

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）（一般）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560723

研究課題名（和文）局所低真空下の高輝度レーザーによる高効率深溶込み溶接機構の解明

研究課題名（英文）Clarification of High-Efficiency, Deep-Penetration Welding Mechanism with High-Brightness Laser under Partial, Low-Vacuum Atmosphere

研究代表者

川人 洋介（KAWAHITO YOUSUKE）

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70379105

研究成果の概要（和文）：深溶込みはレーザー溶接の長所である。本研究は、局所低真空下の高輝度レーザーによる高効率深溶込み溶接機構解明のための溶込み特性、レーザー誘起プルームの光学特性および熔融池内部のキーホール挙動について、基礎研究を実施した。溶込みは、2.5 倍以上の高効率深溶込みが実現され、レーザー誘起プルームの入射レーザー光への光学的な影響は、1 桁以上改善され、キーホールは不安定な挙動が観測されるが、溶接ポロシティの形成には至らないことが初めて明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Deep penetration is an important advantage in laser welding. This study was undertaken in order to clarify high-efficiency, deep-penetration welding mechanism including weldability, optical characteristics of laser-induced plume and keyhole behaviors in molten pool with brightness laser under partial, low-vacuum atmosphere. The penetration depths were over 2.5 times as deep as those obtained at 101 kPa. Refraction of incident laser caused by laser-induced plume was drastically reduced corresponding to surrounding pressure of 101 to 0.1 kPa. X-ray high-speed observation revealed that keyhole is unstable but porosity is not formed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：溶接・接合

1. 研究開始当初の背景

今後の低炭素社会においては、大気中で深溶込み溶接ができるだけでなく、高効率な溶接法が求められる。

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ーおよびファイバーレーザーは、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)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、真空下におけるレーザー溶接は溶込み深さが改善させることが報告されている。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 低真空気下、レーザ出力 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。また、溶融池の安定性およびレーザ誘起プルーム（金属蒸気）が溶接結果に影響することが報告されている。YAG (Ytterbium aluminum garnet) レーザ溶接の報告では、0.4 kPa の低真空下、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。しかしながら、レーザの種類、材料、真空度、溶接条件によって溶込み深さの改善に違いがあり、真空度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り、本研究が基盤的な研究となる。

さらに、レーザ照射部の周辺のみを低真空にすることで、現地施工が可能となり、電子ビーム溶接との違いが明確化でき、従来レーザ溶接の適用が難しい、発電プラント、橋梁、船舶等の大型構造物分野で、先駆的な応用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、局所低真空下の高輝度レーザ溶接において、簡易的な局所低真空カバーにより大気中で溶接できる特徴を犠牲にせず、低いレーザ出力で電子ビーム溶接と同様のシャープな深溶込みを実現するとともに、独自開発した溶融池内部の X 線透視リアルタイム観察法およびレーザ照射部から発生するレーザ誘起プルームの光学特性などによって、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を世界で初めて解明に取り組む。

3. 研究の方法

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 80×50×150 mm である。本研究で使用したレーザ発振器は、最大出力 16 kW および 10 kW の連続発振型のディスクレーザ装置と最大出力 10 kW の連続発振型のファイバーレーザ装置である。溶接状況を模式的に図 1 に示す。レーザ光(図 1 は 16 kW 出力ディスクレーザを用いた図示)は、発振器からコア径 ϕ 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バ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に、10 度傾けてレーザを照射し、レーザ出力 16 kW、溶接速度 5, 17 mm/s、真空度 0.1, 1, 10, 30, 50, 70, 101 kPa (大気圧) 下でメルトラン溶接を実施した。供試材表面は焦点位置に置かれ、入射レーザに 16

