光ファイバによる20MWレーザーパルスの伝送とその応用

依田 正樹, 佐野 雄二, 向井 成彦, Thomas SCHMIDT-UHLIG *,

Gerd MAROWSKY *

(株)東芝 電力・産業システム技術開発センター (〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町8)

* ゲッティンゲン・レーザー研究所 (Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, 37077 Göttingen, Germany)

Fiber Delivery of 20 MW Laser Pulses and Its Applications

Masaki YODA, Yuji SANO, Naruhiko MUKAI, Thomas SCHMIDT-UHLIG, *

and Gerd MAROWSKY*

Power & Industrial Systems Research & Development Center, Toshiba Corporation,

8 Shinsugita, Isogo, Yokohama, Kanagawa 235-8523

* Laser Laboratorium Göttingen e.V., Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, 37077 Göttingen, Germany

(Received January 11, 2000)

The authors delivered 20 MW laser pulses through an optical fiber with a core diameter of 1.5 mm and a length of 5 m, using a beam homogenizer which divided laser beam into 7×7 squares and folded it up into a single square of 0.81×0.81 mm at the front entrance of the fiber. The laser pulses, which were emitted from a frequency-doubled Nd:YAG laser with an energy of 138 mJ and a pulse duration of 5 ns, were irradiated to the all silica step index multi-mode fiber via the homogenizer. The peak intensity of laser pulses reached 42 TW/m^2 (4.2 GW/cm^2) at the fiber entrance. As an example of practical applications, we demonstrated the feasibility of fiber-delivered laser peening through experiments in which the residual stress of an SUS304 test sample was improved from tensile to compressive.

Key Words: Pulse laser, Fiber delivery, Beam homogenizer, Laser peening

1. 諸 言

光ファイバは、低損失・大容量で構造が柔軟であるなどの優れた特徴により光通信をはじめとする様々な分野で適用されている。大出力レーザーによる加工分野においても、kW級出力のCW発振YAGレーザーを用いた溶接、切断あるいは表面改質のためのレーザー光伝送に石英系ファイバが利用されている。しかし、高出力のパルス発振レーザーに関しては、ピーク出力が大きいため光ファイバの損傷が発生し伝送エネルギーをあまり大きくできないのが現状であった。最近ではパルスNd:YAGレーザー光の伝送に中空ファイバを用いる試みがなされており¹⁾成果が期待される。

本稿では、石英ファイバの損傷メカニズムの検討結果から採用したビームホモジナイザを利用した入射光学系の原理と、この入射光学系を用いた石英ファイバによるピーク出力20MWのパルスNd:YAGレーザー光の伝送試験について述べる。また、その応用についてレーザーピーニングを中心に述べる。

2. パルスレーザーの光ファイバ伝送

2.1 光ファイバの損傷メカニズム

単純に単レンズで集光してパルスレーザー光を光ファイバに入射した場合、最大伝送エネルギーはレーザー発振器や周囲の条件により大きく左右される。筆者らの経験ではコア径1~1.5mm程度の石英ファイバを用いてNd:YAGレーザーの第2高調波(波長532nm, パルス幅5ns, 繰り返し10Hz)を伝送すると10~30mJ程度のパルスエネルギーで入射端面付近に損傷が発生した。また、空気中において単レンズで集光すると入射端面手前の焦点でエアープレイクダウンが発生しエネルギーの大幅なロスが生じた。

パルスレーザーに対する光ファイバの耐久性はレーザー光の波長やパルス幅、材料の材質や表面状態によって異なるが、光ファイバの損傷は高エネルギー密度のレーザー光とコア材質の相互作用により多光子電離や電子なだれが発生し引き起こされる。高出力レーザーの伝送には一般にコアが純粋石英の光ファイバが用いられるが、損傷は主に入射端面でのピットの生成や比較的入射端面近くのコア内部でのクラックの生成に分けられる²⁾。

石英コアの損傷しきい値は内部に比較して表面の方が小さく、その比は1/3程度との報告もある^{3,4)}。光ファイバ

の入射端面は内部に比べ研磨傷等の小さな欠陥が起点となつて損傷を発生しやすいことも損傷しきい値を引き下げる要因の一つと考えられる。従つて、表面の欠陥を極力なくすることが必要である。また、入射レーザー光がFig.1 (a)に示すような空間的に強度分布を持つ場合、そのピーク値で最大伝送エネルギーが制限される。そこで、レーザー光のエネルギー密度分布をFig.1 (b)のようなピークのない平坦な分布にすることで最大伝送エネルギーを増すことが可能である^{2,5,6)}。

