母材の移動方向が TIG アークの挙動に及ぼす影響*

—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究 (第4報)—

内海 明博**, 松田 純**, 米田 理史**, 勝村 宗英**

Effect of Welding Direction on TIG Arc Behavior*

—Study on High Speed Surface Treatment by Arc with Laser (4th Report)—

by UTSUMI Akihiro**, MATSUDA Jun**, YONEDA Masafumi** and KATSUMURA Munehide**

In the first report, stabilizing effects of a CO₂ laser on a TIG arc behavior were discussed from the point of the arc voltage and of the interaction between the arc and the laser plume.

In this report, the TIG arc behavior was investigated using high speed video images when the traveling direction of the base metal was changed. In this case, the backward direction meant that the moving direction of the base metal was same as the direction of a tungsten electrode, and in the case of the forward direction, the metal moved to the opposite direction. The main experimental conditions were as follows. The TIG arc current, the laser output, the traveling speed of a SUS304 base metal, Ar gas flow rate and the distance between the base metal and a tungsten electrode were 100 A (DCEN), 2 kw, 150 mm/s, 1×10^{-3} m³/s and 15 mm, respectively.

In the case of the backward direction, the bead width was smaller than one which was formed under the same experimental conditions except the traveling direction of the base metal. In this case, the temperature of the base metal remained normal in front of the combined heat source of the laser and the arc, and rose rapidly just before the heat source. In the case of the forward direction, the temperature rose slowly at the far point from the heat source and rapidly at the near point of it. Furthermore, two or three bonds were observed in the beads. On the other hand, it was appeared that anode spots were observed mainly in the area of the laser spot, and sometimes on the bead at the same time using high speed video images.

As a result, the bead width under the backward direction was narrower than the forward one, and the TIG arc melted not only the area around the laser spot on the base metal but also the solidified bead.

Key Words: CO₂ laser, TIG arc, arc stiffness, high speed video images, preheat, arc plasma, laser plume.

1. は じ め に

第1報¹⁾では、母材表面とタングステン電極先端間の距離および母材移動速度をそれぞれ15 mm および150 mm/s とし、TIG アーク単独とCO₂ レーザを併用した場合のアークの挙動について報告した。ここでは、TIG アーク単独ではその挙動が不安定で、母材上に飛び石状の熔融部を形成する条件でも、レーザを併用することによってアークの挙動が安定することを述べた。

また、第2報²⁾では、TIG アークとCO₂ レーザを併用した場合の母材の溶け込み形状について、シールドガス流量を変化させて調べた。その結果、アルゴン流量が 1×10^{-3} m³/s 以上の条件で、最大溶け込み深さおよびビード幅が一定

の良好な表面形状を呈するビードが得られた。また、アルゴン流量を増すと、レーザ単独の場合と比較して、最大溶け込み深さがほぼ同じでビード幅が広がる傾向を認めた。この場合、母材の移動方向を、母材に対して傾斜させた TIG トーチを前進させる方向としたが、母材移動方向を逆にするとその傾向が認められなかった³⁾。この結果は、レーザ・アーク併用熱源を用いて広い面積の母材表面を処理する目的で、母材を往復移動させてビードを何本も並べようとする場合に、往路と復路のビード幅と最大溶け込み深さが異なることを意味する。

本報では、母材の移動方向が異なった場合のアークの挙動を高速ビデオ画像で観察すると共に、母材に吹き付けられるプラズマ気流による温度上昇を調べ、母材の移動方向の違いによってビード幅が異なる原因を考察した。

2. 実 験 方 法³⁾

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。CO₂ レーザ発振装置から導かれた低次マルチモードのレーザビームを、焦点距離が250 mm の ZnSe レンズで集光した。レーザ出力を 2 kW

