

深溶込みレーザー溶接におけるポロシティの発生機構*

—大出力 CO₂ レーザ溶接におけるポロシティ抑制に関する研究 (第2報) —

川口 勲**, 塚本 進***, 荒金吾郎***, 中田一博****

Formation Mechanism of Porosity in Deep Penetration Laser Welding - Study on Prevention of Porosity in High Power CO₂ Laser Welding (Report 2)-*

By KAWAGUCHI Isao**, TSUKAMOTO Susumu***, ARAKANE Goro*** and NAKATA Kazuhiro****

High power laser is a promising tool to weld heavy section plate members. One of the problems, in this case, is formation of some weld defects such as porosity and hot cracking. In the present paper, formation mechanism of the porosity has been investigated in the deep penetration laser welding. 20 kW CO₂ laser was used to attain the deep penetration in excess of 20 mm. Dynamic keyhole behaviour was observed during welding using a micro-focused x-ray transmission imaging system. Significant fluctuation in the keyhole depth of about 40 % was observed even in the CW welding. The bubble was formed at the keyhole tip during abrupt decrease in the keyhole depth. The keyhole was closed with surrounding molten metal just above the tip, resulting in bubble formation. This is caused by capillary instability of the cylindrical keyhole. Most of the bubbles were combined with each other in the molten pool and remain after solidification. It causes the porosity. The bubble formation is promoted by fluctuation of the keyhole in the radial direction. Increasing the power density in the keyhole is effective in suppressing the porosity by stabilizing the keyhole. However, optimization of the welding variables was not enough to prevent the porosity.

Key Words: Laser welding, High power laser, CO₂ laser, Keyhole behaviour, Keyhole fluctuation, Porosity, Bubble, Capillary instability

1. 緒 言

レーザー発振器の高出力化・高ビーム品質化により、厚板の溶接や深溶込み溶接にレーザーの適用が可能となってきた¹⁾。しかし、溶込み深さの増加と共にポロシティなどの溶接欠陥が発生しやすくなり、これが実用化の障害となっている。著者らの一連の研究では、20mm程度の深溶込み溶接において、ポロシティを適切に防止する技術を開発することを目標としている。

前報²⁾においては、20 kW CO₂ レーザにより各種条件下で部分溶込み溶接を行い、溶込み特性と溶接欠陥の発生状況を調べた。その結果、溶込み深さが10 mmを超えた領域では、いずれの条件においてもポロシティの発生が避けられないこと、ポロシティは、焦点位置が試験片表面より上にある状態でより顕著に発生することを明らかにした。この

ようなポロシティの発生を本質的に防止するためには、ポロシティの発生機構を明確にすることが重要であり、この点に関してこれまでいくつかの興味ある研究結果が報告されてきている。松縄ら³⁻⁷⁾は、X線透過撮影によりキーホール挙動のリアルタイム観察を行い溶接中キーホールが常に変動していること、ポロシティの原因となる気泡が、キーホールの先端から発生することを明らかにしている。また、ポロシティ内部に存在するガスの成分分析を行うことにより、ポロシティがシールドガスにより形成されていることを示している。さらに、気泡の形成機構として、キーホール前面で起こる激しい蒸発が主因となり、これが後方の溶融金属にくぼみを生じることにより発生すると指摘している。しかし、激しい蒸発がなぜキーホール先端でのみ起こるか等不明確な点も多く、ポロシティの発生機構が必ずしも明らかになっていない。

本報告では、大出力 CO₂ レーザ溶接時のキーホール挙動をさらに高解像度で観察することにより、気泡の形成機構を解析することを主目的とした。また、得られた結果を基に、ポロシティの発生を防止するための支配因子について検討を行った。

*受付日 平成18年4月4日 受理日：平成18年9月12日
**正員 物質・材料研究機構 (現：石川島播磨重工業(株))
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 Science
****正員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and
Welding Research Institute, Osaka University

