

# 高出力レーザー伝送光ファイバー

愛川 和彦

## Optical Fibers for High Power Laser Transmission

Kazuhiko AIKAWA

Recently, high-power fiber lasers have been put to practical use in manufacturing industries such as metal cutting, welding, and a field for laser marking. The power transmission by the optical fibers is an indispensable element in these high output laser material processing, the high output of the laser will tend to go ahead more and more in future. With a higher power of laser, the load to the optical fiber becomes large, and improvement in characteristics of the optical fiber is indispensable. Therefore the optimum design and proper techniques of the optical fiber for safety are also important. In this commentary, general information on optical fibers for high-power laser transmission is explained, and commented briefly on an optical coupler as an example of combination method with the related devices.

**Key words:** optical fiber, fiber laser, high power, optical coupler

レーザーを用いた産業用システムにおいて、レンズを用いた光学系に比べてフレキシブルな光学系である光ファイバーによるパワー伝送が以前から提案され、現在は主流となっている<sup>1)</sup>。この光ファイバーによる光学系は、ファイバーレーザーの伝送用のみならず、高出力な固体レーザーや加工用半導体レーザーにも適用が進んでいる<sup>2)</sup>。

今後ますますレーザーの高出力化は進む傾向にあり、それに伴い伝送光ファイバーへの負荷も大きくなるため、伝送光ファイバーの特性向上は必要不可欠である。また、伝送システムの適切な設計と光ファイバーの安全面に配慮した適切な設計、取り扱いも重要である。高出力レーザーの伝送に適した光ファイバーには、ステップインデックス光ファイバー (SI 光ファイバー)、グレーデッドインデックス光ファイバー (GI 光ファイバー) が用いられているが、不純物を添加していない純粋石英コア SI 光ファイバーは、レーザー耐性が高いため主流となっている。

本解説では、レーザーを伝送するための光ファイバーの種類とその特徴、特に高出力レーザー伝送光ファイバーについて解説し、さらに関連デバイスとの結合方法の例として光カップラーについても簡単に解説する。

## 1. 光ファイバー

### 1.1 基本的な光ファイバー構造と特性

光ファイバー素線はコアとクラッドの二重構造を基本としており、図1 (a) に示すようにコアの周囲を屈折率の低いクラッドで覆うことにより、光の反射特性を利用して光を伝送している。図1 (a) には、レーザー伝送光ファイバーとして主流であるSI光ファイバーの例を示している。通信用の一般的な光ファイバーは、コアの屈折率を高めるためにSiO<sub>2</sub>にGeO<sub>2</sub>を添加したGeO<sub>2</sub>添加石英ガラスが用いられているが、レーザー伝送光ファイバーとしては、GeO<sub>2</sub>添加石英ガラスよりも耐パワー特性にすぐれる純粋石英をコアとして用いていることが多い。そのためクラッドは純粋石英よりも屈折率を低くする必要があり、ドーパントとしてフッ素やボロンなどが用いられるが、取り扱いの容易さなどの理由から、フッ素をドーパントして用いる光ファイバーが一般的である。また、製造工程の都合や、光ファイバーの剛性を確保するために、クラッド部分を二重構造にする場合もある。図1 (b) は石英によるクラッドが2層ある構造である。さらに、この石英クラッドを覆う樹脂に屈折率の低い樹脂を用いて樹脂クラッドとする構造もある。

