

溶接時のポロシティ生成機構は、アルミニウム合金での著者ら^{9,10)}の解釈とは異なるようである。

そこで、本研究では、ステンレス鋼レーザ溶接時のポロシティ生成機構を明確にし、ポロシティ低減に対する知見を得るため、マイクロフォーカスX線透視映像装置^{9,10)}を用いて、ステンレス鋼 SUS 304 の CO₂ レーザ溶接時におけるキーホール挙動と気泡およびポロシティの生成状況をリアルタイム観察した。また、湯流れや溶融池形状の可視化も試み、気泡の流動と溶融池内の湯流れとの関連性についても検討した。さらに、溶接部のX線透過試験、溶接金属部中のポロシティの内面観察と成分分析およびポロシティ内部のガス成分分析を行い、ポロシティの生成傾向、生成原因および生成機構を明確にした。それを基に、He ガス中での貫通溶接および前進部分溶込み溶接ならびに窒素ガス中の部分溶込み溶接を行い、これらの溶接法が気泡およびポロシティの防止・抑制に有効であることを確認した。

2. 使用材料と実験方法

レーザ溶接中のキーホール挙動と気泡およびポロシティの生成状況をリアルタイム観察するために、マイクロフォーカスX線透視映像装置(最大160 kV, 1 mA)^{9,10)}を用いた。本装置の平行銅線での分解能は0.35 mm 以上である。実験では、約0.4 mm 以上の気泡およびポロシティが観察でき、また、約0.2 mm 以上のW粒子の流動が観察できた。なお、板厚が薄い方が小さい欠陥まで観察できる。本

装置と撮影方法、レーザ装置とその溶接条件などは前報¹⁰⁾と同様である。

使用材料は最も一般的なステンレス鋼 SUS 304 (C : 0.07%, Si : 0.47%, Mn : 0.83%, P : 0.026%, S : 0.004%, Ni : 8.67%, Cr : 18.11%) (6~10^t×50^w×100^l mm) であり、板厚は6または10 mm である。試料はX線が透過できるように透過方向に薄い形状 (10 mm 以下) を採用した。溶融池内の湯流れ観察用には、直径約0.2~0.5 mm のタングステン (W) 粒子を突合せ部に挟む試料を作製した。また、溶接時の溶融池形状の可視化用には、試料表面にドリルで穴を明け、白金 (Pt) 針金を挿入したものを準備した。

溶接ビードの観察装置と方法、X線透過試験装置とポロシティの形成状況の観察方法、ポロシティ内面観察用の SEM とその観察方法、ガス分析装置と方法などは、前報¹⁰⁾と同様である。

3. 実験結果および考察

3.1 キーホール挙動およびポロシティ生成状況のリアルタイム観察結果

SUS 304 (10^t×50^w×100^l mm) を用いて、He ガス中、出力10 kW で CO₂ レーザによる部分溶込み溶接および貫通溶接を行った。それぞれで得られた溶接ビードの表面、横断面および横方向からのX線透過試験結果を Fig. 1 に

