レーザビーム照射による TIG アーク誘導現象のプラズマ診断による基礎検討*

奥田 博之**, 野村 和史***, 浅井 知***, 岩田 匠平****, 木谷 靖****, 大井 健次****

Fundamental plasma diagnostic study for guiding TIG arc phenomenon by laser beam irradiation*

by OKUDA Hiroyuki**, NOMURA Kazufumi***, ASAI Satoru***, IWATA Shohei****, KITANI Yasushi**** and OI Kenji****

Laser-arc hybrid welding is divided into laser-based and arc-based welding. In the arc-based welding, the laser beam irradiation provides the guiding effect of the arc plasma. Some studies have reported that an unstable arc plasma becomes stable due to this guiding effect. This is considered as the influence of metal vapor generation by laser beam irradiation, however, there are few reports on the measurement of metal vapor and arc plasma state during the guiding process. Therefore, the mechanism has been still not fully understood. In this study, the fundamental study of the guiding arc phenomenon was conducted in TIG arc welding (60 A) with laser beam irradiation (170 W) under relatively low power condition. When the base metal was stainless steel, the guiding arc by the laser beam irradiation was observed unlike the mild steel. Spectroscopic measurement for the guiding arc phenomenon in stainless steel showed that the metal vapor was composed of manganese and chromium, and was widely distributed near the irradiation point, but not concentrated. We also observed the decrement of plasma temperature, which is considered to be caused by distributed metal vapor and the resultant decrement of the current density.

Key Words: imaging spectroscopy, 3D spectroscopy, laser, plasma guiding, TIG arc welding, metal vapor

1. 緒 論

現在様々な製造分野において用いられる溶接法としてアーク溶接やレーザ溶接などが挙げられる。アーク溶接は高いエネルギー効率や高いギャップ裕度といった長所があり、レーザ溶接は深い溶込み、速い溶接速度といった長所がある。その二つの溶接方法を足し合わせたものがレーザアークハイブリッド溶接である。レーザアークハイブリッド溶接はレーザビームとアークを単純に足し合わせたものではなく、それらを組み合わせることで相乗効果を引き出し、それぞれの短所を補い、長所を活かすことができる溶接方法である。レーザアークハイブリッド溶接のメリットとして、レーザビームとアークの相乗効果を引き出すことにより深い溶込みや速い溶接速度、高いギャップ裕度を得られることなどがある。一方で、デメリットとしてパラメータの多さから適切な溶接条件を求めることが難しく、条件次第ではレーザビームやアークの単独溶接時よりも溶接性が低下することや¹⁾、レーザビームとアークの相乗効果により溶接現象が複雑化することでレーザアークハイブリッド溶接の最適化や定量的な評価が難しいことなどがあげられる。

レーザアークハイブリッド溶接はアーク主体の溶接方法とレーザ主体の溶接方法に大別される²⁾。

レーザ主体の溶接方法はアークによる予熱やギャップ裕

度の高さを利用し深溶込みや高速溶接を行う溶接方法である。例えば、内藤ら³⁾は YAG レーザと TIG アークを組み合わせることによりレーザ単独溶接時に比べ溶込みが深くなることや、ポロシティが低減したことを報告している。Shinら³⁾はレーザ単独溶接では溶接できないギャップ距離であってもアークと組み合わせることで溶接することが可能になることを報告している。林ら⁴⁾は 30kW の CO₂ レーザと MIG 溶接を組み合わせることで板厚 22mm の I 形開先の試供材において裏波が形成することや溶接姿勢による溶込み深さの影響を示している。

一方、アーク主体の溶接方法はレーザビーム照射によるアーク安定化効果や極点誘導効果を利用した溶接方法である。村田ら⁵⁾は TIG 溶接に対してレーザビームを照射することによって、不安定なアークの安定化や、アークの誘導効果について報告している。Liu ら⁶⁾は MAG 溶接中に低出力のレーザビームを照射するとレーザビーム照射点付近においてアークプラズマが収縮することを報告している。Hu ら⁷⁾はレーザビーム照射によって不安定なビードが安定化したことを示し、レーザビーム照射によるプラズマの直接加熱と母材金属のプラズマ化によってアークが誘導されたと報告している。また、Kozakov ら⁸⁾は TIG アークプラズマにレーザビームを照射することによりアークプラズマにレーザビームのエネルギーの一部が吸収され、照射位置でのプラズマの導電率が増加することを報告している。このようにアーク主体の溶接法ではレーザビームとアークの相互作用が生じており、アークの誘導・安定化効果は一般にレーザビーム照射によって発生した金属蒸気による影響とされているが、実際に金属蒸気やアークプラズマの状態を計測し

