

# 強化プラスチック (GFRP・CFRP) の 穴あけに関する研究 — 加工条件の影響 —

横尾 嘉道\* 瀬戸 雅文\*\*  
田戸 保\*\* 佐久間 敬三\*\*\*

Study on Drilling of Fiber Reinforced Plastics (GFRP and CFRP)  
— Effect of Cutting Conditions —

Yoshimichi Yokoo, Masafumi Seto  
Tomotsu Tado, Keizo Sakuma

## Abstract

This paper describes the effect of cutting conditions on drilling characteristics of FRP. Carbide drill (K01) wear, employed to examine drill wear, cutting force and hole quality, i.e. excite burr and inner surface roughness.

Thinking over the economic utility, the fastest spindle speed (3500 rpm) and feed rate (0.15 mm/rev) are best in the tested conditions.

## 1. 緒言

ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) および炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は前論文<sup>1)</sup>に示したごとく機械的・物理的ならびに化学的性質がすぐれているため、航空機・船舶ならびに自動車などの産業機器への需要がますます増大している。そしてこれら機器の強化プラスチックでは穴あけ加工を必要とすることは多いが、これらの材料の穴あけに関する資料は非常に少ない。

そこで本研究では超硬ドリル (K01) を使用し、主軸回転数および送りを変えて GFRP および CFRP の穴あけ加工を行い、ドリル切刃の摩耗形態、摩耗幅の変化、トルクおよびスラストの変化、加工穴内面粗さおよび加工穴出口の切残しなどを調べ検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験に使用した工作機械は牧野フライス製作所製 MH-20 型高速立フライス盤である。実験用ドリルは表 1 に示すような超硬ドリル K01 種を用いた。被削材は表 2 に示すような GFRP および CERP の積層板で、その寸法は厚さ 10 mm, 幅 15~60 mm, 長さ 160 mm である。

実験の方法としては、はじめに主軸回転数を 3500 rpm 一定として、送りを 0.02, 0.05, 0.10 および 0.15 mm/rev の 4 通りに変化させて 500 回まで穴あけを行った。次に、送りを 0.05 mm/rev 一定として主軸回転数を 1080, 1950 および 3500 rpm の 3 通りに変化させて同様に 500 回まで穴あけを行った。これらの実験はすべて乾式で行った。切削抵抗 (トルクおよびスラスト) ならびに穴内面粗さの測定はすべての加工条件に対して 1, 100, 300 および 500 回目の穴に対して行った。加工穴出口の切残しの観察は、すべての加工条件に対して、1, 50, 100, 150, 200 と 50 ごとに 500 回目の穴まで行った。ドリル切刃逃げ面ならびにチゼルエッジ摩耗幅の測定は、主軸回

\* 宇部工業高等専門学校名誉教授

\*\* 宇部工業高等専門学校機械工学科

\*\*\* 福岡工業大学電子機械工学科

表1 試験用ドリルの諸元

	超硬(ソリッド)
種類	K 01
直径 (mm)	3
全長 (mm)	45
みぞ長 (mm)	25
心厚 (mm)	0.6
先端角	118°
ねじれ角	30°
逃げ角	10°
研削方法	二段平面研削
突出し長さ (mm)	35

回転数3500 rpm, 送り0.05 mm/rev のときは, 上記のうち1回を除いた他の回について行い, 他の加工条件等の時には500回の穴あけ終了時に行った。

ドリル切刃の逃げ面摩耗幅は, 両切刃中央部の摩耗幅を測定し, その平均値を摩耗量として採用した。チゼルエッジの摩耗幅としては, 両エッジ端の最大幅の平均値を摩耗量として採用した。摩耗部の測定および観察には主として工具顕微鏡 (オリンパス光学 STM 形) を使用した。切削抵抗の測定にはひずみゲージ式動力計 (自製) を用い, 動ひずみ測定器を通じて電磁オシログラフに記録した。GFRP および CFRP の穴あけにおいては, トルクおよびスラスト曲線の形態が種々に変化する。したがって本実験では, ドリル切刃先端が工作物に接した瞬間よりドリル先端が工作物下端部に到着するまでの平均値をトルクおよびスラストの値として採用した。また, 穴内面粗さは東京精密製サーフコム 2B 形を使用して中心線平均粗さ (Ra) にて測定し, 穴出口の切残しについては目視によって観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ドリル切刃の摩耗形態