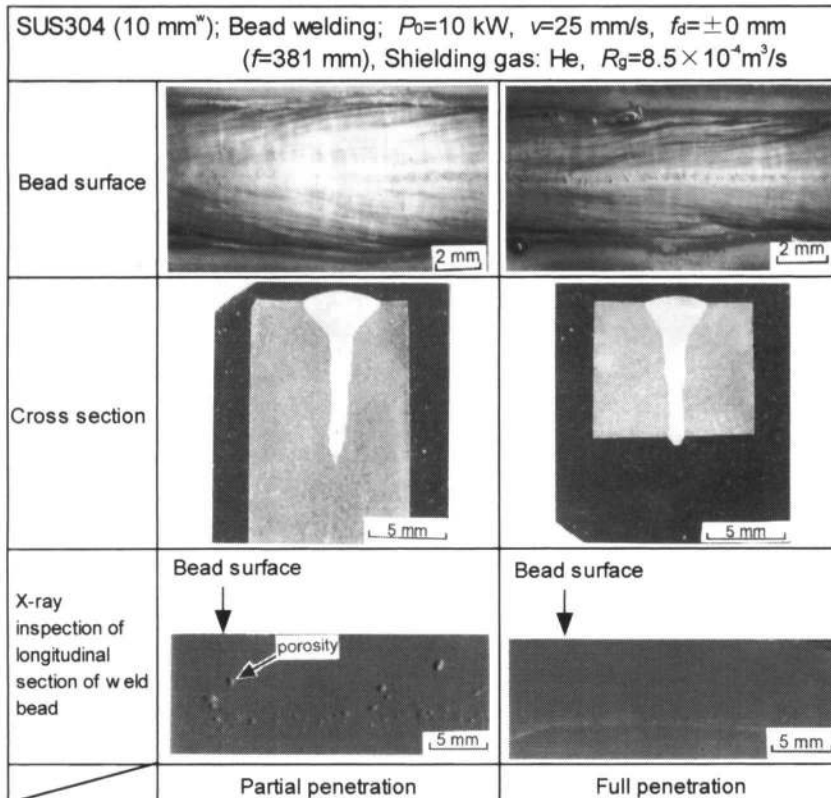


Fig. 1 Comparison of bead surface, cross section and X-ray inspection photos between partially and fully penetrated weld beads of stainless steel.

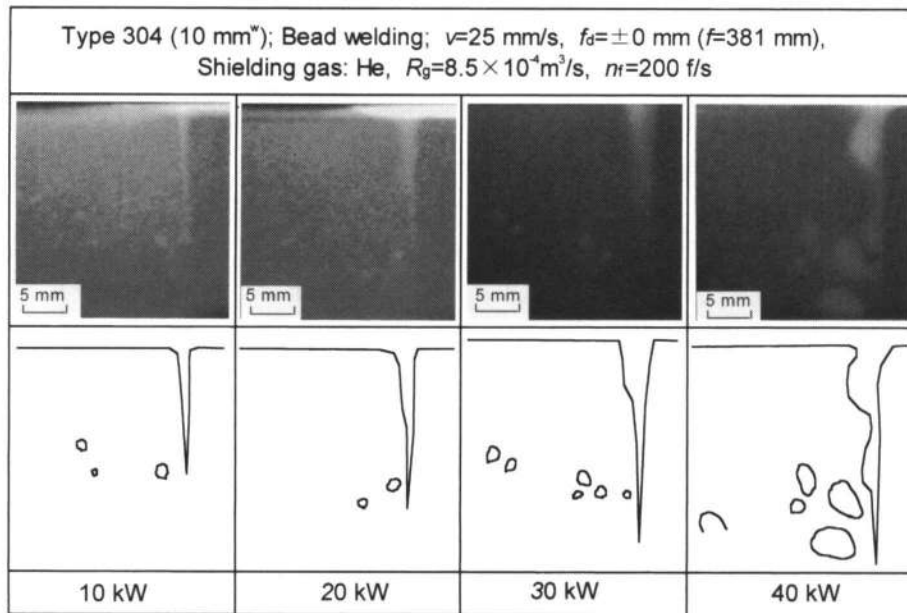


Fig. 2 X-ray transmission real-time observation results and schematic drawing of keyhole and bubble formation behavior during CO₂ laser welding of stainless steel at 10 to 40 kW, showing effect of laser power on keyhole and bubble formation behavior.

