

高輝度・高出力ファイバーレーザー溶接における 長焦点深度加工光学系の開発とその溶込み特性への影響評価

大阪大学 接合科学研究所

教授 片山 聖二

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008218)

キーワード：高輝度，ファイバーレーザー，レーザー溶接，溶込み深さ，集光光学系

1. 研究の目標と背景

従来のレーザー溶接に使用される主なレーザー熱源としては，炭酸ガスレーザーおよび YAG (Yttrium Aluminum Garnet) レーザーが挙げられる．炭酸ガスレーザーは，波長が 9.4 μm または 10.6 μm で，ビーム品質 BPP (Beam Parameter Product) が 3 mm*mrad から 15 mm*mrad と優れている．波長 9.4 μm の場合，低パワーのパルス照射で，100 μm 程度のスポット径に集光でき，穴あけに利用されている．一方，波長 10.6 μm の場合，高パワーの連続照射では約 0.6 mm 径程度に集光され，高パワー密度が実現できる．また，大出力化も進み，45 kW の大出力レーザー発振器が製造された．しかしながら，波長が 10 μm 帯であるため，ファイバー材料である石英では吸収が存在し，ファイバー伝送できない．そのため，装置のサイズやレーザー光の取り回しなど，生産現場での自由度・柔軟性に制限がある．さらに，大出力レーザー溶接で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，逆制動放射過程により入射レーザー光が減衰し，浅い溶込みしか得られなくなるなどの課題がある¹⁾．このようなことからレーザー溶接用の大出力レーザー装置の開発と 45 kW レーザー装置の製造は停止している．

一方，YAG レーザーでは，波長が 1.064 μm であり，ファイバー伝送が可能で，自動化やロボット化に対応しやすく生産技術的に優れたレーザー熱源である．しかしながら，ビーム品質 BPP が 25 mm*mrad から 100 mm*mrad と集光性があまり良くなく，高出力で使用の際は 0.6 mm 前後のスポット径に集光されることが多い．また，発振効率は，炭酸ガスレーザーが 10 % 以下であり，YAG レーザーはさらに悪く 2 % 程度と低いという欠点がある²⁾．

そこで，新しいレーザー光源として高効率の半

導体レーザーが登場した．波長は 0.8 μm から 1.03 μm の近赤外域であり，ファイバー伝送可能で，発振効率が 20 % から 35 % と高いので，電源装置や冷却装置が小型化でき，加工システム自身も小型化が容易である．また，大出力化により，最大 10 kW のものまで市販されている³⁾．しかしながら，ビーム品質は，スロー角とファスト角の異方性をもち，BPP が 300 mm*mrad と悪く，薄板の溶接やブレイジングに用いられている⁴⁾．また，最近では，ファイバー伝送タイプも市販化され，kW 級の出力で 0.2 mm のファイバーで伝送可能となり，ビーム品質も大幅に改善され，20 mm*mrad が登場しており，注目すべきレーザー光源のひとつである．特に，最近，最も注目されているレーザーは，ファイバーレーザーおよびディスクレーザーの高輝度・高出力・高品質レーザーである．波長は YAG レーザーに近い 1.070 μm および 1.030 μm であり，光ファイバー伝送が可能である．ファイバーレーザーのビーム品質は，2 mm*mrad から 12 mm*mrad と炭酸ガスレーザーと同等以上に優れ，ディスクレーザーもまた 8 mm*mrad から 12 mm*mrad と高ビーム品質となっている．最近では，ファイバーレーザーは 100 kW (市販装置の最大パワー：50 kW) の大出力化を達成しており，また，ディスクレーザーは 16 kW まで市販されており，レーザー光を集光したスポットでは超高パワー密度を実現できる．また，発振効率もファイバーレーザー，ディスクレーザーとも 10 kW で 20% 以上と高く，レーザー溶接用熱源として適している⁴⁻⁶⁾．

これまでの高出力ファイバーレーザー溶接に関する研究では，標準的な光学系での溶込み特性やスポットサイズの影響に関して研究がなされてきた．その結果，10 kW の高パワーになるとポロシティやアンダーフィルまたはハン