主軸回転数を3500 rpm 一定として, 送りを0.02, 0.05, 0.10および0.15 mm/rev と変化して GFRP および CFRP を500回穴あけした後のドリル逃げ面の摩耗状態を図1に示す。同図より CFRP を穴あけした場合の逃げ面摩耗の状態は GFRP のそれとは形態も異なり, 全般的に切刃部が丸味を帯びている。また, 前者の逃げ面全体の摩耗幅は後者のそれより相当大きいことがわかる。また同図より, いずれの材料においても, 送りが大きくなるに

表2 被削材の種類と組織

	ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)	炭素繊維強化プラスチック(CFRP)
マトリックス	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂
板厚 (mm)	10	10
繊維含有率(%)	約35	約55
層数	50	24
硬さ H <sub>RE</sub>	102	111

従って逃げ面摩耗幅が小さくなっていることがわかる。本実験では一定厚さの材料を穴加工していることから, 送り量 (1回転当り) が大きくなると切刃の接触距離が短くなる。したがって送り量の増大は切削距離を短くし, 図1に示すように送り量が大きくなるに伴って逃げ面摩耗幅が小さくなったものと考えられる。

次に送りを0.05 mm/rev 一定として, 主軸回転数を1080, 1950および3500 rpm と変化させて GFRP および CFRP を500回穴あけした後のドリル逃げ面の摩耗状態を図2に示す。同図においても摩耗形態の相違は図1と同様であるが, いずれの材料においても, 主軸回転数の増加につれて, 逃げ面全体の摩耗幅は漸次減少していることがわかる。これについては, 主軸回転数の増加につれてドリル切刃の接触時間が減少するため, 逃げ面の摩耗幅は小さくなったものと考えられる。

#### 3.2 逃げ面およびチゼルエッジ摩耗幅の変化

主軸回転数を3500 rpm, 送りを0.05 mm/rev と共に一定にして, GFRP および CFRP を500回まで穴あけした場合のドリル逃げ面およびチゼルエッジの摩耗幅と穴あけ回数との関係を図3に示す。図よりわかるように, 両材種とも, 両摩耗幅は穴あけ回数の増加に対して漸増の傾向にあり, 逃げ面摩耗幅がチゼルエッジ摩耗幅の約2倍の値を示している。また被削材の比較においては, CFRP を穴あけした場合の摩耗量の変化は著しく, その値は GFRP を穴あけした場合の約4倍であることがわかる。

次に, 主軸回転数を3500 rpm 一定として, 送りを0.02, 1.05, 0.10および0.15 mm/rev と変化させて GFRP ならびに CFRP を500回穴あけした場合のドリル逃げ面およびチゼルエッジ摩耗幅の変化を図4に示す。同図より逃げ面摩耗幅は送りの増大に伴って両材種とも減少していることがわかる。これは先に述べたように, 送りの増大によって切刃の接触距離が減少するため, 摩耗幅は減少