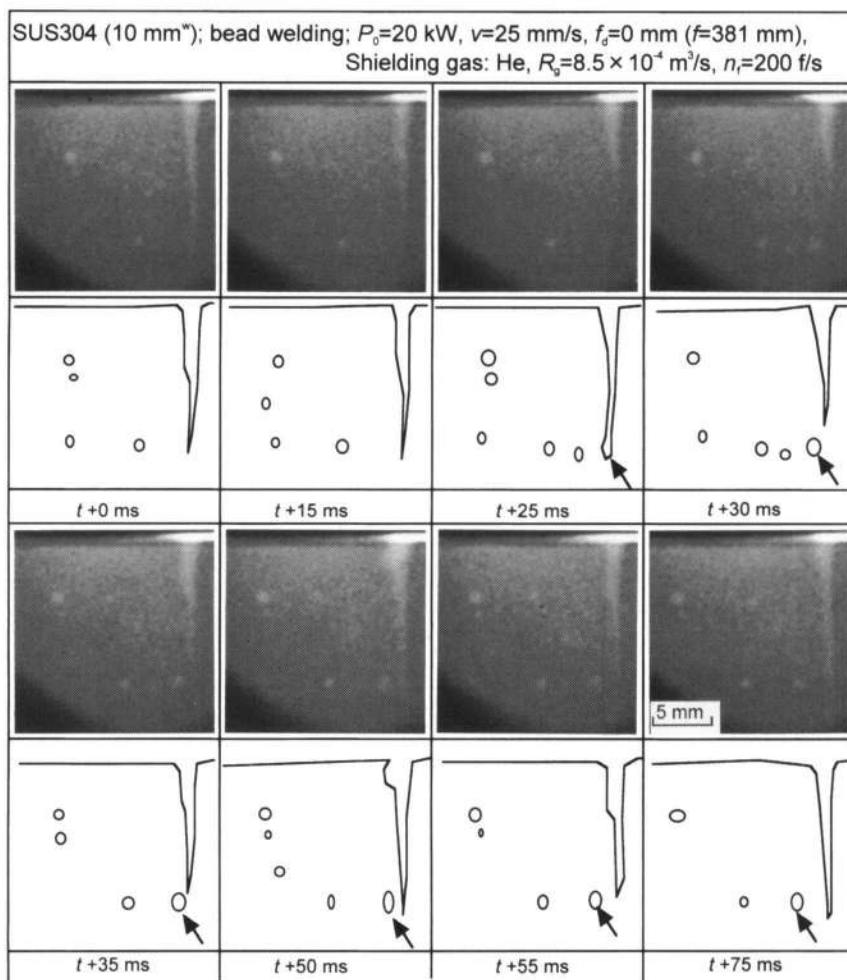


Fig. 3 Typical example of keyhole and porosity formation behavior with schematic drawing of X-ray transmission observation of keyhole and porosity formation behavior during CO₂ laser welding of stainless steel at 20 kW.

