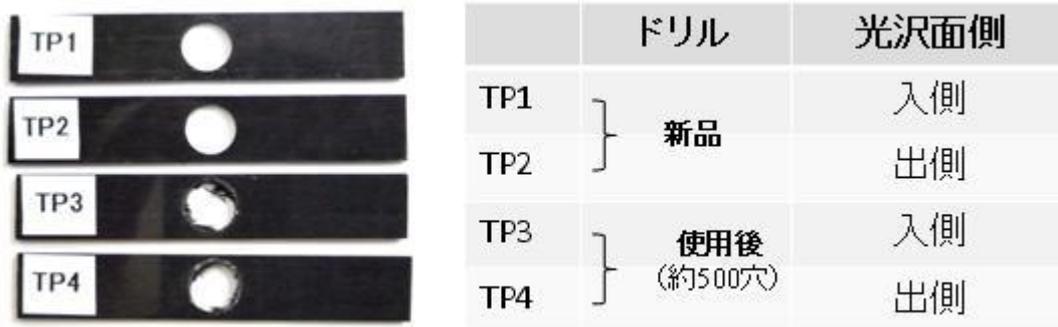


写真703 加工損傷評価試験片

7-2-3 試験結果

まず最初に、完全接着の場合引張応力に応じて繊維応力が図701に示したように発生するかどうかを確認した。その結果を図704に示す。図には、多数ある繊維から適当に選んで測定した2本の繊維を25 μm 間隔で100 μm 長さにわたって引張負荷の前後で測定した結果を示してある。図の縦軸は繊維のラマンシフト量を波数 (cm^{-1}) で示してあり、引張応力が発生するとラマンシフトは低波数側に移動する。図からわかるように、引張負荷によりラマンシフトが低波数側に移動し、繊維には引張応力が発生していることが分かる。また、任意に選んだ2本の繊維には、ほぼ同じ応力が発生している。これらのことから、7-1で述べた予測どおり繊維応力に着目することにより繊維/マトリックス樹脂間の剥離状態が評価可能であることが明らかとなった。

続いて、加工穴周辺の繊維応力の測定結果より引張負荷の有無によって繊維に発生する応力は変化しないことが明らかとなった。これより、繊維/マトリックス樹脂が完全に剥離している可能性が高いと考えられる。

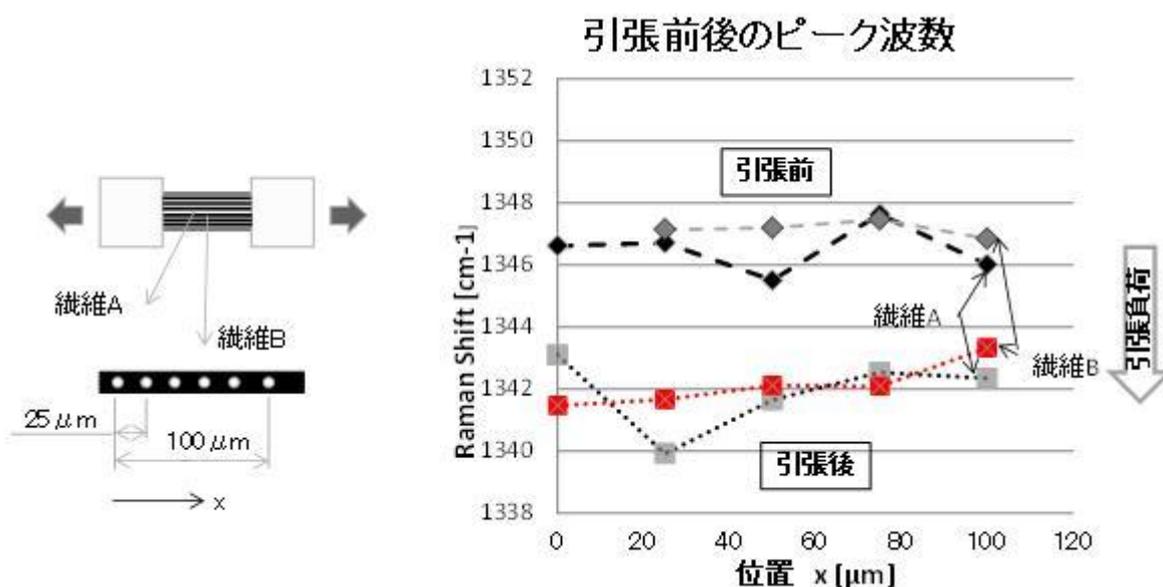


図704 引張負荷前後のラマンシフトの変化 (穴なし試験片)

