

短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発

レーザー技術総合研究所 レーザープロセス研究チーム
主席研究員 藤田 雅之
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014218)

キーワード：レーザー加工，短パルスレーザー，微細加工，炭素繊維，複合材

1. 研究の目的と背景

炭素繊維強化樹脂 (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic) は軽量、高剛性、高耐力といった特徴を持つ複合材料として注目されており、幅広い産業分野で用いられている¹⁾。特に、自動車/航空機産業においては、車体/機体の軽量化による燃費の向上や排出ガスの抑制が実現している。CFRP の用途をさらに拡大するためには、炭素繊維の低コスト化と共に、素材へのダメージが少なく、高品質な加工が可能な技術の確立が重要となってきている。

我々は、CFRP に対するパルスレーザー加工の適用可能性について研究を進めてきた²⁻⁹⁾。CFRP のレーザー加工においては、加工速度の向上と共に熱影響を最小限に抑えることが求められ、加工品質の最適化のためには、レーザー波長、パルス幅への依存性を明らかにすることが重要となる。

本稿では、これまで7年間に亘って行ってきたCFRP のパルスレーザー加工実験結果を取りまとめ、レーザー波長、パルス幅への依存性を考察する。用いたレーザーの主な仕様を図1に示す。各枠内の上段に平均パワー、下段に繰り返し周波数を記入している。平均出力と繰り返し周波数は様々であるが、パルス幅は100 fs から 20 ns まで、波長は266 nm から 1064 nm までをカバーする範囲で実験を行ってきた。

加工試料における熱影響は、試料表面/裏面の電子顕微鏡像 (SEM 像) において (樹脂だけが蒸発して) 炭素繊維が露出した領域の大きさで評価した。また、様々なレーザーを用いた実験結果を定量的に比較するために、単位照射エネルギー当たりの CFRP 除去質量で定義される指標 (単位: mg/kJ) を加

工効率として導入し評価を行った。

2. 実験

2-1 実験方法の概要

表1に図1で示すレーザーを用いて実験した際の代表的なパラメーターを示す。複数年に亘って実験を行ったため実験配置やCFRP試料が異なるが、概ね4通りに分けられ(表1の実験配置A~D)、以下に概要を述べる。試料の設置は図2に示す様に、(a) 低速掃引の場合は直進ステージ上に固定し、(b) 高速掃引の場合は高速モーター上に固定した。いずれの場合も大気中でアシストガス無しで切断加工を行った。

実験配置Aでは、チタンサファイアレーザーを用いて直進ステージ上に置かれた1.3 mm厚のクロスCFRP板の溝掘り加工を行った。CFRP除去量は溝の幅と断面積から求めた。

実験配置Bでは、波長/パルス幅が266 nm/35 psのレーザーを用いて高速モーター上に固定された250 μm厚の一方方向CFRPを円形に切断した。直径20 mmのCFRPディスクが抜け落ちる時間を測定し、切り幅はレーザー集光径と同じであると仮定して除去量を算出した。

実験配置Cでは、波長355 nmのナノ秒レーザーを用いて250 μm厚の一方方向CFRPのスリット加工を行った。ガルバノミラーを用いて試料上でレーザーを直線掃引し、炭素繊維と垂直方向にスリットを形成した。試料厚さおよび表面と裏面のスリット幅から除去量を算出した。

実験配置Dでは、波長532 nmと1064 nmのナノ秒レーザーを用いて高速モーター上に固定された140 μm厚の一方方向CFRPを円形に切断した。直径20 mmのCFRPディスクが抜け落ちる時間を測定すると共に、試料の抜け落ちを防ぐために円の一部をマスクした加工を行い試料厚さおよび表面と裏面のスリット幅から除去量を算出した。