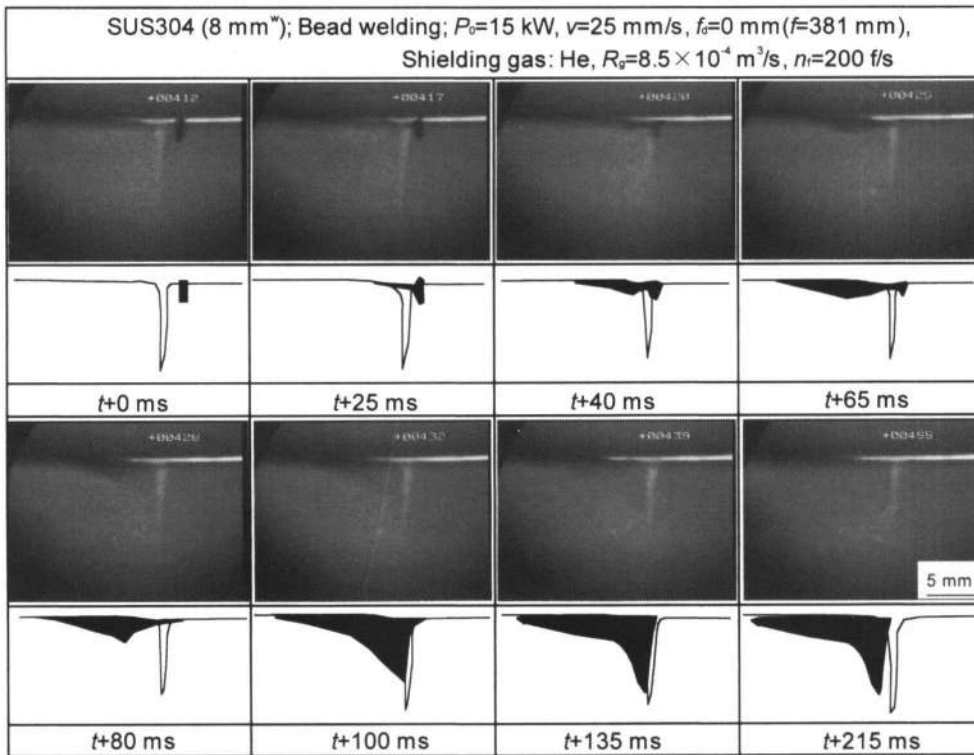


Fig. 4 X-ray transmission images and their schematic drawing during CO₂ laser welding of Type 304 steel plate using Pt wire, showing spread of Pt melting to define weld pool geometry.

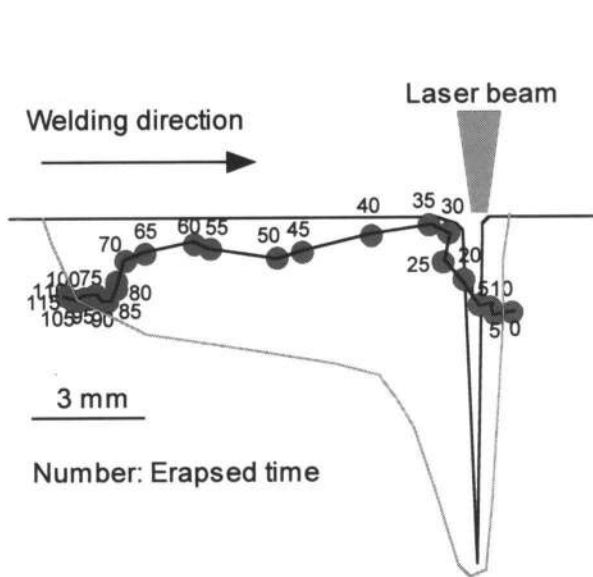


Fig. 5 Measured movement of W particle inside molten pool of Type 304 steel, indicating typical liquid flow near upper part of molten pool.

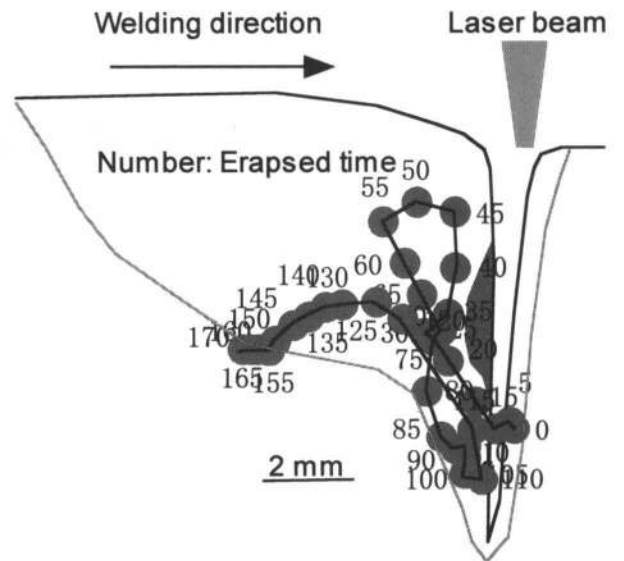


Fig. 6 Measured movement of W particle inside molten pool of Type 304 steel, indicating typical liquid flow observed at the bottom part of the weld pool of stainless steel.

湯流れは、前報¹⁰⁾で明らかにしたアルミニウム合金の場合とは若干異なるようである。気泡の動きは、溶融部底部近傍での湯流れと酷似していることから、湯流れによって輸送されていると判断された。

