

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560118

研究課題名(和文) プラストによるCFRP加工メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of a processing model based on abrasive erosion phenomenon for CFRP

研究代表者

深川 仁 (hitoshi, fukagawa)

岐阜大学・複合材料研究センター・特任教授

研究者番号：90592345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：航空機部品等に使われるCFRPに対する孔加工技術を効率的に行う一手法としてプラスト加工を、ドリル等の一般的手段と比較した結果、CFRPに1-2mmの小径孔加工を行うには、プラストによる方法が一つの効率的な方法として適することがわかった。しかし、プラストによる孔加工工程には不明点が多く、CFRP板に対し微細砥粒を用いた直噴式プラスト加工で、孔加工が進展する過程を観察し、微細エロージョン過程としての材料除去メカニズムを昨年度まで検討してきた。

そこでプラストによる孔加工メカニズムをより明確にすべく、材料と加工条件を変え、理論式との比較を行い、エロージョン摩耗による孔加工進展メカニズムを詳細に分析した。

研究成果の概要(英文)：Composite materials, such as CFRP, are hard-to-cut materials but their specific strength is useful. Drill tools are usually used to generate small holes of 1-2 mm diameter, but tool abrasion occurs early, causing problems of processing costs. Comparing other processing methods, it was revealed in the previous report that it was possible to effectively generate large quantities of small size holes using blasting. However, there have been many unknown mechanisms about this blast processing. In the present report, we investigated the material-removing mechanisms of the blast from the viewpoint of the erosion abrasion, considering the most suitable method through changing work materials and processing conditions such as media and pressure.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 生産工学 加工学

キーワード：CFRP プラスト 孔加工 ドリル 砥粒 複合材料 航空機部品 エロージョン

科学研究費助成事業 研究成果報告書
 プラストによるCFRP加工メカニズムの解明

岐阜大学 研究推進・社会連携機構 特任教授 深川 仁 (FUKAGAWA Hitoshi)

1. 研究開始当初の背景

航空機を中心に適用拡大が進むCFRP(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が、難削材である故に精度を伴う孔加工には、特殊な機械加工装置やドリルが必要となるなど、材料費に加えて加工コストが高い事が普及のネックになっている。

- CFRPの孔あけには超硬ドリル、アブレッシブ・ウォータージェット(AWJ)、レーザ等を用いる方法が、国内外で研究されて来たが、それぞれ加工効率・コスト・品質等に課題がある。
- 一方プラスト加工はバリ取り・塗装剥離・下地処理・錆取り等に利用される既存技術であるが、CFRP加工に適用された例は殆ど無いため、被削材除去メカニズムまでは充分研究されていない。
- 近年、米国で美術工芸品を造る技術を応用し、特殊マスキング材をCFRPに貼り、加工範囲を制限しプラスト加工する方法が編み出され注目を集めている。しかし現場から生まれた技術として、その学術的な評価研究は行われておらず、加工面がテーパ形状を有する事から航空機等の工業用部品加工用に採用されるに至っていない。

2. 研究の目的

CFRPは難削材で、孔加工には特殊な機械やドリルが必要となり、加工コストが高い。小径孔の加工法としてプラストがあるが、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、近年開発された直圧式プラストを用いることで、効率的かつ大量に加工する手段に適していることが先行研究で明らかとなった¹⁾²⁾³⁾。例えば航空機エンジンの吸音材料として、ドリルで多数の小径孔(直径1~2mm, 精度±0.2mm)を板厚1~2mmのCFRP板に加工する工程が考えられるが、コストがかかるという課題がある⁴⁾。

そこで、プラスト加工が、航空機用CFRPの加工にも、適用できないかと考えたが、プラストによる孔加工過程には、不明な点が多い。

本研究では、微細砥粒を用いた直噴式プラストによる孔加工実験を試み、孔加工が進展する過程を、エロージョン摩耗の状況を測定観察する事で、材料除去メカニズムの過程を解明することにより、加工技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 実験装置・方法および試料

使用設備は、サクシオン式プラスト装置と比べ加工能力が高い直圧式サンドプラスト装置(ELP-1TR, (株)エルフォテック)を用いた。この装置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プ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1)。

