

3 kW 出力シングルモードファイバレーザによるCFRP加工

光応用技術R&Dセンター レーザフォトニクス研究部 田久保 勇 也¹・生 駒 晋 也³・梅 田 淑 夫³
内 山 圭 祐²・島 研 介⁴

Processing of CFRP by Using 3-kW Output Single-mode Fiber Laser

Y. Takubo, S. Ikoma, Y. Umeda, K. Uchiyama, and K. Shima

3 kW シングルモードファイバレーザとガルバノスキャナを組み合わせ、CFRP板の高速切断を実現した。スキャン速度 13 m/s、スキャン回数 100 回において、3.1 mm厚の熱硬化性CFRPの切断に成功した。この時の実効加工速度は 7.8 m/minであった。スキャン間のインターバルは 20 ms未満であり、ほぼ連続的なスキャンで加工を行っている。切断後のサンプルの断面状態は良好であり、表面のHAZの大きさは平均で 97 μm であった。高速切断においてもHAZ幅は小さく保たれており、CFRP加工においてシングルモードファイバレーザが効果的に利用できることが示された。

High speed continuous processing of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is demonstrated by using a 3-kW single-mode fiber laser and a galvanometer scanner. The thermoset CFRP with the thickness of 3.1 mm is successfully cut with 100 scans at the scanning speed of 13 m/s. The corresponding effective cutting speed is 7.8 m/min. The laser is scanned continuously with the time interval of the laser irradiation of less than 20 ms. The processing results show the good surface conditions with the heat-affected zone (HAZ) of 97 μm on average. The results indicate the high power CW single-mode fiber laser is applicable to the high speed CFRP processing.

1. ま え が き

近年、自動車産業界では温室効果ガスの削減要求を背景とした車体の軽量化が進められており、軽量・高強度な車体材料としてCFRPの需要が高まっている。CFRPの切断加工において現在主流となっているのは刃物を用いた機械加工であるが、高強度なCFRPを切断すると工具の摩耗が激しく、切断品質の低下につながるうえ、工具の頻繁な交換にコストが生じることが課題となっている。そこで非接触の切断手法として、レーザ加工が注目されている。

レーザを用いたCFRP切断における大きな課題として、HAZが生じることが挙げられる。CFRPにおいては炭素繊維と樹脂の蒸発・分解温度が大きく異なるため、熱の広がりによって樹脂が消滅したりダメージを受け、HAZが生じてしまう。これにより切断面の精度が機械加工に比べて劣ってしまうという問題がある。レーザ加工においてHAZを抑制する方法として、パルス幅がps～fsオーダーの超短パルスレーザを用いる加工技術がある¹⁾。超短パルスレーザを用いた加工はアブレーション加工（非熱加工）と呼ばれ、高いピークパワーで瞬間的に加工を行うこと

で熱の広がりを大きく低減することができる。しかし、この方法では単位時間あたりに与えられるエネルギーが小さいため、加工時間が長くなってしまいう問題がある。産業応用を考える場合には生産性が最重要視されるため、数mm厚のCFRPを数m/minの加工速度で切断することが求められる。加工速度を上げるための解決策としては、高出力CWレーザを用いることが挙げられる。高出力ディスクレーザやファイバレーザを用いて 10 m/minを超える速度での加工を行った結果が報告されているが^{2), 3)}、いずれの報告もHAZが比較的大きい。HAZを抑えるためにしばしば用いられる方法として、同じ場所を複数回スキャンし、スキャン間に時間的なインターバルを挿入する加工技術がある。しかしこの方法では実効加工速度は遅くなってしまいう。HAZを抑えつつCFRPを高速に加工する方法として、シングルモードファイバレーザとガルバノスキャナを組み合わせる手法が挙げられる。シングルモードファイバレーザは高いパワー密度と小さいスポット径を実現することが可能であるため、切断位置に効率的に入熱を行うことができる。またガルバノスキャナを用いて高速スキャンすることで、HAZを抑えることができる。

当社ではこれまで内製のシングルモードファイバレーザを用いて様々な加工技術研究を行っている^{4), 5)}。本報告においては 3 kWのシングルモードファイバレーザを用いたCFRPの高速切断について述べる。ガルバノスキャ

1 レーザフォトニクス研究部 (工学博士)