3.3 ポロシティ内部の観察とガス分析

ポロシティの生成機構を明確にするために、ポロシティ内壁のSEM観察を行い、さらに、ポロシティ内部に残っているガス成分のQ-mass分析を行った。

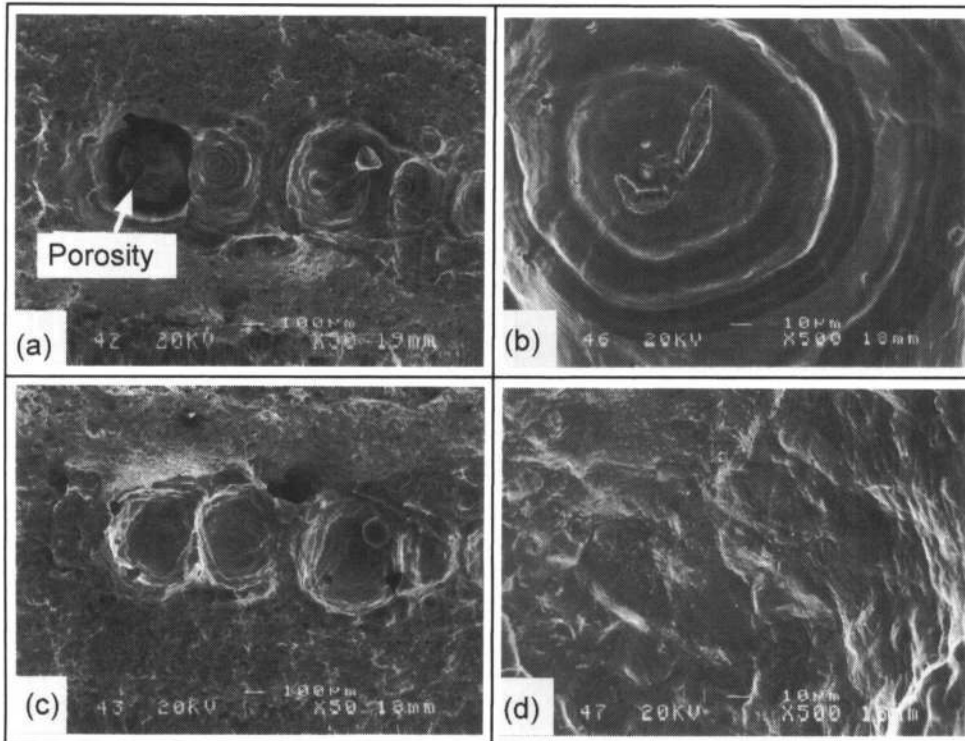


Fig. 7 SEM photos of fractured surfaces [(a), (c)] and porosity surface [(b), (d)] in Type 304 laser weld bead produced at 10 kW in He gas.

SUS 304のCO₂レーザ溶接部の強制破断面をSEMで観察した写真をFig. 7に示す。(a)と(c)は対応面を低倍率で示している。ポロシティ内壁には、凸凹とざらざらした様子が見られ、融液が流れ込んだ痕跡も認められる。これは、ポロシティとなる気泡の内部には金属蒸気が多く存在しており、ポロシティとして凝固した際にポロシティ内壁において金属蒸気が凝固するために内壁がざらざらとなり、十分に凝固していない部分などから、溶融池から融液が流れ込んできたためと考えられる。

次に、ポロシティ内部に残留するガス成分について、真空中Q-mass分析法で測定した。SUS 304をHeシールドガス、レーザ出力10 kWおよび溶接速度25 mm/sで溶接した試料に残存するポロシティの位置をX線透過試験で予めマークしておき、その位置を真空中でドリルを用いて切削し、ポロシティ内から放出されるガスをQ-massで分析した。その結果、ポロシティ内のガス成分として、HeおよびH₂がそれぞれ約40%および60%検出された。この結果より、ポロシティ内にはシールドガスのHeが巻き込まれていることが明らかになった。その他の気体としてH₂が多く含まれているが、これは、主に、溶接終了後に材料内を拡散してきた水素であろうと考えられる。なお、O₂、N₂、Arなどの大気成分はまったく検出されなかった。