被削材は治具上に固定して、装置の内部のコンベアに載せ送る一方で、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、一か所に連続集中して噴射する実験方法も採用している。

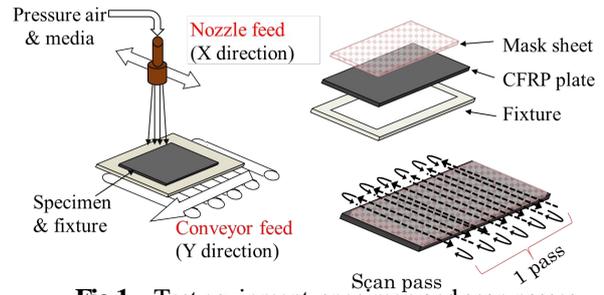


Fig.1 Test equipment, specimen and scan passes

マスク材には、直径0.5~2.0mmの孔に対してフォトリソ技術を用いて加工部のみに孔をあけたフィルムを形成しておき、CFRP板に貼り付けたものを使用した。マスク材料の製造プロセスを図2に示す。

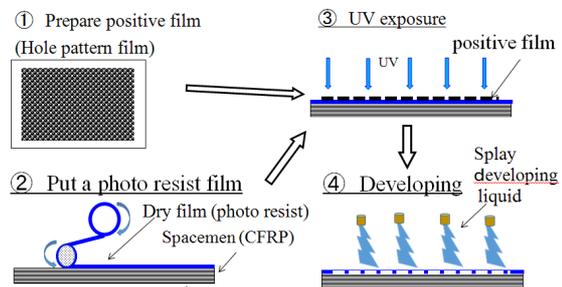


Fig.2 Fabrication process of the mask on the specimen

被削材には、航空機用のエポキシ系クロス材プリプレグを0°/45°/45°/0°の構成で4枚積層し板厚約1mmおよび0°/90°/90°/0°の構成で1.8mmのCFRP、比較用にUD材のCFRP・GFRP、エポキシ樹脂板なども用いた。実験条件を表1に、被削材を表2に示す。CFRPは1.8mm板厚を中心に、GFRPとエポキシ樹脂(Epoxyと記す)板を比較に用いた。加工条件としてノズル圧力と砥粒を変更した比較を行った。

Table 1 Blast test conditions

Mask material	Dry Film Resist	Acrylic polymer resin film, Thickness 0.1mm, 2 sheets,
Media	White alundum Oxide aluminum	WA #320, #600 density 3.9g/cm ³ 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, 0.36MPa
Feed speed	X axis	Nozzle feed 8m/min
	Y axis	Conveyor feed 20mm/min
Nozzle	Diameter & Nozzle distance	5mm and 10mm, 120mm (between nozzle and specimen)

Table 2 Material properties of specimens ^{3) 5)}

	Vf (%)	Young ratio (GPa)	Tensile strength (MPa)	Hardness (Hv)	Fracture toughness (MPa·m ^{1/2})
CF	100	230	4000	1235	0.80
CFRP (cloth)	60	137	2060	606	0.63
CFRP (UD)	58	70	1400	4102	0.34
GF ⁵⁾	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

CF: Carbon fiber GF: Glass Fiber CFRP: Carbon fiber cloth material and epoxy resin, Thickness 1-2mm

3.2 計測方法

孔断面の形状は3Dレーザ粗さ計(顕微鏡:VF-9700キーエンス)や光学顕微鏡を用いて測定した。また、高速度カメラ(オリンパス製)を用いて、**図3**に示す様なセッティングにて接写撮影して観察を行った。

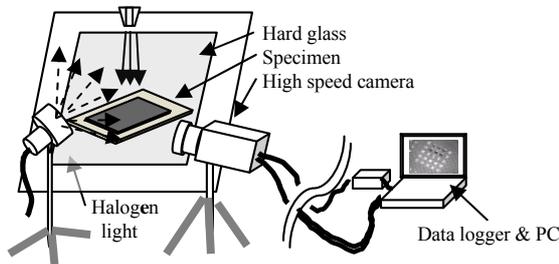


Fig. 3 Schematic diagram of photography kit using a high speed camera

4. 研究成果

4.1 レーザ顕微鏡による孔断面観測

ブラスト加工したCFRPの孔径と断面の代表事例として**図4**に示す。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パスで進展した。噴出圧力を0.15MPaに高めると、パスごとの加工深さが約1.7~2倍となった。

