レーザー解説

高出力YAGレーザーの加工への適用

—— 重工業分野での適用 ——

石 出 孝*・松 本 長*

(1994年9月22日 受理)

High Power YAG Laser Processing

—— High Power YAG Laser Application in Heavy Industries ——

Takashi ISHIDE* and Osa MATSUMOTO*

(Received September 22, 1994)

The YAG laser has an excellent characteristic that makes beam transmission with optical fibers. In addition, the oscillator of the several kW class has been developed, and so its applications are changing largely from conventional one. The authors have adopted the high power YAG laser welding and surface treatments that uses optical fibers favorable to application to narrow, complicated areas.

In this paper, the authors showed the fundamental beam intensity distribution analysis in focusing lens, optical fiber and kaleidoscope beam homogenizer for high power YAG laser. Then, we have designed and manufactured the compact lens system, metal mirror which have high reflectivity and durability and kaleidoscope. And we also showed the beam transmission characteristics in optical fibers. In addition, on the basis of those elementary techniques, some practical applications with high power YAG laser have described.

Key Words: YAG laser, Beam intensity analysis, Metal mirror, Kaleidoscope, Optical fiber, YAG laser welded sleeving technology, YAG laser cladding, YAG laser drilling

1. はじめに

近時、レーザー発振器の高出力化が進み、生産加工用レーザーとして実用化されているレーザーはCO₂レーザー、YAGレーザー、Excimerレーザーがあげられる。このうちCO₂レーザーはすでに10kW級の発振器が実用に供され

ている¹⁾。また、Excimerレーザーは100W級の発振器がアブレーション加工に実用化されている²⁾。YAGレーザーについてもkW級の発振器が次々と開発され^{3,4)}最近では、次世代のkW級発振器の実現の可能性をもたらす、大型単ロッドレーザー⁵⁾、レーザービーム(以下ビームと略記)の高品質化を狙ったカスケードスラブ

*三菱重工業(株) 高砂研究所(〒676 高砂市荒井町新浜2-2-1)

*Takasago Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2-1-1, Shinham, Arai-cho, Takasago 676)

レーザー⁶⁾、あるいは小型で高効率な発振が可能なダイオード励起レーザー⁷⁾等他のレーザーにはみられない多くの新しい技術的發展が見られる。それぞれのレーザーでは、各々の波長、ビーム特性を生かした加工への最適化が進み、CO₂レーザーは、高出力で高品質ビームが得られることから高品質切断、厚板溶接へ実用化が進み、Excimerレーザーでは、その短波長性と短パルス発振によって超高エネルギー密度が得られることから熱影響が極めて少ないアブレーション加工に適用されつつある。YAGレーザーは、高出力レーザーの光ファイバ(以下ファイバと略記)伝送が可能というこれら2種類のレーザーにない特徴を有することから今後特に実用化展開の著しいレーザーとなることが予想される。

ここでは、数百W~kW級YAGレーザーの加工への適用を行ってゆく上で重要な①光の取扱い方(ビーム解析、計測技術)②光ファイバ伝送技術③各種光学系(集光光学系、表面処理用光学系)について紹介する。

基礎検討には1kW級、2kW級の発振器を用い、連続発振の際はC.W.、ランプ電流制御によるパルス状の発振(ピーク出力=2×平均出力、Duty=50%)はP.W.と略記した。

2. ビーム強度解析

2.1 強度分布を考慮した解析

最も実用化の進んでいるCO₂レーザーでは、集光ビーム自体の評価技術⁸⁾とレンズ、ミラー等光学部品性能の評価^{9,10)}について研究が進み、ほぼビームの特性が解明されたといえる段階に達している。このCO₂レーザーでは、ビーム広がり角が2mrad程度と小さく、ビームをコヒーレント光として取扱い得ることから多くの場合、ガウシアンビームの伝送として取り扱う。これに対し、kW級の高出力YAGレーザーの発振ビームはビーム広がり角が20mrad以上と大きくインコヒーレント光として扱う必要があるとともに加工ではビーム強度分布が重要なことから、強度分布を考慮した解析が必要となる。

