

プローブレザービームと YAG レーザ誘起 プルームとの相互作用の可視化

川人洋介*, 木下圭介*, 片山聖二*, 坪田秀峰**, 石出孝**

Visualization of Interaction between Probe Laser Beam and Nd:YAG-Laser-Induced Plume

KAWAHITO Yousuke, KINOSHITA Keisuke, KATAYAMA Seiji, TSUBOTA Shyuhō and ISHIDE Takashi

*大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

**三菱重工株式会社 高砂研究所 (〒676-6838 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)
kawahito@jwri.osaka-u.ac.jp

(原稿受付 2005 年 10 月 21 日)

This study was performed with the objective of obtaining a fundamental knowledge of the interaction between a YAG laser-induced plume and a probe laser such as a fiber laser beam. The interactions were investigated by the power meter measurement and the 10,000 F/s high-speed observation of the spot behavior or brightness of the fiber laser beam ($\lambda:1,090$ nm) which passed vertically through the plume induced during bead-on-plate welding of 8 mm thick SUS 304 plate with 1.5 kW Nd:YAG laser beam ($\lambda:1,064$ nm). The plume was recognized to be a non-ionized metal vapor by spectroscopy. The high-speed observations revealed that a 100 μ s-rapid movement and a brightness decrease of the fiber laser spot during welding were caused at random by not only the existence of a laser-induced plume but also the density difference between the plume and shielding gas. The rapid spot movement and the lower brightness indicated the refraction due to density difference and the attenuation by Rayleigh scattering, respectively. The maximum refraction and attenuation were 1.36 milli-radian and 4.3 percentages on the average, which were lower in comparison with the other laser beam parameters such as the divergence or the variation of high power laser beams. Consequently, the near-infrared laser beams were recognized to deliver desirable wavelengths with the slight interaction against the laser-induced plume.

Keywords: a fiber laser beam, laser-induced plume, refraction, attenuation, austenitic stainless steel

1. 緒 言

集光されたレーザービームは、照射部に高パワー密度を実現し、金属材料を溶融・蒸発させ、蒸気反跳力によりキーホールを形成し、深溶込み溶接を可能にする。たとえば、連続発振の YAG レーザによる溶接では、パワー密度が 10^8 から 10^{10} W/m² に達し、その蒸気反跳力が溶融部にキーホールを形成し、深溶込みの溶接継手が得られる。その際、金属蒸気は、入射レーザービームに向かってレーザー誘起プルーム/プラズマとして噴出する。10 μ m 帯の波長を有する炭酸ガスレーザー溶接の場合、レーザービームとプルーム/プラズマが相互作用し、逆制動放射およびプラズマ振動による入射レーザービームの吸収が起こり、溶込み深さが浅くなることが知られている^{1,2)}。近年、重工業・自動車産業などで実用化されている YAG レーザや、高ビーム品質・高パワー密度化が期待できるファイバーレーザーなどの 1 μ m 帯の近赤外レーザーにおけるプルームとの相互作用は、YAG レーザについて報告されているが³⁻⁷⁾、その相互作用および溶接結果への影響については、十分には明らかにされていない。

そこで本研究では、SUS304 に連続発振型の Nd:YAG レーザビームを照射し、その際に発生するレーザー誘起プルームに対し、ファイバーレーザー (波長: 1,090 nm) をプローブレザービーム (以下、プローブビームと記す.) として、プルームに垂直な方向から照射し、プルーム通過前後のプローブビームスポットの状態変化を高速度観察することで、

パワー密度の低下を引き起こすパワーの減衰およびビームの屈折の有無とその程度に関して調査した。さらに、デフォーカス溶接時における溶融池周辺の YAG レーザ照射部の高速度観察、および本溶接条件下の溶込み深さとプルームとの相関から、レーザービームが鉛直方向からプルームを通過した場合の影響についても検討した。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、厚さ 8 mm の SUS304 で、その化学組成を Table 1 に示す。主に、Fe, Cr, Ni などが含まれている。

本実験で使用した YAG レーザ発振器は、Lumonics 社製の最大出力 4 kW の連続発振型の Nd:YAG レーザであり、Fig. 1 に示すように、溶接ヘッドを鉛直方向から 10 度傾けて、試料表面が焦点位置になるように固定し、Table 2 の溶接条件でビード・オン・プレート溶接を行った。最初に、溶接中のプルームに対し、分解能 0.2 nm、計測スポット径 ϕ 0.5 mm の分光器 (浜松フォトニクス製: PMA-50) を使い、照射部から高さ 5 mm の位置でのプルームの発光分光分析を行い、プルームの電離状態を調べた。次に、プルームに対して広がり角が 0.3 mrad と非常に小さく、最大出力 100 W の連続発振型ファイバーレーザー (SPI 製: SP-100C)

Table 1 Chemical composition of SUS 304 used.

Chemical composition (Mass %)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.05	0.47	0.97	0.03	0.003	8.03	18.02	Bal.

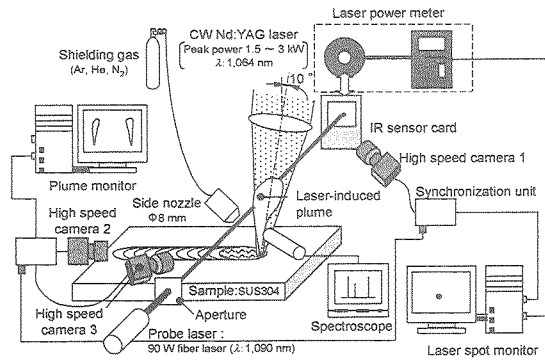


Fig. 1 Schematic experimental set-up of high-speed observation and measurement system for interaction between probe laser beam and laser-induced plume.

