高出力 CO₂ レーザ溶接の基本的特性と 窒素シールドを用いた欠陥抑制メカニズムの検討

— 高出力レーザ溶接現象に関する研究 (第1報) —

川口 勲^{**}, 塚本 進^{***}, 荒金吾郎^{***}, 本田博史^{***}

Characteristics of High Power CO₂ Laser Welding and Porosity Suppression Mechanism by Nitrogen Shield

- Study on High Power Laser Welding Phenomena- (Report 1)-

by KAWAGUCHI Isao, TSUKAMOTO Susumu, ARAKANE Goro and HONDA Hiroshi

High power laser is a promising tool to weld heavy section plates. One of the major problems, in this case, is formation of some weld defects such as porosity and hot cracking. A final goal of a series of our investigations is to develop defect free laser welding process with the depth of more than 20mm. In the present study, characteristics of deep penetration welding have been investigated using a 20kW CO₂ laser facility. Deep penetration of more than 20mm can be attained even at a high welding speed 16.7mm/s. However, porosities are always observed in the longitudinal sections, more significantly for upper focusing conditions. The porosity is not observed, on the other hand, with nitrogen shielding, although large plasma periodically formed during welding and leads to significant reduction in the penetration depth. Pulse modulation of the laser power at the same frequency and duty of the periodical plasma formation can effectively decrease the porosity formation even with helium shielding. This suggests the possibility of porosity prevention by laser power modulation. Dissolution of nitrogen in the molten pool has also good effect to prevent the porosity with nitrogen shielding.

Key Words : Laser welding, High power laser, CO₂ laser, Power density, Laser-induced plasma, Nitrogen shielding gas, Porosity

1. 緒 言

レーザは、大気中で高エネルギー密度が得られる熱源であり、ひずみの少ない高精度な深溶込み溶接を行うことができる。最近では、レーザ発信器の高出力化と高ビーム品質化が一段と進み、これに伴って産業界における実用化が着実に拡大しつつある^{1),2)}。しかし現状における実用化は自動車を中心とした薄板の高精度溶接が主流であり^{3),4)}、もう一方の特徴である深溶込み溶接への適用は、造船や原子力分野で一部報告されているが比較的少ない⁵⁾。この原因として、溶込み深さが増加するに従い、ポロシティや凝固割れ等の溶接欠陥が発生しやすくなることが挙げられる。特に炭素鋼の部分溶込み溶接においては、10mm以上の深さで実用化可能なポロシティ防止法を報告した例はない。このような観点から、著者らの一連の研究では、20mm以上の深溶込み溶接部において、溶接欠陥を適切に防止する技術を開発することを最終目標とした。発信器には、現状でもっと

も深溶込みが可能な高出力 CO₂ レーザを用いた。

本報告では、20kWCO₂ レーザ溶接装置を用いて部分溶込み溶接を行い、プラズマの発生状況、溶込み深さ及びポロシティの発生等に及ぼす各種溶接パラメータの影響について検討を行った。また、ポロシティの防止に関しても若干の検討を行った。最近、炭素鋼の CO₂ レーザ溶接において、窒素シールドによりポロシティを防止した例が報告されている⁶⁾。現実には、大きなプラズマが発生することや継手靱性が低下することなど、必ずしも実用的な方法ではないが、防止法を開発するにあたり、防止機構を知ることは重要である。そこで、窒素シールド下における防止機構について、レーザ出力の周期的な変動とシールドガス固溶の観点から検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 20kWCO₂ レーザ溶接装置

本研究で使用したレーザ溶接装置の構成と、ビーム特性の計測方法について本節にまとめる。レーザ発振器は、最大出力 20kW、リングモードを持った CO₂ レーザを用いた。レーザ光は、金コーティングミラー5枚により約 10m 伝送され、最終的に Fig.1 に示すような放物面鏡を含んだヘッド

*原稿受付 平成 16 年 5 月 26 日 平成 12 年度春季全国大会で発表
**正 員 物質・材料研究機構 (現: 石川島播磨重工業㈱)

Member, National Institute for Materials Science
(Presently, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.)

***正 員 物質・材料研究機構 Member, National Institute for Materials

によって集光され、試験片表面に照射される。放物面鏡には、焦点距離 776mm の長焦点ミラーを用いた。パワーモニターを用いて加工点出力を計測した結果、レーザ出力 20kW の場合、18.3kW であり、91.5% の伝送率であった。照射位置におけるレーザのエネルギー密度や焦点位置などの特性

Fig.1 Schematic diagram of laser welding.