ピングの溶接ビードが形成されやすく、良好な溶接部を得る条件が狭くなることがわかってきている。高輝度・高出力ファイバーレーザーの特性を活かせる長焦点深度の加工光学系については、溶接部の溶込み深さの増加、溶接欠陥の低減による高品質化など、大幅な溶接特性の改善が期待できるが、その効果に関する研究は行われていない。

本研究では、最大出力 10 kW ファイバーレーザーおよびディスクレーザーを用い、オーステナイト系ステンレス鋼に対してビード・オン・プレート溶接を行い、得られた溶込み、レーザー吸収および溶融効率について、電気・光変換効率という観点から比較検討を行った。

また、長焦点深度光学系を用いてレーザー溶接を行い、高集束型光学系と比べて、溶込み深さの改善やポロシティ等の溶接欠陥の防止などにより、エネルギー効率の高い高品質な溶接プロセスを開発するための知見を得るために実験的な検討を行った。

2. 実験方法

2・1 高輝度レーザーとその電気・光変換効率および溶融効率評価のための実験方法

本研究で用いたレーザー発振器は、最大出力 10 kW のファイバーレーザーおよび最大出力 10 kW ディスクレーザーである。焦点位置でのスポット径は、ファイバーレーザーは $\phi 200\mu\text{m}$ で、ディスクレーザーは $\phi 300\mu\text{m}$ である。

まず、高輝度レーザーの特性を明確にするため、レーザー出力毎に電力計でブレーカーから供給される電力を計測し、レーザーの電気・光変換効率を調べた。

次に、レーザーの材料への吸収率および溶融効率について検討した。供試材は、板厚 20 mm の SUS304 ステンレス鋼である。実験方法は、内部に水を流せるようになっているプラスチック製の治具に SUS304 板を固定し、試料表面が焦点位置の状態、レーザーパワーを 2 kW から 10 kW まで変化させ、溶接速度 3 m/min で、ビード・オン・プレート溶接を行った。なお、ファイバーレーザー溶接では反射損傷防止のため、加工ヘッドを前進角に 10 度傾けて使用した。シールドガスは溶接方向前方から 60 度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。レーザー溶接時には、カロリメトリー法を用いて吸収率を算出した。また、溶込み形状から溶融効

率も算出した。さらに、供給された電力を測定し、最終的には、材料に熱として吸収された電力変換効率および溶融に使われた電力変換効率を求め、各レーザー発振器の環境性（省エネルギー）を評価した。

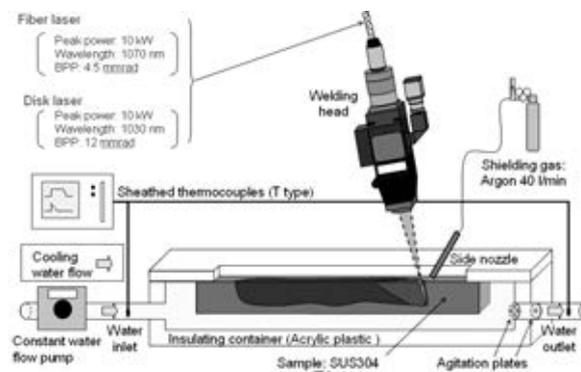


図 1 レーザー吸収率測定実験概略図

2・2 長焦点深度光学系利用による溶接性評価実験方法

長焦点深度光学系を使用した際のレーザー溶接特性を評価する実験を行った。実験装置と溶接状況の概略図を図 2 に示す。供試材は板厚 12mm の HT780 高張力鋼である。本実験で使用したレーザー発振器は最大出力 10kW のファイバーレーザーで、波長 λ が 1070nm で、BPP が $4.5\text{mm}^*\text{mrad}$ と小さく、コア径 $\phi 100\mu\text{m}$ のファイバーレーザーにより加工ヘッドへ伝送され、焦点距離 270mm の長焦点集光レンズにて集光される。焦点位置でのスポット径は $\phi 300\mu\text{m}$ 程度である。