Table 2 Laser welding conditions of bead-on-plate welding for SUS 304.

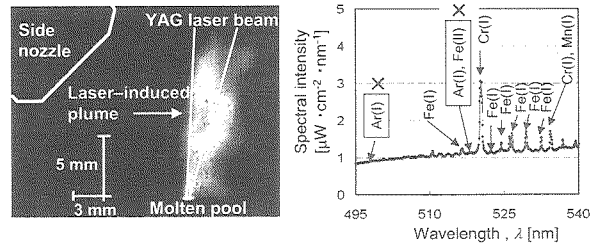
YAG laser power, P_{YAG}	1.5 kW
Focused position, f_d	@ focus
Focal length, f	200 mm
Spot diameter, D_s	600 μm
Welding speed, v	20 mm/s
Shielding gas	Ar
Gas flow rate, R_g	30 l/min

をプローブビームとして、水平方向からブルームを通過させ、2.9 m 離れた場所にて、IR センサカード (SOC 製: IR-1) の蛍光体により、プローブビームスポットを可視化し、高速度カメラ (NAC 製: RX-6) を用い、1,000 F/s で高速度観察を行い、ブルーム通過前後のプローブビームの状態を調べた。さらに、特徴的な現象については、1,090 nm 干渉フィルターを用いて、10,000 F/s での超高速度観察も行った。また、プローブビームの減衰については、ブルームから 0.4 m 離れた場所にて、パワーメータ (OPHR 製: F150A) によるパワー測定を実施した。一方、入射レーザーが、通常の照射の鉛直方向からブルームを通過した場合の相互作用を解明するために、試料をデフォーカス位置に設定し、YAG レーザ照射部で熔融池周辺の未熔融領域に対し、10,000 F/s で反射光の超高速度観察を行い、ブルーム通過後に現れる入射レーザービームとブルームの相互作用を確認した。さらに、溶込み深さとブルームとの相関を調べ、ブルーム通過後の入射レーザービームの影響が、溶込み深さに反映されているのかについても考察した。

3. 実験結果および考察

3.1 YAG レーザ誘起ブルームの特性

試料 SUS304 板に Nd:YAG レーザビームを、Table 2 の溶接条件で照射し、発生したレーザー誘起ブルームの高速度観察静止画像および照射部から 5 mm 上方での分光分析結果を Fig. 2 (a) および (b) に示す。なお、Fig. 2 (b) の横軸は波長 [nm] で、縦軸は強度 [$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$] である。Fig. 2 (a) に示すように、ブルームは、YAG レーザの入射方向に最大 20 mm の高さまで成長し、幅は平均で 5 mm 程度あり、数 kHz の周期で、噴出方向、高さおよび幅を変える挙動を示した。



(a) High-speed observation of laser-induced plume

(b) Spectroscopy of laser-induced plume

Fig. 2 High-speed observation and spectroscopy of 1.5 kW Nd:YAG laser-induced plume under Ar shielding gas.

Fig. 2 (b) から、ブルームの発光スペクトルは、Fe, Cr および Mn の中性線スペクトルが確認されたが、SUS304 の合金元素のイオン化したスペクトル線および Ar の中性線は検出されなかった。これ以外の波長域においても、同様な結果であった。したがって、ブルーム内の金属蒸気はほとんど電離はしておらず、シールドガスの Ar は高温に至っていないことが考えられる。

以上の結果より、本溶接条件下のレーザー誘起ブルームは、高さ 20 mm 以下で、数 kHz の周期で噴出方向、高さおよび幅が変動し、ブルーム内部はほとんど電離しておらず、プラズマ化されていない状態であり、Fe および Cr などの SUS304 の合金成分元素からなる金属蒸気であることがわかった。

3.2 プローブレザービームとレーザー誘起ブルームとの相互作用

3.2.1 ブルーム通過後のプローブレザービームの屈折

レーザービームがレーザー誘起ブルームを通過する際に、相互作用を受けて、パワー密度が低下すれば大きな問題となる。パワー密度の低下は、レーザーパワーの減衰だけでなく、屈折などにより、ビームが広げられても生じる。そこで、ブルーム通過後のプローブビームの状態を詳細に調べようを試みた。具体的には、Table 2 の溶接条件下のブルームに対し、ビーム径 5 mm のファイバーレーザーをアパーチャ径 $D_a=3$ mm のアパーチャに通し、パワー $P_{\text{pro}}=44$ W のプローブビームとして、照射部から高さ h_p が 3 mm の位置を通過させ、IR センサカードで、波長 550 nm の可視光に変換し、1,000 F/s で高速度観察を実施した。その観察結果を Fig. 3 に示す。IR センサカード上で可視化されたスポット形状は、プローブレザービーム径よりも小さい $\phi 2$ mm の円形で、レーザー照射前とほぼ同様な形状で、輝度の低下とスポットの移動が観測された。また、スポットの移動は、観測レートの 1 ms 間隔ではランダムに発生していた。輝度の低下に関しては、プローブビームに対するブルームの散乱や吸収などが考えられ、3.2.3 以降で詳細に検討する。ここでは、スポット移動に関して検討する。スポット形状がほぼ保た

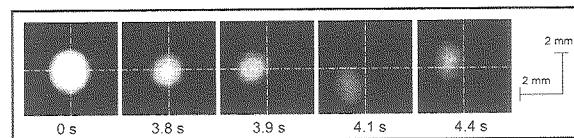


Fig. 3 1,000 F/s high-speed observation of rapid behavior of visualized fiber laser beam spot.

