高出力レーザー伝送用光ファイバの信頼性技術

兵頭 隆史, 石田 智彦, 山川 禎貴, 谷口 浩一

三菱電線工業(株) (〒660-0856 兵庫県尼崎市東向島西之町8番地)

Reliability Technology of Laser Delivery Fiber for High Power Laser

Takafumi HYODO, Tomohiko ISHIDA, Yoshiki YAMAKAWA, and Hirokazu TANIGUCHI

Mitsubishi Cable Industries, LTD., 8 Nishino-cho, Higashimukojima, Amagasaki, Hyogo 660-0856

(Received March 26, 2012)

Laser technologies are extensively used in the various fields such as material processings, medical treatments, and measurements. Especially, the developments of the high power laser with excellent beam quality such as fiber lasers have advanced in the laser machining fields, which are for the production line of the automotive body and the lithium ion battery. In the fields, the laser power transmission technologies by using laser delivery fibers are indispensable and the higher reliability is increasingly required. In this report, we introduce the overview about the preparation methods, which are a laser polishing and an end-cap structure, for the optical fiber end face and the connector technology that is a cladding mode stripper. These technologies can be expected to support the reliability of the laser delivery fibers.

Key Words: Laser delivery fiber, Laser induced damage threshold, Laser polish, Cladding mode

1. 緒 言

レーザー技術は急速な進展を遂げ、加工、医療、計測をはじめ様々な分野で盛んに利用されている。特にレーザー加工分野では、ファイバレーザーを中心とした、出力がキロワットを越える高ビーム品質レーザーの開発が進み、自動車ボディやリチウムイオン電池の製造ラインへの導入が進んでいる。また近年、高密度にスタックされた高出力半導体レーザーを用いたダイレクトダイオードレーザー(DDL)加工が盛んに行われており、ファイバレーザーを凌ぐ高い光変換効率による金属表面加工も進んでいる。一方、実際のレーザー加工の現場では、多くの場合、加工用レーザー発振器と加工用ヘッドの空間的な配置の自由度が要求され、光ファイバを用いたレーザーエネルギー伝送は欠かせない技術となっている。しかし、近年の加工用レーザー発振器の高出力化に伴い、光ファイバ端面のレーザー損傷しきい値の向上など、従来よりも更に高い耐久性がレーザー伝送用光ファイバに求められている。そこで本稿ではレーザー伝送用光ファイバに関して、その信頼性を支える光ファイバ端面加工技術、及びコネクタ技術の概要について紹介する。

2. レーザー伝送用ファイバの損傷事例

高出力レーザーエネルギーを伝送するレーザー伝送用

光ファイバでは、コネクタ部分の損傷が圧倒的に多く、その損傷部位のほとんどは、光ファイバ端面と光ファイバ被覆部である。すなわちレーザー伝送用光ファイバの信頼性の向上は、光ファイバ端面と光ファイバ被覆部の耐久性の向上に支えられていると言える(図1)。

図2は光ファイバ端面の典型的な損傷の様子を示している。損傷初期(図2(a))では、中心部分に薄く影が存在しており、この部分が損傷の核となる。その後、中心部分が熔融し(図2(b))、さらに損傷が進むと、光ファイバ端面が高温となり、最終的にはコネクタ部材を含む全てが焼損(炭化を伴う焼け)に至る(図2(c))。多くの場合、損傷の核となるのは、外部から飛来して付着した異物であり、レーザー出力が大きくなるほど、光ファイバ端面周辺のクリーン度を高く保

Fig. 1 Damages in the connector for laser delivery fibers.

Fig. 2 Damage processes in the optical fiber end face. (a) Initial damage. (b) Partial melting. (c) Whole melting.

つことが重要となる。

Fig. 3はコネクタ内部の光ファイバ被覆部の典型的な焼損の様子を示している。被覆部の焼損は、光ファイバ端面に近い被覆端部から起こり、この原因の多くは、コアに正常に入射されなかったレーザー光が被覆部に吸収されて、発熱することに起因している。

また非常に少ない事例ではあるが、レーザー伝送用光ファイバでも通信用光ファイバと同様にファイバヒューズ¹⁾が発生する。Fig. 4はコア径60 μm のレーザー伝送用光ファイバで生じたファイバヒューズの様子を示している。Fig. 4 (a)は出射端近傍で生じたコア内の空隙、Fig. 4 (b)は同ファイバの導中でのコア内の空隙を示している。空隙の形状は砲弾型をしており、砲弾型の先端(曲率)部が出射側、砲弾型のフラット部がレーザー光源側を向いており、通信用光ファイバで確認されている空隙の形状とはほぼ同等である²⁾。なお同ファイバでは、外見上は端面のみの損傷であったが、ファイバヒューズが生じた全長に渡って、光ファイバの機械強度が著しく劣化しており、コア中を高温で伝搬するファイバヒューズの影響が大きいことが確認された。ファイバヒューズの

Fig. 3 Damage of fiber jacket in the connector.

