

# 10 kW 級ファイバーレーザ・マグアークハイブリッド溶接によるI形開先突合せ溶接継手形成に関する検討\*

申 玖孝\*\*, 中田 一博\*\*\*

## Study on Weld Bead Formation with Square-Groove Butt Joint by 10 kW Class Fiber Laser-MAG Arc Hybrid Welding\*

by SHIN Minhyo\*\* and NAKATA Kazuhiro\*\*\*

Hybrid welding consisted of high power fiber laser and pulsed MAG arc was conducted on square-groove butt joint for SS400 of 12 mm thickness to investigate the optimum welding parameters for fully-penetrated weld bead formations by single pass. As a result, a sound fully-penetrated weld bead can not be obtained in laser leading-arc trailing process because irregular melt-through was observed in the bottom side weld beads under the all evaluated welding parameters. However, the formation of the irregular melt-through was suppressed effectively in arc leading-laser trailing process and sound fully-penetrated weld beads without any apparent defects was obtained successfully at the root gap up to 0.5 mm. Moreover, by using a high speed camera, it was revealed that the irregular melt-through was formed when amount of spatter was fluctuated on bottom side weld bead in laser leading-arc trailing process. However, in arc leading-laser trailing process, spattering constantly occurred and a stable molten metal pool was observed on bottom side weld bead. It was also found that the optimum laser and arc distance was below 4 mm, in which laser beam was irradiated onto the weld pool under the arc. From study results, the effect of hybrid welding parameters on the full penetration of 12 mm thick SS400 plate was systematically evaluated.

**Key Words:** Hybrid welding, High power fiber laser, Pulsed MAG arc, Fully-penetrated weld bead, Melt-through

## 1. 緒 言

近年開発されたファイバーレーザは、従来のレーザと比べると高出力化が容易であり、かつ高出力範囲内でもビームの品質が高いという特徴がある<sup>1)</sup>。また、装置が小型であり、発振効率も25%以上である<sup>2)</sup>。しかしレーザ単独溶接ではルートギャップ裕度が狭いために実用的な継手溶接が困難であり、アークと組み合せたハイブリッド溶接が望まれている<sup>3)</sup>。

ファイバーレーザとアークとのハイブリッド溶接の研究は既にこれまで報告されている<sup>4-8)</sup>が、厚板の突合せ継手を対象とした研究報告は少なく、わずかに二、三の例が見られるのみである<sup>4, 6)</sup>。

本研究では、最大出力10kWの高出力ファイバーレーザを用いてマグアークとのハイブリッド溶接システムを構築し、それを用いて、板厚12mmにおけるI形突合せ開先における高速溶接での1パス貫通溶接継手形成に関する検討を行い、形成条件を明示し、形成機構を検討した。

## 2. 供試材および実験方法

母材は厚さ12mmの一般構造用圧延鋼板SS400であり、溶接ワイヤは、ワイヤ径1.2mmの500MPa級YGW15である。それらの化学成分をTable 1に示す。シールドガスは20%CO<sub>2</sub>+80%Arであり、マグアークトーチから供給した。溶接試片形状をFig. 1に示す。継手形状はI形開先とし、ルートギャップをギャップなしから0.5mm、1.0mmに変化させた。ルートギャップの調整は所定の厚さを有するスペ

Table 1 Chemical compositions of steel specimen and welding wire used.

Material	Chemical composition (mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Fe
SS400	0.15	0.26	0.66	0.013	0.014	-	Bal.
YGW15	0.09	0.37	1.04	0.011	0.009	0.02	Bal.

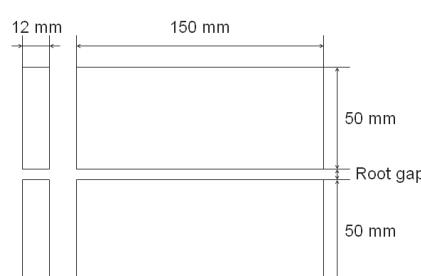


Fig. 1 Schematic of square-groove butt joint used.