れているので、スポットの移動は、輝度の重心位置の変化から対応できるものと考え、輝度重心位置の変化を調べた。その結果を Fig. 4 に示す。横軸と縦軸は、輝度重心の位置の x, y 座標 [mm] で、原点がレーザ照射前の輝度重心の位置である。なお、この重心位置の移動は、レーザ照射開始から 5 s 間に、1,000 F/s で観察した Fig. 3 に示すような画像を基に算出した。輝度重心の位置は、かなり広範囲に分布し、分布の中心は、原点ではなく、シールドガス側にわずかに偏った位置である。これについては、シールドガスとプラームの密度差がプローブビームになんらかの影響を与えたと考えられる。詳細については、3.2.2 で取り扱う。したがって、レーザ誘起プラームの発生中に、プローブビームは曲げられることが明確になった。

次に、スポット移動とプラームとの関連性を検討するために、プローブビームの通過高さ h_p を 10 と 20 mm の位置でも同様な検討を行った。但し、スポットの移動量を、プローブビームの曲がり換算して評価するために、輝度重心の原点からの距離 D_{spot} を、プラームと IR センサカードとの距離 $L=2.9$ m で割った値 (以下、プローブビームの屈折角 θ と記す。) を計算し、それで評価することにした。その結果を Fig. 5 に示す。横軸はプローブビームのプラーム通過高さ h_p [mm] で、縦軸は屈折角 θ [mrad] である。屈折角 θ の最大値は、 $h_p=20$ mm で $\theta=1.2$ mrad であったが、その位置の屈折角 θ の時間平均 θ_{ave} は、0.26 mrad で、 θ に比べ 4 分の 1 以下と小さい値であり、 $h_p=10$ mm の $\theta_{ave}=0.4$ mrad の方が大きかった。これは、 $h_p=20$ mm の位置がプラームの先端部に位置し、プラームの有無によって突発的な強い影響を受けやすく、 $h_p=10$ mm の位置がプラームほぼ中央部に位置し、安定したプローブビームへの影響が反映した結果であると考えられる。

さらに、パワー P_{YAG} あるいは溶接速度 v を変えて、 $h_p=10$

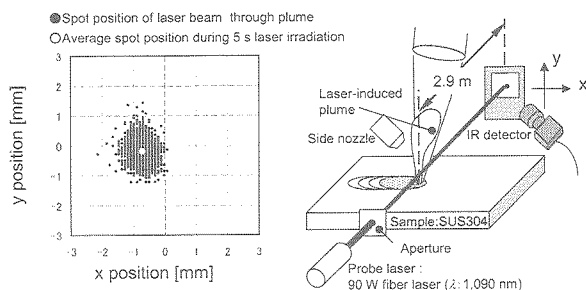


Fig. 4 Visualized spot distribution of fiber laser beam passed through YAG laser-induced plume under Ar shielding gas.

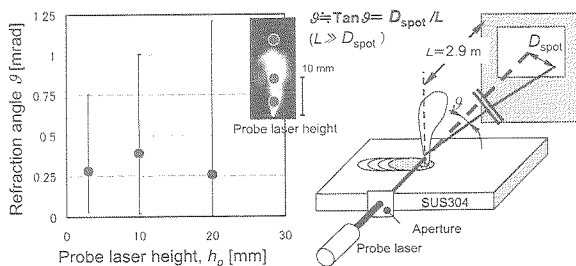


Fig. 5 Refraction angle at each probe laser height.

mm の位置での屈折角 θ を調査した。その結果を Fig. 6 に示す。具体的溶接条件は、 $P_{YAG}=1.5, 2$ および 3 kW, あるいは $v=8, 20$ および 50 mm/s で、その他は Table 2 の条件である。縦軸は屈折角 θ で、Fig. 6 (a) と (b) の横軸はパワー P_{YAG} [kW] と溶接速度 v [mm/s] である。パワー P_{YAG} の増加に関しては、プラームの 2 倍程度の成長に対し、屈折角 θ は増加したが、その時間平均 θ_{ave} の伸びは僅かであった。 θ と θ_{ave} の最大値は、それぞれ 1.25 と 0.43 mrad であった。さらに、溶接速度 v に関しては、半分以下の溶接速度低下によって、プラームの揺らぎが増加し、屈折角 θ も増加したが、その時間平均 θ_{ave} には大きな変化はなく、 θ と θ_{ave} の最大値は、それぞれ 1.36 と 0.45 mrad であった。したがって、 $h_p=10$ mm での屈折角 θ およびその時間平均 θ_{ave} は、パワー増加によるプラームサイズの 2 倍程度の増加や、溶接速度変化によるプラームの揺らぎの変化が、本溶接条件下での影響としては顕著でないことが判明した。

以上のことから、本溶接条件下では、レーザ誘起プラーム発生中に、プローブビームが曲げられる現象が観測された。そのプローブビームの曲げられ方は、時間的にランダムで、空間的には広がりを持ち、その曲げられ度合を示す屈折角 θ およびその時間平均 θ_{ave} の最大値は、1.36 と 0.45 mrad であった。また、プラームのサイズや挙動による θ と θ_{ave} への影響を調べたところ、パワー増加によるプラームサイズの 2 倍程度の増加や、半分以下の溶接速度低下によるプラームの揺らぎの増加に関して、本溶接条件下での影響としては顕著でないことがわかった。