2. 実験方法

欠陥発生の原因となる気泡の生成機構を明らかにするため、マイクロフォーカス X 線透過装置を用いて、レーザ溶接時のキーホール挙動をリアルタイムで観察した。Fig.1 に装置の概観を示す。最大管電圧 225kV、最大管電流 1mA、焦点サイズ 24 μ m の X 線管から発生した X 線を、溶接時に試験片側面から照射した。透過した X 線像はイメージインテンシファイアーによって映像化し、高速度ビデオカメラによって毎秒 1000 コマで撮影した。このときの画像分解能を、透過度計を用いて計測した結果、試験片厚さ 6mm の場合、0.32mm であった。より高解像度な映像を得るためには、X 線が透過する厚さ、すなわち試験片幅を薄くすることが望ましい。しかし、試験片幅を狭くしすぎると溶接中に試験片温度が極端に上昇し、これがキーホール挙動に影響を及ぼすことが懸念される。このため、実験の目的に応じて、特に観察したい位置のみを最小 4mm まで狭くし、温度上昇を抑えるため板厚方向の切削部分を短くした Fig.2 (b) に示すような試験片を用いた。また、溶融池の形状を知るには、軟鋼と密度が比較的近くかつ X 線吸収係数の高い Pt をあらかじめ試験片に埋め込み、これが溶接中に溶融した時の Pt の偏析状況を X 線透過撮影することにより行った。

溶接には、最大出力 20kW の CO₂ レーザ溶接装置を用い、下向き姿勢でビードオンプレート溶接を行った。レーザ出力 (発振器出口出力) は 20kW 一定で行い、レーザの集光は焦点距離が 500mm の放物面鏡により行った。溶接速度は 16.7mm/s、焦点外し距離は、0, \pm 10, \pm 15mm で行った。シールドガスは、He を内径 4mm のノズルより溶接方向前方から 50L/min で流した。なお、供試材には、SM490C を用いた。以上の溶接条件を Table 1 にまとめる。ポロシティの発生量は、前報²⁾と同様に、幅 15mm の試験片に溶接を行い、溶接後試験片測方から X 線透過試験を行い、溶融断面積のうちポロシティの総面積が占める割合をポロシティ発生率 (Pr(%)) とし、この値で評価した。

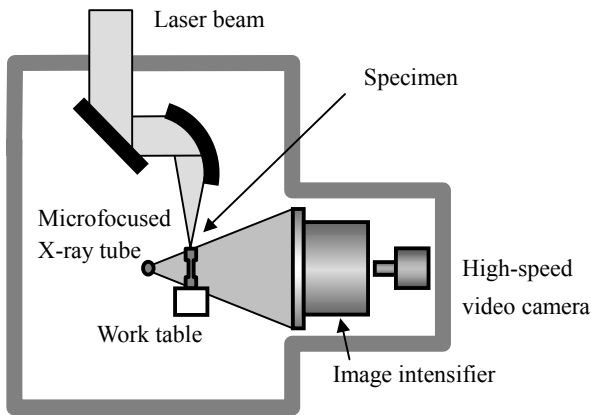


Fig. 1 Schematic image of experimental setup.

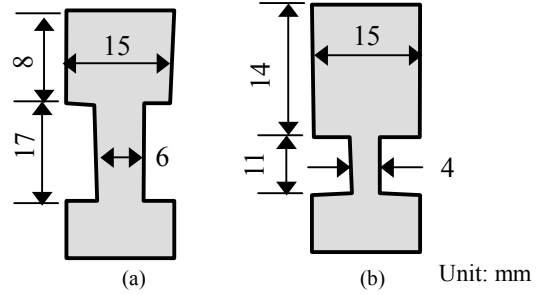


Fig. 2 Specimen size for observation of keyhole and its tip.