さらに加工部位によって深さのばらつきが見られた。このばらつきはクロス材の繊維束の折り目に沿って現れる傾向であった。

すなわち、CFRPの母材と強化繊維の材料特性の差に起因するものと考えられる。

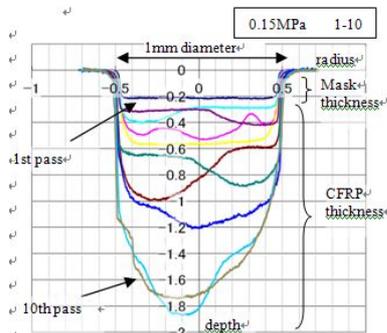


Fig.4 Cross sectional profile of 1mm diameter holes for each 1 to 10th blast pass at 0.15MPa

4.2 高速度カメラによる孔あけ工程観測結果

図5はマスク無しの場合の加工面上視写真である。加工状況を高速度カメラにて撮影した結果を**図6**および**図7**に示すが、比較のため**図6**はマスク無、**図7**はマスク有である。観察の結果、どちらも10数秒内で、エロージョン摩耗が進展し、孔の貫通が開始することを確認した。マスク無では、最初に積層1層目の縦横の織模様に沿って積層が0°方向の網目状の稜線が現われ、次に1層目に対して45°方向に積層した2層目、3層目の網目が順に現われ、最後に再び0°方向の4層目に達して、小さな孔が貫通した。さらにブラストを行うと、その小さな孔どうしがつながり大きな孔に進展する模様が観察された。また、加工中のCFRP板表面を顕微鏡で分析した結果、先にCF部分が摩耗進展し、マトリックスのエポキシ樹脂が多い部位の加工が遅れることが判明した。

マスク有では、孔内部でマスク無の場合と同様の現象が起きたが、孔の円筒外周部や、角孔では孔の隅が、先に摩耗進展するケースがあることや、最後にマトリックス樹脂だけの薄皮が切れ残るケースも観測された(**図8**)。どちらの場合も、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、**図9**の画像観察から、砥粒の反射角は加工面に対して20~45°の範囲内であるとわかった。

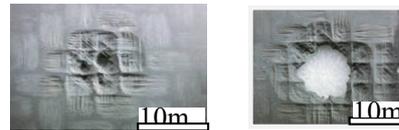


Fig.5 Pictures of the surface of CFRP after blast without masking

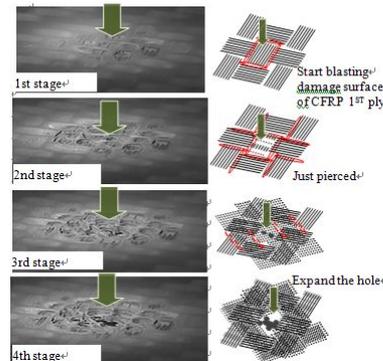


Fig.6 Piercing process of CFRP without masking

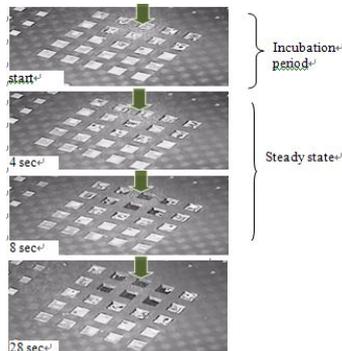


Fig.7 Piercing process of CFRP with masking (square and circle holes)

