

熱可塑性樹脂部材のレーザ加工技術の開発

小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦

Development of laser beam machining technology of a thermoplastic resin component

Hiroshige Ogawa, Tomoyuki Tanaka, 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、異種金属や非導電性材料の加工が可能なファイバーレーザ加工機を用いて、レーザの熱影響について、加工条件と加工状態の関係を明らかにし、熱影響を最小化できる種々の方法について検討した。

レーザ切断では、パルスモードを使い、Duty 比を小さく、周波数を大きくすることで、熱影響部（以下 HAZ という）が小さくなる傾向にあることが分かった。φ10mm の穴に対して HAZ0.159mm まで抑えることができた。

レーザ溶着は、レーザ透過溶着法（LTW : Laser Transmission Welding 以下 LTW という）を用いて行い、適度な圧力で試料を押しつけることが重要で、レーザ照射エネルギー密度と接合力は密接に関係しており、エネルギー密度を高めるために、移動速度を遅くし、回転数を早くするのが良い。CFRP と PET のレーザ溶着試験では、引張剪断荷重 788.8N（接合部以外で破断）の結果を得た。

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て実用的な加工条件を究明する。

2. 実験

2. 1 トレパニング加工シミュレーション

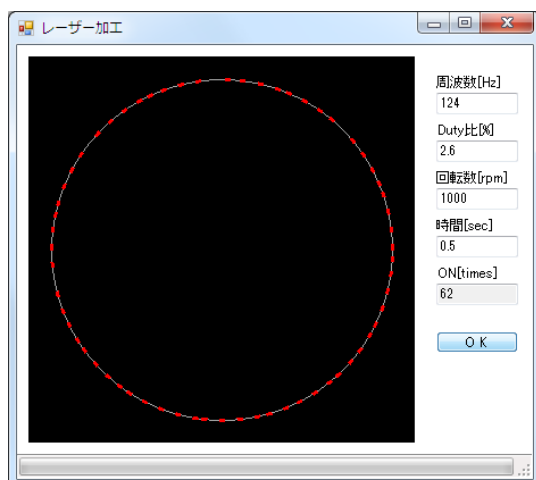


図1 トレパニング加工シミュレーション

実験を進める上で、周波数、Duty 比、回転数、照射時間の組合せによっては、同じ場所を繰り返し照射するだけで、全周が照射できない条件が存在する。そこでトレパニング加工シミュレーションを行い、事前にレーザ条件が良いか否かを判定する必要があり、プログラムを作成し確認した（図1）。

2. 2 トレパニング加工

本研究においては、レーザ加工機による CFRP の加工方法を検討し、CFRP 切断面を評価し、熱影響等を小さくするための最適加工条件を究明する。併せて、実用化を目指した加工時間、加工精度の問題点を抽出し、生産現場において利用可能なレーザ加工技術を確立する。

今回は、回転ヘッドによるトレパニング加工（図2）を中心にレーザ切断性能について評価実験を行う。

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	φ 10mm 設定可能範囲: φ 0~22mm
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% 設定可能範囲: 2.6~100%
回転数	800, 1000, 2000rpm 設定可能範囲: 0~5000rpm
照射時間	10sec (2secON+1secOFF) × 5
CFRP マトリックス	TPU
板厚	1.0mm

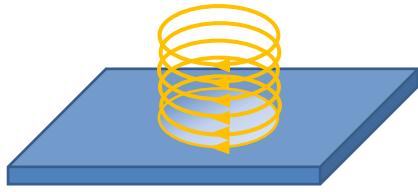


図2 回転ヘッドを用いたトレパニング加工

2. 3 穴あけ試験片引張試験

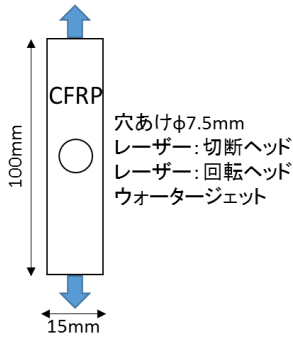


図3 引張試験片

レーザ切断性能については、HAZ 幅及び引張強度試験によって評価する。
引張試験片については図3の形状に加工したもので行う。ここでは3種類の加工方法の優位性を検証する。

