

Review

2. レーザ光による各種接合技術と切断技術



S. Katayama

高輝度・高パワーレーザ溶接現象
と溶込み特性

片山 聖二 *

1. 緒言

従来の溶接用レーザとしては、CO₂（炭酸ガス）レーザおよびYAG（ヤグ）レーザがある。高パワーのCO₂レーザ溶接では、シールドガスとしてArを使用すると、Arプラズマが発生し、入射レーザ光が逆制動放射により吸収され、溶込みが浅くなる^{1, 2)}。一方、YAGレーザは、ファイバ伝送が可能で、自動化やロボット化に対応しやすく生産技術に優れたレーザ光源であるが、高パワーではビーム品質が悪くなり、発振効率も4%以下と低いという欠点がある²⁾。

そこで、最近、溶接用レーザとしては、高輝度・高パワー・高品質・高効率で、ファイバ伝送が可能なファイバレーザおよびディスクレーザが注目されている。

したがって、本研究では、最大パワー10 kWのファイバレーザまたは最大パワー16 kWのディスクレーザを用い、さらに開発した長焦点深度の集光光学系も使用して、各種条件でレーザ溶接を行い、溶込み深さの改善とポロシティ等の溶接欠陥の防止に有効かどうかを確認した。また、レーザ溶接中の湯流れをX線透視リアルタイム観察法で観察し、スパッタとアンダフィルの発生機構を理解し、防止法について検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 市販および長焦点深度集光光学系のビーム特性

市販の集光光学系と本研究で開発した長焦点深度集光光学系のビームプロファイルを計測した。それらの測定結果を図1に示す（以下、通常の高集光光学系をOptics P、開発した長焦点深度集光光学系をOptics Mと記す）。

測定の結果、開発したOptics Mの焦点深度は従来のOptics Pの倍程度に大きいことがわかった。また、Optics PおよびOptics Mのレーザビームのスポットサイズはそれぞれ $\phi 200\ \mu\text{m}$ および $\phi 270\ \mu\text{m}$ であった。そこで、これら2つの集光光学系を用い、実際に溶接したときに得られる溶接ビードの溶込み深さの差異、溶接欠陥の発生状況の差異などについて検討した。

溶接状況の概略図を図2に示す。供試材は厚さ12mmのHT780高張力鋼である。本実験で使用したレーザ発振器は最大出力10 kWのファイバレーザで、波長 λ が1070nmで、BPPが4.5mm*mradと小さく、コア径 $\phi 100\ \mu\text{m}$ のファイバレーザにより加工ヘッドへ伝送される。

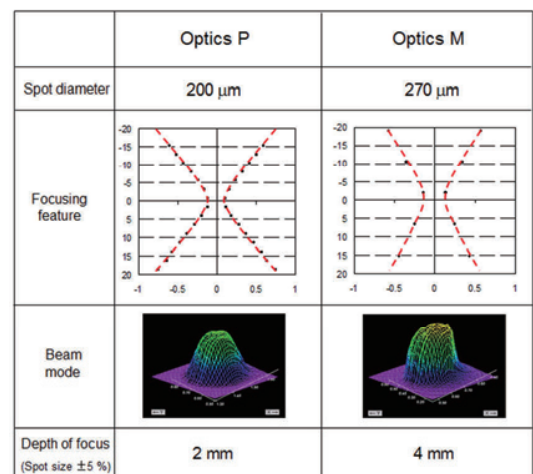


図1 通常の集光光学系（Optics P）と長焦点深度集光光学系（Optics M）におけるビームプロファイルと集光状況の測定結果の比較

実験は、通常、加工ヘッドを前進角に10°傾けた状態で、レーザパワーを10 kW、溶接速度を1.5 m/minから10 m/minまで変化させてメルトラン（ビード・オン・プレート）溶接を行った。シールドガスは溶接方向後方から45°の角度で設置された口径 $\phi 8\text{mm}$ のサイドノズルからArガスを流速40 L/minで供給した。溶接時のレーザ誘起ブルームおよび溶融池の状態を観察するため、高速度ビデオカメラを用い、10,000 f/sで観察した。また、溶融池観察においては照明用光源として半導体レーザ（最大出力 P_{max} : 30 W、波長 λ : 980 nm）を用いた。

