

5 kWシングルモードファイバレーザによるCFRPの高速切断

光応用技術R&Dセンター 田 久 保 勇 也¹・鈴木 究²・阪 本 真 一³・山 形 友 二⁴・
寺 田 佳 弘⁵

High Speed Laser Cutting of CFRP using 5-kW Single-mode Fiber Laser

Y. Takubo, K. Suzuki, S. Sakamoto, Y. Yamagata, and Y. Terada

当社は、長さ7 mのレーザデリバリケーブルを備えた5 kW連続波（CW）シングルモードファイバレーザを開発した。高出力と長尺のレーザデリバリケーブルを両立させるために、全固体型フォトリソニックバンドギャップファイバ（PBGF）を採用し、誘導ラマン散乱（SRS）を効果的に抑制することに成功した。ビーム品質指標である M^2 値は出力に関わらず1.6で安定しており、最大出力時には38 %という高い電力変換効率（WPE）が得られた。また、200時間を超える長時間の運転においても安定した出力を得られ、本機体の高い信頼性が実証された。レーザを高速ワブリングヘッドと組み合わせて加工実験を行い、厚さ19 mmの炭素繊維強化プラスチック（CFRP）板の高速切断に成功した。

We demonstrated a 5-kW continuous-wave (CW) single-mode fiber laser with a 7 m-long laser delivery cable. To achieve both high power and long laser delivery cable length, we adopted an all-solid photonic bandgap fiber (PBGF) to suppress effectively stimulated Raman scattering (SRS). The beam quality factor (M^2) remained stable at 1.6 independent to the output power, and a high wall-plug efficiency (WPE) of 38% was achieved at the maximum output. In addition, the stable output during long-term operations exceeding 200 hours confirmed the high reliability of the system. When our laser was combined with a high-speed wobble head, it demonstrated excellent cutting performance on 19-mm-thick carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates.

1. ま え が き

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、軽量かつ高強度な材料として特に航空・自動車産業を中心に需要が拡大している。一般的には機械工具による切断や穴あけ加工が主流だが、CFRPは高い強度を有するために工具が非常に摩耗しやすいという問題がある。工具の摩耗は加工品質の低下を招くため頻繁な工具交換が必要となり、結果として製造コストの増加につながる。そこで近年では工具摩耗が発生しない加工方法として、レーザ加工が注目されている。

CFRPのレーザ加工における最大の問題は、加工部近傍に熱影響部（HAZ）が発生することである。これはCFRPの主成分である炭素繊維と樹脂の蒸発・分解温度が大きく異なるため、加工時の熱の広がりによって樹脂が揮発、焼失、あるいは変質してしまう現象である。HAZを抑制する手法としてはパルスレーザ、特にパルス幅がps～fsオー

ダの超短パルスレーザを用いる手法が報告されており、この手法では、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極限まで抑えることができる^{1) 2) 3)}。しかしその一方で、加工に必要なエネルギーを与えるためには長時間レーザ光を照射する必要があるため、製造現場で求められるスループットを満たすことが難しいという課題がある。

この問題を解決するための別のアプローチとして、シングルモードレーザと高速スキャナを組み合わせた加工方法が挙げられる^{4) 5)}。シングルモードレーザは高いパワー密度と小さいスポット径を両立できるため、高速スキャナとの組み合わせにより熱の広がりを抑えつつ加工を行うことが可能となる。当社ではこれまでに、3 kW出力のシングルモードファイバレーザと高速スキャナを組み合わせたCFRPの高速切断を行い、実効切断速度7.8 m/min、HAZ 100 μ m未満という結果を得ている^{6) 7)}。さらに実効切断速度を向上させるためには、レーザ出力をより大きくすることに加え、出射端の可動域を拡大し、広範囲を加工できるようにすることも重要である。通常レーザ本体は加工装置の外部に設置され、出射端を加工ヘッドまで伸ばして固定するため、その上で広範囲に出射端を移動させるために