Table 1 Welding conditions.

| | |
|--------------------|---|
| Max. laser power | 20kW |
| Focal length | 500mm |
| Shielding gas | He |
| Shielding gas rate | $8.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Focal position fd | -10, 0, +10, +15 mm |
| Welding speed | 16.7 mm/s |

3. 実験結果および考察

3.1 気泡の形成過程

前報²⁾で報告したように、溶込み深さが 10mm を超える部分溶込みレーザ溶接部では、ポロシティが多数発生し、溶接条件の最適化だけでは、これを防止することはできない。このようなポロシティの発生は、キーホール挙動と密接に関連することが知られている。そこで、深溶込み溶接時のキーホールの動的挙動を X 線透過撮影により観察した。はじめに、キーホール挙動が比較的広範囲に見える Fig.2(a) の幅 6mm の試験片を用いた。観察結果の一例を Fig.3 に示す。既に報告されているように²⁾、溶接中、キーホールは径方向、深さ方向に大きく変動しており、気泡はキーホールの先端から発生する。Fig.4 には、Pt を溶解させることによって X 線透過により観察した溶融池形状を示す。写真の黒く見える部分が Pt 濃度の高い部分、すなわち、Pt を溶解した時点における溶融池を示す。先端で発生した気泡は、この溶融池の形状に沿って上昇するが、そのほとんどは表面まで浮上することなく凝固し、ポロシティとして残留する。このように、気泡の発生場所やポロシティとして残留する様子が本 X 線透過像から観察できるが、画面の解像度が十分でないため、キーホール先端でどのような現象が起こり、何が原因となって気泡が発生するかを明らかにすることはできない。

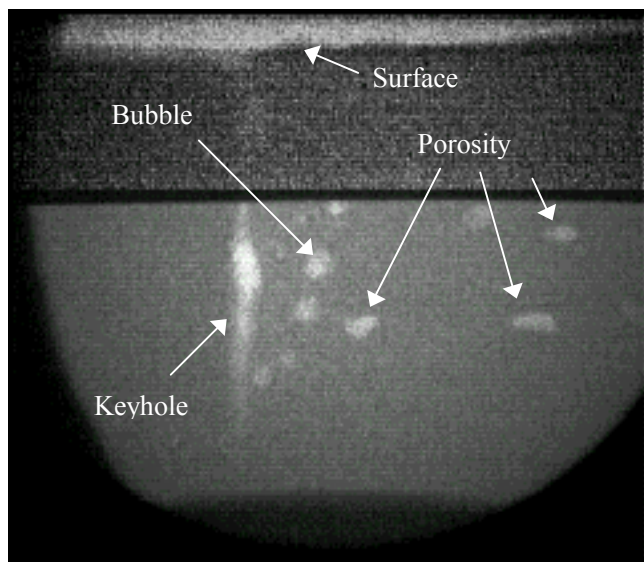


Fig. 3 X-ray transmission image of keyhole, bubble and porosity.

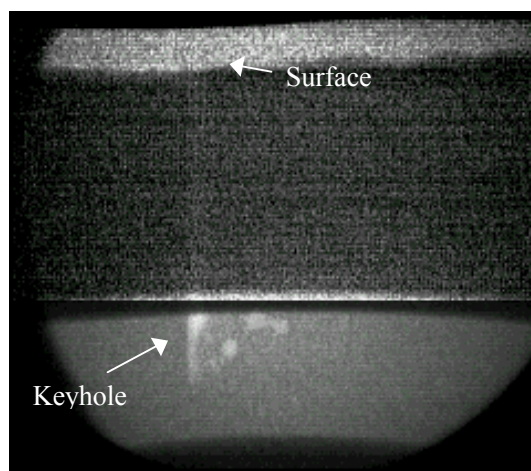


Fig. 5 X ray transmission image of narrow sample to get clear image.