は、ビームプロファイラーにより計測した。この計測は、同装置で計測可能なエネルギー密度の制限から 16kW で行った。また、20kW における焦点位置は、アクリル板に短時間レーザを照射することによってできる穴径を計測することにより補正し⁷⁾、以下の焦点外し距離の算出に使用した。また、本発振器は、高周波放電による励起を採用しており、レーザ出力変動の高速応答性を特徴にしている。その応答速度は、0.1ms 以下であり、さらに外部信号を入力することによって、レーザ出力は自由に制御することが可能である。この場合の出力変化の応答性については、発信器出口で偏光ミラーにより分岐させたレーザの一部を、最大 300kHz の応答性を持つパワーセンサーにより計測した。

2.2 実験方法

高出力 CO₂ レーザ溶接の場合、プラズマの発生が材料に投入される実際的な入熱やパワー密度を低下させる。そこで、初めに、ガスプラズマの除去方法の検討を行った。内径 4mm のノズルから He を前方噴射し、ガス流量がプラズマの状態や溶込み深さに与える影響を調べた。レーザ出力 20kW、溶接速度 16.7mm/s を一定とし、He ガス流量を $4.2 \times 10^{-4} \sim 16.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で変化させ、溶接を行った。ガスプラズマの観察は、溶接方向測方から高速度カメラにより 1000frames/s で撮影して行った。

次に、高出力レーザ溶接の基本的特性を調べるため、レーザ出力 20kW 一定のもと、溶接速度を 8.3~83.3mm/s、焦点外し距離を -25~+25mm の範囲で変化させ、ビードオンプレート溶接を行い、溶込み深さ及び欠陥発生状況を調べた。

この場合の溶接条件を Table 1 にまとめる。欠陥の発生状況は、幅 17mm に切削した試験片の側面（溶接方向および溶込みと直角方向）から X 線透過試験を行って欠陥を検出し、欠陥発生率(Pr)を、熔融断面積中に占める欠陥総面積の割合(%)として評価した。

Table 1 Welding conditions.

Laser power at processing position	18.3kW
Focal length	776mm (20kW)
Shielding gas	He, N ₂
Shielding gas rate	$4.2 \sim 16.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Focal position fd	-25~+25 mm
Welding speed	4.2~83.3mm/s

上記検討の結果、いずれの条件においてもポロシティの発生が認められた。すなわち溶接条件の最適化だけではポロシティの発生が防止できなかった。一方、窒素をシールドガスに用いることにより、炭素鋼においてもポロシティが効果的に防止できることが報告されている⁶⁾。高出力 CO₂ レーザの場合、大きな窒素プラズマが発生することや、炭素鋼に適用した場合は、靱性が低下するなど、必ずしも実用的ではないが、防止機構を明らかにすることにより、新しい防止法の開発が期待できる。そこで、本研究でも、窒素シールドを用いて、ポロシティの防止効果を調べた。窒素シールド下では窒素プラズマが周期的に発生し、プラズマ中でのレーザ吸収により、材料に投入される入熱が周期的に変化する。すなわち、レーザ出力のパルス変調を行った場合と同じ効果がある。そこで窒素シールド中におけるプラズマの発生挙動を模擬し、周期的なプラズマの発生と同じ周波数及びデューティでレーザ出力を矩形波によりパルス変調し、He シールド雰囲気下でパルス変調による欠陥の防止効果を調べた。この場合のレーザ出力の一例を Fig.2 に示す。ピーク出力は 20kW 一定とし、ベース出力を 8~18kW の範囲で変化させた。また、溶接金属中の窒素含有量を測定することにより、窒素溶解による防止効果についても検討した。

なお、使用材料に関しては、すべて SM490C を用いた。

Fig.2 Pulse modulation of laser power at the same frequency of periodical plasma formation in nitrogen shield.