Fig. 4 Micrograph of the void generated by fiber fuse. (a) Fiber fuse damage in the near output end face. (b) Void in the fiber core.

は、レーザーの出射端面に異物が付着し、端面温度が約1000 $^{\circ}\text{C}$ に達すると生じるとの報告があり³⁾、レーザー伝送用光ファイバでも出射端面付近のクリーン度を高く保つことが重要である。

3. レーザー伝送用光ファイバの信頼性向上技術

3.1 光ファイバ端面の耐久性向上技術

3.1.1 表面粗さと残存不純物の影響

光ファイバ端面のレーザー損傷しきい値は、前述の異物の付着以外に、端面の表面粗さや残留する研磨剤等の不純物に影響されることが知られている⁴⁾。端面に研磨加工などによる微視的な欠け、傷が存在する場合、これらが入射されるレーザーの電界強度を増強させ、主にパルス発振レーザーに対する耐性を低下させる要因になると考えられる。また研磨剤などの不純物が端面に残留すると、これらの不純物がレーザー光を吸収し、局所的に高温になることでプラズマが発生し、容易に端面を損傷すると考えられる⁵⁾。

一般的に行われている機械式研磨で形成した光ファイバ端面を原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)により観察した。使用した光ファイバは、コア径600 μm のステップインデックス(Step Index: SI)ファイバである。Fig. 5 (a)は機械式研磨を行った光ファイバ端面のAFM像(長さ10 μm $\times$ 幅10 μm 領域)を示している。観察の結果、表面には無数の線状の研磨傷(スクラッチ傷)が残っており、表面粗さ(rms値)は0.48 nm程度となっていることが判った。次に機械式研磨を行った光

Fig. 5 AFM images of the end face of the optical fiber polished by conventional mechanical polishing and laser polishing. Scanning area of 10 $\times$ 10 μm^2 . (a) Mechanical polishing. (b) Laser polishing.

ファイバ端面について、二次イオン質量分析(Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS)を用いて、表面近傍に残留する不純物を分析した。Fig. 6は検出された不純物の二次イオン強度の深さ分布を示している。これより表面から深さ100 nm程度まで、研磨剤に含まれるセリウム(Ce)、ランタン(La)等の不純物元素が残留していることが判る。Ce等の元素に関しては、可視域や紫外域のレーザーに対する耐性を劣化させるとの報告⁶⁾があり、今後進展が期待される短波長レーザー加工へのレーザー伝送用光ファイバの適用の際には、光ファイバ端面での不純物元素の管理が重要な課題になると考えられる。これらのことから機械式研磨で形成した光ファイバ端面のレーザー損傷しきい値を向上させるためには、研磨傷と表面粗さの低減、そして残留不純物の管理が必要と考えられる。

3.1.2 プラズマエッチング技術

大気中アーク放電のプラズマの温度は、一般に数1000 °Cに達することが知られており、プラズマ中に光ファイバ端面を曝すことで、石英材料の最表面を蒸散し、機械式研磨で浸入した不純物を除去し、さらに光学的に平滑な端面を形成できる可能性がある。そこで機械式研磨を行なった後の光ファイバ端面のプラズマエッチング処理を行った。使用した光ファイバは、コア径600 μm のSIファイバである。

プラズマエッチング後の光ファイバ端面をAFMにより観察を行ったところ、機械式研磨で生じた線状の研磨傷(スクラッチ傷)が大幅に減少し、表面粗さ(rms値)は0.19 nm程度まで改善されることが判った。次にプラズマエッチング後の光ファイバ端面について、SIMSにより表面近傍の不純物分析を行った。Fig. 6にはプラズマエッチング後のCeの二次イオン強度の深さ分布を示している。これよりプラズマエッチング処理を行うことで、端面近傍に存在していたセリウムが大幅に削減されることが判る。しかしながら二次イオン強度からはCeが完全に除去されているかは不明であり、除去される一方、一部がプラズマエッチング処理中の熱で再拡散している可能性も考えられる。

Fig. 6 Impurity depth profiles of the end face of the optical fiber polished by conventional mechanical polishing and plasma assisted etching.

