

熱可塑性樹脂部材のレーザ加工技術の開発（第2報）

小河 廣茂、丹羽 孝晴、今井 智彦

Development of laser beam machining technology of a thermoplastic resin component (II)

Hiroshige Ogawa, Takaharu Niwa, Tomohiko Imai

炭素繊維複合材料（以下 CFRP という）は、硬い積層材料であるため加工が容易ではなく、切削加工やウォータージェットでの様々な問題点が指摘されている。そのため、精密加工が可能で、メンテナンス性に優れたファイバーレーザ加工機を用いて、レーザの熱影響を最小化できる種々の加工方法について検討した。

CFRP のレーザ切断では、パルスモードを使い、熱影響部（以下 HAZ という）を抑えた加工条件を探索した。マトリックス樹脂の熔融温度に比例して、エネルギー密度を上げる必要があるが、それに伴い HAZ も大きくなる傾向があり、2mm 厚 CFRP（マトリックス樹脂 PA6、PA66）で、HAZ を約 0.2mm に抑える条件を得た。

CFRP と樹脂のレーザ溶着は、レーザ透過溶着法（LTW : Laser Transmission Welding 以下 LTW という）により行い、樹脂の熔融温度に比例してレーザ照射エネルギー密度を上げなければならないが、熱劣化の影響を伴うため、レーザ出力、回転数、速度に対して最適組合せが必要となる。CFRP（マトリックス樹脂：TPU、PA6、PA66）と PET のレーザ溶着において、1245N、1016N、918N の引張試験力（接合部以外で破断）となる加工条件を得た。

1. はじめに

ボーイング 787 で本格的に実用化された CFRP は、航空機や次世代自動車産業向けの市場が拡大する傾向にあるが、切断・穴あけ加工については、現状ではダイヤモンドカッター、ウォータージェットが使われており、刃先摩耗、粉塵の影響、産業廃棄物処理、ランニングコスト等の問題を抱えている。また、CFRP の用途拡大に向け、CFRP 等を含む樹脂同士の溶着や、樹脂と金属の接合（溶着）が求められている。そのため、精密加工が可能で、メンテナンス性に優れ、異種金属や非導電性材料の加工が容易なレーザ加工に期待が高まっており、本研究ではファイバーレーザを用いた実用的な加工条件を究明する。

2. 実験

2.1 トレパニング加工

本研究においては、CFRP のレーザ加工に伴い生じる熱影響について評価し、熱影響等を最小化するための最適加工条件を究明する。本年度は前報¹⁾で扱った CFRP 以外のマトリックス樹脂 PA6、PA66、PPS（各板厚 2mm）について実験する。加工方法は、前報と同様に図 1 の方法で行う。ただし、今回はレーザヘッドを Z 軸方向にも移動させ、その効果についても検証する。各条件を表 1 と表 2 に、加工パターンを図 2 に示す。

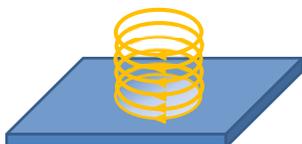


図1 回転ヘッドを用いたトレパニング加工

表1 実験条件

発振器	Rofin-Baasel FL010S
モード	PW
出力	1000W 設定可能範囲:100~1000W
直径	φ10mm 設定可能範囲:φ0~22mm
繰返周波数	49, 124, 524, 1024, 2048Hz 設定可能範囲:0~5000Hz
Duty比	2.6, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 16.0, 30.0% 設定可能範囲:2.6~100%
回転数	1000rpm(201・202), 2000rpm(207) 設定可能範囲:0~5000rpm
照射時間	20sec (2secON+1secOFF) × 10
CFRP マトリックス	PA66(201), PA6(202), PPS(207)
板厚	2.0mm

