



M. Fujita

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

藤田 雅之*

1. まえがき

炭素繊維強化プラスチック（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。

CFRPは炭素繊維とマトリックス樹脂から成る複合材料である。典型的な炭素繊維とマトリックス樹脂の物性値を表1に示す¹⁰⁾。熱伝導率、蒸発/分解温度、蒸発熱、それぞれ樹脂と炭素繊維では1桁以上の差がある。炭素繊維に比べて樹脂の方がより低い温度で、より少ないエネルギーで蒸発（昇華）することが分かる。CFRPのレーザー加工における問題は、レーザー照射条件を樹脂に最適化すると炭素繊維が加工できない、炭素繊維に条件を合わせると樹脂に過剰な熱が加わるという点である。

本稿では、これまで行ってきた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。

2. 実験方法

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10 nsまで、波長は266 nmから1064 nmまでをカバーする範囲で微細加工の実験を行った。

表2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を示す¹¹⁾。レーザーパルの繰り返し周波数が1 kHz程度の場合、試料を直進ステージ上に固定し約20 mm/sの低速掃引で加工を行った。繰り返し周波数

表1 典型的なCFRP材料の物性値¹⁰⁾

	熱伝導率 (W/m/K)	蒸発/分解 温度 (K)	蒸発熱 (J/g)
樹脂	0.2	800	1000
炭素繊維	50	3900	43000

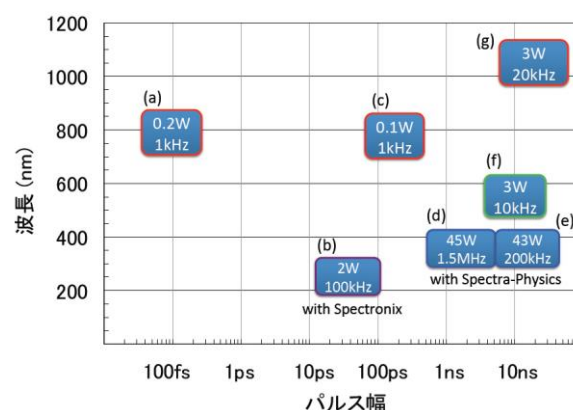


図1 CFRP加工に用いたレーザーのパルス幅と波長

が10～数100 kHzの場合は、試料を高速モーター上に固定し1500 mm/sの高速掃引で加工を行った。さらに、繰り返し周波数が1 MHz以上の場合はガルバノスキャナを用いた。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。試料の形態や厚みに関しては、参考文献11に示す。

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定性的に評価した。

3. 実験結果

図2に図1で示すレーザーを用いて加工した試料表面の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、波長が短いほど、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2 (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532 nmが樹脂を透過するためにCFRP