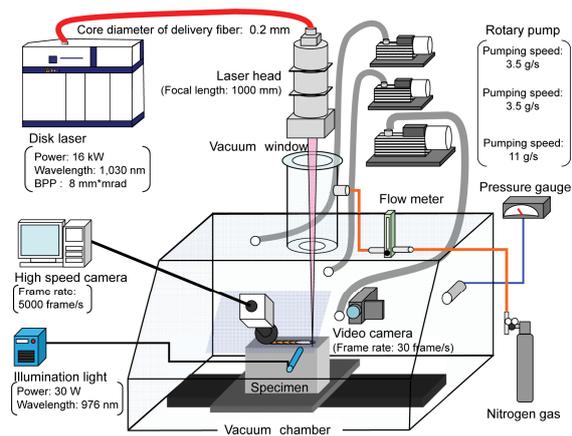


図 1: 低真空レーザ溶接の実験構成

kW 出力ディスクレーザを使用した時の集光特性および焦点位置でのビームプロファイルを図 2 に示す。レーザスポット径は ϕ 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/mm² である。低真空下の実験では、チャンバ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、所定の真空度に制御した。なお、入射レーザ光が通過する保護ガラスに、レーザ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、金属蒸発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から 30 frames/s で撮影した。また、図 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 (波長: 532 nm, スポット径: 1.5 mm) をプローブレザとして、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のスポット位置を、高速度カメラを用いて 1000 frames/s で観察した。そして、スクリーン上のスポット位置の時間変化から、低真空下のプルームによるプローブレザの屈折挙動を定量的に評

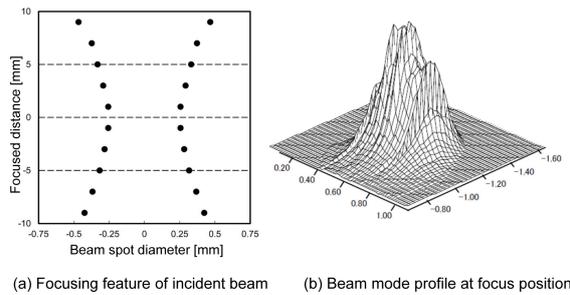


図 2: 実験で使用したレーザーの光学特性 1 例

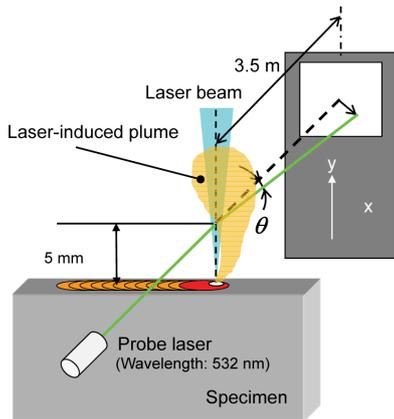


図 3: レーザ誘起プルームの光学特性評価

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ーザの屈折角 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。さらに、溶接時の試験片内部におけるキーホール形状および挙動については、マイクロフォーカス X 線透視撮影装置を用い、1000 frames/s で高速度観察を行った。使用した試料の厚みは、キーホールを明確に観察するため、10 mm とした。

4. 研究成果

(1) 低真空下におけるステンレス鋼とアルミニウム合金の溶込み特性

0.1 kPa の低真空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ー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図 4 に示す。図 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、雰囲気中の減圧に伴い、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、各真空下で得られたビード外観と溶込み断面の写真を図 4 と同様に図 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、雰囲気中の減圧

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

図 4: 低真空下における 6 kW レーザ出力でのステンレス鋼溶接結果

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

図 5: 低真空下における 6 kW レーザ出力でのアルミニウム合金溶接結果

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ール生成温度が下がり、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。比較結果を図 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。これは、キーホールを掘り下げる時間が有限であることが要因と推測される。

また、ステンレス鋼およびアルミニウム合金に対し、種々の真空度におけるレーザ出力の影響を検討した。出力は、6, 10, 16, 26 kW で、溶接速度 5 mm/s、焦点位置である。なお、6, 10 kW ではファイバレーザ装置を用い、16, 26 kW ではディスクレーザ装置を用いた。ステンレス鋼およびアルミニウム合金の種々の真空度での溶込み結果を、図 7 と図 8 に示す。最大の溶込み深さは、SUS304 では 55 mm、A5052 では 56 mm であった。大気圧の結果と比較すると、2.5 倍以上の高効率深溶込みが実現されることが判明した。