*原稿受付 平成12年12月27日 平成9年度秋季全国大会、および平成10年9月3日高エネルギービーム加工研究委員会で発表

**正 員 産業技術総合研究所 Member, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST

とし、焦点位置 F は、母材表面から 3 mm 下（焦点はずし距離 $a = -3$ mm）とした。アーク電源は、第 1 報¹⁾で用いたものと同じ装置（垂下特性）とした。母材に対するタングステン電極（以下、電極という）の傾き角 α 、母材-電極間距離 b 、およびレーザー電極間距離 c をそれぞれ 60° 、15.0 mm、および 8.7 mm ($d = 0$ mm) とした。マイクロメータを電極先端部の位置決めに使用したため、Fig. 1 の A 点と B 点とはほぼ一致している。TIG アーク電流値は 100 A とした。アルゴンをシールドガスとし、流量は主に 1.00×10^{-3} m³/s (60 l/min) とした。母材として、 $300 \times 50 \times 5$ (mm) の SUS304 を用い、治具によって駆動台に固定した。母材表

面は実験直前にアセトンで清浄にした。

母材移動方向は、Fig. 1 に図示した方向とし、この場合のアークを後退角アークと称する（以下、後退角の場合という）。なお、母材移動方向が後退角 (Backward direction) と反対の場合を前進角 (Forward direction) の場合という。母材移動速度は 150 mm/s とした。高速度ビデオの撮影条件は、400コマ/s (絞り: 3.5, シャッター速度: 1/10000 s) とし、フィルターは主に ND4 と ND400 を併用した。母材の表面温度を測定する場合には、SUS304 薄板 (板厚 0.3 mm) を用い、熱電対 (タイプ: R) を薄板の裏面に溶接した。この場合、SUS304 薄板の変形の影響を少なくするため、母材移動速度を 200 mm/s とした。

主な実験条件を Table 1 に示す。

3. 実験結果

3.1 ビード形状

Fig. 2 (a) は、CO₂ レーザ（以下、レーザという）と TIG アーク（以下、アークという）を併用し、シールドガス流量（以下、ガス流量という）を 1.00×10^{-3} m³/s とした後退角の場合のビード表面を示す。比較のために前進角の場合を Fig. 2 (b) に示す。母材移動方向以外の条件が全く同じであるにもかかわらず、後退角の場合 (a) のビード幅は、前進角の場合 (b) のそれより狭くなっている。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

Laser power: 2 kW
Defocus distance: -3 mm
Arc current: 100 A (DCEN)
Angle of electrode to base metal: 60°
Base metal-Electrode distance: 15.0 mm
Beam-Electrode distance: 8.7 mm
Ar gas flow rate: 1.00×10^{-3} m ³ /s
Traveling speed: 150 mm/s

Fig. 2 Bead appearances.
(a) Backward direction, (b) Forward direction.

Fig. 3 Macrosections of beads.

Fig. 3にFig. 2と同一条件のビードの断面マクロ写真を例示する。また、参考のため、同一条件のレーザ単独の場合の写真も示した。後退角と前進角の場合を比較すると、ビード幅は大きく異なるが、最大溶け込み深さ（以下溶け込み深さという）はほぼ同じ程度になっている。

Fig. 4は、レーザとアークを併用した後退角の場合のガス流量とビード幅および溶け込み深さとの関係を示す。比較のために前進角の場合も併記した。なお、前進角の場合のアーク現象については、既報^{2,4)}で述べたので、ここでは後退角の場合との比較だけを行う。Fig. 4の結果から、前進角の場合にはガス流量の増加に伴いビード幅が増加することが分かる²⁾。一方、後退角の場合は、ガス流量が増してもビード幅に変化は認められなかった。他方、溶け込み深さについては、若干増加する傾向が認められるが、前進角の場合ほど顕著ではない。

レーザ・アーク併用の場合のアークの挙動は、ビードの断面形状をレーザ単独の場合のそれと比較すると理解しやすい²⁾。そこで、レーザ単独の場合のガス流量とビード幅および溶け込み深さの関係を調べた。Fig. 5にその結果を示す。ガス流量とビード幅との関係は、前進角と後退角との

間に差はなく、いずれの場合のビード幅もガス流量の増加に伴って若干増加する傾向が認められる。一方、ガス流量と溶け込み深さの関係について見ると、ガス流量の増加に伴って溶け込み深さが増している。