\*受付日 平成23年1月6日 受理日 平成23年8月3日

\*\*学生員 大阪大学接合科学研究所 Student-Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka university

\*\*\*正員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka university

ーサを試片両端の開先にさし込み、マグアーク溶接により仮付溶接を行った。

レーザは波長 1070 nm のファイバーレーザであり、最大出力 10 kW のファイバーレーザ発振器を用いた。マグアークは DC500A インバータ制御パルスマグアーク溶接機を用い、パルスマグアーク溶接をおこなった。構築したハイブリッド溶接ヘッドを Fig. 2 に示す。レーザは垂直から 10° 傾斜条件で、アークは垂直から 25° 傾斜条件で溶接を行った。レーザ焦点は材料の表面に固定した。レーザビーム伝送のファイバーダイамeter は 0.3 mm, 焦点距離 310 mm の集光レンズにより焦点位置でのレーザビーム径は 0.48 mm である。ハイブリッド条件としてレーザ・アーク間距離 D を 2 から 10 mm まで変化させた。また溶接方向をレーザ先行とアーク先行に変化させ、それにおいてレーザ・アーク間距離を変化させた条件も検討した。レーザ・アーク間距離はレーザ先行の場合、DLA, アーク先行の場合、DAL と以下表記する。ハイブリッド溶接条件をまとめて Table 2 に示す。溶接中の溶融池表面における溶融金属の流れを高速度ビデオカ

メラを用いて動的観察した。撮影速度は 2000 frames/s とし、950 nm のバンドパスフィルターを使用した。また溶接部の外観および断面観察により得られた溶接ビードの形成特性を評価した。溶接部断面は 2% ナイタール腐食液を用いて腐食後に溶け込み形状や欠陥発生などを観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ルートギャップおよび溶接方向によるハイブリッド溶接プロセスマップ

開先なしの場合の突合せ溶接で得られた 1 パス貫通溶接ビードを外観および断面形状で分類すると Fig. 3 のようになる。良好なビードは○印、1 mm 未満のアンダーフィルがある場合には○印、1 mm 以上のアンダーフィルは△印、ハンピング状の不安定な裏ビードが形成された場合には▲印、部分溶け込みは×印で表示した。レーザ・アーク間距離 D は 2 mm で固定し、溶接方向はレーザ先行およびアーク先行、ルートギャップは 0 mm, 0.5 mm, 1.0 mm、レーザ出力は

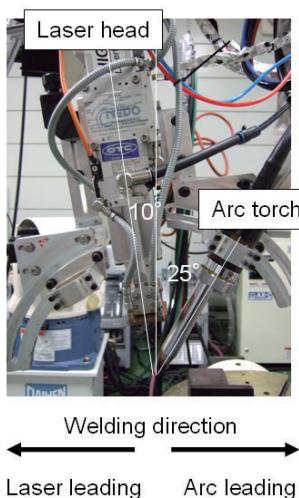


Fig. 2 Setup of 10 kW fiber laser head and MAG arc torch for hybrid welding.

Table 2 Parameters for hybrid welding.

Laser	Power	4 ~ 10 kW
	Defocused distance	0 mm (surface of the plate)
MAG arc (Pulsed)	Arc current	300 A
	Arc voltage	30 V
	Shielding gas flow rate	20% CO <sub>2</sub> + 80% Ar, 30 L/min
Welding speed		0.8 ~ 3.5 m/min
Distance between laser beam and MAG arc		2 ~ 10 mm
Root gap		0 ~ 1.0 mm
Welding direction		• Laser leading and arc trailing • Arc leading and laser trailing

