

# 高張力鋼厚板のレーザ・炭酸ガスアークハイブリッド溶接における溶込み特性

潘 慶 竜, 水 谷 正 海, 川 人 洋 介, 片 山 聖 二

大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)  
qlp@jwri.osaka-u.ac.jp

Thick High Tensile Strength Steel Plate Fully-penetrated by Laser-CO<sub>2</sub> Gas Shielded arc Hybrid Welding

PAN Qinglong, MIZUTANI Masami, KAWAHITO Yousuke and KATAYAMA Seiji

(Received December 10, 2015)

In this study, a high power disk laser and CO<sub>2</sub> gas shielded arc hybrid welding process was established to weld 780 MPa high tensile strength steel plates of 25 mm in thickness. The effects of welding conditions such as laser power, root gap and arc characteristic on the weld bead geometry and welding defects were studied. The results showed that sound weld joints could be obtained by hybrid welding procedure with either double-sided or one-sided two passes. The range of welding conditions for the production of a good weld bead on the bottom surface became much wider at the increased root gap in one-sided first pass hybrid welding. Optimizing the welding speed and laser power in the second pass hybrid welding could prevent the formation of cracks. If the partial penetration weld was extremely deep, cracks might occur in the second pass hybrid weld. Therefore, the appropriate penetration in the second pass welding could produce a sound full penetration weld bead by remelting the cracks which had occurred in the first hybrid weld bead.

**Key words:** laser-arc hybrid welding, high tensile strength steel, thick plate, weldability

## 1. 緒 言

高張力鋼は、軽量化による省エネルギーの要望から、近年、自動車、船舶、海洋構造物、橋梁などの各種構造物において薄板から厚板まで広く適用されており、今後さらに適用の拡大が予想される<sup>1-3)</sup>。特に、高張力鋼厚板の溶接法として、各種アーク溶接法が使用されているが、アーク溶接はパワー密度が低く、溶込み深さが浅いことから、開先の作製、溶落ち防止のための裏当ての使用、割れ防止のための予熱や後熱処理、多層盛溶接における溶接施工条件(入熱量・パス間温度)の管理などが必要とされる<sup>4,5)</sup>。なお、サブマージアーク溶接では厚板の溶接が1パスで可能であるが、大電流を必要とし、過剰入熱によって溶接部の靱性が劣化することが多い。一方、レーザ溶接では、アーク溶接と比べてパワー密度およびエネルギー密度が高いため、材料を瞬間に溶融、蒸発させることができ、深溶込み溶接や高速溶接が可能である。しかし、レーザビームの集光スポット径が小さいため、ギャップ裕度が小さく、レーザビームの狙い位置精度が厳しく、高い治具精度が必要とされる<sup>6-8)</sup>。

ところで、レーザ・アークハイブリッド溶接法は、レーザとアークの異なる特徴を有する熱源を効果的に組み合わせることでおのおの短所を補完するとともに長所を生かして相

乗効果を引き出すことができる。つまり、アークは溶融金属を供給してギャップ裕度を改善し、レーザは深溶込みなどの役割をもち、高速溶接も可能である<sup>9-12)</sup>。したがって、高張力鋼厚板の溶接において高速・高生産性で高品質な溶接部を作製するために、大出力レーザ・アークハイブリッド溶接法の確立が期待されている。そこで、本研究では、厚さが25 mmの高張力鋼HT780に対して、高出力ディスクレーザと炭酸ガスアークの二つの熱源を用い、両面2パスおよび片面2パスI形突合せハイブリッド溶接を行い、良好な貫通溶接継手の作製を試み、溶込み特性と溶接性に及ぼす各溶接パラメータの影響を検討した。

## 2. 供試材および実験装置

実験に使用した供試材は、板厚25 mmの高張力鋼HT780であり、溶接ワイヤは炭酸ガスアーク溶接用の直径1.2 mmのMG-80である。それぞれの化学組成をTable 1に示す。HT780鋼は、炭素(C)含有量が約0.09%と低く、リン(P)およびイオウ(S)含有量もそれぞれ約0.006%および0.002%と低い鋼種である。

使用したレーザ発振器は、波長が1030 nmの最大出力16 kWのディスクレーザであり、そのビーム品質は8 mm\*mradである。レーザ光は発振器からコアφ200 μmのファイバーで伝送され、焦点距離 $f$ : 280 mmの集光レン

