

アーク溶接システムにおける放電誘発のためのパルスレーザフォーカシング*

塚本 雅裕**, 村井 健介***, 田中 学**, 茅原 崇****, 阿部 信行**, 中田 一博**, 牛尾 誠夫**

Pulsed Laser Focusing for Triggering Discharge in Arc Welding System*

by TSUKAMOTO Masahiro**, MURAI Kensuke***, TANAKA Manabu**, KAYAHARA Takashi****, ABE Nobuyuki**, NAKATA Kazuhiro** and USHIO Masao**

New methods of triggering arc discharge using a plume and a plasma channel in a tungsten inert gas (TIG) arc welding system were demonstrated. The plume and the plasma channel were produced by pulsed laser focusing on an aluminum alloy plate (anode) under a tungsten rod (cathode). The plume was ejected from the laser focusing spot. The plasma channel was generated by gas breakdown in laser beam path. To avoid oxidation, argon (Ar) or helium (He) gas is usually used to shield the rod and molten metal of the workpiece from air. Therefore, formation of the plume and the plasma channel was performed in Ar or He gas. The disadvantages of the conventional triggering methods that require high-frequency generation, high-voltage pulse, or may cause sticking of the rod to the plate are removed in the new methods. The minimum laser energy required for the triggering using the plume and the plasma channel was investigated. Results in this study indicated that laser energy required for the triggering using the plume in Ar gas was lower than that in He gas and that laser energy required for the triggering using the plasma channel in Ar gas was lower than that using the plume in Ar gas. It was found that plasma channel formed by pulsed laser focusing in Ar gas is preferable for triggering arc discharge in the TIG arc welding system.

Key Words: Pulsed laser, Plume, Plasma channel, Gas breakdown, Arc, Arc discharge, Triggering arc discharge, Arc welding, TIG, Arc starting

1. 緒 言

タングステンイナートガス (TIG) アーク溶接システムにおいて、アークプラズマは、カソード (タングステンロッド) とアノード (溶接材料) の間で作られる¹⁾。確実なアーク放電誘発技術は、アーク溶接を使用する製造プロセスにおいて必要不可欠である。代表的な従来の誘発技術 (法) として高周波法、高電圧法及びタッチスタート法がある。高周波法及び高電圧法は、従来高周波発生器及び直流高電圧発生器によって電極間に存在するガスを電離させることでアーク放電を誘発する²⁾。しかしながら、高周波法は周囲のコンピュータ機器の動作を妨げる可能性があり、高電圧法については高電圧による事故を防ぐための電気回路を電源内に設けている^{2, 3)}。タッチスタート法では、ロッドを溶接材料へ接触するまで下げた後、アークを誘発するためにすばやく引き上げる。本方法は、アーク溶接用電源以外の電源を必要としない。タッチスタート法の利点は、その簡易性である。しかしながら、ロッドを引き上げる際に溶接

材料にロッドの一部 (タングステン) が溶け落ちることがあり、溶接部に悪影響を及ぼす。これはタッチスタート法の欠点である³⁾。

パルスレーザ集光によって形成されるブルームやプラズマチャンネルは、アーク放電を誘発するための電氣的導通路として機能する可能性がある。Fig. 1 (a) 及び 1 (b) にブルーム及びプラズマチャンネル発生のためのレーザ集光方法の概略及びアーク放電誘発のための配置概略図を示す。Fig. 1 (a) 中に示したようにブルームは、レーザを集光し、溶接材料表面におけるレーザ強度がアブレーション閾値強度以上になると、照射面から噴出する⁴⁾。ブルームはイオン化した粒子を含んでいるので、ロッドに到達すれば両電極間の導通路として機能し、アーク放電を誘発する。プラズマチャンネルは、ガス中においてレーザ強度がガスブレイクダウン閾値強度 $I_{th,gb}$ 以上になる場合に、レーザによって電離したガスから構成される電氣的導通路である^{5, 6)}。Fig. 1 (b) が示すようにレーザを集光すると集光点に近づくにつれビーム断面積 S は減少し、集光点を通過すると増加する。従って、集光点に近づくにつれレーザ強度 I_L は増加し、集光点通過後減少する。プラズマチャンネルの長さ l_p は、集光点から $I_{th,gb}$ と同じになる位置までの距離 l_f の2倍の長さになる。レーザビームの直径を D 、1 パルス当たりのエネルギーを E_L 、パルス幅を Δt 、集光レンズの焦点距離を f 、 $I_{th,gb}$ になる時のビーム断面積を $S_{th,gb}$ とすると $I_{th,gb} = E_L (S_{th,gb} \Delta t)^{-1}$ 、 $S_{th,gb} = \pi f^2 (0.5D)^2 l_f^{-2}$ となる。 $l_p = 2l_f$ であるから $l_p = 4\pi^{-0.5} (I_{th,gb} \Delta t)^{-0.5} D^{-1} f E_L^{0.5}$ と表すことができ、 D 、 Δt 及び f が一定の場合、 l_p を電極間距離と同じかそれ以上にするためには、レーザエネルギー E_L を調整