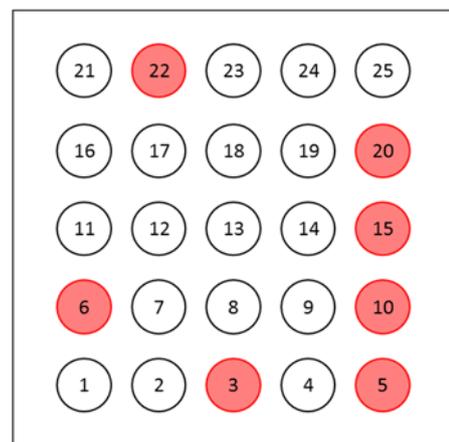


図2 加工パターン

表2 レーザ条件

No.	Duty比	周波数	パルス長	エネルギー
1	2.6%	49Hz	0.278mm	25.5W
2	3.0%	49Hz	0.321mm	29.4W
3	4.0%	49Hz	0.427mm	39.2W
4	5.0%	49Hz	0.534mm	49.0W
5	10.0%	49Hz	1.069mm	98.0W
6	2.6%	124Hz	0.110mm	64.5W
7	3.0%	124Hz	0.127mm	74.4W
8	4.0%	124Hz	0.169mm	99.2W
9	5.0%	124Hz	0.211mm	124.0W
10	10.0%	124Hz	0.422mm	248.0W
11	2.6%	524Hz	0.026mm	272.5W
12	3.0%	524Hz	0.030mm	314.4W
13	4.0%	524Hz	0.040mm	419.2W
14	5.0%	524Hz	0.050mm	524.0W
15	10.0%	524Hz	0.100mm	1048.0W
16	2.6%	1024Hz	0.013mm	532.5W
17	3.0%	1024Hz	0.015mm	614.4W
18	4.0%	1024Hz	0.020mm	819.2W
19	5.0%	1024Hz	0.026mm	1024.0W
20	10.0%	1024Hz	0.051mm	2048.0W
21	4.0%	2048Hz	0.010mm	1638.4W
22	5.0%	2048Hz	0.013mm	2048.0W
23	10.0%	2048Hz	0.026mm	4096.0W
24	16.0%	2048Hz	0.041mm	6553.6W
25	30.0%	524Hz	0.300mm	3144.0W

【CFRP】TEPEX-201:PA66/T2, 202:PA6/T2, 207:PPS/T2 <マトリックス樹脂/板厚Tmm>
 【レーザー条件】
 出力1000W,回転速度1000rpm,回転径φ10mm,
 2秒間照射,1秒間休み,Z軸0.2mm降下、2秒間照射,
 1秒間休み,Z軸0.2mm降下・・・の合計20秒間照射(10回繰返し)

2. 2 レーザ溶着試験

本装置を用いて、レーザー加工法による異種材料の溶着について研究する。今回は、樹脂 (PET、PVC、PC) と CFRP (マトリックス樹脂: TPU、PA6、PA66、PPS) を LTW 法により接合する。

LTW の原理は、レーザービームを透過させる光透過性樹脂部品を、レーザービームを吸収させる光吸収性樹脂部品の上に重ね、接合したい面に圧力を加え、レーザービームを照射する。光透過性樹脂部品を透過したビームは、まず光吸収性樹脂部品の境界面付近で発熱し、溶融する。次にその熱は、熱伝導によって光透過性樹脂部品に伝わり溶融し、溶融プールを形成し、接合する。

CFRP の表面は光吸収性樹脂であり、この方法を用いてレーザー溶着実験を行い、接合面の欠陥及び強度向上の改善点を明らかにし、高品質な加工条件を探索する。加工条件はレーザーの出力、周波数、摺動速度、回転速度について、引張試験の評価を行って、最適な条件を究明する。ただし、回転径、焦点距離は同一条件とする。

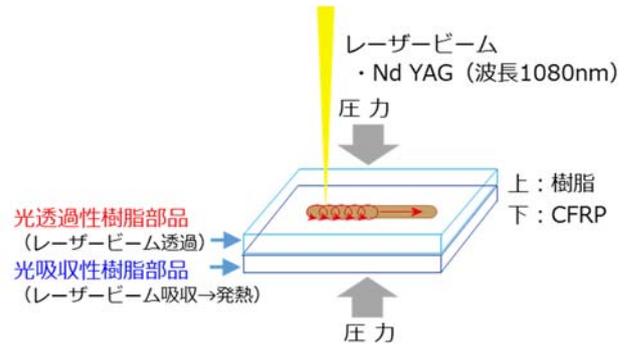


図3 レーザ溶着加工

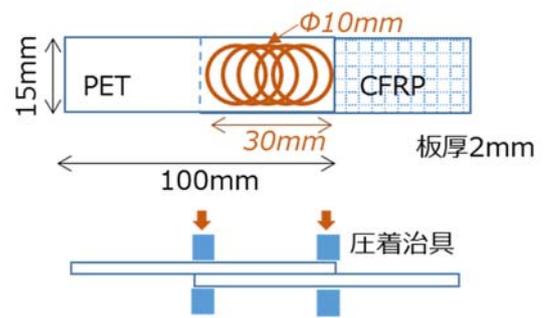


図4 レーザ溶着試験片

3. 結果及び考察

3. 1 トレパニング加工試験結果

レーザー加工では HAZ を全く無くすることはできない。必ず加工部周辺に熱影響が発生する。CFRP の加工において HAZ は実用上問題ない範囲内 (目標値は 100μm 以下) に抑える必要があると考えている。