3. 実験結果及び考察

3.1 ビーム特性と出力変動の応答性

高出力レーザ溶接装置の集光ビーム特性の一例として、焦点位置におけるビームプロファイルを Fig.3 に示す。最大出力 20kW では計測可能なパワー密度を超えるため、16kW において計測を行った。パワー密度分布は、ガウシアン分布の周りにリングを組み合わせた形となっている。周辺のリングの部分を除いたガウシアン分布の部分だけで計測すると、焦点位置においてレーザは約 $300\mu\text{m}$ にまで集光されている。ビーム半径を 86%radius 法で算出したところ、Fig.4 に示すように最小ビーム径は、 $680\mu\text{m}$ 、ピークのパワー密度の最大値は、 $2.94 \times 10^{11}\text{W/m}^2$ であった。また、 M^2 値は 3.1 であった。

続いて、本装置の応答性を計測した例を示す。Fig.5 は矩形波の入力信号に対する出力波形を示している。16~100Hz の低周波域では、若干、立ち上がり時にオーバーシュートが見られるが、入力波形と出力波形とはよく応答している。一方、500~1000Hz の範囲では、若干矩形波からくずれた波形となるが、6kW の出力変化に十分応答することがわかった。

Fig.3 Beam profile at focal position.

Fig.4 Distributions of beam radius and energy density near focal position.

Fig.5 Waveforms of input signal and output laser power for various pulse frequencies.

3.2 高出力レーザ溶接の基本的特性

レーザが高出力化するに従い、レーザと熔融金属の相互作用により発生する金属プラズマと、シールドガスや大気との相互作用によるガスプラズマが共に大きく発生するようになる。特に波長の長い CO_2 レーザを用いた場合、これらのレーザ誘起プラズマ中におけるレーザの吸収が大きく、これにより材料に投入される入熱が低下する⁸⁾。そこで、ガス流量がガスプラズマの発生に与える影響について検討を行った。Fig.6 には、このときのサンプル表面におけるプラズマの発生状況を示す。He ガス流量が $8.33 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ 以上の場合には、金属プラズマと空気がシールドガスにより遮蔽されるため、ガスプラズマの発生が効果的に防止できる (Fig.6(a))。これに対し、 $4.2 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ では大きなガスプラズマの発生が認められ (Fig.6(b))、その結果 Fig.7 に示すように、溶込み深さが減少する。これらの結果から本実験におけるガス流量は、 $8.33 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ が適当であることがわかった。

(a) He $8.33 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ (b) He $4.2 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$

Fig.6 Effect of shielding gas flow rate on plasma formation.

Fig. 7 Effect of shielding gas flow rate on penetration depth.

次に、高出力レーザ溶接の基本的特性を把握するため、溶接速度と焦点外し距離を変化させた場合の溶け込み深さと欠陥の発生状況を調査した。初めに、溶接速度を変化させた場合の溶け込み深さを、Fig. 8 に示す。溶接速度が遅くなるに従い、溶け込み深さは増加するが、溶接速度が 4.2mm/s になると逆に減少した（図中○印）。これは、同じガス流量を用いた場合、溶接速度の低下と共にガスプラズマが発生しやすくなるためである。そこで、速度が 4.2mm/s の場合のみガス流量を $16.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ に増加させると（図中△印）、ガスプラズマの発生が防止され、溶け込み深さが増大し、8.3mm/s の場合とほぼ同等の溶け込み深さが得られた。すなわち 8.3mm/s 以下の低速領域では、速度を減少しても溶け込み深さが増加しない。これは、低速になるに従い、キーホール内部で形成される金属プラズマの影響が大きくなるため、波長の長い CO₂ レーザ溶接では YAG レーザ溶接と異なり⁹⁾ 低速化による溶け込み深さの増大は期待できない。

Fig. 8 Effect of welding speed on penetration depth.

一方、焦点外し距離を変化させた場合の溶け込み深さは、Fig. 9 に示すように、どの溶接速度においても、焦点外し距離が 0～+5mm の範囲で最も溶け込み深さが深くなる。また、この結果から、目標である 20mm 以上の溶け込み深さは、16.7mm/s 以下の溶接速度で達成できることがわかった。

次に、溶接速度と焦点外し距離がポロシティの発生量に与える影響を調べた。その結果、本研究の実験範囲内では、いずれの溶接条件においても、ポロシティの発生が認められた。Fig. 10 は、各溶接速度におけるポロシティ発生率 P_r に対する焦点外し距離の依存性を示している。この結果か

ら、速度の上昇とともに溶け込み深さが浅くなり、欠陥が発生しにくくなることがわかる。一方、33.3mm/s 以下の溶接速度においては、いずれの条件においても、多くの欠陥が認められたが、特に、焦点外し距離がプラス側で、大量の欠陥が発生することがわかった。

Fig. 9 Effect of focusing condition on penetration depth.

Fig. 10 Porosity formation ratio P_r for various focusing conditions and welding speeds.

