

高出力半導体レーザーとホットワイヤ法とを組み合わせた 極厚鋼板 1 パス縦向き溶接技術の開発

広島大学 大学院 工学研究科
教授 山本 元道
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017230)

キーワード：高出力半導体レーザー，ホットワイヤ，厚鋼板，1 パス立向き，矩形ビーム

1. 研究の目的と背景

近年，大型船舶建造分野では，高能率・高品質（低変形・低入熱）溶接技術として有望なレーザー溶接技術の導入が強く期待されている．大型船舶では 20mm を超える板厚の鋼板が主に使用されており，特に大型コンテナ船では，重要強度部材に 50mm を超える板厚の高張力・高靱性鋼板が適用されている¹⁻⁵⁾．開先加工などはプラズマ切断およびガス切断で行われ，溶接長は 20m に達する場合もある．これまでもレーザー・アークハイブリッド溶接の適用が検討されてきたが，開先加工精度，ギャップ裕度，板厚，溶接継手靱性，導入コストなどの問題で，板厚 10mm 程度以下の極限られた範囲での適用にとどまっている．

著者らは，長年，ホットワイヤ法を用いた高能率・高品質溶接技術の開発を行ってきた⁶⁻⁸⁾．近年は，アーク熱源に比べてより精密な入熱制御，さらなる低入熱化・高能率化が期待できる，レーザー熱源との組み合わせを検討してきた．厚鋼板 1 パス立向き溶接技術に関するこれまでの研究では，板厚 28mm 程度までの供試材料に対して，高出力半導体レーザーとホットワイヤ法とを組み合わせた溶接プロセスの実現に注力してきた⁹⁻¹⁰⁾．

本研究では，まず 6kW 高出力半導体レーザーを用いて，ビーム形状・寸法の適正化，ビーム揺動照射条件の適正化および反射レーザー光による溶融現象の解明を実施した．さらに，2 台の 6kW 高出力半導体レーザーを組み合わせて総出力を 12kW とし，板厚 50mm の極厚鋼板に対して本プロセスが適用可能か検討した．板厚に対して比較的低出力のレーザーではあるが，レーザービーム形状およびエネルギー分布制御などを適正化することで，本プロセスが適用可能かを調査した¹¹⁻¹²⁾．

2. 供試材料および実験条件

2・1 供試材料

母材には，板厚 26mm および 50mm の造船用高張力鋼板を用いた．図 1 に示すように，試験片寸法は幅 50mm あるいは 100mm，高さ 200mm とし，当該試験片 2 枚を幅 10mm の隙間（開先）を設けて突合せて設置し，立向き溶接を実施した．添加ワイヤには，直径 1.6mm の高張力鋼板用ワイヤ（JIS Z 3325 YGL2-6A (AP)，JIS Z 3312 G78A4UMN5C1M3T）を用いた．

2・2 実験方法

図 2 に，板厚 26mm の試験片に対する実験システムの概略図を示す．まず 2 枚の母材鋼板を隙間（開先）を設けて水冷銅板上に設置し，隙間（開先）を含む母材鋼板側面に水冷銅板を両側から軽く押し当てる．1 台の半導体レーザー発振器によって任意のレーザービームを形成して試験片上方から照射しつつ，水冷銅板上に設置した試験片を降下させることによって，1 パス立向き溶接を再現した．レーザー照射条件の影響を検討するために，固定照射および揺動照射を適宜適用した．

図 3 に，板厚 50mm の試験片に対する実験システムの概略図を示す．板厚 26mm での検討時と同様に，2 枚の母材鋼板を隙間（開先）を設けて水冷銅板上に設置した．2 台の半導体レーザー発振器によって 2 つのレーザービームをそれぞれ形成して，総出力 12kW の条件で 1 パス立向き溶接を検討した．片方のレーザービームは固定照射とし，もう片方のレーザービームは揺動照射とした．

ホットワイヤは，側面的水冷銅板片側に送給用の穴を加工して送給した．シールドガスは，両側的水冷銅板内に加工した穴を通じて開先内の溶融池上部に供給した．試験片上方に小型高速カメラを設置し，開先内での溶融池形成状態やホットワイヤ送給状態を観察した．