ビード幅に関してレーザ・アーク併用およびレーザ単独の場合とをFig. 4とFig. 5とで比較すると、後退角の場合は、アークを併用することによって、レーザ単独の場合よりビード幅が広がるが、前進角の場合ほど顕著でない。一方、溶け込み深さについて比較すると、前進角の場合、アークを併用することにより溶け込み深さが若干増加するのに対して、後退角の場合には、アークを併用しても、レーザ単独の場合と変わらない。

3.2 プルーム長、アーク電圧およびアーク入熱

以上の結果から、レーザ・アーク併用で後退角の場合、ガス流量が増加してもビード幅が変化しないこと、および溶け込み深さが同一条件のレーザ単独の場合と同じであることの2点が、前進角の場合と異なっていることが分かった。この原因が、前進角の場合と同様に、アークの挙動の違いにあると考えられる²⁾。そこで、レーザ・アーク併用の場合のアークの挙動に関連するプルーム長、アーク電圧、およびアーク入熱を調べた。ここで、プルーム長は、高速度ビデオ画像で観測されるプルームの母材表面から上端までの平均距離をいう。

Fig. 6は、ガス流量とプルーム長の関係を示す。ガス流量の増加に伴ってプルーム長が減少する点では、母材移動方向が変わっても同じ傾向を示すが、同一ガス流量でのプルーム長は、後退角の場合の方が小さい。母材移動方向以外の実験条件が同じ場合にプルーム長が小さいのは、熔融池の表面積が小さいことを示唆している²⁾。また、この結果は、母材に到達するレーザのエネルギー量が、前進角の場合よりも後退角の場合の方が大きいことを示している²⁾。

Fig. 7は、ガス流量とアーク電圧、およびアーク入熱との

Fig. 4 Effect of gas flow rate on bead width and penetration depth. (Arc with laser)

Fig. 5 Effect of gas flow rate on bead width and penetration depth. (Laser only)

Fig. 6 Effect of gas flow rate on plume length.

Fig. 7 Effect of gas flow rate on arc voltage and heat input.

関係を示す。ここで、アーク入熱はアーク電流値とアーク電圧値の積から求めた。母材の移動方向に依らず、ガス流量の増加に従い、アーク長が増加し²⁾、アーク電圧は上昇すること、およびアーク入熱も若干増加傾向を示すことが認められる。前進角と後退角の違いについて見ると、アーク入熱に関しては、後退角の場合の方が若干大きい、ガス流量の増加に伴いその差が少なくなっている。他方、アーク電圧は、後退角の場合の方が低い、ガス流量の増加に伴って前進角の場合との差が大きくなっている。

3.3 プラズマ気流による母材の予熱効果

次に、ビード幅等が異なる一因として考えられるプラズマ気流による母材の予熱効果を調べた。前述の条件の場合、SUS304薄板に裏波が形成されるため、熱電対を設置した場所の表面側を溶融池が通過すると、熱電対が断線し、溶接部から離れて落下する。熱電対が断線する時点をレーザ・アーク複合熱源が通過する基準点とした。複合熱源の中央部が熱電対の上を通過しなくても断線することがあるが、この場合には測定温度が低くなるため、熱電対を溶接した部分の中心点を溶融池の中央部が通過した場合のデータだけを採用した。

Fig. 8 は、熱電対が断線する時点を基準として温度変化を測定し、平均値をプロットしたものである。したがって、熱電対が断線する0.1 s 前の温度は、溶融池の位置に対して熱電対が母材の移動方向と逆の方向（以下、溶接方向あるいは溶融池の前方という）に20 mm 離れた位置にあるときの値を示す。この結果から、前進角の場合は、溶融池の前方60 mm ですでにプラズマ気流によって約400 K にまで予熱されていることが分かる。一方、後退角では、40 mm 前方でも常温のままであり、20 mm 前方でも、常温から約410 K の範囲でばらつく程度であった。ここでは200 mm/s で母材を移動させたが、Table 1 記載の条件 (150 mm/s) では、母材表面がより高温に予熱されているものと考えられる。

Fig. 8 Effect of preheating by plasma on temperature of base metal.