3.2.2 プローブレザビームの屈折の要因

プラームの発生に伴う、スポット移動の原因について詳細な検討を行った。 $D_a=1$ mm のアパーチャを通しプローブビームを小径化し、 $h_p=10$ mm の位置で、Table 2 の溶接条件下のレーザ照射直後に成長するプラームの先端位置 h_{plume} と輝度重心の距離 D_{spot} との関係求めた。その結果を Fig. 7 に示す。但し、プラームの成長を詳細に観察するために、観察レートを 10,000 F/s と一桁高速化した。その結果、IR センサカードによる可視化では損傷しきい値を超えるパワー投入が必要になることが判明したので、直接プローブビームのスポットを、1,090 nm の干渉フィルターを通して観察した。プラーム先端 h_{plume} がプローブビームの

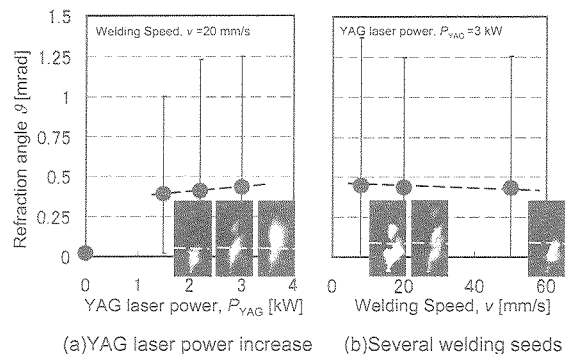


Fig. 6 Refraction angle at 10-mm probe laser height under welding conditions of YAG laser power increase or several welding speed.

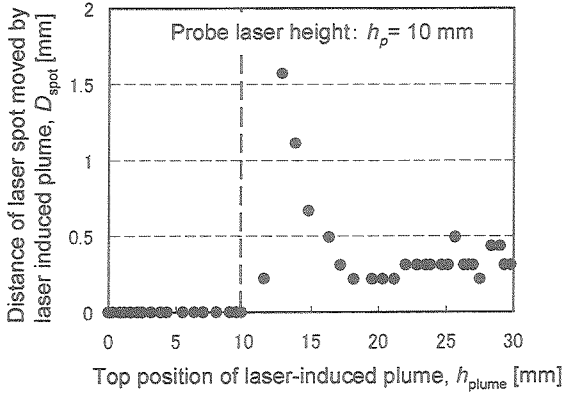


Fig. 7 Typical interaction between probe laser beam and laser-induced plume grown up in initial laser irradiation.

位置 h_p に達した時に、輝度重心の距離 D_{spot} が大きく増加することが明らかになった。この結果、レーザ誘起ブルームがスポット移動と関連することが確かめられた。さらに、その後の典型的なスポット形状とそれに対応するブルーム形状を Fig. 8 に示す。上の写真がスポット像で、下の写真がプローブビームの光軸方向とそれに垂直な方向からのブルームの観測画像である。スポットは、薄くなっているものが観測された。これらのスポットは、Fig. 3 に示した観測では見られない形状であった。この原因については、スポット形状やその輝度の変化が、100 μ s 以上の非常に速い変化であり、先の 1 ms 観察レートでは撮れる現象でなかったためと考えられる。なお、同溶接条件下で、1,000 F/s で干渉フィルターによるスポット観測も実施し、Fig. 3 と同様な傾向であったことは確認している。また、このようなスポットの振る舞いを、異なる波長で観察しても同様な傾向が得られたので、反射光などの別の要因が観測結果に反映していないことも確認している。

Fig. 8 のスポットと対応するブルーム形状との検証を行った結果、ブルームの有無は、Fig. 7 のようなスポット移動の原因となることは確かめられるが、溶接中のブルーム存在下で、Fig. 1 に示すような異なる 2 方向から見たブルーム形状と比較しても、顕著な相関は見られなかった。これは、ブルームの形状だけでなく、内部状態も含めて反映されているためであると考えられる。

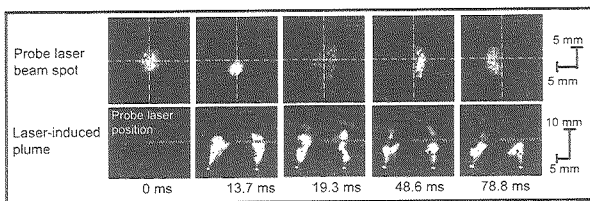


Fig. 8 10,000 F/s high-speed observation of rapid behaviors of fiber laser beam spot and laser-induced plume.
 Right plume image: view from coaxial direction of probe laser beam
 Left plume image: view from direction perpendicular to probe laser beam

また、屈折角 θ の時間平均 θ_{ave} が大きい $h_p=10$ mm 位置が、ガスノズルと近い位置なので、シールドガスの影響を受けている可能性についても検討した。具体的には、シールドガスの種類を He, N_2 に変更して Table 2 の溶接条件でビード・オン・プレート溶接を行い、屈折角 θ の時間平均 θ_{ave} を求めた。その結果を Fig. 9 に示す。参考として $h_p=3$ mm の位置での θ_{ave} も記載しておく。横軸と縦軸は、分子量と屈折角 θ の時間平均 θ_{ave} [mrad] である。 $h_p=10$ mm の位置では、シールドガスの分子量が小さいほど、屈折角が大きくなることが判明した。つまり、ブルームとシールドガスとの密度差が大きいほど、プローブビームは屈折されたことが判明した。よって、ブルームとシールドガスとの密度差も、プローブビームを曲げるのに重要な役割をしており、プローブビームはブルームとシールドガスとの密度境界部で屈折させられたと考えられる。一方、 $h_p=3$ mm の位置では、シールドガスに関わらず、ほぼ一定の値であった。これは、ガスノズルから距離が離れた結果、シールドガスがある程度大気を巻き込み、密度差の影響が低下したことや、 $h_p=3$ mm の位置がブルームの噴出部に近く、10 mm の位置に比べ、Fig. 8 に示すように、プローブビームとブルームとが相互作用する距離が短いため、屈折角 θ の時間平均 θ_{ave} 自体が減少した結果であると推察される。