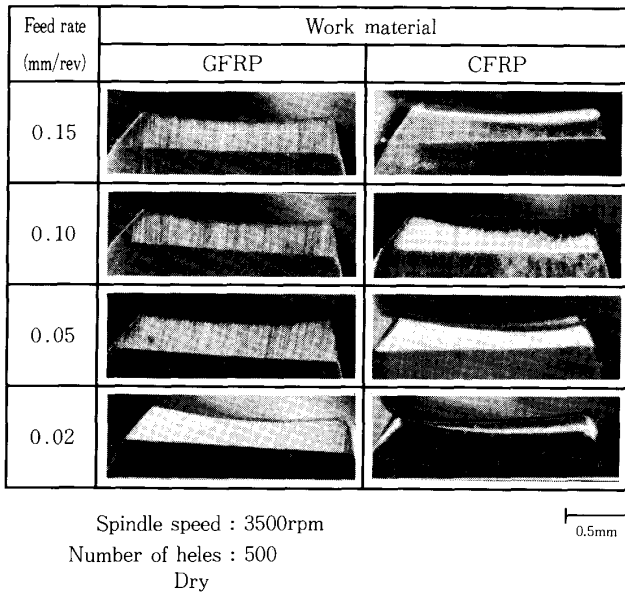


図1 送りを変化させた場合の超硬ドリル逃げ面の摩耗形態

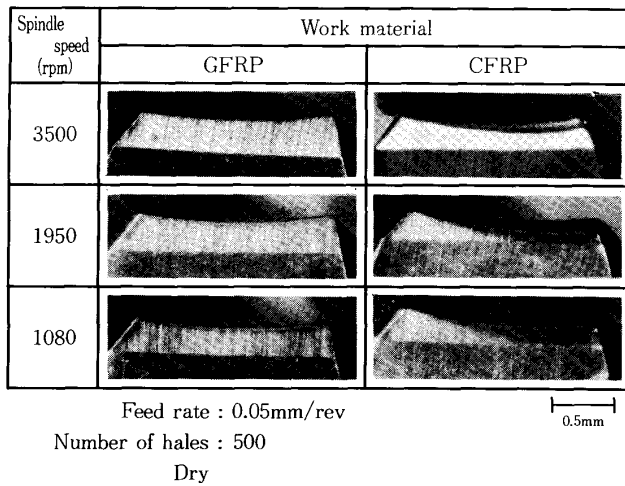


図2 主軸回転数を変化させた場合の超硬ドリル逃げ面の摩耗形態

したものと考えられる。また同図より CFRP の場合には、送りの増大に伴ってチゼルエッジの摩耗幅は漸次減少しているが、GERP の場合にはほぼ一定の値を示している。これについては、逃げ面に比べて、チゼルエッジはスラストの影響を受けやすく、スラスト増大の影響と切刃接触距離減少の影響とが打消し合ってほぼ一定の値を示したものと考えられる。

次に送りを 0.05 mm/rev 一定として、主軸回転数を 1080, 1950 および 3500 rpm と変化させて GFRP および CFRP を 500 回穴あけした場合のドリル逃げ面およびチゼルエッジ摩耗幅の変化を図 5 に示す。同図よりわかる