実験は加工ヘッドを前進角に 10°傾けた状態でレーザーパワーを 10kW、溶接速度を 1.5m/min から 10m/min まで変化させてビード・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 を流速 40 L/min で供給している。溶接時のレーザー誘起プ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 で高速度観察した。また、溶融池観察においては照明光源として半導体レーザー（最大出力 P_{max} : 30 W、波長 λ : 973 nm）を用いた。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、250f/s で観察を行

った。X線透視観察時の試料は、板幅が 3 mm、板厚が 12 mm である。

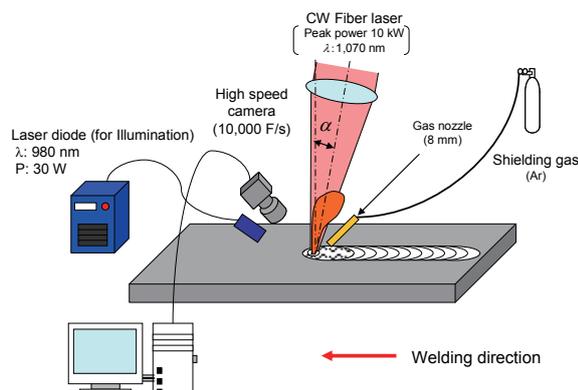


図 2 長焦点光学系の溶接特性実験概略図

3. 実験結果

3・1 高輝度レーザーの溶接性

レーザー出力を 2 ～10 kW と変化させて高出力ファイバーレーザー溶接を行った。得られた溶接ビード部の断面形状および溶込み深さを、レーザー発振に必要な電力量、溶融効率、カロリメトリ法で算出されるレーザー吸収率とともに図 3 に示す。断面形状は、ビード幅が狭いくさび状の深溶込みが形成され、従来レーザー溶接時のワインカップ状とは異なっていることがわかる。溶込みは、レーザー出力が 2 kW から 10 kW に増加するに従って深くなり、10 kW で 11.5 mm に達した。また、レーザー吸収率は、2 kW の 63% から、レーザー出力の増加とともに増加し、10 kW で 84% の高い値を示した。一方、溶融効率は、レーザー出力によらず、ほぼ 30 % 程度の値であった。

Laser power	2 kW	4 kW	6 kW	8 kW	10 kW
Power conversion efficiency for laser	12.7 %	19.6 %	26.3 %	33.1 %	39.8 %
Cross section					
Penetration	3.4 mm	6.2 mm	8.6 mm	10.4 mm	11.5 mm
Melting efficiency	33 %	31 %	31 %	32 %	32 %
Absorption	63 %	74 %	81 %	83 %	84 %

図 3 レーザ溶接部の断面形状と溶込み深さならびにレーザー吸収率、溶融効率

得られた結果を基に、レーザー吸収率および溶融効率を、レーザー出力からではなく、ブレーカーからレーザー供給される電力量から、省エネルギーの観点で評価した。その結果を図 4 に示す。

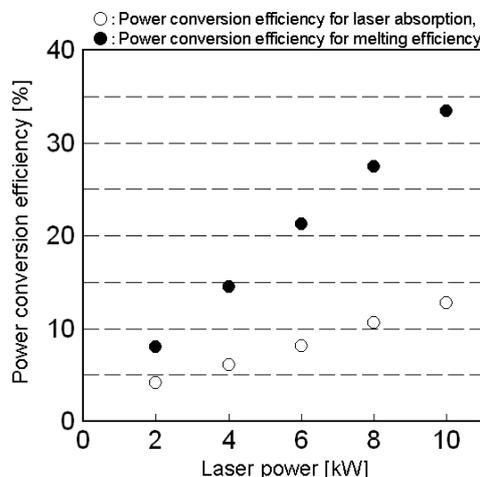


図 4 電力量とレーザー吸収率および溶融効率の関係

レーザー出力が増加すると、材料に熱として吸収される電力変換効率および溶融に使われる電力変換効率はともに増加した。一番効率が良い条件は、10 kW 出力で、ブレーカーから投入された電気エネルギーの 33% が熱として材料に吸収され、13% が溶融に使われた計算となる。現在、製造工程で稼動している従来のランプ励起の YAG レーザの電気・光変換効率の 2 % 程度に比べると、10 kW 高出力ファイバーレーザー溶接は、10% 以上あり、格段に省エネルギープロセスになっていることが判明した。