以上の結果から、本溶接条件下のプローブビームが曲げられる現象には、レーザ誘起ブルームの存在が関係し、100 μ s 以上の非常に速い現象であることがわかった。また、ブルームとシールドガスとの密度差によっても、プローブビームの曲げ(屈折)が生じ、その影響は小さくはないこともわかった。

3.2.3 プルーム通過後のプローブレザービームの減衰

Fig. 3 および Fig. 8 のスポットの観測結果が示すように、プローブビームスポットの輝度が低下する状態が存在することが明らかになった。その輝度低下の程度を調べるため、Table 2 の溶接条件で発生したブルームに対し、 $D_a=3$ mm のアパーチャを通したプローブビームの減衰を、パワーメータで計測した。但し、プローブビームのブルーム通過高さ h_p は、照射部から 3, 10 および 20 mm の高さである。 $h_p=3$ mm のプローブビームのパワー計測結果および各通過高さ h_p での減衰率 A_t を Fig. 10 (a) および (b) に示す。Fig. 10 (a) の横軸が時間 [s] で、レーザ照射開始が 0 s、縦軸はレーザバ

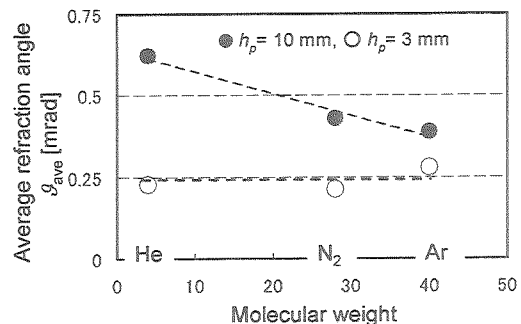
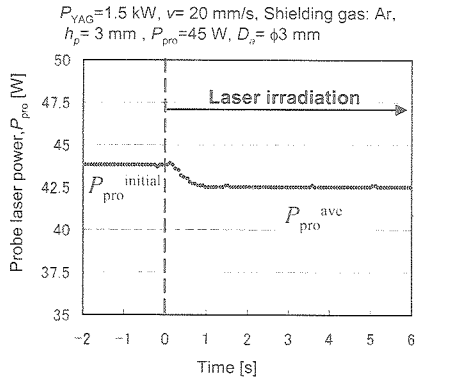
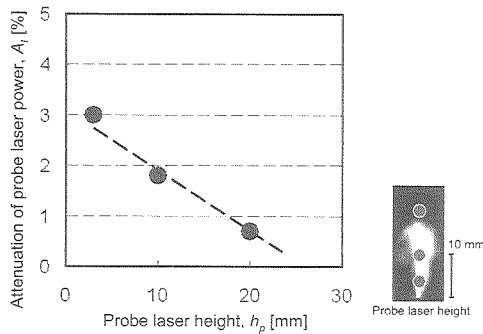


Fig. 9 Relationship between average refraction angle and molecular weight of shielding gas.



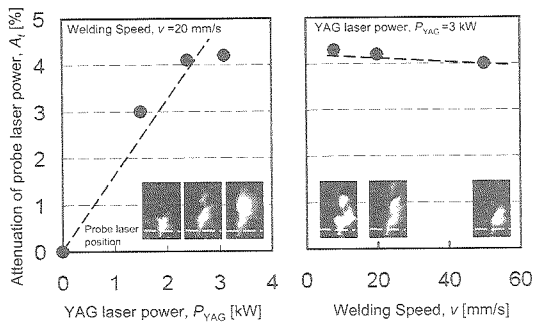
(a) Measurement of Attenuation of probe laser power



(b) Attenuation at each probe laser beam height

Fig. 10 Attenuation measurement of probe laser power and attenuation at each probe laser height.

ワ- [W]である。 Fig. 10 (b)の横軸は、通過高さ h_p [mm]で、縦軸はレーザパワーの減衰率 A_t [%]である。 Fig. 10 (a)から、レーザ照射開始前のプローブビ-ムパワー $P_{pro}^{initial}=44$ W から減衰し、1 s から 5 s までほとんど変わらず、その平均の P_{pro}^{ave} は 42.7 W の値を示し、減衰率 $A_t=(P_{pro}^{initial}-P_{pro}^{ave})/P_{pro}^{initial}$ は 3% であった。各プローブビ-ム通過高さ h_p における減衰率 A_t を計算した結果、Fig. 10 (b)に示すようにブル-ームの先端に近づくにつれて、減衰率 A_t が小さくなる結果となった。さらに、減衰率 A_t が最大となる $h_p=3$ mm の位置での減衰率 A_t を、パワー P_{YAG} あるいは溶接速度 v を変えて調査した。溶接条件としては $P_{YAG}=1.5, 2$ および 3 kW あるいは $v=8, 20$ および 50 mm/s である。結果を Fig. 11 に示す。縦軸は減衰率 A_t [%]で、Fig. 11 (a)および(b)の横軸はパワー P_{YAG} [kW]と溶接速度 v [mm/s]である。パワー P_{YAG} の



(a) YAG laser power increase (b) Several welding seeds

Fig. 11 Attenuation at 3 mm probe laser height on welding conditions of YAG laser power increase or several welding speeds.