*受付日 2019年12月11日 受理日 2020年4月7日

**学生員 大阪大学大学院工学研究科 Student member, GraduateSchool of Engineering Osaka University

***正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, GraduateSchool of Engineering Osaka University

****正 員 JFE スチール株式会社 Member, JFE Steel Corporation

Fig. 1 Schematic of experimental setup

Fig. 2 Electrode shape

た例は少なく、現象の完全な解明はなされておらず、レーザービームとプラズマの相互作用についても解明されていない。

そこで本研究では、比較的低出力のレーザービームとTIGアークを組み合わせ、レーザービームによるアーク誘導現象の確認を行うとともに、レーザービーム照射前後でのプラズマ状態の変化や温度分布を分光計測器および三次元発光分光法を用いて計測し、相互作用現象の観察と解明を試みた。

2. 実験装置および実験方法

本研究では、Ar-TIGアークと連続波レーザービームを組み合わせたレーザーアークハイブリッド溶接を行った。誘導効果に着目するため、半導体レーザー先行の溶接とした。レーザービーム照射によるプラズマ形状や状態の変化を計測するため、デジタルカメラやイメージング分光器を用いた。また、プラズマの温度計測として、発光分光法を適用した。ただし、現象が非軸対称となるため、著者ら⁹⁾が開発した三次元発光分光計測装置による温度計測を行った。

Fig. 1に実験装置の構成と主な実験条件を示す。標準条件として、レーザービームには中心波長840 nmの半導体レーザー、TIG電極には2% CeO₂入りW電極(φ3.2 mm径)、TIGトーチは前進角30°、レーザービームの入射角度は後退角35°、レーザービームの狙い位置はTIGの狙い位置、母材SUS304(板厚4 mm)、レーザービーム出力170 W、スポット径1 mm、アーク電流60 A、アーク長5 mm、シールドガスAr、ガス流量15 L/min、溶接速度1 mm/sとした。不安定なアークをあえて発生させるため、Fig. 2に示すようにW電極には60°に磨

Fig. 3 Schematic of 3D spectroscopic measurement system

いた電極に加え、先端が損耗した電極も用いた。アーク誘導現象の確認には、標準条件に加え母材SS400での実験を行い、発生する金属蒸気の質の影響を調べた。また、アーク溶接単独で金属蒸気が発生する条件としてシールドガスをHeに変更した実験も行った。その際Heのガス流量は25 L/min、アーク長3 mmとし、溶接線垂直方向に2 mmずらした位置にレーザービームを照射した。

Fig. 3に温度計測に用いた三次元発光分光装置の概要を示す。本計測装置は、非軸対称プラズマに対して多方向から計測を行うことで、断面像を再構成するトモグラフィ計測に基づくものである。検出器は計4台、45°間隔で配置し、それぞれAr I (763.5 nm)の干渉フィルタを取り付けた。得られた画像の再構成法にはML-EM法を、画像再構成によって得られた発光強度分布からの温度算出にはFowler-Milne法を三次元に展開した手法を用いた⁹⁾。

3. レーザービームによるアークの誘導現象

レーザービームによるアーク誘導現象の確認のために次のような実験を行った。損耗した電極を用いて不安定なアークを発生させたビードオンプレート溶接途中にレーザービームを照射し、レーザービーム照射前後におけるビード状態とプラズマ形状の観察を行った。本来のアーク狙い位置とレーザービームの狙い位置は同じ点である。まず、母材にSUS304を用いた際の、発生した不安定なアークに対してのレーザ