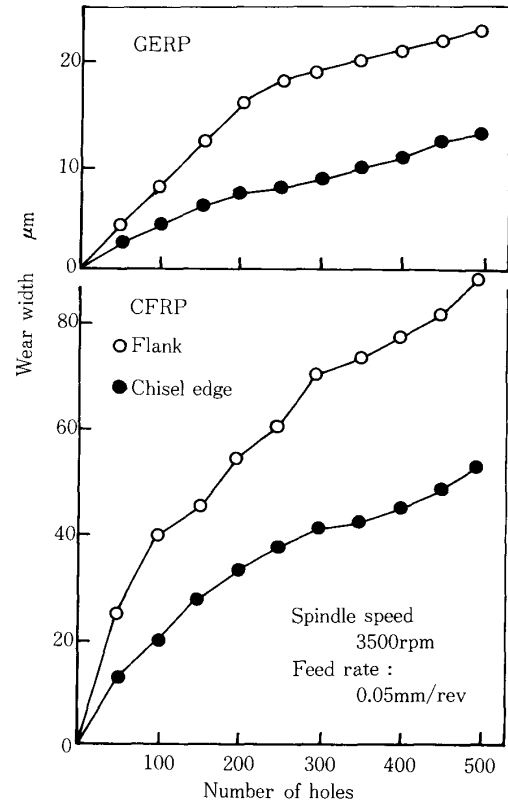


図3 GFRP および CFRP を穴あけした場合の穴あけ回数とドリル摩耗幅との関係

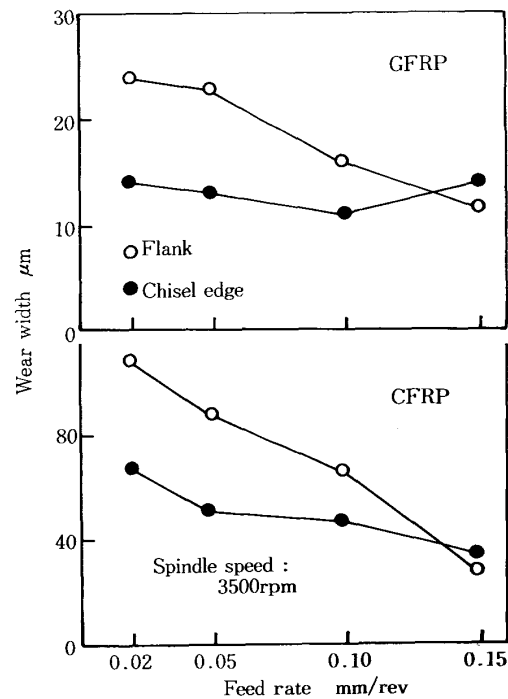


図4 GFRP および CFRP を 500 回穴あけした場合のドリル摩耗幅と送りとの関係

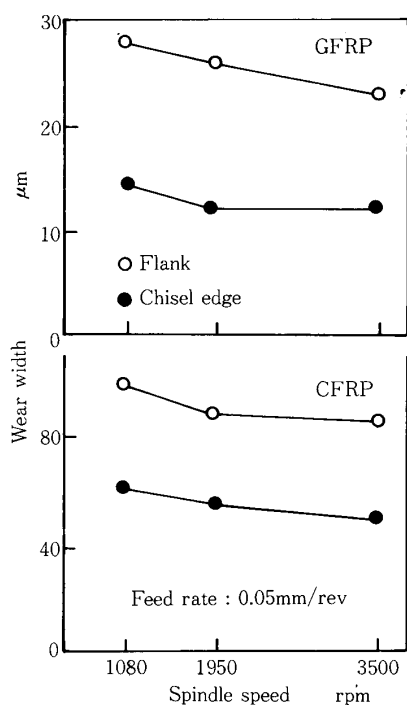


図5 GFRP および CFRP を500回穴あけした場合のドリル摩耗幅と主軸回転数との関係

ように、両材種ともに、主軸回転数の増加に伴って、両摩耗幅は僅かではあるが減少している。主軸回転数一定の場合と異なり、送り一定の場合は切刃の接触距離は一定となるが、主軸回転数の増加につれて、切刃の接触時間は減少する。この接触時間の減少のため、逃げ面およびチゼルエッジの摩耗幅は、主軸回転数の増加につれて、減少するものと考えられる。

### 3.3 トルクおよびスラストの変化

超硬ドリルを用いて、GFRP および CFRP を穴あけした場合のトルクおよびスラストと穴あけ回数との関係について前報<sup>1)</sup>に示した通りであるのでここでは省略する。

そこで、主軸回転数3500 rpm 一定として、送りを0.02, 0.05, 0.01, 0.15 mm/rev と変化させて GFRP および CFRP を穴あけした場合の送りとトルクとの関係を図6に、送りとスラストの関係を図7に示す。図6よりわかるように、いずれの材料においても、全般的には送りを増すにつれてトルクは増加の傾向にあるが、0.02 mm/rev の送りの時にはこれと反対の傾向がでてくる。これについては、送り0.02 mm/rev の時には切削開始前の上すべり領域が他より大きいため、工具摩耗を助長し、これがトルクの増大をもたらしたのと考えられる。次

に、図7からわかるように、両材種とも送りの増加に伴ないスラストは増加の傾向にある、GFRP では切削回数による影響は非常に少ないが、CFRP では切削回数の増加に伴って、スラストは大きく増加している、とくに切削回数の初期においてその増加割合は大きくなっている。これは図3の切削回数と摩耗量の関係図で切削回数300回までの摩耗の増加割合が大きいことから理解できる。

次に送りを0.05 mm/rev 一定として、主軸回転数を1080, 1950および3500 rpm と変えて GFRP および CFRP を穴あけした時の主軸回転数とトルクとの関係を図8に、主軸回転数とスラストの関係を図9に示す。図8より、切削初期においては、両材種とも、主軸回転数の変化による影響はほとんど見られないが、切削回数が多くなれば、両材種とも主軸回転数の増加に伴いトルクは減少の傾向にある。これは主軸回転数の増加に伴ないドリル切刃の摩耗が減少するためではないかと考える。次に図9よりわかるように、両材種とも主軸回転数の増加につれてスラストは僅かに増加の傾向にある。そして、GFRP に比較して、CFRP のスラストは切削回数の増加に伴い大きく増加している。とくに切削の初期においてその増加割合が大きくなっている。これは材質的なもので、ガラス繊維と炭素繊維の相違およびの含有量(層数など)の相違によるものと考えられる。

### 3.4 加工穴内面粗さの変化

GFRP および CFRP を超硬ドリルで穴あけした場合の穴あけ回数と加工穴内面粗さとの関係はすでに報告<sup>2)</sup>した。GFRP の場合には、第1穴から第100穴までは粗さが急増するが、その後はほぼ横ばいに推移し、CFRP の場合には、粗さは200穴まで漸増し、その後はほぼ一定となっている。