7-3 研究成果

実施した試験により次の成果が得られた。

照射光を $1\ \mu\text{m}$ に絞って照射し、散乱光のスペクトルから繊維に発生している応力を評価するラマン散乱を用いることにより、CFRP加工部近傍の繊維とマトリクス樹脂の接着状態が評価可能であり、これに基づいて加工損傷の定量的評価が可能であることを明らかにした。

ドリルの形状や最適加工条件（回転数、送り速度）、さらに、本ドリルの特徴である中空軸を活用した冷却の効果についても本手法による定量評価を用いることにより、開発や最適化を効率的に実現できる。

第8章 吸塵装置の開発および吸塵データ収集

8-1 研究目的及び目標

CFRPの穿孔加工による粉塵は、作業環境悪化による作業者への健康問題らが指摘されているため、加工部周辺の先端治具及びサイクロン方式の吸塵装置にて高効率に粉塵捕集出来るシステムを開発し、微細粉塵（粒径 $3\mu\text{m}$ 以下）の抑制と切りくず捕集率99%以上を目標とする。

8-2 実施内容および結果

8-2-1 市販吸塵装置の排気特性確認

[試験要領]

市販吸塵装置の排気特性を確認するため、一定環境下のクリーンブース内で環境データ測定、手順は以下の通り。〈写真801参照〉

1. クリーンブース（クラス1，000以下）内でパーティクルカウンタにて10分間環境データ計測
2. その後、吸塵ON、その2分後にCFRP加工粉塵を吸引
3. 吸引後の環境データ変化を計測

