

水中での高強度レーザーの光ファイバへの結合

岡田和之, 今田貴雄, 岡野恭久, 中村泰徳

Coupling of Intense Laser to Optical Fiber in Water

Kazuyuki OKADA, Takao IMADA, Yasuhisa OKANO and Yasunori NAKAMURA

Abstract

The $0.53\text{ }\mu\text{m}$ intense pulse-laser was coupled to the silica fiber with $400\text{ }\mu\text{m}$ of core diameter in water. The optical damage threshold was experimentally observed to be 1.7 times higher than that in non-water. The damage was not occurred on the input end surface of the fiber, but in the core.

Key words: Silica fiber, Optical damage, Laser delivery

1. はじめに

石英ファイバはレーザー光伝送デバイスとして通信分野を中心に医療, 計測, 加工など幅広い分野で応用が検討されているとともに実用化も盛んである. 医療, 加工などのエネルギーを必要とする分野での応用では, 比較的大口径の石英ファイバで高い強度のレーザー光を伝送する. このエネルギー伝送においては, 伝送光のパルス波形よりも伝送エネルギーが重要とされる場合が多い. この場合, ファイバ長は数m程度と通信応用に較べて極端に短いため, ファイバの損失特性よりも入射端面の光損傷が最大伝送エネルギーを決める大きな要因となる.

ファイバ入射端では, レーザー光は屈折率 1.0 の空気層から屈折率 1.5 程度の石英ガラス層へ入射する. 空気・石英ガラス境界面での屈折率差が大きいと光の屈折も大きくなり, 条件によっては損傷を受けやすくなることも予想される.

本論文では, レーザー光とファイバの結合において, 屈折率を徐々に変化させ, ファイバへの入射レーザーエネルギーの増加を試みた. このため, ファイバ入射端前に屈折率が 1.3 である水の層を設置してレーザー光をファイバと結合させ, ファイバ入射端面ならびにその近傍の光損傷を調べた.

2. 実験配置ならびに条件

パルスレーザーとしてQスイッチ Nd:YAG レーザー(エクセルテクノロジー㈱, Surelite I-10, 発振波長 $1.06\text{ }\mu\text{m}$, 繰り返し 10pps) を使用し, 光学結晶で 2 倍高調波である $0.53\text{ }\mu\text{m}$ に変換して用いた. 光学減衰フィルターを用いてファイバに入射するレーザー光のエネルギーを調整した後, 焦点距離 210 mm のレンズで石英ファイバの入射端面に集光した. 集光前のレーザーエネルギーをパワーメータ (OPHIR, 30A-P) で測定し, ファイバへの投射エネルギーとした. ファイバ入

射端面上での正確な光強度は評価が難しいが、レーザー光とファイバとの結合条件を変化させないときの相対的な比較は可能である。ファイバで伝送された光のエネルギーも同様にしてパワーメータ (OPHIR, 3A-P) で測定した。

光ファイバはコア径 $400\mu\text{m}$ 、長さ 3m の石英ガラス製のもの (三菱電線工業㈱, ST400E-SY) を用いた。入射端面は研磨紙を用いて図 1 に示した状態まで研磨した後、実験に使用した。

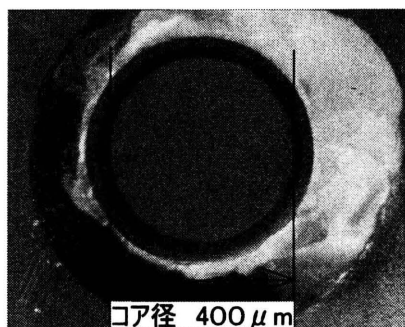


図 1 ファイバ入射端面の光学顕微鏡写真

レーザー光と石英ファイバの結合では、ファイバ入射端面にプラスチックのカプセルを取り付けて水を充満させた。この筒と水がない場合、水の層厚を 25mm 、 50mm と変化させた場合のファイバで伝送されたレーザー光のエネルギーを測定した。以後、それぞれの場合を水層 0mm 、 25mm 、 50mm と称する。いずれの場合も、集光レンズとファイバ入射端面との距離は一定とした。本来は空気から水、水からファイバコアガラスへとレーザー光を入射させるべきであるが、実験装置製作の都合上、水を保持するプラスチック円筒の先端に厚さ 1mm のガラス板を取り付けた。このガラス板の設置は、ファイバ損傷評価にほとんど影響を与えないことを別の実験にて確認した。

ファイバ入射端面の光損傷閾値を評価するために、レーザー光伝送時間 (伝送パルス数) を一定としてパルスエネルギーを増加させたときの伝送エネルギーの変化を観測し、伝送エネルギーの急激な低下でファイバが損傷したと判断した。