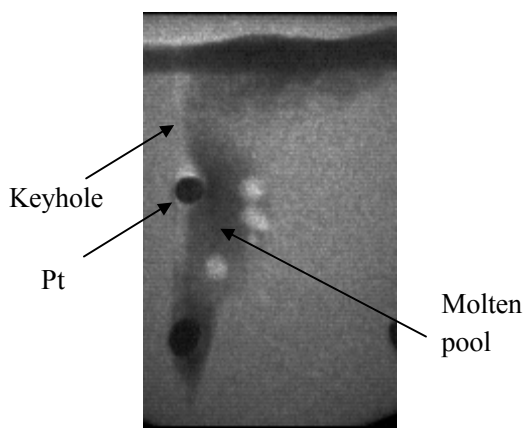


Fig. 4 Molten pool shape.

そこで、Fig.2 (b)に示すようにキーホール先端部付近のみ幅を4mmまで狭くした試験片を用いて気泡形成過程の観察を行った。その結果、Fig.5に示すように、先端付近のキーホール挙動をより明瞭に観察することが可能となった。この観察方法を用い、まず、キーホール深さと欠陥の発生時期との関係を調べた。その結果をFig.6に示す。本実験は出力一定のもとで溶接を行っているにもかかわらず、キーホール深さは、14~24mmの範囲で大きく変動している。この変動幅は最大溶込み深さの約40%にも相当しており、溶接時には、縦断面で通常観察されるスパイクと比べてはるかに大きいキーホール深さの変動がある。気泡の発生は、このようなスパイク現象と密接に関係する。図中には、気泡が発生した時点を矢印で示したが、いずれの場合もキーホールが急激に浅くなる時点で気泡が発生することがわかる。

次に、気泡が発生する過程をキーホール先端付近のみ拡大したX線透過像により観察した。その結果をFig.7に示す。キーホール深さが最も深いFig.7(a)の状態から急激に浅くなる過程で、キーホール先端付近にくびれが発生し(Fig.7(b))、この位置で溶融金属がキーホールを閉じることにより先端

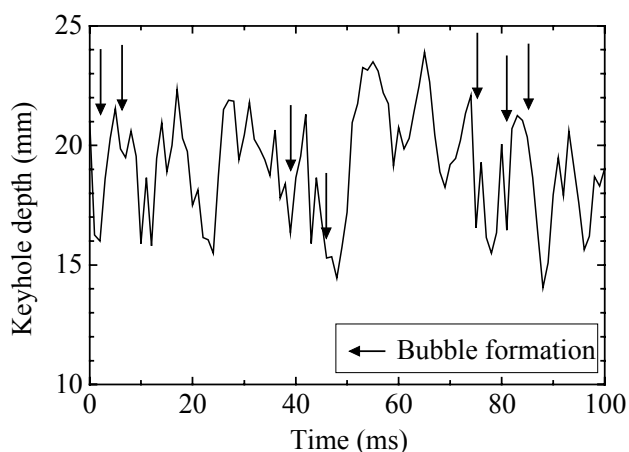


Fig. 6 Fluctuation in keyhole depth and bubble formation points.

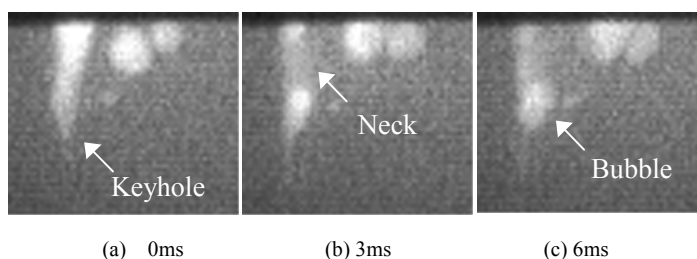


Fig. 7 Bubble formation in CW laser welding.