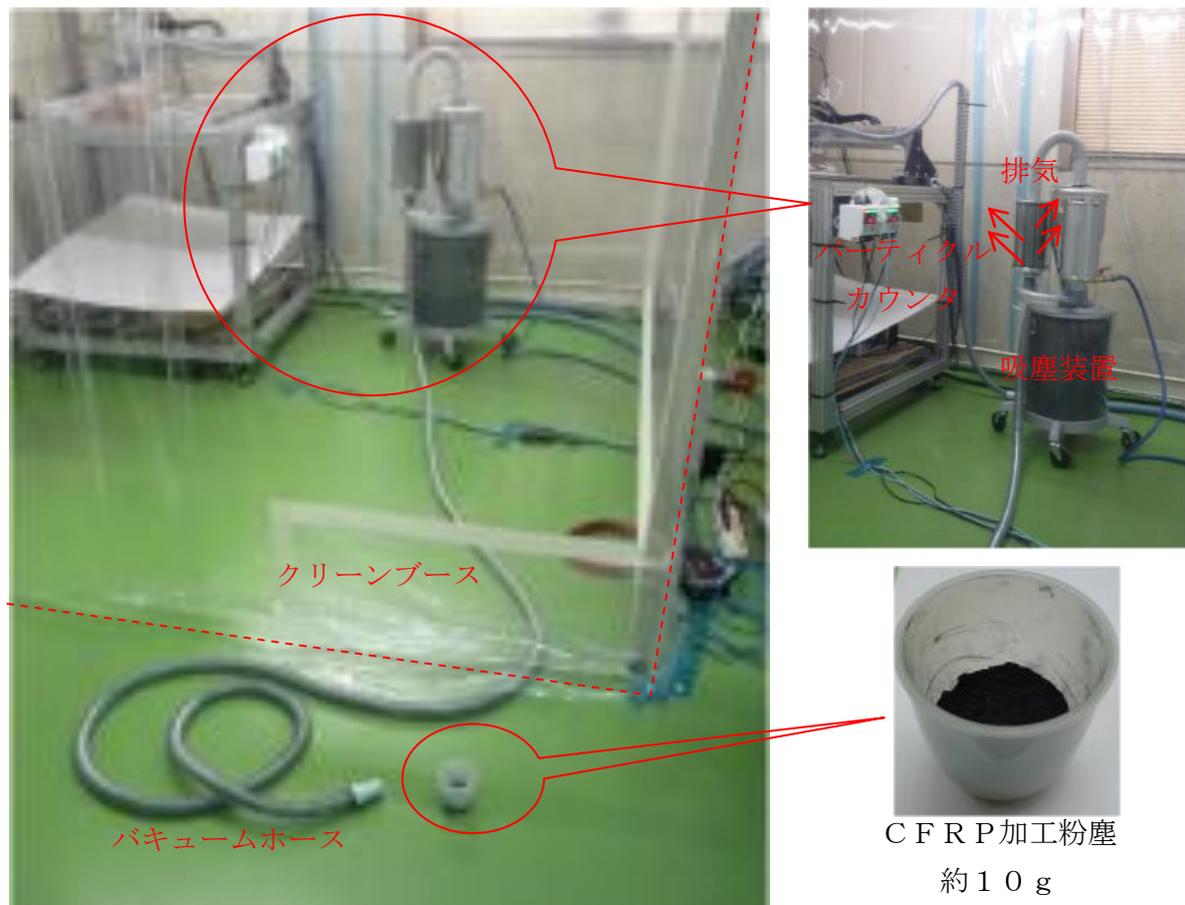
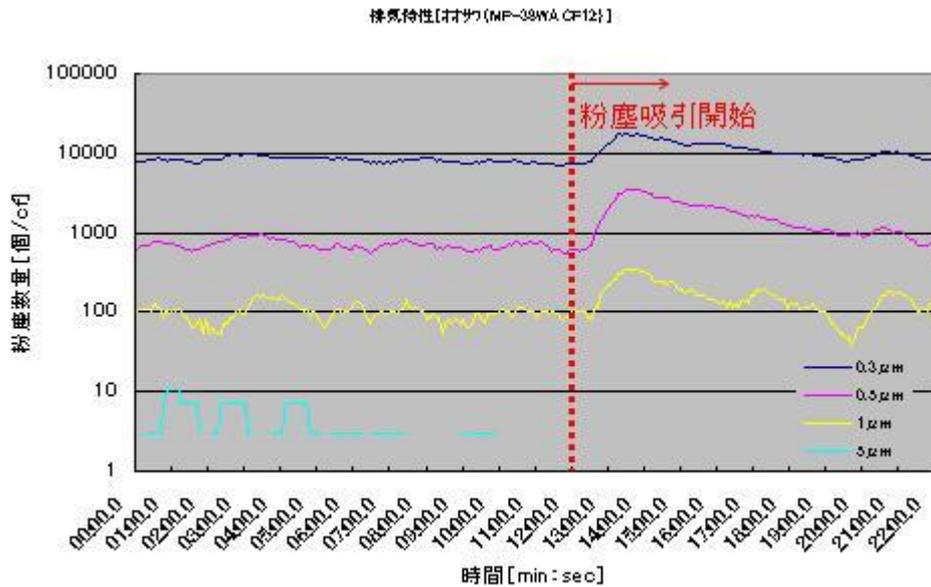


写真801：市販吸塵装置の排気特性確認

[試験結果]

吸塵を開始すると、0.5 μm 以上の粉塵はクラス1,000付近からクラス3,000台まで一旦上昇するが、約10分後にクラス1,000程度に落ち着く。

グラスウールフィルタ（約数～数十 μm レベル）のため、1 μm 以下の微粉塵はフィルタでは回収できず、環境に放出されてしまう。〈グラフ801参照〉



グラフ801：市販吸塵装置の排気特性

8-2-2 吸塵装置の開発

サイクロン式の吸塵装置（穿孔装置コントローラ一体型）を製作した。その吸塵源は圧縮エアによるエジェクター方式を採用し、吸引ノズルから排気方向に圧縮エアを噴射することで、吸引側を負圧とし、粉塵を吸引する。サイクロンを経て外部に排出される空気は高性能フィルタによって0.3 μm 程度の粉塵も殆ど捕集することが出来る。〈写真802参照〉