*原稿受付 平成16年10月29日 平成13年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

*** 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

****学 生 員 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 Student Member, Department of Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University

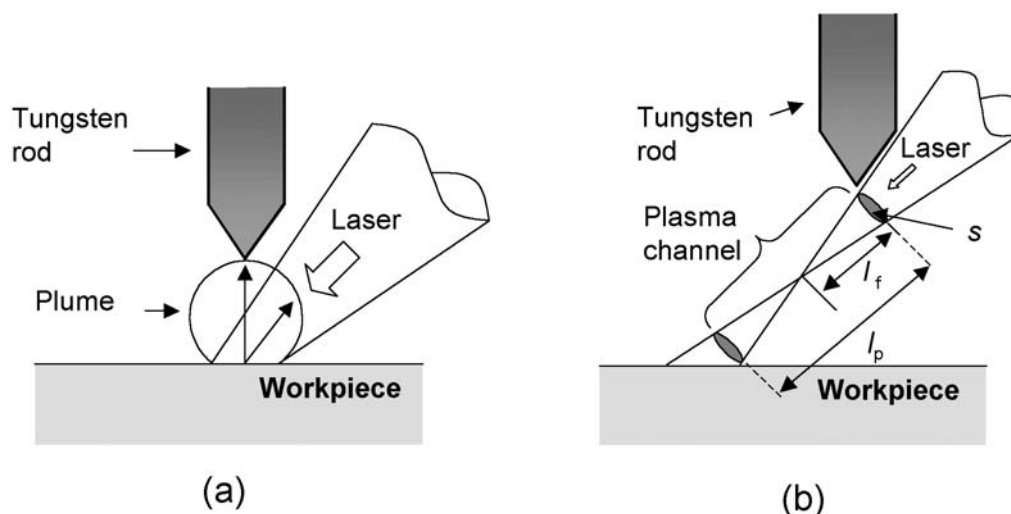


Fig. 1 Principle of triggering arc discharge in the TIG arc welding using (a) a plume and (b) a plasma channel produced by pulsed laser focusing.

する必要がある。溶接材料とロッド間にプラズマチャンネルを形成し、その長さが電極間距離と同じかそれ以上の場合、アーク放電を誘発できる可能性がある。プラズマチャンネルは、すでにレーザー誘起スパークギャップに利用されている⁷⁾。しかしながら、TIG アーク溶接システムにおいてプラズマチャンネルを用いたアーク放電誘発法については報告されていない。

従来法では、溶接材料表面に酸化膜がある場合、放電が誘発されないことがある。酸化膜によって溶接材料表面の抵抗値が増加するためである。大気中においてアルミニウム合金材等の表面では、自然に酸化膜が形成されるので確実にアーク放電を誘発するためには、表面研磨等による酸化膜除去を前処理として行う必要がある。プルームを用いたアーク放電誘発法（プルーム法）では溶接材料表面の酸化膜のレーザーアブレーションが生じることになる。プラズマチャンネルを用いたアーク放電誘発法（プラズマチャンネル法）においてもプラズマチャンネル中を伝播したレーザーにより溶接材料表面のレーザーアブレーションが引き起こされる。つまり、プルーム法及びプラズマチャンネル法では酸化膜除去のための前処理を必要とせずアーク放電を誘発することができる。また、放電誘発の妨げとなっていた酸化膜は、レーザーアブレーションによって、プルーム及びプラズマチャンネルの一部となりアーク放電誘発のために利用される。