*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

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

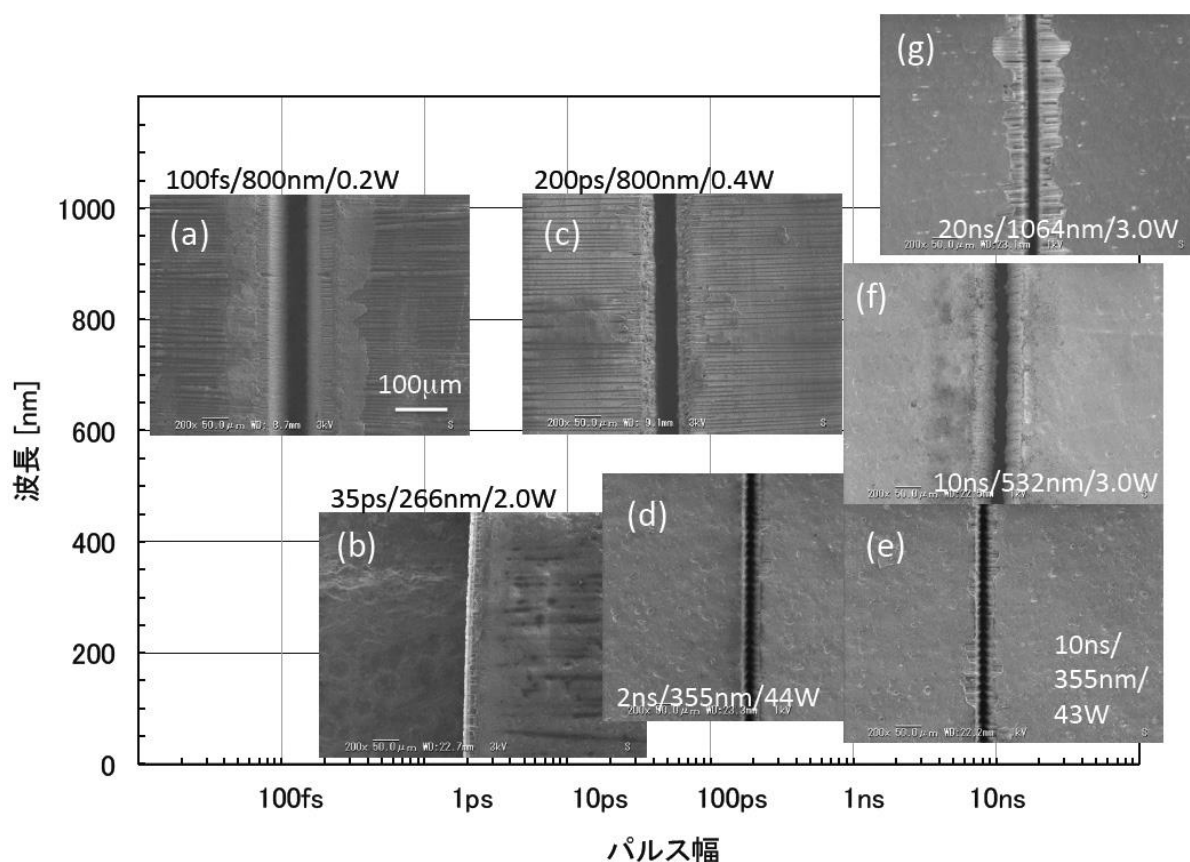


図 2 パルスレーザーを用いた CFRP 加工のパルス幅・波長依存性

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、1064 nm 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 3 にパルス幅/波長が 20 ns /1064 nm, 10 ns/532 nm, 200 ps /800 nm 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 3 (a), (b) は図 2 (g), (f) と同じ SEM 像であり、図 3 (d), (e) は図 3 (a), (b) に対応した試料裏面の SEM 像である。図 3 (d)

で確認できる炭素繊維の露出が図 3 (e) には見られない。532 nm 光によって炭素繊維が切断された後に樹脂層が弱い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¹⁰⁾。

図 3 (c), (f) に、パルス幅 200 ps, 波長 800 nm 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 2 (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

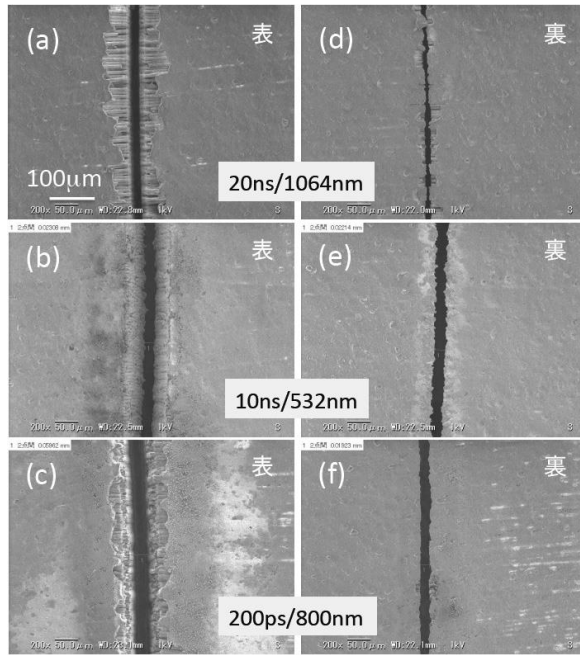


図3 波長/パルス幅が、1064 nm/20 ns、532 nm/10 ns、800 nm/200 ps のレーザーを用いて加工した試料の表面 (a)-(c)、裏面 (d)-(f)の SEM 像