3.4 陽極点の挙動

以上に述べた結果から、母材の移動方向によってビード幅等が異なるのは、後退角と前進角の場合とでは陽極点の形成される位置が異なる可能性がある。ちなみに、前進角の場合の陽極点は、レーザによって形成される溶融池を前方・側方に広げる作用をするため、併用の場合の溶融池周辺部に分布していた²⁾。そこで、後退角の場合の陽極点の挙動を高速度ビデオ装置で観察した。

Fig. 9 は、ガス流量を $1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ とした場合の高速度ビデオ画像である。連続した10コマを任意の位置から順に2.5 ms 毎に並べてある。これらの画像から陽極点を確認するのは困難であるが、画像処理をすることによってそれが容易になり、処理画像単独で困難な場合でも、連続した画像の動きからその発生位置を確認することが可能になる²⁾。その結果、図の(b), (d), (g), (h)および(j)では陽極点がそれぞれ2カ所に、またその他の画像では1カ所に発生していることが確認された。陽極点が2カ所に発生する割合は、平均して全画像の約半分であった。この割合は、ガス流量の増加に伴って若干増加する傾向にあった。これらの画像において、アーク柱の明るさの変動は、用いた電源特性による電流値の変動に起因する¹⁾。また、アーク柱中心軸の変動は、主としてガス流が乱流であることに起因する²⁾。

Fig. 9 High-speed video images of arc and laser plume.

Fig. 10 は、Fig. 9 (b)および(h)を画像処理し¹⁾、拡大印刷したものである。図中のAはレーザー単独で形成された場合の溶融池先端部の位置とほぼ同じ点であり、この周辺部に陽極点が定常的に形成されていた。Fig. 10 (b)では、A点から約1.5 mm 離れたB点にも陽極点が存在する。この場合のB点の位置は、ほぼ溶融池の後端部にあたり、母材表面で

Fig. 10 High-speed video images of arc and laser plume.

の直径が約1.2 mm のビーム¹⁾はB点を照射していない。一方、Fig. 10 (h)では、A点から約4.0 mm 離れた位置(B点)に陽極点が認められる。B点は、凝固したビード上にある。(h)のように、A点から1.5 mm 以上離れた点に陽極点が発生する割合は、本実験条件では小さかった。

4. 考 察

Fig. 3 (a)のビード断面組織において複数のボンドが存在すること、および、Fig. 10 の高速度ビデオ画像において陽極点が溶融池またはビード上に分散して分布することから、レーザ・アーク併用で後退角の場合のアークの作用には、次の3 ケースが考えられる。

(1)陽極点が、Fig. 10 のA点近辺、すなわち、レーザ単独の場合に形成される溶融池の溶接方向前方および側方部に分布する場合、アークはビームが形成する溶融池の幅を広げる²⁾。

(2)陽極点が、A点から溶接方向の後方で1.5 mm 以内に形成される場合、すなわち、溶融池表面に分布する場合は、

アークは溶融池を加熱し、その下部にある既に凝固した部分を再溶融させる。

(3)陽極点が、A点から1.5 mm以上離れた所、すなわち、凝固した部分に発生する場合、アークの一部は、プルームを突き抜け、形成されたビード表面の一部を再溶融させる。

上記の3ケースをビードの断面写真 Fig. 3(a)と対応させて以下で考察する。この図では、ボンド B1 以外にビード内にもボンド B2 が認められる。この図の場合の B2 は、ビードの右側では B1 とほぼ同じ位置にあるが、他の断面を観察した結果、B2 が一部 B1 の外側に存在する場合、B3 に近い部分に存在する場合、全く存在しない場合などその形状は一定ではなかった。一方、図の B3 では、ボンド B2 ほど明確ではないが、ボンド B2 からビード表面に向かって成長した結晶粒が B3 で不連続になっている。この B3 も、明確にボンドと分かる場合、形成されない場合など各種のケースが認められた。とくにボンドが明確な場合には、ビード中央部の表面近くに形成されていることが多く、ビード表面に小さな突起を認めた。他方、前進角の場合には、ビード内に明確なボンドが形成されることはなく、Fig. 3(b)に例示したような縞模様がビード内に認められる場合もあるが、この部分で結晶が不連続になる場合は認められなかった²⁾。ケース(1)によって、レーザ単独の場合よりもビード幅が広がることから、このときに形成されるのがボンド B1 であり、ボンド B2 および B3 は、ケース(2)および(3)に該当するものと考えられる。

