高出力・高輝度レーザーを用いたステンレス鋼及びアルミニウム合金の 部分溶込み溶接における減圧雰囲気の影響*

阿部 洋平**, 川人 洋介***, 中村 浩****, 西本 浩司*****, 水谷 正海***, 片山 聖二***

Effect of Reduced Pressure Atmosphere on Partial Penetration Welds of Stainless Steel and Aluminum Alloy with High Power and High Brightness Laser*

by ABE Youhei**, KAWAHITO Yousuke***, NAKAMURA Hiroshi****, NISHIMOTO Koji*****,
MIZUTANI Masami*** and KATAYAMA Seiji***

Deep penetration is an important advantage in laser welding. This study was undertaken in order to investigate effect of reduced-pressure atmosphere from 0.1 kPa to ambient pressure (101 kPa) on partial penetration welding. A 16 kW disk laser of 1030 nm in wavelength was employed and Type 304 stainless steel and A5052 aluminum alloy was met-run welded in 17-mm/s welding speed. The penetration depths of the stainless steel and the aluminum alloy achieved 26 and 23 mm, respectively, at vacuum pressure of 10 kPa. The depths were over 1.6 times as deep as those obtained at 101 kPa. Decrease of boiling temperature calculated on the basis of the reduced-pressure atmosphere coincided with an increase of the penetration depth. At less than 1 kPa, however, the penetration depth in steel was kept 26 mm steady and it in aluminum decreased to 19 mm. Refraction angle caused by a laser-induced plume measured with a 532 nm-wavelength probe laser beam was drastically reduced corresponding to surrounding pressure of 101 to 0.1 kPa. According to observation of the keyhole inlet with high-speed video camera, its size in steel decreased and stabilized with the pressure reduction, which indicate that reduced-pressure atmosphere made an incident laser beam focused stably with little influence of the plume and led to the stable keyhole inlet. On the other hand, the keyhole inlet in aluminum expanded more than quadruple of the ambient-pressure inlet size at 1 and 0.1 kPa, which seems to make such an unstable process that the weld penetration was reduced.

Key Words: disk laser, stainless steel, aluminum alloy, reduced-pressure atmosphere, penetration depth, laser-induced plume, keyhole inlet.

1. 緒 言

深溶込みはレーザー溶接の長所である。近年開発された高出力・高輝度レーザーであるディスクレーザおよびファイバーレーザは、高出力でビーム品質が優れるため、キーホール生成に必要とされるパワー密度 (50 kW/mm² 以上)¹⁾が入射レーザー方向に対し広範囲に実現でき、厚板のレーザー溶接熱源として期待される。また、減圧雰囲気下におけるレーザー溶接は溶込み深さが改善されることが報告されている²⁻⁵⁾。炭酸ガスレーザーを用いたステンレス鋼 SUS304 の溶接では、13 kPa 減圧雰囲気下、レーザー出力 20 kW、溶接速度 5 mm/s の条件で、大気圧下の 2.5 倍程度に相当する 45 mm 溶込み深さが得ら

れている²⁾。また、溶融池の安定性およびレーザー誘起ブルームが溶接結果に影響することが報告されている³⁾。YAG (Ytterbium aluminum garnet) レーザ溶接の報告では、0.4 kPa の減圧雰囲気下、3 kW レーザ出力の条件で、SUS304 ステンレス鋼は大気圧下の 1.3 倍、A5083 アルミニウム合金は 2.8 倍に相当する溶込み深さが得られ、ポロシティの低減が確認されている⁴⁾。しかしながら、レーザーの種類、材料、減圧雰囲気、溶接条件によって溶込み深さの改善に違いがあり、減圧雰囲気が溶込みおよび溶接現象に対する影響について十分に明らかにされていないのが現状である。