主軸回転数を3500 rpm 一定として、送りを0.02, 0.05, 0.10および0.15 mm/rev と変えて GFRP および CFRP を穴あけした場合の送りと穴内面粗さとの関係を図10に示す。同図より GFRP の場合には、第1穴ではそれほど粗さの違いが現はれていないが、第100~500穴では送りが小さくなる程、粗さだ大きくなっているのがわかる。これについては、送りが小さくなる程、ドリルの工作物に接触する時間が長くなり、摩擦熱を発生し、それらがマトリックスであるエポキシ樹脂の分解・気化<sup>3)</sup>を促し、露出したガラス繊維の剛直さが粗さを大きくしていると考えられる。一方 CFRP の場合には、穴内面粗さは全

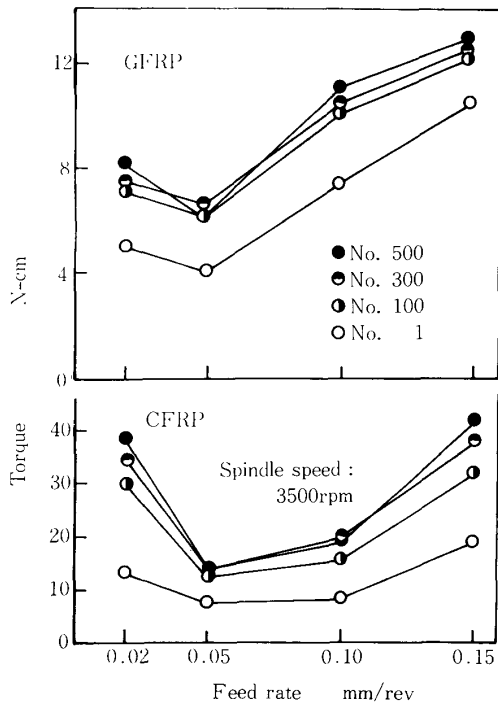


図6 GFRP および CFRPを穴あけした場合のトルクと送りとの関係

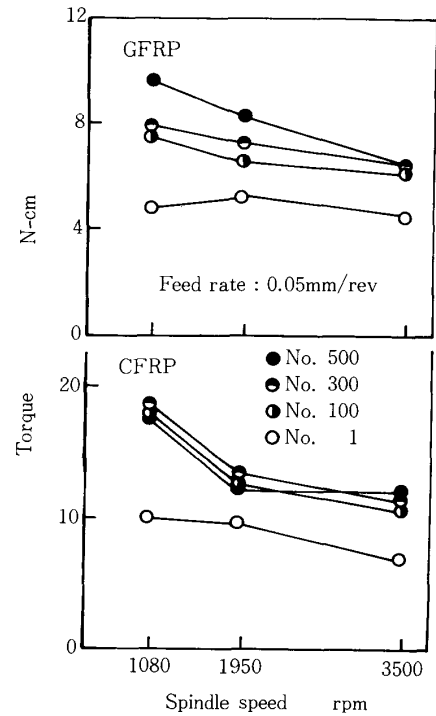


図8 GFRP および CFRPを穴あけした場合のトルクと主軸回転数との関係

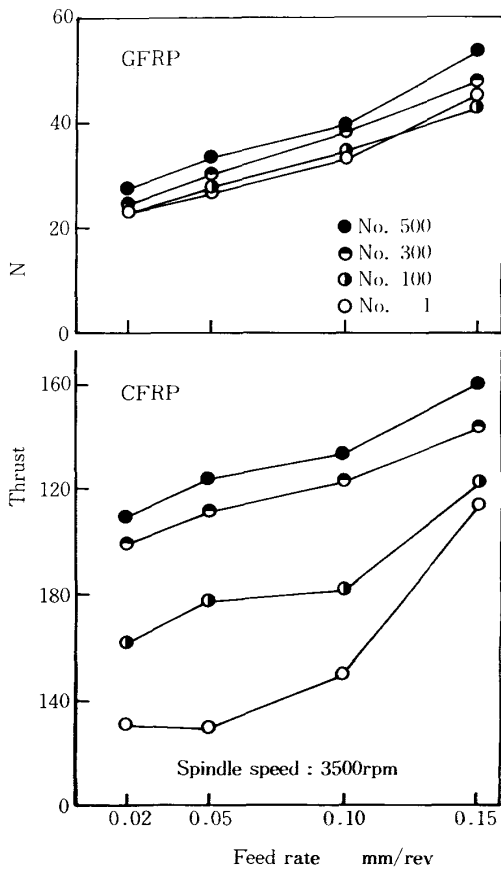


図7 GFRP および CFRPを穴あけした場合のスラストと送りとの関係

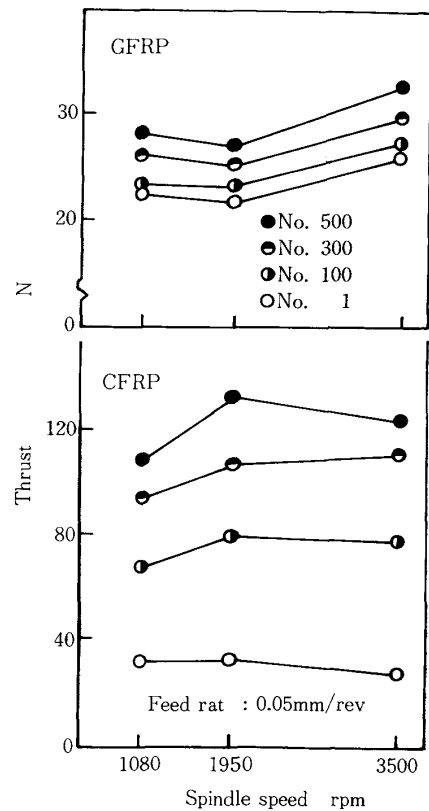


図9 GFRP および CFRPを穴あけした場合のスラストと主軸回転数との関係

一般的に穴あけ回数とともに漸増しているが、送りの変化に対してはほとんど変化していない。これについては、炭素繊維がガラス繊維より熱伝導性に優れており、また柔軟であるためと考える。