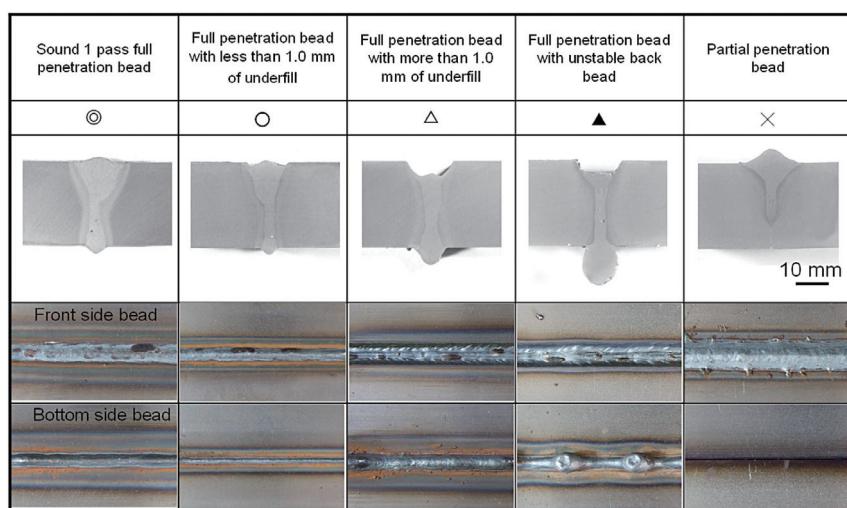


Fig. 3 Classification of hybrid weld bead depending on bead appearance and shape of bead penetration.

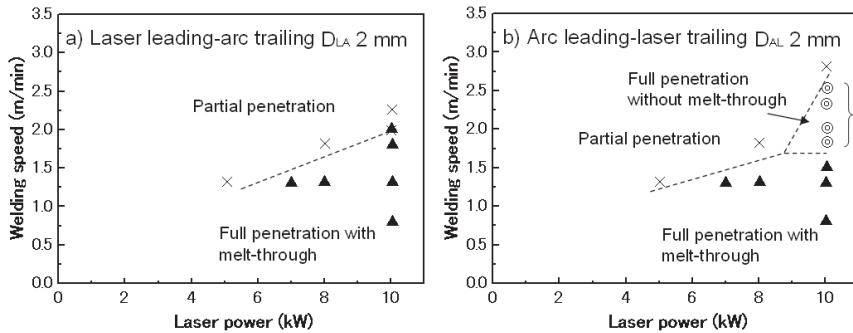


Fig. 4 Process windows for SS400 at 0 mm root gap in the case of laser leading-arc trailing and arc leading-laser trailing under constant distance between laser and arc, D: 2 mm.

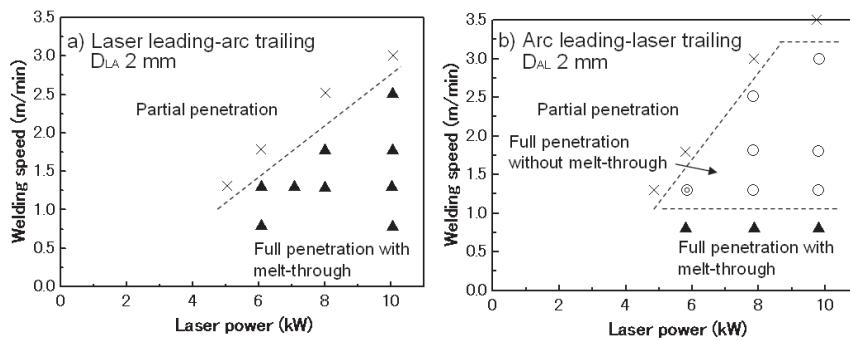


Fig. 5 Process windows for SS400 at 0.5 mm root gap in the case of laser leading-arc trailing and arc leading-laser trailing under constant distance between laser and arc, D: 2 mm.