本研究では、TIG アーク溶接システムにおいてレーザー集光によって発生したプルーム及びプラズマチャンネルを利用しアーク放電誘発を試みた。両方法には同一のパルスレーザー及び集光システムを用いた。溶接材料としてアルミニウム合金試料をタングステンロッドの下に置き、ロッド下の試料表面にレーザーを集光した。両方法のアーク放電誘発の信頼性は、プルーム及びプラズマチャンネル形成の再現

性に依存している。通常アルゴンやヘリウムガスはロッドおよび溶接材料の溶融部の酸化を防ぐためのシールドガスとして使われている。したがって、プルーム形状はプルームとアルゴンまたはヘリウムガスとの衝突によって決まる。プラズマチャンネル形成については、シールドガス中のレーザーのガスブレイクダウン閾値強度に依存する。ガスブレイクダウン閾値強度は、ヘリウムガス中よりアルゴンガス中の方が小さいことが調べられている⁸⁾。システムとして考えた場合、可能な限り小型のパルスレーザーの使用、つまり最小レーザーエネルギーにおいてアーク放電誘発を実現することが望まれる。本実験では、プルーム法はアルゴン及びヘリウムガス中でそれぞれ行い、プラズマチャンネル法はアルゴンガス中で行った。両方法において両電極間の距離を変え、それぞれの距離におけるアーク放電誘発に必要な最小レーザーエネルギーについて測定し、それぞれの方法の場合について比較した。

2. 実験条件

Fig. 2(a), 2(b), 2(c) 及び 2(d) に実験セットアップの概略図、プルーム及びプラズマチャンネル観測用 CCD カメラの配置概略図及びアーク放電誘発のためのレーザー集光実験配置概略図をそれぞれ示す。アーク溶接システムとして Fig. 2(a) に示しているように最大電流 300A の直流電流型 TIG アーク溶接システムを用いた。プルーム及びプラズマチャンネル発生用のレーザーとしてパルス Nd:YAG レーザ（以下、パルスレーザー）を使用した。本実験ではパルスレーザーによってアーク放電誘発を試みるので、本 TIG アーク溶接システムが有しているアーク放電誘発のための高周波発生回路を取り除いた。陰極には、直径 3.2mm のタングステンロッド、陽極にはアルミニウム合金（AA5083）試料を用