次に送りを0.05 mm/rev一定として、主軸回転数を1080, 1950および3500 rpmと変化させて、GFRPおよびCFRPを穴あけした場合の主軸回転数と穴内面粗さとの関係を図11に示す。同図よりGFRPの場合には、第1穴においては穴内面粗さの変化は僅少であるが、第100~500穴においては回転数の減少につれて粗さが相当減少している。このことは、回転数の減少につれて前述の摩擦熱が減少し、エポキシ樹脂の分解・気化も少くなるためであると考えられる。一方CFRPの場合には、穴内面粗さは回転数の減少に対して僅かに減少の傾向にあらが、GFRPの場合に比べるとほとんど変わらないといえる。これについても炭素繊維の熱伝導性と柔軟性に原因があるものと考えられる。

### 3.5 加工穴における切残し

穴あけ加工した場合には加工穴の寸法精度の外にも加工穴周辺における種々の異状が問題になることが多い。GFRPおよびCFRPを穴あけした場合にはその周辺に切残し、はくりならびに焼けなどを生ずる。そのうち、今回の実験で顕著に現れたのは切残しである。従って、ここでは切残しについて考察をおこなうことにする。

前述のごとく、切削条件（主軸回転数、送り）を変化させてGFRPおよびCFRPを穴あけした場合に生じた切残しの状態を表3に示す。表中のタイプIは加工穴に切残しが無く、良好な状態を示し、タイプIIは僅かな切残しがあるが、簡単に除去できるものである。タイプIIIやIVになると、切残しの量が多くなり、その除去にもそれだけ多くの手数がかかるものである。各タイプの評価基準を図12に示す。表3よりわかるように、GFRPを前述の加工条件で穴あけを行った場合、ほとんど切残しは見られない。次にCFRPについて考えると、全般的に穴あけ回数の増加に伴って切残しが多くなっている。これは穴あけ回数の増加により、ドリル切刃が鈍化して、切残しが多くなるものと考えられる。次に送りを変化させた場合には、送りの増加に伴い切残しも増加している。これは送りの増加に伴って、被削材と切刃との接触回数が少くなるためと考えられる。また、主軸回転数を変化させた場合には、主軸回転数の減少に伴って切残しが増加している。これは主軸回転数が少ない程、切刃の摩耗