3.1.3 レーザーポリッシュ技術

光ファイバを構成する石英ガラスは、赤外波長9.1 μm に二酸化ケイ素(SiO_2)の分子振動による強い吸収ピークを持っており⁷⁾、その吸収の裾にある炭酸ガス(CO_2)レーザーの発振波長10.6 μm に対しても、強い光吸収が存在する。レーザーポリッシュ技術は、 CO_2 レーザーを光ファイバ端面に照射することで、石英ガラスの最表面を選択的に加熱蒸散させ、光学的に平滑な表面を形成する技術である⁸⁾。従来の機械式研磨と異なり、研磨紙や研磨剤を全く使用しないため、不純物の浸入は無く、非常にクリーン度の高い表面が得られる。

実験では CO_2 レーザー発振器からのレーザー光をビームエキスパンダ、フォーカシングレンズ等から構成される光学系を介して、光ファイバ端面に集光し、レーザーポリッシュを行った。

使用した光ファイバは、コア径600 μm SIファイバである。Fig. 5 (b)はレーザーポリッシュ行った後の光ファイバ端面のAFM像(長さ10 μm × 幅10 μm 領域)を示している。AFM観察の結果、表面粗さ(rms値)は0.20 nmであり、プラズマエッチング処理とほぼ同等の表面粗さが得られており、機械式研磨後に多数観られた研磨傷(スクラッチ傷)は全く無く、非常に平滑な表面が得られていることが判った。

3.1.4 レーザー損傷しきい値の評価

レーザー伝送用光ファイバでは、光ファイバ端面でのフレネル反射損失を減らすため、無反射(Anti-Reflection: AR)コーティングを施すことが多く、特にレーザーマーキングやトリミングなどのパルスレーザー加工用途ではARコーティングに対して高い耐久性が要求される。一般にARコーティングのレーザー損傷しきい値は、下地となる基板の表面状態に影響されることが知られている⁹⁾。表面状態が良好でない場合、膜の密着性低下や微視的な段差による電界強度の増強により、レーザー損傷しきい値が低下する。前述のプラズマエッチング処理、レーザーポリッシュ技術の効果を検証するため、これらの処理を施したSIファイバ端面にARコーティングを行い、Qスイッチパルスレーザーに対するレーザー損傷しきい値の評価を行った。光ファイバ端面へのARコーティングは、酸素イオンアシストを採用した電子ビーム蒸着法により行っている。

Fig. 7 Experimental setup of laser damage test.

Fig. 7はレーザー損傷しきい値の測定系の構成を示している。レーザー発振器にはQスイッチNd:YAGレーザー(波長1064 nm, パルス幅10 ns)を用いた。レーザー出力は、偏光子と $\lambda/2$ 板からなるエネルギー調整器で照射エネルギー強度を調整し、焦点距離 $F=600$ mmのフォーカシングレンズにより、光ファイバ端面に直径約300 μm のスポットサイズで集光している。またレーザー損傷の有無は、損傷時にサンプル表面で発生するプラズマ発光、パワーメータによる出力変動、顕微鏡による損傷面の観察により決定した。なお試験方法は、同一箇所にレーザー光を照射し、1パルス毎に照射エネルギーを少しずつ増加させて、損傷の有無を確認する方法(N-on-1試験)を採用している。

Fig. 8は各サンプルのQスイッチパルスレーザーに対するレーザー損傷しきい値を示している。測定したサンプル数は、機械式研磨14サンプル、プラズマエッチング処理11サンプル、レーザーポリッシュ9サンプルである。Fig. 8より機械式研磨のレーザー損傷しきい値(平均値)が28.4 J/cm²であるのに対し、プラズマエッチング処理では30.3 J/cm²、レーザーポリッシュでは37.0 J/cm²であり、レーザーポリッシュは機械式研磨に比べて、約30%のレーザー損傷しきい値の向上が図られている。なおプラズマエッチング処理とレーザーポリッシュでは、その表面粗さは0.2 nm前後で同等であるが、レーザーポリッシュはプラズマエッチング処理に比べて20%以上レーザー損傷しきい値が高い。このことから機械式研磨で導入されて、完全に除去できなかった研磨傷(スクラッチ傷)や不純物元素の影響が、プラズマエッチング処理のサンプルでは未だ存在しているものと考えられる。また今回得られたレーザーポリッシュでのレーザー損傷しきい値37.0 J/cm²は、後述する石英材料内部のレーザー損傷しきい値300 J/cm²に比べ、1桁程度の差がある。この原因としては、表面粗さが未だ十分では無いと考えられること、さらに光ファイバ製造工程中にコア内に形成されると考えられる欠陥の影響があるものと考えられる。なお本稿で取り上げなかった連続発振レーザーに対するレーザー損傷しきい値の評価に関しては、