増加とともに、ブル-ームサイズが 1.5 倍、2 倍と大きくなり、それに伴い、プローブビ-ムの減衰率 A_t も増加し、最大で 4.2 % になった。さらに、溶接速度 v を半分以下に低下させた場合では、ブル-ームの幅広い揺らぎが観測され、減衰率 A_t は 4.3 % に達した。

以上の結果から、本溶接条件下のプローブビ-ムの減衰率 A_t は、 $h_p=3$ mm の位置で最大となり、3% であった。レーザパワー P_{YAG} を 3 kW まで上げ、さらに、溶接速度 v を半分程度減少させ、ブル-ームのサイズや幅が増加すると、4.3% までパワー減衰が増加することが判明した。また、この値は、高出力レーザのパワー変動 5% と同程度であり、シールドガスでブル-ームをしっかりと除去し、入射レーザビ-ムとブル-ームとの干渉を照射部近傍のみにしなければ、パワーの変動と同程度にはできないことを意味し、シールドガスによるブル-ーム除去は重要であることも再確認できた。

3.2.4 プローブレ-ザビ-ムパワーの減衰の要因

プローブビ-ムのパワー減衰の要因としては、ブル-ームによる散乱や吸収が考えられる。散乱については、散乱体の粒径に応じて λ^{-4} の波長依存性がある Rayleigh 散乱や波長依存性のない Mie 散乱などがある。本溶接条件においても、散乱の種類とその影響について調査を行った。YAG レ-ザ誘起ブル-ームに対して、プローブビ-ムとして、ブル-ーム位置でのビ-ム径 D_{pro} が 1.03 mm の $P_{pro}^{initial}=19.8$ mW の He-Ne レ-ザ ($\lambda: 633$ nm) とビ-ム径 $D_{pro}=1.3$ mm, $P_{pro}^{initial}=15.3$ mW の半導体レーザ ($\lambda: 830$ nm) およびビ-ム径 $D_{pro}=1.47$ mm, $P_{pro}^{initial}=22$ W のファイバレーザ ($\lambda: 1,090$ nm) を使用し、 $h_p=3$ mm 位置を通過させ、各波長のプローブビ-ムの減衰 A_t を求めた。但し、各プローブビ-ム径 D_{pro} が異なるので、減衰 A_t は D_{pro} で除算して規格化した減衰 $A_t^{Dnormal}$ で評価した。その結果を Fig. 12 に示す。横軸は、1,090 nm の波長で規格化し、その値をマイナス 4 乗にした値で、縦軸は $A_t^{Dnormal}$ である。規格化した減衰 $A_t^{Dnormal}$ には、明瞭な λ^{-4} の波長依存性が確認でき、プローブビ-ムの減衰の主な原因は Rayleigh 散乱であると考えられる。

また、ブル-ームによるレーザビ-ムの吸収について検討する。

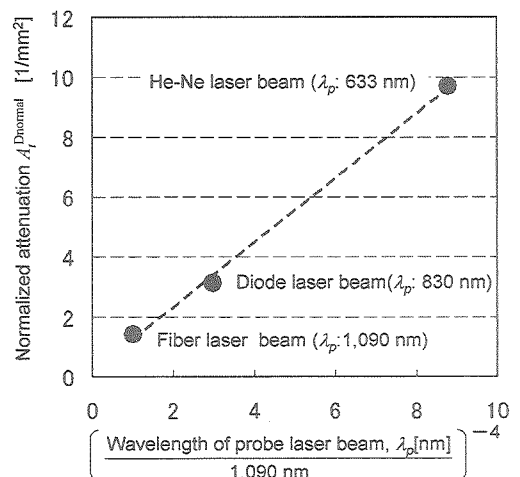


Fig. 12 Scattering of different-wavelength probe laser beam.

3.1 節で述べたようにブルームに電離状態が確認されていないので、プラズマ振動による吸収は発生していないと考えられる。また、熱電子の逆制動放射によるレーザービームの吸収に関しては、 λ^2 の波長依存性があるが、本溶接条件下のブルームの減衰に関する波長依存性は Fig. 12 が示すように明瞭な λ^{-4} の波長依存性を示している。したがって、本溶接条件下では、ブルームによるレーザービームの吸収が顕著に起こっているのではなく、散乱要因が強く反映し、パワー減衰を招いていると考えられ、その散乱は主に Rayleigh 散乱であると推測される。

以上の結果から、本溶接条件下では、プローブビームの減衰要因として、プラズマ振動や熱電子の逆制動放射によるレーザービームの吸収が顕著に起こっているのではなく、散乱（主に Rayleigh 散乱）が強く反映し、パワー減衰を招いていると考えられる。

3.3 ブルーム通過後入射レーザービームの溶接結果への影響

3.2 節の検討においては、水平方向からブルームにプローブビームを入射させた場合、屈折や減衰が存在し、その程度を明らかにした。しかし、実際のレーザー溶接では、入射レーザーは鉛直方向からブルームを通過するので、ここでは、その影響について検討する。具体的には、Fig. 13 に示すような実験構成で、集光レンズから遠ざかる方向に 10 mm デフォーカスした位置に試料表面を設置し、 $P_{YAG}=3$ kW で、その他は Table 2 の条件でビード・オン・プレート溶接を行った。但し、シールドガスは YAG レーザ同軸方向から、10 mm 離れて $\phi 6$ mm のノズルで吹きかけた。レーザー照射後、熔融部周辺でレーザービームが照射されているのが確認できる領域 A（以下、領域 A と記す。）に対して 10,000 F/s で超高速観察を行い、Fig. 8 のようなスポットの移動、形状変化および輝度低下が現れるか観察した。その同期観察結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 の左図が熔融池とブルームの観察画像で、右図が領域 A の YAG レーザ照射