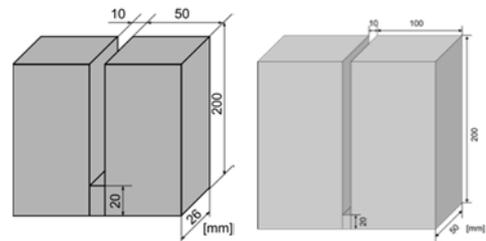


図 1 試験片形状・寸法

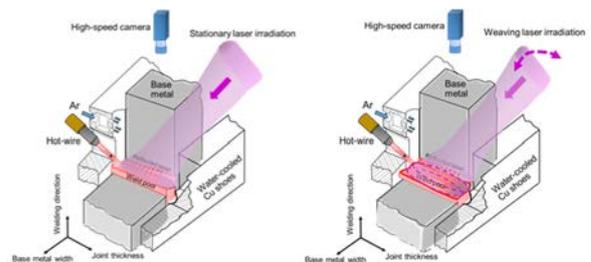


図 2 実験システム概略図（1 ビーム，板厚 26mm）

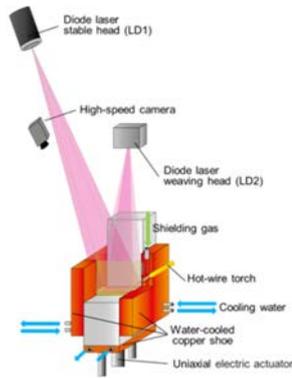


図3 実験システム概略図 (2 ビーム, 板厚 50mm)

2・3 実験条件

表1に板厚26mmの試験片を用いてビーム形状(幅)およびビーム揺動照射の影響を検討した際の実験条件を、表2に板厚26mmの試験片を用いてビーム揺動条件(波形)の影響を検討した際の実験条件を、表3に板厚50mmの試験片を用いて2ビーム照射を行った際の実験条件をそれぞれ示す。表1に示した実験条件では、ビーム長さは板厚相当に設定し、ビーム幅は固定照射の場合は開先幅に合わせた10mm、揺動照射の場合は4mmあるいは2mmとした。レーザ出力は6kW一定としたため、それぞれのビーム形状でのエネルギー密度は、23、55、111W/mm²である。表2に示した実験条件では、揺動波形を2種類採用し、揺動周波数を15あるいは5Hzと変化させた。開先幅方向への揺動1サイクル中の開先表面においてレーザ照射時間は、揺動波形と揺動周波数との組み合わせにより11.5~72.5msとなる。表3に示した板厚50mmに対する実験条件では、片側を8×51mmの矩形レーザビームの定常照射とし、もう片方を2×56mmの矩形レーザビームの揺動照射とした。

溶接速度(試験片降下速度)は各条件で一定とし、ワイヤ送給速度は開先内を充填する必要十分な値とした。ホットワイヤ電流は、上記ワイヤ送給速度に応じた適正值とした。シールドガスにはArあるいは80%Ar+20%O₂の混合ガスを用いた。

表1 実験条件1 (板厚 26mm, 1 ビーム)

| Laser irradiation method | Stationary | Weaving | |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Weaving frequency, Hz | | 5 | |
| Weaving waveform | | Exponential | |
| Laser irradiating angle, deg. | | 15 | |
| Laser power, kW | | 6 | |
| Spot size (Defocus), mm | 10 ^w x 26 ^l | 4 ^w x 27 ^l | 2 ^w x 27 ^l |
| Defocus amount, mm | 0 | 20 | 20 |
| Laser power density, W/mm ² | 23 | 55 | 111 |
| Welding speed, cm/min | | 3.3 | |
| Wire feeding speed, m/min | | 5.31 | |
| Wire current, A | 161 | 181 | 164 |
| Wire feeding angle, deg. | | 45 | |
| Shielding gas (Ar), l/min | | 10 | |