が分離し、気泡が形成されている。発生した気泡は、再びキーホールに吸収され消滅することもあるが、多くの場合後方へと流れ、互いに合体することにより大きく成長する。

このように気泡の発生機構は、分解能を上げて撮影すると、気泡がキーホール前面からの強い蒸発により発生するのではなく、先端付近で溶融金属がキーホールを閉じることにより発生することがわかる。

3.2 気泡の形成機構

以上示したキーホール先端が熔融金属によって閉じる現象は、細長いキーホールの不安定現象により説明できる。細長い円柱状の液体の不安定性については、古くから物理学の分野で解析されており、液柱の長さが断面の円周 ($2\pi r$, r : キーホールの半径) 以上になると不安定現象を起こすことが知られている⁸⁾。その結果、液柱にはくびれとふくらみが形成され、くびれ部から液柱が分断される方向に力が働く。また、このときにくびれの成長速度は、熔融鉄のように表面張力が十分に大きい場合、 $2.9\pi r$ の長さで最大となる⁹⁾。X線透過像からキーホール半径を測定すると約 0.5mm であり、深さが 20mm あるキーホールは十分に不安定な状態にある。このため、溶接中キーホールには Fig.8 に示すようにくびれが形成されるが、キーホール内部には高パワー密度のレーザーが存在するため、くびれが生じた位置にレーザーが照射され、このエネルギー密度がある臨界値以上である場合、蒸発時の反跳力によりくびれの部分が拡大し、キーホールが維持される。このように、キーホール内部で熔融金属とレーザーの相互作用が繰り返されることにより、キーホールは径方向に振動しながらその形状を保つ。しかしくびれ部にレーザーが照射した時点では、レーザーのエネルギーがくびれ部の加熱により消費されると共に、局部的に加熱されたくびれ部から発生する金属蒸気によるプラズマを形成し¹⁰⁾、発生したプラズマにレーザーが吸収される。その結果、キーホール先端に到達するレーザーのパワー密度が低下し、これがキーホールを維持するための臨界値以下になった場合、先端が不安定現象により分離し、Fig.7 に示したように気泡が形成される。

このような現象は、レーザー出力を急激に低下させることにより再現できる。Fig.9 は、レーザー出力を 20kW から 8kW に急激に減少させ底部におけるパワー密度を急激に減少した時のキーホール挙動を示す。出力が急激に低下した (b) の時点でキーホールにくびれが発生し、そのくびれの部分を起点として、(c) のようにキーホールが分断されることが分かる。以上のように、気泡は先端における急激なパワー密度の低下によって不安定現象がおこることにより発生する。またキーホール底部におけるパワー密度の低下が上部で発生するキーホール変動に起因するため、キーホールの径方向への振動が大きくなるほどポロシティが発生しやすくなると考えられる。

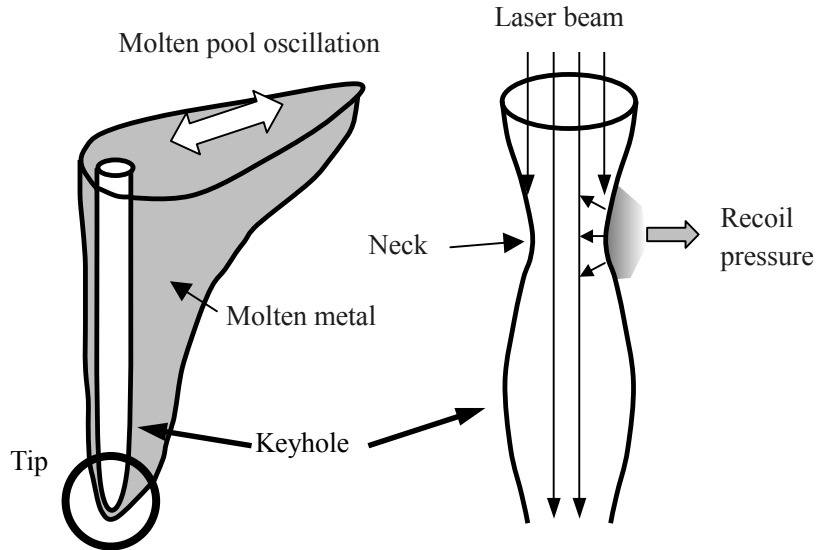


Fig. 8 Fluctuation in keyhole depth and bubble formation.