1 レーザフォトリソ研究部 主査
2 レーザフォトリソ研究部 アシスタントマネージャー
3 レーザフォトリソ研究部 主席研究員
4 レーザフォトリソ研究部 グループ長
5 レーザフォトリソ研究部 部長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
シングルモードファイバ レーザ	Single-mode Fiber Laser	単一の発振器から生じるレーザ光を出力として用いるファイバレーザ。基本モードおよび低次モードのみが導波するためビーム品質が高く、集光性に優れた特徴を持つ
フォトニックバンド ギャップ	Photonic Bandgap	周期的な屈折率構造を持つ媒質中で、特定波長の光が伝搬できなくなる現象
フォトニックバンド ギャップファイバ (PBGF)	Photonic Bandgap Fiber	クラッド部分に周期的な構造を持たせることで上記フォトニックバンドギャップを生じさせ、伝搬あるいは遮断する光の波長を選択できる特殊な光ファイバ
誘導ラマン散乱 (SRS)	Stimulated Raman Scattering	非線形光学現象の一種であり、レーザの発振波長成分をポンプ光とし、異なる波長成分がストークス光として生じる現象。高出力かつ伝搬距離が長いほど生じやすい。発生すると発振波長の成分が減少して出力が低下し、逆方向に伝搬するSRS光が光学部品を損傷させる問題がある
主発振器出力増幅器 (MOPA)	Master Oscillator Power Amplifier	レーザ光を発振させる主発振器と、その光をさらに増幅する増幅部からなるレーザ方式。高いビーム品質を維持したまま出力を向上することができる
M ² 値 (エム・スクエア値)	M ²	レーザ光がどれだけガウシアンビームに近いかを示す値であり、シングルモードレーザの指標としてよく用いられる。完全なガウシアンビームの場合は値が1となり、1に近いほど集光性の高いビームといえる
ニアフィールドパターン (NFP)	Near Field Pattern	レーザの出射端から近い領域におけるビームパターン
焦点深度 (レイリー長)	Rayleigh Length	ビームの断面積が集光点における断面積の2倍になる位置と、ビームの集光点の間の距離。集光性をどれだけの距離で維持できるかの指標となる

は5 m以上の長いデリバリケーブルを持つことが望ましい。しかし、高出力シングルモードファイバレーザにおいて長いデリバリケーブルを採用すると、誘導ラマン散乱（SRS）などの非線形効果が発生してしまうため、従来製品の出力は3 kW程度に制限されていた。そこで当社では、高出力シングルモードファイバレーザにおける長尺のデリバリケーブル採用を実現するために、SRS抑制の方策として全固体型フォトニックバンドギャップファイバ（PBGF）を採用した。

本報告では、長さ7 mのレーザデリバリケーブルを搭載した5 kW出力のシングルモードファイバレーザの開発、およびそれをういたCFRP加工結果について述べる。

2. ファイバレーザの構成

フォトニックバンドギャップファイバ（PBGF）は、周期構造によって形成されたフォトニックバンドギャップを利用した特殊な光ファイバである。周期構造の設計によってフォトニックバンドギャップを制御し、特定波長の光の伝搬を制御することができる。当社が開発した全固体型PBGFの断面図を図1に示す。本PBGFは、レーザの発振波長を透過させつつ、SRSによって生成される波長成分を遮断するように設計されている。SRSはファイバ長が長いほど生じやすく、一定以上のSRS光が発生するとレーザの出力光が低下してしまうという性質があるが、PBGFをSRSフィルタに適用することで、レーザ光が伝搬可能な距離を伸ばすことができる。

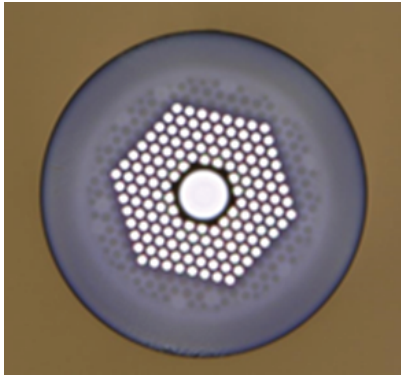


図1 全個体型PBGFの断面

Fig. 1. Cross section of all-solid PBGF.

図2および図3に、今回開発した5 kWシングルモードファイバレーザの構成図と外観をそれぞれ示す。本ファイバレーザは主発振器出力増幅器（MOPA）構成を採用しており、励起用レーザダイオード（LD）モジュール、コンバイナ、共振器を構成するためのファイバブラッググレーティング（FBG）、発振媒体のイッテルビウム（Yb）添加ファイバ、PBGFによるSRSフィルタ、クラッドモードストリッパ、および長さ7 m以上のレーザデリバリケーブルで構成されている。今回設計、作製したSRSフィルタは、発振波長成分の97%を透過させる一方、SRS波長成分を約20 dB減衰させる性能を有している。キャビネットの寸法やインターフェースは、当社の標準的なマルチモードファイバレーザ製品（FLC-12000M-W等）と互換性を持つように設計されている。