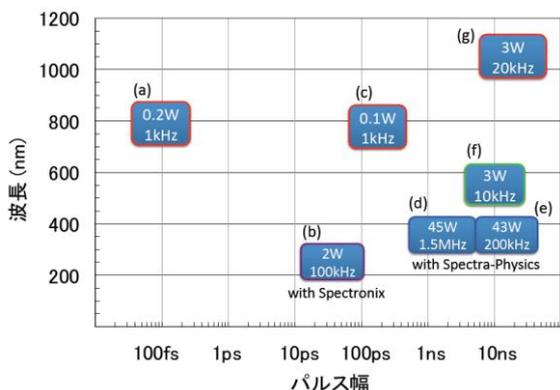


図1 CFRP加工に用いたレーザーのパルス幅と波長

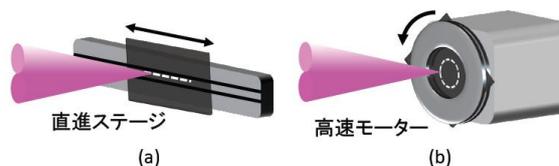


図2 試料の固定法：(a) 低速掃引、(b) 高速掃引

表1 実験条件：(a)～(d)は図1に対応。(*)のスポット径は過小評価の可能性あり

	パルス幅	波長	平均パワー	繰返し周波数	スポット径	掃引速度 mm/s	照射強度 W/cm ²	実験 配置
(a)	100 fs	800 nm	0.2 W	1 kHz	100 μm	17	2.7×10^{13}	A
(b)	35 ps	266 nm	2.0 W	100 kHz	60 μm	1500	2.1×10^{10}	B
(c)	200 ps	800 nm	0.4 W	1 kHz	100 μm	17	2.7×10^{10}	A
(d)	2 ns	355 nm	45.0 W	1550 kHz	24 μm	37200	3.4×10^9	C
(e)	10 ns	355 nm	43.0 W	200 kHz	24 μm	4800	5.0×10^9	C
(f)	10 ns	532 nm	3.0 W	10 kHz	18 μm*	1500	1.2×10^{10}	D
(g)	20 ns	1064 nm	3.0 W	20 kHz	27 μm*	1500	1.4×10^9	D

2・2 実験結果

図3に加工試料表面のSEM像の比較を示す。全てのSEM像は同じ倍率で示してある。大雑把な比較になるが、用いたレーザーのパルス幅が短く、波長が短い程、熱影響が小さい(炭素繊維の露出領域が小さい)事が分かる。

ここで注意したいのは樹脂に対するレーザー光の吸収率の影響である。図3(f)では、炭素繊維の露出は見られないが樹脂部がダメージを受けているように見受けられる。これは、波長532nmが樹脂を透過するためにCFRPを切り抜く際に、(炭素繊維を切断した後に)底面の最後の樹脂層を蒸発させ

るのに時間がかかりレーザーを過剰に照射したためと思われる。一方で、1064nmの波長も樹脂を透過するが、この場合は炭素繊維の加熱による熱影響で裏面の樹脂が蒸発したと考えられる。この考察を裏付けるデータとして、図4に波長/パルス幅が1064nm/20ns、532nm/10ns、800nm/200psのレーザーを用いて貫通加工した試料の表面と裏面のSEM像を示す。図4(a),(b)は図3(g),(f)と同じSEM像であり、図4(d),(e)は図4(a),(b)に対応した試料裏面のSEM像である。図4(d)で確認できる炭素繊維の露出が図4(e)では見られない。532nm光によって炭素繊維が切断された後に樹脂層が弱い