その損傷しきい値自身が、光ファイバ端面を取り巻く環境(光ファイバ自身の構造、コネクタ構造、冷却雰囲気)の影響を大きく受けるため、具体的な評価方法も含めて今後の課題と考えられる。

3.1.5 エンドキャップ技術

エンドキャップ技術は、光ファイバ端面に石英コーン(円錐状の石英部材)を融着して、レーザー入射端面でのパワー密度を低減させる方法である¹⁰⁾。一般に石英材料内部のレーザー損傷しきい値は300 J/cm²と報告されているが¹¹⁾、石英表面は前述の機械式研磨での不純物の侵入や表面粗さ等の影響により、内部よりもレーザー損傷しきい値は低い値になると考えられる。そこで石英コーンを融着して、光ファイバ端面を石英材料内部に埋め込むことで、表面粗さの課題を解決し、レーザー損傷しきい値の向上を図っている。また石英コーンの融着により、レーザー入射端面でのビーム径は拡大され、パワー密度が低減し、ARコーティングへの負荷も軽減させることが可能である。Fig. 9にコア径600 μm のSIファイバに石英コーン(直径7 mm, 長さ8 mm)を融着した様子を示す。融着条件の最適化により、融着部での歪はほとんど無く、光ファイバへの結合効率の低下は見られない。光ファイバ端面に石英コーンの融着を行うことで入射面でのビームサイズが拡大され、入射可能なレーザーパワーは、100倍以上に増大することが可能となっている。

3.2 レーザー伝送用コネクタの耐久性向上技術

光ファイバのコアに対してレーザー光が正常に入射されていない状態、すなわち光ファイバの開口数(NA)を越えて入射し続けた場合やコア径よりも大きな集光スポット径での入射し続けた場合、あるいは加工対象物からの強い反射光が光ファイバ端面に戻った場合には、コネクタ内部で光ファイバの被覆部が損傷する場合がある。これらの損傷は、光ファイバ端面から異常な状態で入射したレーザー光が、クラッド層内を介して光ファイバ中を伝搬(いわゆるクラッドモード伝搬)し、その伝搬途中でレーザーパワーが被覆材料に漏洩し、吸収されて

Fig. 8 Laser induced damage threshold of the AR coating on the end face of optical fiber.

Fig. 9 Photograph of the end cap of laser delivery fiber.

発熱することが原因となっている。

Fig. 10は入射端面を#1000で粗研磨したコア径400 μm のSIファイバ(NA0.4)にレーザー光(NA0.3)を入射し、入射端面の散乱により故意に高NA成分を発生させ、長時間レーザー伝送を行った際のコネクタ温度を示している。実験では、入射パワー3.65 Wに対し、出力パワー3.15 Wであり、伝搬途中に被覆材料に吸収されるパワーは、入射端面での散乱損失を差し引き、0.48 Wであった。Fig. 10より経過時間200時間後にコネクタ温度が急上昇して、被覆部の焼損に至っていることが判る。特徴的な点は焼損直前まで、コネクタ温度や光出力に大きな変化が現れないことである。またFig. 11は同実験で入射パワーを調整して、被覆材料に吸収されるパワーを変化させ、焼損に至るまでの時間を測定した結果を示している。これより焼損に至るまでの時間が、ほぼ吸収パワーで決まることが判る。このような光ファイバの損傷過程は、通信用光ファイバに極端な曲げを与えて、高い入射パワーを伝搬させた場合にも観察されている¹²⁾。急激に損傷するメカニズムは、被覆材料がクラッドモード伝搬光を吸収して劣化が起これば、材料自身の着色や炭化が

Fig. 10 Connector temperature of the laser delivery fiber under laser incident over NA input.

Fig. 11 Relation between damaged time and absorbed power under laser incident over NA input.