※高性能フィルタ：一般的にHEPAフィルタと呼ばれ、粒径0.3 μm の粒子に対して99.97%以上の粒子捕集率を有する。

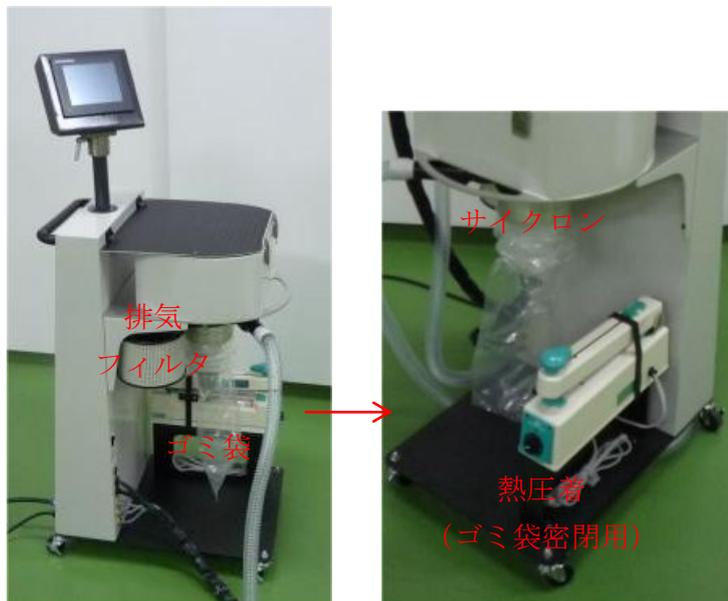
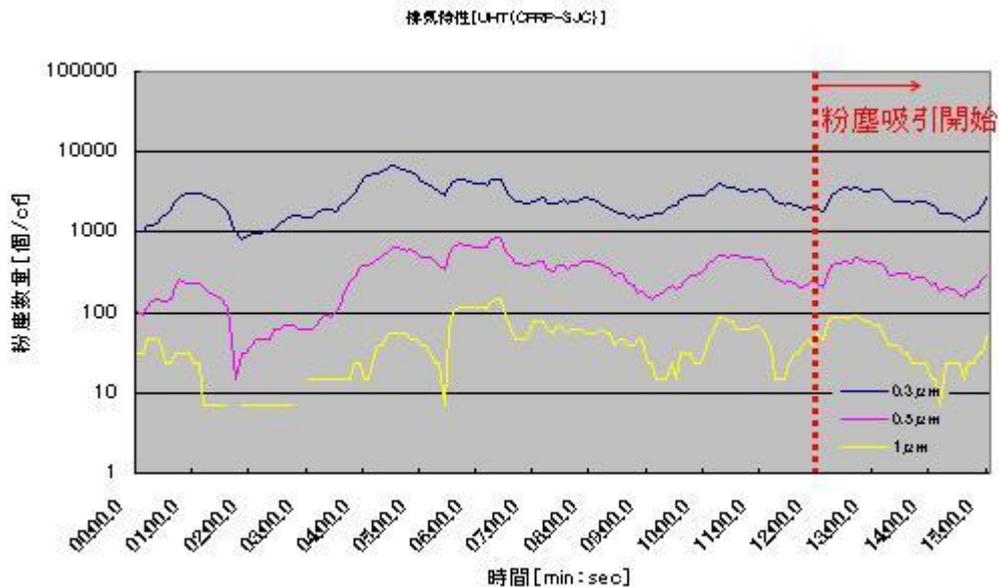


写真802：吸塵装置



グラフ 8 0 2 : 試作吸塵装置の排気特性

開発した吸塵装置を使用し、8-2-1と同様な試験を行った結果をグラフ 8 0 2 に示す。粉塵を吸引しても粉塵数量 (個/c f) の値はほとんど変化しなかった。

※本試験で用いたクリーンブースは、周りをビニールシートで覆った簡易型であり、外部環境変動 (空調等) によって影響を受ける。グラフ 8 0 1 と 8 0 2 では、粉塵の吸引試験を行う前の粉塵数量 (個/c f) のレベルが異なるが、外部環境の変動による影響と考えられる。