表2 実験条件2 (板厚 26mm, 1 ビーム)

| | | | |
|--|----------------------------------|-----|-------------|
| Laser power, kW | 6 | | |
| Spot size (Defocus), mm | 2 ^w x 27 ^l | | |
| Defocus amount, mm | 20 | | |
| Laser power density, W/mm ² | 111 | | |
| Laser irradiating angle, deg. | 0 | | |
| Weaving form | Sine | | Exponential |
| Weaving frequency, Hz | 15 | 5 | |
| Duration time near groove surface, ms | 11.5 | 34 | 72.5 |
| Total duration time near groove surface for 1 second, ms | 172.5 | 170 | 362.5 |
| Welding speed, cm/min | 1.7 | | |
| Wire feeding speed for one wire, m/min | 1.24 | | |
| Wire current for one wire, A | 93 | | |
| Wire feeding angle, deg. | 45 | | |
| Shielding gas (Ar), l/min | 20 | | |

表3 実験条件3 (板厚 50mm, 2 ビーム)

| Irradiating type | Stable | Weaving |
|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| Laser power, kW | 6 | 6 |
| Defocus | Just focus | Just focus |
| Laser irradiating angle, deg. | 35 | 0 |
| Laser spot size, mm | 8x51 | 2x56 |
| Weaving frequency, Hz | | 5 |
| Weaving waveform | | Exponential |
| Welding speed, cm/min | 3.3 | |
| Wire feeding speed, m/min | 10 | |
| Wire current, A | 228 | |
| Shielding gas, 10 L/min | 80%Ar + 20%O ₂ | |

3. 実験結果および考察

3・1 レーザビーム幅の影響

3・1・1 溶接中可視化結果

図4に、試験片上方から高速度カメラによって撮影した開先内部の可視化画像の模式図と撮影例を示す。画像中央の比較的輝度の高い部分が溶融池であり、溶融池中央部に挿入されるホットワイヤ先端も明瞭に確認できる。

図5に、板厚26mmの試験片を用いてビーム幅およびビーム揺動照射の影響を検討した際の可視化画像を示す。図6には、図5の可視化画像を輝度分布として示す。溶接中の可視化動画から、全ての条件において安定した溶融池形成およびワイヤ送給が実現できていることが確認できた。図6に示した輝度分布を見ると、エネルギー密度の最も低いビーム幅10mmの定常照射条件では、輝度値(温度)は比較的低く、溶融池全体で均一な分布となっている。一方、ビーム幅を狭くしてエネルギー密度を大きくし、揺動照射を適用した場合には、レーザビームの照射時間が相対的に長くなる開先壁面近傍(溶融池両端部)において輝度(温度)が高くなっている。さらに、ビーム幅が2mmでエネルギー密度が最も高い場合には、開先壁面近傍の溶融池両端部の狭い範囲において輝度(温度)が比較的高くなっている。

3・1・2 断面観察結果

図7に、継手の水平断面観察結果を示す。全ての条件において、レーザ照射側（写真上側）では溶接金属が完全に充填しておらず、ワイヤ送給側では十分な溶接金属が形成されている。ビーム幅が広くエネルギー密度の最も小さい固定照射の条件では、ビーム幅が狭くエネルギー密度の大きい揺動照射の条件に比べて、ビード幅が狭く、開先に沿ったビードが形成されている。一方、ビード幅4mmとして揺動照射を適用した条件では、他の条件に比べてビード幅が広く母材溶融量が多いことがわかる。

図8に、図7に示した各条件の継手断面において計測した板厚方向のビード幅分布を示す。溶接スタート位置から50mmおよび70mmの位置の2断面での計測結果を示している。(a)に示すビーム幅が広くエネルギー密度の最も小さい固定照射の条件では、試験片両表面近傍に大きな融合不良が確認された。板厚中央部においても母材溶融量（溶込み）は非常に小さく、最大でも1mm（片側0.5mm）程度であった。一方、(b)に示すビード幅4mmあるいは(c)に示すビード幅2mmの揺動照射を適用した条件では、固定照射の条件に比べてビード幅が広く母材溶融量が多いことがわかる。また融合不良も溶接スタート位置から70mmの断面においてレーザ照射側の狭い範囲でのみ確認された。さらに、ビード幅4mmでは2mmの場合に比べてエネルギー密度が1/2と大きく低下しているにもかかわらず、母材溶融量（溶込み）が大きくなっている。これは図6に示したように、開先幅（10mm）に対してビーム幅を狭くしすぎるとレーザ照射と反対側の開先壁面近傍の温度が急激に低下する一方、開先幅に対してある程度のビーム幅を維持した場合には、当該部の温度低下が抑制できるためであると考えられる。