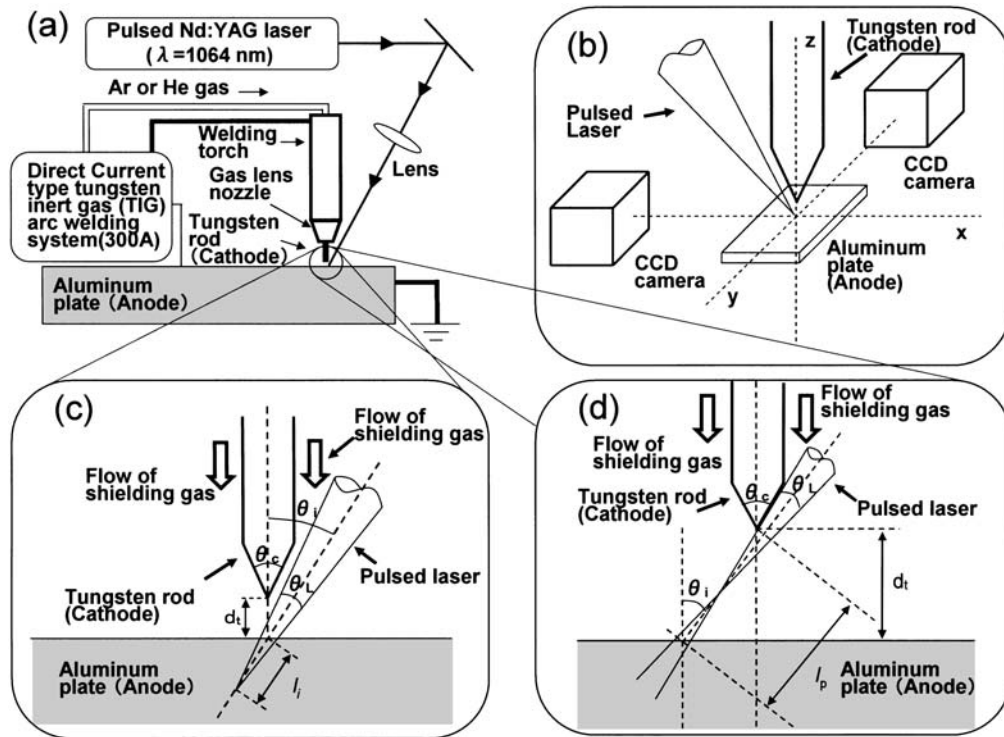


Fig. 2 (a) A schematic diagram of the experimental setup to trigger arc discharge. (b) Two CCD cameras installed perpendicular to the rod to observe the plume and plasma channel formation. (c) The laser focusing onto the Al alloy plate. (d) The laser focusing into Ar gas ejected from the nozzle between the electrodes.

いた。ロッドの先端は円錐型であり60度の角度を有しており、ロッドを保持している溶接トーチは直径 12.7 mm のガスレンズノズルを有している。アーク放電誘発実験時には、電極間には約 60 V の電圧を印加し、アーク電流は 50 A に設定した。シールドガスとして、ブルーム発生実験にはアルゴンまたはヘリウムガス、プラズマチャンネル発生実験にはアルゴンガスを使用した。ガス流量は、10 l/min に設定した。パルスレーザーの波長、パルス幅及びビーム直径はそれぞれ 1064 nm, 7 ns 及び約 8 mm であり、試料には焦点距離 150 mm のレンズを用いレーザーを集光した。本レーザーの繰り返し周波数は、10 Hz であるが、本実験ではアーク放電誘発のためにシングルショット (1パルス照射) を行った。Fig. 2 (b) に示したように二つの観測用 CCD カメラをロッドに対し直行する二方向の軸上に設置した。本 CCD カメラを用い、ブルーム及びプラズマチャンネル形状を観測し、それぞれの再現性を調べた。本観測システムはブルーム及びプラズマチャンネル端がロッド先端部に接触するための位置調整時にも使用した。Fig. 2 (c) 及び 2 (d) 中に示したパルスレーザーの集光角 θ_L は $\theta_L = 2 \tan^{-1}(0.5D/f)$ により与えられる。D および f はそれぞれビーム直径及び集光レンズの焦点距離であり、前述したように D = 8 mm, f = 150 mm であるから θ_L は 3.1° となる。ロッドがパルスレーザー照射されるとアブレーションが起こり損傷を受ける。そこで、ロッドのパルスレーザーアブレーションを回避するためのパルスレ

ザ入射角 θ_i 、ロッド先端角 θ_c 及びパルスレーザー集光角 θ_L は、 $\theta_i > 0.5(\theta_c + \theta_L)$ の関係を満たさなければならない。Fig. 2 (d) に示すようにレーザー光軸と試料表面との交点とロッド先端までの距離、つまりアーク放電誘発に必要なプラズマチャンネルの長さ l_p とロッド先端と試料表面までの距離 d_t は、 $l_p = d_t / \cos \theta_i$ により与えられるので、 θ_i の減少にともない l_p は小さくなり、必要なレーザーエネルギーも低減される。 θ_c 及び θ_L はそれぞれ 60° 及び 3.1° であるから、 θ_i の最小値は 31.5° となる。従って、Fig. 2 (c) 及び 2 (d) にそれぞれ示したブルーム及びプラズマチャンネル発生のためのパルスレーザー入射角 θ_i は、32° に設定した。Fig. 2 (c) に示した焦点と試料表面までの距離 l_1 は、ブルームサイズが最も大きくなる時の条件である 7.7 mm に設定した。Fig. 2 (d) に示した焦点位置は、ロッド先端と試料表面との距離の半分の位置になるように設定した。 d_t は 1.5 mm から 3.5 mm まで 0.5 mm 間隔で変化させ、それぞれの d_t におけるアーク放電誘発のために必要な最小レーザーエネルギーを測定した。真空中におけるブルームを観測するために真空チャンバ内に試料を設置し、Fig. 2 (c) で示した条件下でパルスレーザー照射実験を行った。