3・2 長焦点深度光学系の溶接性

3・2・1 長焦点深度光学系のビーム特性

本研究で開発した長焦点深度光学系の品質を検証するため、ビームプロファイルを測定した。また、以降の実験で特性を比較するために使用する通常の光学系についても同様に計測した。それらの測定結果を図 5 に示す（以下、通常の高集束光学系を Optics P、開発した長焦点深度光学系を Optics M と記す）。

測定の結果、開発した Optics M を使用することで、焦点深度は従来使用される Optics P の倍程度に相当する 4 mm が得られることがわかった。また、スポットサイズは Optics P が $\phi 200\mu\text{m}$ 、Optics M が $\phi 270\mu\text{m}$ であった。

そこで、これら 2つの光学系を用い、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を調査した。

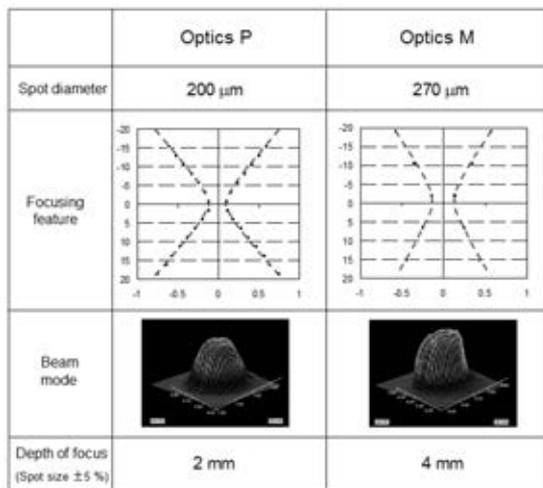


図 5 通常の光学系 (Optics P) と長焦点深度光学系 (Optics M) のビームプロファイルと集光状況

3・2・2 溶込み特性に及ぼす長焦点深度光学系の影響

長焦点深度光学系の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 6 および図 7 に示す。

Optics P の場合、溶接速度 1.5m/min において貫通溶接部が得られたが、アンダーフィルが発生した。そして、溶接速度 3m/min 以上では部分溶込みとなった。また、X線透過試験写真

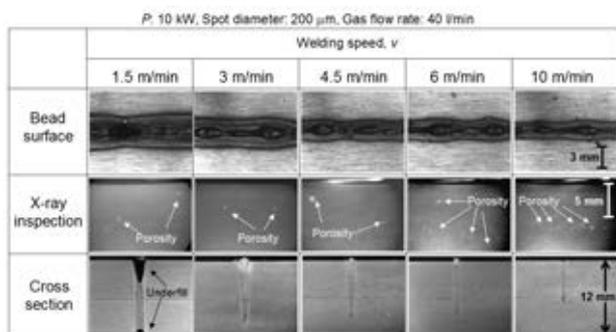


図 6 Optics P (通常の光学系) による溶接部の表面、断面、X線透過写真

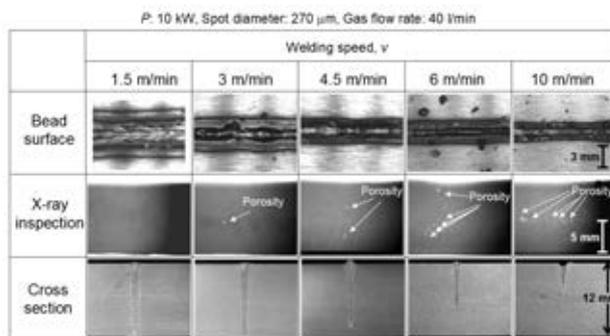


図 7 Optics M (長焦点深度光学系) による溶接部の表面、断面、X線透過写真

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た。

一方、Optics M の場合、溶接速度 3m/min で貫通溶接が可能であり、アンダーフィルは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 と同様に多数の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得ることができた。