2. 4 レーザ溶着試験

本装置を用いて、レーザ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 と CFRP の接合を中心に LTW 法を用いて加工する。

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、高品質な加工ができる条件を探索する。加工条件として、レーザの出力、周波数、摺動速度、回転速度、回転径及び焦点距離について、引張試験による評価を行って、最適な加工条件を究明する。

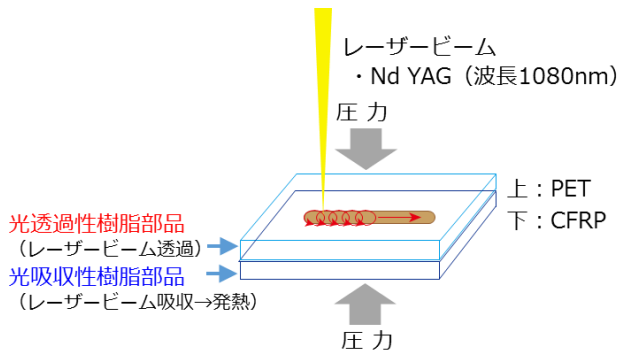


図4 レーザ溶着加工

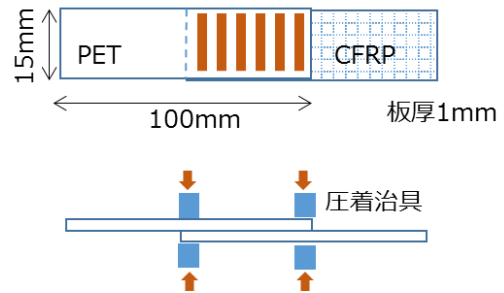


図5 レーザ溶着試験片



図6 レーザ溶着用圧着治具



図7 レーザ溶着試験片の引張試験

3. 結果及び考察

3. 1 トレパニング加工試験結果

レーザ加工では 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 100 μm 以下)に抑える必要があると考えている。

HAZ は工具顕微鏡を用いて図8のとおり計測した。

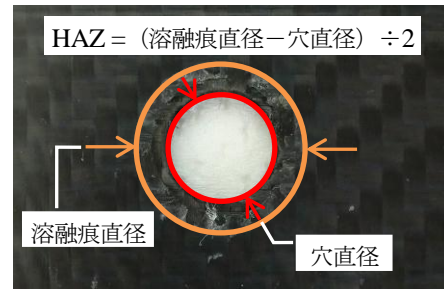


図8 溶融痕の評価方法

表1に示す条件でトレパニング加工を行い、HAZ に対する重回帰分析を行った。その結果を表2に、散布図を図9に示す。

表2 重回帰分析結果

目的変数	HAZ	
説明変数	周波数、Duty比、回転数	
重回帰式	$HAZ = a_1f + a_2d + a_3r + a_4*$	
寄与率	0.65452	
重相関係数	0.80902	
残差正規性のSW検定確率	0.2279	
F検定値	42.94167	
重回帰式の有効性の検定	有効	

* ただし、表中に示す重回帰式の各パラメータは、

HAZ: 熱影響域[mm]
 a_1 : 0.0001, f : 周波数[Hz]
 a_2 : 0.0376, d : Duty比[%]
 a_3 : 0.0001, r : 回転数[rpm]
 a_4 : 0.1146

である。

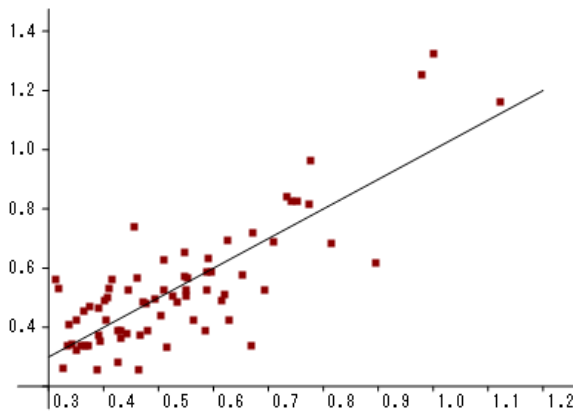


図9 実測/予測散布図

実験では、出力、照射時間は同一条件とした。この結果から、HAZはDuty比に最も影響を受け、周波数・Duty比・回転数の組合せにより、小さく出来る条件が存在する。