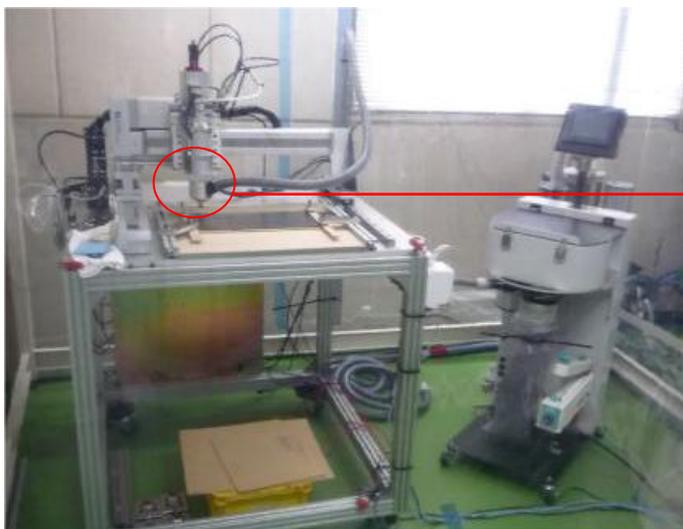
8-2-3 粉塵捕集データ収集

1. 環境データ収集

[試験要領]

穿孔加工システムによる加工時の環境を確認するため、一定環境下のクリーンブース内で環境データ測定、手順は以下の通り。〈写真 8 0 3 参照〉

1. クリーンブース (クラス 1, 0 0 0 以下) 内でパーティクルカウンタにて 1 0 分間環境データ計測
2. その後、CFRP材へ連続穿孔加工 (刃先交換型ドリルにて約 6 0 0 穴)
3. 加工中の環境データ変化を計測



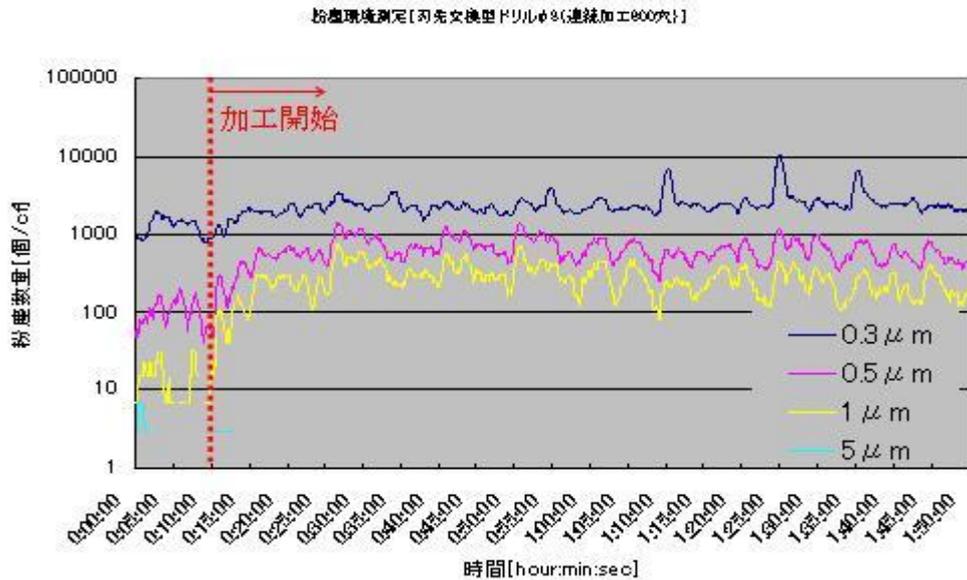
ワークと密着させるため
先端にスポンジ貼付け



写真 8 0 3 : 穿孔加工システムによる加工時の環境データ収集

[試験結果]

- ・クラス1，000付近で安定推移しており、大きな粉塵飛散は見られない
(グラフ803参照)



グラフ803：連続穿孔加工による環境データ

2. 切りくず捕集率

[試験要領]

刃先交換型ドリル（コーティングなし）を用い、吸塵を行いながら、約600穴の連続穿孔加工を実施した。その際、CFRP及び下敷を合わせた被削材料全体の加工前と加工後の重量をそれぞれ測定、粉塵捕集袋から袋の重量を差し引いたものとフィルタから回収した粉塵の重量を測定し、切りくず捕集率を確認した。

[試験結果]

捕集率 99.5%を達成した。

内訳	加工前 (A)	加工後 (B)	粉塵量 (A - B)
CFRP	328.05 g	180.15 g	147.90 g
下敷	252.87 g	207.08 g	45.79 g
発生粉塵			193.69 g
粉塵1 (捕集袋含まず)			191.13 g
粉塵2 (フィルタから回収)			1.67 g