3.4 キーホール溶接時のポロシティの生成機構

以上の観察・分析結果より、ステンレス鋼のポロシティ

生成機構を模式的にまとめてFig. 8に示す。レーザの照射によって激しい蒸発が起これ、その蒸発反力で深いキーホールが形成される。このキーホールは膨張・収縮を繰り返す、非常に不安定であり、その内部には金属蒸気が充満しているが、キーホール前壁や底部での蒸発が溶融池内に起これ、プラズマ・ブルームの噴出が少ないときには、吹き付けているシールドガスが巻き込まれる場合があると推察される。左図に示す主挙動では、キーホール先端部は溶接方向に対してやや後方に曲がり、溶接方向のキーホール先端部前面で激しい蒸発が起これると、その反対側の溶融池が窪み、気泡が溶融池後部へ押し出されるような形で形成する。気泡には金属蒸気と共に不活性シールドガスも極僅かに含有される。この気泡は溶融池内を少し移動してから凝固壁にトラップされ、ポロシティとして残留する。また、右図に見られるように、レーザパワーが高い場合やレーザの焦点が試料内部にある場合、一部、キーホールの中間部から気泡を生成することがあった。これは、キーホール中間部前壁で激しい蒸発が起きた場合に、キーホール後壁を押し上げて気泡を形成し、この気泡が凝固壁でトラップされ、ポロシティとなることが確認された。このように、ステンレス鋼のレーザ溶接時におけるポロシティの生成機構は、アルミニウム合金のレーザ溶接時におけるポロシティ生成機構¹⁰⁾と同様であり、主にキーホール先端で発生した気泡がポロシティの原因であることが明らかになった。なお、溶融池底部は、湯流れがアルミニウム合金の場合ほど

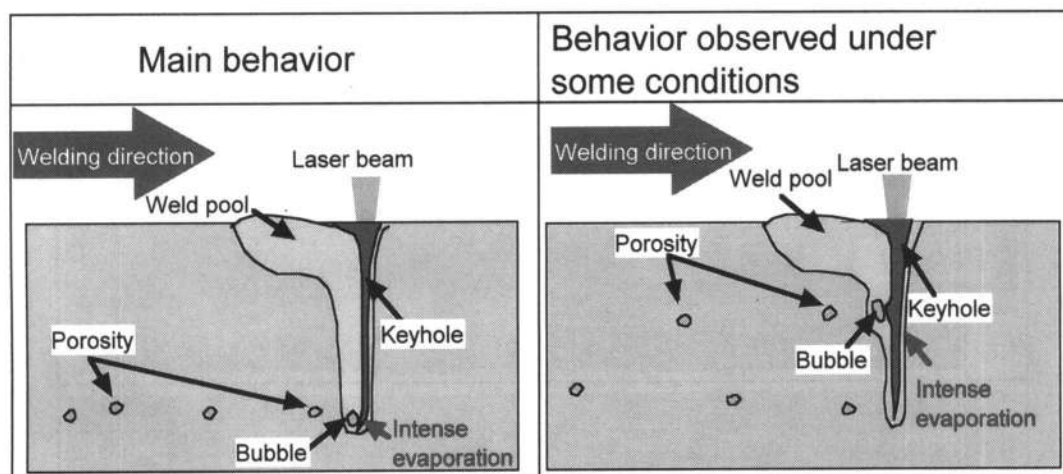


Fig. 8 Schematic representation of porosity formation mechanisms in stainless steel.

広範囲に起こらないため、狭く、また、気泡の浮上も少ないことが判明した。このため、ポロシティは溶接ビードの中間部から底部に多いことがわかった。

3.5 ポロシティの低減・抑制法に関する知見

貫通レーザ溶接部にはポロシティがほとんど生成していないことから、その溶接現象をX線透視リアルタイム観察を行った。その結果の一例を Fig. 9 に示す。貫通溶接の場合、キーホール先端が貫通して裏面に抜けているため、この部分からの気泡の発生がなく、ポロシティが生成しにくいことがわかる。この結果より、貫通溶接でポロシティが生成しない理由は、気泡が本質的に生成されないためであり、生成した気泡が溶融池の裏面から消失するためではないことが明確になった。