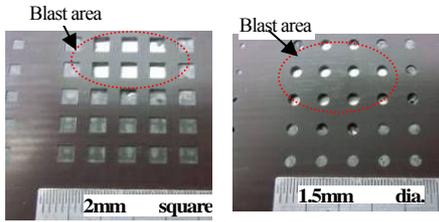


Fig.8 Pictures of the surface of CFRP after blast with masking

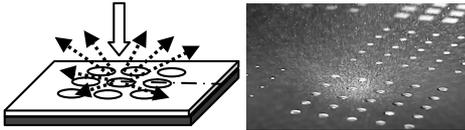


Fig.9 Flow and reflection of the blast media

4.3 被削材ごとの孔断面観察と摩耗体積の変化

CFRP(クロス材), CFRP(UD 材), GFRP, Epoxy(各材料板厚 1.8mm)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 10 に示す. 各被削材のパス数が増すごとに加工が進展する状況が観察された. 被削材の加工パスごとの摩耗体積を測定した結果を図 11 に示す. 強化繊維の織りやその材質及び有無により大きく摩耗進展速度が異なることがわかる.

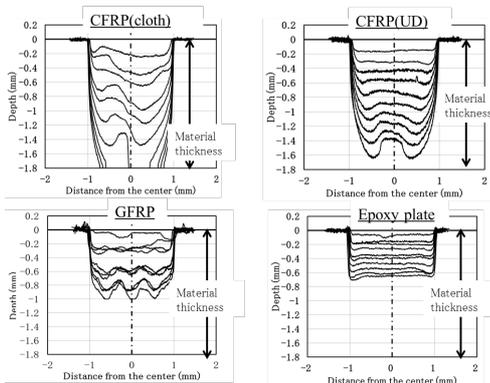


Fig.10 Processing section of every pass (laser microscope)³⁾

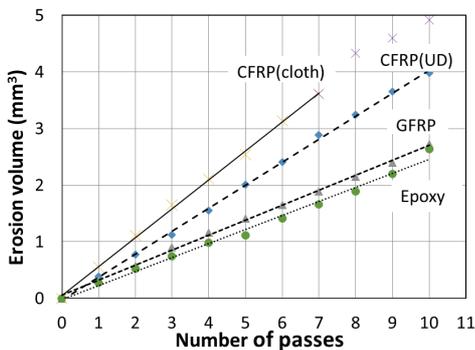


Fig.11 Erosion volume and the number of passes in changing test specimen³⁾

4.4 メディアの違いによる摩耗体積の計測

主なメディアは, WA#320(アルミナ直系 40 μ)であるが, 比較用に粒度の異なる WA#600(アルミナ直系 20 μ)と種類が異なる SiC#320 も使用した. 被削材は

CFRP(クロス材)で板厚 1.88 mm, 孔径 2 mm に対しパスごとの摩耗体積を図 12 に示す. メディアの粒径および材質の違いにも影響されることがわかる.

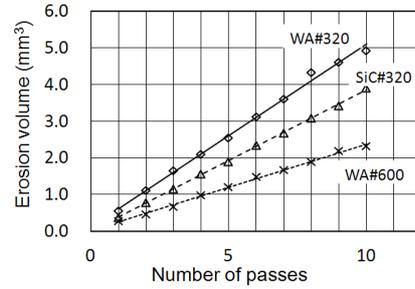


Fig.12 Erosion volume and the number of passes by each media

4.5 噴射圧力と加工孔径の違いによる摩耗深さの計測

ノズル部での設定の噴出圧力を変えた, 0.10MPa と 0.15MPa で比較を行ったところ, 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, 圧力が同じ 0.10MPa の場合, 加工孔直径が 0.5 mm と 1.0 mm では, 摩耗深さの差はほとんどなかった. 結果を図 13 に示す. マクロ的には, エロージョンの速度は孔径より, ノズルの圧力の影響が大きいことが判明した.