捕集粉塵 192.80 g

$$\text{切りくず捕集率 (\%)} = 192.80 / 193.69 \times 100 = 99.54\%$$

8-3 研究成果

穿孔加工による粉塵捕集では、加工部周辺を先端治具で覆い密閉状態を保つことにより外部への粉塵飛散が抑制され、切りくず捕集率は目標値99%以上に対し99.5%と上回る結果となった。

吸引して人体に悪影響を及ぼすと云われている3μm以下の微細な粉塵は、吸塵装置の排気フィルタを高性能化することで抑制され、好適な環境下で穿孔作業が行えることが検証できた。

第9章 穿孔ロボットに関する調査

9-1 研究（調査）目的及び目標

平面あるいは曲面の穿孔に対応可能なロボットを開発するに当たっては、実際の航空機製造現場の情勢を知る必要がある。しかしながら、航空機製造現場に立ち入る事は各社の秘密保持等の問題から大変に難しい。その為、主に加工機（穿孔装置）メーカー等のウェブサイトから情報を得るべく、インターネット上で調査する。また、公開されている特許情報から、装置開発の方向性を探る。

9-2 実施内容および結果

分野特化型勉強会事業による第3回勉強会における岐阜大・深川 仁特認教授による講演「航空機用CFRPの孔開け」から、現在の航空機製造現場で使用されている穿孔装置メーカー等の情報を得ることが出来た。それらの情報からメーカーウェブサイトを探し出し、さらに関連の出願特許情報の調査をする事が出来た。

調査の結果、大まかに翼の加工、胴体の加工、胴体の結合、フラップ・ハッチ等の小部品等に分類される各加工部位に於いて独自の装置が使用されている事が判った。

9-3 研究（調査）成果

当研究開発の穿孔装置は集塵問題に着目した点に於いて優れており、集塵効率に関しては当初目標を超える99.5%以上を達成する事ができた。その小型軽量の装置の特長から考えると、翼・胴体等の大型部品に対応する穿孔装置への適用は優位性が低いと思われる。むしろより小型な、例えば可動範囲が数m程度の多関節ロボット用の穿孔専用エンドエフェクターとして、先進各社と共同開発をする事で、小型軽量・高集塵効率等の性能を発揮して航空機製造業界に貢献できると考えられる。また、多元的曲面を持つ加工部位に対して、独自の構想に基づいて研究中の面直位置合わせ機構を完成させる事が出来れば、ロボットメーカーを問わず搭載可能になり、航空機業界はもとより、今後CFRPの導入が想定される自動車業界にも参入出来る。

※エンドエフェクタ：ロボットのアーム先端に取り付ける効果器。

第10章 全体総括

10-1 成果の総括

本研究開発は平成22年度の補正予算にて採択されたもので、研究開発期間が非常に短いにもかかわらず、研究成果が提案した目標値に達することができたのは、本研究の提案、採択の以前から本研究メンバーにおいて1年間の予備勉強会（地域産業の競争力を目指した新産業発掘のための調査事業・分野特化型勉強会事業）を実施していたことに加え、本プロジェクトの構想、研究開発に参画したメンバーの責任感の強さと弛まぬ努力の結果によるものと判断される。

難切削材であるCFRPの穿孔には、長寿命のドリルの開発と穿孔時に発生する切りくずを工具内部より吸引出来るドリル、穿孔装置、吸塵装置の開発が必要不可欠と考えた。

まず、長寿命のドリルを開発するために、切削工具用超硬合金の開発から手掛けることとし、株式会社サン・アロイにて、通常使用されているWC粉末より極めて微細な0.2μm以下の微粉末を高品位に成形、焼結する技術を開発した。

耐摩耗性や刃立ち性の向上、硬さと靱性の向上を狙い、材料特性としては『硬さHRA92.0以上、抗折力3.0GPa以上』を目標に開発を進めた。

名古屋市工業研究所の評価結果は密度、硬さ、抗折力とも目標を上回り、また、工具先端の丸みも0.5μmと鋭利な刃が作製可能となった。また、この素材にてパイプ形状、刃先交換形状、新たに開発することとなった段付き形状の成形体も試作出来た。

これら超硬成形体はビーティーティー株式会社にて、ダイヤモンド砥石を用い、外周、溝および先端刃の成型研削を実施し、各種形状のドリルを試作した。

電子顕微鏡（SEM）、電子線マイクロアナライザー（EDS）など最先端の測定装置を駆使して、刃先エッジ部分の観察、刃先表面の元素の定性分析を行い、その結果を基に、超硬工具の刃先の鋭利化を可能にする研削条件および研削方法を開発し、刃先丸みを0.5μm以下に鋭利化することが出来た。