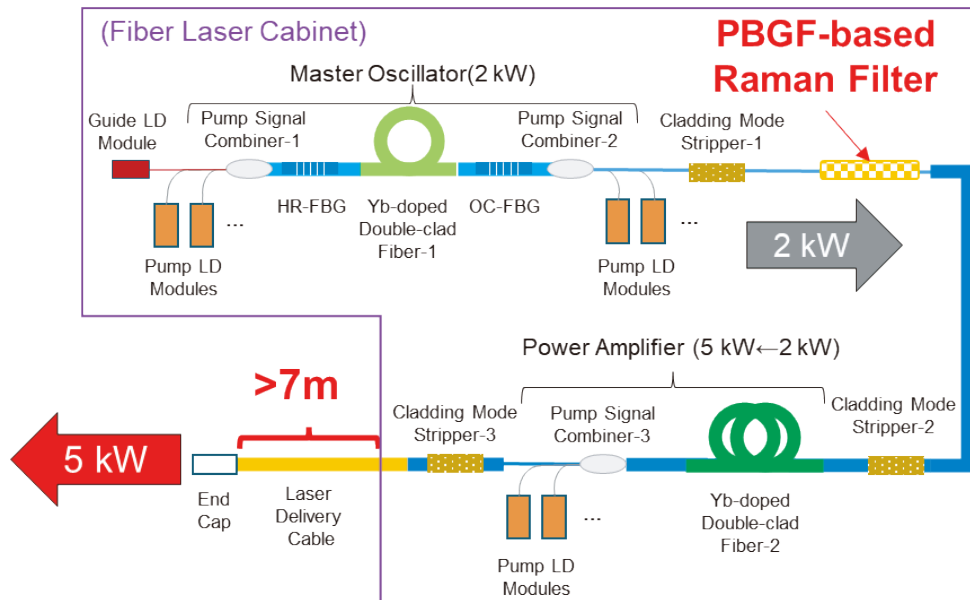


図2 5 kWシングルモードファイバレーザの構成図

Fig. 2. Schematic diagram of the 5-kW single-mode fiber laser.



図3 5 kWシングルモードファイバレーザの外観

Fig. 3. Appearance of 5-kW single-mode fiber laser cabinet.

3. ファイバレーザの特性

図4に、ファイバレーザのビーム品質指標である M^2 値、および電力変換効率（WPE）を示す。測定された M^2 値は出力に関わらず1.6であり、CFRP切断に使用するに十分なビーム品質が得られている。また、最大出力（5.4 kW）時の電力変換効率は約38%であり、市販のシングルモードファイバレーザの典型的な値（約30%）を上回る性能を示している。図5に、レーザ出力端面でのビームパターン（NFP）を示す。ビーム径は約40 μm である。

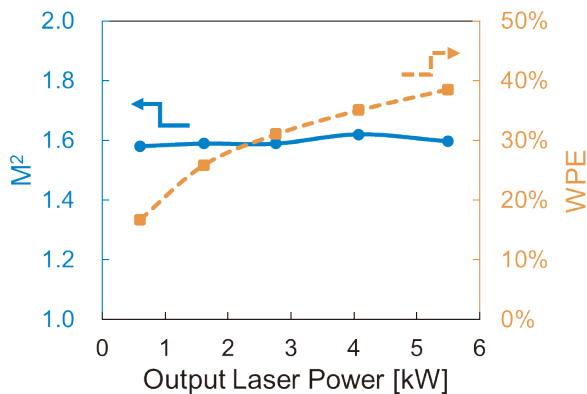


図4 ビーム品質および電力変換効率

Fig. 4. Beam quality (M^2) and wall plug efficiency (WPE) of the fiber laser.

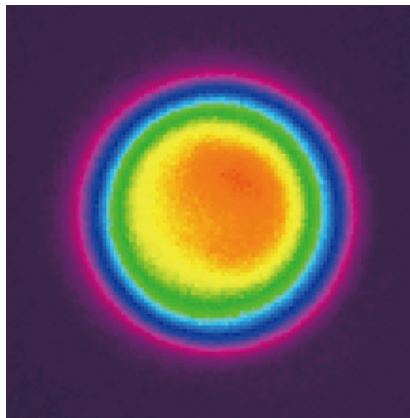


図5 ビームパターン（NFP）

Fig. 5. Near-field pattern (NFP) of the fiber laser.

表1に、本機体に対して実施した信頼性試験の条件を示す。環境試験や振動・衝撃試験、および200時間超の連続運転試験を実施している。試験実施後も光学特性に変化は見られず、製品として十分な信頼性を有していることを確認した。また、図6に最大出力での連続運転時における出力の経時変化を示す。長時間の運転においても、安定したレーザ出力を得られ、本機体の高い信頼性が実証された。

表1 信頼性試験条件

Table 1. Items for robustness evaluation.