本研究では、高出力で優れたビーム品質 BPP (Beam parameter product) 8 mm*mrad を有する最大出力 16 kW のディスクレーザ (波長: 1030 nm) を用い、0.1 kPa の減圧雰囲気から大気圧 (101 kPa) に制御された空間において、ステンレス鋼 SUS304 およびアルミニウム合金 A5052 の厚板に対し、17 mm/s 溶接速度でメルトラン溶接を行い、得られた溶込み深さおよび形状を調べた。また、各減圧雰囲気でのレーザー誘起ブルームの状態観察および、ブルーム通過で可視光プローブレーザが屈折される角度計測を行い、ブルームによる光の伝搬特性への影響について評価した。さらに、各減圧雰囲気下におけるキーホール口およびその周囲の溶融池挙動を高速度ビデオで観察して溶接現象を明らかにし、減圧雰囲気と溶込みとの関係について検討した。

*受付日 平成24年8月23日 受理日 平成25年2月26日 平成22年度秋季全国大会で発表

**学生員 大阪大学工学研究科 (現 日立造船株) Student member, Graduate School of Engineering, Osaka University (Present Address Hitachi Zosen Corporation)

***正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

****正 員 大阪大学工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

*****正 員 阿南工業高等専門学校 Member, Anan National College of Technology

2. 供試材, 実験装置および実験方法

供試材は, オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 およびアルミニウム合金 A5052 で, サイズは $80 \times 50 \times 150$ mm であり, 各金属の化学組成についてまとめたものを Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions of stainless steel and aluminum alloy used.

(a) Type 304 stainless steel (mass%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.04	0.5	0.9	0.03	0.001	8.1	18.2	Bal.

(b) A5052 aluminum alloy (mass%)						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
0.1	0.26	0.02	0.05	2.4	0.22	Bal.

す。本研究で使用したレーザ発振器は, 最大出力 16 kW の連続発振型のディスクレーザ装置である。溶接状況を模式図的に Fig. 1 に示す。レーザ光は, 発振器からコア径 $\phi 0.2$ mm のファイバーによって伝送され, 焦点距離 1000 mm のレンズで, アクリル製のチャンパー内の供試材の表面に集光した。ステンレス鋼では, 垂直にレーザ, 高反射材であるアルミニウム合金では, レーザ戻り光防止のため 10 度傾けてレーザを照射し, レーザ出力 16 kW, 溶接速度 17 mm/s, 減圧雰囲気 0.1, 1, 10, 30, 50, 70, 101 kPa 下でメルラン溶接を実施した。供試材表面は焦点位置に置かれ, 入射レーザは, Fig. 2 に示すような集光特性および焦点位置でのビームプロファイルを有し, レーザスポット径は $\phi 0.5$ mm で, ガウス分布と仮定した場合のピークパワー密度は最大 160 kW/mm^2 である。減圧雰囲気下の実験では, チャンパー内部を所定の圧力にするため, 排気速度 3.5 g/s の 2 基および 11 g/s の 1 基のロータリー

Fig. 1 Schematic experimental setup for disk laser welding under reduced-pressure atmosphere.

Fig. 2 Focusing feature and beam mode profile at focus position.

ポンプを使用し、0.03 kPa 程度まで減圧後、窒素ガスを導入し、所定の減圧雰囲気に制御した。なお、入射レーザー光が通過する保護ガラスに、レーザー照射による供試材からの蒸発金属が付着するのを防ぐため、保護ガラスをチャンバー天井に高さ 500 mm を超える煙突部に設置した。また、保護ガラスの下部にシールドガスの導入口があり、蒸発金属の付着を妨げる方向に導入ガスの流れを設計している。101 kPa の大気圧下での実験では、供試材をチャンバーの外に出し、シールドガスとして窒素を溶接方向後方より45度の角度で、16 mm 径のサイドノズルを用いて 0.6 g/s で供給し、メルトラン溶接を行った。各溶接条件でのビード幅及び溶込み深さを調べるために、溶接長 120 mm の溶接ビード中央部および中央部から前後 20 mm 程度離れた位置の 3 断面においてビード形状を測定し、平均値を求めた。