他方、上記の3ケースを Fig. 10 のビデオ画像と対応させると、レーザ入熱と Fig. 10(b)のA点から母材に流入する電流は、Fig. 3(a)のボンド B1 を形成し、B点からの電流はボンド B2 を形成すると考えられる。すなわち、Fig. 10(b)ではケース(1)と(2)が同時に起こっている。B点で溶融池の中で、発生する場所も、継続する時間もランダムであり、また、B点でのアーク電流値も異なるため、前述したようにボンド2の位置が様々になる。ボンド B1 と B2 を比較すると、A点に流れ込む電流量の方が多いが、B点にもかなりの電流が流れ込んでいるものと考えられるものの、ケース(2)の入熱が B1 のビード幅を大幅に広げることはいとえられる。ただし、陽極点が溶融池の深いところに形成されると、ボンド B2 のように、溶け込み深さがボンド B1 より若干増すものと考えられるが、このような例はまれであった。ケース(3)では、Fig. 10(h)の点Bからの入熱によって Fig. 3(a)のボンド B3 が形成されるが、この入熱は、ボンド B3 による溶融部の断面積が B1 のそれよりかなり小さいことから、B点に流れ込む電流量はA点のそれよりかなり少ないと考えられる。したがって、これがビード幅や溶け込み深さを増す作用をしないことは明らかである。ちなみに、このケース(3)の場合、ビードの表面形状が悪くなる。したがって、ガス流量が増加して(3)のケースが無くなるとビード形状は良好になる。

Fig. 10 において、B点に陽極点が形成されやすくなるの

は、溶融池やまだ冷え切っていないビード上に高温のプラズマが吹き付けられていることが一因であると考えられる。また、高速度ビデオ画像を見る限り、A点にある陽極点がB点に移動するのではなく、突然B点にも発生する。これは、プラズマ気流が溶接方向前方の母材を加熱し、凝固したビードを加熱することのない前進角の場合とは異なった現象である。

レーザ・アーク併用後退角の場合、ガス流量の増加に伴い、プルーム長が減少する(Fig. 6)ことから、母材へのレーザの到達エネルギー量が増加すると考えられる。また、ガス流量の増加に伴い、アーク入熱量も増加した(Fig. 7)。それにもかかわらず、溶け込み深さが若干増加するだけでビード幅は変化しなかった(Fig. 4)。この理由は次のように考えられる。すなわち、ガス流量の増加に伴ってプルーム長が減少することにより、アークは母材の近くでプルームに引き込まれる。アークの屈曲点が電極から離れるほどアークの硬直性が弱まる¹⁾ため、アークがプルームを突き抜ける上記(3)のケースが生じにくくなる。しかし、上記(2)のケースが多発するようになり、アーク入熱が分散することには変わりがない。また、ガス流量の増加に伴うアーク入熱の増加は、アーク長が増した結果生じたものであり、電極から母材に至る間での熱損失の増加を考慮すれば、母材への入熱は計算値よりは小さいものと考えられる。したがって、ガス流量の増加に伴うアーク入熱の増加分は、ケース(1)のビード幅を増加させるほどのエネルギーになっていないことが分かる。また、プルーム長の減少に伴うレーザ入熱の増加は、溶け込み深さを若干増加させる程度であることも分かる。