ズによりスポット径 280 μm に集光された。レーザビームは試料に対して垂直に照射した。アーク熱源としては最大電流が 350 A である溶接機を用いた。

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。また、レーザとアークの配置の模式図を Fig. 2 に示す。アークの基本条件として、水平方向から 60° 傾け、電極ワイヤのチップからの突出し長さは 15 mm とした。試料表面上におけるアーク狙い位置とレーザスポット狙い位置間距離 ΔL は 4 mm である。シールドガスとして炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) を内径 16 mm のアーク電極同軸ガスノズルより 30 L/min で供給した。溶接方向はアーク先行であり、突合せ溶接を行った。

溶接ビード部の溶込み形状については、切断面を研磨し、ナイタールで腐食して観察した。また、溶接金属部に生じていた縦割れについては、走査型電子顕微鏡 (SEM) で破断面を観察することにより高温 (凝固) 割れであるのか低温

割れであるかの同定を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 両面 2 パスハイブリッド溶接における溶込み特性

最初に、ギャップ 0.5 mm の I 形突合せ継手の鋼板に対して、レーザパワーを 16 kW、溶接速度を 1 m/min 一定とし、溶接電流を 300 A から 340 A まで増加させてレーザ・炭酸ガスアークハイブリッド溶接を行った。得られた溶接ビードの外観および断面形状を Fig. 3 に示す。溶接電流 300 A および 320 A の場合、部分溶込みの未貫通溶接部が得られた。340 A に増加すると、貫通溶接部が形成したが、顕著な溶落ちが発生し、表面はレーザ切断に類似で、裏面にハンピングが形成した。また、いずれの溶接金属においても割れが発生することがわかった。これは、梨形割れと類似の高温割れ (凝固割れ) の一種と推察される。なお、3.3 節において、割れの詳細な観察を行うことにより割れの種類を判定するが、以後、割れとして記述する。

次に、溶接電流を 300 A 一定とし、ギャップを 1 mm に増加させてハイブリッド溶接を行った。得られた溶接ビード外観を Fig. 4 に示す。ギャップを増加すると、貫通溶接部が得られやすくなったが、いずれも表面にアンダフィルが発生し、裏面にハンピングが形成することが確認された。なお、ギャップ 1 mm の場合、スパッタが表面に多数付着していた。これはギャップの増加によってアークが不安定になったためと考えられる。

さらに、ギャップを 0.7 mm と固定して溶接速度を 1 m/min から 1.7 m/min まで変化させて溶接を行った。得られ

Table 1 Chemical compositions of high tensile strength steel and wire.

| Materials  |       | Chemical compositions (mass%) |      |      |       |       |                      | Fe   |
|------------|-------|-------------------------------|------|------|-------|-------|----------------------|------|
|            |       | C                             | Si   | Mn   | P     | S     | Others               |      |
| Base metal | HT780 | 0.09                          | 0.21 | 0.95 | 0.006 | 0.002 | 2.00                 | Bal. |
| Wire       | MG-80 | 0.08                          | 0.38 | 1.25 | 0.009 | 0.011 | 2.22% Ni<br>0.63% Mo | Bal. |

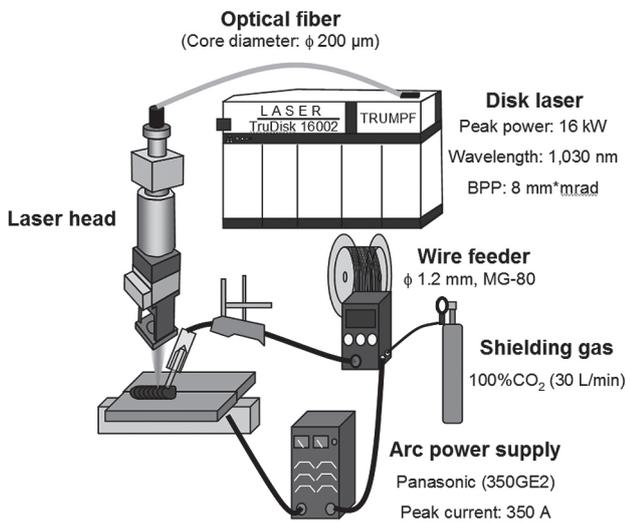


Fig. 1 Schematic experimental setup of laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding.