次に、レーザーパルスエネルギーを一定として伝送時間 (伝送パルス数) に対する伝送エネルギーの変化を調べ、ファイバ入射端面の光損傷が時間的にどのように進展するかを把握した。ファイバの損傷閾値近傍では伝送パルス数の増加とともにファイバが損傷することも予想され、閾値の評価に影響を及ぼす。

3. 実験結果および検討

レーザー伝送時間を 30秒 (伝送パルス数: 300) 一定として、石英ファイバに投射するパルスエネルギーを 2.7mJ から 19.1mJ まで変化させたときの伝送エネルギーの変化を図 2 に示した。水層 0mm の場合、投射エネルギーを 2.7mJ から増加させると 7.7mJ で伝送エネルギー 2.7mJ を観測した。投射エネルギー 8.0mJ では伝送エネルギーが約 20% 低下して、 2.2mJ となった。さらに、投射エネルギーを大きくして 8.7mJ とすると伝送エネルギーは測定できなかった。投射エネルギーが 8.0mJ 近傍で、損傷が起こり始めていると推測できる。この領域を図 2 では薄いシェイドを付けて示した。最大伝送エネルギー 2.7mJ を観測したときの投射レーザーエネルギーに対する割合を評価すると 35% となる。今回の実験に用いているファイバの長さが 3m であることを考慮すると、この値がファイバ入射部でのレーザー・ファイバ結合効率にほぼ等しくなると考えてよい。コア内での幾何学的集光を避けるために、実験ではレーザー光をレンズの焦点距離よりも遠くでファイバに入射させている。このため、ファイバ入射端面でのレーザー光の集光径はコア径より大きくなっている可能性が高く、レーザーとファイバとの結合効率が 35% と低くなっていると思われる。

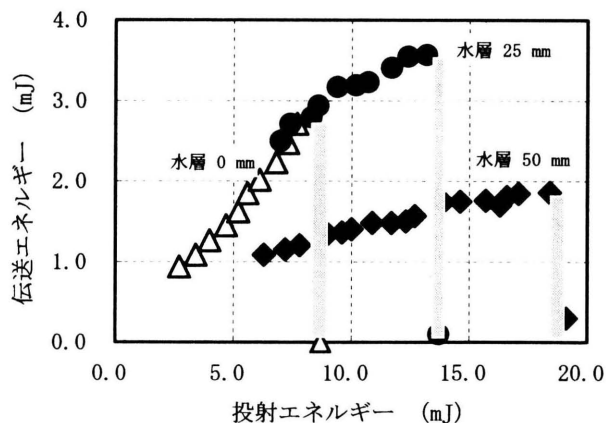


図 2 石英ファイバの光損傷特性

プラスチックのカプセルに水を満たし、水層の厚さが 25mm では、投射エネルギー 13.2mJ で 3.6mJ を観測したが、 13.7mJ では損傷を起こし、伝送エネルギーが観測できなかった。水層 25mm を使用することにより、水の層がない場合 (水層 0mm) に比べてファイバへの投射エネルギーを 1.7 倍に増加させることができた。水層 0mm と同様にレーザー・ファイバ結合効率を評価すると 27% と算出された。水層 0mm の場合に較

べて少し低い値である。水層中での散乱などが影響しているものと推測される。

水層の厚さを 50mm に大きくすると、投射エネルギーを 18.4mJ と更に増加させることが可能となったが、伝送エネルギーは水層 25mm の場合よりも逆に減少した。損傷閾値近傍でのレーザー・ファイバ結合効率も 10% と低い値となった。

水層 25mm, 投射エネルギー 13.7mJ のときのレーザー光伝送後のファイバ入射端面を顕微鏡で観察してみると、伝送前の図 1 と比較して顕著な損傷は見受けられなかった。入射端面の状態は伝送エネルギー低下には影響を及ぼしていないことがわかる。図 3 はファイバ入射端表面からさらに奥を観測したときの画像であり、ファイバコア内部には明らかな損傷が見られた。

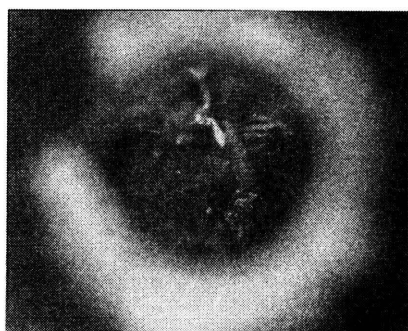


図 3 ファイバコア内部の損傷

損傷の場所を明らかにするために、損傷後のファイバで光伝送を行ったときのファイバ軸方向の様子を観測した。その結果を図 4 に示した。ファイバ入射端面



図 4 レーザー損傷ファイバの発光

から 9~13mm の領域で強い発光が見られ、ファイバコア中に閉じ込められているはずの光がファイバ外へ放射されていることが確認できる。この領域で損傷が起こり、光が強く散乱していると予想される。これにより、コア・クラッドの境界面での全反射条件を満たさ