3. 実験結果と考察

Fig. 3 (a), 3 (b) 及び 3 (c) はそれぞれレーザーエネルギー 60 mJ の場合の真空、アルゴン及びヘリウムガス下における

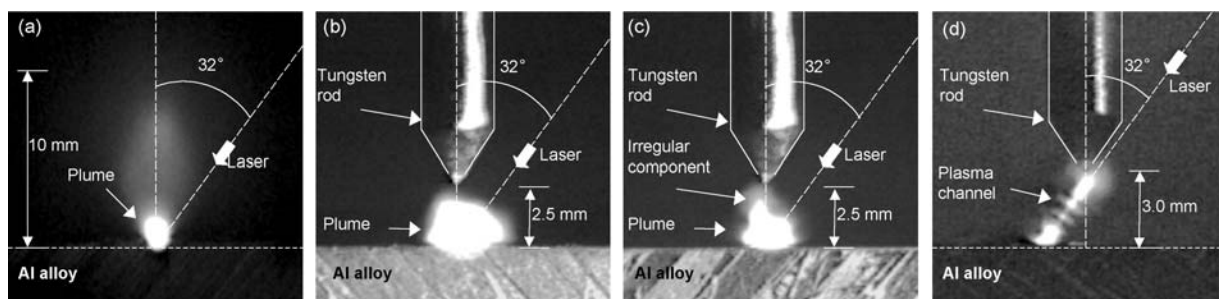


Fig. 3 Optical images of plumes produced by pulsed laser irradiation at the laser energy of 60 mJ in (a) a vacuum, (b) Ar, and (c) He atmospheres, respectively, and (d) a plasma channel in Ar gas produced by pulsed laser focusing at the laser energy of 23 mJ.

典型的なプルーム像, Fig. 3(d)には, アルゴンガス下でレーザーエネルギー 23 mJ の場合に発生したプラズマチャンネル像を示す. Fig. 3(b) 及び Fig. 3(c) が示すように電極間距離は 2.5 mm である. 真空下におけるプルームは Fig. 3(a) からわかるように試料表面から垂直方向に広がり, プルームの長さは 10 mm 以上に達していた. Fig. 3(b) 及び 3(c) はアルゴン及びヘリウムガス下において観測されたプルームであり, それぞれのサイズが真空におけるサイズより小さいことを示している. これらの結果は, プルームの噴出がアルゴン及びヘリウムガスによって妨げられたことを示している. また, ヘリウムガス下におけるプルームの形状がアルゴンガス下の形状と異なり Fig. 3(c) 中に示した不規則に発生する成分を有することがわかる. プルーム観測から, 本不規則成分は, レーザ照射ごとに発生位置及び長さに変化することがわかった. 本不規則成分の挙動は, レーザエネルギー 35 mJ から 135 mJ の範囲においても観測された. しかしながら, Fig. 3(b) から分かるようにアルゴンガス下では, プルームは不規則に発生する成分を有することはなかった. 35 mJ から 135 mJ のレーザーエネルギー範囲におけるレーザー照射実験においてもアルゴンガス下では, 不規則成分は観測されなかった. 以上の観測結果は, ヘリウムガス下ではプルームとガスとの衝突現象が不安定であることを示している. アルゴンガス下では観測されなかったことからガスの密度あるいはイオン化ポテンシャルの違い⁹⁾によって衝突現象に差異が生じたものと考えられる. これらの現象の解明には, 詳細な理論的解析及び本不規則成分形成の時間分解測定を含む実験的研究が必要となる. また, レーザエネルギーが増加するにつれてアルゴンまたはヘリウムガス下におけるプルームサイズは増加した. したがって, 電極間距離を増加させる際, アーク放電誘発のためにレーザーエネルギーの増加が必要となる.