ビーム照射前後のプラズマ形状の変化を Fig.4 に示す。プラズマ状態の撮影は Ar I (763.5nm) の干渉フィルタを用いて溶接線後方から行った。レーザビーム照射前には不安定なアークが発生し、本来の狙い位置から大きくずれた位置にアークが発生していることが確認された。しかし、レーザビームを照射するとアークが安定し、本来の狙い位置付近でアークが発生することが確認された。その時のビード形状とその模式図を Fig.5(a) に示す。アークが不安定になっていたことから本来の狙い位置とは異なる場所に不安定なビードが形成されていたが、レーザビーム照射によってアークが安定化したことにより、ビードも安定化したことが確認された。次に母材を SS400 とした際のビード形状とその模式図を Fig.5(b) に示す。SUS304 の場合と同様、レーザビーム照射前は SS400 においてもアークが不安定になっていたことから、本来の狙い位置とは異なる場所にビードが形成された。しかし SUS304 の場合と異なり、レーザビーム照射によってビードが安定化することは無く、アークとレーザビームの二つのビードが形成するだけとなった。このことから、母材の違いによりレーザビームによるアークの誘導・安定化効果に違いがあることが確認された。

4. レーザビーム照射によるアークプラズマ状態の変化

レーザビーム照射が及ぼす影響を確認するためプラズマ状態の計測を行った。前節では損耗した電極を用いて不安定なアークを発生させ誘導現象の確認を行ったが、損耗した電極では現象の再現性が乏しく、現象の確認が困難であったため、プラズマ状態の確認の際は損耗していない通常の電極を用いた。レーザビーム照射によるアーク誘導現象が発生した母材 SUS304 と発生しなかった母材 SS400 でのレーザビーム照射前後のプラズマ状態の変化を Fig.6 示す。アークの誘導効果が確認されなかった母材 SS400 ではレーザビーム照射前後でプラズマ状態の変化はほとんど確認されなかった。しかし、誘導効果の発生した母材 SUS304 ではプラズマ状態に2つの変化が確認された。一点目はレーザビーム照射点において照射前には見られなかった新たな発光が確認されたこと、二点目はレーザビーム照射によってプラズマ状態の発光が減少していることである。これらの現象の確認のため、照射点付近での発光にはイメージング分光器による計測を、発光量の減少には三次元分光計測装置を用いた検証を行った。

Fig.4 Changes in plasma shape by laser beam irradiation

Fig.5 Changes in bead shape by laser irradiation

4.1 レーザビーム照射による新たな発光

母材 SUS304 でのレーザビーム照射による新たな発光を計測するため、溶接線前方からイメージ分光器 (Princeton

Fig. 6 Difference in plasma state by laser beam irradiation depending on the base metal

Instruments 製 IsoPlane-160) を用いた発光分光計測を行った。イメージ分光器では、任意の空間一軸上の分光結果が得られるため、レーザビーム照射点において母材表面直上と母材 2 mm 上での分光計測を行った。Fig. 7 は母材表面直上のレーザビーム照射後の溶接線方向 x 軸から見た分光計測結果である。横軸が波長、縦軸が y 方向を表している。レーザビーム照射点付近ではシールドガスである Ar I の発光である 696.5 nm や 763.5 nm のスペクトルのピークや、レーザビーム照射によって発生したと考えられる Mn I の発光である 476.2 nm や Cr I の発光である 520.8 nm などのスペクトルのピークが確認された。しかし母材の主成分である Fe I のスペクトルのピークはほとんど確認されなかった。縦軸方向への発光の広がり注目すると、Mn や Cr の金属蒸気由来の発光が y 軸方向へおよそ 3.5 mm ほど広がっていることがわかる。今回用いたレーザビームはスポット径がおよそ 1 mm であることから、金属蒸気はレーザビーム照射点付近のみに集中して分布するのではなく、ある程度の広がりを持って分布したことがわかった。

レーザビーム照射前後におけるレーザビーム照射点での分光計測結果を Fig. 8 に示す。いずれの条件においても露光時間などの撮影条件は一定である。同図 (a) に示すように、母材表面上において、レーザビーム照射前には Ar I の発光

Fig. 7 Measurement result of TIG arc plasma with laser beam just above SUS304 surface by imaging spectrometer