各溶接条件でのプルームの発生状況を観察するため、デジタルハイビジョンカメラを用い、プルームを溶融池側面方向から 30 frames/s で撮影した。また、Fig. 3 に示すように、最大出力 200 mW の連続発振型半導体励起固体レーザー（波長：532 nm、スポット径：1.5 mm）をプローブレザーとして、水平方向からプルームを通過させ、プルームから 3.5 m 離れた位置に設置したスクリーン上に照射し、スクリーン上のプローブレザーのスポット位置を、高速度ビデオカメラを用いて 1000 frames/s で観察した。そして、スクリーン上のスポット位置に時間変化から、減圧雰囲気下のプルームによるプローブレザーの屈折挙動を定量的に評価した。具体的には、レーザー照射開始から 50 ms 毎の 140 駒の画像においてスポットの輝度重心位置を求め、屈折の方向とともに、原点からの距離をプルームとスクリーン間の距離で除したプローブレザーの屈折角 θ を求めた。

各溶接時のキーホール口および溶融池の挙動を観察するため、高速度ビデオを用いて、溶融池表面を 5000 frames/s で撮影し、溶融池表面の挙動と溶込み深さとの関係について検討した。なお、観察には、照明光源として半導体レーザー（最

大出力：30 W、波長：976 nm）を用い、干渉フィルター（中心波長：973 nm、半値幅：5 nm）を用いた。また、溶接方向のキーホール平均口径およびキーホール中心位置での平均溶融幅として、レーザー照射開始から 2.5 s までの 50 ms 毎に、キーホールおよび溶融池が明瞭に観察できた20駒の画像についての平均値を採用した。

3. 実験結果および考察

3.1 減圧雰囲気下におけるステンレス鋼とアルミニウム合金の溶込み

0.1 kPa の減圧雰囲気から大気圧までの様々な圧力下において、供試材表面をディスクレーザビームの焦点位置に設置し、16 kW 出力、17 mm/s 溶接速度で、メルトラン溶接を実施し、部分溶込み深さについて調査した。

ステンレス鋼 SUS304 に対し、0.1, 10, 50, 101 kPa 圧力下で得られた典型的なビード外観と溶込み断面の写真を Fig. 4 に示す。Fig. 4 が示すように、ビード幅は 101 kPa から 0.1 kPa に減圧するに伴い、6.1 mm から狭くなり、1.7 mm となり、ハンピングビードが形成された。なお、101 kPa のビード幅が 50 kPa よりも狭いのは、酸化状況から雰囲気中の酸素の影響が推察される。溶込み深さは、雰囲気圧の減圧に伴い、

Pressure [kPa]	101	50	10	0.1
Bead surface
Cross section
Bead width [mm]	6.1	6.5	3.4	1.7
Penetration [mm]	15	19	26	26

Fig. 4 Surface appearance and cross section of weld bead obtained in Type 304 stainless steel plates under each reduced pressure.

Fig. 3 Schematic experimental set-up for measurement of refraction angle in probe laser beam caused by laser-induced plume during welding.

Pressure [kPa]	101	50	10	0.1
Bead surface
Cross section
Bead width [mm]	12	8.9	8.5	5
Penetration [mm]	14	22	23	19

Fig. 5 Surface appearance and cross section of A5052 weld bead under each reduced pressure.

Fig. 6 Weld penetration depth as a function of boiling temperature calculated on the basis of reduced-pressure atmosphere.

大気圧下での 15 mm から増加し、10 kPa で 26 mm 最大溶込みに達し、大気圧下の溶込みと比較して、1.7 倍となった。しかしながら、2 桁減圧された 0.1 kPa 雰囲気下では、10 kPa での溶込みと比べ、顕著な深さの増加がないこともわかった。