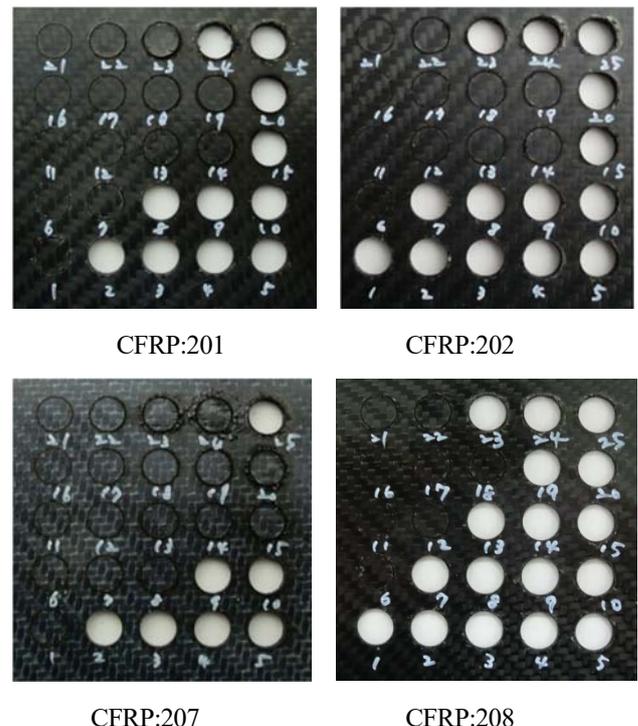


図5 CFRP トレパニング加工結果

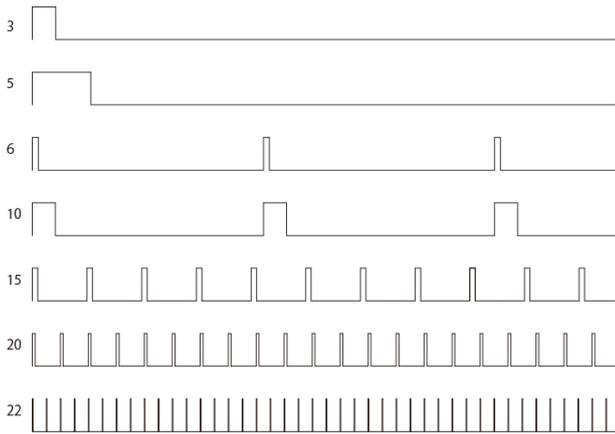


図6 レーザパルスパターン

図5の結果から、穿孔可能な条件としては、1回のパルス照射である程度の切り込み量が確保できるか、また、トータルエネルギー密度が十分か、この両方の条件がある閾値を超えた時に穴が空くと考えられる。その理由として、表2の中から7条件をピックアップし、レーザパルスパターンを図6に比較して示した。ここで縦軸はレーザ出力で横軸は時間を示す。また図中の左の数字は表2のNoに相当する。図5と図6から、No.6とNo.15は、パルス長が同じ位なのにNo.6は穴が空かなかった。これはトータルエネルギー密度が小さいことが要因と考えられる。次に、No.20とNo.22はトータルエネルギー密度が同じなのに、No.22は穴が空かなかった。即ち1回のパルス照射で十分な切り込み量が得られていないため、繰り返しても穴が空くには至らなかったと考えられる。

HAZの測定結果について、各材料の最小値とその条件を表3に示す。

表3 各材料のHAZ最小値

CFRP (:板厚)	Duty比 (%)	周波数 (Hz)	回転数 (rpm)	照射時間 (sec)	HAZ (mm)
201:2mm	3.0	49	1000	20	0.244
202:2mm	2.6	49	1000	20	0.231
207:2mm	5.0	124	2000	20	0.434
208:1mm	4.0	524	1000	10	0.247

