

高出力レーザ伝送ケーブル

先端技術総合研究所 下平 幸輝¹・田中 弘範²・佐山 忠嘉¹・松崎 貴宏¹
遠藤 智久¹・滝澤 隼¹
ファイバレーザ事業部 田端 学³・橋本 拓也⁴

Delivery Cable for High Power Fiber Laser

K. Shimohira, H. Tanaka, T. Sayama, T. Matsuzaki, T. Endo, S. Takizawa,
M. Tabata, and T. Hashimoto

金属加工を主な用途としたCWファイバレーザのさらなる高出力化に伴い、高い反射光耐性を有した伝送ケーブルが求められる。当社では、独自構造の採用により、反射光耐性に加えて、機械的な堅牢性にも優れた伝送ケーブルを開発した。

Intensity of reflected light is increased in laser processing with high power CW fiber lasers. A delivery cable having high durability against reflected light is required. We have developed a delivery cable that has high durability against reflected light and mechanical force.

1. ま え が き

近年、金属加工を主な用途として、高出力CWファイバレーザの普及が進んでいる。一般的なレーザ加工では、レーザ発振器から出射されたレーザ光を加工ヘッド内の集光光学系で集光し、その集光点近傍のレーザ光を被加工物に照射することで、被加工物を溶融させて加工を行う。高出力レーザ伝送ケーブル（以降、伝送ケーブル）は、一端はレーザ発振器のユニット内に組み付けられ、もう一端は加工ヘッドに接続されて使用されるファイバ型デバイスである。レーザ加工における加工品質は、照射するレーザ光の出力、集光特性（BPP）、集光点におけるビームプロファイルなどに大きく影響を受けることが知られている¹⁾。これらの特性は、その大部分が発振器の光学回路構成で決まるため、伝送ケーブルにはこれらの特性を維持したままレーザ光を加工ヘッドへ伝送するための光学的性能が求められる。

また、レーザ加工開始直後の材料が溶融するまでの間や、不適切な加工条件によって加工ができない状況などに、照射したレーザ光が被加工物の表面で強く反射され、加工ヘッドを経由して伝送ケーブル内に再入射する場合がある²⁾。このように高強度の反射光が再入射した際に

も、レーザ装置が反射光を検知して安全に停止するまでの間、伝送ケーブルは壊れることなく耐える必要がある。近年のファイバレーザの高出力化に伴い³⁾、反射光強度も高くなっていることから、伝送ケーブルにおける反射光耐性の重要性が高まっている。

さらに、レーザ加工機として安定した性能を実現するためには、伝送ケーブルに外力が作用した際にもレーザ照射位置やレーザパワー密度などが不安定にならない。そのため、伝送ケーブルの持つ出射光軸安定性や衝撃耐性などの機械的堅牢性も重要となる。

当社では、これまでのファイバ型デバイス開発において培ってきた光学設計や信頼性設計、機構設計により、反射光に強く、機械的な堅牢性にも優れた伝送ケーブルを実現した。本稿ではその諸特性について報告する。

2. 伝送ケーブルの構造

図1に開発した伝送ケーブルの外観写真を示す。伝送するレーザ光出力に応じて、二種類のモデルをラインナップした。両者における最も大きな違いは、エンドキャップと呼ばれるガラス部品の直径と長さである。図2に、伝送ケーブル内部に配置されている光学部品の構造図を示す。エンドキャップとは、レーザ光を伝送させるファイバの先端に配置される透過率の高い透明体のことである。通常、石英ガラスが用いられることが多く、レーザ光出射面は光学研磨され、ARコーティングされている。ファイバコアから直接レーザ光を出射させた場合、