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 8 に示す。Optics M は溶接速度 3 m/min で貫通溶接が可能であり、従来の Optics P に比べて溶込みが増加していることがわかる。しかし、溶接速度 4.5 m/min~6 m/min においては両者の溶込みはほぼ同等となり、溶接速度 8 m/min~10 m/min では Optics M の溶込みが浅くな

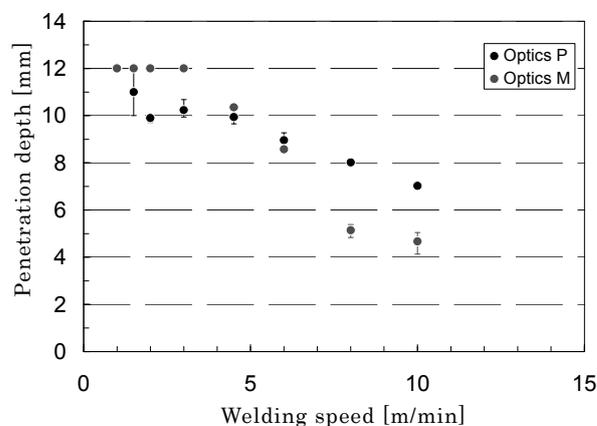


図 8 レーザ溶接部の溶込み深さに及ぼす集光光学系の影響

った。これは、図 9 に示すように、深さ方向のパワー密度の違いが現れたものである。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/mm^2 で、Optics P の 32 kW/mm^2 より高いために深い溶込みを得られたと判断される。

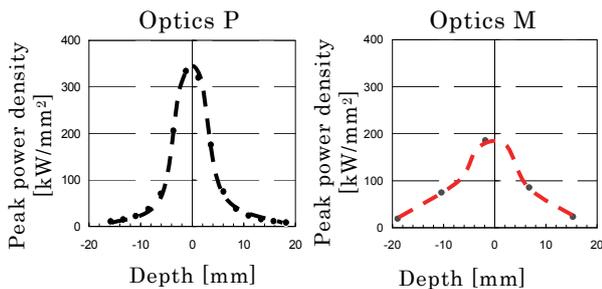


図 9 各集光光学系におけるピークパワー密度の比較

以上の結果より、Optics M は、深さ 10mm 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と比べて優位性があるということがわかった。すなわち、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集光光学系が有効であることが確認された。

また、図 10 にレーザパワー 10 kW、溶接速度 1.5 m/min で溶接中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、

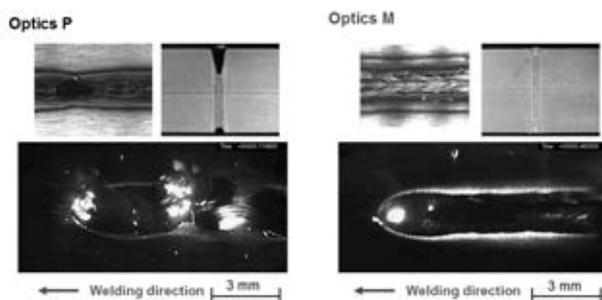


図 10 高速カメラによる溶融池観察

不規則な形状の溶接ビードが形成され、アンダー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。

3・2・3 X線透視リアルタイム観察結果

溶接速度 1.5m/min でレーザ溶接を行った場合、Optics P では多数のポロシティが確認されたが、Optics M ではポロシティは確認できなかった。そこで、溶融池内部のキーホール挙動およびポロシティの形成状況を調査するため、図 11 に示すマイクロフォーカス X線透視リアルタイム撮影装置を用いて観察を行った。