3. 2ヘリカル加工効果

図7にレーザヘッドをZ軸方向に移動させた(以下3D加工と言う)ものと、最表面に焦点を合わせてZ軸固定のもの(以下2D加工と言う)の比較を示したが、2D加工は、最表面層(焦点位置)にレーザが照射され続けるためHAZの影響が大きくなっているのが分かる。また、3D加工の切断面は、レーザ痕が確認でき、レーザが内部にまで届いているのが分かる。板厚2mmのCFRPにおいては、3D加工の効果が得られており、加工データは複雑になるが、HAZの影響を抑え、切断能力を向上する手段の一つと考える。

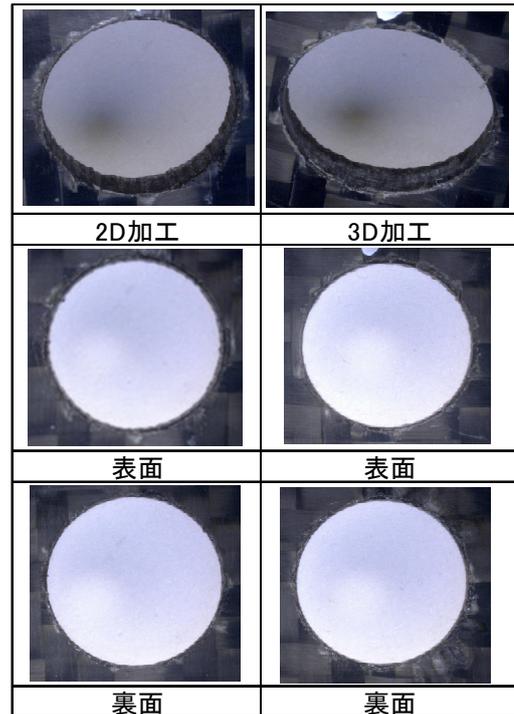


図7 レーザヘッド2次元と3次元加工の比較

3. 3 レーザ溶着試験結果

異種材料の溶着においては、溶着面以外つまり引張強度の低い材料側で破断することが目標となる。CFRP(4種類)と樹脂(3種類)について、図4の方法でレーザ溶着させた試験片を作成し、引張試験による評価を行った。この結果を表4に示す。溶着面が剪断破壊に至ったものは表に塗り潰して表示した。それ以外は、溶着部が剪断破壊すること無く、樹脂側で破断に至ったものである(図8参照)。ただし、表4は、各材料の最大強度が得られた加工条件のみを示しており、全条件が分かる詳細データは、図9および図10にレーザ加工条件と強度の関係を示す。ここで縦軸は試験強度[N]を示す。

CFRP208は前報で引張試験において溶着部で破断しない加工条件をPETについて報告しているが、今回PVC、PCについても探索した。今回新たに加えたCFRP202、CFRP207とPVC、PCとのレーザ溶着については、引張試験において、いずれも溶着部で剪断破壊に至っており、加工条件の設定範囲が十分でなく、溶着強度が低かったためである。これらの材料の樹脂の熔融温度がCFRP208に比べて高いため、レーザエネルギーが高い条件下でないと溶着するには十分でなく、強度も得られないと考える。



図8 レーザ溶着試験片(条件2)

表4 各種材料のレーザ溶着条件と強度試験結果

条件	CFRP		樹脂	出力	mode	速度	回転数	引張剪断荷重	
1	208	1mm	TPU	PET 1mm	50W	CW	F20mm/min	2500rpm	1245.000N
2	208	1mm	TPU	PET 2mm	50W	CW	F30mm/min	2500rpm	1123.812N
3	208	1mm	TPU	PVC 1mm	50W	CW	F40mm/min	2500rpm	720.003N
4	208	1mm	TPU	PC 1mm	50W	CW	F40mm/min	3000rpm	512.822N
5	201	2mm	PA66	PET 2mm	50W	CW	F10mm/min	2500rpm	918.399N
6	201	2mm	PA66	PVC 2mm	50W	CW	F30mm/min	2500rpm	469.318N
7	201	2mm	PA66	PC 2mm	50W	CW	F10mm/min	2500rpm	636.366N
8	207	2mm	PPS	PET 2mm	50W	CW	F10mm/min	2500rpm	484.147N
9	207	2mm	PPS	PVC 2mm	50W	CW	F20mm/min	2500rpm	106.932N
10	207	2mm	PPS	PC 2mm	50W	CW	F20mm/min	4000rpm	274.915N
11	202	2mm	PA6	PET 2mm	50W	CW	F20mm/min	2500rpm	1016.135N