(株)フジクラ 光応用製品事業推進室 (〒285-8550 佐倉市六崎 1440) E-mail: aikawa@lab.fujikura.co.jp

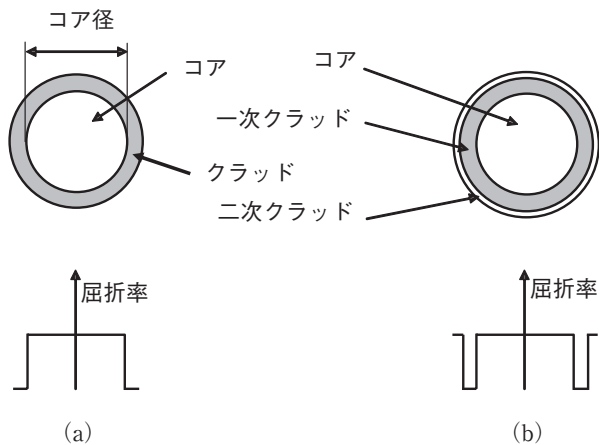


図1 光ファイバー素線構造。

SI 光ファイバーは、コアに純粋石英ガラス、クラッドにフッ素などを添加した石英ガラスから構成された母材を高温の炉にて熔融延伸、および被覆することで製造される。光ファイバーはガラス表面にごみや傷が付くと強度劣化を引き起こす可能性があるため、紡糸直後に被覆が施される。一般的な通信用光ファイバーの被覆は二層被覆であり、一層目は緩衝層、二層目は保護層などよばれている。一次被覆層は、きわめて柔軟な樹脂層となっている。これは、外部から加わる力により、光ファイバー素線中のクラッド部分が微小変形を起こしてその変形がコアに伝わり、光の伝送損失が発生するのを防止する役割を有している。また、ガラスクラッド表面に塵やほこりが接触して物理的損傷を受けることを防止するだけでなく、塵やほこりあるいは空気中の水分、および水分に含まれる化学物質等により化学的浸食を受けることを防ぐ役割も有している。二次被覆層は、一次被覆層に比べて高いヤング率を有する硬い樹脂層となっており、光ファイバーの強度を確保する役割を有している。被覆された光ファイバーの構造を図2に示す。

レーザー伝送光ファイバーも通信用光ファイバーと同様

の被覆構造を用いるものもあるが、一次被覆層にクラッドの効果をもたせた低屈折率なポリマー樹脂を用いた構造もある。ポリマー樹脂の屈折率は 1.38, 1.40 が一般的であり、屈折率 1.46 の純粋石英をコアとすると、それぞれ  $NA = 0.48, 0.40$  に相当する。石英ガラスコア / 石英ガラスクラッド光ファイバーに比べて大きな NA が得られることが特長である。なお、NA はおもにレンズ分野で用いられる指標であるが、光ファイバーの分野でも重要な指標で、開口数とよばれている。光ファイバーにおける NA は、光ファイバーが光を取り込む角度、または光の出射角度の目安であり、コアの屈折率を  $n_1$ 、クラッドの屈折率を  $n_2$  とすると、NA は以下の式 (1), (2) から算出される。

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta$  は比屈折率差とよばれ、 $\Delta$  が大きいほど光はコア・クラッド界面で全反射しやすく、コアの中に閉じ込められやすくなる。

## 1.2 耐パワー性を考慮した光ファイバーの構造

光ファイバーの光学特性は、おもに図 1 (a) に示すコア・クラッドの屈折率分布構造により決まる。耐パワー性が要求される光ファイバーコアの石英ガラスは、前述のように  $GeO_2$  などの添加物のない純粋石英が用いられることが一般的である。コアからの光の漏洩は、NA, クラッド厚、伝送波長に依存するが、NA の大きな光ファイバーを用いると、光ファイバーの曲げによるコアからの光の漏洩を小さく抑えることができ、曲げ損失により制限される使用可能な波長範囲が広がる。標準的な純粋石英ガラスコア / フッ素添加石英ガラスクラッドの大口径ファイバーの NA は 0.22 前後であり、より高い NA が要求される場合、0.28 といった高い NA の光ファイバーも提供されている<sup>3)</sup>。

光ファイバーの基本材料となる石英ガラスのレーザー耐性は  $\sim 4 \text{ GW/cm}^2$  と見積もられており<sup>4)</sup>、高パワー光を伝