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。10ns /532nm 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。照射強度が高くなると熱影響領域が抑制されるというモデルが提唱されている¹⁰⁾。パルス幅と波長の2軸に加えて照射強度の3軸目を設定することで、より完全なデータベースになると考えられる。

3. 加工効率の考察

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・波長依存性を定性的に評価したが、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,

と仮定した。

CFRP 除去質量は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

表3 mg/kJ を単位とした物理的なレーザー加工効率。 τ はパルス幅, λ は波長, P は平均パワー, I は集光強度。

τ	λ (nm)	P (W)	I (W/cm ²)	mg/kJ
100 fs	800	0.2	2.7×10^{13}	31
35 ps	266	2.0	2.1×10^{10}	15
200 ps	800	0.4	2.7×10^{10}	15
2 ns	355	45	3.4×10^9	14
10 ns	355	43	5.0×10^9	5.4
10 ns	532	3.0	1.2×10^{10}	2.5
20 ns	1064	3.0	1.4×10^9	2.7

表4 文献中で示されたデータから評価した加工効率。 τ はパルス幅, λ は波長, P は平均パワー。

Ref.	τ	λ (nm)	P (W)	notes	mg/kJ
12	600 fs	1030	150	~2mm ³ /s, 6MHz	20
13	8 ps	1030	1.5k	8mm ³ /s/1.1kW	11
14	10 ps	1064	23	1mm ³ /min./W	25
14	10 ps	532	14	1mm ³ /min./W	25
14	10 ps	355	10	1mm ³ /min./W	25

表5 各種レーザーの光子コストの評価。

	出力, 市場価格	万円/W	円/kJ
フェムト秒レーザー	5W, 5000 万円	1000	500
ピコ秒レーザー	10W, 5000 万円	500	250
UV ナノ秒レーザー	10W, 1500 万円	150	75
Green ナノ秒レーザー	10W, 600 万円	60	30
IR ナノ秒レーザー	10W, 400 万円	40	20

め、CFRP の平均密度を 1.5 g/cm³ と仮定して算出した。また、照射パワー (W) と加工時間 (s) から加工に要したエネルギー (J) を求めた。得られた結果を表3に示す。

また、自前の実験データだけでは波長とパルス幅が限定されるので、文献¹²⁻¹⁴⁾に掲載された値を元に加工効率を評価した。結果を表4に示す。表中で notes の欄に文献中に記載されている物理量を示す。

表3と表4で示した加工効率の値を視覚的に図4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昇華に費やされた場合の理論限界値は 45 mg/kJ となり¹⁰⁾、図4の左下に参考値として破線で示している。また、10ns/532nm のデータは集光強度不足のために小さすぎる値が得られたと考えられるため、参考値として破線で示している。同様に、35ps/266nm のデータも、試作段階でのレーザーを利用したためにピコ秒レーザーとしては集光強度が低く、小さな値になっていることに留意していただきたい。

いずれにせよ、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、加工効率が高いことが分かる。図2の結

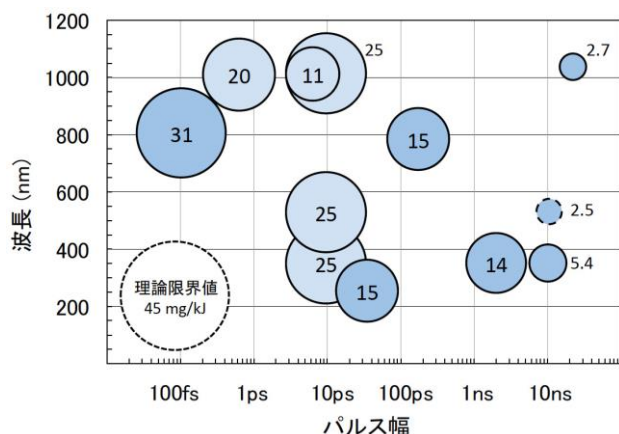


図4 mg/kJの単位で評価したCFRPのレーザー加工効率の
パルス幅、波長依存性。それぞれの円の面積は
加工効率 (mg/kJ) に比例。

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。図2(d)と(e)に相当する円を比較すると、同じ波長(355nm)でもパルス幅が10nsよりも2nsの方が加工効率が2倍以上高くなっているが、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。図2(d)の場合(2ns/355nm)はパルスオーバーラップが殆どゼロの状態で切断加工を行った。また、同じサブナノ秒領域で図2(b): 35ps/266nmと図2(c): 200ps/800nmに相当する円を比べると、パルス幅と波長が短い分、35ps/266nmの方が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