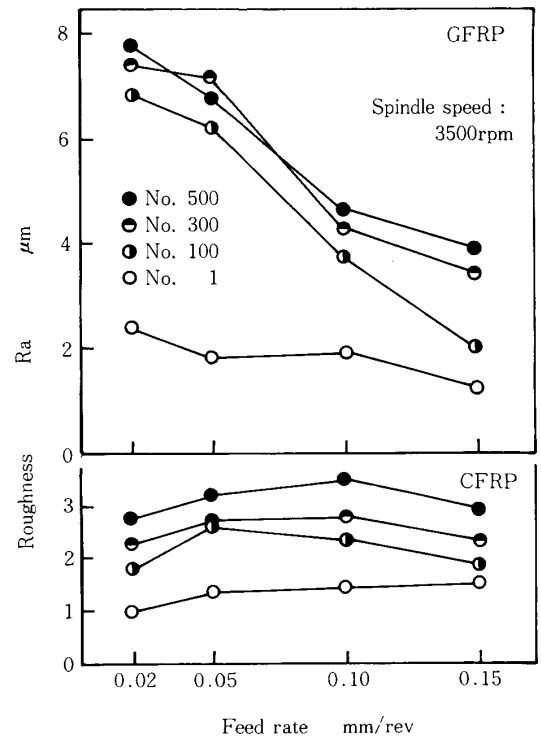


図10 GFRPおよびCFRPを穴あけした場合の穴内面粗さと送りとの関係

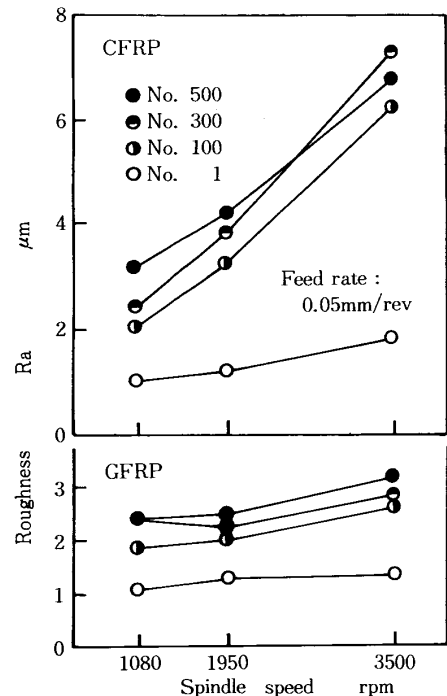


図11 GFRPおよびCFRPを穴あけした場合の穴内面粗さと主軸回転数との関係

表3 GFRPならびにCFRP穴あけの時の切残しの状態

被削材	題目	回転数 (rpm)	送り (mm/rev)	穴番号											平均値
				1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
GFRP	送りの変化	3500	0.15	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
		3500	0.10	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
		3500	0.05	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
		3500	0.02	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
	回転数の変化	3500	0.05	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
		1950	0.05	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1.00
CFRP	送りの変化	3500	0.15	I	I	II	II	II	II	I	II	II	II	II	1.73
		3500	0.10	I	I	I	I	II	II	I	II	II	II	II	1.55
		3500	0.05	I	I	II	I	II	II	I	II	II	II	II	1.64
		3500	0.02	I	I	I	I	I	I	II	II	I	I	I	1.18
	回転数の変化	3500	0.05	I	I	II	I	II	II	I	II	II	II	II	1.64
		1950	0.05	I	I	I	I	II	I	I	II	II	II	II	1.45
		1080	0.05	I	II	II	II	II	III	II	II	II	III	III	2.18

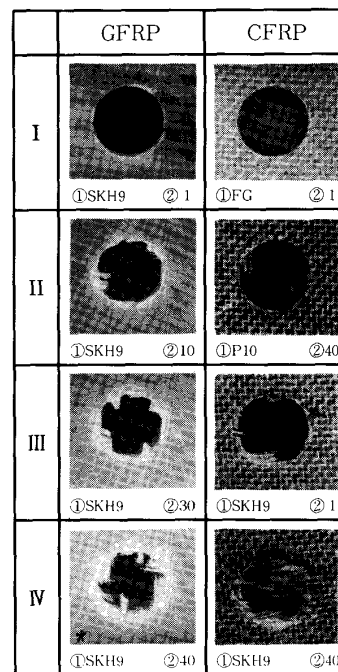
が大きく、切刃が鈍化して切れ味が悪くなったのが原因と思われる。

3.6 加工条件選定の総合考察

今まで送りを変えたり、主軸回転数を変えたりして、GFRPとCFRPの穴あけ加工を行い、種々の値を測定してきたが、いずれの加工条件を選ぶかはこれらの値を比較・検討しながら総合考察を行う必要がある。今回測定した値のうち、トルクとスラストの値の大小は、学問的な価値を度外視すれば、加工経費などの経済的要因に与える影響が少ないので省略した。