アルミニウム合金 A5052 に対し、各雰囲気圧力下で得られたビード外観と溶込み断面の写真を Fig. 4 と同様に Fig. 5 に示す。溶接ビード幅は、圧力の低下に伴い細くなり、0.1 kPa では 5 mm となり、ステンレス鋼よりも 2.9 倍程度太く、ハンピングビードが形成されないことが確認された。溶込み深さは、雰囲気の減圧に伴い、大気圧下での深さ 14 mm から増加し、10 kPa で最大深さ 23 mm となり、大気圧下と比較して 1.6 倍となった。しかしながら、0.1 kPa で得られた溶込み深さは、最大深さよりも減少し、19 mm となった。また、溶接欠陥ポロシティに関しては、50 kPa 以上の圧力では存在したが、10 kPa 以下では確認できなかった。

雰囲気が減圧されると、ステンレス鋼およびアルミニウム合金の蒸気圧が低下し、沸点が低くなるのでキーホルの生成温度が下がり、深溶込み溶接に有効であると考えられる。純鉄と純アルミニウムの蒸気圧の既存データ²⁾を基に沸点を算出し、沸点と得られた溶込み深さとの比較を行った。比較結果を Fig. 6 に示す。両材料とも、10 kPa までの圧力では、沸点の減少に伴い溶込みが増加し、10 kPa で最大溶込みに達成し、沸点の低下が溶込み深さの増加に影響を与えていると考えられる。しかしながら、1, 0.1 kPa では、沸点が減少するにもかかわらず、ステンレス鋼は溶込みの改善が見られず、アルミニウム合金は溶込みが減少し、材料による違いが存在した。

3.2 減圧雰囲気下におけるレーザ誘起ブルーム

減圧雰囲気がレーザ誘起ブルームおよび溶接結果に影響するとの報告³⁾があり、0.1, 10, 50, 101 kPa 雰囲気圧力で発生するステンレス鋼 SUS304 およびアルミニウム合金 A5052 のブルームの高速度観察を行った。溶接条件は 3.1 節と同様である。ステンレス鋼ブルームの観察結果を Fig. 7 に

Fig. 7 Typical video picture of SUS304 laser-induced plume observed under each reduced pressure.

Fig. 8 Observation picture of reduced-pressure SUS304 plume at each defocused distance.

示す。各圧力下でブルームは大きく異なった。101 kPa 下では、大量のスパッタを伴って、羽のような形状の一般的なブルーム発光が観察された。50 kPa では、大気圧下より形状が小さいブルーム発光が確認された。10 kPa になると、101 および 50 kPa で観測されたブルーム発光はレーザ照射部付近に限定され、照射部上空には入射レーザ軌跡のような発光が観察された。さらに減圧した 0.1 kPa では、入射レーザ軌跡のような発光が明瞭に観察された。

ここで、観測された入射レーザ軌跡のような発光について検討を行う。入射レーザ軌跡のような発光形状は、入射レーザの集光状態 (Fig. 2 (a) から算出した集光角: 24度) と類似した幾何的な形状をしていたので、0.1 kPa 減圧雰囲気下において、焦点位置および -40, -20, +20 mm 焦点はずし距離でブルームの観察を行った。観察結果を Fig. 8 に示す。なお、供試材表面を原点とし、焦点位置が集光レンズに近づく方向を正方向とする。+20 mm 焦点はずし距離では、供試材表面から上空 20 mm の位置 (入射レーザの焦点位置) で、入射レーザ軌跡のような発光のくびれが観測された。各焦点はずし距離がマイナス方向に変化するに伴い、発光くびれは供試材内部に隠れ、供試材表面での発光部が太くなって、想定される入射レーザの軌跡 (集光角) と幾何学的に一致した。よって、入射レーザの軌跡に沿った発光部には青白く撮影されている部分もあることから、単に散乱されたレーザが撮影されているとは考えられない。むしろブルームを構成する蒸発金属が、入射レーザの光軸上で加熱されて発光していると推察され、減圧下のブルームに関する新しい知見と考える。

各雰囲気でステンレス鋼を溶接した場合に発生したブルームを透過させたプローブレザの、スクリーン上のスポット

Fig. 9 High-speed video picture of probe laser spot passing through SUS304 plume under each reduced pressure.