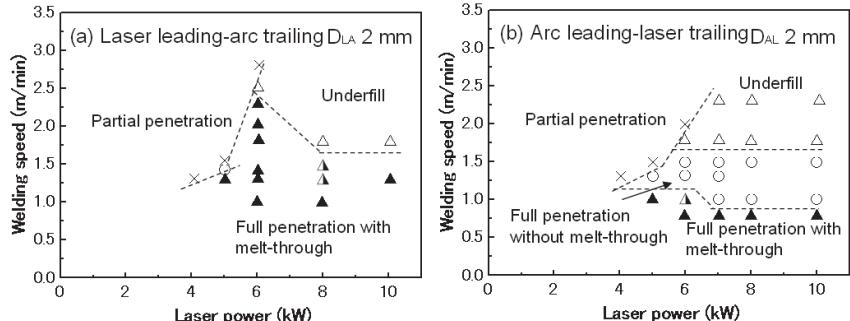


Fig. 6 Process windows for SS400 at 1.0 mm root gap in the case of laser leading-arc trailing and arc leading-laser trailing under constant distance between laser and arc, D: 2 mm.

4 kW から 10 kW, 溶接速度は 0.8 m/min から 3.5 m/min まで変化させて、溶接ビード形成の特徴を検討した。Fig. 4, 5 および 6 にそれぞれルートギャップ 0 mm, 0.5 mm および 1.0 mm の場合のプロセスマップを示す。図中のビードの形状分類は Fig. 3 に依った。ルートギャップ 0 mm の場合、レーザ先行 DLA では、検討したレーザ出力および溶接速度においては部分溶け込み、もしくはハンピング状の不安定な裏波ビードが形成され、良好な貫通裏波ビードは得られなかった。一方、アーク先行 DAL では、レーザ出力 10 kW において、溶接速度 1.8 m/min から 2.5 m/min の範囲で良好な 1 パス貫通ビードが得られた。次に、Fig. 5 に示すルートギャップ 0.5 mm では、ルートギャップ 0 mm と同様に、レーザ先行では検討した溶接条件においては部分溶け込み、もしくはハンピング状の不安定な裏波ビードが形成され、良好な貫通裏波ビードは得られなかった。一方、アーク先行

の場合、6 kW 以上の広い範囲でアンダーフィルが 1 mm 未満の安定な裏波ビードが形成された。特に、レーザ出力 6 kW、溶接速度 1.3 m/min の場合に良好な貫通溶接ビードが得られた。さらに、Fig. 6 に示すルートギャップ 1.0 mm では、レーザ先行の場合はルートギャップ 0 および 0.5 mm と同様に、検討した溶接条件においては、部分溶け込みやハンピング状の不安定な裏波ビードが形成され、また一部でアンダーフィルが 1 mm 未満の安定な裏波ビードが形成されたが、その形成条件範囲は狭く、良好な貫通裏波ビードは得られなかった。アーク先行では、5 kW 以上の広い範囲で安定な裏波ビードが形成されたが、アンダーカットの発生のために良好な貫通ビードの形成は困難であった。

以上のようにルートギャップにかかわらずレーザ先行の場合にはハンピング状の不安定な裏波ビードが形成されたのに対し、アーク先行で広い範囲で安定な裏波ビードが形

成できる条件が存在した。しかし、アンダーフィルやアンダーカットのない良好な貫通ビードの形成条件範囲はルートギャップの増大とともに狭くなる傾向にあった。ルートギャップが広くなると溶融池の溶融金属を表面張力で支えることが難しくなり、その結果、アンダーフィルやアンダーカットが発生し易くなつたと考えられる。