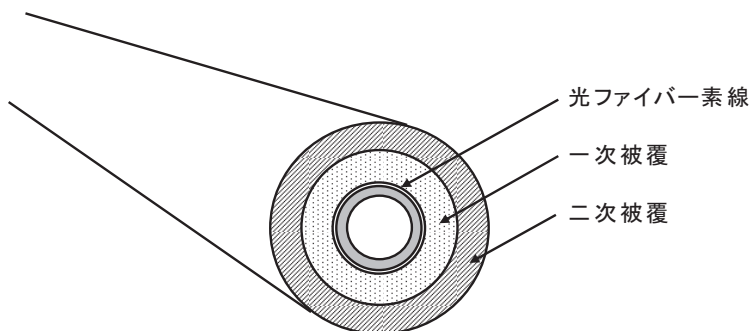


図2 2層被覆された光ファイバーの構造。

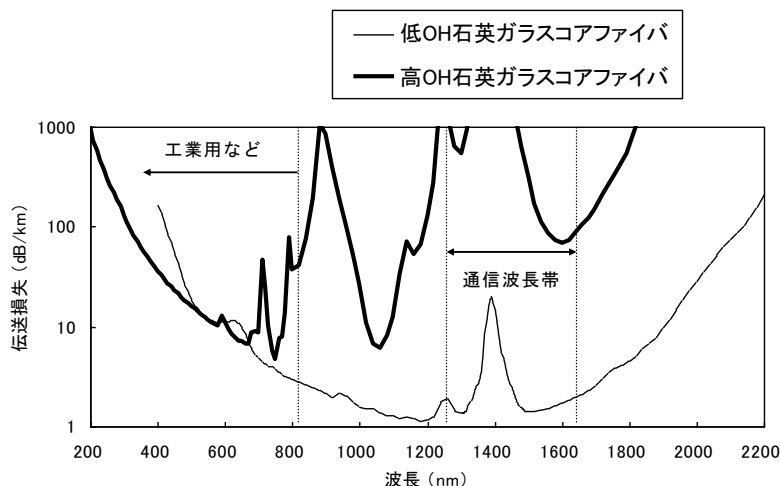


図3 低 OH 石英・高 OH 石英ガラスコア光ファイバーの損失波長特性.

送する際には、高パワー密度によるコアの石英ガラスの破壊を避ける設計が必要である。そのため、高パワー伝送光ファイバーではコア径も重要なパラメーターであり、コア径を大きくしコアの断面積を広げることで、パワー密度を下げる方法が取られている。コア径は光源のスポット径、NA、伝送するパワーによって使い分けられるが、各社から、100～1500  $\mu\text{m}$  程度のコア径の大口径ファイバーがラインナップされている<sup>\*1-3</sup>。

エネルギー伝送などの分野では、紫外および可視光領域のレーザーがおもに使われる。一般的に、紫外および可視光領域で低損失な光ファイバーには、コアに OH 基が高濃度に添加されるダイレクト法による高 OH 純粋石英ガラスが用いられている。これは、紫外線領域での損失に影響を与える石英ガラスの構造欠陥を OH 基が低減するためである<sup>5)</sup>。

合成石英ガラス中に水素が含有されていると、代表的な石英ガラスの欠陥である NBOHC (非架橋酸素欠乏欠陥 (non-bridging oxygen hole center,  $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$ )) と E' センター ( $\equiv\text{Si}\cdot$ ) が 180 nm から 260 nm の UV 領域に吸収をもたない  $\equiv\text{SiOH}$  および  $\equiv\text{SiH}$  に修復される<sup>6)</sup>。このように、紫外領域などの波長領域では、積極的に欠陥を埋めるような材料を添加するのが効果的である。また、元々欠陥の少ない石英ガラスを用いる方法もある。しかし、紫外領域で OH 基添加が効果的である一方、OH 基などが意図的に添加された石英ガラスを用いた光ファイバーには 1.38  $\mu\text{m}$  を吸収ピークとする OH 基吸収損失があり、可視光より長い波長で損失が増加してしまう。損失波長特性を図 3

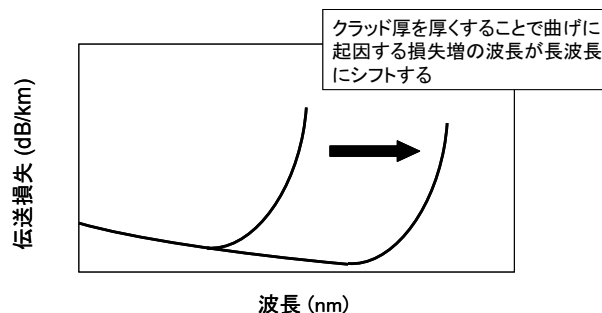


図4 光ファイバーの曲げ損失特性.

に示す。これら OH 基の添加、不添加などの製造方法は、使用波長などの要求特性に応じて使い分けするのが一般的である。

### 1.3 光ファイバーの曲げ特性

光ファイバーは小径で曲げると、曲げ損失による損失の増加とともに、歪みによりガラス表面の欠陥が増大し、最終的には破断に至る。光ファイバーの検査工程では、加重を掛けてあらかじめ弱い部分を除去するブルーフ工程があり、この検査工程を通った光ファイバーが製品として用いられている<sup>7)</sup>。

曲げ損失は、側圧により微小な曲げが加わることによるマイクロバンド損失と、大きな曲げによるマクロバンド損失があるが、前述のように、マイクロバンド損失については被覆を工夫することで抑制する手法が取られる。マクロバンド損失については、NA を高くすることやクラッド厚を厚くすることにより低減されている。光ファイバーの設計にあたっては、周囲の光部品との結合を考慮したコア