2 レーザフォトニクス研究部

3 レーザフォトニクス研究部 グループ長

4 光応用技術 R&D センター 上席研究員

略語・専門用語リスト		説明
略語・専門用語	正式表記	
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic	強化材に炭素繊維を用いた繊維強化プラスチック。
HAZ	Heat-Affected Zone	熱影響部。レーザによる入熱で材料の状態が変化した部分。
CW	Continuous Wave	連続波。
UD	Unidirectional	繊維が織られておらず、一方向に揃えて作られたもの。
プリプレグ		炭素繊維に樹脂が含浸したシート状の材料。

ナのスキャン速度を 13 m/sに設定し合計 100 回のスキャンを行うことで、厚さ 3.1 mmのCFRPの切断に成功した。この時の実効加工速度は 7.8 m/minであった。スキャンごとのインターバル時間は 20 ms未満であり、通常挿入されるインターバル時間と比べて圧倒的に短いため、ほぼ連続的なスキャンで加工を行っている。HAZの大きさは平均で 97 μm であり、最も大きい個所でも 200 μm 未満であった。本結果により、CFRPの高速切断においてシングルモードファイバレーザが効果的に利用できることが示された。

2. 実験条件

図 1 に実験系の概略図を示す。内製の 3 kWシングルモードファイバレーザの光出力端となるデリバリーケーブルをガルバノスキャナに接続しており、レーザのビーム品質を示す M^2 (エムスクエア) の値は 1.3 である。ガルバノスキャナの倍率は 3 倍であり、レーザのスポット径は約 100 μm である。実験に使用したCFRP材は 3.1 mm厚のUD材であり、0°, 90°の方向に交互に 13 層のプリプレグが積層されている。使用したワークの寸法

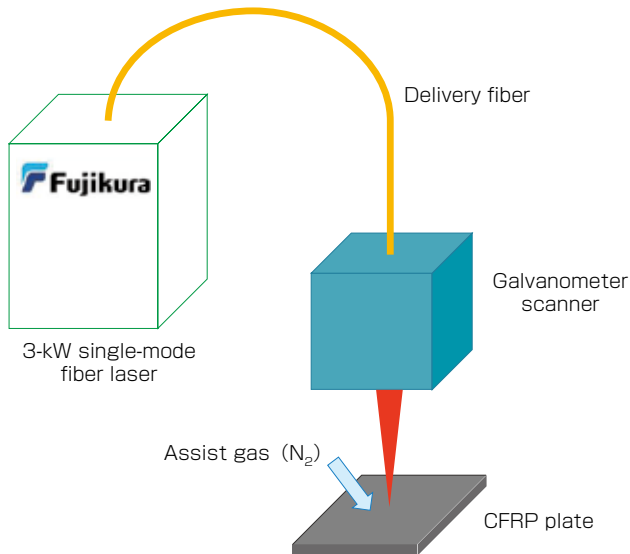


図1 CFRP切断実験系の構成図
Fig. 1. CFRP processing setup.

は 150 mm×30 mmである。加工中に生じる繊維くずの除去、および表面の冷却のため、アシストガスとして窒素ガスを噴射している。

図 2 にレーザのスキャン条件を示す。幅 30 mmのCFRP板に対し、スキャン距離は片道で 200 mmとしている。これによって生じる加工のインターバルは 20 msであり、通常挿入されるインターバルが数 100 ms～数sであることを考えると、ほぼ連続的なスキャン加工と言える。カーフ（切断溝）幅を確保して繊維くずを効率的に排出するために往路と復路の間に間隔を設定しており、ワーク表面においては 400 μm の間隔に設定している。また加工効率を上げるため、一定回数のスキャンごとに焦点位置をワーク内部にずらしている。この際に往路と復路の間隔も調整しており、こちらについては次章で詳しい検討結果を述べる。

3. スキャン条件の最適化

実効加工速度を向上させるためには、できるだけ少ないスキャン回数で切断を実現する必要がある。そこでスキャン回数ごとにカーフ深さの観察を行い、条件の最適化を行った。まず初めに加工焦点をワーク表面に合わせた状