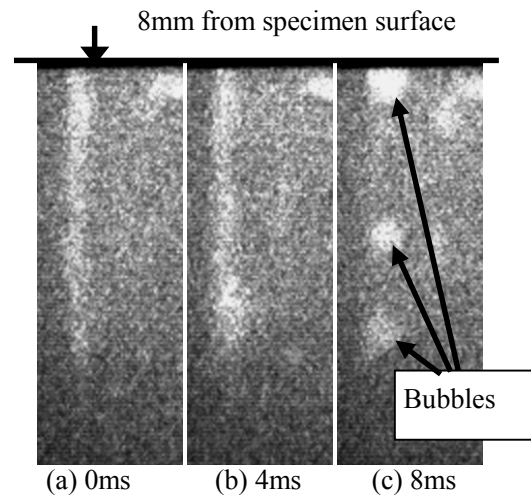


Fig. 9 Bubble formation during abrupt decrease in laser power from 20kW to 8kW.

3.3 キーホール変動とポロシティの発生

前報²⁾では、ポロシティの発生に及ぼす焦点位置の影響を調べ、焦点位置が試験片内部にある場合にポロシティが最も発生しにくく、上部へ移動する、すなわち上焦点になるに従ってより顕著に発生することを報告した。この原因を明らかにするため、各種焦点位置のもとで、溶接中のキーホール挙動を観察した。その結果、上焦点になるほどキーホールの径方向への変動が大きくなる傾向が見られた。Fig.10 は焦点は少し距離 f_d が +15mm の時の X 線透過像を示すが、キーホールが大きく変動し、その結果多数の大きなポロシティが発生していることがわかる。3.2 で述べたように、キーホールの径方向への振動が大きくなるほどキーホール先端で不安定現象が起こりやすく、その結果、ポロシティが発生しやすくなると考えられるため、各種焦点位置のもとでキーホールの径方向への振動を、X 線透過像から評価した。

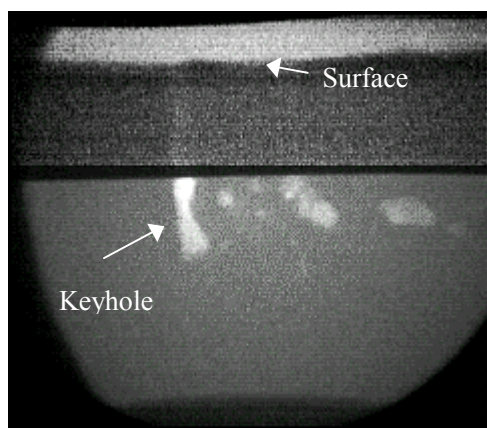


Fig. 10 Keyhole behaviour and bubble formation for upper focusing condition ($f_d=+15\text{mm}$).

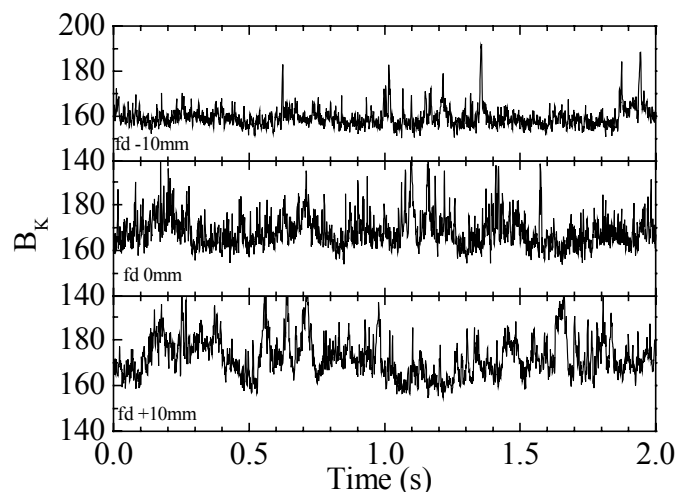


Fig. 12 Effect of focal position (f_d) on keyhole fluctuation.