\*1 [http://www.polymicro.com/products/opticalfibers/products\\_opticalfibers\\_fv.htm](http://www.polymicro.com/products/opticalfibers/products_opticalfibers_fv.htm)

\*2 [http://www.fujikura.co.jp/products/tele/o\\_applied\\_p/td4004.html](http://www.fujikura.co.jp/products/tele/o_applied_p/td4004.html)

\*3 <http://www.mitsubishi-cable.co.jp/ja/products/group/optical-fiber/large.html>

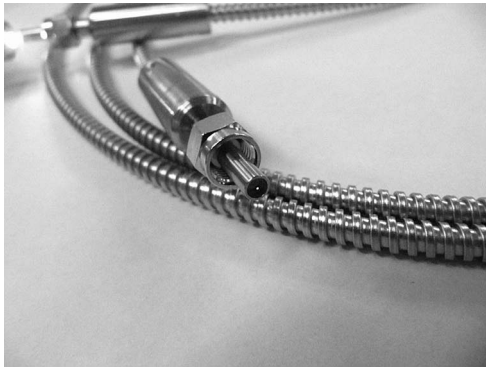


図5 金属管で保護された光ファイバー。

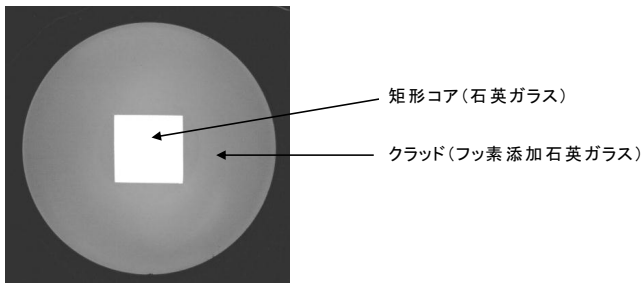


図6 矩形コア光ファイバーの断面。

径および使用される波長から、最低必要なクラッド径が決められる。一般的なNAを有する大口径光ファイバーの場合、使用波長の10倍程度のクラッド厚が必要であることがわかっている。例えば、可視光領域で使用される場合は数 $\mu\text{m}$ 前後のクラッド厚でよいが、 $1.3\mu\text{m}$ や $1.55\mu\text{m}$ といった赤外光領域で使用される場合は $15\sim 20\mu\text{m}$ 前後のクラッド厚が必要となる。曲げ損失特性は、NA、被覆材料、曲げ径に依存するが、模式図として示すと図4のようになる。

高出力レーザー伝送光ファイバーケーブルは、産業用ロボットなどに取り付けられ、常に曲げ延ばしの動作の中で使用される。そのため、ケーブル状態で100万回程度の屈曲試験に耐える必要がある。このような用途に用いられる光ファイバーケーブルは、図5に示すような金属製のフレキシブル管で保護され、十分な強度が確保されている。フレキシブル管は巻き取りや外力による伸び縮みの発生があり、特に長尺になるほど、光ファイバーにストレスがかかる危険性が増大する。光ファイバーへのストレスはレーザービームの品質を落とし、製品の加工性を悪くするだけでなく出力低下にも繋がるため、設計の際には十分な注意が必要である。