図9に、エネルギー密度および開先幅（ W_G : 10mm）に対するビーム幅（ W_L ）の割合（ W_L/W_G ）とビード幅ならびに融合不良率との関係を示す。ビーム幅を広くしてエネルギー密度を小さくしすぎると、開先壁面近傍での温度上昇が不十分となり融合不良率が大きく上昇する。一方、開先幅に対してビーム幅を狭くしすぎると、エネルギー密度は大きくなりレーザ照射側の開先壁面近傍の温度は比較的上昇しやすくなり、融合不良率は大きく上昇しないものの、レーザ照射されていない反対側の開先壁面近傍の温度は急激に低下し、母材溶融量すなわちビード幅が小さくなったと考えられる。

本溶接プロセスを効率的かつ安定的に実施するためには、溶融池の温度が急激に低下しないように保ちつつ、開先壁面近傍への入熱が大きくなるようにエネルギー密度をできるだけ高める必要があることが明らかになった。

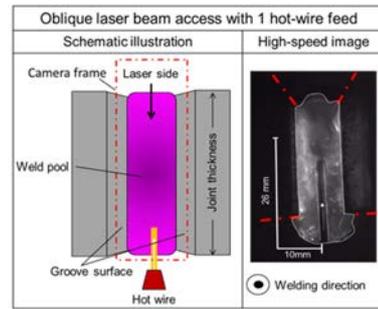


図4 溶接中の可視化画像の模式図と撮影例

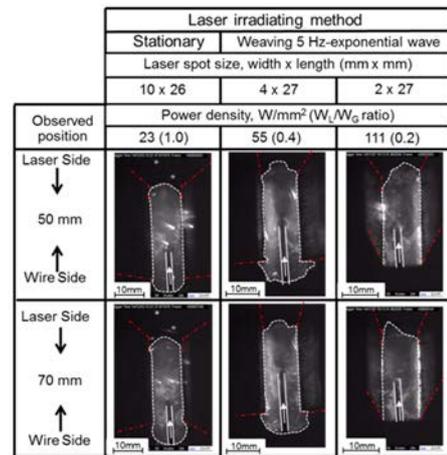


図5 溶接中の可視化画像
(ビーム幅・揺動照射の影響、板厚26mm)

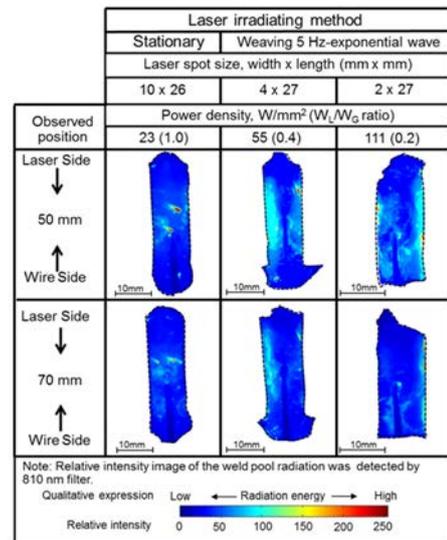


図6 溶接中の輝度分布
(ビーム幅・揺動照射の影響、板厚26mm)

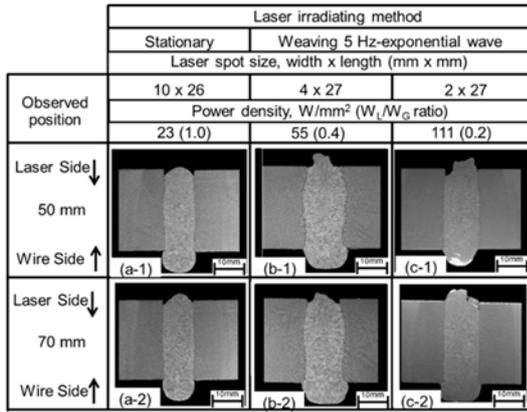


図7 断面観察結果

(ビーム幅・揺動照射の影響, 板厚 26mm)