3.3 窒素シールドによるポロシティの抑制とその機構

3.2 で述べたように、深溶け込み溶接部で発生するポロシティは、溶接条件の最適化だけでは防止できない。松縄らは、ポロシティ内部に存在するガスの成分を分析し、ポロシティがシールドガス (He) により形成されることを明らかにした⁸⁾。このため、溶融金属に対して溶解度の高い気体をシールドガスとして使えば、ポロシティの発生が抑制できる。溶鉄中の窒素溶解度は Cr 量の増加と共に大きくなるため、Cr を多く含有するステンレス鋼のレーザ溶接では、しばしば窒素がシールドガスとして用いられる¹⁰⁾。しかし Cr を含有しない炭素鋼では窒素溶解度が非常に小さくなるため、窒素シールドによるポロシティの抑制効果がないといわれてきた。これに対して、松縄らは、高出力 CO₂ レーザ溶接において窒素シールドの実験を行い、炭素鋼においても窒素シールドによりポロシティの抑制効果があると指摘している⁶⁾。このようなことから、本研究においても、窒素シールドを用いてその抑制効果を調べるとともに、ポロシティの抑制機構について、窒素プラズマの周期的な発生による

出力変調の効果と、窒素の固溶の 2 点に着目し、検討を行った。

Fig.11 に窒素シールドを用いた場合の縦断面形状を示す。本溶接は、加工点出力 20kW、溶接速度 16.7mm/s で実施したものである。この場合、溶込み深さが約 60%程度まで減少するが、ポロシティの発生は全く認められなくなる。Fig.12 には、窒素シールドを行ったときのプラズマの発生挙動を示す。レーザ照射により材料表面に金属蒸気が発生し、これが気体と衝突を起こすことにより、大きなガスプラズマがキーホール直上で点火し、その後ガスプラズマは上方へと移動する。このようなガスプラズマの上昇の原因については、レーザが照射されたガスが高温になることによる浮力や、発生したガスプラズマがレーザ照射されている上方の気体分子と衝突することにより電離を繰り返すことによるガスプラズマの発生位置自身の上昇が考えられる。このような、ガスプラズマは、サンプル表面から離れるに従いレーザのパワー密度が低下するため、プラズマを維持するために必要な臨界パワー密度以下になった地点でプラズマが消滅する。その後再びキーホール直上でプラズマが形成され、同様な現象が繰り返される。また、大きなガスプラズマが形成されている間はキーホール直上で金属蒸気の発生が見られず、プラズマ中でのレーザ吸収により実質的に材料に投入される入熱が低下する。

いずれにしても、このような周期的なガスプラズマの発生は、結果的に材料への入熱量を時間的に変動させる効果があることが本研究においては、重要である。そこで、純粋な出力変動の効果調べるため、窒素プラズマの発生を

Fig.11 Suppression of porosity formation using N₂ gas shielding.

Fig.12 Periodical formation of nitrogen gas plasma in nitrogen shield welding.

模擬した出力変調溶接をヘリウムシールド下で行った。出力変調条件の選定のため、窒素プラズマの発生状況を観察した結果、デューティ 52%, 周波数 15.9Hz で発生していた。これを模擬して、デューティ 50%, 周波数 15.9Hz の矩形波の出力変調を与え、溶接を行った。ピーク出力 W_p 一定 (20kW) のもとでベース出力 W_B を変化させたところ、Fig.13 に示すように、ベース出力の低下とともに次第にポロシティの防止効果が認められ、 W_B/W_p が 0.6 において最もポロシティの発生が減少した。一方、 W_B が 10kW 以下となると、スパッタが発生し急激に欠陥が発生しやすくなり、8kW 以下ではビードが形成されなくなる。以上の結果、ベース出力が 12kW で CW 溶接よりも欠陥量を少なくすることができた。この場合の欠陥発生状況を X 線透過試験により調べた結果を Fig.14 に示す。連続溶接(CW 溶接)と比較すると、パルス変調溶接において、欠陥の大きさ、数ともに、減少していることがわかる。実際の窒素シールドによる出力波形は矩形波ではないため、本実験によって正確な再現はできないが、欠陥を抑制できることは、出力変動の効果が欠陥抑制の要因となっていることを示している。この場合の溶込み深さは主にピーク出力に依存するため、平均出力の

Fig.13 Effect of W_B/W_P in pulse modulation on the porosity formation ratio Pr (W_B : base power, W_P : peak power).

Fig.14 Suppression of porosity formation by laser power modulation.

