

熱可塑性樹脂部材のレーザ加工・超音波溶着技術の開発

小河 廣茂、田中 等幸、今井 智彦

Development of laser beam machining and ultrasonic welding 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。

回転ヘッドを組み込んだハイブリッド・レーザ加工機は、トレパニング（穴開け）加工において、従来ヘッドよりも熱影響を小さく出来、加工時間を短くすることができた。さらに、CW モードより PW モードの方が、熱影響が小さい。最適な出力のパルス波で短時間に加工することが、熱影響を最小限にする条件である。

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 エラストマー効果測定

エラストマーシートは、PC 機器の放熱用としても利用されるなど、ヒートシンク効果が期待される。使用し

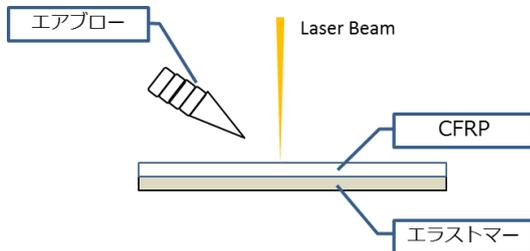


図1 レーザ照射時のエラストマーの使い方

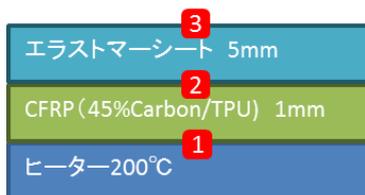


図2 エラストマーの吸熱測定

たエラストマーシート（株式会社タナック製衝撃吸収ゲル）の成分については、非公開のため詳細は不明であるが、シリコン系の素材で、粘着性と耐衝撃性を有する。

実際のレーザ加工では、図1に示すようにエラストマーシート上にワークを置き、上部からレーザビームを照射する。先ずその吸熱効果を調べるため、図2のようにレーザの代わりにヒーターを用い、1~3箇所を熱電対を貼り、それぞれの温度変化を計測する。

2. 2 トレパニング加工

表1 実験条件と実験材料

モード	CW	PW
出力	150 - 700W	800 - 1004W
直径	φ 10mm	φ 5 - 15mm
周波数	—	2 - 500Hz
デューティ比	100%	2.3 - 17.0%
回転数	160 - 1000rpm	500 - 800rpm
照射時間	0.8 - 30sec	5 - 50sec
CFRP マトリックス	TPU	TPU/PA66
板厚	1.0mm	1.0mm/0.5mm

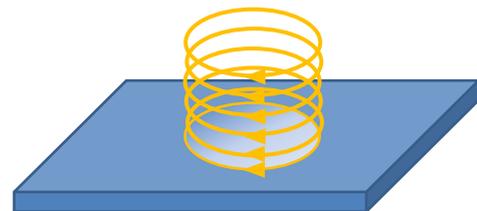


図3 回転ヘッドを用いたトレパニング加工

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、トレパニング加工を中心にレーザ切断性能について評価実験を行う。実験条件は表1に示すとおり。

3. 結果及び考察

3. 1 エラストマー効果

CFRP のエラストマーシートによる吸熱特性について、実験結果を図3に示す。これよりエラストマーがCFRPの表面温度上昇を遅らせていることが確認できる。従って短時間であれば、レーザの熱影響を下げる効果があると推定する。また、硬さ及び粘度の違うエラストマーシートを使って計測したが、それによる効果は見られなかった。

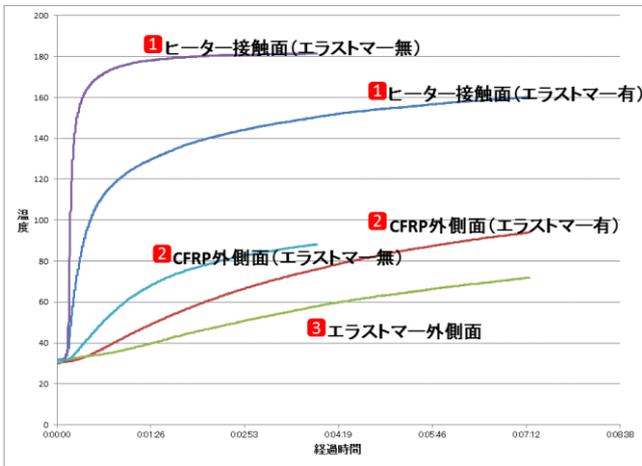


図4 エラストマーの吸熱特性

実際のCFRPの加工において、エラストマーシート有無の比較実験を行った例を図5に示す。この結果からエラストマーシートに熱影響を抑える効果を確認した。

レーザ照射面 (表)	レーザ照射面 (裏)
エラストマー：無	
 溶融痕幅 (max)2.279mm	 溶融痕幅 (max)2.463mm
エラストマー：有	
 溶融痕幅 (max)0.72mm	 溶融痕幅 (max)0.766mm