Fig. 8 Measured spectrum of TIG arc plasma on SUS304 plate

Fig.9 Influence of shielding gas and laser beam irradiation on the bead shape of SUS304

が確認され、Mn や Cr といった金属蒸気の発光はほとんど確認されないのに対し、同図 (b) に示すように、レーザビーム照射後は Ar I の発光量が減少し、Mn I や Cr I の発光が強くなることが確認された。そのため、レーザビーム照射点に見られた新たな発光は Mn や Cr といった金属蒸気による発光であると考えられる。また、同図 (c), (d) に示すように、母材表面上 2mm では母材表面上とは異なり、レーザビーム照射によって発光に大きな変化は見られず、発光量がわずかに減少するのみとなった。

以上から、Fig.5 に示した、母材が SUS304 の場合にのみアーク誘導が見られた現象は、レーザビーム照射によって母材表面近傍に発生した Mn や Cr が主体の金属蒸気によるものであると考えられる。したがって、仮にアーク溶接単独で金属蒸気が十分発生する条件であれば、レーザビームを照射してもアークの誘導効果は小さくなるはずである。

そこで、シールドガスに He を用いた TIG 溶接にレーザビーム照射を組み合わせたビードオンプレート溶接を行った。He-TIG アークは、Ar-TIG アークに比べ集中熱源となるため金属蒸気が発生しやすい¹⁰⁾。この実験ではシールドガスによらずアーク長は 3mm、母材は SUS304 とした。また誘導効果を見るために、Fig.1 のようにアーク狙い位置に対してレーザビーム照射位置を 2mm 横にずらした。

Fig.9 は各シールドガスにおけるレーザビーム照射前後でのビード形状変化である。同図 (a) に示すように、シールドガスが Ar の場合はビードがレーザビーム照射方向へとわずかだが偏っていることが確認され、不安定な電極の場合と同様にレーザビームによる誘導効果が確認された。一方で同図 (b) のシールドガスが He の場合は、レーザビーム照射によりビードの拡大が確認されたが、レーザビーム照射点側の方がより拡大していることが確認された。これは、単にレーザビーム照射による入熱の増加によってビード形状が変化したと考えられる。

Fig.10 に各条件におけるプラズマの外観を示す。同図 (a), (b) の比較から、Ar ガスを用いた際にはレーザビーム照射後で確認された青白い発光が、レーザビーム照射前には確認されなかったことがわかる。一方で、同図 (c) に示すように、He ガスを用いた際にはレーザビーム未照射時においても青白い発光が確認された。また、同図 (d) に示すように、He

Fig.10 Difference in plasma state by laser beam irradiation to SUS304 depending on the shielding gas

ガスを用い、レーザビームを照射した場合には、母材付近の発光が、強くなることは無く、プラズマの外縁部の発光が強くなるのみであった。静止 He-TIG 溶接において母材の溶融池の形成と成長とともに発生した Mn や Cr の金属蒸気はプラズマ中に侵入し、プラズマ外縁部で強く発光することが報告されている¹¹⁾。これと同様の現象がレーザビーム照射によって起こったと考えられる。レーザビーム未照射時においてもプラズマ中に侵入した Mn や Cr の発光が確認されるが、レーザビーム照射による入熱の増加によって溶融池が成長し、より多くの金属蒸気が発生したことにより多くの Mn や Cr の金属蒸気がプラズマ中へと侵入したためにプラズマの外縁部の発光が強くなったと考えられる。

以上から、シールドガスを He とした際のように、あらかじめ金属蒸気が十分に発生する条件では誘導効果が小さいことが確認された。

4.2 レーザビーム照射によるアークプラズマ発光量の減少

Fig.6 に示したように、母材 SUS304 ではレーザビーム照射によって照射部周辺のプラズマの発光量が減少したことからプラズマの温度が低下していると考えられる。そのため三次元発光分光計測装置を用いた分光計測を行った⁹⁾。

母材にSUS304, レーザビーム照射後 (Fig.6(b)) での, 各検出器により撮影された画像を Fig.11 に示す. いずれの画像においてもレーザビーム照射後には下部にわずかな輝度の低下が見られた. 得られた画像を前述の方法により放射強度へと変換し温度分布を算出した. その結果を Fig.12 に示す. 同図に示す温度分布は, 傾斜方向断面のyz面, および母材2mm上面でのものである. また, Fig.13に各高さにおける最高温度を示す. 計測結果よりレーザビーム照射

によってアークプラズマの温度が1,000K程度低下していることが確認された.