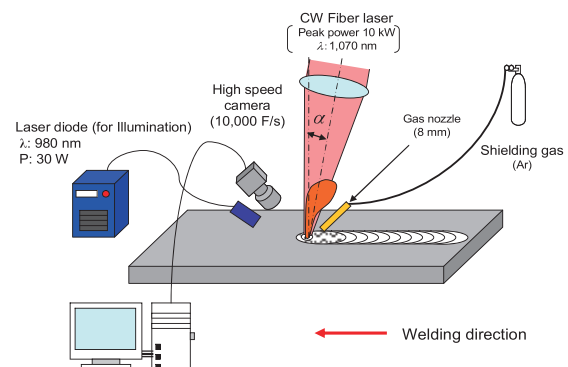


図2 長焦点光学系による溶接実験の概略図

* 大阪大学接合科学研究所 教授

さらに、溶接時の溶融池内部におけるキーホール挙動および気泡の発生状況やポロシティの生成機構を解明するため、マイクロフォーカスX線透視撮影装置（島津製，MTT-225）を用いて、250 f/s で観察を行った。その装置の模式図を図3に示す。X線透視観察時の試料は、板幅が3 mm、板厚が12 mmである。

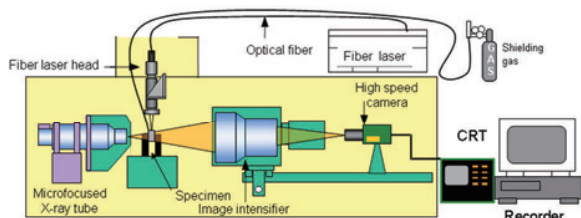


図3 X線透視撮影装置を用いたリアルタイム観察システム概略図

2.2 三次元X線透過観察システムによる観察方法

次に、SUS304 ステンレス鋼板に対して、最大パワー16 kW、波長 1030 nm の高出力ディスクレーザを用いて、溶接中の湯流れを三次元X線透過観察システムにより観察した。このシステムは、図4に示すように、マイクロフォーカスX線発生装置（最大電圧：230 kV、最大電流：1 mA、1,000 Frames/s）とミニフォーカスX線発生装置（最大電圧：225 kV、最大電流：3.5 mA、1,000 Frames/s）の二種類のX線源を有している。供試材を通過したX線は、高速応答イメージインテンシファイア（残光時間：0.1 ms）、高速度カメラ（最大 10,000 Frames/s）を通して観察でき、異なる角度から同時計測した二つの画像データの視差を利用して対象物体の三次元位置座標を取得することができる。溶融金属の流れの速度は試料中に埋め込んだ直径約 0.5 mm のタングステンカーバイド粒子を焦点位置を供試材表面とし、レーザ出力 6 kW、溶接速度 25～250 mm/s において、メルトラン溶接を行った。そして、追跡してトレースした。また、高速度カメラを用いて、スパッタの挙動を観察した。溶接実験はレーザビームの溶接速度 150 mm/s においてレーザ照射角度を 0°、+20°、焦点はずし距離を 0 mm、-2 mm と変化させメルトラン溶接を行い、溶接結果および溶接現象への照射角度と焦点はずし距離の影響を調べた。

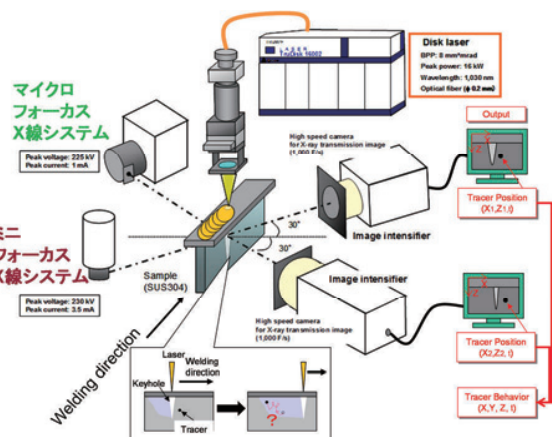


図4 レーザ溶接用に導入された三次元X線透過観察システムとその溶接状況の模式図

ムの溶接速度 150 mm/s においてレーザ照射角度を 0°、+20°、焦点はずし距離を 0 mm、-2 mm と変化させメルトラン溶接を行い、溶接結果および溶接現象への照射角度と焦点はずし距離の影響を調べた。