Fig. 10 Effect of reduced-pressure atmosphere on refraction angle of probe laser beam caused by laser-induced plume at welding in SUS304.

の観察結果を Fig. 9 に示す。101 kPa では、スポット移動および形状変化が観測され、101 kPa から減圧されるに従い、スポット移動量および形状変化は低減された。最も減圧された 0.1 kPa では、レーザー照射前と比較してスポット移動はほとんどなく、スポットの形状変化も確認されなかった。また、Fig. 9 の観察結果より、レーザーの屈折方向と屈折角 θ を計算した結果を Fig. 10 に示す。101 kPa と比較し、1 桁以上小さな値となった。これは、ブルームがプローブレザーの伝搬に与える影響が弱くなったことを意味している。

アルミニウム合金 A5052 について、高速度ビデオを用いたブルームの観察とプローブレザーの屈折状態の観察を行った。観察結果を Fig. 9 と同様に Fig. 11 に示す。ステンレス鋼と同様に、各減圧雰囲気下でブルーム状態は大きく変化した。101 kPa 下では、大量のスパッタを伴った青白いブルーム

Fig. 11 Typical observation picture of A5052 plume under each reduced pressure.

Fig. 12 Effect of reduced-pressure atmosphere on A5052 plume.

が激しく発光していた。50 kPa では、照射部付近に橙色のブルームが観測され、照射部上空には、入射レーザー軌跡のような発光が観測された。10 kPa になると、照射部付近の発光が弱くなるが、入射レーザー軌跡のような発光は確認された。さらに 0.1 kPa では、白色のブルームの発光がレーザー照射部付近でわずかに観察された。プローブレザーの屈折角 θ の計測結果を Fig. 10 と同様、Fig. 12 に示す。A5052 では SUS304 と同様に、減圧に伴い屈折が改善され、安定していることがわかった。ブルームの発光がほとんど観測されない 0.1 kPa 下の θ の平均値は 0.03 mrad であり、101 kPa と比較し 1 桁以上優れた値が得られ、ブルームとプローブレザーの相互作用が小さいことが確認された。

3.3 減圧雰囲気下におけるキーホール口および溶融池

深溶込みには、レーザーが安定してキーホールへ導光されることが必要で、キーホール口の挙動は重要である。各雰囲気圧力でのキーホール口および溶融池の高速度ビデオによる観察を行った。ステンレス鋼の典型的な観察結果を Fig. 13 に示す。101 kPa では、キーホール平均口径は 1.2 mm で、平均溶融池幅は 1.8 mm となり、溶融池表面には金属酸化皮膜が確認でき、キーホール口周辺で溶融池表面の波打つような変動が観察された。雰囲気の減圧に伴って、キーホール口径は小

Pressure [kPa]	101	50	10	0.1
High-speed picture 1 mm └┐ 1 mm				
Schematic illustration				
Average size of keyhole inlet [mm]	1.2	1.1	0.7	0.7
Average width of molten pool [mm]	1.8	3.1	1.5	0.9

Fig. 13 High-speed video picture of keyhole inlet and molten pool in Type 304 stainless steel weld observed under each reduced pressure.

Pressure [kPa]	101	50	10	0.1
High-speed picture 1 mm └┐ 1 mm				
Schematic illustration				
Average size of keyhole inlet [mm]	0.9	1.4	1	3.9
Average width of molten pool [mm]	5.6	3.4	3.1	1.3

Fig. 14 High-speed observation picture of keyhole inlet and molten pool in A5052 welds under each reduced pressure.

Time [s]	2.65	2.85	3.09	3.3
High-speed picture 1 mm └┐ 1 mm				
Schematic illustration				
Size of keyhole inlet [mm]	6.5	0.7	1.2	6.4
Width of molten pool [mm]	0.7	0.8	1.6	2

Fig. 15 Unstable behavior of keyhole inlet and molten pool in A5052 weld obtained at 0.1 kPa.