図5 CFRP 切断時のエラストマー効果

3. 2 トレパニング加工試験結果

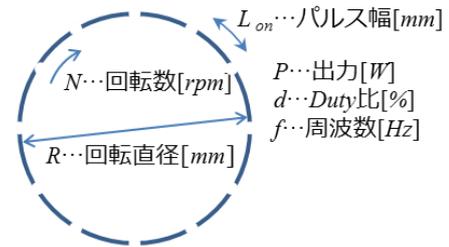


図6 トレパニング加工パラメータ

$$v = \frac{\pi RN}{60} [\text{mm/s}] \dots\dots\dots(1)$$

$$L_{on} = \frac{1}{f} \times \frac{\pi RN}{60} \times \frac{d}{100} [\text{mm}] \dots\dots(2)$$

$$t_{on} = \frac{d}{f \times 100} [\text{sec}] \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta_{on} = \frac{6N}{f} \times \frac{d}{100} [\text{deg}] \dots\dots\dots(4)$$

$$L_{off} = \frac{1}{f} \times \frac{\pi RN}{60} \times \frac{(100 - d)}{100} [\text{mm}] \dots\dots(5)$$

$$t_{off} = \frac{(100 - d)}{f \times 100} [\text{sec}] \dots\dots\dots(6)$$

$$\theta_{off} = \frac{6N}{f} \times \frac{(100 - d)}{100} [\text{deg}] \dots\dots(7)$$

上記に加工速度、1回のパルス幅、時間、角度の計算式を示すが、トレパニング加工においては、加工速度 v とレーザ出力 P が大きく、照射時間 t_{on} が小さい程、熱影響層 (以下 HAZ という) を小さくできる。また、パルス幅 L_{on} が大きい程、加工時間は短くなる。何故なら、強いレーザ出力が照射されると、時間と共に HAZ が成長し、表面のみならず内部にまで熱影響による欠陥が拡張する (図7参照)。特に熱溶融の伝搬速度が速い樹脂やCFRP等の素材程顕著である。

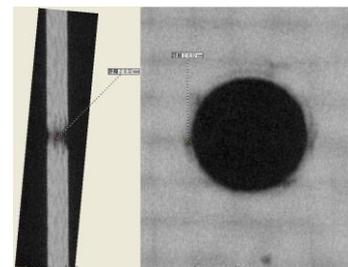


図7 X線CTによる内部欠陥評価

ここで、回転ヘッドと従来ヘッドの仕様を比較すると、加工速度は、回転ヘッド > 従来ヘッドの関係にあり、さ

らに前者は、加工時ワークの振動は殆ど無いなどの利点を有する反面、加工できる直径は 22mm 以下と小さい。

実際にトレパニング加工を行い、回転ヘッドによる加工の方が従来ヘッドに比べて、短時間で加工でき、HAZ が小さいことが確認された。

ここで、HAZ は工具顕微鏡を用いて図 8 に示す方法で計測した。

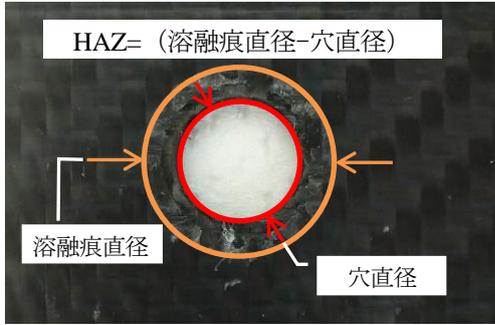


図 8 溶融痕の評価方法

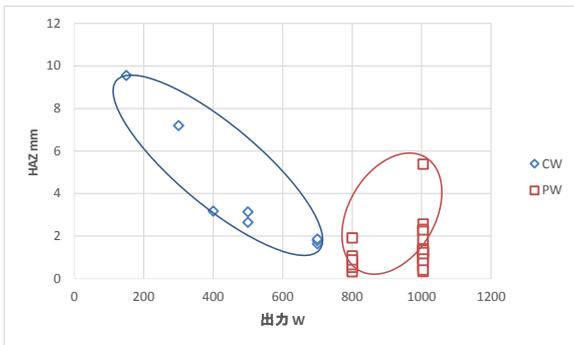


図 9 CW/PW モードによる HAZ の比較

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ために、本研究では、HAZ を出来るだけ小さくする方法を究明し、実用上問題ない範囲内（目標値は 100μm 以下）に抑える技術の確立が最も重要であると考えている。加えて加工時間と加工精度についても合わせて検討しなければならない。

表 1 に示す条件でトレパニング加工を行い、CW と PW による HAZ について測定した。

結果は図 9 に示す様に、CW モードより PW モードの方が、HAZ が小さい。これは、エネルギー密度が CW > PW の関係にあり、熱影響が大きいと推測される。また、超短パルスレーザが樹脂材料等を加工する際に熱影響を全く及ぼさないで切断できる理由からも分かる。

しかしながら PW モードでは切断深さが浅いため、照射を繰り返す必要があり、その結果、さらに熱影響層が広がることになる。そのため、総合的に評価して良い条件を見つける必要がある。