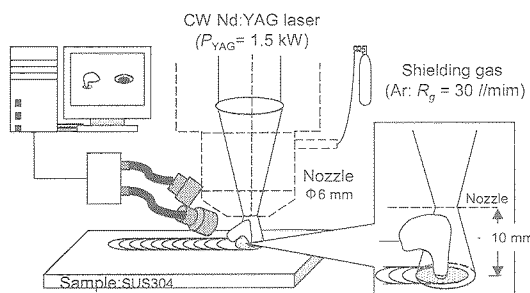


Fig. 13 Schematic experimental set-up of high-speed observation for laser induced plume and area irradiated by YAG laser beam around molten pool at 10-mm defocused height.

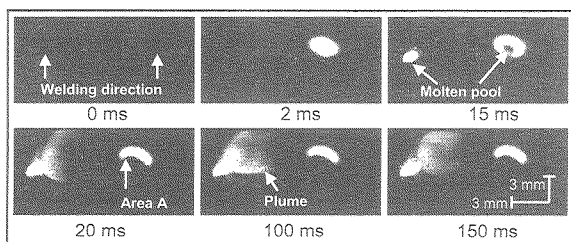


Fig. 14 10,000 F/s high-speed observation of rapid behaviors of laser-induced plume and YAG laser beam spot.

部の画像である。20 ms 以降はブルームの存在が確認でき、入射レーザービームと干渉していると考えられる。そのブルームを通過した入射レーザービームの領域 A での照射部は、溶接中に形状および輝度についても顕著な変化が現れなかった。これは、ビームの曲がり（屈折）について考えると、前節では、ビームの曲がり最大でも 1.36 mrad 程度で、本実験に使用した最大出力 4 kW の Nd:YAG の広がり角 30 mrad 以上と比べると十分小さな値であったので、無視できるほど小さな影響であったためと推察される。一方、輝度に関しては、レーザービームと同軸上のシールドガスの吹き付けで、ブルームと入射レーザービームの干渉が抑えられ、散乱の影響が 3.2 節で検討したような顕在なレベルにならなかったためであると考えられる。

最後に、ブルームを鉛直方向から通過した入射レーザービームが、溶込み深さにその影響が反映されるのかを考察した。まず、本溶接条件下の溶込み深さとブルームのサイズについてまとめた結果を Fig. 15 に示す。上の写真は断面形状で、その断面において白枠で囲われている領域を下のグラフにプロットした。横軸は照射開始点からの距離 L [mm] で、縦軸は 10 ms 間の平均ブルームの高さ h_{plume} および溶込み深さ P_d [mm] である。また、グラフ内の図は、溶接中の湯流れの模式図である。 $L=24$ mm 付近にブルームの高さ h_{plume} が高い点が集まっているところが見受けられる。その位置での溶込み深さ P_d は深くはなく、むしろ溶接方向の後方に深い溶込みが見られる。参考文献⁸⁾によると、Fig. 15 の模式図に示されるように、溶込み深さを形成する上で湯流れが重要な役割をし、その場合、照射位置から溶接方向の後方に 1 mm 前後ずれた位置であることが予想でき、先に述べた位置が、その位置にあたる。これは、Fig. 15 に示すように、ブルームが高く噴出し、その強い蒸発反力が深いキーホールを形成し、強い湯流れが起き、深溶込みが生成されたと考えられる。つまり、高いブルームがある程度存在すると、深溶込みが形成される可能性が高い。よって、高いブルームがある程度存在した状態では、入射レーザービ-

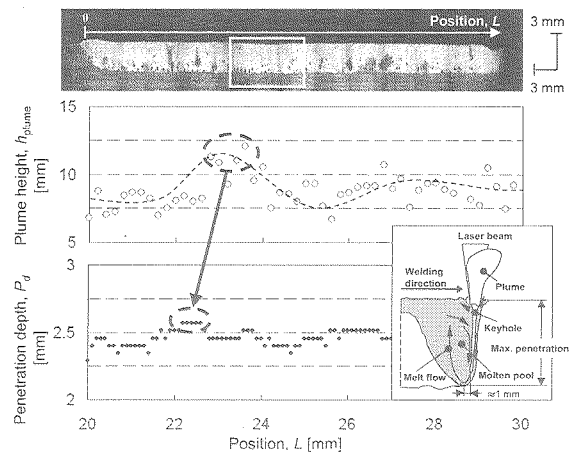


Fig. 15 Experimental result of penetration depth, laser-induced plume behavior and Schematic illustration of liquid flow in molten pool under this welding conditions.