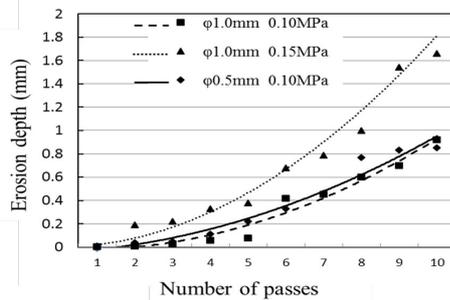


Fig.13 Erosion depth and number of passes at 0.10MPa & 0.15MPa

4.6 エロージョン摩耗モデルに基づく進展過程と潜伏期

図 4 などにに基づきエロージョンの深さをまとめたカーブを図 13 に示した. プラストによる 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遅く, 一定時間後に進み始めることが確認された. これはエロージョンカーブに潜伏期間があるとする報告(図 14)⁶⁾と傾向は似ているが, 圧力を 0.15MPa に高めた場合は, この潜伏期間がほとんどないことも確認された.

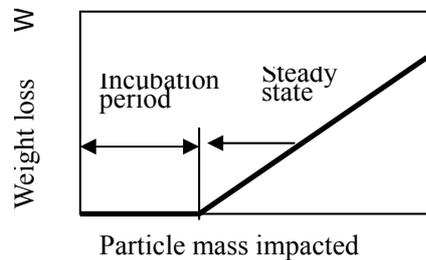


Fig.14 Typical erosion curve by "Erosion Behavior of FRP's"⁷⁾

4.7 加工孔寸法精度と加工時間

加工したCFRPの孔径ならびにマスク材寸法を顕微鏡で測定した結果、加工時間は送りを行わず一か所にプラストを集中投下する方法で、1MPaの圧力では、孔入口では $2 \pm 0.05\text{mm}$ 以内、出口では $+0.05 \sim -0.25\text{mm}$ の公差に入り、孔はテーパ状でテーパ角はおおよそ $-0.03 \sim 3.4^\circ$ であった。なお、孔は板厚2mmの場合、約30秒以内で貫通、その後孔が広がるが、入口側の変化は僅かだが、出口側は加工時間により拡大し、入り口側寸法に近づく。その結果、テーパ角が時間経過とともに小さくなり、さらに加工を続けると、テーパ角はマイナスに転じた。

4.8 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先に進む傾向が一部みられたが、プ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(図15)。しかし、2mmの角孔では、送りをかけた状態、すなわち偏析が起きにくい条件下でも、孔の隅でエロージョンが進むケースが観察された。これは、粒子の運動観察結果から砥粒が跳ね返る際に壁に沿って、砥粒密度が高くなるためではないかと推定される。ただし、カメラ解像度の限界から孔内部の砥粒挙動の確認は充分できず、より解像度の高い高速度カメラでの砥粒流れの観測が課題である。

4.9 被削材によるエロージョンの差

図11から、各供試体の摩耗体積は加工パス数と比例関係にあるとわかる。CFRPとEpoxyを比較すると、CFRPがEpoxyに比べ約2倍の速さの摩耗体積を示す。またGFRPと比べても2倍ほどの速さを示す。すなわち摩耗量の差はCFに起因すると考えられる。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、プラスト砥粒を弾き、摩耗の進展が更に遅いことがわかる。

CF(カーボン繊維)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であることに起因すると考える⁵⁾。なお、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(1)に示されるように $5/4$ 乗に比例するとされている⁵⁾

$$Q \propto \pi l_c^2 d_c \propto \frac{\rho^i E^{5/4} v_p}{H^{17/12} K_c} \rho^p^{1/6} \gamma_p^{1/2} v_p^{7/3} \quad (1)$$

ここで、 l_c はクラックの長さ、 d_c クラックの深さ、 ρ^i と ρ^p は基材と砥粒の質量、 ρ 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。CFとエポキシ樹脂とはヤング率の比が $230/3.9=59$ なので、 Q の比が $59^{5/4} \approx 163$ と桁違いの差である事が判る⁹⁾。

なお、プラスト過程で、CFRPの繊維模様に沿ったマトリックスが出る原因は、図16に示すようなクロス材の1ブロックを見ると、エポキシ樹脂リッチの部分とCFリッチの場所が、立体的に交互に分布することから理解できる。この現象は、クロス材プリプレグの積層方向に沿って現れている。