3. 実験結果

3.1 長焦点深度集光光学系によるレーザ溶接

長焦点深度の集光光学系における溶込み特性について検討した。Optics P および Optics M の光学系で、溶接速度 1.5～10 m/min で得られた溶接ビードの表面外観写真、X線透過試験による深さ方向の透過写真、横断面写真をそれぞれ図5および図6に示す。Optics P の場合、溶接速度 1.5 m/min において貫通溶接部が得られたが、アンダフィルが発生した。そして、溶接速度 3 m/min 以上では部分溶込みとなった。また、X線透過試験写真から、1.5～10 m/min のすべての条件において多数のポロシティが発生したことが確認される。

一方、Optics M の場合、溶接速度 3 m/min で貫通溶接が可能であり、アンダフィルが発生していなかった。溶接速度 4.5 m/min 以上では部分溶込みとなった。Optics P と同様にポロシティが確認されたが、溶接速度 1.5 m/min の貫通溶接部ではポロシティの発生は確認されず、良好な溶接ビードを作製できることがわかった。

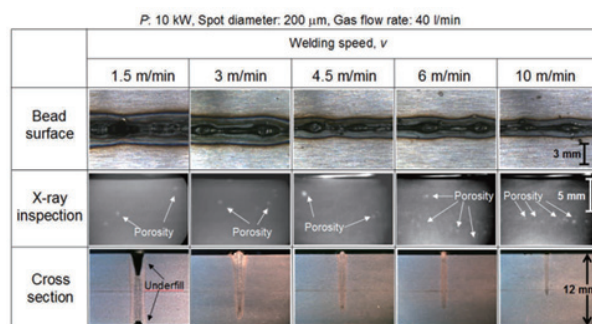


図5 Optics P（通常集光光学系）による溶接部の表面、断面およびX線透過写真

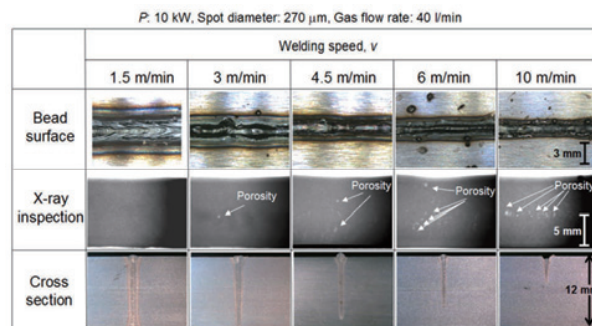


図6 Optics M（長焦点深度集光光学系）による溶接部の表面、断面およびX線透過写真

次に、各溶接速度で得られたレーザ溶接部の溶込み深さに及ぼす集光光学系の影響を図7に示す。Optics Mは溶接速度 3 m/min で貫通溶接が可能であり、溶込みは 5 m/min 以下の低速度域で従来の Optics P より深いことがわかる。しかし、溶接速度 8 m/min~10 m/min では Optics M の溶込みが浅くなった。深さ方向のパワー密度の違いが影響として現れたものと考えられる。焦点位置近傍では、Optics P のパワー密度が高いために高速度では溶込み深さの増加に有効に作用したと考えられる。一方、10 mm 程度の深い溶込み位置においては Optics M のパワー密度が 50 kW/mm² で、Optics P の 32 kW/mm² より高いために深い溶込みを得られたと判断される。