ムに及ぼす影響よりも、高いブルームの発生に伴う蒸発反跳力による深いキーホールを形成する効果の方が、レーザー溶接にとって強い影響となることが考えられる。

以上、本溶接条件下では、入射 YAG レーザビームが鉛直方向から YAG レーザ誘起ブルームを通過した場合には、水平方向からのプローブビーム入射時に計測および観測された屈折や散乱の顕著な影響を受けた形跡は確認できなかった。さらに、高いブルームがある程度存在すると、高いブルームが入射ビームに影響を与えるよりも、深いキーホールを形成させ、強い湯流れを起こし、深溶込みが生成される方に効果が現れることが考えられる。

以上の結果から、YAG レーザやファイバーレーザの波長 $1\ \mu\text{m}$ 帯の近赤外域レーザは、レーザー誘起ブルームによる相互作用が小さく、半導体レーザや炭酸ガスレーザより、レーザー溶接に望ましいと判断される。

4. 結 言

本研究では、ファイバーレーザや Nd:YAG レーザの近赤外域レーザと、SUS304 の板材に 3kW までの Nd:YAG レーザを照射した際のブルームとの相互作用について検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

1) YAG レーザ誘起ブルームの特性については、

- ①本溶接条件下におけるブルームは、YAG レーザの入射方向に最大 20 mm の高さまで成長し、幅は平均で 5 mm 程度あり、数 kHz の周期で、噴出方向、高さおよび幅を変える挙動を示した。
- ②ブルームの発光分光分析の結果、Fe および Cr などの SUS304 の合金成分元素からなる金属蒸気であり、蒸気も Ar ガスもブルーム内部はほとんど電離しておらず、プラズマ化されていない状態であることがわかった。

2) プローブレザビームとレーザー誘起ブルームとの相互作用では、

- ①本溶接条件下では、レーザー誘起ブルーム発生に伴い、プローブビームが曲げられる現象が観測された。そのプローブビームの曲げられ方は、時間的にランダムで、空間的には広がりを持ち、その曲げられ度合を示す屈折角 θ およびその時間平均 θ_{ave} の最大値は、1.36 と 0.45 mrad であった。
- ②本溶接条件下のプローブビームが曲げられる現象には、レーザー誘起ブルーム存在が関係し、100 μs 以上の非常に速い現象であることがわかった。また、ブルームとシールドガスとの密度差によっても、プローブビームの曲げ（屈折）が生じ、その影響は小さくはないこともわかった。
- ③本溶接条件下のプローブビームの減衰率 A は、照射表面からのプローブビーム通過高さ $h_p=3\ \text{mm}$ の位置で最大となり 3% であった。レーザーパワー P_{YAG} を 1.5 kW から 3 kW まで上げ、さらに、溶接速度 v を半分程度減少させ、ブルームのサイズが増加し、その挙動が激しくなると、4.3% のパワー減衰が増加す

ることが判明した。

④プローブビームの減衰要因として、プラズマ振動や熱電子の逆制動放射によるレーザービームの吸収が顕著に起こっているのではなく、散乱（主に Rayleigh 散乱）が強く反映し、パワー減衰を招いていると考えられる。

3) ブルーム通過後入射レーザービームの溶接結果への影響は、

- ①シールドガスの吹き付け下で、入射 YAG レーザビームが鉛直方向から YAG レーザ誘起ブルームを通過した場合には、2) に述べた屈折や散乱の顕著な影響を受けた形跡は確認できなかった。さらに、高いブルームがある程度存在すると、高いブルームが入射ビームに影響を与えるよりも、深いキーホールを形成させ、強い湯流れを起こし、深溶込みが生成される方に効果が現れることが考えられる。
- ②YAG レーザやファイバーレーザの波長 $1\ \mu\text{m}$ 帯の近赤外域レーザは、レーザー誘起ブルームによる相互作用が小さく、半導体レーザや炭酸ガスレーザに比べてレーザー溶接に望ましいと考えられる。

謝 辞

本研究は、エネルギー使用合理化技術戦略的開発実施テーマ「コアードビームによるキーホール内三次元エネルギー投入の最適化」における研究の一環としてなされたものであり、関係各位へ感謝の意を表します。また、本研究遂行にあたり、ご助言とご協力を頂いた、大阪大学接合科学研究水谷正海技官および内藤恭章氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Miyamoto, I.: Fundamentals of laser welding, Proc. of the 26th Laser Materials processing Conference, (1991), 1. (in Japanese)
- 2) Locke, E. V., E. D. Hoag and R. A. Hella: Deep Penetration Welding High-Power CO₂ Lasers, Quantum Electronics, IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. 8-2, (1972), 132.
- 3) Gress, J., P.A.Hilton, C.Y.Barlow and W.M.Steen: Plume Attenuation under High Power Nd:YAG Laser Welding, Proc. ICALEO'02, Sec. C, (2002), (CD).
- 4) Tubota, S., T. Ishide, M. Nayama, Y. Shimokusu and S. Fukumoto: Development of 10 kW Class YAG Laser Welding Technology, Proc. of ICALEO'00, Vol. 89, Sec. C, (2000), 219.
- 5) Matsunawa, A. and T. Ohnawa: Beam-Plume Interaction in Laser Materials Processing. Trans. JWRI, Vol. 20-1, (1991), 66.
- 6) Peeble, H.C. and R. L. Williamson: The Role of the Metal Vapor Plume in Pulsed Nd:YAG laser Welding on Aluminum 1100, Proc. of LAMP'87, (1987), 29.
- 7) Watanabe, T., Y. Yoshida and C. Shimo: Numerical Calculation of Shapes Machined with Pulsed YAG Laser (3rd Report), The Review of Laser Engineering, Vol. 16-5, (1988), 13.
- 8) Katayama, S., N.Seto, M. Mizutani and A.Matsunawa: Formation Mechanism of Porosity in High Power YAG Laser Welding, Proc. of ICALEO'00, Vol. 89, Sec. C, (2000), 16.