さくなり、溶融池表面の挙動は安定し、溶融池幅が狭くなった。10 kPa でキーホール平均口径は 0.7 mm に至り、入射レーザのスポット 0.5 mm と比較して 1.4 倍の値となった。さらに減圧された 0.1 kPa では、キーホール口径の変化は見られないが、平均溶融池幅は大気圧雰囲気下の約 1/2 にまで減少し、溶融池後方にハンピングビードが形成されていることが確認された。ステンレス鋼におけるレーザ溶接時のハンピング形成の原因および防止法の研究成果⁹⁾を踏まえると、ハンピングの原因は溶融池幅が狭くなった結果、融液の溶融池後方への流速が速くなり、溶融池後方に融液が過剰に残留したためと推察される。

次に、アルミニウム合金におけるキーホール口および溶融

池の観察結果を Fig. 13 と同様に Fig. 14 に示す。101 kPa 下では、キーホール平均口径は、入射レーザスポットと比べ 1.8 倍となる 0.9 mm であり、キーホール口付近で溶融池表面が金属酸化皮膜に覆われ、大きく盛り上がっていた。雰囲気圧力が 101 kPa から 10 kPa まで減圧されるに伴い、キーホール平均口径は 0.9 mm から 1.4 mm までの値を推移し、ステンレス鋼とは異なる傾向を示した。さらに、0.1 kPa では、キーホール平均口径は 3.9 mm に増加した。一方、平均溶融池幅は、ステンレス鋼と同様に減圧に伴い、101 kPa の 5.6 mm から 0.1 kPa の 1.3 mm まで減少した。そこで、特異な現象の生じた 0.1 kPa でのキーホール口径の増加について、高速度ビデオ観察結果を基に時間変化の詳細を観察した。観察結果を Fig. 15 に示す。

Table 2 Effect of reduced-pressure atmosphere on keyhole inlet and molten pool in Type 304 stainless steel weld.

Pressure [kPa]	Penetration depth [mm]	Size of keyhole inlet [mm]		Width of molten pool [mm]	
		Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
101	15	1.2	0.2	1.8	0.3
70	16	1.1	0.1	4.1	0.2
50	19	1.1	0.1	3.1	0.2
30	23	0.8	0.09	2.7	0.1
10	26	0.7	0.07	1.5	0.1
1	26	0.7	0.05	1	0.03
0.1	26	0.7	0.08	0.9	0.06

(101 kPa: Ambient pressure)

Table 3 Effect of reduced-pressure atmosphere on keyhole inlet and molten pool in A5052 aluminum alloy weld.

Pressure [kPa]	Penetration depth [mm]	Size of keyhole inlet [mm]		Width of molten pool [mm]	
		Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
101	14	0.8	0.2	5.6	0.3
70	17	1.3	0.4	4.1	0.5
50	22	1.4	0.4	3.5	0.4
30	22	1.2	0.2	3.4	0.3
10	23	1	0.2	3.1	0.2
1	20	5.8	0.8	1.5	0.3
0.1	19	3.9	2.8	1.3	0.6

(101 kPa: Ambient pressure)

レーザー照射開始から 2.65 s 後では、溶接方向に長く伸びたキーホール口が観察でき、口径は 6.5 mm と大きな値であった。2.85 s では、キーホール口は、円形で 0.7 mm となり、キーホール後方に金属酸化膜に覆われていない溶融池表面の箇所を確認できた。3.09 s ではキーホール口径が 1.7 倍程度に大型化し、後方は盛り上がった。その後、3.3 s では、再び 2.65 s と同様な長く伸びたキーホールが形成された。一連のキーホール口および周辺の溶融池表面の挙動から、ブルームが一時的に強くなり、金属酸化膜に覆われていないキーホール後方の溶融池表面を押し上げて盛り上がり、その後落込み、溶接方向に長く伸びたキーホール口が形成されたと考えられる。こうしたキーホール口および溶融池の一連の挙動は、溶接中全ての時間で観察された。