次に、ガス流量が増加した場合に、溶け込み深さは若干増加するが、同一条件のレーザ単独の場合と同じであったことから、前進角の場合にアーク入熱が溶け込み深さの増加に寄与していなかったが²⁾、レーザ・アーク併用の後退角の場合にも、同じ現象が生じていることが分かる。しかし、レーザ・アーク併用とレーザ単独の場合を同一条件で比較すると、プルーム長は併用の場合の方が大きい。したがって、母材に到達するレーザエネルギー量は少なくなるはずである。一方、併用の場合は、レーザ単独の場合よりもビード幅が若干広い。そのため、レーザ照射部にある溶融池の面積が広がっている。これは、母材のレーザエネルギー吸収率が増加することを示す³⁾。その結果、レーザ・アーク併用とレーザ単独の場合の母材へのレーザ入熱が同程度になり、溶け込み深さも同じになったものと考えられる。

Fig. 7 において、ガス流量が $0.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ から $1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ に増加するのに従って、アーク電圧が上昇している。これは、前進角の場合には、ガス流量の増加に伴ってアーク柱の中心軸の振れ幅が大きくなり、プルーム長が小さくなるが、プルームに回り込む際のアーク経路が不規則に変化するようになり、アーク長の増加すること²⁾が主因である。後退角の場合も、高速度ビデオ画像で同様な現

象が確認された。また、後退角と前進角の場合の電圧を較べると、後退角の方が低くなっている。これは、ガス流量の増加に伴って、前進角の場合にはビード幅が増加するが、後退角の場合には変化しなかったことに対応していると考えられる。すなわち、ガス流量が $0.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ で、ビード幅が同程度のときのアーク電圧はほぼ同じであるが、ガス流量の増加に伴って、後退角のビード幅は変化しないが、前進角の場合には増加した。このため、前進角の場合は、後退角の場合よりも溶接方向の左右に陽極点の移動範囲が広くなり、アーク長の平均値が増加したものと推察される。

一方、Fig. 6とFig. 7でガス流量とプルーム長およびアーク電圧との関係を見ると、ガス流量の増加に伴いプルーム長が減少し、アーク電圧は上昇している。すなわち、母材移動方向が同じなら、プルーム長の小さい方が、アーク電圧は高くなることが分かる。他方、母材移動方向が変わると、プルーム長の小さい後退角の場合の方がアーク電圧は低くなっている。これらの結果から、プルーム長の大小だけでアーク電圧を論じられないことが分かる。そこで、後退角について、レーザ出力を変えてプルーム長を変化させ、アーク電圧の変動を調べた。

Fig. 11は、後退角でガス流量を $1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ とし、レーザ出力だけを変え、アーク電圧とプルーム長との関係を示したものである。ここで、レーザ出力の設定範囲は、アーク電圧の変動範囲が、ガス流量の変化による電圧変動範囲とほぼ同じになるように、 $0.5 \sim 3 \text{ kW}$ とした。この結果も、レーザ出力の増加によってプルーム長が増加し、アーク電圧が減少している。しかし、アーク電圧の変動が $22 \sim 26 \text{ V}$ と、Fig. 7のガス流量の変化に対する変動($21 \sim 24.5 \text{ V}$)よりも若干大きいのにに対し、プルーム長の変動幅は $2 \sim 9 \text{ mm}$ とFig. 6のそれ($7 \sim 8.5 \text{ mm}$)よりプルーム長の小さい側へ大幅に広がっている。この結果は、プルーム長が大きい状態から極端に小さく変化しても、アーク柱の挙動が安定していて、電極の中心軸に沿って直進するならば、アーク電圧の上昇率は極端には大きくはならないことを示して

いる。すなわち、プルーム長とアーク電圧が1対1の対応をしていないことが分かる。ちなみに、ビードが良好な表面形状を呈するのは、レーザ出力が 2 kW 以上のときである。

Table 1の実験条件で、ガス流量を $1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ としてアクリル板にレーザビーム（以下、ビームという）を照射すると、アクリル板表面での溝幅は約 1.2 mm であった。これと比較すると、SUS304鋼板に形成されるレーザ単独の場合のビードの幅は半分程度であり、この実験条件では、母材に吸収されるビームのエネルギー量の少ないことが分かる。前進角の場合、レーザ・アーク併用によって母材のレーザ吸収率が増した²⁾。一方、後退角の場合、ビード幅は、レーザ単独の場合よりも若干増すが、溶け込み深さが変わらないこと、および、前進角の場合よりもビード幅と溶け込み深さが小さいことから、レーザ・アーク併用後退角プロセスが母材のレーザ吸収率向上にはほとんど寄与していないことが分かる。