5. 考 察

5.1 誘導現象の発生に関する考察

以上の実験結果より誘導現象の発生に関する考察を行う. 一般に母材付近に金属蒸気が発生することにより, 周囲のガスよりも電離電圧の低い金属蒸気の近傍でアーク柱が発生し, アークが集中すると考えられている¹²⁾. 今回の実験においてはシールドガスに用いたArの電離電圧は15.76Vであるのに対し, 発生した金属蒸気であるMnやCrの電離電圧はそれぞれ7.43V, 6.77Vである¹³⁾. そのため, Fig.14に示すように, 発生した金属蒸気は周囲のガスに比べて電離電圧が低く, シールドガスよりも先にプラズマとなるために, レーザビーム照射点へとアークが誘導されたと考えられる. しかし, 先に述べたシールドガスをHeとした場合の

Fig.11 Acquired raw images of each detector

Fig.13 The maximum value of the temperature at each height

Fig.14 Schematic of laser irradiation effect on arc guiding phenomenon

Fig.12 3D temperature distributions

Fig. 15 Schematic of laser irradiation effect on arc temperature decrease

ようにアーク溶接単独で金属蒸気が発生するような溶接方法であると、既に金属蒸気が発生しているため、レーザビーム照射によってさらに金属蒸気が発生したとしても誘導効果が薄くなったと考えられる。そのため、GMA 溶接などの金属蒸気が多く発生する溶接法でも同様、レーザビームによる誘導現象の効果は小さいと考えられる。

また、今回母材 SUS304 では誘導効果が得られたが、SS400 では効果が得られなかった。これは母材成分の沸点による違いであると考えられる。Fe, Mn, Cr の沸点はそれぞれ 3,160 K, 2,933 K, 2,305 K であり Fe に比べて Mn や Cr の沸点は低くなっているため、沸点の低い Mn や Cr は金属蒸気となり、沸点の高い Fe の金属蒸気は発生しなかったことが理由であると考えられる。したがって、仮にレーザビームが高出力となり入熱が増大し Fe の金属蒸気も発生するようになったとすると、誘導効果が確認されなかった母材 SS400 でも誘導効果が得られる可能性が高い。

5.2 レーザビーム照射によるアークプラズマの温度低下

次にレーザビーム照射によるアークの温度低下について考察を行う。Fig. 15 に示すように、レーザビーム照射によって発生した金属蒸気は照射点付近に集中するのではなく、ある程度の広がりを持って分布することから、発生した金属蒸気によりアークが広がり電流密度が低下し、ジュール発熱が減ったために温度が低下したと考えられる。

ただし、プラズマ中に金属蒸気が混入することによってプラズマの温度は低下する。MIG アークにおける中心温度が低いのもこのためである^{14,15)}。そのため、本実験においてもレーザビーム照射部で発生した金属蒸気がプラズマ部へ混入し、温度低下を招いた可能性も考えられる。そこで次のような試算を行った。レーザビーム照射によって発生した Mn がプラズマ中に 5% 混入したと仮定すると、Ar と Mn の発光量は Fig. 16 のような関係となることが計算される。わずかな混入であっても Mn の発光は Ar に比べて非常に強くなることを意味している。しかし、イメージング分光器による計測では、母材上 2 mm において Mn の発光が確認されなかったことからプラズマ中への金属蒸気の混入はほぼ無いといえる。そのため、プラズマ温度の低下は金属

Fig. 16 Relationship between temperature and emission intensity of Ar I (763.5 nm) and Mn I (476.2 nm) with Ar 95% + Mn 5% condition