なくなり、伝送光がファイバ外へ逸脱しているものと思われる。水層 50mm の場合でも、入射端から同じ距離のところで、同様の現象が確認された。

レーザー光はレンズによって集光され、ファイバコア内へ導かれる。前述したように、本実験ではレンズとファイバ入射端面間の距離はレンズの焦点距離より大きくしている。したがって、幾何光学的にファイバコア内でレーザー光が集光され、光強度が高くなる状況は実現されないはずである。現在、コア内部での損傷メカニズムについては検討中である。

水層を設けない状態で、1 パルスあたりの投射レーザーエネルギーを 8.0mJ 一定としてファイバで伝送されたレーザーエネルギーの時間変化を測定した。この結果を図 5 に示した。(図 5 中の△印) 測定時間は 4 分間(伝送パルス数: 2400 パルス)とした。この間、伝送エネルギーの急激な低下は見受けられず、ほとんど一定の値を示した。この投射エネルギーは、図 2 に示した損傷特性では損傷が起こり始める閾値近傍の値である。ほぼ同じ投射エネルギー (8.3mJ) において、

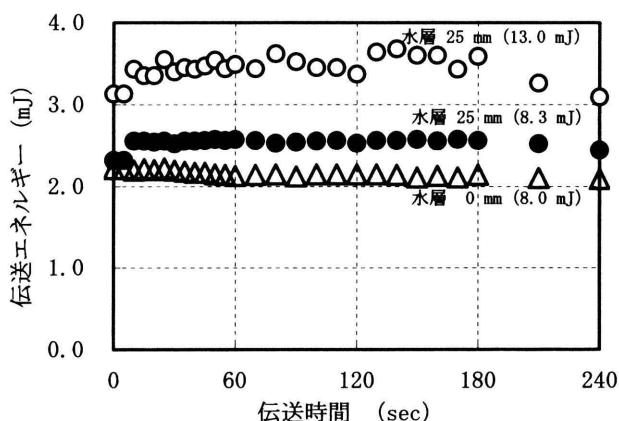


図 5 伝送エネルギーの時間変化(水層 0, 25mm)

水層 25mm を設けた場合の特性も併せて図 5 に示した。水層を設置した場合、損傷閾値が向上して安定なエネルギー伝送がなされていることがわかる。投射エネルギーを図 2 で示された損傷閾値近傍まで高くした状態(投射エネルギー: 13.0mJ)で 4 分間の伝送エネルギーの変化を観測すると、水層 0mm の場合と同様の特性を示したが、伝送エネルギーのばらつきは若干大きくなった。図 5 に示した両者の時間変化を考慮すると、ほぼ正当な損傷閾値が図 2 で評価できていると考える。

同様の実験をファイバ入射端面前に水層 50mm を設置して行った結果を図 6 に示した。投射レーザーエネ

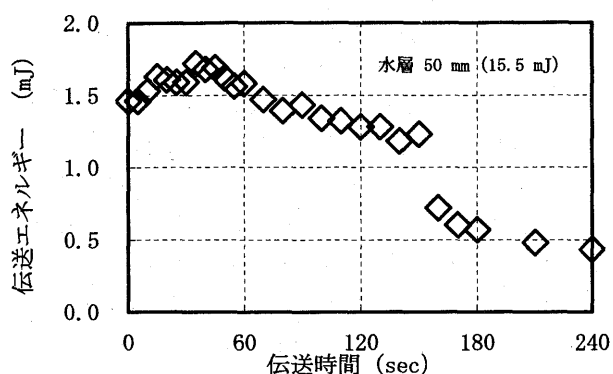


図6 伝送エネルギーの時間変化 (水層 50mm)

ルギーは 15.5mJ に設定した。図2から判断して、このエネルギーではファイバに損傷は起こらない条件である。伝送時間が経過するとともに伝送エネルギーは大きく変動している。水層が厚いために、液体であるがゆえの揺らぎなどの影響を受けてファイバコアへの入射状態が定まっていないことも推測される。

損傷はファイバ入射端表面ではなく、コア内部で起っている。この損傷が伝送エネルギーの低下を引き起こしているとするれば、内部損傷のメカニズムを明らかにする必要がある。今回の実験では、装置製作の都合上、ファイバ入射端表面のみに水層を設けているのではなく、入射端から数 cm にわたりファイバを水の中に浸している。損傷が起こっている部分は、ファイバ被覆材を通してではあるが、水層の影響を受けていることも否定できない。この内部損傷メカニズムの解明と併せて水層との関連を明らかにする必要がある。

4. まとめ

高強度パルスレーザー光を石英ファイバに結合するときに、ファイバ入射端部に水層を設けることによりファイバコアに入射できるエネルギーを 1.7 倍に増加できた。損傷はファイバ入射端表面ではなく、コア内部で起っている。今後、損傷メカニズムを水層との関連も含めて解明する必要がある。