次に、レーザの入射角を変化させて、前進または後進の部分溶込み溶接を行い、ビームの入射角の作用によるポロシティ低減の可能性について検討した。

SUS 304の前進または後進溶接ビードのX線透過試験結果を各入射角に対してまとめたものを Fig. 10 に示す。図の左側が後進溶接で右側が前進溶接である。それぞれの溶接方法のX線透視リアルタイム観察を行い、確認された状況を模式図として上側に示す。後進溶接では、角度の増加に伴ってポロシティが多くなっている。この場合、キーホール先端部から気泡がより多数発生する様子が観察され、キーホール先端部での（壁面に対してほぼ垂直方向に起こる）蒸発が溶融池内部方向により起こりやすくなったためと考えられる。一方、前進溶接では、逆に角度の増加に伴ってポロシティが減少している。この場合、キーホール先端部での気泡の発生が少なくなる状況と発生した気泡がキーホール内に消失しやすい状況が観察された。したがって、前進溶接では、キーホール先端部での蒸発が、溶融池の底部方向へ起こり、溶融池が気泡を発生するほど変形しなかったことと、さらに、角度が大きい場合、発生した気泡

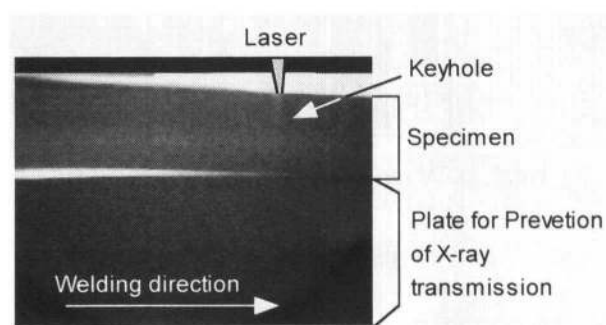


Fig. 9 Typical X-ray transmission image of full penetration welding of stainless steel.

がキーホール内に戻りやすくなったことが推察される。

以上の結果より、ポロシティの低減に前進溶接が有効であることが確認された。

さらに、N₂シールドガスによるポロシティ低減の可能性について検討した。N₂ガス中でのレーザ溶接部のX線透過試験結果および溶接中のX線透視観察像の一例を He ガスの場合と比較して Fig. 11 に示す。He ガスの場合、ポロシティが多く残るが、N₂ガスシールドでは、ポロシティがほとんどないことがわかる。N₂ガスの場合、上部が広く、底部が細いキーホールの生成が見られた。実際には、CO₂レーザとNプラズマの相互作用により、パルス的なレーザ溶接が行われている¹⁵⁾。そして、ポロシティの生成が少ないのは、キーホール先端部からの気泡の発生がほとんどないためであることが明らかとなった。これは、主に、気泡の発生しないパルス変調的なレーザ溶接が行われているため¹⁰⁾と考えられる。なお、ステンレス鋼のレーザ溶接では、蒸発した金属蒸気（特にCr元素）がキーホール内に取り込まれたNガスと反応してキーホール内のNガス量が低下することやキーホール内に侵入したNはキーホール壁面でステンレス鋼の溶融池内に固溶されること¹⁶⁾が測