特にkW級のYAGレーザーでは、YAGロッド内の光学的歪みが大きいことため位相の揃った光のみとして発振されているわけではない。また、この種のYAGレーザーに用いられる集光光学系は、軸上収差が波長に比べ大きくなることから、集光ビームの強度分布は、幾何光学的の強度分布¹¹⁾で評価できる。ここでは、強度分布を考慮した集光ビームの解析方法を示す。この方法の妥当性については、集光ビームの強度分布計測より評価した結果を後に示す。

Fig. 1にビーム強度解析手法を示す。光源の任意の点光源 $p(x, y)$ が像側につくる点像強度分布PSF(Point Spread Function)は、光学系で生じる収差を考慮して

$$PSF = S(x, y : x_i, y_i)$$

と表される。この強度分布では、光軸上と光軸から離れた地点での点像強度分布は、光学系の収差のため異なる。このとき像側でのビーム強度分布 I は、光源でのビーム強度分布を $I_o(x, y)$ として

$$I(x_i, y_i) = \int S(x, y : x_i, y_i) I_o(x, y) dx dy \quad (1)$$

で表される。

Fig. 1 Beam intensity distribution analysis.
Ray tracing considering the beam intensity is carried out.

2.2 解析結果の評価

集光ビーム計測は、ピンホールを高速回転させると共に光軸と垂直な方向に微小移動させ、集光ビームを横切らせた。このピンホールを通

過した光を矩形導波管により回転中心に設けたセンサ部に導き、ビーム強度を計測した。

集光ビーム解析結果とその計測結果を比較、評価した。解析、計測に用いた光学系の構成をFig. 2に示す。ファイバは、コア径0.68mmのSI型ファイバ($NA=0.2$)を用い、レンズ系は5枚の組み合わせレンズと1枚のレンズ保護ガラスから構成される集光光学系である。レンズの結像面を $L_f=0\text{mm}$ とし、この位置よりレンズ側に加工面がある場合の加工面の位置を $L_f<0$ とし、その反対側を $L_f>0$ として示した。

Fig. 3に解析及び、計測より求めた結像面近傍の集光ビーム強度分布形状を比較した。両者の形状は比較的良好に一致している。さらに、集光ビーム径($1/e^2$ 径)についても比較した。結果をFig. 4に示す。解析により求められた集光ビーム径は実測値とよく一致している。以上の結果より、高出力YAGレーザーにおけるビーム強度解析は、(1)式により求めればよいことが示された。以後のビーム強度解析では全てこの手法を用いている。

Fig. 2 Configuration of optical system used for beam analysis.

Fig. 3 Comparison between calculated and measured beam intensity distribution at the imaging point.

Fig. 4 Comparison between calculated and measured $1/e^2$ spot size.

3. 高出力YAGレーザーの光ファイバ伝送

kW級のビームを安定にファイバ伝送し、これを加工に実用化してゆこうとすると、様々な課題についての検討が必要になる。加工用光学系で、十分なパワー密度を得るためには、ファイバのコア径を小さくする必要がある。一方、ファイバのコア径を小さくするとそれだけファイバに入射する際のパワー密度も高くなり、①レーザーによるファイバの実用上の耐光強度を明らかにする必要がある。また、②ファイバ長に対する伝送損失、さらには加工用光学系で集光されたビーム強度分布を知るため③ファイバ端面でのビーム強度分布を明らかにする必要がある。

3.1 光ファイバの耐光強度と伝送損失

一般にファイバの耐光強度は、パルス幅がnsオーダーのQスイッチ付きYAGレーザーで調べられ、SI型ファイバではほぼ 10^{13}W/m^2 、GI型ファイバで 10^{12}W/m^2 とされている。しかし、いずれの場合もパルスレーザーによって、損傷が生じる値であって、CWレーザーの場合は、あらためてその確認が必要になる。ファイバの耐光強度は、CWレーザーで使い得る最大の集光パワー密度にて調査する必要がある。ここで用いたCWレーザーは、PW使用ではピーク出力を平均出力の2倍まで上げることができ、その際のビーム広がり角はCW時に比べ小さくなる。そこで、ファイバの耐光強度は、ファ