mg/kJを単位とした物理的なレーザー加工効率を、g/円を単位とした経済的な評価に変換するを試みる。表5に各種レーザーのフォトンコスト(円/kJ)の概算値を示す。市場価格に関しては、あくまで筆者の経験に基づく予測値であるため、読者の実情に応じた値に変えて比例計算していただきたい。万円/W から円/kJ への換算には、装置償却までの運転時間を2000時間/年で5000時間(2×10⁷秒)と仮定した。一例としてフェムト秒レーザーの場合は、1000万円/(W×2×10⁷秒)で円/J が得られる。運転費用や消耗品費用は無視している。

図5にg/円の単位で評価したCFRPのレーザー加工効率のパルス幅、波長依存性を示す。それぞれの円の面積は加工効率(g/円)に比例している。図4の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、図5の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、より短いナノ秒パルス(10nsよりも2ns)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。

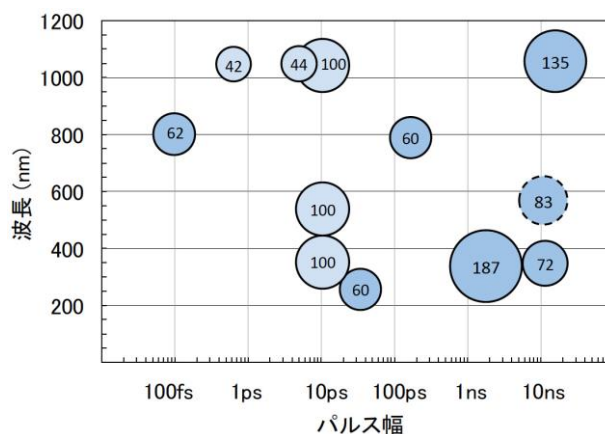


図5 g/円の単位で評価したCFRPのレーザー加工効率
のパルス幅、波長依存性。それぞれの円の面積は
加工効率 (g/円) に比例。

3.3.1 CFRP 加工効率の改善策

図4に理論限界値として45mg/kJの円を表示しているが、これは照射エネルギーが全て吸収され炭素繊維の蒸発(昇華)に費やされた場合の値である。実験を重ねていくと、CFRPを切断するには切り代に相当する部分の炭素繊維を全て蒸発させる必要はないということに気付いた²⁾。表1に示す様に、樹脂に比べて炭素繊維を蒸発させるのに要するエネルギーは43倍である。炭素繊維の蒸発量を最小限に抑える工夫が重要となる。図6に少ないエネルギーでCFRPを除去するアイデアを示す。ポイントは炭素繊維を細切れにした上で周囲を固める樹脂を蒸発させる事である。

図6(a)は多重線加工を示す。まず、炭素繊維に切れ目を入れ、少し離れたところを照射すると、炭素繊維が細切れで除去され、エネルギーの節約ができる。この時、集光点の左側に位置する炭素繊維は熱的に孤立しているので温度が上がりやすくなり、炭素繊維を固定している樹脂が容易に蒸発する。図6(b)は2ビーム同時照射の例を示す。集光点の間に熱が集中することで炭素繊維の周囲の樹脂が蒸発し、細切れになった炭素繊維は固体のまま飛散して