1 光部品研究部

2 光部品研究部グループ長

3 第1開発部グループ長

4 第1開発部

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
CW	Continuous Wave	レーザー光の発振形態の一つで、連続波発振のこと。
加工ヘッド	Processing head	伝送ケーブルを介して伝送されるレーザー光を集光し、被加工物に集光したレーザー光を照射するための装置。集光光学系が組み込まれている。
ARコート	AR (Anti-Reflection) coating	複数の誘電体膜を積層させることで、反射率を低減させた膜。
ビームパラメータ積	BPP (Beam Parameter Product)	レーザー光の集光点におけるビーム半径とビーム広がり半角の積で表される、ビーム品質の指標となるパラメータ。一般的に、BPPが小さい方が良好なビーム品質と言われる。
PVC	Polyvinyl Chloride	ポリ塩化ビニルのこと。
ビームプロファイル	Beam profile	レーザービームの横断面における強度分布を二次元画像として示したもの。

ファイバコア近傍におけるレーザー光のパワー密度が非常に高いため、微細な光吸収体がファイバコアに付着すると、レーザー光の吸収により発熱し、ファイバが損傷する可能性がある。そこで、エンドキャップをファイバ先端に取り付けることにより、レーザー光射出面におけるビームの口径を拡大させる。この結果、レーザー光射出面におけるパワー密度を減少させ、損傷の可能性を低減することができる。当社では、レーザー光出力が 10 kW 以上の場合と、10 kW 未満の場合で、エンドキャップの直径と長さを使い分けて、レーザー光射出面におけるパワー密度を射出面の損傷閾値未満に抑制している。

当社の開発品では、エンドキャップとファイバの間に



図1 伝送ケーブルの外観写真
Fig. 1. Photographs of the delivery cable.

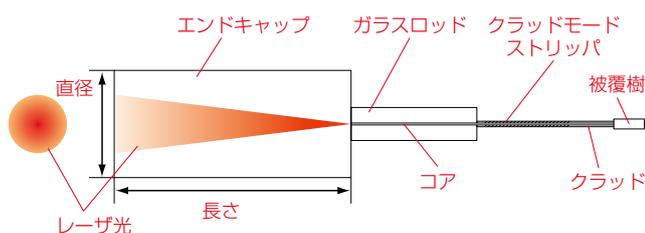


図2 伝送ケーブルの光学構造
Fig. 2. Schematic diagram of optic part in the delivery cable.

配置したコアを有するガラスロッドと、ファイバクラッドに設けたクラッドモードストリッパにより、反射光耐性を向上させている。レーザー加工において、被加工物からの反射光が加工ヘッド内に入射すると、加工ヘッド内のレンズを通過してエンドキャップの裏面付近で集光する場合がある。ガラスロッドがない場合、反射光の集光点にエンドキャップと空気の境界面が存在するため、境界面における光の散乱によりレーザー光の吸収率が高くなる。この結果、反射光の集光位置が発熱し、損傷に至る可能性がある。当社の開発品では、エンドキャップの裏面にガラスロッドを配置し、エンドキャップと空気の境界面をなくすことで、反射光に対する構造的な懸念を払拭している。また、ファイバクラッドに結合した反射光はクラッド内を伝搬する過程において、ファイバの屈曲部などでファイバを被覆している樹脂の内部へ漏れ出し、樹脂を損傷させる可能性がある製品の信頼性を高めるためには、予め反射光をクラッドから空気中へ漏れさせ、樹脂内部へ漏れ出す反射光量を減少させることが望ましい。そこで当社の開発品にはクラッド表面を粗面化したクラッドモードストリッパを設け、クラッド光をクラッド外へ散乱させている。散乱されたクラッド光は、金属筐体の内壁で吸収されて熱に変換されるため、金属筐体を水冷している。

ファイバは、外力によるキズや破断の発生を防ぐために、PVCで被覆された金属管で保護されている。レーザー加工時、伝送ケーブルが取り付けられた加工ヘッドが自在に移動することで、伝送ケーブルには屈曲や捻回が加えられるため、ファイバを保護するケーブルには、繰り返される屈曲や捻回に対する耐性が求められる。