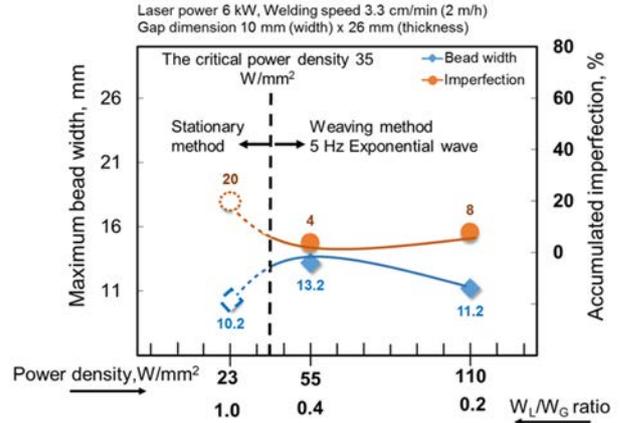
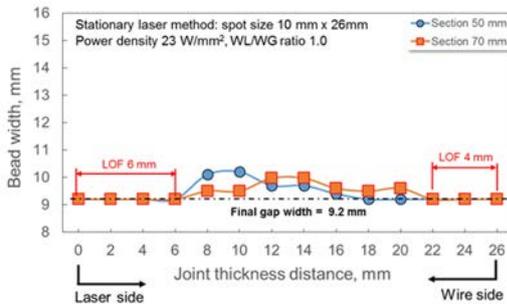
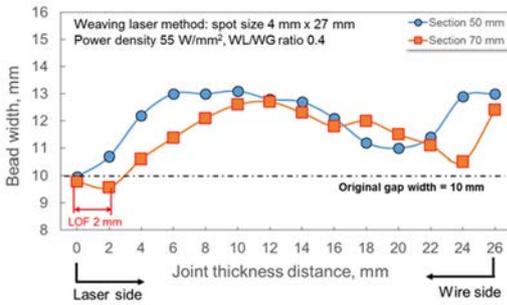


図9 ビード幅・融合不良率計測結果

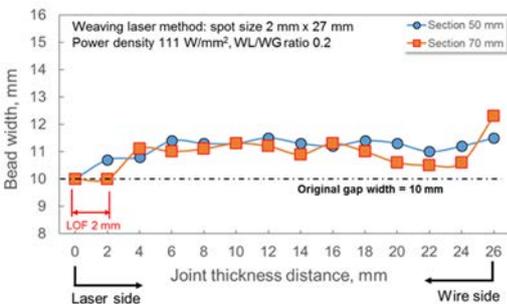
(ビーム幅・揺動照射の影響, 板厚 26mm)



(a) ビーム形状: 10×26mm, 固定照射



(b) ビーム形状: 4×27mm, 揺動照射



(c) ビーム形状: 2×27mm, 揺動照射

図8 ビード幅計測結果

(ビーム幅・揺動照射の影響, 板厚 26mm)

3・2 レーザビーム揺動条件の影響

図10に、継手の水平断面および縦断面観察結果を示す。図10中には、縦断面写真中に赤枠で示した領域の拡大写真も示している。全ての条件の水平断面において、鋼板両表面近傍において融合不良が観察される。縦断面写真中の拡大写真を見ると、揺動周波数が大きい(15Hz)サイン波形を適用した場合に大きな融合不良が発生していた。一方、揺動周波数が小さい(5Hz)指数関数波形を適用した場合には融合不良は観察されなかった。

図11に、ビーム揺動の1サイクル中での開先壁面近傍におけるレーザー照射継続時間と溶接金属の開先面積に対する充填率および融合率との関係を示す。溶接金属の充填率は、ビーム揺動条件を変化させてもほぼ一定になっている。一方、融合不良率は、開先壁面近傍におけるレーザー照射継続時間が長くなるほど融合率が上昇、すなわち母材溶融が促進されていることがわかる。

本溶接プロセスを効率的かつ安定的に実施するためには、溶融池を安定して維持できる程度以上のビーム揺動周波数とし、揺動周波数はあまり大きくせず、開先壁面近傍でのレーザー照射計測時間をできるだけ長くする必要があることが明らかになった。