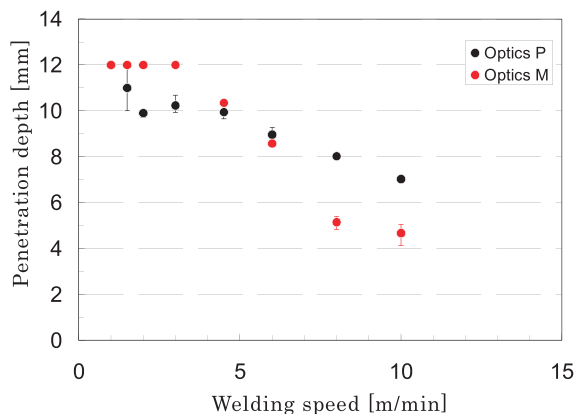


図7 レーザ溶接部の溶込み深さに及ぼす集光光学系の影響

以上の結果より、Optics Mは、深さ 10 mm 以上の深溶込みが必要とされる条件においては従来の高集光光学系に比べて優位であることがわかった。一応、高速度で深い溶込みは、高集光光学系が有効であり、低速度で安定な溶接を行うためには、適度な集束性のある長焦点深度の集光光学系が有効であることが判明した。

図8は、パワー10 kW、溶接速度 1.5 m/min でのレーザ溶接時の溶融池の挙動を高速カメラで撮影した結果を溶接ビードの表面と断面写真とともに示す。なお、高速カメラの撮影速度は 10,000 fps である。撮影の結果、Optics P による溶接時の溶融池は激しく変動し、キーホール後方の溶融池が盛り上がり不規則な形状の溶接ビー

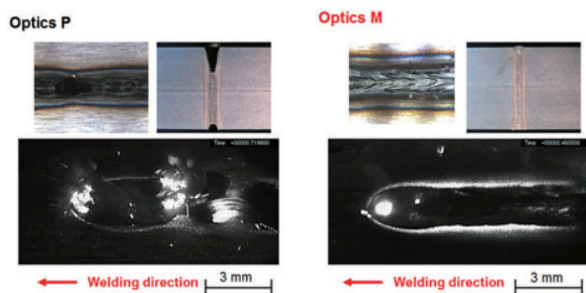


図8 高速カメラによる溶融池表面の観察

ドが形成され、スパッタも発生してアンダフィルが発生する様子が観察された。一方、Optics M による溶接の場合、溶融池は安定しており、良好な溶接ビードが形成されている様子が観察された。

レーザパワー10 kW、溶接速度 1.5 m/min での両者の X 線透視撮影の結果を図9に示す。その撮影の結果、Optics P による溶接では、キーホールが板材を貫通しているが、キーホールの変動が激しく、キーホールの中間深さ近傍から多数の気泡が発生し、後方の凝固部にトラップされる様子が観察された。一方、Optics M による溶接では、キーホールは細く、その変動は小さく、気泡の発生は見られず、ポロシティも発生していなかった。Optics M の場合、広範囲の深さ位置にキーホールを維持するために必要なレーザパワーが供給されているため、キーホールが安定し、良好な溶接が行えたものと考えられる。

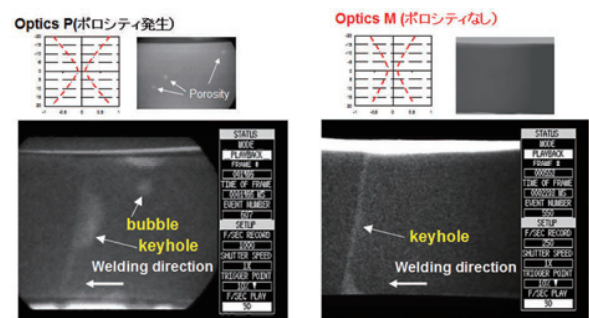


図9 通常の集光光学系と長焦点深度集光光学系を用いた場合のレーザ溶接時の X 線透視画像

3.2 高輝度レーザ溶接現象および溶接欠陥発生状況の観察結果

焦点位置を板材表面とし、レーザパワーを 6 kW として溶接速度を種々変化させて得られた溶接ビードの外観および断面形状を図10に示す。溶込みはすべてキーホール型であった。溶接欠陥に関しては、約 50 mm/s 以下の