### 3.2 溶接ビード形成現象に及ぼす溶接方向の影響

レーザ先行では裏ビード形成が不安定になりやすい原因を調べるために、高速度ビデオカメラを用いて溶接中に溶接部の真横から観察を行い、裏ビード形成挙動を検討した。溶接条件は、ハイブリッド溶接の目的であるルートギャップを有する場合のビード形成としてルートギャップは 0.5 mm とし、アーク先行で良好な貫通溶接ビードが得られ、またレーザ先行ではハンピング状ビードとなる条件が安定して得られる条件としてレーザ出力 10 kW、アーク電流 300 A、溶接速度 1.3 m/min とした。Fig. 7 および Fig. 8 にそれぞれレーザ先行およびアーク先行時の高速度ビデオカメラによる画像を示す。(1)～(4) はそれぞれ連続した画像の中の特徴的な静止画像を示したものである。レーザ先行の場合、Fig. 7 の (2) ((1) から 109 ms 後) に示すように、裏ビードのキーホール開口部から激しいスパッタが発生し、その後方約 7 mm の位置に、小さな溶融金属のたれ下がり部分が認められた。溶接の進行とともに (3) ((1) から 654 ms 後) に示すようにスパッタの発生は継続しているが、そのスパッタ量は減少し、これにともない溶融金属のたれ下がり部分が成長しながらスパッタ発生部から後方約 26 mm まで相対的に後退し、(4) ((1) から 1099 ms 後) ではさらに大きく球状に成長した。この後、スパッタは再び激しくなり、(1) から (4) の一連の現象がくり返される傾向を示した。一方、アーク先行では、Fig. 8 に示すようにスパッタにより吹き飛ばされる溶融金属量はレーザ先行と比べる

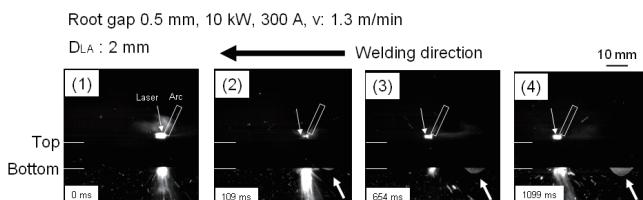


Fig. 7 High speed camera images showing spattering and humping behavior at bottom surface of weld bead in laser leading-arc trailing direction.

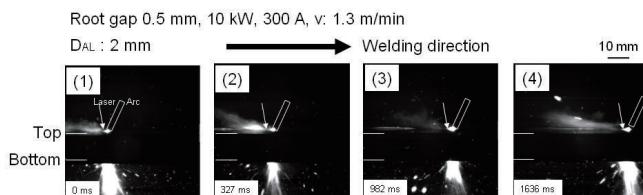


Fig. 8 High speed camera images showing spattering behavior at bottom surface of weld bead in arc leading-laser trailing direction.

と多く、かつ定常に激しいスパッタが発生し、レーザ先行でみられた溶融金属のたれ下がり部分は認められなかつた。逆に、表側の溶接ビード表面に余盛が形成されることが観察された。

以上の結果から、レーザ先行の場合には、裏面からスパッタにより吹き飛ばされる溶融金属量が、一定ではなく周期的に変動しており、スパッタ量が減少した場合には、その結果として裏ビード表面における溶融金属量が増加し、いわゆるハンピングビード形成により不安定な裏ビードが形成される傾向を示した。これに対して、アーク先行ではレーザビームが溶融池内に照射されることによりレーザビームの吸収率が増加するなどの効果が期待され<sup>9</sup>、このために、いわゆるキーホールが安定に形成されやすくなり、裏面におけるスパッタの発生も安定し、滑らかな裏波ビードが形成されたと推察される。これらの結果より、より安定して裏波溶接ビードを得るためにには、レーザ出力の増加、あるいはより細いレーザビーム径の適用などが有効と考えられる。

### 3.3 溶接ビード形成に及ぼすレーザ・アーク間距離の影響

レーザ・アーク間距離 2 mm に対して得られたプロセスマップである Fig. 4～Fig. 6 の結果に基づき、レーザ出力 10 kW、アーク電流 300 A、溶接速度 1.3 m/min, 2.0 m/min を固定し、ルートギャップおよび溶接方向をパラメータとしたときの溶接ビード形成に及ぼすレーザ・アーク間距離 D の影響を検討した。ルートギャップは 0, 0.5 および 1.0 mm として、それぞれにおいて D を 2～10 mm まで変化させた。

まず、ルートギャップ 0 mm 突合せ継手では Fig. 9 に示すようにいずれの溶接方向でも D の増加とともに溶け込み深さは減少した。アーク先行ではレーザ先行に比して溶け込み深さが深くなり、DAL 2～4 mm では連続した裏波ビードが形成された。しかし 7 mm 以上では溶け込み深さが浅くなり貫通ビードは得られなかつた。これに対してレーザ先