コア内部については、損傷しきい値の低い入射端面で損傷を発生しなければコア内部でも損傷は発生しないはずであるが、入射光がコア内部で小さなスポットに集光することで損傷を引き起こすと考えられる。従つて、コア内部での損傷を防ぐためにはコア内部でレーザー光が集光しないよう配慮する必要がある。通常、入射光は入射端面の手前で焦点を持つように集光し、拡散する状態で光ファイバに入射する。

光ファイバの出射端面では入射端面に比べビーム径が大きく、また、レーザー光のエネルギー密度分布は伝送中に十分均一化されるため入射端面に比べ損傷は起こりにくい。

2.2 ビームホモジナイザの適用

光ファイバ入射端面でレーザー光のエネルギー密度を平坦にするとともにコア内部での集光を防ぐための光ファイバ入射光学系に、主にエキシマレーザー加工で利用されているビームホモジナイザの原理を適用した。Fig.2に示すように、光ファイバ入射光学系はレーザービームを拡大するためのビームエキスパンダ、レーザービームを分

Fig.1 Comparison of two types of laser beam profile for fiber delivery.

Fig.2 Schematic drawing of incident optics for fiber.

割するためのレンズアレイおよび光ファイバに集光するための集束レンズから構成されている。レンズアレイにより分割されたレーザービームは光ファイバ入射端面で一つに重ね合わされるため均一なエネルギー密度分布となる。また、それぞれのレーザービームは異なる位置に焦点を持つため光ファイバのコア内部で小さなスポットに集光しにくくなる。さらに、入射端面より手前の空気中においてもブレイクダウンを起こしにくくなる。

ビームホモジナイザの集光面でのスポットサイズ D および周縁光線が光軸となす角度 θ は、レンズの収差やレンズアレイと集光レンズの距離を無視すれば以下の式により簡易的に求めることができる。ここで、 f_1 と f_2 はそれぞれレンズアレイおよび集光レンズの焦点距離、 w_1 および w_2 はレンズアレイに入射するレーザービームの幅とレンズアレイを構成する小レンズの幅である。

$$D = w_2 \times f_2 / f_1 \quad \tan \theta = (w_1 / f_2 + w_2 / f_1) / 2$$

Fig.3に集光位置での均一化したエネルギー密度の空間分布の例を示す。

2.3 光ファイバ伝送試験

Fig.4に伝送試験に用いた装置の構成を示す。光源にQスイッチ式Nd:YAGレーザーの第2高調波(波長532nm, パルス幅5ns, 繰り返し10Hz)を用い、コア径0.6mmのSI型マルチモード石英ファイバ(Fiberguide SFS-600Z)により伝送した。光源からのレーザー光はビームアッテネータを用いてエネルギーを調整した。また、ビームスプリッタによりレーザー光の一部を分岐してパワーメータにより出力をモニターするとともに、光ファイバ出射端においても出射

Fig.3 Beam profile homogenized on the fiber surface (wavelength: 532 nm, pulse duration: 5 ns(FWHM)).

Fig.4 Experimental setup for fiber delivery using beam homogenizer.

光の出力をパワーメータによりモニターした。

入射光学系は1:3のビームエキスパンダ、シリンドリカルレンズを直交して組み合わせた7×7のレンズアレイ($f=400\text{mm}$)および集光レンズ($f=50\text{mm}$)で構成されている。ビームエキスパンダとレンズアレイの間にはレンズアレイに対応した7×7の円形のアパーチャを置き、入射端面で円形になるよう集光した。光ファイバの端面は損傷しきい値を高めるため研磨せずに折ったままで使用した⁷⁾。光ファイバへの入射条件としては、光ファイバのコア径と開口数を d_f および NA_f とすると、光ファイバ入射端面での集光スポット径 d_i と開口数 NA_i は以下の条件を満足する必要がある*。そこで、入射端面での集光スポット径は $d_i=$

$$d_i = 0.7d_f \text{ for } d_f \leq 0.6\text{mm}$$

$$d_i = d_f - 0.2\text{mm} \text{ for } d_f > 0.6$$

$$0.3NA_f \leq NA_i \leq 0.9NA_f$$

0.6mmより $d_i = 0.4\text{mm}$ に、開口数は $NA_f = 0.22$ より $NA_i = 0.2$ とした。

コア径0.6mmのファイバを用いた伝送試験の結果、最大入射パルスエネルギーは27.9mJであり、この時のピーク出力は5.6MW、入射端面の出力密度は44TW/m²(4.4GW/cm²)であった。