ファイバ面でのパワー密度が一層高くなるPWで調べた。ファイバは、SI型ファイバに比べて耐光強度の低いコア径0.4mmのGI型ファイバを用いた。その結果、入射パワー1kWまでで、伝送損失は6%程度と低い値となり、ファイバは損傷していない。この結果より、SI、GI型ファイバともほぼ 10^{10}W/m^2 程度のパワー密度までのビームについては入射可能と考えた。

ファイバの伝送試験には、 $NA=0.2$ 、コア径 $=0.68\text{mm}$ のSI型ファイバと $NA=0.25$ 、コア径 $=0.55\text{mm}$ のGI型のファイバを用いた。また、ファイバ長は、5m、200mについて調査することにより、ファイバ入射端面での反射損失及び、ファイバ入射端面での反射損失を除いたファイバ内部での伝送損失を調べた。

5mのSI型のファイバのレーザー出力約1.8kWまで伝送損失はCW、PWの場合で、ほぼ一定で約7%であった。さらに200mでの伝送損失はFig. 5に示すように12%程度となった。計算によるファイバ端面反射損失がSI、GI型ファイバともほぼ7%で5mでの伝送損失と一致していることから、5mでのファイバ内部での伝送損失を無視すると、SI型ファイバでのファイバ端面反射損失は7%であり、ファイバ内部での伝送損失は、200mでほぼ5%となりファイバ伝送損失は、1.1dB/kmとなる。

Fig. 5 Transmission loss of step index type optical fiber in 200m length.

3.2 ファイバの接続による長距離伝送

現在格別の設備投資をせずに製造可能なファイバの製造限界長さは、コア径が $0.55\sim 0.7\text{mm}$ で $200\sim 250\text{m}$ である。従って、これ以上の距離を伝送したり、途中損傷したファイバの部分的交換が必要な際には、ファイバどうしの接続の必要が生じる。一般にファイバの接続方法は、ファイバからの出射光をレンズにて再集光し、他方のファイバに入射させる①光学的接続、ファイバ端面を溶解させ2本のファイバを接続する②融着接続¹²⁾、ファイバどうしの光軸を精度よく一致させ機械的に接続する③機械的接続の方法がある。光学的接続は、レンズ系による再集光を行うため、レンズの収差分とアライメント裕度分だけ、接続されるファイバのコア径を大きくする必要がある。従って溶接に利用する最終段のファイバコア径は大きくなり小さい集光スポット径が得られなくなる。また、レンズ系によるビーム伝送損失を必ず伴う。一方、融着接続は接続に手数がかかる。そこで、ビーム品質を確保でき、ビーム伝送損失も少なくなることが期待される機械的接続を検討した。

機械的な接続では、ファイバの光軸を正確に合わせるとともにファイバ間距離を正確に管理した。ファイバコネクタの外観をFig. 6に示す。ファイバの光軸のズレ量を $20\mu\text{m}$ 以下とし、ファイバ間距離を $100\mu\text{m}$ 以下となるよう管理し、ファイバどうしをコネクタで接続した。本装置には、ファイバホルダー部の温度上昇を監視するため、温度センサーを設置し、接続部でのビームの漏れが検知できる構造となっている。接続作業には特別な技術は不必要で、レーザーに関する知識を持たない作業でも扱える。Fig. 7にはSI型ファイバどうしで、コア径 0.68mm と 0.7mm のファイバを接続した際の伝送損失を示した。7.5%の伝送損失となり、5mのSI型ファイバにビーム入射した際の伝送損失7%と比べ大きな差はなく、ほとんどファイバ面の反射損失のみである。

以上により、ファイバの接続は、機械的接続によれば耐光強度の高いSI型ファイバの接続が

Fig. 6 Mechanical optical fiber connecting system without lens system.

Fig. 7 Transmission loss in mechanical optical fiber connecting system.