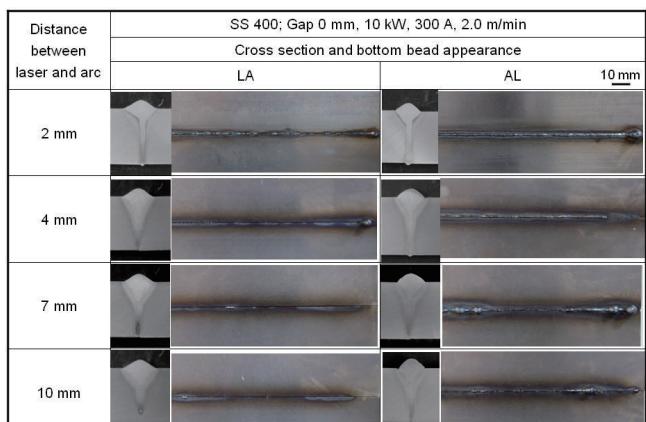


Fig. 9 Cross-sections and bottom bead appearances of 0 mm root gap in the case of changing welding direction and the distance between laser and arc.

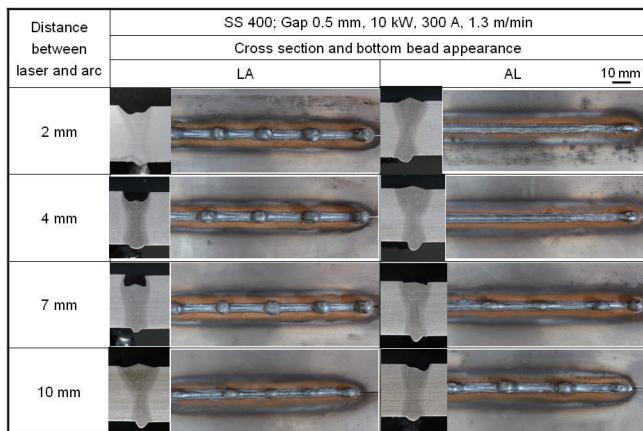


Fig. 10 Cross-sections and bottom bead appearances of 0.5 mm root gap in the case of changing welding direction and the distance between laser and arc.

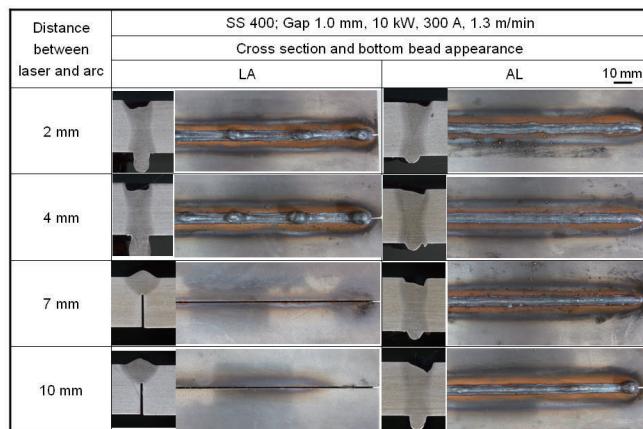


Fig. 11 Cross-sections and bottom bead appearances of 1.0 mm root gap in the case of changing welding direction and the distance between laser and arc.