4.10 噴出圧力と加工孔径の違いの影響

図13から、エロージョン速度は孔径より、ノズル圧力の影響が大きいことがわかった。

噴出圧力の変化の影響は、一般に流速 v_p が圧力 p の $3/4$ 乗に比例し⁸⁾、さらにエロージョン率 Q は噴射圧力の $7/3$ 乗に比例する⁷⁾ことを考慮して、流速 v_p は、式(2)のように示される⁸⁾。

$$v_p = K \cdot D^{1/3} \cdot p^{3/4} \quad (2)$$

式(1)と式(2)より、 Q は次の関係にある。

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

したがって圧力が0.10から0.15MPaに高まると、加工深さがエロージョン量は2.03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、ほぼ一致する。

4.11 メディアの違いによる影響

図12から、メディアのWA#320とWA#600を比較すると、直径が $40\mu\text{m}$ と $20\mu\text{m}$ の差(質量換算で8倍)であり、2倍以上の大きな差ができたと考える。さらに、WA#320とSiC#320の違いを考えると、粒径サイズは同じものの、比重差が3.9と3.2で、その比が1.2であることなどに一因があると考えられる。

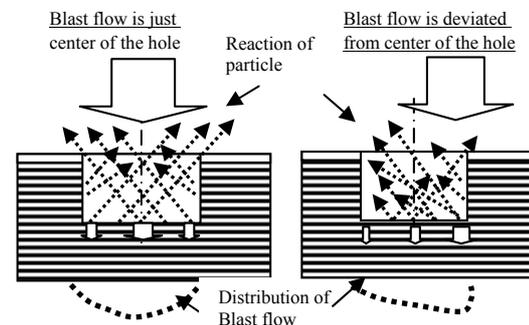


Fig.15 Blast flow deviation and erosion deviation and

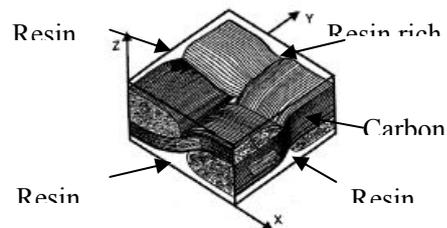


Fig. 16 Macro structures of CFRP consist of Carbon fiber and epoxy resin

4.12 ケーススタディーと今後の試験

以上の結果より、直圧式サンドプラスト装置を用い、微細砥粒を高い圧力で噴射することで、CFRPに対して充分な能率での加工が可能であることが示された。今後、実際の航空機エンジンカウルに用いられる吸音パネル(図17)に対する加工方法の確立を目指す。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、本研究結果はその領域をカバーしており、今後は曲率のある部品やハニカムコアとの組合せや接着工程を考慮した加工プロセスの確立を目指す。さらに必要とする吸音性能が出るか確認試験を行なう計画である。

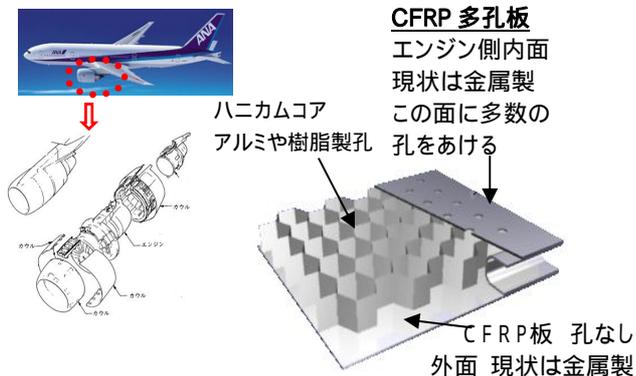


Fig.17 Sound-absorbing panels and aircraft engine cowl

結言

以上の結果、次のことが明らかとなった。

- (1) プラストによる航空機用部品用 CFRP (厚さ 1 ~ 2mm) に対して, 1 ~ 2mm の小径孔加工が可能。
- (2) CFRP のプラスト孔加工過程では, カーボン繊維の方がエポキシ樹脂より先にエロージョン摩耗が進み, ヤング率から考えられるその差は 163 倍。
- (3) プ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。また, マスク材の孔側壁の影響により, プラスト粒子の反射から粒子密度の差が生じて, 孔外周が中央より先に摩耗する。
- (4) CFRP の織物の位置により, 加工時間に若干のばらつきが生じるが, それは樹脂の密度が織物の場所により一定パターンで異なるため。
- (5) 被削材とメディアとノズル圧力に, エロージョン速度は大きく支配される。被削材の CFRP は GFRP や Epoxy に比べ約 2 倍の速さで摩耗し, メディアの WA は同一粒径 SiC の 2 倍の効率, ノズル圧が 1.5 倍になると効率は 2 倍以上。
- (6) プラスト加工を利用することで, 航空機材料である CFRP に小径の孔加工を効率よく行う事ができることが明らかになった。