パイプ形状型ドリル、刃先交換型ドリル、中空面取りドリル、中空段付きドリルなど予定していた全ての形状のドリルを試作出来ており、PCDおよびcBNのチップを搭載したドリルも考案、試作している。

穿孔装置および吸塵装置の開発はUHT株式会社にて行い、夫々の試作が完了している。穿孔時に発生する切りくずを中空ドリルあるいは中空モータを通して、吸塵させるシステムが非常に有効であることが検証できた。

クリーンブース内で、穿孔試験、吸塵試験を行い、それらのデータを採取した。

当初、開発したドリルで数10孔まではきれいに穿孔出来たが、それ以上穿孔するとバリが目立つようになり苦勞した。刃先交換型ドリルで、その表面をダイヤモンドコートすることにより、1000孔/本の技術目標が達成できた（1200孔/本の実績）。

加工形状精度誤差、最大切削速度もそれぞれ技術目標を上回る結果が得られている。

切りくず捕集率は目標の99%を上回る99.5%を達成、パーティクルカウンタで測定した穿孔作業中の環境データも、作業前に設定したクラス1000程度で安定的に推移しており、作業環境の改善は満足の出る結果が得られた。

穿孔作業中、穿孔箇所周辺の温度をサーモレーサーにて追跡した。穿孔部分の温度は冷却エアーを導入することにより、導入しない場合の120℃から100℃程度に下がり、マトリックス樹脂への影響も低減出来た。

今後も補完研究を継続し、それぞれの課題ごとに最適化を追求するとともに、事業化に向けて、量産化、コスト低減などを進捗させる。エンドユーザーへのPR、加工試験の依頼を通して、真のユーザーニーズを商品に反映させる。

以上、企業サイドの開発に加え、名古屋市工業研究所は超硬合金焼結体の評価、穿孔加工面の粗さ評価を担当した。

大同大学は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を検討し、その結果を精密工学会で発表するという学術的な成果を挙げている。また、工具の変形や工具先端に掛かる応力のシミュレーションも検討した。

岐阜大学はラマン散乱を用い、ドリル穴周辺の損傷の定量的評価を実施した。

現状、これら学術的な成果をドリルの形状、構造などの改良、穿孔精度や捕集効率の向上に反映させるところまでには至っていないが、補完研究においては、これら成果を活用して行く所存である。

10-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況

10-2-1 工業所有権の取得状況

委託業務の成果として、特許を1件出願した。

発明等の名称：ドリル及びそれを用いた穿孔装置

出願日：平成23年5月18日

出願番号：特願2011-111798

出願人：NEXT I&D株式会社、ビーティーティー株式会社

10-2-2 対外発表の状況

金沢大学にて開催される精密工学会平成23年度秋季大会にて発表

「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」

○ 羽賀大介（大同大院）、井上孝司（大同大）、柿本政計（NEXT I&D）、

松本二三秋（UHT株）、青木渉（BTT株）

平成23年9月20日に発表

10-2-3 展示会への出展状況

メカトロテックジャパン2011

上記展示会のCFRP加工コーナー、コンセプトゾーンに出展

出展企業：ビーティーティー株式会社

平成23年9月29日～10月2日に、ポートメッセなごやにて開催

10-3 今後の事業化に向けた取組み

本研究で開発した新規形状ドリル及び冷氣送気、粉塵捕集装置付き穿孔装置の製品化については、すでにアドバイザー企業と研究メンバー企業の取引先（航空機部品加工メーカー）に加工試験を依頼しており、商品化に向けてのシステム仕様の検討を行っている。また、航空機器を取り扱う商社を通じ大手ユーザーへのサンプル提供やモニタリングを実施し、中部経済産業局及びアドバイザーの（社）中部航空宇宙技術センターに協力をお願いし、国内外の航空宇宙産業におけるCFRPユーザーの動向調査及びアプローチを開始する。

CFRP材加工はボーイング787の就航に伴い、日本三大重工の加工需要が増大しており、本製品の本格受注に備え、製品の量産化を目指し、さらなる研究を実施する。