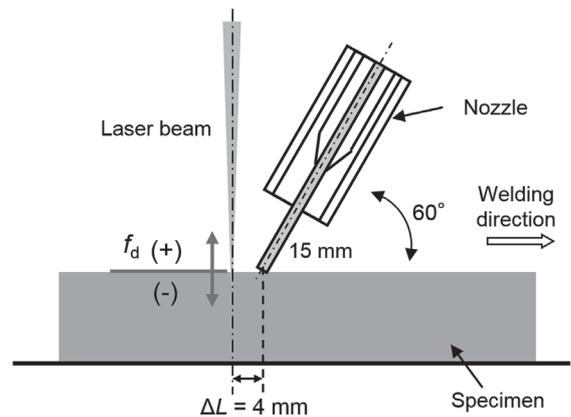


Fig. 2 Schematic of setup conditions for laser and arc hybrid welding.

|                |               | $P_l = 16 \text{ kW}, v_1 = 1 \text{ m/min}, \text{gap} = 0.5 \text{ mm}, f_d = -1 \text{ mm}, \Delta L = 4 \text{ mm}, 100\% \text{CO}_2$ |   |              |   |              |  |
|----------------|---------------|--|---|--------------|---|--------------|--|
| $I_a / V_a$    |               | 300 A / 24 V   |   | 320 A / 26 V |   | 340 A / 28 V |  |
| Top surface    | Cross section |  |   |              |   |              |  |
| Bottom surface |               | —  | — | —            | — |              |  |

Fig. 3 Surface appearances and cross sections of weld beads produced by laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding for I-butt joints at various welding currents.

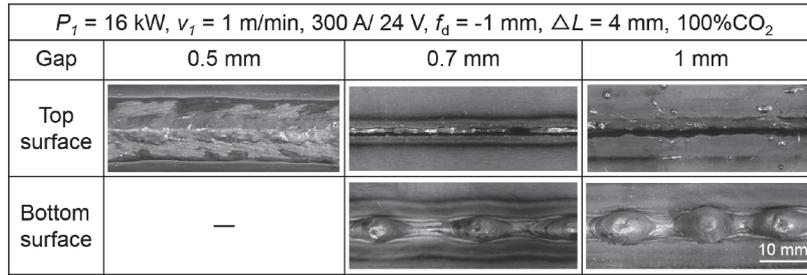


Fig. 4 Surface appearances of weld beads produced by laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding for I-butt joints at various gaps.

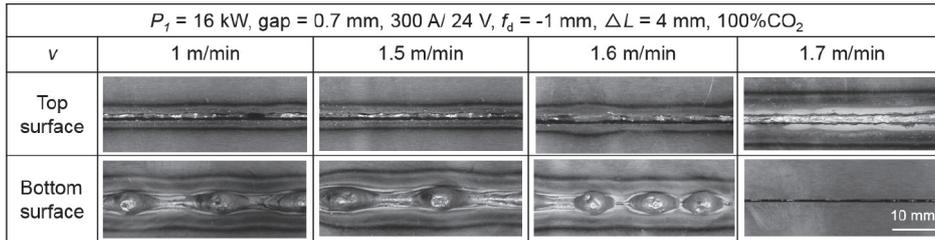


Fig. 5 Surface appearances of weld beads produced by laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding for I-butt joints at various welding speeds.

た溶接ビードの外観を Fig. 5 に示す。溶接速度が 1.6 m/min 以下の場合、貫通の溶接ビードが形成されたが、表面がアンダフィルとなり、裏面にハンピングが発生した。一方、速度 1.7 m/min では、表面にアンダフィルを有する部分溶込みの溶接部となり、貫通溶接部は得られなかった。

以上の結果より、板厚 25 mm の高張力鋼 HT780 の突合せ溶接は 1 パスで良好な貫通溶接部を作製することが非常に困難であると判断された。

そこで、次に、両面からの 2 パスハイブリッド溶接を行った。まず、ギャップ 0.5 mm の I 形突合せ継手に対して、レーザーパワーを 16 kW、溶接速度を 1 m/min と固定して 1 パス目のハイブリッド溶接を行い、その後、試料を反転させて溶接速度 0.8 m/min で 2 パス目のハイブリッド溶接を行った。溶接結果に及ぼす 2 パス目のレーザーパワーおよび溶接速度の影響を Fig. 6 に示す。1 パスの溶接では、下部の溶接金属に割れが発生した。両面からの 2 パスハイブリッド溶接の場合、表面形状の比較的良好な貫通ビードが得られた。しかし、レーザーパワー 6 kW の場合、割れが 1 パス目とは少し異なる位置で、2 パス目の溶接金属の下部に発生した。これは、1 パス目の割れが 2 パス目の溶接で溶融除去されたが、2 パス目の溶接底部に新たに発生したとみなされる。そこで、レーザーパワーを 4 kW に減少すると、溶接欠陥のない良好な溶接ビードが形成されることが判明した。この場合、1 パス目の割れは溶融除去され、2 パス目の溶接では割れが発生しなかったことになる。