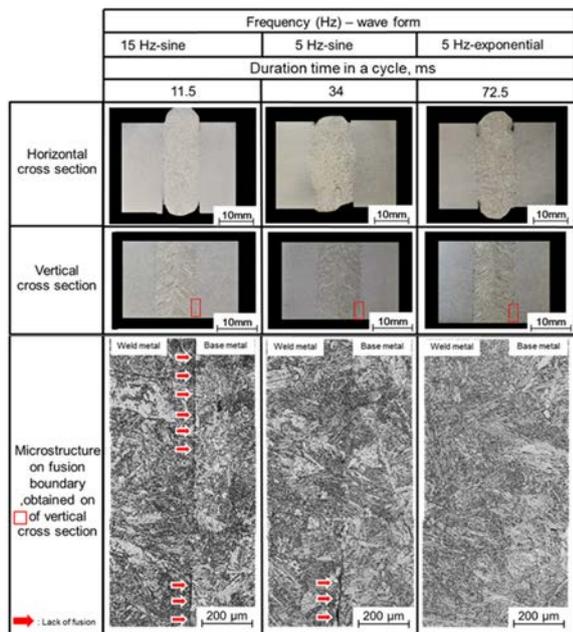


図10 断面観察結果
(ビーム揺動条件の影響, 板厚 26mm)

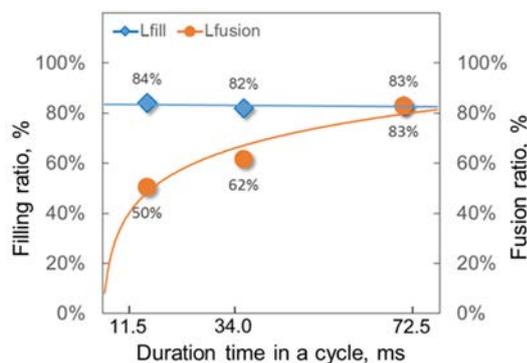


図11 溶接金属充填率・融合不良率計測結果
(ビーム揺動条件の影響, 板厚 26mm)

3・3 2ビーム照射による板厚 50mm での検討結果

図12に、溶接後の試験片外観および断面観察結果を示す。左側に示す試験片外観を見ると、非常に安定したビードが試験片両側に形成されており、欠陥等も観察されなかった。本実験では試験片の強固な拘束は行わなかったが、面外変形は非常に小さかった。右側に示す断面写真を見ると、ワイヤ送給側と反対側で溶融幅が少し異なるものの、開先両面の板厚方向全体にわたって、融合不良等の欠陥の無い安定したビードが得られていることがわかる。当該断面写真から計測した希釈率は17%であり、現在適用されているエレクトロガスアーク溶接やエレクトロスラグ溶接に比べて、大幅に低下させることができています。また熱影響部 (HAZ) 幅も13mmと、エレクトロガスアーク溶接やエレクトロスラグ溶接に比べて、低下させることがで

きています。

図3および表3に示したように、幅の広い固定照射ビームと幅の狭い揺動照射ビームとを組み合わせることで、溶融池の安定した形成・維持と開先壁面近傍への効果的なレーザー照射による母材溶融の促進が実現できたと考えられる。

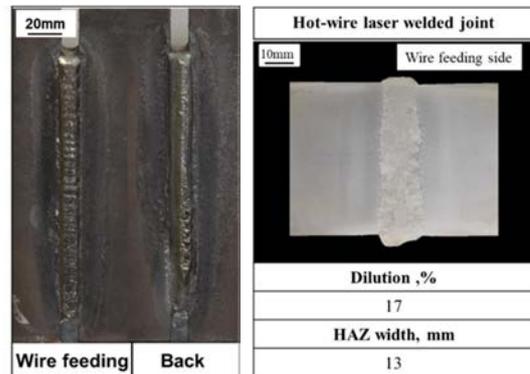


図12 溶接後の試験片外観および断面

4. まとめ

2台の6kW高出力半導体レーザーとホットワイヤとを組み合わせ、板厚26mmおよび板厚50mmの高張力厚鋼板の1パス縦向き溶接を検討した。得られた成果の概要を以下に示す。

(1) 板厚26mm, 開先幅10mmのI形突合せ継手に対して、6kW半導体レーザー発振器とホットワイヤシステムとを組み合わせることで、エレクトロガスアーク溶接法と同程度の施工能率で、低入熱・低変形な1パス立向き溶接を実現することができた。