可能で、伝送損失が少ない上に、接続が容易であることが示された。

3.3 出射ビームの強度分布

ビーム強度解析は、ファイバの耐光強度が高く、実用上有利なSI型ファイバにつき実施した。その手法は、ビーム強度を考慮した光線追跡をファイバ内部で行うものでFig. 8に解析手法を示した。ファイバのコア、クラッド界面 π に囲まれた空間の点 P_i を始点として進む i 回反射反射後の光線を C_i とすると

$$C_i = (P_i, \nu_i, a_i)$$

と表せる。ここで

P_i : 点 P_i の位置ベクトル

ν_i : 光線 C_i の方向ベクトル

a_i : 光の強度

従って、次の反射光線 C_{i+1} が C_i の成分で表すことができると光線を次々に追跡してゆくことができる。 C_{i+1} と C_i との間には、下式が成立する。

$$P_{i+1} = P_i + a_i \nu_i \quad (2)$$

$$\nu_{i+1} = -2(\nu_i \cdot n_j) \cdot n_j + \nu_i \quad (3)$$

$$a_{i+1} = R a_i \quad (4)$$

また $P_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ とすると

$$x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 = r^2 \quad (5)$$

ここで

n_j : コア、グラッド界面 π 上点 P_{i+1} での法線ベクトル

R : 反射率

r : ファイバコアの半径

以上より、反射光線 C_{i+1} を次々に求め、ファイバ出射面でのビーム強度を計算できる。

また、ファイバの出射ビーム強度分布は、ファイバ出射面より0.05 mm離れた地点での強度分布を計測した。計測に用いたファイバはコア径0.68, 0.7 mmの2本のSI型ファイバである。Fig. 9にコア径0.7 mmのSI型ファイバの出射強度分布をファイバ端面位置に応じて計測した結果を示した。同図でファイバ中央のC-C'線上からの強度分布では、ビーム中央部で強度の高い部分が生じている。またコア径0.68 mmのファイバでも同様な結果が得られた。

Fig. 8 Ray tracing method in step index type optical fiber.

Fig. 9 Lateral distribution of beam intensity in step index type optical fiber.

4. 各種加工用光学系

4.1 溶接用光学系

溶接用光学系には、キーホール溶接となるのに十分小さい集光光束径が得られることが要求される。そこで、光学系に対する空間的制約を考えずに、極力集光光束が小さくなる結像倍率0.375の光学系を製作した。溶込み深さは、特定のパワー密度以上を確保することにより深くなり、その断面形状からキーホール溶接に必要な集光光束径はkW級で0.6 mm程度であることがわかった。また、ファイバ伝送の優位性を生かせる小型溶接用光学系として、レンズの口径が10 mm度を想定した。この条件と前述の集光光束径0.6 mmを満足する溶接用光学系を検討した。ファイバは耐光強度の高いSI型ファイバで、そのコア径は0.7 mm, NAは0.2である。以上の条件により、バックフォーカスのできるだけ長い(17.4 mm)4枚の組み合わせ

Fig. 10 Small condensing lens system for welding.

レンズから成る Fig. 10に示す結像倍率の0.867の光学系を製作した。

4.2 表面処理用光学系

種々の表面処理用光学系のうち安価で構造が簡単なカライドスコープ(万華鏡)¹³⁾について述べる。カライドスコープは、4枚の帯状反射鏡により構成され、入射ビームは管内で多重反射を繰り返す、ビームは矩形状に均一化され、出射する。この出射ビームをレンズ系でワーク面に結像し、表面処理に利用する。

カライドスコープでも既述のビーム強度を考慮した光学追跡により、ビーム強度分布を求めることができる。その方法をFig. 11に示す。カライドスコープ中の点 P_i を始点として進む i 回反射後の反射光線 C_i 、及び、反射平面 π_j を各々

$$C_i = (P_i, \nu_i, a_i), \pi_j = (Q_j, n_j)$$

ここで、 P_i ; 点 P_i の位置ベクトル, ν_i ; 光線 C_i の方向ベクトル, a_i ; 光の強度, Q_j ; Q_j の位置ベクトル, n_j ; 反射平面 π_j の法線ベクトルとすると、 π_j に対する反射光線 C_{i+1} は

$$C_{i+1} = (P_{i+1}, \nu_{i+1}, a_{i+1})$$

で表され、その各々の成分は次式となる。

$$P_{i+1} = P_i + ((Q_j - P_i) \cdot n_j) \nu_i / (\nu_i \cdot n_j) \quad (6)$$

$$\nu_{i+1} = -2(\nu_i \cdot n_j) \cdot \nu_i \quad (7)$$

$$a_{i+1} = R a_i \quad (8)$$

計算では、反射率 $R=1$ としてカライドスコー

プ内の光の散乱, 吸収は無視した。

本解析により, 入射ビームに対するビーム均一化状況を調査した結果をFig. 11, Fig. 12に示す。Fig. 11は解析結果で, カライドスコープ口寸法を2 mmとして, 長さを25 mmとすることにより, 十分均一化したビームが得られる。