低下による影響は大きくない。Fig.15 に示すように、平均出力の減少に対して、溶込み深さの減少は、1mm 程度に抑えられた。これらの結果から、レーザに出力変調を加えることにより、ポロシティが抑制できる可能性を見いだした。

しかしながら、出力変動の効果だけでは、窒素シールド下のように完全にポロシティを除去することはできていない。そこで次に、窒素の固溶による効果を検討するために、溶接金属中に含まれる窒素含有量を、溶融金属上部、中部、底部の3ヶ所において調べた。その結果、母材や、シールドガスに He を用いた場合に比べて、窒素含有量が当然ながら増加し、底部においても、ヘリウムシールドの2.8倍もの窒素を含んでいることが確認された。そこで底部における窒素含有量から母材の窒素含有量を引いた値が底部において吸収した窒素量と考え、これが 1773K においてどの程度の体積になるかを計算した。その結果、同温度における溶鉄の約5倍の体積の窒素が固溶していることがわかった。この量は、欠陥の抑制に効果のある十分な量であると考えられる。

これらの結果をまとめると、窒素シールドによる欠陥の抑制は、周期的な窒素プラズマの発生による出力変動の効果と、窒素の固溶とのふたつの効果から達成できていると考えられる。しかし、緒言などで述べたように窒素をシールドガスに使用することは現実的ではなく、出力変調によりポロシティの発生を防止することが期待される。この点に関しては、第3報で詳しく述べる。

Fig.15 Comparison of penetration depth between CW and pulse weldings.

Table 2 Nitrogen contents in weld metal.

N contents (wt.%)		
Base metal	0.0029	
He Shield	0.00549	
N ₂ Shield	Top	0.0325
	Middle	0.0244
	Bottom	0.0163

4. 結 言

本研究では、20kWCO₂ レーザ溶接装置を用いて、深溶込

み溶接時の基本的な特性について検討を行った。得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) 溶接速度の減少と共に溶込み深さは増加するが、8.33mm/s以下になるとほぼ一定な値を示した。これは、低速領域においてキーホール内部の金属プラズマによるレーザの吸収効果が大きくなるためである。
- 2) ポロシティは、溶込み深さの増加に伴い発生しやすくなるが、特に焦点位置が試験片上方にあるときに顕著に発生する傾向を示した。
- 3) シールドガスに窒素を用いた場合、周期的な窒素プラズマの発生により溶込み深さが大幅に減少するが、ポロシティが効果的に防止される傾向を示した。
- 4) 窒素プラズマの周期的な発生を模擬した矩形波出力変調溶接を行った結果、ポロシティの減少効果が認められた。この結果は、適切な出力変調によりポロシティが防止できる可能性を示唆している。
- 5) 窒素シールド下でポロシティが抑制されたのは、プラズマの周期的な発生による出力変調効果と、窒素が溶融鉄中に固溶した2つの効果がある。

参 考 文 献

- 1) M. Kutsuna: Recent Laser Equipments and its Application, Welding Technology, 52-1 (2004), 74-81. (in Japanese)
- 2) S. Tsukamoto: Laser Welding, Journal of the Japan Welding Society, 72-1 (2003), 16-21. (in Japanese)
- 3) H. Minagawa: Recent Welding in Automotive Industry, Welding Technology, 52-2 (2004), 76-79. (in Japanese)
- 4) K. Mori: Study of In-process monitoring for YAG laser welding Rep.2 Detection of welding quality, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 19-1 (2001), 182-187. (in Japanese)
- 5) T. Ishide: Recent Application of Laser Processing in Heavy Industry, Welding Technology, 52-2 (2004), 62-68. (in Japanese)
- 6) A. Matsunawa, J.D.KIM and S. Katayama: Porosity Formation in Laser Welding, Proceedings ICALEO'99, 2 (1999), E19-27.
- 7) G. Arakane, S. Tsukamoto, I. Kawaguchi and H. Honda: Porosity Formation in Full Penetration Welding of Thick Plates Using High Power CO₂ Laser, Journal of High Temperature Society, 29 (2003), 164-170. (in Japanese)
- 8) S. Tsukamoto: Laser Induced Plasma, Journal of Japan Laser Processing Society, 8 (2001), 37-41 (in Japanese)
- 9) H. Hugel: Laser Beam Welding – Recent Developments in Process Technology and Lasers, Proceedings of 7th International Welding Symposium (2001), pp547-554
- 10) T. Ishide, Y. Nagura, O. Matsumoto, T. Nagashima, T. Kidera and A. Yokoyama: High Power YAG laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants, Proceedings of LAMP'92 (1992), 957-962.