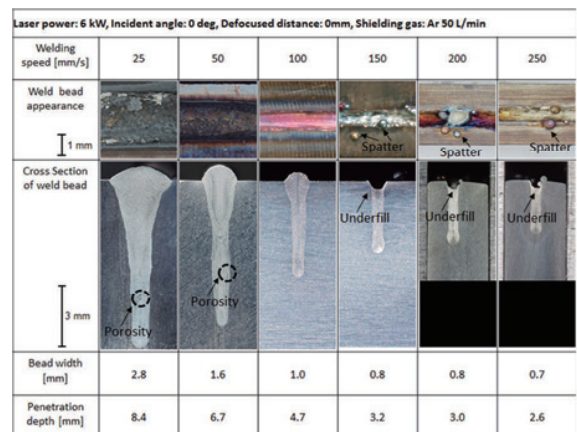


図10 レーザ溶接部の表面および断面と溶接結果に及ぼす溶接速度の影響

低速度でポロシティが生成し、150 mm/s 以上の高速度では溶接ビードの表面にアンダフィルが形成し、ビード付近にはスパッタの付着が見られた。

そこで、レーザ溶接中の溶融池内部のキーホール挙動や湯流れを三次元 X 線透過観察システムを用いて観察した。その結果の一例として、溶接速度が 25 mm/s および 150 mm/s と大きく異なる条件でのレーザ溶接結果の一例を図 1 1 に示す。低速度溶接の場合、キーホール底部先端から溶融池底部後方への湯流れとキーホール口上方へ流動して、その後溶融池表面後方へ移動する湯流れの 2 方向がある。底部方向の流れが速くて大きく旋回し、キーホール先端部から気泡が発生し、湯流れに乗って流動するが、溶接ビードにポロシティとして残存する 때가 あった。一方、高速度溶接の場合、レーザ誘起ブルームはキーホール口から上後方に噴出して、溶融池内部から上昇してきた融液がキーホール後端からスパッタとして噴出している。その結果、噴出する融液量が多いと、アンダフィルの溶接ビードとなる。レーザ溶接では、通常、溶融池底部においてキーホールから後方への湯流れがあるため、溶接ビード底部は半円状となっている。

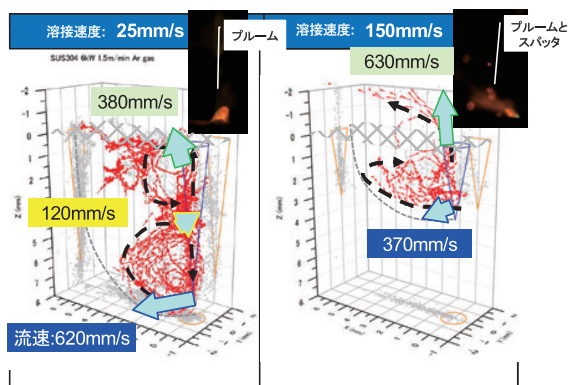


図 1 1 溶接速度 25 および 150 mm/s でのレーザ溶接中の溶融池内部の湯流れの 3 次元表示例

溶接速度 100 mm/s での観察結果と模式図およびタングステンカーバイト流動の 3 次元表示を図 1 2 に示す。溶融池の表面から下方の融液がキーホールの後壁を上昇し、スパッタとして飛散することが判明した。

図 1 3 は高速レーザ溶接中のキーホールと照射されるレーザビームとの関連性を示す。高速溶接では、レーザビームはキーホール前壁に照射され、その照射されたキーホール前壁から蒸発が激しく起こることが推察される。したがって、スパッタは、図 1 3 に示されるように、蒸発物質とブルームの噴出に伴ってキーホール後端の融液が溶融池より離れた位置に吹き飛ばされることによって形成し、それが激しい場合、アンダフィルのビードとなることが明らかになっている。