(1) 送りを変化させた場合

GFRPにおいては、送りの増加に伴ない、逃げ面摩耗幅と穴内面粗さは減少しており、チゼルエッジの摩耗幅と切残しはともに送りの影響を受けていない。従って、摩耗幅の関係より、送りとしては大きい方（この場合は0.15mm/rev）が最も経済的であるといえる。一方CFRPにおいては、逃げ面とチゼルエッジの摩耗幅はともに送りの増加に伴って減少している。また、穴内面粗さはほぼ一定であり、切残しは送りの増加に伴って増加している。従って、加工条件の選択は、摩耗幅と切残しのどちらを重視するかによって異なる。しかし、この場合の切残しはタイプII程度であるため、その除去も容易であるから、摩耗の少ない送り（0.15mm/rev）の方がやはり経済的である。



Spindle speed : 3500rpm  
 ※Spindle speed : 600rpm  
 Feed rate : 0.05mm/rev  
 ①Tool material  
 ②Number of holes

図12 穴出口側表面における切り残し判定基準

(2) 主軸回転数を変化させた場合

GFRP, CFRPの両材種とも、回転数の増加に伴って

摩耗幅、切残しはともに減少している。一方、穴内面粗さは、GFRPでは、回転数の増加とともに増加し、CFRPではほぼ一定の値である。この場合は摩耗幅・切残しと穴内面粗さのいずれを重視するかの問題も生ずるが、加工時間の相違のことを考え合せば、回転数の多い方(3500 rpm)が経済的に有利と考えられる。

#### (3) 経済的に最も有利な加工条件

加工条件として、送りを変化させた場合と主軸回転数を変化させた場合と個別的に述べたが、これらを総合的に考えて加工条件を選定すれば、今回行った実験の範囲内では、主軸回転数3500 rpm、送り0.15 mm/revが経済的に最も有利であるといえる。

## 4. 結 論

超硬ドリルを用いて加工条件(主軸回転数・送り)を変えてGFRPならびにCFRPに穴あけ加工した今回の実験で得られた主な結論は次の通りである。

- 1) 主軸回転数を3500 rpm一定にして送りを変えて穴あけした場合、逃げ面摩耗幅は両材種とも送りの増加とともに減少する。
- 2) 主軸回転数を3500 rpm一定にしてGFRPに穴あけした場合、チゼルエッジの摩耗幅は送りに関係なくほぼ一定であるが、CFRPに穴あけした場合、チゼルエッジの摩耗幅は送りの増加とともに僅かに減少する。
- 3) 送りを0.05 mm/rev一定にして主軸回転数を変えて穴あけした場合、逃げ面およびチゼルエッジの摩耗幅は両材種とも主軸回転数の増加とともに漸減する。
- 4) 主軸回転数を3500 rpm一定にして送りを変えて穴あけした場合、両材種とも、トルクは送りの変化に対して中くぼみの状態となり、送り0.05 mm/revの場合に最低値を示す。一方、両材種とも、送りの増加に伴ってスラストは増加の傾向にある。

5) 送りを0.05 mm/rev一定にして主軸回転数を変えて穴あけした場合、両材種とも、主軸回転数の増加に伴って、トルクは僅かに減少しているが、スラストは僅かに増加している。

6) GFRPの穴あけにおいては、穴出口の切残しはほとんど見受けられない。一方、CFRPの穴あけにおいては、主軸回転数を一定にして送りを増加した場合、穴出口の切残しは増加の傾向にあるが、送りを一定にして主軸回転数を増加した場合、穴出口の切残しはやや減少の傾向がある。

7) GFRP・CFRPの穴あけについて、今回行った実験条件の範囲内では、主軸回転数3500 rpm、送り0.15 mm/revの加工条件がドリルの摩耗も少い上に、加工時間も少ないので経済的に最も有利である。

終りに本実験を行うにあたり、実験材料の提供をいただいた東レ・開発研究所の方々に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 佐久間敬三・横尾嘉道・瀬戸雅文：“強化プラスチック(GFRP・CERP)の穴あけに関する研究—工具材種と摩耗挙動—”，機械学会論文集(C編)49巻446号(昭58-10月)1799頁
- 2) 横尾嘉道・瀬戸雅文・佐久間敬三：“強化プラスチック(GFRP・CFRP)の穴あけに関する研究—工具材種と加工穴性状—”，宇部工業高等専門学校研究報告30号(昭59-3月)41頁
- 3) 伊藤公正：“プラスチック・データ・ハンドブック”，工業調査会(1980)86頁

(昭和60年9月10日受理)