項 目	内 容
高温・低温動作	-5℃～55℃
高温・低温保管	0℃～45℃
水温	21±2.5℃
振動・衝撃（輸送試験）	>5 h, >100 km
連続運転	200 h

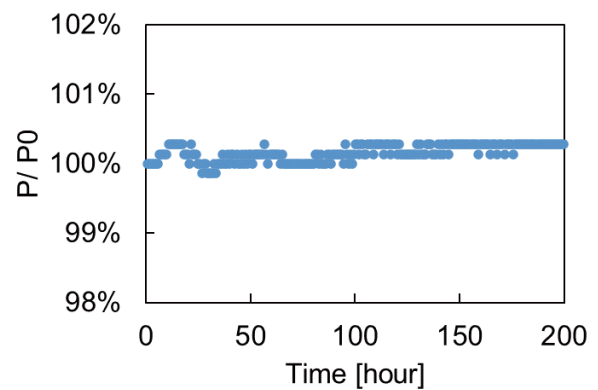


図6 連続運転時の出力安定性

Fig. 6. Output stability during continuous full-power operation.

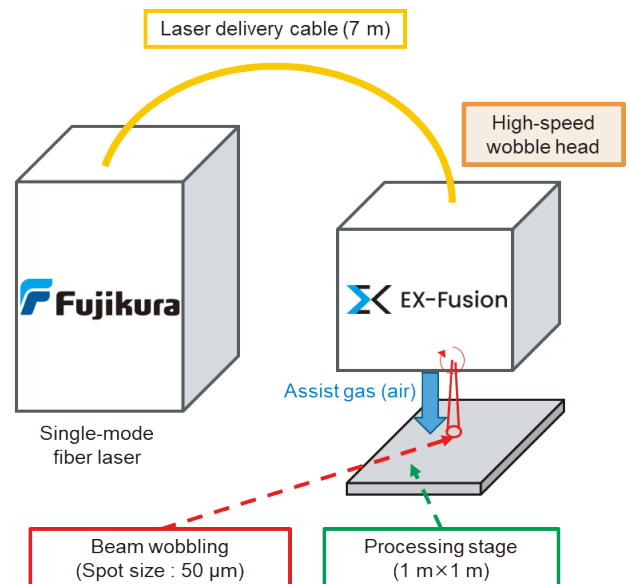


図7 CFRPレーザ加工装置の構成

Fig. 7. The laser processing setup for CFRP cutting.

表2 EX-Fusion社製高速ワブリングヘッドの仕様

Table 2. Specifications of EX-Fusion's wobble head.

項 目	内 容
光学倍率	1.2
焦点距離	300 mm
ワブリング径	$< \phi 5 \text{ mm}$
ワブリング周波数	$< 800 \text{ Hz @ } \phi 3 \text{ mm}$ $< 1.2 \text{ kHz @ } \phi 2 \text{ mm}$

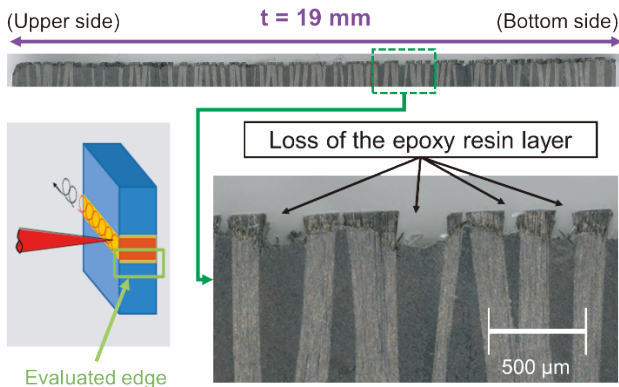


図8 CFRP板の加工結果

Fig. 8. Processing result of a CFRP plate.