#### 1.4 特殊な大口径ファイバー

大口径ファイバーのコア形状は通常は円形であるが、コア形状が矩形の光ファイバーも実用化されている<sup>8-11)</sup>。こ

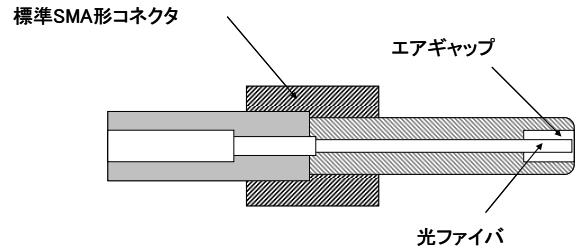


図7 コネクター構造。

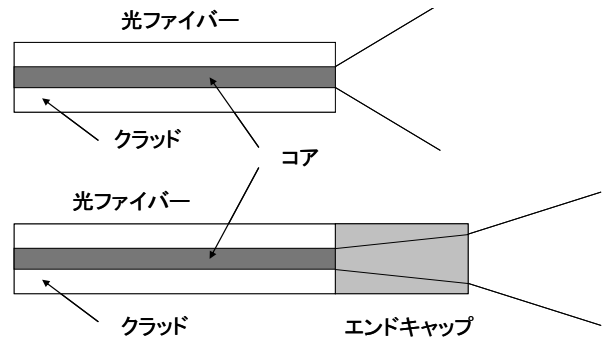


図8 エンドキャップ。

のような矩形コア光ファイバーを用いることで、特殊な光学系を使用することなく、光ファイバー端面から矩形ビームパターンが得られる。クラッドに樹脂を用いたタイプの矩形コア光ファイバーもあるが、大きなNAが得られやすいという利点はあるものの、樹脂クラッド部分の耐パワー特性が石英ガラスよりも劣るため、コア・クラッドともに石英を用いたタイプのほうが耐パワー特性などの信頼性にすぐれている。従来の純粋石英コア/フッ素添加クラッドと同じ材質であるが、特殊な光ファイバー製造方法によりコア部を任意の矩形サイズにすることが可能となっている。この矩形コア光ファイバーの断面の一例を図6に示す。

用途としては、薄膜型太陽電池やフラットパネルディスプレイ分野で用いられているレーザーによる加工があり、出射パターンが矩形のトップハット形のビームとなることが加工形状の高品質化につながる。その他の用途として、LD発光素子との高効率な結合が可能な光ファイバーとして、LDモジュール用ピグテールへの適用なども挙げられる。

## 2. 関連デバイスとの結合方法

### 2.1 光ファイバー端面

高出力レーザー伝送光ファイバーで不具合が生じる場合、コネクター部の損傷が圧倒的に多い。損傷のおもな原因は光ファイバー端面への異物付着であり、その異物に



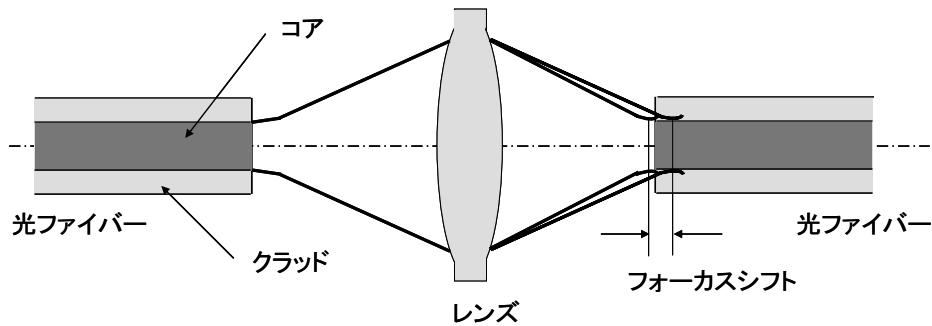


図9 Fiber-to-fiber カップラーの模式図.

レーザー光が照射されると、光ファイバー端面が損傷する。近年のレーザーの高出力化に伴い、端面の物理的強度の向上が必要となっている。

光ファイバー端面のレーザー損傷閾値は、表面粗さや表面に残存する研磨剤などの不純物に依存する。そこで、機械研磨後にプラズマ処理を施すことで表面エッチングを行い、表面近傍の酸化セリウムを低減する表面改質を施すことでレーザー損傷閾値を改善するなどの方法がとられている<sup>12)</sup>。また、炭酸ガスレーザーを用いて光ファイバー端面を蒸散させ、平滑面を形成し改善を行った報告もされている<sup>13)</sup>。

レーザー伝送光ファイバーのコネクター構造を図7に示す。ミスアライメント時などの光コネクターおよび光ファイバーの損傷を低減するために、光ファイバーの周囲にエアギャップを設けた構造となっている。

高出力ファイバーレーザーの出力端として光ファイバーをそのまま用いると、空気との界面での放射密度が高いため、光ファイバーの出射端が損傷してしまうことがある。そこで、光ファイバーの出射端に以下の工夫をすることで、損傷に対して強固な構造とすることが可能である。図8にエンドキャップの構造を示す。コア・クラッド構造を有する光ファイバー端面に石英材料などを融着接続することにより、石英材料の出射面におけるビームの口径が拡大される。その結果、石英と空気との境界におけるパワー密度を大きく低減することができ、表面損傷のリスクを低減することができる。

光コネクター端面では、伝搬した光の後方反射や散乱光の影響で、光コネクター内部の温度が高温に達することがある。そのため、キロワットクラスの光パワーの伝送用では、光コネクターの外周または光コネクター内部は、冷却して使用される。