各雰囲気圧力における、キーホール口径、溶融池幅、それらの平均値と標準偏差について、ステンレス鋼とアルミニウム合金でまとめたものを Table 2 および Table 3 に示す。なお、溶込み深さも併記しておく。Table 2 が示すようにステンレス鋼溶接時のキーホール口は、雰囲気圧力の 101 kPa から 10 kPa までは小径化し、10 kPa 以下では平均値 0.7 mm と一定になった。標準偏差も同様な傾向で、減圧に伴い小さくなり、10 kPa 以下では、101 kPa に比べ 1 桁小さい値となった。ところで、前節において 10 kPa 以下ではブルームによるレーザー屈折がごく小さいことを述べた。10 kPa 以下の雰囲気圧力でキーホール口が小型化し安定していることは、入射レーザーがよく絞られた状態で、安定してキーホール口を通過していることと対応していると推察される。また、雰囲気圧力が 70 kPa から 0.1 kPa 低下するに伴い、平均溶融池幅は 4.1 mm から 0.9 mm まで減少した。標準偏差も減圧に伴い減少を示

しており、ステンレス鋼の溶接現象が減圧によって安定すると考えられた。一方、101 kPa では、雰囲気圧力の増大にも関わらず溶融池幅が 1.8 mm と、70 kPa に比較して狭くなった。これは、大気中の酸素が影響したものと推定される。溶融池幅に関しては、101 kPa では酸素の影響で 1.8 mm と狭くなると推察され、雰囲気圧力が 70 kPa から 0.1 kPa 低下するに伴い、4.1 mm から 0.9 mm まで減少した。標準偏差も減圧に伴い減少を示しており、ステンレス鋼の溶接現象が減圧によって安定することがわかった。

一方、Table 3 が示すようにアルミニウム合金では、キーホール平均口径は、101 kPa から 10 kPa までは、0.8 mm から 1.4 mm までの値を推移し、標準偏差は 0.2 mm から 0.4 mm でステンレス鋼の傾向とは異なった。さらに、1, 0.1 kPa 下では、Fig. 15 に示すようなキーホール口の変動により、平均口径は、101 kPa 下の 0.8 mm から最大 5.8 mm までに増加し、標準偏差も 0.2 mm から最大 2.8 mm に達し、プロセスが不安定になることが判明した。Fig. 6 に示したように、アルミニウム合金では 1, 0.1 kPa の雰囲気圧力で沸点の減少に関わらず溶込み深さが 10 kPa に比較して減少したが、これはこのプロセスの不安定性に起因する現象と考えられる。溶融池幅に関しては、ステンレス鋼と同様な減少傾向を示した。

以上、雰囲気圧力の減圧に伴い供試材の沸点低下、レーザー誘起ブルームによるレーザー屈折能力の減少、キーホール口に導光されることから、ステンレス鋼 SUS304 では 10, 1, 0.1 kPa の雰囲気圧力で、アルミニウム合金 A5052 では 10 kPa で、大気圧での溶込みの 1.6 倍以上の最も深い溶込みが形成されたと考えられる。