4. CFRP加工結果

作製した本機体をEX-Fusion社に提供し、同社が開発した高速ワブリングヘッドに接続してCFRP材料の加工実験を行った。レーザ加工においてワブリングとは、レーザを切断方向に対して直線的に走査するのではなく、周期的な円を描きながら走査させる手法であり、スパッタの低減や加工品質の向上に寄与する。図7に、EX-Fusion社におけるCFRP切断用レーザ加工装置の構成を示す。レーザ光はワブリングヘッドを通して被加工物に照射される。加工ステージのサイズは1 m × 1 mであり、7 mのレーザデリバリーケーブルによりこの範囲を十分にカバーできている。ヘッドの光学倍率は1.2、スポット径は約50 μm、推定焦点深度は約1.2 mmである。アシストガスには空気を使用し、ノズルを通してレーザ光と同軸に出射している。表2にワブリングヘッドの仕様を示す。本ヘッドは5 kW出力のレーザ光の入射に耐えるレーザ損傷耐性を有しており、市販品と比較して高速なワブリング周波数を備えている。

図8に加工実験の結果を示す。サンプルとして用いたCFRP板（東レ製F6343B-05P、90°平織り）の厚さは19 mmであり、CFRP板としてはかなり厚い素材である。レーザ光は円形のワブリング動作を行いながら、切断方向と平行に走査されている。このように単純な直線走査ではなくワブリング動作を組み合わせることにより、局所的に過度

な入熱が行われることを防ぎ、加工後の切断面の品質を向上させることが期待できる。実験では、4 kWの連続波（CW）出力と高速ワブリングにより、19 mmという非常に厚いCFRP板を1 m/min以上の高速で切断することに成功した。従来のCFRP厚板加工は厚さ10 mm程度が限界であり^{3) 8)}、シングルモードファイバレーザとワブリング動作の組み合わせの強みが表れているといえる。加工したサンプルには、CFRPのレーザ加工における典型的なHAZの一種である、樹脂層が一部失われ表面がやや不均一になっている様子が確認された。HAZの大きさは全域にわたって160 ~ 180 μm程度であり、同程度の切断速度での加工と比較して小さく抑えられている⁸⁾。またCFRP板の上面と下面それぞれの近傍においてHAZの発生状況はほぼ一定であり、高品質な加工結果が得られている。厚板加工に関しては10 mm厚でHAZの大きさが100 μm未満の報告もあるが³⁾、切断速度はそこまで高速ではないため、今回の加工結果は速度と品質の両立という点で優れている。今後さらなるレーザの高出力化と加工条件の最適化を行うことによって、HAZを低減しつつ加工の高速化が実現することが期待される。

5. むすび

当社は全個体型PBGFを搭載することで、長さ7 mのレーザデリバリーケーブルを備えた5 kW出力のシングルモードファイバレーザを、高い信頼性ととともに実現した。また、当社の標準製品と互換性を持つよう設計されている。EX-Fusion社の高速ワブリングヘッドと組み合わせた加工実験では、厚さ19 mmのCFRP板を1 m/min以上の高速で切断することに成功した。加工面には熱影響によるわずかな樹脂層の損失が見られたものの、高品質な加工を実現することができた。今後も広範な加工用途への適用を可能にするために、高出力・長尺デリバリーケーブルのシングルモードファイバレーザの開発を推進する。

謝 辞

CFRPの切断結果は、EX-Fusion社よりご提供いただいたものである。

また本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託事業「経済安全保障重要技術育成プログラム／高効率・高品質レーザー加工技術の開発／高出力ファイバーレーザー」（川崎重工業株式会社からの再委託）で得られたものである。

開発したファイバレーザは、NEDOディーブテック・ス

タートアップ支援事業の一環として、EX-Fusion社によりレーザ加工性能評価に使用されている。

参考文献

- 1) S. Blumel, et al.: “Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources,” Phys. Procedia, 56, pp.1143-1152, 2014.
- 2) R. Staehr, et al.: “High precision laser macrodrilling of carbon fiber reinforced plastics with a new nanosecond pulsed laser –Optimized toward industrial needs,” J. Laser Appl., 31, 022207, 2019.
- 3) Z. Wang, et al.: “Development of laser processing carbon-fiber-reinforced plastic,” Sensors, 23(7), 3659, 2023.
- 4) F. Schneider and D. Petring: “CFRP is demanding – Also on laser cutting,” Laser Technik J., 2, pp.61-65, 2018.
- 5) M. Oberlander, et al.: “Optimization of laser-remote-cutting of CFRP by means of variable exposure delay times – simulation and validation,” J. Laser Appl., 30, 032204, 2018.
- 6) Y. Takubo, et al.: “High speed continuous processing of CFRP with 3-kW CW single-mode fiber laser,” The 38th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), Orlando, Macro 502, 2019.
- 7) 田久保ら：「3kW出力シングルモードファイバレーザによるCFRP加工」, フジクラ技報, 第133号, pp.26-29, 2020.
- 8) D. Herzog, et al.: “Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness,” Mater. Des., 92, pp.742-749, 2016.