さらに表3に示す実験を行い、次の知見を得た。

No.1~3よりDuty比を上げるとHAZは大きくなる傾向にある。No.7~9より周波数を上げるとHAZは小さくなる傾向にある。ただしDuty比が大きい(10%以上)と周波数を上げてもHAZは小さくならない(No.3,4)。ただし、この中でNo.1及びNo.9は開孔していない。

表3 Duty比・周波数・HAZの関係性評価

No.	Duty比[%]	周波数[Hz]	HAZ[mm]	その他の条件
1	2.6	124	0.244	回転数1000rpm 2秒間1000W照射、1秒間休み、2秒間900W照射、1秒間休み・・・、2秒間600Wの合計10秒間照射 穴径φ 10mm
2	5	124	0.251	
3	10	124	0.675	
4	2.6	49	0.159	
5	5	49	0.358	
6	10	49	0.599	
7	5	124	0.251	
8	5	524	0.197	
9	5	1024	0.251	

3. 2 トレパニング加工方法の違いによる強度比較

比較したトレパニング加工方法は、以下の3種類で、①切断ヘッド・・・Duty比8%、周波数124Hz、出力1000W、パス数8回、加工速度1000mm/min、②回転ヘッド・・・Duty4%、周波数124Hz、出力1000W、回転速度1000rpm、照射時間(2秒ON+1秒OFF)×5=10秒、③アブレイションウォータージェット(WJ)・・・水圧350MPa、切断速度1000mm/minの条件加工で、同じ形状、穴径はφ7.5mmに加工した(図3)。それについて、引張強度の比較試験を行い、結果を図10に示す。

この結果、若干の差が生じているが、どの加工方法でも引張強度は同じ位であると見なせる。さらに言うならば、回転ヘッドを用いた方が、強度試験の測定値誤差の範囲が最も小さく、加工が均一で再現性が良いと推察できる。

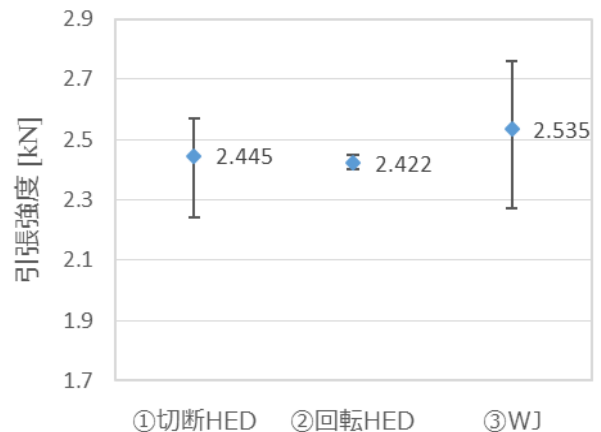


図10 トレパニング加工の違いによる引張試験結果

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方の材料側で破断することが目標となる。表4に示す条件でレーザー溶着加工を行い、引張試験による評価を行った。今回は、素材として厚み1mmのCFRP(カーボン45%/TPU綾織り)と樹脂PETに絞って、加工条件を探索した。この結果、いずれの試験片も溶着面が剪断破壊に至ること無く、樹脂側で破断された。最も大きい強度が得られた加工条件は、図11より移動速度20mm/min、回転数4000rpmであった。即ちエネルギー密度が大きい条件であることが分かった。ただし、レーザー出力に応じて加工する移動速度は適正範囲があり、出力が大きい、或いは試料の厚みが小さい場合には、移動速度が遅すぎると、レーザー照射面が局部的に熱せられ、熱的破壊に至る。今回の実験条件は1) 報の基礎実験結果を踏まえて、熱的破壊に至らない条件で行った。