以上の結果より、溶接速度およびレーザーパワーの低減した条件は、割れの防止に有効であると推察される。

### 3.2 片面 2 パスハイブリッド溶接における溶込み特性

3.1 節では、両面 2 パスハイブリッド溶接法より、良好な貫通溶接部を作製できる条件があることがわかった。しかし、大型鋼板の反転作業は危険で困難であることや反転のためのクレーン待ちなどの生産性の低下が問題となる。

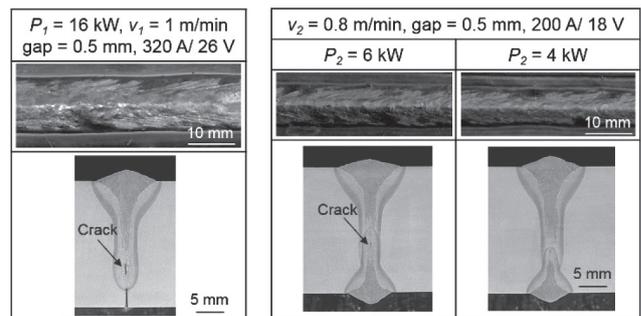


Fig. 6 Surface appearances and cross sections of weld beads produced by laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding under two-sided two passes.

そこで本節では、片面からの 2 パスハイブリッド溶接を行った。まず、1 パス目で良好な裏面ビードを作製することを目的として、溶接性に及ぼす焦点はずし距離の影響を検討した。ギャップ 0.7 mm の I 形突合せ鋼板に対して、レーザーパワーを 16 kW、溶接速度を 1.5 m/min と固定して焦点はずし距離を -5 mm から -18 mm まで変化させて 1 パス目のハイブリッド溶接を行った。得られた溶接ビードの外観および断面形状を Fig. 7 に示す。-5 mm から -14 mm までの範囲において、貫通溶接部が得られることがわかった。また、焦点はずし距離をマイナス方向に増加させると、裏面でのハンピングが改善され、-14 mm では良好な裏面形状の溶接ビードが得られた。しかし、焦点はずし距離が長すぎる -18 mm では、部分溶込みの未貫通溶接部が形成した。これは、試料表面のレーザーパワー密度が低くなったことにより、レーザービームによるキーホールが形成されにくくなり、キーホール底部に照射されるレーザーが低下したためと考えられる。なお、-14 mm の場合、溶接金属の中央部に割れが発生した。また、部分溶込み溶接の場合、溶接金属下部に割れが発生することが多いことがわかつ

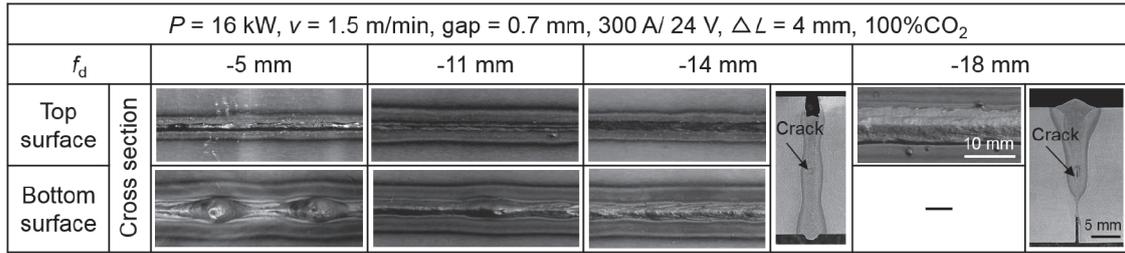


Fig. 7 Surface appearances and cross sections of weld beads produced by hybrid welding for I-butt joints at various defocused distances.