今後この本技術を用いて, エンジンカウルの吸音材料に適用するための実用化研究を行う予定である。

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)262-267
- 2) 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄, 加藤敦司, 精密工学会春季大会学術講演予稿集 (2012) B16
- 3) 加藤敦司, 深川仁, 清水啓祐, 山田伊久子, 加藤隆雄, プラスト加工による 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予稿集 (2012) C12
- 4) 深川仁: 特開 2002-337094, 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
- 5) 日本金属学会編, 金属データブック, 丸善, (1993) 203
- 6) 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 (1991) 40, 449, 205-210
- 7) 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), 444-450

- 8) 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)
- 9) 末益博志: 入門複合材料の力学, 倍風館 (2009) 49, 86

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線) [雑誌論文] (計 2 件)

- 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)262-267 (査読付き論文)
- 2) "Development of Hole Generation Technology for Aircraft CFRP Parts" Key Engineering Materials, (2012) Vol. 523-524 (査読付き論文) [学会発表] (計 7 件)
- 1) 深川仁, 廣垣俊樹, 山田伊久子, 加藤敦司, 清水啓祐, 西川幸佑, プラストによる CFRP など複合材料の小径孔あけの研究: エロージョン摩耗現象の解明, 精密工学会春季大会学術講演予稿集, 2014 年 3 月 18 日, 東京大学
- 2) 清水啓祐, 山田伊久子, 深川仁, 各種プラスト砥粒を用いた CFRP への同時多数小径孔加工の研究, 機械学会東海支部, 2014 年 3 月 18 日, 大同大学
- 3) 西川幸佑, 山田伊久子, 深川仁, プ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, 機械学会東海支部学生会, 2014 年 3 月 17 日, 大同大学
- 4) 加藤敦司, 清水啓祐, 加藤隆雄, 深川仁, プラスト加工による CFRP 板の複数同時穴あけ工程の分析, 砥粒加工学会 ABTEC2013, C122013 年 8 月 27 日 首都大学
- 5) 清水啓祐, 加藤敦司, 加藤隆雄, 深川仁, プラスト加工による CFRP 板への小径穴加工工程の検討, 機械学会東海支部学生会, 2013 年 3 月 17 日 三重大学
- 6) 加藤敦司, 清水啓祐, 加藤隆雄, 深川仁, プラスト加工による CFRP 板の穴あけ, 機械学会東海支部学生会, 2013 年 3 月 18 日, 三重大学
- 7) 深川仁, 廣垣俊樹, 加藤隆雄, 加藤敦司, プラストによる航空機用 CFRP の小径穴あけ, 精密工学会春季大会 B16, 2012 年 3 月 15 日, 首都大学 [図書] (計 1 件) 「炭素繊維 製造・応用技術の最前線」第 4 章の 3 機械加工 監修: 前田豊 シーエムシー出版 2013 年 PP57-61 [産業財産権] 出願 (計 0 件) 取得状計 0 件 [その他] ホームページ等 http://www1.gifu-u.ac.jp/~g_cc/dl/GCC_seeds.pdf

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 深川仁 (Fukagawa Hitoshi) 岐阜大学 複合材料研究センター・特任教授 研究者番号: 90592345
- (2) 研究分担者: 山田伊久子 (Yamada Ikuko) 岐阜大学・複合材料研究センター・特定研究補佐員 研究者番号:
- (3) 連携研究者: 廣垣俊樹 (Hirogaki Toshiki) 同志社大学・理工学部・教授 研究者番号: 802735172