最後に、チャンバーを図 9 に示す実験装置(移動型簡易局所真空カバー)に置き換え、局部

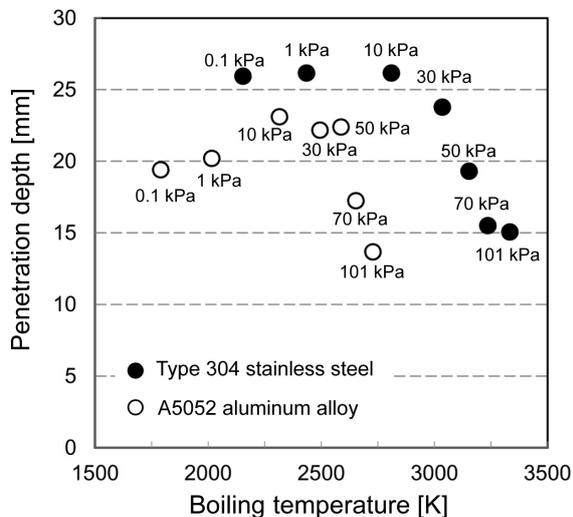


図 6: 各種材料における低真空が溶接に及ぼす影響

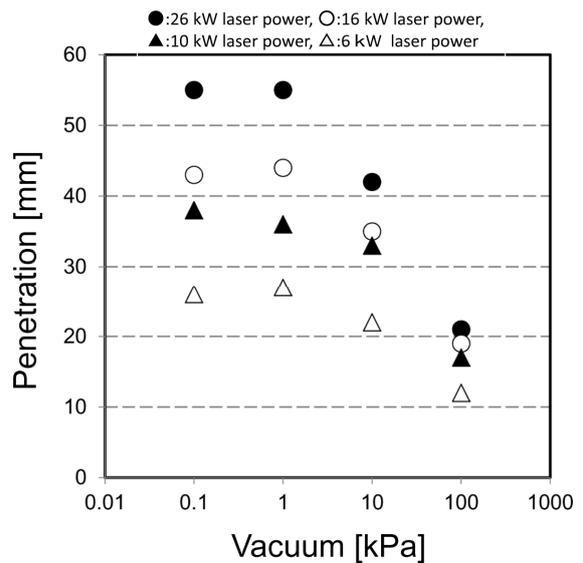


図 7: 各出力でのステンレス鋼低真空溶接結果

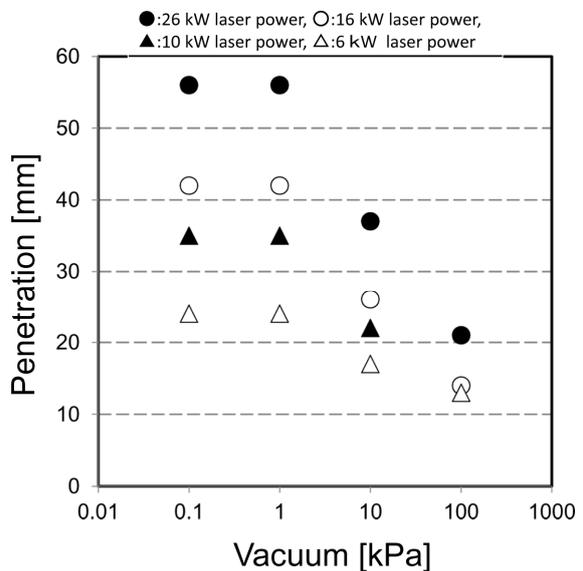


図 8: 各出力でのアルミニウム合金低真空溶接結果

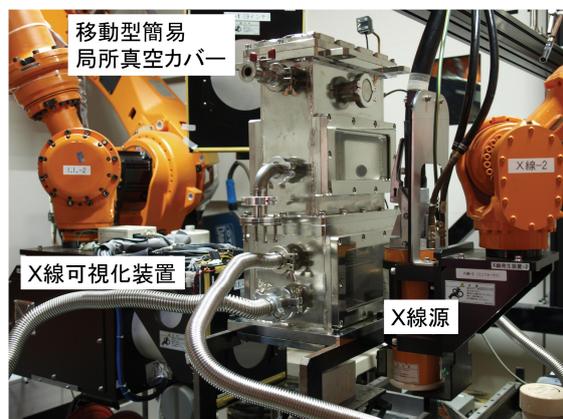
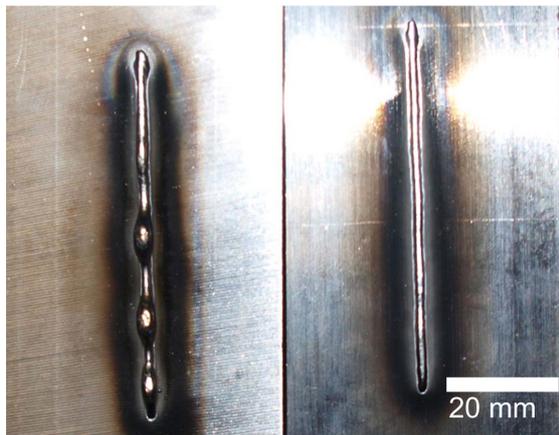