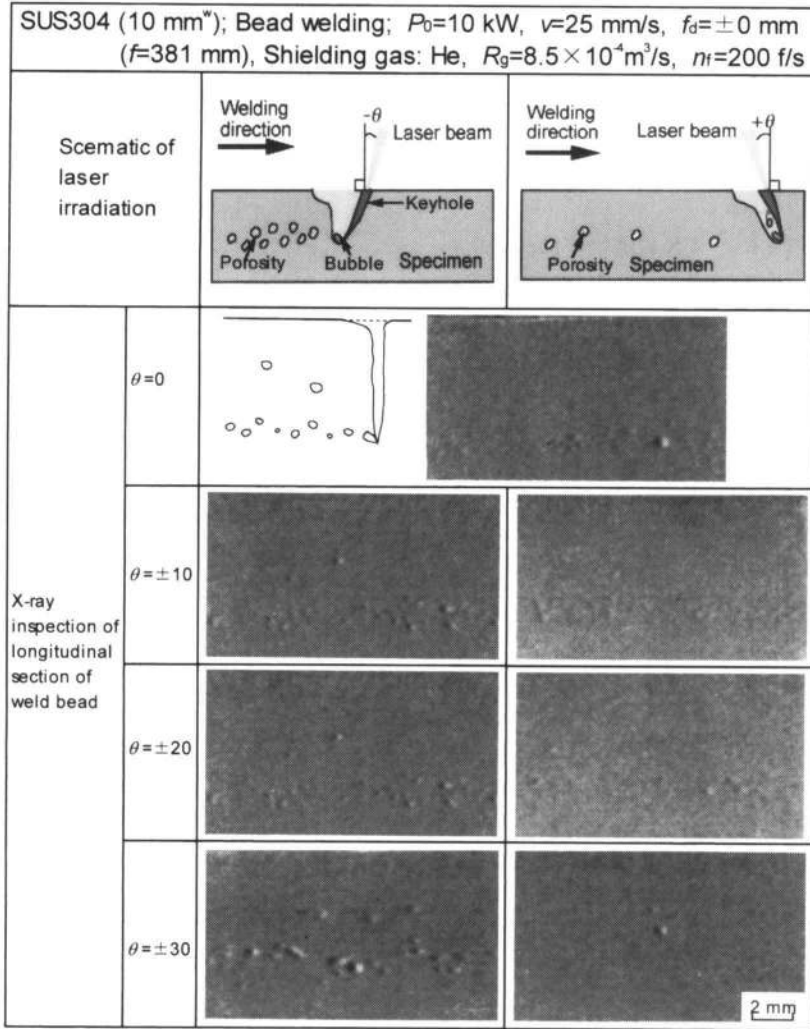


Fig. 10 X-ray inspection results and schematic drawing of forward and backward welding made at different beam angles in stainless steel, showing influence of laser beam inclination angle on porosity formation.

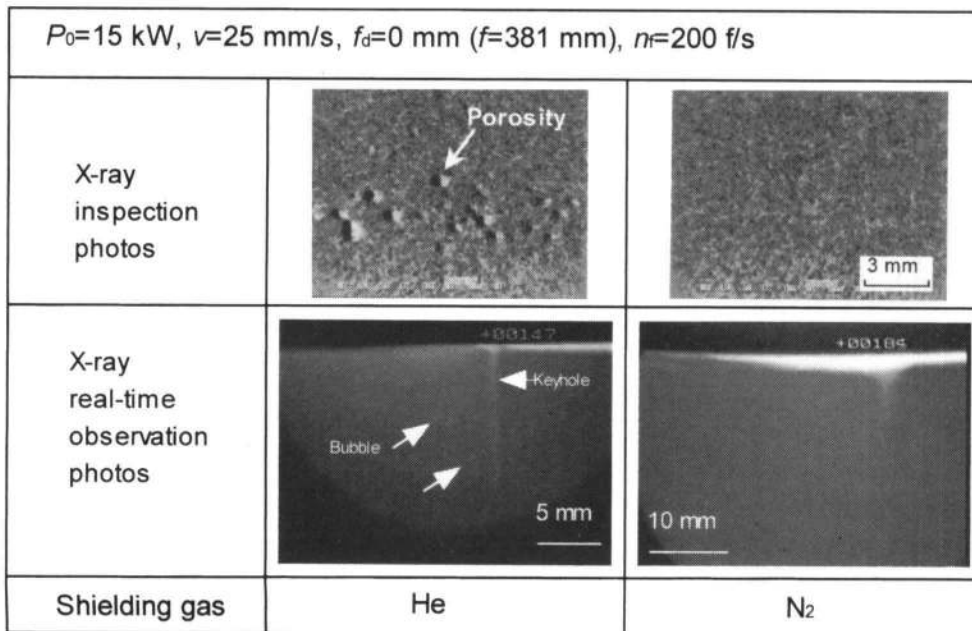


Fig. 11 Comparison of X-ray inspection and real-time observation results of porosity formation in Type 304 laser welds produced between helium and nitrogen shielding gases, showing effect of N₂ gas on porosity suppression.