行では DAL 2~4 mm においても連続した貫通溶接ビードは得られなかった。レーザ先行では溶融池前方の低温部分にレーザビームが照射されるために、アーク先行時の溶融池中心部に照射される場合に比してビーム貫通能力が低下したと考えられる。

次にルートギャップ 0.5 mm の結果を Fig. 10 に示す。レーザ先行では、ルートギャップ 0 mm の場合と同様にいずれの DAL においてもハンピング状の不安定な裏ビードが形成され、良好な貫通溶接ビードは得られなかった。一方、アーク先行では、DAL 2~4 mm では良好な貫通溶接ビードが得られた。しかし DAL 7 mm 以上ではハンピング状裏ビードが形成され、ビード表面にもアンダフィルが発生した。さらにルートギャップ 1.0 mm の結果を Fig. 11 に示す。レーザ先行の場合はルートギャップ 0.5 mm と同様に DAL 2~4 mm でも安定な裏ビードは形成されず、さらに DAL 7 mm 以上では、先行レーザビームの照射位置が溶融池から離れてルート部が溶接できず、アーク単独と同様な溶接ビード断面を呈した。一方、アーク先行では、DAL 10 mm まで安定な裏ビードが得られた。しかし、溶接ビ

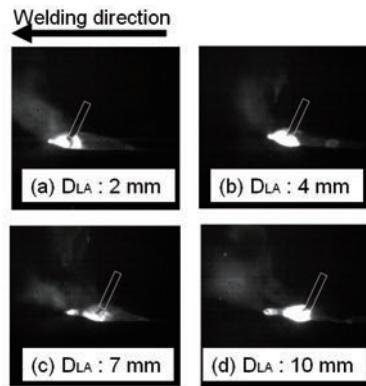


Fig. 12 High speed camera images of hybrid weld bead surface in laser leading-arc trailing at root gap of 0.5 mm.

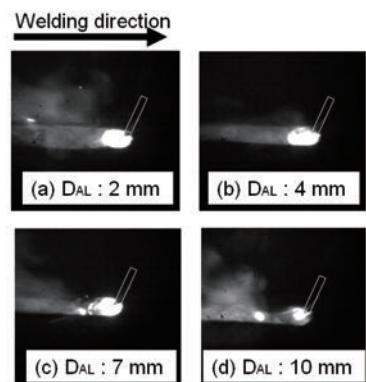


Fig. 13 High speed camera images of hybrid weld bead surface in arc leading-laser trailing at root gap of 0.5 mm.

ード表面ではいずれの DAL においてもアンダフィルが発生した。

以上の結果からアンダフィルがなく、滑らかで安定した裏波ビード形状を有する良好な 1 パス貫通ビード形成には、ルートギャップ 0 mm および 0.5 mm の場合にはアーク先行で、かつ DAL 2~4 mm の条件までが有効であることが明らかになった。またこれらの良好な溶接ビード部では溶接割れやポロシティの発生は認められなかった。

ビード形成に及ぼすレーザ・アーク間距離の影響を明らかにするために、ルートギャップ 0.5 mm における、レーザ・アーク間距離を変化した場合の溶融池表面の画像をレーザ先行およびアーク先行に対してそれぞれ Fig. 12 および Fig. 13 に示す。Fig. 12 のレーザ先行では、アーク前方にレーザによる輝点が見え、これがレーザビームによるキーホールに当たる。DAL が大きくなり、7 mm になるとキーホールは溶融池から離れて、その前方に形成する。一方、Fig. 13 はアーク先行の場合を示す。DAL 2~4 mm では映像からは特定はできないがレーザ照射位置はアーク直下の溶融池内であり、DAL 7 mm になるとアークから離れて溶融池内の後部に照射される。また、10 mm となると溶融池から完全に分離されることが分かった。すなわちアーク先行では DAL 2~4 mm で良好な裏波ビードが形成される理由として、アーク直下の高温の溶融池内にレーザビームが照射さ

れることによりレーザビームの貫通能力が高くなると推察されるのに対して、DAL 7 mm 以上では、照射位置が溶融池後方のより低温側となり、貫通能力が低下してキーホールが不安定になり、これがハンピング状裏波ビードの形成につながったと考えられる。

以上の結果より、本研究のレーザ・アークハイブリッド溶接条件下においては、ハイブリッド溶接により滑らかな裏波ビード形状を有する貫通溶接部が得られる有効なレーザ・アーク間距離は 4 mm 以内であり、それはレーザビーム照射位置がアークにより形成される溶融池内高温部に照射される条件であることが明らかになった。なお例えれば板厚が異なる場合には溶融池形状もアーク溶接条件により変化するために、それに対応して有効なレーザ・アーク間距離も変化するものと推察される。