3. 開発した伝送ケーブルの特性

開発品の光学構造は、エンドキャップの違いを除いて、二つのモデルにおいて共通である。そのため、本稿では、伝送出力の大きいモデルについて、その諸特性を報告する。

3. 1 光学特性

開発した伝送ケーブルの代表特性を表 1 に、ビームプロファイルを図 3 に示す。レーザー光出力は 12 kW に対応し、当社のファイバレーザー製品群で最も出力の高いモデルに使用できる。伝送損失とBPP変動量は十分小さく、ビームプロファイルの劣化も認められない。これは、低損失で、且つ集光特性とビームプロファイルを維持しながらレーザー光を送ることができることを示している。出射光軸角は、伝送ケーブルから出射されるレーザー光の光軸と基準軸とのなす角と定義されている。出射光軸角が大きければ、加工ヘッドに伝送ケーブルを接続して使用した場合に、ヘッド内のレンズにおける適切な位置にレーザー光が伝搬せず、レンズによるレーザー光の散乱が発生し、結

表1 伝送ケーブルの代表特性
Table 1. Typical characteristics of the delivery cable.

項目	代表値
レーザー光出力 (kW)	12
伝送損失 (%)	1.1
BPP変動量	0.31
出射光軸角 (mrad)	8.8

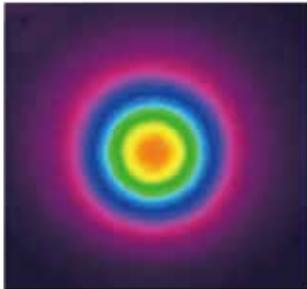


図3 伝送ケーブルから出射されたレーザー光のビームプロファイル
Fig. 3. Beam profile of laser light radiated from the delivery cable.

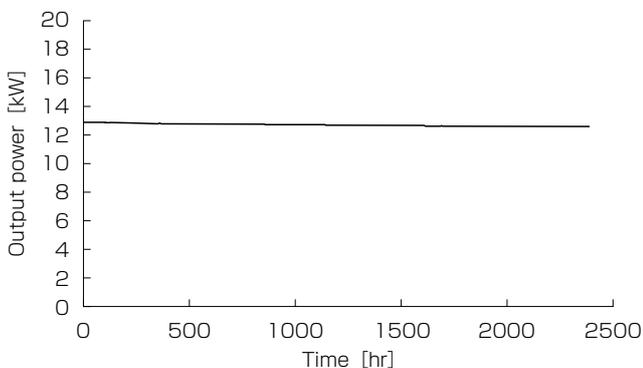


図4 連続運転時のレーザー光出力
Fig. 4. Output power of laser light on continuous operation.

果、レーザー光出力の損失につながることを考えられる。本開発品の出射光軸角は十分に小さく、実使用上、問題ないレベルである。

開発品に対して、高出力レーザー光を送りさせた場合に劣化がないことを確認するために、当社のファイバレーザーに開発品を接続し、2,000 時間の連続運転を行った。図 4 に連続運転の結果を示す。経過時間に対し、レーザー光出力の低下は認められず、当社の開発品は、長時間の使用に耐え得ることを確認した。

3. 2 反射光耐性

先述したように、反射光が伝送ケーブルに入射した場合、クラッドモードストリッパで散乱されたクラッド光が金属筐体に吸収される。この金属筐体は水冷されているため、金属筐体の温度は、反射光の強度に応じた平衡温度に達する。この温度は製品として許容できる温度よりも低くなければならない。伝送ケーブルに反射光が入射した状態を模擬し、エンドキャップ側からレーザー光を入射させた状態での金属筐体の温度を調査した。結果を図 5 に示す。レーザー光出力 750 W のレーザー光を入射し続けても、平衡に達した金属筐体の温度は許容温度に対して十分に低く、開発品は高い反射光耐性を有していることが確認された。

3. 3 機械的堅牢性

本開発品では、当社が長年培ってきたガラス部品に対する信頼性保証手法により、落下耐性の向上も実現した。開発品を所定の高さから落下させて、故障の有無を確認する落下試験を行った。表 2 に示した結果の通り、開発品は高い落下耐性を有しており、実際の使用環境を考慮しても、十分に使用に耐え得る強度を有している。