以上の結果から、後退角の場合は、レーザ・アーク併用法を表面処理に適用しようとする、前進角と比較して、ビード幅が小さい、すなわち、アークの熱効率が悪い、ビードの表面形状が不整になりやすいといった不利な面が明らかになった。しかし、これはTable 1の条件下でのことであって、母材移動速度を 100 mm/s 程度に小さくするだけでも、前進角の場合との差を小さくすることができたが、より高速度での表面処理方法を追求する観点から言えば、適正条件の更なる検討が必要である。また、レーザ・アーク併用プロセスを表面処理技術として有用なものにするためには、第3報で報告した⁶⁾「揺動レーザビームとTIGアークとの併用法」を追求するのも一つの選択肢と言える。他方、表面処理技術ではなく、溶接技術という観点からは、高速度である、ビード幅が狭い、ビードの表面形状も良いなど、後退角の場合にも有利な点が認められる。

5. お わ り に

CO_2 レーザとTIGアークを併用した場合に、母材の移動方向を変えるとビード幅が変わった。その原因を明らかにするために、前進角と後退角の場合について、ビード断面、アーク電圧、および、高速度ビデオ画像を比較した。その結果、後退角と前進角の場合の違いについて、以下のことが明らかになった。

(1)アーク入熱が主にビード幅を広げ、レーザ入熱が主に溶け込み深さを決定する点では後退角の場合も同様であった。後退角の場合、前進角と較べてビード幅および溶け込み深さが小さくなる一因は、アーク入熱が溶融池やビード部分に分散することにある。

(2)前進角では、陽極点がレーザによって形成される溶融池の周辺部にのみ分布する。一方、後退角の場合には、陽極点が溶融池やビード部分にも分散分布する。陽極点が溶

Fig. 11 Effect of laser output on arc voltage and plume length.

融池やビード部分に分散分布する場合、ここからのアーク入熱はビード幅の拡大にほとんど寄与していない。

(3)後退角の場合、プラズマ気流による母材の予熱効果はほとんどなかった。これは、前進角の場合よりもビード幅が狭くなる一因と考えられる。

(4)レーザ・アーク併用の前進角の場合、本実験条件下では、レーザビームはアークの挙動をほぼ完全に制御した。一方、レーザ・アーク併用の後退角アークの挙動は、陽極点が溶融池から離れたビード上に発生するなど、レーザビームによって完全に制御することができない場合もある。これは、周辺の母材の温度よりも高温のビードに向かってプラズマ気流が吹き付けられていることが主因と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 松田 純, 内海明博, 米田理史, 勝村宗英, 矢納広靖, 荒木孝雄: CO₂ レーザによる TIG アークの安定化—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究 (第 1 報)—, 本会論文集 Vol. 15, No. 3 (1997), 445~452.
- 2) 内海明博, 松田 純, 米田理史, 勝村宗英: 母材の溶け込み形状に及ぼすガス流量の影響—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究 (第 2 報)—, 本会論文集 Vol. 18, No. 3 (2000), 381~389.
- 3) 内海明博, 松田 純, 米田理史, 勝村宗英: TIG アークの挙動に及ぼすレーザ照射位置の影響, 本会概要, 61 (1997), 360~361.
- 4) 内海明博, 松田 純, 米田理史, 勝村宗英: 電極点の挙動と溶融池の形状との関係, 本会概要, 65 (1999), 256~257.
- 5) S.L. Engel: Heat treating with lasers, American Machinist, May (1976), 108.
- 6) 内海明博, 松田 純, 米田理史, 勝村宗英: 揺動レーザビームによる TIG アークの制御—レーザ・アーク併用高速表面処理法の研究 (第 3 報)—, 本会論文集 Vol. 18, No. 4 (2000), 534~539.