#### 4. 結 言

厚板 12 mm の SS400 における I 形突合せ継手に対して 10 kW 級ファイバーレーザとマグアークによるハイブリッド溶接を実施し、その溶接パラメータが溶接ビード形状に及ぼす影響を検討した。本研究の溶接条件の範囲で得られた結果は以下のようになる。

- 1) レーザ先行／アーク後行の場合、検討したルートギャップおよびレーザ出力、溶接速度の範囲では裏波ビードが不安定となり、いわゆるハンピングビード現象が発生し、良好な 1 パス貫通ビード形成が困難であった。しかし、アーク先行／レーザ後行の場合、滑らかで安定な裏波ビードが得られる条件範囲が存在した。
- 2) 高速度ビデオカメラによる観察結果により、ハンピング状となる不安定な裏波ビードが形成されるレーザ先行では、裏面でのスパッタ量が周期的に変動し、スパッタ量が減少した時にこれに対応して裏面の溶融金属の滞留量が増加して、こぶ状にたれ下がり、いわゆるハンピングビード形状を呈した。これに対して滑らかで安定した裏波ビードが形成されたアーク先行では裏面でのスパッタの発生は安定であり、吹き飛ばされた溶融金属量も多く

なる傾向にあった。

- 3) アーク先行では、ルートギャップ 0 mm および 0.5 mm において、アーク・レーザ間距離 DAL 2 mm および 4 mm で良好な 1 パス貫通ビードが得られたが、7 mm 以上では部分溶け込みおよびハンピング状の不安定な裏波ビードが形成された。
- 4) ハイブリッド溶接により滑らかで安定した裏波ビードの形成が可能なレーザ・アーク間距離は本研究の溶接条件の範囲では 4 mm 以内であり、レーザビーム照射位置が溶融池内のアーク近傍の高温部にある条件と一致した。

#### 参 考 文 献

- 1) L. Quintino, A. Costa, R. Miranda, D. Yapp, V. Kumar and C. J. Kong: Welding with High Power Fiber Lasers-a Preliminary Study, Materials and Design, 28 (2007), 1231-1237.
- 2) Z. Liu, G. Xu and M. Kutsuna: Laser and laser-MAG hybrid Welding of High Strength Steel Using Fiber Laser and CO<sub>2</sub> Laser, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 25-2 (2007), 254-260.
- 3) M. Kutsuna: Laser-Arc Hybrid Welding, Developments in Advanced Welding Processes, Technical Commission on Welding Processes Japan Welding Society, (2009), I45-I66.
- 4) M. Shin and K. Nakata: Single Pass Full Penetration Welding of High-Tensile Steel Thick-Plate Using 4 kW Fiber Laser and MAG Arc Hybrid Welding Process, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 27-2 (2009), 80s-84s.
- 5) D. S. Howse, R. J. Scudamore and G. S. Booth: The Evolution of Yb fiber laser/MAG Hybrid Processing for Welding of Pipelines, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, (2005), 6.
- 6) M. Rethmeier, S. Gook, M. Lammers and A. Gumennuk: Laser-Hybrid Welding of Thick Plates up to 32 mm using a 20 kW Fiber laser, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 27-2 (2009), 74s-79s.
- 7) Victor, B., Nagy, B., Ream, S. and Farson, D.: High brightness hybrid welding of steel, ICALEO 2009 Congress proceedings, Vol. 102, 2009, 79-88.
- 8) Yang, S., Sarrafi, R. and Kovacevic, R.: Hybrid 4 kW fiber laser-GMAW welding of half-inch mild steel, ICALEO 2010 Congress proceedings, Vol. 103, 2010, 1463-1468.
- 9) S. Katayama: Laser Welding, Journal of The Japan Welding Society, 78-2 (2009), 124-138 (in Japanese).