B_K : Integral brightness in the rectangle

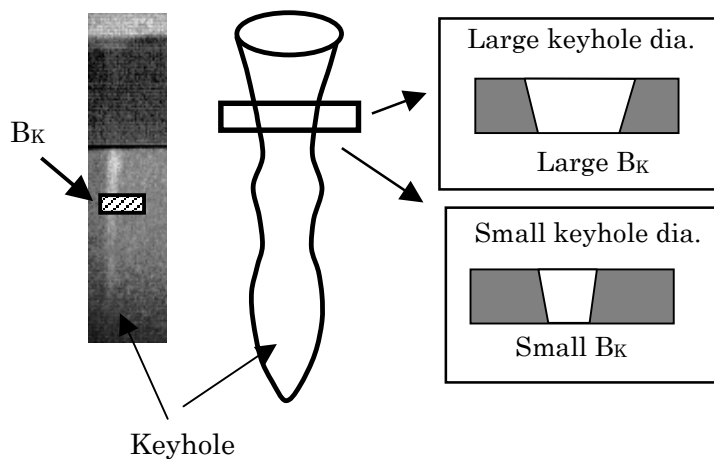


Fig. 11 Evaluation of keyhole fluctuation.

Fig.11 にその方法を示す. X線透過像の各フレームにおいて、試験片表面から 8mm の位置で、キーホールと直行する縦 7 ピクセル、X 横 15 ピクセル(縦 1mmX 横 2.2mm)の矩形領域を選択し、この矩形内の輝度の積分値 B_K を計測する. X 線透過像ではキーホールが白く、それ以外の部分はグレーに撮影されるため、 B_K はおおそキーホール径に比例した値となる. そこで、 B_K の時間変化を計測することにより、キーホールの径方向への振動の大きさを評価した. 各種金属材料に基本波パルス YAG レーザ単独照射と異波長レーザ重畳照射を行い、溶融池とキーホール開口部の生成状況を高速度ビデオカメラで観察した.

Fig.12 に各種焦点位置のもとで計測した B_K の時間変化を示す. B_K の変動が焦点位置に依存し、上焦点になるほど変動が大きくなる様子がわかる. これをより定量化するために、 B_K の標準偏差 σ_{B_K} を用いて B_K の変動のばらつきを評価し、ポロシティ発生率と比較した. その結果、Fig.13 に示すように、 f_d がマイナス側からプラス側へと増加するに従い、 σ_{B_K} が増加する、すなわちキーホール径の変動が大きくな

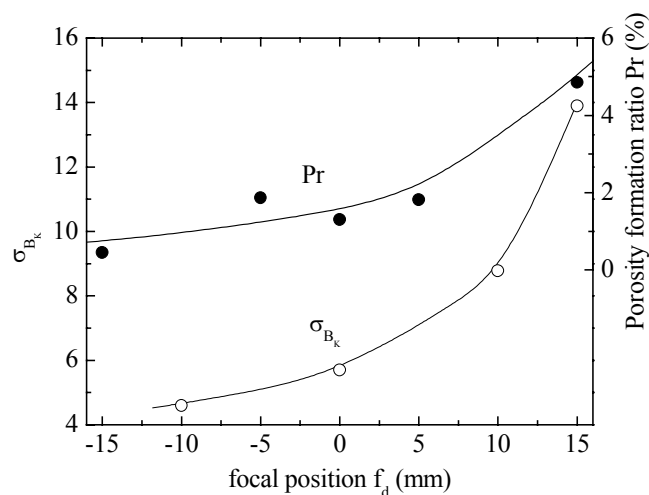


Fig. 13 Effect of focal position on σ_{B_K} and Pr.