さらに PW モードによる実験を行い、得られた実験データについて統計解析を行った。その結果を図 10 ～ 11 及び表 2 に示す。

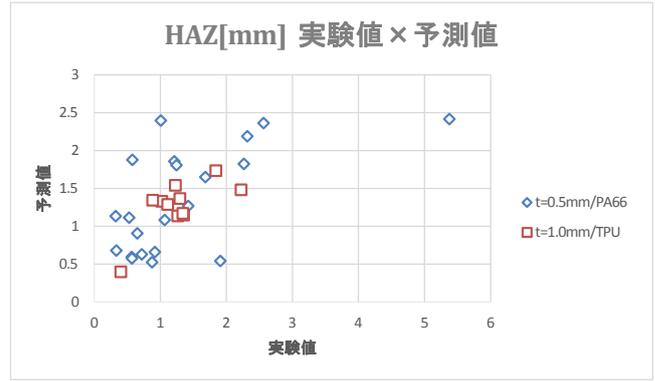


図 10 回帰分析結果

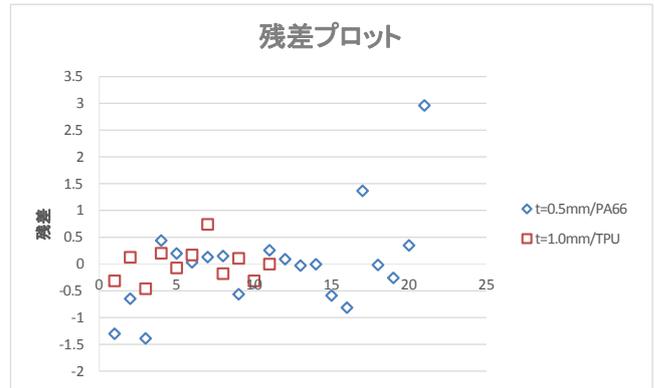


図 11 残差プロット

表 2 回帰式の精度と有意性

	t=0.5mm/PA66	t=1.0mm/TPU		
重相関係数R	0.6017	0.7276		
決定係数R ²	0.3621	0.5294		
有意F	0.1946	0.4501		
a ₁ 係数/t値	-4.3801	-1.5221	1.9045	2.9946
a ₂ 係数/t値	0.0063	2.5196	0	—
a ₃ 係数/t値	0.0770	1.0595	-0.0277	-0.6673
a ₄ 係数/t値	-0.0048	-0.8563	0.0032	1.0459
a ₅ 係数/t値	-0.1624	-0.8761	-0.0605	-1.7621

$$\text{回帰式: } HAZ = a_1 + a_2P + a_3d + a_4f + a_5s$$

- P : 出力 [W]
- d : Duty 比 [%]
- f : 周波数 [Hz]
- s : 照射時間 [sec]

トレパニング加工の結果として、代表的パターンは図 12 に示す 4 つで、最も良いのは、①の熱影響が少なく穴が開くもの、反対に最も悪いのは、④の熱影響が大きい穴が開かないものとなる。図 12 から分かることは、①は、照射時間が最も短い、熱影響は大きい。①と③の違いは、周波数のみ①の方が小さく、(3)式と(4)式から L_{on} と t_{on} が① > ③ の関係にあり、①は丁度切断できるエネルギーであったことを意味する。さらに①は、

◎より周波数が大きく、 L_{off} と t_{off} が◎>④の関係となり、停止時間が短く、連続照射に近い状況で熱影響が積算されたため、HAZが大きくなったと考えられる。

	結果画像	レーザ条件
◎ 良好		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 500Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.3999mm
③ 熱影響大		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 18.4% 周波数 104Hz 照射時間 6sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 1.1850mm
◎ 空かない		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 1300Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.1753mm
④ 空かない & 熱影響大		出力 1004W 回転数 800rpm Duty 2.3% 周波数 5000Hz 照射時間 50sec 回転直径 15mm 板厚 1.0mm マトリックスTPU HAZ 0.9875mm

図12 トレパニング加工パターン

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、本研究で以下の基礎的知見を得た。

まず切断においては、焦点位置に合わせる事が重要である。そしてCWモードよりPWモードの方が熱影響を小さくできる。しかし加工時間は長くなる。

トレパニング加工では、回転ヘッド機構を設けることでPWモードでも高速に複数パスが可能で優位である。

また、レーザ照射時、ワークの下にエラストマーシートを敷くとヒートシンク効果により吸熱される。短時間の照射であれば有効であるが、長時間照射を続けると逆にエラストマー自体が高温になりワークに対しても影響する。

また、トレパニング加工におけるレーザ条件とHAZの影響について、実験結果を回帰分析したが、決定係数は低く回帰式の精度はそれ程高いとは言えない。またF検定及びt検定からも有意性を示す結果は得られていない。この点はさらに検討を進めなければならない。今後は、PWモードを中心に、レーザ出力、Duty比、周波数、照射時間の各条件がHAZにどう影響するかについて、補足実験を繰り返し、検証する予定である。

【参考文献】

- 1) 小河ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2,Vol.1, 2014