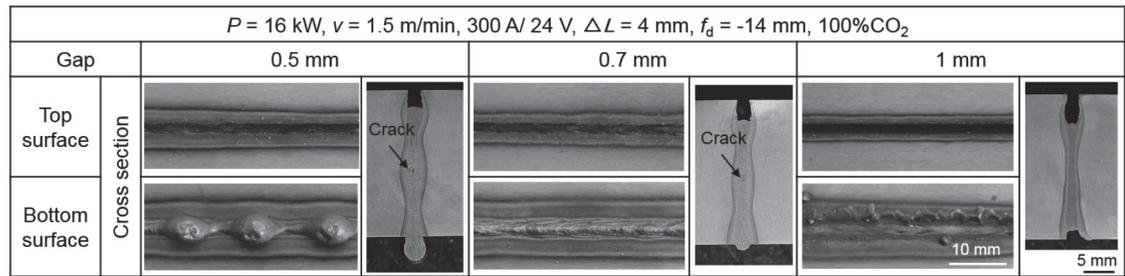


Fig. 8 Surface appearances and cross sections of weld beads produced by hybrid welding for I-butt joints at various gaps.

た。

次に、レーザの焦点はずし距離を -14 mm に固定してギャップを 0.5 mm から 1 mm まで変化させ、そして、ギャップ 0.7 mm および 1 mm において溶接電流を 260 A から 350 A まで変化させてハイブリッド溶接を行った。得られた溶接結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8 より、いずれのギャップに対しても貫通溶接部が得られたが、表面はレーザ切断と類似の凹形状となった。一方、裏面の溶接ビードは、ギャップ 0.5 mm, 0.7 mm および 1 mm の場合、それぞれハンピング、良好な形状およびアンダフィルとなり、0.7 mm の適正なギャップを確保すれば、良好な裏面溶接ビードの形成が可能であることがわかった。なお、0.5 および 0.7 mm の場合、溶接金属の中央部に割れが発生していることが確認された。特に、溶接ビード幅が広いところに見られるようであった。一方、1 mm の場合、溶接金属部に割れは発生していなかった。これらのことから、溶接ビードにおいて融液が多量に残り、中央部の凝固が遅れた場合、サブマージ溶接法でよく知られている梨形割れと類似の機構で割れが発生したものと推断される。そして、1 mm の場合は、溶接中に溶融金属が裏面から溶け落ちることにより融液が少なくなり、凝固遅れの生じる溶融池が広範囲には形成されず、割れが発生しなかったものと考えられる。

Fig. 9 より、ギャップ 0.7 mm の場合、溶接電流 260 A では、裏面にアンダフィルが発生していた。溶接電流を増加させると、アンダフィルの改善が見られ、電流 300 A では良好な裏面ビードが形成され、320 A では溶落ち傾向が見られた。一方、ギャップ 1 mm の場合、電流 300 A および 330 A で溶接ビード裏面にアンダフィルが発生した。これはギャップが広くなったため、レーザが溶融池をよく貫通し、溶融金属が溶け落ちたためと考えられる。電流 350

| P = 16 kW, v = 1.5 m/min, f <sub>d</sub> = -14 mm, ΔL = 4 mm, 100%CO <sub>2</sub> |                 |                           |               |
|---|-----------------|---------------------------|---------------|
| Gap   | Welding current | Bottom surface appearance | Cross section |
| 0.7 mm  | 260 A           |                           |               |
| 0.7 mm  | 280 A           |                           |               |
| 0.7 mm  | 300 A           |                           |               |
| 0.7 mm  | 320 A           |                           | —             |
| 1 mm  | 300 A           |                           | —             |
| 1 mm  | 330 A           |                           | —             |
| 1 mm  | 350 A           |                           |               |

Fig. 9 Bottom surface appearances and cross sections of weld beads produced by hybrid welding for I-butt joints with different gaps at various welding currents.