図 9: X 線透視撮影での移動型簡易局所真空カバーの外観 (中央部のチャンバー: 局所真空カバー)



(a) Laser power: 10 kW (b) Laser power: 6 kW

図 10: 局部低真空度での溶接ビード例

低真空を実現し、チャンバーを用いた場合と同様な実験を行い、安定した溶接ビードおよび溶込みが得られることを確認した(図 10 参照)。また、移動型簡易局所真空カバーは、マイクロフォーカス X 線透視撮影装置を用いた高速度観察でも使用した。

(2)低真空下でのプルームの光学特性

真空度がレーザー誘起プ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 のプルームの高速度観察を行った。溶接条件は(1)の 6 kW 出力と同様である。ステンレス鋼プルームの観察結果を図 11 に示す。各圧力下でプ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プ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プルーム発光が確認された。10 kPa になると、101 および 50 kPa で観測されたプルーム発光はレーザー照射部付近に限定され、照射部上空には入射レーザー軌跡のような発光が観察された。さらに減圧した 0.1 kPa では、入射レーザー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ー軌跡のような発光について検討を行う。入射レーザー軌跡のような発光形状は、入射レーザーの集光状態

(図 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 下において、焦点位置および -40, -20, +20 mm 焦点はずし距離でプルームの観察を行った。観察結果を図 12 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(入射レーザーの焦点位置)で、入射レーザー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

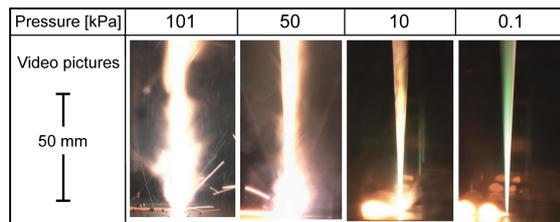


図 11: 各真空度でのレーザー誘起プルーム

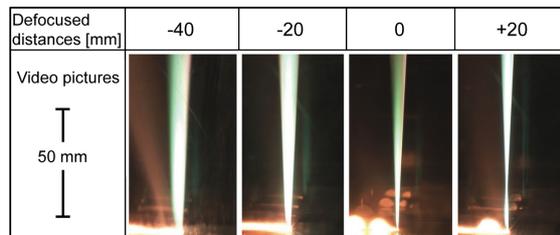


図 12: 0.1 kPa 下の各焦点はずし位置でのプルーム

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大きくなって、想定される入射レーザーの軌跡(集光角)と幾何学的に一致した。よって、入射レーザー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ーが撮影されているとは考えられない。むしろプルームを構成する蒸発金属が、入射レーザーの光軸上で加熱されて発光していると推察され、低真空下のプルームに関する新しい知見と考える。

各真空度でステンレス鋼を溶接した場合に発生したプルームを透過させたプローブレーザーの、スクリーン上のスポットの観察結果を図 13 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、図 13 の観察結果より、レーザーの屈折方向と屈折角 θ を計算した結果を図 14 に示す。101 kPa と比較し、1 桁以上小さな値となった。これは、プルームがプローブレー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プルームの観察とプローブレーザーの屈折状態の観察を行った。ステンレス鋼と同様に、プルームとプローブレーザーの相互作用が小さいことが確認された。

(3)低真空下でのキーホール挙動

真空下の熔融池内部のキーホール挙動は、従来のキーホール(直径 0.6 mm)よりも太く、内壁が 100Hz 程度の周期で大きく揺動していることが判明した。これは世界初の知見であ