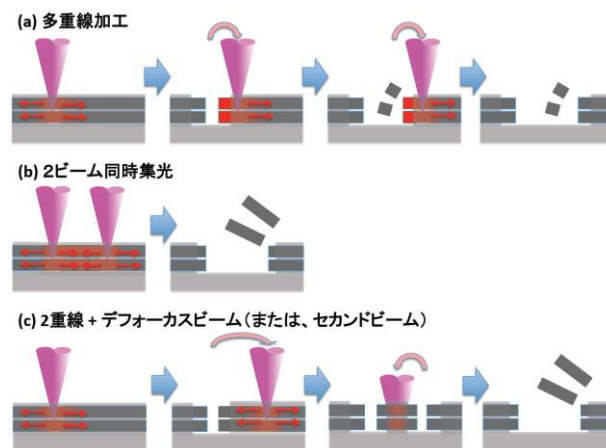


図6 CFRPのレーザー加工効率を改善するアイデア

いく。図 6 (c) の場合は、間隔が広めの 2 重線加工を施して炭素繊維を孤立させたところにデフォーカスした低強度かつ大きめの集光スポットでレーザー光を照射する、或いはパルス幅が長めで低ピークパワーのセカンドビームを照射すると、容易に樹脂が蒸発し細切れになった炭素繊維は固体のまま飛散していく。

3.3.2 複合パルス加工

図 7 に示す手法 (図 6 (c) に相当) で CFRP の溝加工を試みた結果を紹介する。溝の端に相当する箇所を短パルスレーザーで加工し (図 7 (a))、次いで溝に残る部分へ長パルスレーザーを照射し (図 7 (b)) 除去することにより、高品質かつ高効率に溝を形成 (図 7 (c)) することが可能となる。

試料として炭素繊維が一方向に並んだ CFRP を用いた実験結果を図 8 に示す。パルス幅 200 ps のレーザー (波長 800 nm, 出力 0.4 W, 繰り返し 1 kHz) を用いて 100 μm 間隔で深さ約 100 μm の細溝を 4 本形成し、細溝の間に残った部分へパルス幅 200 ns のレーザー (波長 1064 nm, 出力 13 W, 繰り返し 25 kHz) を 100 mm/s の掃引速度で照射し、幅約 150 μm の溝を形成した。図 8 (a) の 4 本の溝はレーザー光を 50 往復掃引して形成したが、200 ns のレーザーを 1 回掃引するだけで図 8 (b) のような溝加工が実現した。図 8 (a) の段階で炭素繊維が細切れになっているために、低強度の 200 ns レーザーでも 100 μm 幅の溝を容易に形成することができた。

図 9 に図 8 (b) の加工試料を表面から見た写真 (a) (図中に示す矢印が幅 150 μm の溝に相当) と 200 ns レーザーだけでシングルスキャンで溝加工した試料の写真 (b) を示す。溝両端部をあらかじめ加工していない場合 (図 9 (b)) は、溝周囲に炭素繊維が露出した熱影響部が観察され、溝幅も狭い。図 9 (a) では、炭素繊維が細切れになっているところへ 200 ns レーザーを照射しているため、横方向への熱伝導も抑制され“孤立した”炭素繊維が効率よく除去されたものと考えられる。この時に樹脂内部に存在した炭素繊維はアブレーションされずに固体のまま吹き飛んだものと推測される。

図 8、図 9 に示した加工試料では、炭素繊維と加工溝の方向が互いに直交しており、炭素繊維を細切れにする効果が顕著に現れた。ところが、加工溝方向を炭素繊維に対して平行にすると様子が一変する。図 10 に図 7 と同じ手法で炭素繊維と平行に溝加工した CFRP の断面 (図 10 (a)) 及び表面 (図 10 (b)) から観察した光学顕微鏡写真を示す。図 10 (a) に示す矢印部に 200 ns レーザーを照射した。図 10 (b) 内の矢印で示す部分は図 9 (a) とは異なり、樹脂だけが蒸発し炭素繊維が露出していることが分かる。図 8 (b) と図 10 (a) を比較すると、樹脂が蒸発した量が格段に異なる。これは、CFRP のレーザー加工において炭素繊維による熱伝導が重要な役割を果たすことを示している。

結果は割愛するが、炭素繊維に対して 45 度方向の溝加

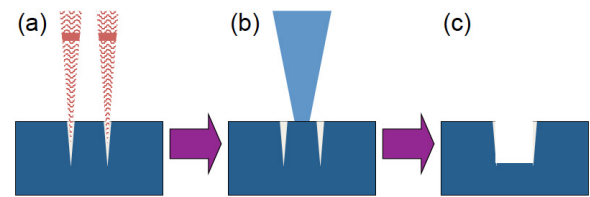


図 7 複合パルス加工の手順：(a) 100 μm 間隔で幅 100 μm 程度の細溝を短パルスレーザーで加工し、(b) 溝間に残る部分へ長パルスレーザーを照射すると、(c) 高効率で高品質な溝が形成される。