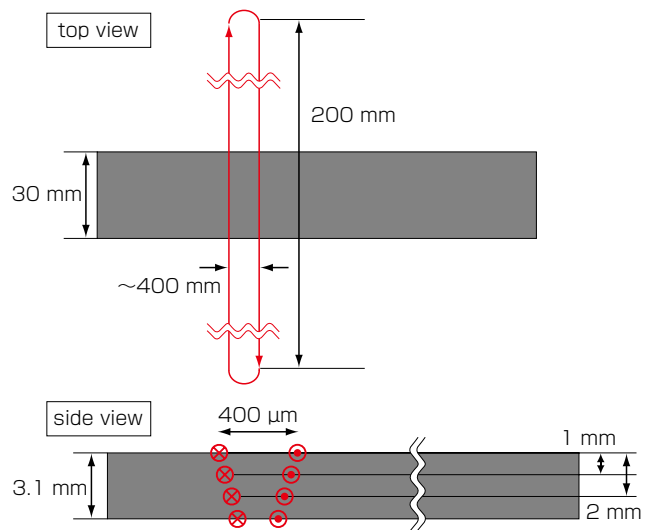


図2 スキャン条件
Fig. 2. Scanning condition.

態でスキャンを行い、深さの測定を行った。図3にスキャン回数とカーフ深さの関係を示す。スキャン回数が増えるごとにカーフ深さは深くなっているが、回数が増えるにつれて効率は下がってきていることが見受けられる。図中の写真はスキャン回数30回時の側面写真である。カーフ中央部に山が残っているが、レーザ照射位置での深さはこの時点で1 mmを超えていることがわかる。

次にワーク表面に焦点を合わせた状態で30回スキャンを行ったのち、焦点をワークの内部1 mmの地点にシフトしてさらにスキャンを行った。焦点位置をシフトさせる際に、往復におけるスキャンのずらし幅も400 μm から350 μm に変更した。これによりカーフの底に効率的にレーザ光を照射することができる²⁾。図4にこの条件下でのスキャン回数とカーフ深さの関係、およびスキャン回数60回時の側面写真を示す。同じ合計回数が60回の状態を図3と比較してみると、焦点位置をシフトさせた際にはカーフ深さが2 mmを超えており、加工効率が向上していることがわかる。

同様に、焦点を表面に合わせた状態で30回、内部1 mmの位置に合わせた状態で30回スキャンしたのち、

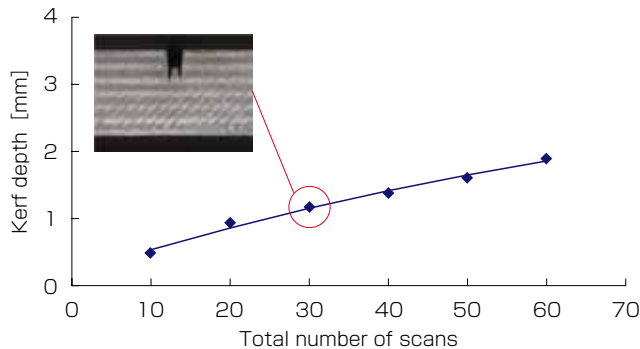


図3 スキャン回数とカーフ深さの関係
(焦点：ワーク表面)

Fig. 3. Kerf depths versus the number of scans. (focal position is the surface of the CFRP plate)

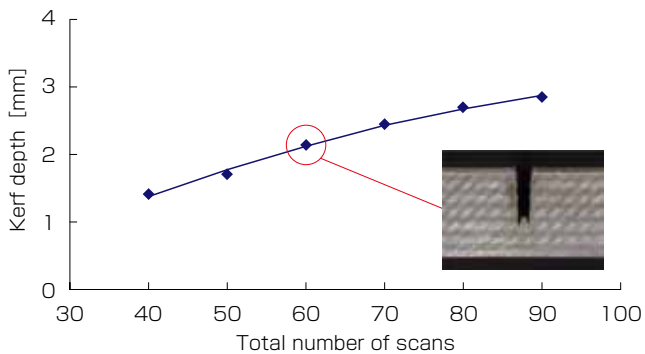


図4 スキャン回数とカーフ深さの関係
(焦点：ワーク表面で30回スキャン後、1 mm内部に合わせてスキャン)

Fig. 4. Kerf depths versus the total number of scans. (focal position is shifted to 1-mm inside the CFRP plate after 30 scans on the surface of the plate)