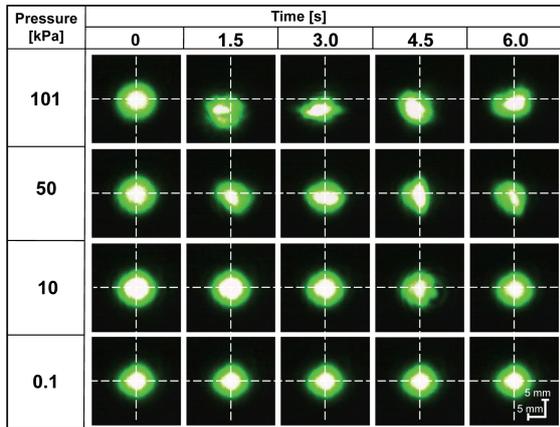


図 13: 各真空度でステンレス鋼を溶接した場合に発生したブルームを透過させたプローブレザ挙動

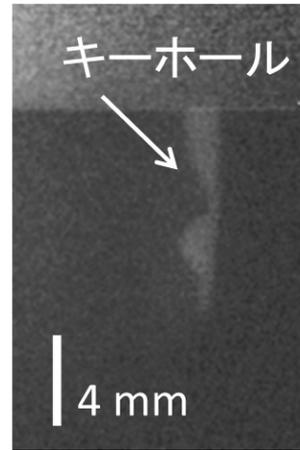


図 15: 低真空 (0.1 kPa) 下でのキーホール挙動

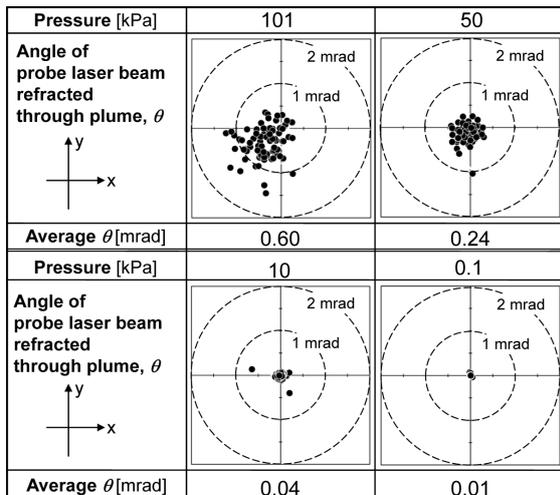


図 14: 低真空下でのブルームの光学特性

る。キーホールの不安性挙動（揺動を含む）が、溶接欠陥ポロシティ（溶接金属部の空隙）の原因と従来考えられてきたが、シールドガスのキーホール侵入こそが原因である可能性が出てきた。また、減圧に伴いポロシティは減少し、レーザ誘起ブルームおよびキーホール口の挙動は安定化するが、熔融池内部のキーホール挙動は、図 15 に示すように内壁が大きく揺動し、逆の現象になる新たな知見も得られた。さらに、溶込み深さを決定する要因が、熔融池にキーホールを掘る実時間（常圧時と比較して、減圧下では最高 6 倍程度速い）と密接に関係していることも明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 阿部洋平, 川人洋介, 中村浩, 西本浩司, 水谷正海, 片山聖二, 高出力・高輝度レーザ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, 溶接学会論文集, 査読有,

31-1, 2013, pp48-55.

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 阿部洋平, 川人洋介, 水谷正海, 片山聖二, 低真空中における高出力レーザ溶接, 溶接学会平成 22 年度秋季全国大会, 日本大学 (福島), 2010 年 9 月 8 日.
- ② 阿部洋平, 水谷正海, 川人洋介, 片山聖二, Deep Penetration Welding with High Power Laser under Vacuum, 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), 米国アナハイム, 2010 年 9 月 30 日.
- ③ 川人洋介, 阿部洋平, 水谷正海, 片山聖二, 高出力・高輝度レーザを用いた低真空溶接, 第 74 回レーザ加工学会講演会, 東京大学, 2010 年 12 月 6 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川人洋介 (KAWAHITO YOUSUKE)
大阪大学・接合科学研究所・准教授
研究者番号: 70379105

(2) 研究分担者

片山聖二 (KATAYAMA SEIJI)
大阪大学・接合科学研究所・教授
研究者番号: 10144528

(3) 連携研究者

西本浩司 (NISHIMOTO KOUJI)
阿南工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号: 40501169