## 2.2 関連デバイスとの結合方法

レーザー光を光ファイバーで伝送する場合、レーザー光

を効率的に対象物へ導くために、結合、切り替え、分配などが必要になる。結合には、fiber-to-fiber カップラーが使われている。レーザー光を受光する光ファイバーのコア径およびNAは、レーザー光を出射する光ファイバーのものよりも大きいのが一般的である。この光ファイバーの接続にfiber-to-fiber カップラーが用いられる。図9にfiber-to-fiber カップラーの模式図を示す。

キロワットクラスのレーザーシステムにおいては、フォーカスシフトという現象が問題となる。これは温度による光ファイバーの屈折率変化、光学部品の屈折率変化・変形などに起因するもので、フォーカス位置がレーザー出力に依存してシフトしてしまう現象である。fiber-to-fiber カップラーでは、このフォーカスシフトについても考慮して設計する必要がある。例えば、温度による屈折率変化の小さな光学部品を使用する、光吸収の少ない反射防止コーティングやレンズ材料を使用する、などの設計が重要である。また、フォーカスシフトの有無にかかわらず、コネクター部のみならず、このカップラー部分の冷却も必要となる。さらに、コネクター部が接続されていない場合にレーザー光を停止するインターロックを提供するような設計も安全面から必要である。

高パワーなレーザーに使用される伝送光ファイバーの構造と特性、損傷に対する保護、および端面加工・処理技術について解説した。また、関連デバイスとの結合方法の例として、光カップラーについても簡単に解説した。今後ますますレーザーの高出力化は進むと考えられ、安全面へ配慮した伝送光ファイバーの最適な設計、および慎重な取り扱いが重要である。レーザーの高出力化に対応した伝送光ファイバー、関連デバイスとの結合技術の発展に期待する。

## 文 献

- 1) 柳瀬和夫, 山根毅士: “光ファイバーを用いた高出力レーザー光伝送”, レーザー研究, **7** (1979) 371-376.
- 2) D. Havrilla, M. Holzer and S. Strohmaier: “高出力を維持する低開口数のダイレクト半導体レーザー”, Laser Focus World Japan, **5** (2011) 34-36.
- 3) G. Schotz, J. Vydra, G. Lu and D. Fabricant: “New silica fiber for broad-band spectroscopy,” *Fiber Optics in Astronomy III. ASP Conference Series, Vol. 152* (1998) pp. 20-31.
- 4) 伊田正樹, 佐野雄二, 向井成彦, T. Schmidt-Uhlig, G. Marowsky: “光ファイバによる 20 MW レーザーパルスの伝送とその応用”, レーザー研究, **28** (2000) 309-313.
- 5) J. Vydra and G. Schotz: “Improved all silica fibers for deep UV-applications,” Proc. SPIE, **3596** (1999) 165-175.
- 6) J. Assmus, J. Gombert, K. F. Klein, J. Clarkin and G. Nelson: “Improvements in UV-transmission of all-silica optical fibers with low OH-content,” Proc. SPIE, **3596** (1999) 108-114.
- 7) Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi and Y. Ishida: “Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing,” J. Appl. Phys., **53** (1982) 4847-4853.
- 8) 中井忠彦, 阿久津剛二, 木下貴陽, 山本哲也, 大泉晴朗, 谷口幸一: “方形コアレーザーガイドの開発”, 三菱電線工業時報, **106** (2009) 5-8.
- 9) J. R. Hayes, J. C. Flanagan, T. M. Monro and D. J. Richardson: “Square core jacketed air-clad fiber,” Opt. Express, **14** (2006) 10345.
- 10) 小西一昌, 蟹江智彦, 高橋健一郎, 島川 修, 水戸瀬雄一, 佐々木隆, 樽 稔樹, 永島拓志, 布施敬司, 井上 享: “パワー伝送用矩形コアファイバの開発”, SEI テクニカルレビュー, **177** (2010) 125-128.
- 11) 林 和幸: “矩形コアファイバ”, フジクラ技報, **119** (2010) 49.
- 12) 石田智彦, 阿久津剛二, 谷口幸一: “高出力レーザーの光ファイバによる伝送技術”, レーザ加工学会講演論文集, **76** (2012) 103-106.
- 13) 山川禎貴, 石田智彦, 谷口幸一: “レーザーポリッシュ技術による高品質光ファイバ端面加工”, 三菱電線工業時報, **108** (2011) 1-4.

(2012年7月24日受理)