る傾向が認められた. 本実験においては、溶込み深さが 15 ~ 23mm の範囲にあるため、焦点位置が約 10mm 程度試験片内部に入った状態でキーホール内部における平均パワー密度が最も大きくなる. したがって Fig.13 の結果は、キーホール内部におけるレーザのパワー密度が大きくなるほど、変動の小さい安定したキーホールが形成されることを意味している. キーホールの安定性がパワー密度に依存する原因については定量的な説明が明確にはできないが、ポロシティ発生率 Pr は σ_{B_K} と良く対応しており、 σ_{B_K} が大きくなるほどポロシティが発生しやすくなる. したがって、ポロシティが上焦点においてより顕著に発生したのは、キーホール内部におけるパワー密度が小さくなるに従い、キーホールの径方向への振動が大きくなったためと考えられる.

以上述べたように、キーホールの径方向への振動が大きくなるほどポロシティが発生しやすくなる. キーホール内部のパワー密度を増加させるとより安定したキーホールが形成されるようになるが、 $f_d=10\text{mm}$ の条件でも多数のポロ

シティが観察され、深溶込み溶接においては溶接条件の最適化のみではポロシティの防止ができない。したがって、キーホールをより安定化する制御法を確立することが必要である。

4. 結 言

本報告では、大出力レーザ溶接による深溶込み溶接時のキーホール挙動を X 線透視法により高速度撮影し、ポロシティの発生機構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) 深溶込みレーザ溶接においては、一定出力のもとで溶接を行っても、キーホール深さが約 40%程度ランダムに変動する。ポロシティの原因となる気泡の発生はこの深さ変動と密接に関連し、キーホールが急激に浅くなるときのみに、キーホール先端から気泡が発生する。
- 2) 気泡は、キーホール先端付近で不安定現象が起こり、溶融金属がキーホールを閉じることにより発生する。
- 3) キーホールの径方向への振動が大きくなるに従い、先端で不安定現象が起こりやすくなり、その結果ポロシティが発生しやすくなる。
- 4) 焦点位置が試験片内部から上部に移動するに従い、キーホール径方向への振動が大きくなり、ポロシティが発生しやすくなる。キーホール内部のパワー密度とキーホールの径方向への振動の相関が認められた。
- 5) ポロシティの発生を防止するためには、キーホールの径方向への振動を抑制することが重要である。

参 考 文 献

- 1) M.Kutsuna: Recent Laser Equipments and its Application, Welding Technology, 52-1(2004), 74-81. (in Japanese.)
- 2) I.Kawaguchi, S. Tsukamoto, H.Honda, G. Arakane: Characteristics of High Power CO₂ Laser Welding and Porosity Suppression Mechanism by Nitrogen Shield, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 23-2 (2005), 259-264 (in Japanese.)
- 3) A. Matsunawa, Kim J. D., N. Seto, N. Mizutani and S. Katayama: Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding., Journal of Laser Application Vol.10 : 2000 ; 247-254.
- 4) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behaviour during high power CO₂ laser welding., Proceedings of ICALEO'99., Nov.15-18, 1999, San Diego, USA, E19-27.
- 5) S. Katayama, N. Seto, M. Mizutani and A. Matsunawa: Formation Mechanism of Porosity in High Power YAG Laser welding., Proceedings of ICALEO 2000., Oct.2-5, 2000, Dearborn, USA, Vol.89, C16-25.
- 6) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: Porosity Formation Mechanism and Suppression Procedure in Laser Welding of Aluminum Alloy, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 18-2, (2000), 243-255 (in Japanese)
- 7) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: Porosity Formation Mechanism and Reduction Method in CO₂ Laser Welding of Stainless Steel, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 19-4, (2001), 600-609 (in Japanese)
- 8) J.W.S. Rayleigh : THE THEORY OF SOUND, Vol.2. New York : Dover Publications, 1945.
- 9) S. Chandrasekhar : Hydrodynamic & Hydromagnetic Stability, Oxford Clarendon Press, 1961.
- 10) S. Tsukamoto: Laser Induced Plasma, Journal of Japan Laser Processing Society, 8 (2001), 37-41 (in Japanese)