4. 結 言

本研究では、16kW 高出力ディスクレーザを用い、0.1kPa から101kPaの雰囲気下において、ステンレス鋼 SUS304 およびアルミニウム合金 A5052 の厚板に対し、溶接速度 17mm/s、供試材表面が焦点位置である条件でメルトラン溶接を行い、得られた溶込み深さを調べた。また、各減圧雰囲気でのレーザ誘起ブルームの観察およびレーザの屈折特性を評価した。さらに、各減圧雰囲気下におけるキーホール口および溶融池挙動を、高速度ビデオで観察して溶融現象を明らかにし、深溶込みとの関係について検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) ステンレス鋼 SUS304 の厚板に対する 16kW 高出力レーザ溶接では、10kPa までの減圧に伴い溶込みが増加し、10, 1, 0.1kPa の雰囲気圧力で最大溶込み 26mm に達し、大気圧下の溶込みと比較して、1.7 倍となった。
- 2) アルミニウム合金 A5052 の厚板に対する 16kW 高出力レーザ溶接では、10kPa で最大溶込み 23mm となり、大気圧下と比較しておよそ 1.6 倍となった。しかしながら、1 および 0.1kPa では、溶込みが減少することが判明した。
- 3) 純鉄と純アルミニウムの蒸気圧を基に算出した沸点と溶込み深さとの比較により、両材料とも、10kPa 以上では、沸点が減少することと溶込みが増加することとの関係が示唆された。しかしながら、1kPa 以下では、ステンレス鋼は溶込みの改善は見られず、アルミニウム合金は溶込みが減少し、材料による違いが存在した。
- 4) 高速度ビデオによる観察およびプローブレーザによる屈折測定によって、101kPa から 0.1kPa までの雰囲気では、減圧されることにより、ステンレス鋼およびアルミニウム合金のレーザ誘起ブルームは、レーザを屈折させる能力が低減することが明らかになった。
- 5) 減圧雰囲気下における入射レーザ軌跡のようなブルーム発光について、ブルームを構成する蒸発金属が、入射レーザの光軸上で加熱され発光していると推察され、減圧雰囲気下のブルームについての新しい知見が得られた。
- 6) ステンレス鋼のキーホール口は、雰囲気圧力の 101kPa から 0.1kPa の減圧に伴い、40% 程度小径化し、標準偏差も 1 桁小さくなり、入射レーザはよく絞られた状態で、安

定してキーホール口を通過していると考えられる。

- 7) アルミニウム合金のキーホール口は、1, 0.1kPa 下で、平均口径が 101kPa 下の 0.8mm から最大 5.8mm までに増加し、標準偏差も 0.2mm から最大 2.8mm に達し、プロセスが不安定となった。プロセスの不安定性は溶込みを減少させる要因と推察される。
- 8) 雰囲気圧力の減圧に伴い、供試材の沸点低下、誘起ブルームによるレーザ屈折能力の減少、キーホール口および溶融池の安定化が、入射レーザをよく絞られた状態で、キーホール口に安定して導光でき、結果としてステンレス鋼では 10, 1, 0.1kPa の雰囲気圧力で、アルミニウム合金では、10kPa で最も深い溶込みが形成されたと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、平成22年から平成24年まで採択された科学研究補助金基盤研究 (C)「局所低真空下の高輝度レーザによる高効率深溶込み溶接機構の解明」の一環として行った研究であり、関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Arai, M. Kutsuna and M. Miyamoto H. Kaneko: レーザ溶接加工, Machinist, (1996), 4. (in Japanese)
- 2) T. Ishide, T. Ikeda, G. Takano, T. Hayashi, K. Matsuhira and Y. Inaba: Basic study on high-power CO₂ laser welding, Preprints of The National Meeting of J.W.S. 55 (1994), 32-33. (in Japanese)
- 3) T. Ishide, M. Mega and Y. Shimokusu: Fundamental Study on High-Power CO₂ Laser Welding Technique, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 32-2 (1995), 109-112. (in Japanese)
- 4) S. Katayama, Y. Kobayashi, M. Mizutani and A. Matsunawa: Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding, J. Laser Appl., 13-5 (2001), 187-192.
- 5) Y. Arata, N. Abe and T. Oda: Fundamental Phenomena in High Power CO₂ Laser (Repoert II) -Vacuum Laser Welding- Transactions of JWRI, 14-2 (1985), 17-22.
- 6) K. Mitani, Y. Suita, Y. Aiga S. Shobako, Y. Tsukuda and N. Terajima: Butt Weld Experiments by Diode Laser Welding Process in Vacuum, Space Utiliz. Res., 24 (2008), 94-97. (in Japanese)
- 7) The Japan Institute of Metals: 改訂 3 版 金属データブック, Maruzen, (1995), 86-88. (in Japanese)
- 8) Y. Kawahito, M. Mizutani and S. Katayama: Defect Formation Mechanism and Reduction Procedure in 10 kW High Power Fiber Laser Welding of Stainless Steel, Q. J. Jpn. Weld. Soc., 26-3 (2008), 203-209. (in Japanese)