A では、良好な裏面ビードを得られたが、溶接ビード表面の直上のギャップが広くっており、2パス目の溶接が困難となることが予想された。

続いて、2パス目のハイブリッド溶接を行った。溶接条

| Parameter       | Figure 10 (a) |             | Figure 10 (b) |             |
|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                 | First pass    | Second pass | First pass    | Second pass |
| Laser power     | 16 kW         | 12 kW       | 16 kW         | 8 kW        |
| Gap             | 0.7 mm        | —           | 0.7 mm        | —           |
| Welding speed   | 1.5 m/min     | 1.5 m/min   | 1.5 m/min     | 0.8 m/min   |
| Welding current | 300 A         | 350 A       | 300 A         | 200 A       |
| Focal position  | -14 mm        | -1 mm       | -14 mm        | -1 mm       |

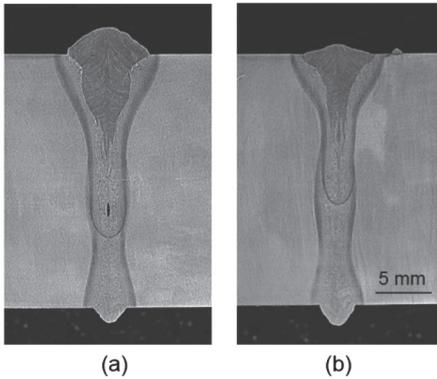


Fig. 10 Cross sections of weld beads produced by laser-CO<sub>2</sub> gas arc hybrid welding at one-sided two passes.

件および得られた結果を Fig. 10 に示す。いずれも貫通溶接部を作製できたが、レーザパワー 12 kW、溶接速度 1.5 m/min の条件で割れが 2 パス目の溶接ビードの下部に発生していた。レーザパワーおよび溶接速度をそれぞれ 8 kW および 0.8 m/min に減少させた場合、割れない良好な溶接ビードが作製できることがわかった。溶接割れを防止するためには、2 パス目の溶接部の溶込み深さを 1 パス目の割れを溶融除去できる深さで、できるだけ浅く制限する必要があることが判明した。なお、両面 2 パス目のハイブリッド溶接では 6 kW のレーザパワーで割れが発生したが、片面 2 パス目のハイブリッド溶接では 8 kW のレーザパワーで割れが防止できた。この理由については、ギャップの影響およびワイヤ成分の影響により溶融池底部の湯流れや凝固時の融液の残量に差が生じたことが考えられるが、現在のところ不明であり、今後、明確にする必要がある。

### 3.3 溶接割れの観察結果

3.1 節および 3.2 節では、主に部分溶込みのハイブリッド溶接金属部に溶接割れが形成されることがわかった。そこで、その割れが生じていた部分の水平断面および割れ破面を SEM で観察した。その結果を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。Fig. 11 より、溶接割れは連続ではなく、そして割れが生じていた部分の溶接ビード幅が広がっていることが確認された。一方、破断面では、Fig. 12 の実線で囲まれた範囲が高倍率の観察結果より割れの生じていた部分であると判断された。Area 1 の高倍率の観察結果では、破断面に対して垂直方向に成長した凹凸のあるデンドライト状の形態が観察された。これは Area 2 で見られる小さいディンプルとは特徴が異なる。なお、割れの発生していない溶接金属部の強制破断面はディンプルの形成から延性があることがわかる。

これらの観察結果より、溶融池の後方での凝固が連続し

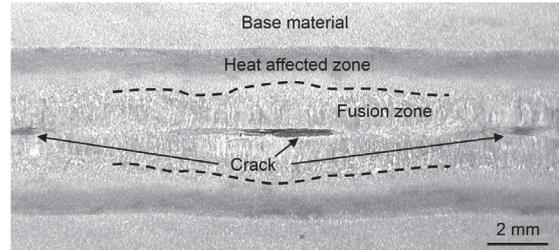


Fig. 11 Horizontal section of hybrid weld, showing discontinuous cracks along weld bead centerline.

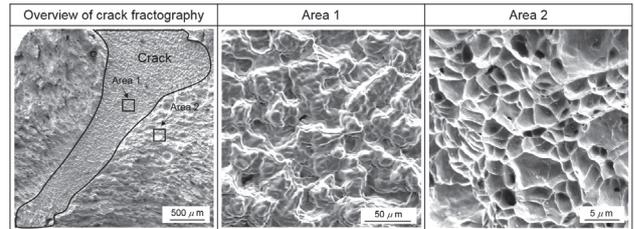


Fig. 12 SEM observation photos, showing crack surface and artificially-fractured surface of hybrid weld fusion zone.