Fig. 12には, カライドスコープの結像倍率を調整することにより, 種々の矩形ビーム寸法を作り, そのビーム強度分布とアクリルバーンパターンを調べた結果をまとめたものである。この図より, ビームが完全に矩形状に整形されていることがわかる。

4.3 耐熱金属ミラー

ファイバ伝送によるYAGレーザー加工プロセスでは, 狭隘箇所へ適用する用途が多いことから, そこで用いられるミラーも堅牢性が要求されるとともに, 水冷なしに利用する機会が多くなる。そこでミラー自体が高温となっても十分な反射率を確保できる金属ミラーが必要となる。Fig. 13にはこのために開発した金属ミラーの外観を示す。このミラー面には, ミラーコーティング物質の高温での相互拡散を防止するためのバリアブルコートと, 誘電体多層膜による高反射率化コートが成されている。Fig. 14にミラー温度とその際の反射出力を示している。本ミラーはほぼ99%の反射率を維持している。

5. 加工への適用

5.1 溶接への適用

ファイバ伝送による高出力YAGレーザー溶接の実用例として, 原子力プラント蒸気発生器伝熱管の補修溶接¹⁴⁾がある。この溶接はFig. 15に示す蒸気発生器伝熱管の損傷部に内径約17 mmのスリーブを挿入し, この内面から2ヵ所を重ね溶接するもので, 狭隘かつ放射能雰囲気での溶接であることから, ファイバ伝送によるYAGレーザー溶接が必要不可欠な溶接手法であった。

このシステムでは炉の格納容器の外に設置されたコンテナ内の2kWYAGレーザーより発

振されたビームは200mのコア径0.55 mmのGI型ファイバあるいはコア径0.6 mmのSI型ファイバにより炉の格納容器内に伝送される。こ

Fig. 11 Vector notation in ray tracing at kaleidoscope surface.

Composition of the YAG laser kaleidoscope and its beam uniforming states against the kaleidoscope length.

Beam size (mm)	Profile measured	Acryl burn pattern
2 × 2		
4 × 4		
6 × 6		

Fig. 12 Comparison between measured profile and acryl burn pattern in uniformed beam shape.

Fig. 13 Appearance of high power YAG laser metal mirror.

Fig. 14 Performance of metal mirror in heating up condition.

で25 mのSI型ファイバに接続され、溶接工具の先端までビーム伝送される。伝送されたビームは外形12 mmの4枚の組み合わせレンズにより集光されつつ、小型金属ミラーで反射され、溶接が行われる。溶接は、ミラーと2枚のレンズ部が回転することにより行われ、溶接状況をインプロセスでモニタリングする手法が実用化されており、光学系の劣化状況や、溶接の安定性がたえずモニタされている¹⁵⁾。Fig. 16には、溶接に用いた工具の構成を示した。

現在までに約4万本のスリーブの溶接が実施され、原子力プラントの信頼性向上に大きく寄与している。

Fig. 15 Outline of laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plant.

Fig. 16 Configuration of laser welding tool and its appearance.

5.2 穴あけへの適用

400 WクラスのパルスYAGレーザー発振器の穴あけへの実用例として、産業用ガスタービンのタービン翼冷却穴の穴あけがある¹⁶⁾。これは、従来放電加工で実施していたのに対し、その工数低減を目的に実用化された。穴あけには、品質の良いビームを利用するため、小型な発振器をNCに搭載したミラー伝送によるビームを集光し、加工に用いている。ここでは、ビームを円運動させ、Fig. 17に示すような穴径1.2 mm程度の穴あけを実施する。Fig. 17に加工システムの外観を示すが、タービン翼はパレットチェンジャーシステムにより搬送され、次々と穴あけ加工が行われる。この手法により従来の約6倍の能率向上が図れた。

Fig. 17 Turbine blades drilling system.