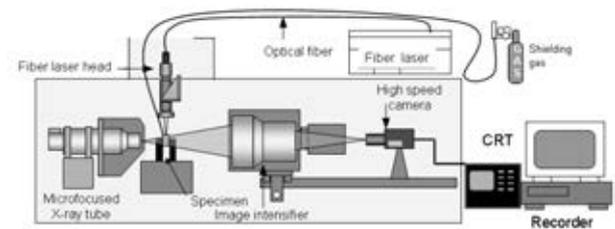


図 11 X線透視撮影装置を用いたリアルタイム観察システム概略図

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 12 に示す。

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ものの、キーホールの変動が激しく、キーホールの中間深さ部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、気泡は発生しなかった。Optics M の

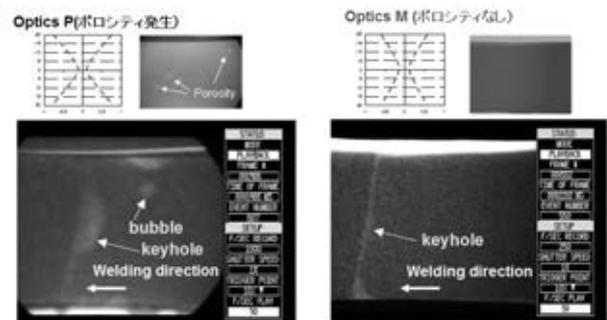


図 12 通常の光学系と長焦点深度光学系の X 透過画像

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ー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。

4. 結論

本研究では、高輝度レーザーの電力変換効率を検証し、溶融特性等に及ぼす溶接速度の影響について検討した。また、本研究で開発した長焦点光学系の溶接性能および溶接の安定性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。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 10 kW 出力で、ブレーカーから投入された電気エネルギーの 33% が熱として材料に吸収され、13% が溶融に使われることなどについて解明した。従来のランプ励起の YAG レーザの電気・光変換効率の 2% 程度に比べると、高出力ファイバーレーザー溶接は、格段に省エネルギープロセスであると判定された。
- (2) 開発した長焦点深度光学系 (Optics M) のビームプロファイルを測定した結果、通常の高集束集光光学系 (Optics P) の 2 倍の焦点深度に相当する 4 mm の焦点深度が得られた。また、スポット径は 270 μ m であった。
- (3) 開発した長焦点深度光学系 (Optics M) は、溶接速度 3m/min で板厚 12mm の高張力鋼板 HT780 を貫通溶接することが可能であった。通常の高集束集光光学系 (Optics P) を用いた場合、貫通溶接するには 1.5 m/min まで速度を遅くする必要があるため、従来の 1/2 程度の投入エネルギー低減が見込まれることになる。また、溶接速度 1.5 m/min の貫通溶接条件で溶接を行うと、従来の高集束集光光学系を使用すると、アンダーフィルやポロシティといった溶接欠陥が抑制されることが明らかとなった。
- (4) X 線透視撮影の結果、通常の高集束集光光学系 (Optics P) による溶接では、キーホールが板材を貫通しているものの、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発生し、後方の凝固部にトラップされていく様子が観察された。一方、開発した長焦点深度光学系 (Optics M) による溶接

では、キーホールを押し広げるために十分なパワー密度を持ったレーザーが長焦点になった分、広範囲に存在するため、キーホールの変動は小さく、気泡は発生しなかった。

謝辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 20 年度研究開発助成 (AF-2008218) として採択されたものであり、同財団に心より感謝しています。また、本研究遂行にあたり、ご協力を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 (修士) 課程機械工学専攻松本直幸君および阿部洋平君に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 江嶋 亮：“高出力半導体レーザー装置の現状とその応用”，LMP シンポジウム 2008 最新の高出力レーザーの現状とその応用 (2008)，pp. 59-66.
- 4) 辻 正和：“IPG ファイバーレーザーの性能とそのアプリケーションの紹介”，溶接学会全国大会講演概要 第 83 集 (2008)，pp. F38-F42.
- 5) 門屋輝慶：“高出力ディスクレーザー”，レーザー加工学会誌，Vol. 14，No. 2 (2007)，pp. 14-19.
- 6) 川人洋介，阿部洋平，大西輝政，水谷正海，片山聖二：“高輝度・高効率レーザーによるステンレス鋼の溶接特性”，溶接学会全国大会講演概要 第 85 集 (2009)，pp. 126-127.