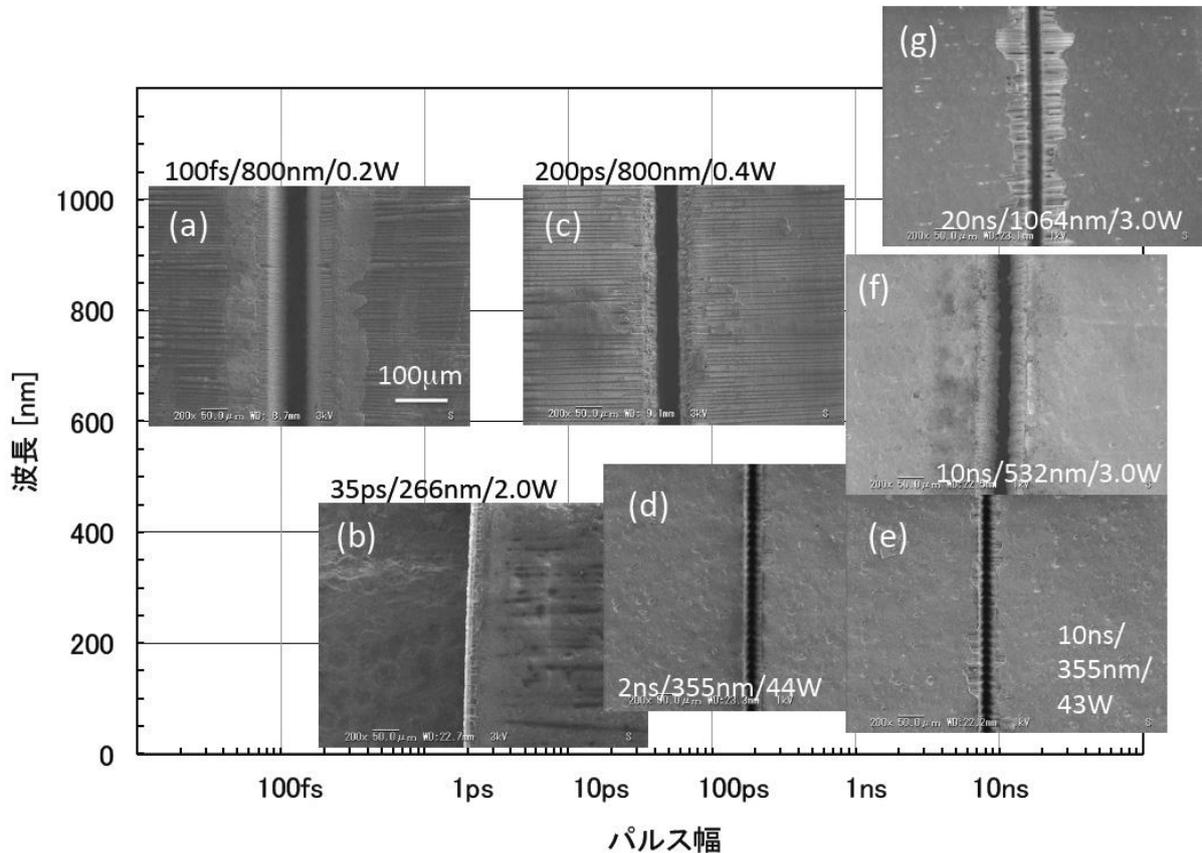


図3 パルスレーザーを用いたCFRP加工のパルス幅・波長依存性

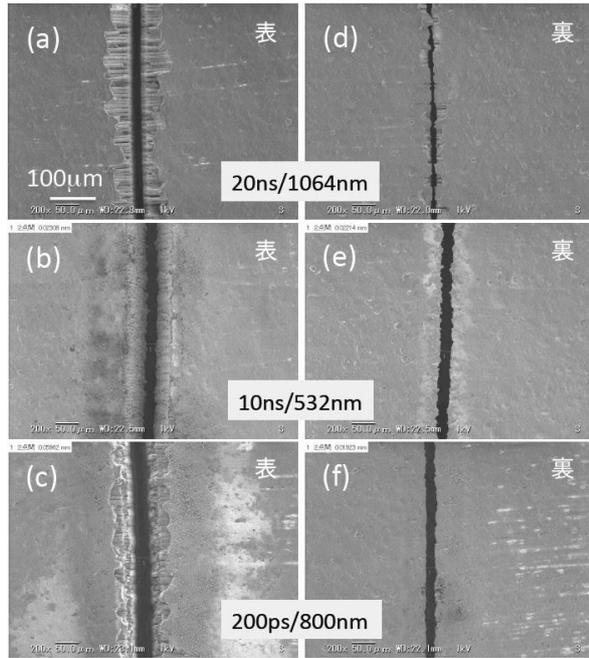


図4 波長/パルス幅が、1064 nm/20 ns (a), (d)、532 nm/10 ns (b), (e)、800 nm/200 ps (c), (f)のレーザーを用いて加工した試料の表面 (a)-(c)、裏面 (d)-(f)のSEM像。

多光子吸収によりアブレーションされたものと推測される。今回の実験条件は最適化されたものではなく、照射強度を高めることにより熱影響が少ない加工が可能であると考えられる。