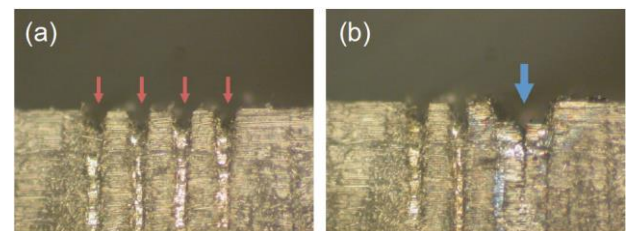


図 8 複合パルス加工例：(a) パルス幅 200 ps のレーザーで細溝を形成し、(b) その一部にパルス幅 200 ns のレーザーを照射することで幅 150 μm の溝を形成。

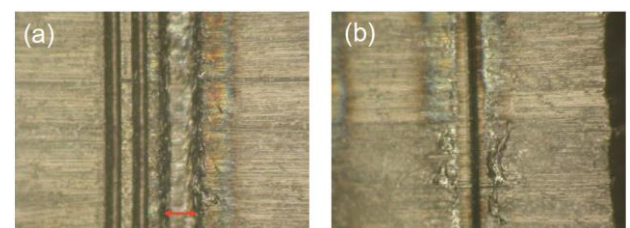


図 9 図 8 (b) の加工試料を表面から見た写真 (a) とパルス幅 200 ns パルスレーザーだけで溝加工 (シングルスキャン) した試料の写真 (b)。図中に示す矢印が幅 150 μm の溝に相当。

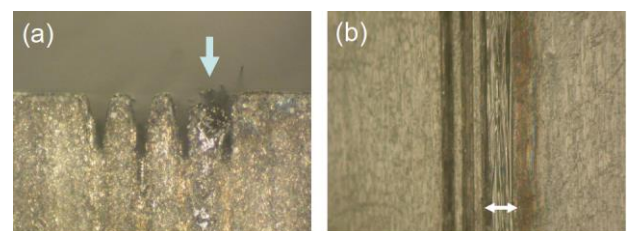


図 10 図 7 と同じ手法で、炭素繊維と平行に溝加工した試料の (a) 断面および (b) 表面。パルス幅 200 ns のレーザーを (a) の矢印で示す部分に照射。 (b) の矢印は (a) の矢印で示す部分に相当。

工を試した場合は、垂直方向の溝加工と同様の結果が得られ、炭素繊維を細切れにする効果を確認することができた。また、炭素繊維と平行方向に溝加工する対策として、この手法をさらに発展させた“ミシン目加工”を行った。結果は参考文献 2 に示す。

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が得られた。

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¹⁵⁾。

また、炭素繊維と樹脂の複合材である CFRP のレーザー加工においては炭素繊維の除去がキーポイントであり、エネルギー消費/利用量が決まる。除去加工という観点からは必ずしも全ての材料を蒸発させる必要はなく、掃引方法に工夫を凝らすことで加工効率の改善が可能であることが確認できた。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。また、35 ps /266 nm 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いました。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: Short-Pulse Laser processing of CFRP, *Physics Procedia* **39**, 137 (2012).
- 11) 藤田雅之: 天田財団助成研究成果報告書, **30**, 235-238, 2017.
- 12) T. Mans, J. Dolkemeyer, C. Schnitzler: High Power Femtosecond Lasers, *Laser Tech. J.*, **3**, 40 (2014).
- 13) C. Freitag, M. Wiedenmann, J. P. Negel, A. Loescher, V. Onuseit, R. Weber, M. A. Ahmed, T. Graf: *Proc. of ICALEO'2014*, paper #702, (2014).
- 14) A. Wolynski, T. Herrmann, P. Mucha, H. Haloui, J. L'huillier: *Physics Procedia*, **12**, 292 (2011).
- 15) 藤田雅之, 染川智弘, 宮永憲明: 第 87 回レーザ加工学会講演論文集, 117-120, 2017.