Fig. 4 に電極間距離に対するアルゴン及びヘリウムガス下におけるプルーム法及びアルゴンガス下におけるプラズマチャンネル法に要した最小レーザーエネルギーを示す. 電極間距離が増加すると放電に必要な最小レーザーエネルギーは増加することがわかる. Fig. 4 が示すように, プルーム法において, アルゴンガス下では, ヘリウムガス下よりも低い

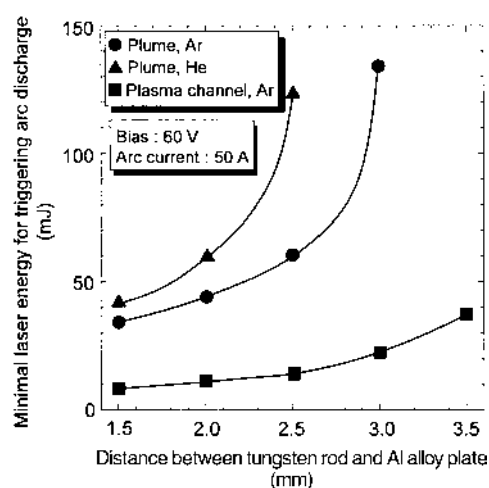


Fig. 4 Minimal laser energies for perfectly triggering arc discharge using plume in Ar (●) and He (▲) atmospheres and using plasma channel in Ar gas (■) as functions of distance between the tungsten rod and the Al alloy plate, respectively.

レーザーエネルギーで放電を誘発することができる. プラズマチャンネル法の場合, アルゴンガス下におけるプルーム法の場合より低いレーザーエネルギーで放電を誘発できることがわかる. ヘリウムガス下では, Fig. 3(c) で示した不規則に発生する成分の形成位置が, レーザ照射ごとに変わるので, 常にプルーム先端がロッドのエッジに到達するとは限らない. 同様な不規則成分の挙動は, 35 mJ から 135 mJ のレーザーエネルギー範囲で観測された. ヘリウムガス下においてもアルゴンガス下と同じ最小レーザーエネルギー時に放電が誘発される場合がある. これはプルームの不規則成分が時折ロッドに到達するためと考えられる. しかしながら確実な放電誘発は得られない. 不規則成分の挙動に左右されず, プルーム全体を導通路とした確実な放電誘発を行うためには Fig. 4 で示したレーザーエネルギーが必要となる. プラズマチャンネルによる放電誘発が Fig. 4 が示したような低いレーザーエネルギーで達成されたことについて考察する. Fig. 3 中の試料を取り除いた場合プラズマチャンネルは観測されなかった. 試料がない場合, アルゴンガス下で長さ 3.6 mm のプラズマチャンネルを発生させるため

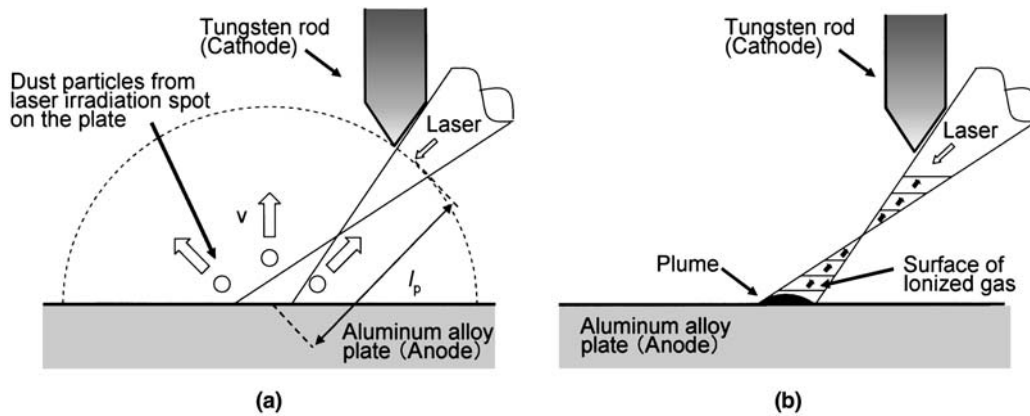


Fig. 5 (a) Reduction of gas breakdown threshold due to dust particles from the laser irradiation spot on the plate. (b) Plasma channel formation due to the ionized gas by a shock wave or the ultraviolet radiation from the laser irradiation spot on the plate.