内部2 mmの位置に焦点を合わせてスキャンを行った。スキャンの往復におけるずらし幅は300 μm とした。図5にこの条件でのスキャン回数とカーフ深さの関係、およびスキャン回数100回時の側面写真を示す。100回のスキャンではほぼ切断に近い状態まで達しており、110回以上のスキャンで切断を実現することができた。より早い段階で焦点位置を内部にずらし、最終的にワーク底面位置でのスキャンを行うことにより、スキャン回数はさらに減らすことができると考えられる。

4. 切断実験結果

前章における検討結果をもとに、表1に示すようにスキャン条件を設定して切断実験を行った。25回のスキャンごとに焦点位置をワークの内部へ1 mmずつシフトさせ、同時に往復でのずらし幅を50 μm ずつ狭めている。合計のスキャン回数は100回(50往復)である。

この条件で加工を行い、3.1 mm厚のCFRP板の切断に成功した。図6に切断後の側面写真と断面写真を示す。カーフ角度は3°未満であり、また断面の状態も良好であった。スキャン速度13 m/sをスキャン回数100回で割ると、実効加工速度は0.13 m/s = 7.8 m/minとなる。3.1 mm厚のCFRP切断としては、非常に速い速度で実現することができた。また図7に切断後のサンプルの上面の光学顕微鏡画像、および電子顕微鏡画像を示す。HAZの幅は平均でおよそ97 μm であり、最も大きい地点でも

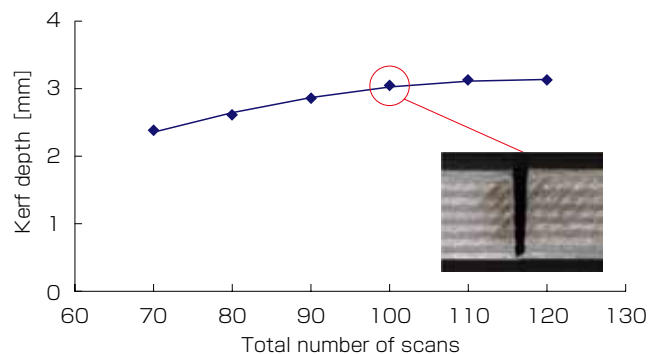


図5 スキャン回数とカーフ深さの関係 (焦点：ワーク表面で30回スキャン、1 mm内部で30回スキャン後、2 mm内部に合わせてスキャン)

Fig. 5. Kerf depths versus the total number of scans. (focal position is shifted to 2-mm inside the CFRP plate after 30 scans on the surface of the plate and 30 scans on 1-mm inside the plate)

表1 切断実験におけるスキャン条件
Table 1. Scanning conditions in cutting experiment.

焦点位置 (mm)	スキャン位置のずらし幅 (μm)	スキャン回数 (回)
0 (ワーク表面)	400	25
1	350	25
2	300	25
3	250	25

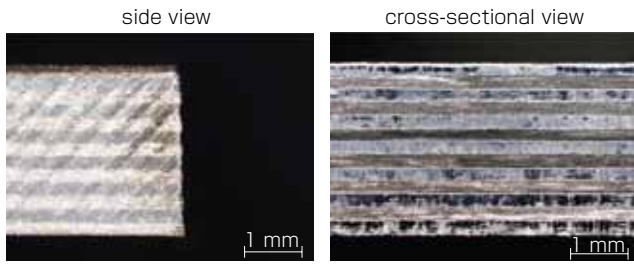


図6 切断後の側面、および断面の光学顕微鏡画像
Fig. 6. Side view and cross-sectional view of the processed CFRP plate.

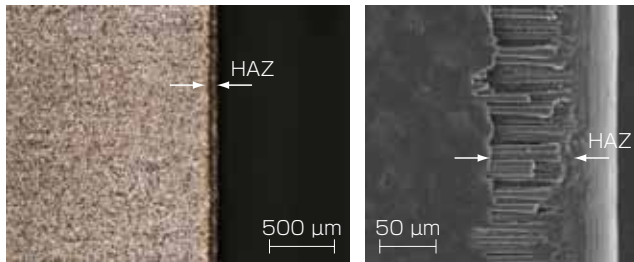


図7 切断後の上面の光学顕微鏡画像、および電子顕微鏡画像
Fig. 7. Microscopic image and SEM image of the top view of the processed CFRP plate.