5.3 表面処理への適用

5.3.1 レーザー焼入れ

カライドスコープの適用例をFig. 18に示す。これは1kW級YAGレーザーによるパイプの表面硬化状況を示したものである。Fig. 19は、マルテンサイト系ステンレス光の丸棒にスパイラル状の焼入れを行うもので、その断面マクロを示す。この図から焼入れ状況は終始安定していることがわかる。

5.3.2 レーザークラッディング

Fig. 20は1kWクラスのYAGレーザーを用いて、パイプ内面からのレーザークラッディングを

Fig. 18 Laser hardening condition by YAG laser kaleidoscope.

Fig. 19 Macro section of laser hardening parts.

Fig. 20 Configuration of laser cladding tool from inside the tubes.

Fig. 21 Appearance of laser cladding parts which inner diameter is 30 mm.

実施した際の先端工具を示している。光ファイバによって伝送されたビームの集光部付近に、2重ノズルの外側から、粉末状のクラディング材料を自動送給する手法で施工を行っている。

Fig. 21には内径30 mm SUS304の管内面より高Cr, Fe基の硬化材料をクラディングした例を示す。約2 mmの厚さの良好なクラッド層が得られている。

6. まとめ

ここでは高出力YAGレーザー加工の基礎的な検討と、実用例を紹介してきた。資料の前半では光の取扱い方を中心に示したが、これはレーザー加工では実用化するエンドユーザが、プロセスに適した光学系を開発することがひじょうに重要であると考えたからである。(実際には、そのプロセスに適した発振器をメーカーとともに開発できればさらによい結果が得られる。)またレーザー加工機は通常のNCを扱うのとは異なり、まだまだビームの安定性に不安があることを認識して利用することが必要である。

今後のYAGレーザーはさらに高出力化が進み、5kWクラスまでの実用化が検討され、ファイバを利用したフレキシブルな加工への展開がますます進むと考えられる。また、ビーム品質のよいkW級スラブレザー、ダイオード励起のYAGレーザーが商品化される時期も近いことから、YAGレーザーの中でもプロセスに応じた発振器の使い分けが進んでゆくことと考えられる。いずれにせよ、レーザー加工技術の発展には、従来プロセスにとらわれ過ぎないこと、発振器メーカーユーザが協力し、プロセス開発に

対応してゆくことが必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 野田：“連続冷間圧延ラインにおける高出力レーザー溶接機，レーザー加工機の最新技術”，レーザー熱加工研究会編，ISBN: 4-9900098-3-5, pp.387-391.
- 2) 折井：エキシマレーザーによる多層セラミック基板の配線の切断，第28回レーザー熱加工研究会論文集，'93.7, pp.203-210.
- 3) T.Yamada, et al. : *Multi-kW Continuously-pumped Nd: YAG Laser*, CLEO-88 Proceedings.
- 4) K.Okino, et al.: *1.8kW CW Nd: YAG Laser application*, ICALEO-89 Proceedings., p.26.
- 5) 住友金属鉱山製品カタログ，HIGH POWER LASER HPL-1100RP.
- 6) HOYA製品カタログ，L741スラブレザー。
- 7) *Laser Focus World*, 28 August 1992, p.9.
- 8) 菅原：レーザー研究 16 (1988) 119.
- 9) Y.Myoi, et al. : CLEO '86 (1986) WJ4.
- 10) H.A.Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, Adams Hilger Ltd. London (1969).
- 11) 久保田：波動光学，岩波書店。
- 12) T.Ishide et al., : *Proceedings of the High-Power Solid State Lasers and Applications*, SPIE 1277 (1990) ECO-3, p.188.
- 13) T.Ishide et al. : *Proceedings the 4th European Conference on Laser Treatment of Materials*, ECLAT '92 (1992) 57.
- 14) A.Yokoyama et al. : *Proceedings of the 5th International Symposium of the Japan Welding Society* (1990) 5WS, p.29.
- 15) T.Ishide et al. : *Proceedings the 4th European Conference on Laser Treatment of Materials*, ECLAT '92 (1992) 81.
- 16) 光斎他：YAGレーザーによる産業用ガスタービンブレードの穴あけ加工，第29回レーザー熱加工研究会論文集，ISBN: 4-9900098-5-1, p.85.