て起こってなくて、溶融が一部閉じ込められたところが形成し、凝固する際に、溶接金属部の中央付近まで固相が到達した段階で、融液の不足となり凝固割れが生じたものと推察され、割れの形成機構は梨形割れと同様であると考えられる。

## 4. 結 言

本研究では、板厚 25 mm の高張力鋼 HT780 に対して、両面 2 パスおよび片面 2 パスでレーザ・炭酸ガスアークハイブリッド溶接による貫通溶接継手の作製を試み、溶込み特性および溶接性に及ぼす各種パラメータの影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) I 形突合せ継手に対して、レーザ・炭酸ガスアークハイブリッド溶接による 1 パスで良好な貫通溶接部を作製することが非常に困難であると判断された。
- (2) 両面からの 2 パスハイブリッド溶接の場合、比較的良好な貫通溶接部が得られた。
- (3) 片側からの 2 パスハイブリッド溶接の場合、1 パス目で裏面の良好な溶接ビードを形成し、2 パス目で凹型のアンダフィル部を埋める方法により、割れなどの溶接欠陥のない良好な溶接部が形成できることがわかった。
- (4) 部分溶込みの溶接ビードにおいて割れが発生したが、この割れは融液が多量に残り、中央部の凝固が遅れ、その中央部に割れが発生したと推察され、梨形割れと同様な高温割れ(凝固割れ)と判定された。一方、溶接中に溶融金属が裏面から溶け落ちた場合、融液が少なくなり、凝固遅れの生じる溶融池があまり形成されなくなり、割れが発生しなくなったものと考えられる。

- (5) 1パス目の割れは2パス目溶接による再溶融で除去でき, 2パス目の割れを防止するためには, レーザパワーおよび溶接速度を低減させ, 溶接部の溶込み深さを浅く制限する必要があることがわかった.

#### 参考文献

- 1) Miki, C., Homma, K. and Tominaga, T.: "High strength and high performance steels and their use in bridge structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **58**-1, (2002), 3-20.
- 2) Kim, H.J., Keoleian, G.A. and Skerlos, S.J.: "Economic assessment of greenhouse gas emissions reduction by vehicle lightweighting using aluminum and high-strength steel", *Journal of Industrial Ecology*, **15**-1, (2011), 64-80.
- 3) 川畑友弥, 西畑ひとみ: 素材開発(2)鉄鋼材料—高張力鋼—, *溶接学会誌*, **81**-3, (2012), 184-191.
- 4) Nathan, S.R., Balasubraminian, V., Malarvizhi, S. and Rao, A.G.: Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints, *Defence Technology*, **11**-3, (2015), 308-317.
- 5) Chen, Y., Yang, C., Chen, H., Zhang, H. and Chen, S.: Microstructure and mechanical properties of HSLA thick plates welded by novel double-sided gas metal arc welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **78**-1-4, (2015), 78, 457-464.
- 6) Ohnishi, T., Kawahito, Y., Mizutani, M. and Katayama, S.: Butt welding of thick high strength steel plate with a high power laser and hot wire to improve tolerance to gap variance and control weld metal oxygen content, *Science and Technology of Welding and Joining*, **18**-4, (2013), 314-322.
- 7) Todo, M., Shinozaki, K., Yamamoto, M., Kadoi, K., Yamamoto, M., Phaonaim, R. and Okagaito, T.: Hot-wire laser welding process using laser diode for large-diameter pipe with narrow gap joint, *溶接学会論文集*, **33**-2, (2015), 107s-110s.
- 8) 片山聖二, 井戸諒治, 西本浩司, 水谷正海, 川人洋介: 低真空中における高出力ディスクレーザ溶接による高張力鋼厚板の貫通溶接, *溶接学会論文集*, **33**-3, (2015), 262-270.
- 9) Webster, S., Kristensen, J.K. and Petring, D.: Joining of thick section steels using hybrid laser welding, *Ironmaking and Steelmaking*, **35**-7, (2008), 496-504.
- 10) Rethmeier, M., Gook, S., Lammers, M. and Gumenyuk, A.: Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fibre laser, *溶接学会論文集*, **27**-2, (2009), 74s-79s.
- 11) Cao, X., Wanjara, P., Huang, J., Munro, C. and Nolting, A.: Hybrid fiber laser-Arc welding of thick section high strength low alloy steel, *Materials and Design*, **32**-6, (2011), 3399-3413.
- 12) Turichin, G., Kuznetsov, M., Sokolov, M. and Salminen, A.: Hybrid laser arc welding of X80 steel: Influence of welding speed and preheating on the microstructure and mechanical properties, *Physics Procedia*, **78**, (2015), 35-44.