次に、伝送ケーブルを加工ヘッドに接続して使用される状況を想定し、伝送ケーブルに所定の外力を印加した場合の機械的な安定性を評価した。レーザー加工中は、加工ヘッドが自在に移動するため、ヘッドに接続されてい

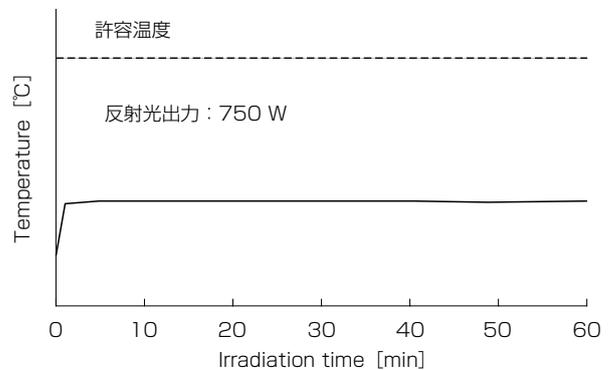


図5 反射光試験における伝送ケーブル内金属筐体の温度変動
Fig. 5. Temperature variation of a case used in a delivery cable under exposure to back reflected laser radiation.

表2 落下試験結果
Table 2. Result of drop test.

項目	試験条件	試験結果
落下高さ (mm)	1,000	合格
落下加速度 (G)	1,000	
落下回数 (回)	10	

表3 機械試験結果
Table 3. Result of mechanical test.

項目	試験条件	試験結果
曲げモーメント (N・m)	4	合格
引張り (N)	25	
捻回 (N・m)	10	

表4 ケーブルの屈曲試験結果
Table 4. Result of cable bending test.

項目	試験条件	試験結果
片側触れ角 (°)	90	合格
回数 (回)	1,000,000	

る伝送ケーブルは移動による振動や衝撃などの外力を受ける。この外力によって加工ヘッドに対する伝送ケーブルの位置が変化し、伝送ケーブルから出射されるレーザー光の光軸も変動する。この光軸の変動量が大きい場合、加工ヘッド内のレンズによるレーザー光の散乱や、加工ヘッドから出射されたレーザー光の光軸変動が生じ、加工不良を起す可能性がある。したがって、伝送ケーブルに外力が印加された際のレーザー光の光軸変動量は、許容できる範囲内に抑えなければならない。本開発品では、伝送ケーブルにおける加工ヘッドと嵌合する部分の機構部

品設計を最適化することにより、この要求を満たすことができた。表3に、伝送ケーブルに所定の外力を印加した場合における、出射光軸角の変動量を評価項目とした試験の結果を示す。当社の開発品は、高い機械的安定性を有していることが確認された。

最後に、開発品のケーブルに対する屈曲試験の結果を表4に示す。表4の結果から、開発品は繰り返される屈曲に対する高い耐性を有しており、実際の使用に十分に耐え得ると考えられる。

4. む す び

種々の光学特性に優れ、出力 12 kW のレーザー光を伝送できる伝送ケーブルを開発した。また、本開発品は、反射光耐性と機械的な堅牢性においても優れた性能を有していることを確認した。これは、当社が培ってきたガラス部品に対する信頼性保証手法と機構部品の設計技術に加え、ガラスロッドを用いた独自の光学構造により実現されたものである。

参 考 文 献

- 1) S. Rung, et. al: "Laserscribing of thin films using top-hat laser beam profiles" Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 8, No. 3, pp. 1-2 2013
- 2) 杉本 亮ほか:「4kW出力連続波ファイバレーザー」, フジクラ技報, 第126号, pp. 7-10, 2014
- 3) D. J. Richardson, et. al: "High power fiber lasers : current status and future perspectives" Journal of the Optical Society of America B, Vol. 27, Issue 11, pp. B63-B92 2010