さらに、コア径1.5mmの石英ファイバ(Fiberguide SFS-1500Z)を用いて伝送試験を行った。ビームエキスパンダの拡大率を1:4に、集光レンズの焦点距離を $f=150$ に変更した。光源の最大出力に制限があることから円形に集光するためのアパーチャを取り除いたため、光ファイバの入射端面での集光の形状は0.81mm×0.81mmの四角形となった。伝送試験の結果、最大入射パルスエネルギーは138mJ、この時のピーク出力は27.6MW、入射端面の出力密度は42TW/m²(4.2GW/cm²)であり、コア径0.6mmのファイバとほぼ同等の結果が得られた。

3. 光ファイバ伝送技術の応用

3.1 パルスレーザーの応用分野

レーザー装置の高機能化と小型化に伴い、加工、表面改質、超微粒子の創製、成膜などの応用開発が急速に進展している⁸⁾。パルスレーザーのファイバ伝送が可能になると、応用範囲の更なる拡大が期待できる。特に、遠隔での操作性が要求される既存構造物の検査・補修技術は、ファイバ伝送のメリットが大きく、レーザー超音波探傷(レーザーUT)⁹⁾、レーザークリーニング^{10,11)}、レーザーブレイクダウン分光分析(LIBS)¹²⁾、レーザーピーニング^{13,14)}などへの応用が期待されている。

これらの技術は光源としてQスイッチNd:YAGレーザー(基本波または第2高調波)を用いることが多く、石英系ファイバによる伝送が可能な波長領域である。必要とされるエネルギー密度は、レーザーピーニングおよびLIBSで10⁵J/m²のオーダーであり、レーザーUTおよびレーザークリーニ

ングでは10²~10³J/m²程度である。従って、レーザーピーニングおよびLIBSへの適用が最も困難であることが分かる。そこで、レーザーピーニングへの光ファイバ伝送技術の適用について検討した結果を以下に述べる。

3.2 レーザーピーニングの原理と適用の目的

レーザーピーニングは水中でパルスレーザーを金属表面に照射し、材料表面で発生するレーザープラズマの衝撃力により材料の表面処理を行って疲労強度の向上や応力腐食割れ防止をはかる技術である。

Fig.5にレーザーピーニングの原理を示す。水中透過性の良い可視光の短パルスレーザーを水中で集光して材料に照射する。レーザー光のエネルギー密度が十分高い場合、材料表面では材料自身がプラズマ化し急速に膨張するが、水中では水の閉じ込め効果により膨張が抑制されプラズマの圧力は数GPaに達する。この圧力は衝撃波となって材料中を伝播し塑性変形を引き起こすが、周囲からの弾性拘束により圧縮残留応力が材料内部に形成される。

筆者らはFig.6に示すレーザーピーニング施工装置を開発し、原子炉の炉内構造物である炉心シュラウド溶接線の熱影響部の応力改善に適用した。レーザーピーニング施工により材料表面の残留応力を引張状態から圧縮状態に変換することで応力腐食割れの発生を未然に防止することができる。この装置ではQスイッチ式Nd:YAGレーザーの第2高調波(波長532nm、パルス幅10ns以下、繰り返し60または120Hz)を水密構造の中空パイプの中をミラーで反射しながら最大約40m先の施工ヘッドまで伝送しており、レーザー光の照射位置を0.1mmの精度でリアルタイムに制御するために高機能なビームアライメント機構を新たに開発した。しかし、今後さらに狭隘で複雑な形状の炉底部や配管内面などへ適用する上でレーザー光の光ファイバ伝送化が望まれている。光ファイバは振動や温度などの周囲環境の影響を受けにくく構造が柔軟であるため、システムの簡素化と適用範囲の拡大が可能である。

Fig.5 Fundamental process of laser peening: during (a) and after (b) laser irradiation.¹⁴⁾

* Fiberguide Industry, Inc.: Application Note.