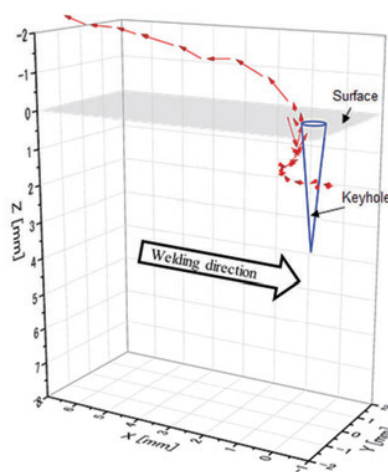
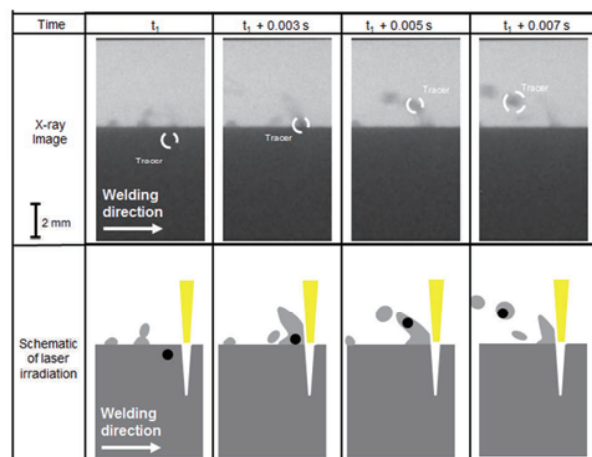


図 1 2 溶接速度 100 mm/s での X 線透視像とその模式図およびタングステンカーバイト粒子の湯流れ

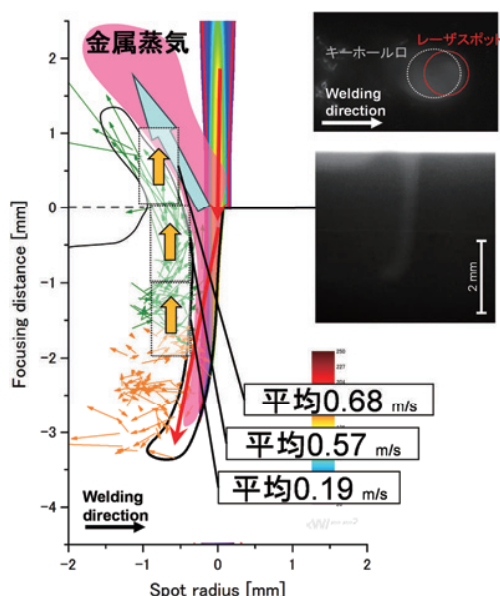


図 1 3 高速レーザ溶接時の集光レーザビームとキーホールの関係、キーホール後壁での湯流れの測定結果

図 1 4 は溶接ビード形状とスパッタの発生に及ぼす焦点はずし距離の影響を示す。焦点位置を板の下方に設定することによって、下方からの蒸発になるため、スパッタが減少し、アンダフィルの溶接ビードとならないことが確認された。しかも溶込みが深くなることもわかった。

図 1 5 は溶接ビードの形成に及ぼすレーザービームの傾斜の影響を示す。アンダフィルは、レーザービームを前進角に傾斜することによってスパッタの発生量を減少させて防止できることがわかった。また、前進角照射の場合、吹き上がった融液が再度溶融池に取り込まれるため、アンダフィルとならないことも観察され、確認された。

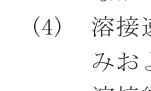
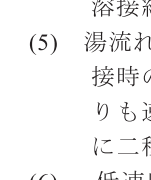
Laser power: 6kW, Welding speed: 9m/min, Incident angle: 0°, Shielding gas: Ar 50L/min				
Defocused distance [mm]	-4 mm	-2 mm	0 mm	+2 mm
Weld bead appearance				
Cross section of weld bead				
Bead width [mm]	1.0	0.9	1.0	1.0
Penetration depth [mm]	3.8	4.0	3.4	2.5