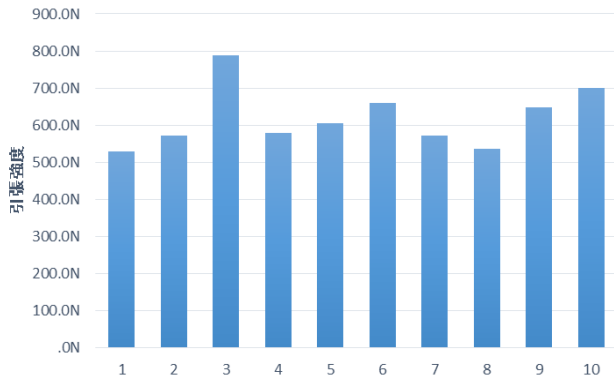


図1-1 溶着試験片の引張試験結果

4. まとめ

CFRP のレーザによる切断加工は可能であるが、熱影響層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。

切断・穴空け加工においては、どちらも試料を切取る加工であり、加工条件の究明としては同じ課題として扱えるので、今回は穴空け加工に絞って実験した。HAZ への影響については、Duty 比を上げると大きくなり、パルス波の繰返周波数を上げると小さくなる傾向にあることが分かった。このことはレーザエネルギー密度に起因しており、Duty 比を上げる或いは周波数を下げるということはエネルギー密度を大きくするということであり、これが大きいと HAZ も大きくなるということは容易に想像できる。ただし実験の結果から Duty 比が 10%以上になると周波数を上げても HAZ はそれ程小さくならな

った。つまり周波数よりも Duty 比の影響の方が大きいからである。重回帰分析結果からも裏付けられている。

結論として、材料種類や厚みによって今回の条件をそのまま適用出来ないが、Duty 比を低めにし、図1のシミュレーションで確認しながら周波数、照射時間をそれぞれ決定することで、HAZ を小さくできる条件が見つかる。

また、CFRP の切断加工によく用いられる WJ と比較した実験より、穴空け加工試験片の引張強度は、大きく差が出た訳では無く、HAZ を抑えたレーザ加工条件であれば、利用可能であると考えられる。

CFRP と異種材料とのレーザ溶着について、今回は、CFRP と PET に絞ってレーザ溶着加工試験片の評価を行った。

適度な圧力で押しつけることが非常に重要で、1) 報の実験では無かった圧着治具を使って加工した結果、接合力に大幅な改善が見られた。表4に示した条件全てにおいて、引張試験の際、接合部分から破断すること無く、PET 側で破断した。CFRP1mm と PET1mm のレーザ溶着では、CW 出力 30W、移動速度 20mm/min、回転数 4000rpm の加工条件が最も良く、引張剪断荷重 788.8N を得た。エネルギー密度を大きくすることが重要で、適度なレーザ出力で、移動速度は遅く、回転速度は速く、の組合せが良い傾向にある。

【参考文献】

- 1) 小河ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第2号, pp.1-4, 2014

表4 各種材料のレーザ溶着条件と強度試験結果

条件	CFRP マトリックス	相手材	Mode	出力	速度	回転数	回転径	焦点距離	引張剪断荷重
1	TPU	PET	CW	40W	F100mm/min	800rpm	φ 2mm	JUSTFocus	529.6N
2	TPU	PET	CW	100W	F2000mm/min	800rpm	φ 2mm	JUSTFocus	573.0N
3	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	4000rpm	φ 2mm	JUSTFocus	788.8N
4	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	0rpm	φ 2mm	out2mm	579.2N
5	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	0rpm	φ 2mm	out5mm	605.9N
6	TPU	PET	CW	35W	F100mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	659.2N
7	TPU	PET	CW	100W	F2000mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	570.9N
8	TPU	PET	CW	35W	F100mm/min	4000rpm	φ 2mm	out5mm	536.3N
9	TPU	PET	CW	35W	F20mm/min	800rpm	φ 2mm	out5mm	648.7N
10	TPU	PET	CW	30W	F20mm/min	4000rpm	φ 2mm	out5mm	700.0N