図4 (c), (f)に、波長800 nm、パルス幅200 psのレーザーを用いて、低パワーで加工した試料の表面と裏面のSEM像を示す。溝加工した図3 (c)に比べて、1/4のパワー (0.1W)で貫通加工を試みた結果である。サブナノ秒レーザーによる加工にもかかわらず表面では熱影響が見られる一方で、裏面では炭素繊維の露出は見られなかった。532nm/10nsの場合と同様に、底面の最後の樹脂層を多光子吸収で蒸発させるのに時間がかかりレーザーを過剰に照射したためと思われる。

CFRPを貫通加工する際には、樹脂の吸収率の波長依存性を考慮した上で照射強度の最適化が必要であると言える。

3. 考察

3・1 加工効率の物理的評価

前節では熱影響層の発現に関してパルス幅・波長依存性を考察したが、本節では加工効率の観点から依存性を考察する。様々なレーザーを用いた加工結果を定量的に比較するために、単位照射エネルギー当たりのCFRP除去質量で定義される指標 (単位: mg/kJ) を加工効率として評価した。簡単のために、

- (i) CFRPの平均密度は1.5 g/cm³、
- (ii) CFRPの炭素繊維体積含有率は50 %、
- (iii) 炭素繊維に比べて樹脂を蒸発させるエネルギーは無視できる、

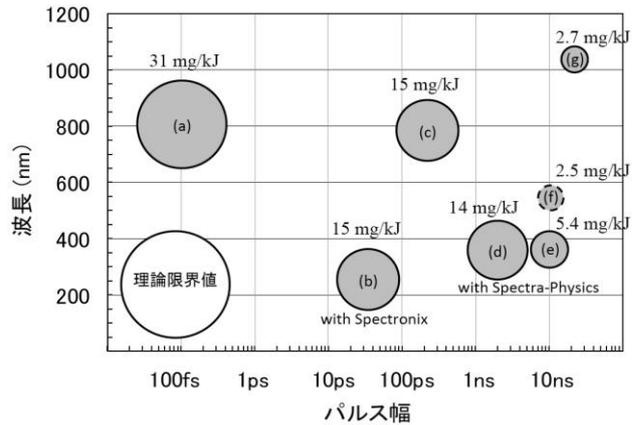


図5 加工効率 (mg/kJ) のパルス幅・波長依存性

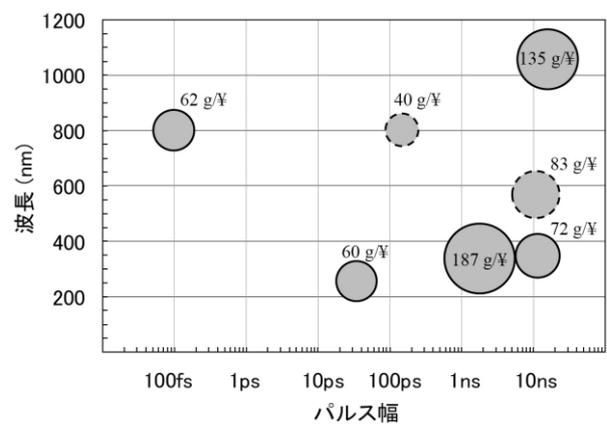


図6 加工コスト (g/円) のパルス幅・波長依存性

と仮定した。

加工試料の厚みおよび表面と裏面の切り幅、すなわち切断部分の断面積と長さから除去体積を求め、照射パワーと加工時間から加工に要したエネルギーを求めた。得られた結果を図5に示す。それぞれの円の面積は加工効率 (mg/kJ) に比例している。照射エネルギーが全て炭素繊維の蒸発に費やされた場合の理論限界値は45 mg/kJとなる¹⁰⁾。図5 (f)の値は参考値として破線で示している。

全体的な傾向としてパルス幅が短く波長が短くなる程、加工効率が高いことが分かる。図3の結果と合わせて考えると、加工効率が高いほど熱影響が小さくなるという結果が得られた。(d)と(f)を比較すると、同じ波長でもパルス幅が10 nsよりも2 nsの方が加工効率が高くなっているが、若干掃引速度とパルスオーバーラップの条件の違いも影響していると思われる。(d)の場合はパルスオーバーラップが殆どゼロの状態で行った。また、(b)に関しては、(c)と比べてパルス幅と波長が短い分、加工効率が良くなると期待されたが、照射強度に差が無いため同等の結果が得られたものと推測される。