図 1 4 SUS 304 鋼のレーザー溶接ビードの表面外観と断面形状に及ぼすレーザービームの焦点はずし距離の影響

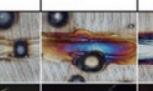
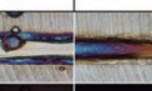
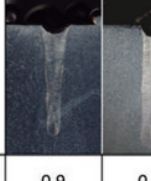
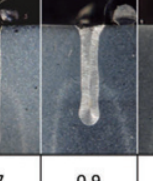
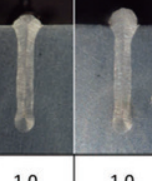
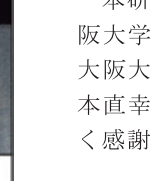
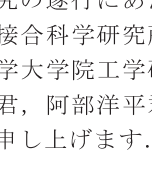
Laser power: 6kW, Welding speed: 9m/min, Defocused distance: ±0mm, Shielding gas: Ar 50L/min					
Incident Angle [deg]	-20°	-10°	0°	10°	20°
Weld bead appearance					
Cross section of weld bead					
Bead width [mm]	0.9	0.7	0.9	1.0	1.0
Penetration depth [mm]	3.5	3.9	3.2	3.4	3.5

図 1 5 SUS 304 鋼のレーザー溶接ビードの表面外観と断面形状に及ぼすレーザービームの照射角度の影響

4. 結論

本研究では、開発した長焦点集光光学系による溶接性能について溶込み深さとレーザー溶接現象の観察結果から評価した。また、レーザー溶接時の欠陥の発生とその現象について観察した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 開発した長焦点深度光学系 (Optics M) のビームは、

通常の高集束集光光学系 (Optics P) より少しスポット径が大きくなり、焦点深度は 2 倍になった。

(2) 開発した長焦点深度集光光学系 (Optics M) は、低速度での溶込みが深く、溶接速度 3 m/min で板厚 12 mm の高張力鋼板 HT780 の貫通溶接が可能であった。また、溶接速度 1.5 m/min の貫通溶接の場合、従来の高集束 Optics P では、アンダフィルやポロシティが発生したが、開発の Optics M では欠陥が抑制され、良好な貫通溶接ビードが得られた。

(3) X 線透視撮影の結果、通常の Optics P の溶接では、キーホールの変動が激しく、多数の気泡がキーホールの中間深さ位置近傍から溶融池内に発生し、後方の凝固部にトラップされてポロシティとなる様子が観察された。一方、開発した Optics M による溶接では、キーホールの変動は小さく、気泡は発生しなかった。

(4) 溶接速度を変化させると、ポロシティ、良好な溶込みおよびアンダフィルとスパッタの 3 種類の異なる溶接結果が得られた。

(5) 湯流れの三次元 X 線透視観察の結果から、レーザー溶接時のキーホール付近の湯流れ速度は、溶接速度よりも速く、キーホール後方の溶融池内の上部と下部に二種類の循環する湯流れが存在した。

(6) 低速度では、キーホール下先端部からの湯流れが速く、ポロシティが発生した。一方、高速度では、レーザーがキーホール前壁に照射され、上後方への蒸発が激しく起こり、その蒸気の流れによってキーホール後端の融液が上方へ引き上げられてスパッタとして発生し、アンダフィルの溶接ビードが形成した。

(7) 高速溶接時の大きなスパッタは、焦点位置を下方にするか、ビームを前進角に傾けて照射することによって低減できることがわかった。その結果、アンダフィルの形成は防止できた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実質的な実験を遂行頂いた大阪大学接合科学研究所川人洋介准教授、水谷正海技官、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程機械工学専攻松本直幸君、阿部洋平君、土井雄一郎、上村洋輔君らに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 宮本勇：「レーザー溶接の基礎」，第 26 回レーザー熱加工研究会論文集（1991），pp. 1-17.
- 片山聖二：「レーザープロセスの基礎とその知能化」，平成 12 年度溶接工学夏季大学教材（2000），pp. 115-144.