200 μm 未満であった。7.8 m/minという高速切断においても、HAZの大きさを100 μm 程度という小さい水準に抑えることができた。

最後にアシストガスがHAZに与える影響について調査を行った。図8にアシストガスの元圧を0.1～1.3 MPaまで変化させた際のHAZの大きさを示す。図中のバーは各条件での標準偏差を示している。元圧を下げて流速が下がるとHAZの大きさが大きくなる傾向が見られるが、0.1 MPaまで下げた場合でもおよそ120 μm という比較的小さな値であった。シングルモードファイバレーザによる小さなスポット径、およびガルバノスキャナによる高速掃引によって、HAZの広がりや抑えられたと考えられる。ただし0.7 MPa以下ではカーフが最下層には達していたものの、切断には至らなかった。アシストガスの流速が低下したため加工中に生じる繊維くずを除去できず、加工効率が低下したと考えられる。アシストガスの影響に関しては流速（流量）だけでなく、噴射する角度や距離等も複合的に影響しているため、さらなる調査が必要である。

5. むすび

3 kW出力のシングルモードファイバレーザとガルバノスキャナを組み合わせて、CFRP板の高速切断を行った。スキャン速度13 m/s、スキャン回数100回、すなわち実効加工速度7.8 m/minにおいて、3.1 mm厚のCFRPの切断に成功した。この時のHAZの大きさは平均で97 μm 、

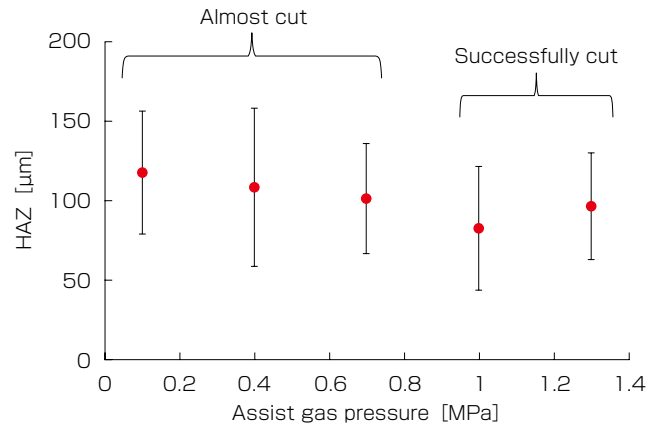


図8 アシストガスの元圧とHAZの関係
Fig. 8. Size of the HAZ versus the pressure of the assist gas.

最大個所でも200 μm 未満であった。シングルモードファイバレーザによる小さなスポット径とガルバノスキャナによる高速掃引、およびアシストガスによる冷却により、HAZを小さく抑えた高速切断を実現することができた。今回実現した実効加工速度は自動車産業界における生産性の要求を満たしており、シングルモードファイバレーザによる加工が産業界において効果的に利用できる一例が示された。今後もシングルモードファイバレーザを用いた特殊材料の加工の検討を行い、産業界におけるレーザ加工の発展に寄与していきたい。

参考文献

- 1) S. Blumel, P. Jaeschke, O. Suttman, and L. Overmeyer, "Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources," *Physics Procedia* 56, pp.1143-1152, 2014.
- 2) A. N. Fuchs, M. Schoeberl, J. Tremmer, and M. F. Zaeh, "Laser cutting of carbon fiber fabrics," *Physics Procedia* 41, pp. 372-380, 2013.
- 3) Dirk Herzog, Matthias Schmidt-Lehr, Max Oberlander, Marten Canisius, Markus Radek, and Claus Emmelmann, "Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness," *Materials & Design* 92, pp. 742-749, 2016.
- 4) K. Uchiyama, S. Ikoma, Y. Takubo, M. Kashiwagi, K. Shima, and D. Tanaka, "High speed laser processing using a 3 kW single-mode fiber laser with a 20-m-long delivery fiber," *Proc. of LPM2017*, Toyama, Japan, Mo3-O-7, 2017.
- 5) S. Ikoma, K. Uchiyama, Y. Takubo, M. Kashiwagi, K. Shima, and D. Tanaka, "High speed and high aspect ratio laser processing using a high-power single-mode continuous-wave fiber laser with galvano scanner," *The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Atlanta, USA, P115, 2017.