3・2 加工効率の経済的評価

3・1節では照射エネルギーおよび除去質量といった物理量

表2 加工効率の経済的評価における仮定。

レーザーの種類	装置価格 万円/W	エネルギーコスト 円/kJ
フェムト秒レーザー	1000	500
ピコ秒レーザー	500	250
UV ナノ秒レーザー	150	75
緑ナノ秒レーザー	60	30
赤外ナノ秒レーザー	40	20

を元に加工効率を評価したが、本節では加工コストといった経済的な観点から加工効率のパルス幅・波長依存性を考察する。経済性を評価するために、表2に示す様な装置価格およびエネルギーコストを仮定した。装置価格に関しては、筆者のこれまでの購入記録を元に（アカデミックプライスではない）市場価格をオーダーで推定した。また、エネルギーコストに関しては、装置を2000時間/年で稼働させて5000時間（ $\sim 2 \times 10^7$ 秒）で償却するものと仮定して推計し、これらの値を元にエネルギーコスト1円当たりに除去できる質量（g/円）を算出した。

図6に加工コスト（g/円）のパルス幅・波長依存性を示す。図5と同様に、それぞれの円の面積は加工効率（g/円）に比例している。物理的な評価においては短パルス・短波長ほど加工効率が高い結果が得られたが、経済的な評価においては装置価格が比較的安価な赤外ナノ秒レーザーの優位性が示された。また、同じナノ秒領域でも、より短いナノ秒（10nsよりも2ns）パルス且つ短波長で最も高い加工効率を得られた。UV ナノ秒レーザーの装置価格は赤外ナノ秒レーザーの約4倍であるが、高い物理的な加工効率はその差を上回ったものと言える。

4. まとめ

様々なレーザーを用いてCFRP加工における熱影響の発現と加工効率のパルス幅・波長依存性を調べた。全体的な傾向として、パルス幅が短く波長が短くなるほど物理的な加工効率が高く熱影響が小さくなることが実験的に明らかとなった。一方で、装置価格を考慮した経済的な評価においては、より短いナノ秒かつ短波長において最も高い加工効率を得られた。

加工品質を最優先する場合はフェムト秒レーザーまたはUVピコ秒レーザーを、ある程度熱影響が許容され低コストでの加工が望まれる場合は赤外ナノ秒レーザーを、初期投資額に余裕がある場合はUVナノ秒レーザーを選択するなど、状況に応じて用いるレーザーのパルス幅・波長を選択することとなるのではなかろうか。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団平成26年度一般研究開発助成により実施されたものであり、ここに感謝の意を表

します。また、266 nm/35 ps レーザーはスペクトロニクス（株）から、355 nm ナノ秒レーザーはスペクトラ・フィジックス（株）から装置を借用して実験を行ったものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 炭素繊維協会ホームページ、
<http://www.carbonfiber.gr.jp/field/craft.html>
- 2) 藤田 雅之, 染川 智弘, 尾崎 巧, 吉田 実, 宮永 憲明: レーザー研究, **39**, 701-705, 2011.
- 3) 藤田 雅之, 染川智弘: レーザ加工学会誌, **20**, 34-38, 2013.
- 4) 藤田 雅之: 光学, **44**, 341-349, 2015.
- 5) M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga, Y. Mitooka, K. Mikame; *29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Anaheim, U.S.A., paper #M105, 2010.
- 6) M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga; *31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Anaheim, U.S.A., paper #M1202, 2012.
- 7) M. Fujita, T. Somekawa, N. Miyanaga; *Physics Procedia* **41**, 629-632, 2013.
- 8) M. Fujita, H. Ohkawa, M. Otsuka, T. Somekawa, Y. Maeda, Y. Orii, K. Inaba, G. Okada, N. Miyanaga; *33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. San Diego, U.S.A., paper #M601, 2014.
- 9) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga; *Lasers in Manufacturing*. Munich, Germany, paper #158, 2015.
- 10) R. Weber, C. Freitag, V. Kononenko, M. Hafner, V. Onuseit, P. Berger, T. Graf; *Physics Procedia* **39**, 137-146, 2012.