(2) 開先壁面近傍への入熱を大きくして母材溶融を促進するために、ビーム幅を狭くしてエネルギー密度を高め、当該部でのレーザー照射時間を長くするビーム揺動条件を選定することが必要である。一方、開先内の溶融池を安定して形成・維持しつつ、急激な温度低下を防止するためには、開先幅に対して適切なビーム幅を選択する必要がある。

(3) 板厚50mm, 開先幅10mmのI形突合せ継手に対して、8×51mmの矩形ビームの定常照射と2×56mmの矩形ビームの揺動照射とを組み合わせることで、総出力12kWの比較的低いレーザーパワーで、開先全面での安定した溶融池形成と十分な母材溶融を実現することができた。

(4) 適正なレーザービーム形状、レーザービーム照射条件、ホットワイヤ送給条件を適用することで、低入熱、低希釈で融合不良の無い、良好な継手を得ることができた。

参考文献

- 1) K. Hirota, T. Nakagawa, S. Takeda, Y. Hashi, M. Tada: World's first development and application of HTSS (high tensile strength steel) with yield stress of 47 kgf/mm² to actual ship hull structure, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 44-3 (2007), 1-5.
- 2) Y. Funatsu, J. Otani, K. Hirota, T. Matsumoto, H. Yajima: Development of Higher Toughness YP47 (460N/mm²) Class Steel Plate for Large Container Ships, Proc. 2010 ISOPE, (2010), 102-106.
- 3) R. Uemori, M. Fujioka, T. Inoue, M. Minagawa, H. Shirahata, T. Nose: Steels for Marine Transportation and Construction, Nippon Steel Technical Report, 391 (2011), 37-47.
- 4) N. Koichi, H. Kazykuni, E. Taiki: Development of Shipbuilding Steel Plate with Superior Low Temperature Toughness for Large Heat Input Welding, JFE Technical Report, 20 (2015), 8-13.
- 5) K. Sasaki, K. Suda, R. Motomatsu, Y. Hashiba, S. Okita, S. Imai: Development of Two-electrode Electro-gas Arc Welding Process, Nippon Steel Technical Report, 380 (2004), 57-63.
- 6) M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, D. Fujita, T. Inoue, M. Fukahori, Y. Kitahara: Development of Hot-wire Laser Welding Method for Lap Joint of Steel Sheet with Wide Gap, Quarterly J. JWS, 29-3 (2011), 58-61.
- 7) K. Kadoi, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Owaki, K. Inose, D. Takayanagi, Development of high-efficiency and High-quality Hot-wire Laser Fillet Welding Process, Quarterly J. JWS, 29-3 (2011), 62-65.
- 8) R. Phaonaim, K. Shinozaki, M. Yamamoto, K. Kadoi, S. Tsuchiya, A. Nishijima: Development of a highly efficient hot-wire laser hybrid process for narrow-gap welding - welding phenomena and their adequate conditions, Welding in the World, 57 (2013), 607-613.
- 9) E. Warinsiriruk, K. Hashida, M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, T. Tanino, et al.: Welding phenomena during vertical welding on thick steel plate using hot-wire laser welding method, Quarterly J. JWS, vol. 33-2, pp. 143-147, (2015).
- 10) E. Warinsiriruk, K. Hashida, M. Yamamoto, K. Shinozaki, H. Yajima, T. Tanino, et al.: Oblique laser irradiation technique for vertical welding of thick steel plates employing hot-wire laser welding, Quarterly J. JWS, vol. 33-4, pp. 326-331, (2015).
- 11) S. Charunetratsamee, E. Warinsiriruk, K. Shinozaki, M. Yamamoto: Optimization of Laser-Irradiating Conditions for Vertical Welding on Thick Steel Plate using Hot-Wire Laser-Welding Method, Quarterly J. JWS, vol. 37-4, pp. 187-192, (2019).
- 12) S. Charunetratsamee, E. Warinsiriruk, K. Shinozaki, M. Yamamoto: Melting by Reflected Laser Beam during Vertical Welding via Hot-Wire Laser Welding, Quarterly J. JWS, vol. 37-4, pp. 208-214, (2019).