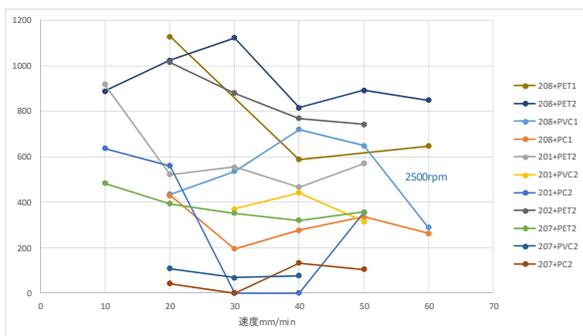


図9 移動速度—引張試験結果

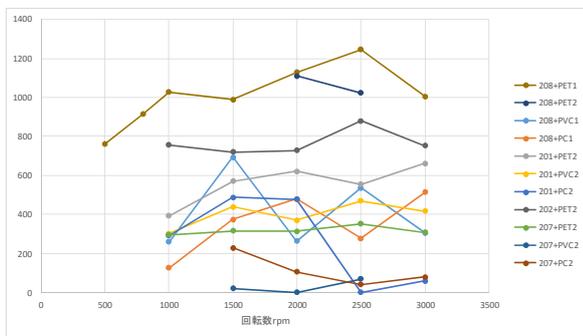


図10 回転速度—引張試験結果

4. まとめ

CFRP のレーザによる切断加工は可能であるが、熱影響を全く無くすることはできないため、それを出来るだけ小さくし、且つ加工時間を短くする手法の実現が期待されており、本研究で最適条件の探索を行った。

今回扱った材料は、マトリックス樹脂として、TPU、PA6、PA66、PPS を含浸させた CFRP で実験した。溶融温度は、TPU<PA6<PA66<PPS の関係になっており、溶融温度に比例して高いレーザエネルギーが必要となる。この中で PPS を含浸させた CFRP が、最も穿孔数が少なく、表1及び表2の実験条件は、エネルギー密度が低めに偏っている。

また、板厚 1mm と 2mm ではレーザ照射時間が異なるため、単純な比較は出来ないが、2mm の場合 HAZ は、PA6<PA66<PPS となり、前述の関係と一致しており、低融点程、切り込み量が大きくなるからと考える。

CFRP208 (板厚 1mm) の場合 HAZ は、前報で扱った徐々にレーザ出力を下げっていく 2D 加工<レーザ出力一定 2D 加工<レーザ出力一定 3D 加工という結果となり、3D 効果は認められなかった。これについては、板厚の影響かマトリックス樹脂の影響かは分かっていない。

板厚 2mm の CFRP (201、202、207) について HAZ は、3D<2D の関係にあり、3D 効果は有効であった。

次に、CFRP と異種材料とのレーザ溶着について、今回は、CFRP (201、202、207、208) と樹脂 (PET、PVC、PC) を用いてレーザ溶着加工の評価を行った。

今回の結果は前報と実験条件を変えた結果、CFRP208 と PET 1mm は同じ組合せとなるが、単純に比較できない。変更点は、出力が 30W では安定しておらず再現性が得られなかったため、50W に上げて実験した。さらに、図4に示す様にレーザ溶着パターンをφ10mm の1ラインとした。今回新たに加えた樹脂の PVC、PC については、引張試験の結果、CFRP208 のみ溶着部以外で破断し、他の CFRP は溶着部で剪断破壊に至った。これは溶融温度が PET に比べて高いため、よりエネルギー密度の高い条件が必要となるからである。詳細は、図9および図10に示したが、この中で例えば CFRP208 と PET 1mm、CFRP202 と PET 2mm 等発散しているものは、さらに良好な加工条件が他に存在することを意味しており、加工条件を広く取る必要があった。今回の結果から、溶着強度は CFRP207<CFRP0201<CFRP202<CFRP208 となった。今後の課題として、特に溶融温度の高い材料の溶着強度が低かったため、高いレーザエネルギー密度で、熱的劣化が無く溶着強度が向上する加工条件の究明が必要となる。

【参考文献】

- 1) 小河ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 第3号, pp.43-46,2015