進み、更に強い光吸収を起こす。これらが加速度的に繰り返されて、急激な焼損に至るものと考えられる。なお損傷に至る過程は、レーザーの入射パワー、高NA成分、周囲の温度環境に大きく影響されると考えられるが、概して高NA成分を含みやすい高出力レーザーの光ファイバ伝送では、クラッドモード伝搬光に対する対策は重要と考えられる。

3.2.1 クラッドモード除去技術

クラッドモード除去技術は、コネクタ入射端近傍の光ファイバのクラッド側面に特殊な表面加工により凹凸形状を形成することで、クラッドモード伝搬光を積極的に除去する技術である。Fig. 12は光ファイバのクラッド側面に形成した凹凸形状の一例を示している。図中の右半分が凹凸形状に加工された部分、左半分は未加工部分である。

光ファイバ側面に形成した凹凸形状のクラッドモード除去性能について評価を行った。使用した光ファイバは、コア径200 μm , NA0.20のSIファイバであり、光ファイバ端面から長さ15 mmに渡って、特殊な表面加工により凹凸形状を形成した。作製したクラッドモード除去構造付き光ファイバに対して、HeNeレーザー光(波長633 nm)を入射NA0.13~0.40の範囲で入射し、各入射NA

Fig. 12 Unevenness shape of the optical fiber side for removing cladding mode.

Fig. 13 Relations of NA between input and output in fiber connector with and without cladding mode stripper.

に対する出射NAを測定した。Fig. 13に得られた結果を示す。これよりクラッドモード除去構造が無い場合は、入射NAの増加に伴い、光ファイバのNA0.20以上でも出射NAは増え続け、クラッドモードが被覆層まで広がって伝搬していることが判る。これに対してクラッドモード除去構造がある場合は、入射NAが大きくなっても、出射NAは光ファイバのNAである0.20に制限され、クラッドモード伝搬光が効果的に除去されていることが判る。このように光ファイバのNAを越えるクラッドモード伝搬光に対する除去性能は十分高く、Fig. 10及びFig. 11に示した被覆部の焼損に対しても高い防止効果が期待される。なお実際に本クラッドモード除去技術を適用する場合は、除去されたクラッドモード伝搬光のエネルギーを安全に排出する必要がある、排出するパワーに応じて冷却構造(水冷方式、空冷方式)を最適に設計することで、耐久性の高いレーザー伝送用コネクタが実現される。

4. 結 言

本稿ではレーザー伝送用光ファイバについて、その信頼性を支えるための光ファイバ端面加工技術、及びコネクタ技術についてその概要を紹介した。今後、レーザー加工分野では、更なる加工用レーザー発振器の性能向上

が進み、レーザー伝送用光ファイバの信頼性に対する要求は益々高まるものと考えられる。今回紹介した光ファイバ端面加工技術やコネクタ技術が、高出力レーザー伝送技術の信頼性を支える技術となることに期待をしている。

参考文献

- 1) R. Kashyap and K. J. Blow: Electron. Lett. **24** (1988) 47.
- 2) S. Todoroki: Opt. Express **13** (2005) 6381.
- 3) Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase: IEEE J. Lightwave Technol. **21** (2003) 2511.
- 4) 吉田 國男, 吉田 英次, 本越 伸二: レーザー研究 **24** (1995) 11.
- 5) 實野 孝久: NTR News **18** (2002).
- 6) J. Neauport, L. Lemaingre, and H. Bercegol: Opt. Express **13** (2005) 10163.
- 7) N. Shibata, S. Shibata, S. Horiguchi, T. Izawa, and H. Osanai: Nat'l Conv.IECE J. **820** (1977) 4.
- 8) P. A. Temple, W. H. Lowdermilk, and M. David: Laser Induced Damage in Optical Materials 1981, NBS Spec.Pub. **18** (1982) 3249.
- 9) W. H. Lowdermilk and M. David: IEEE J. Quantum Electron. **QE-17** (1981) 1888.
- 10) 山崎 元彦, 阿久津 剛二, 中村 守, 兵藤 隆史, 渡部 民重, 石田 智彦, 佐竹 武史: 三菱電線工業時報 **105** (2008) 24.
- 11) S. Motokoshi, K. Mikami, and K. Kato: Laser-Induced Damage in Optical Materials 2010, Proc. SPIE **7842** (2010) 78420F-1.
- 12) M. Bigot-Astruc, P. Sillard, S. Gauchard, P. Le Roux, and E. Brandon: Optical Fiber Communication Conference (2006) OFK-4.