には 60 mJ 程度のレーザーエネルギーが必要であった。レーザー照射後顕微鏡観察を行った結果、試料上のレーザー照射面にはクラッターが形成されており、これは、レーザー照射によりアブレーションが生じたことを示している。試料を設置することにより長さ 3.6 mm のプラズマチャンネル形成に必要なレーザーエネルギー（閾値）が 60 mJ から 23 mJ に減少した理由としてレーザーアブレーションの有無が関係していることがわかる。はじめに、試料表面のレーザーアブレーション領域から噴出する高速飛行粒子（ダスト粒子）について着目した。この場合、パルス時間内に Fig. 5(a) に示した半径 l_p の半円内にダスト粒子が散在している場合を想定する。ダスト粒子のアブレーション閾値強度は、バルク材表面における閾値強度より低いので、レーザービーム内でダスト粒子のアブレーションが生じプラズマチャンネルが形成される⁸⁾。この場合、パルス幅の初期の時間帯にダスト粒子が形成されたと仮定すると、少なくともパルス幅 $t_L = 7$ ns の間にタングステンロッドに到達していなければならない。この際、必要な速度は $v_p = l_p / t_L$ から導出され $v_p = 5.1 \times 10^5$ m/s となる。試料表面におけるレーザー照射スポットは楕円形で長径が $113 \mu\text{m}$ で短径 $96 \mu\text{m}$ であるからレーザー強度はレーザーエネルギーが 23 mJ の場合 4×10^{14} W/m² になる。レーザー強度 2×10^{15} W/m² におけるレーザー照射面から噴出したアルミニウム粒子の速度は約 1×10^3 m/s である⁹⁾。従って、レーザー強度 4×10^{14} W/m² 時に 100 倍以上の速度である 5.1×10^5 m/s を有するダスト粒子が生成された可能性は低い。よって試料から噴出したダスト粒子がプラズマチャンネル形成閾値を減少させた可能性は低いと考える。他のプラズマチャンネル形成の要因として、レーザー照射面から発生する衝撃波あるいはプルームから放射される紫外線等の高エネルギーフォトンがある¹⁰⁾。衝撃波あるいは高エネルギーフォトンがアルゴンガスを電離し、ガスブレイクダウン閾値低下に寄与している可能性がある。衝撃波あるいは高エネルギーフォトンが関係する場合、Fig. 5(b) に示したようにレーザー光軸上を徐々に集光レンズ方向に向かって電離したガス面が進行し、プラズマチャンネルが形成されることに

なる。これらを確認するためにはプラズマチャンネル形成の時間分解測定を含むより詳細な実験及び解析が必要となる。

4. 結 言

電極間距離 1.5 mm から 3.5 mm の範囲においてパルスレーザー集光によって生成されるプルーム及びプラズマチャンネルを用い TIG アーク溶接システムにおける放電誘発に成功した。プルーム法の場合、ヘリウムガス下よりもアルゴンガス下の方が低エネルギーで放電誘発することができた。アルゴンガス下におけるプラズマチャンネル法の場合、プルーム法の場合よりさらに低いレーザーエネルギーで放電誘発することができた。低レーザーエネルギーで放電誘発システムを構築する場合、プラズマチャンネル法が有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) R.L.O'Brien: Welding Processes (Welding Handbook, 8th ed., vol.2, American Welding Society, (1991), 74.
- 2) R.L.O'Brien: Welding Processes (Welding Handbook, 8th ed., vol.2, American Welding Society, (1991), 91.
- 3) T.Taisaku: Welding Technique (1997), 81. (in Japanese)
- 4) M.von Allmen and A.Blatter: Laser-Beam Interactions with Materials, Springer-Verlag (1995), 39.
- 5) H.T.Buscher, R.G.Tomlinson and E.K.Danon: Physical Review Letters, 15 (1965), 847.
- 6) S.Shimada, S.Uchida, H.Yasuda, S.Motokoshi, C.Yamanaka, D.Wang, Y.Watada, Z.Kawasaki, T.Yamanaka, Y.Ishikubo and M.Adachi: Rev. Laser Eng., 24 (1996), 572-581. (in Japanese)
- 7) A.J.Alcock, M.C.Richardson and K.Leopold: Rev. Sci. Instrum, 41 (1970), 1028-1029.
- 8) M.von Allmen and A.Blatter: Laser-beam interactions with materials, Springer-Verlag (1995), 124.
- 9) T.Yabe: Annual collaboration report of Institute of Laser Engineering, 1996, Institute of Laser Engineering, Osaka University, (1996) 219-220. (in Japanese)
- 10) Yu.P.Raizer: Laser-induced discharge phenomena, Studies in Soviet science, Consultants Bureau (1977), 206.