Fig.6 Concept of laser peening system for BWR core shroud.¹⁴⁾

3.3 応力改善試験

コア径1.5mm, 長さ5mの石英ファイバ(Fiberguide SFS-1500Z)を介して伝送したレーザー光により応力改善試験を行った。光源および入射光学系は伝送試験と同一の体系であり, 光ファイバからの出射光の集光光学系および施工装置はFig.7に示した $f=120$ および $f=50$ の2枚のレンズと試験水槽で構成されている。集光されたレーザー光は水槽の光学窓を透過した後, 照射ノズルから水槽中のSUS304試験片に照射される。試験片はXYステージにより駆動されており, XYステージは試験片中央の12mm×12mmの範囲に均一にレーザー光が照射されるよう計算機により制御されている。Fig.8に試験片の外形とレーザー光の照射方法を示す。試験片表面ではレーザー光が照射されると気泡やプラズマの残渣が発生するため, 光軸と同軸に照射ノズルから水を噴射してこれらを除去した。試験片には原子炉内の中性子線による照射硬化を模擬するため20%冷間加工を施し, 表面は溶接時の熱影響を模擬するためグラインダ加工により引張残留応力を付与した。

レーザー光のパルスエネルギーは光ファイバ出射端でパワーメータにより測定し100mJ(ピーク出力20MW)とした。このときの入射パルスエネルギーは125mJであり, 伝送効率は80%であった。照射面での集光スポット径は0.7mmで, 1mm²あたり100パルスを均一に照射した。

施工後の表面残留応力はX線残留応力測定法により測定し, 電解研磨と測定を交互に繰り返すことで深さ方向の応

Fig.7 Experimental setup for laser peening.

Fig.8 Dimensions of a SUS304 test sample and sequence of pulse laser irradiation.

力分布を求めた。Fig.9に未施工および施工後の材料の残留応力分布を示す。レーザーの走査方向をX方向, それと垂直な方向をY方向として両方向の残留応力を測定した。その結果, 光ファイバ伝送光を照射したことにより表面から深さ0.8mm以上まで圧縮残留応力が形成され, 応力改善効果が確認された。

Fig.9 Residual stress profile of test samples with and without laser peening by fiber-delivered laser pulses (test sample: 20 % cold worked SUS304, pulse energy: 100 mJ, spot diameter: 0.7 mm, pulse density: 100 pulse/mm²).

4. 結 言

ビームホモジナイザを適用した入射光学系を採用したことによりピーク出力20MWの高出力パルスレーザー光を光ファイバにより伝送し、パルスレーザーの応用分野で最もファイバ伝送が困難であったレーザーピーニング技術に適用できることを金属材料の応力改善試験により確認した。また、今回報告した高出力パルスレーザー光の光ファイバ伝送技術は、パルスレーザー光を利用したレーザー超音波探傷技術やレーザークリーニング技術、あるいはレーザーブレイクダウン分光による分析技術等の様々な分野への適用が期待できる。

参考文献

- 1) 松浦 祐司, 宮城 光信: レーザー研究 **27** (1999) 173.
- 2) H. Kar, J. Helfmann, K. Dörschel, G. Müller, O. Müller, H. Ringelhan, and B. Schaldach: SPIE **1067** (1989) 223.
- 3) N. Bloembergen: IEEE J. Quantum Electronics **QE-10** (1974) 375.
- 4) S. W. Allison, G. T. Gillies, D. W. Magnuson, and T. S. Pagano: Appl. Opt. **24** (1985) 3140.
- 5) W. M. Trot and K. D. Meeks: J. Appl. Phys. **67** (1990) 3297.
- 6) B. Richou, I. Schertz, I. Gobin, and J. Richou: Appl. Opt. **36** (1997) 1610.
- 7) F. Wondrazek and F. Frank: Laser und Optoelektronik **20** (1988) 62.
- 8) 電気学会 レーザアブレーションとその産業応用調査専門委員会編: レーザアブレーションとその応用 (コロナ社, 1999).
- 9) 落合 誠, 仏田 隆, 成瀬 克彦, 平澤 泰治: 日本原子力学会 1999 年春の年会要旨集 II (1999) p.269.
- 10) 日塔 光一, 山口 恭志, 田村 俊幸, 福島 正, 松林 義和, 松井 政雄: 火力原子力発電 **50** (1999) 711.
- 11) 大橋 克明, 蘆立 修一, 黒澤 潔, 中根 昌代, 高田 淳, 岡崎 幸基, 芦部 楠夫, 小長井 主税, 本吉 和仁: 1999年電気学会全国大会講演論文集 (1999) p.7.
- 12) 中根 昌代, 中山 邦彦, 芦部 楠夫, 小長井 主税, 本吉 和仁, 鈴木 典子: 日本原子力学会1998年秋の大会予稿集 I (1998) p.49.
- 13) 佐野 雄二, 依田 正樹, 向井 成彦, 小畑 稔: レーザー研究 **26** (1998) 793.
- 14) Y. Sano, M. Kimura, N. Mukai, M. Yoda, M. Obata, and T. Ogisu: Proc. Int. Forum AHPLA'99, SPIE **3888** (Osaka, 1999) p.33.