蒸気の混入によるものではないと考えられる。

6. 結 論

本研究では、レーザビームによる Ar-TIG アーク誘導現象の基礎検討として、誘導効果が得られる条件の検討を行うとともに、レーザビーム照射によるアークプラズマの状態変化を実験的に検討した。以下に、本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 損耗した電極を用いて発生させた不安定なアークに対しレーザビームを照射すると母材 SUS304 の場合アークが誘導され、母材 SS400 の場合にはアークは誘導されなかった。
- 2) TIG アーク溶接中にレーザビームを照射すると母材 SUS304 の場合照射点付近に新たな強い発光が見られたのに対し母材 SS400 の場合には新たな発光は見られなかった。
- 3) 母材 SUS304 の溶接中にレーザビームを照射することによって母材付近に Mn や Cr の金属蒸気が発生し、それはレーザスポット径よりも広い範囲で分布していることが確認された。また、発生した金属蒸気は母材付近に存在しプラズマ中への混入は無かった。
- 4) Ar-TIG 溶接ではレーザビームによりアークプラズマが誘導されたが、He-TIG 溶接では誘導されなかったことから、アーク溶接単独で金属蒸気が発生する溶接方法では誘導効果は小さいと考えられる。
- 5) レーザビーム照射によって発生した金属蒸気によってアークプラズマの電流経路が広がることでアークプラズマの温度が全体的に低下した。

参 考 文 献

- 1) Y. Naito, M. Mizutani and S. Katayama: Penetration Characteristics in YAG Laser and TIG Arc Hybrid Welding, and Arc and Plasma/Plume Behavior during Welding, Journal of the Japan Welding Society, 24, 1 (2006), 32-38. (in Japanese)
- 2) N. Abe and M. Hayashi: Trend of Laser Arc Combination Welding Method, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 70, 4 (2004), 389-393. (in Japanese)
- 3) M. Shin and K. Nakata: Single pass full penetration welding of high-

- tensile steel thick-plate using 4kW fiber laser and MAG arc hybrid welding process, *Journal of the Japan Welding Society*, 27, 2 (2009), 80-84.
- 4) T. Hayashi, S. Katayama, N. Abe and A. Ohmori: High Power CO₂ Laser MIG Hybrid Welding Process for Increased Gap Tolerance, *Journal of the Japan Welding Society*, 21, 4 (2003), 522-531. (in Japanese)
- 5) Y. Murata, K. Yokoyama, T. Kim and Y. Suga: Stabilization and Control of Arc in TIG Welding by Laser Irradiation, *Transactions of the JSME*, 77, 81 (2011), 329-339.
- 6) L. Liu, R. Huang, G. Song and X. Hao: Behavior and Spectrum Analysis of Welding Arc in Low-Power YAG-Laser-MAG Hybrid-Welding Process, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36, 4 (2008)1937-1943.
- 7) B. Hu and G. den Ouden: Laser induced stabilisation of the welding arc, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 1 (2005), 76-81.
- 8) R. Kozakov, B. Embe, A. V. Pipa, M. Huse, D. Uhrlandt, J. Hermsdorf and V. Wesling: Change of electrical conductivity of Ar welding arc under resonant absorption of laser radiation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48 (2015), 095502.
- 9) K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai and Y. Hirata: 3D temperature measurement of tandem TIG arc plasma, *Welding in the world*, 57, 5 (2013), 649-656.
- 10) A.B. Murphy, M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, T. Sato and J.J. Lowke: Modelling of thermal plasmas for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapour, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (2009), 194006.
- 11) M. Tanaka and Y. Tsujimura: Visualization of metal vapor behavior in TIG welding, *Journal of the Japan Welding Society*, 30, 2 (2012), 164-170. (in Japanese)
- 12) K. Andou and M. Hasegawa: 溶接アーク現象, Sanpo (1973). (in Japanese)
- 13) The Japan Institute of Metals and Materials: 改訂3版金属データブック, Maruzen (1993). (in Japanese)
- 14) K. Nomura, K. Yoshii, K. Toda, K. Mimura, Y. Hirata and S. Asai: 3D measurement of temperature and metal vapor concentration in MIG arc plasma using a multidirectional spectroscopic method, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, 42 (2017), 425205.
- 15) Y. Tsujimura, M. Nakatani and M. Tanaka: Analysis of Metal Vapor Behavior in Gas Shielded Arc Welding with Consumable Electrode by Imaging Spectroscopy, *Tetsu-to-Hagané*, 98, 10 (2012), 534-540
- ~~~~~