

レーザ・アークハイブリッド溶接による大型厚板接合に向けた諸検討

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

内村, 友哉
九州大学工学部技術部

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7364870>

出版情報：第102回レーザ加工学会講演会講演論文集, pp.13-17, 2025-07
バージョン：
権利関係：



レーザ・アークハイブリッド溶接による大型厚板接合に向けた諸検討

Some studies on joining large thick plates by laser/arc hybrid welding

松田 和貴*, 内村 友哉**, 後藤 浩二*

*九州大学 大学院工学研究院海洋システム部門

**九州大学 工学部 技術部

(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Kazuki MATSUDA*, Tomoya UCHIMURA**, Koji GOTOH*

*Kyushu University, Faculty of Engineering, Department of Marine Systems Engineering

E-mail: gotoh@nams.kyushu-u.ac.jp

**Kyushu University, School of Engineering, Technical division

(Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan)

レーザ・アークハイブリッド溶接は入熱範囲を集中させて大入熱の溶接が可能であることから、従来のアーク溶接と比較して溶接変形（特に角変形）を大幅に抑制できるため、大型構造物の工作精度を大幅に改善できる溶接法として、船舶や橋梁などの厚板構造物の建造工程への導入拡大が期待されている。そのため、著者らは同溶接法を厚板の接合に適用することを目的に、種々の検討を継続している。本報告では、溶接姿勢拡張を目的とした横向及び立向上進での施工、突合せ継手製作時に安定した裏波形成を達成するための施工条件、等についての取り組みを報告する。

Laser-arc hybrid welding has been shown to significantly suppress welding deformation (particularly angular distortion) in comparison with conventional arc welding. This is due to the fact that it is able to concentrate the heat input range and weld large heat inputs. It is therefore expected to be introduced more widely in the construction process of thick plate structures, such as ships and bridges, as a welding method that can significantly improve the work accuracy of large structures.

The authors are conducting a series of studies with the objective of implementing this welding method in the context of joining thick plates. In this report, the authors describe their efforts in the construction of horizontal and vertical welded joints to extend the welding position, and in the construction conditions to achieve stable back-wave formation during the fabrication of butt-joints.

Key words: Laser/arc hybrid welding, Butt weld, Tee weld joint,

1. 緒 言

レーザ・アークハイブリッド溶接（以下、ハイブリッド溶接と記す）は、現状の大型構造物の建造で使われるアーク溶接と比べて溶接入熱を接合部近傍に集中して投入できるため、溶接変形を大幅に抑制出来る高精度・高品質の溶接技術である。特にレーザを用いる効果により、板厚方向深さにアーク溶接よりも均一な入熱を付与できるため、角変形を低減できることから、継手に誘起曲げ二次応力を生じさせにくいことや、工作精度を大幅に改善できることが期待される。

同溶接法を採用するには高出力のレーザ光に対

する作業への安全性に配慮し、遮光環境を整備した自動溶接とする必要があるものの、建造工程への導入が期待される種々のデジタル生産技術との親和性が高いと考えられることから、現状の建造工程そのものを大幅に合理化できる可能性を有する技術であると期待される。

このような背景に立ち、著者らはハイブリッド溶接を船体や橋梁のような厚板構造物建造工程への導入を促進するために必要な技術的課題に取り組んできた。船体建造工程への導入拡大に向けた研究のいくつかについては当会講演会での講演を含め報告⁽¹⁾しているが、本稿では、継続している研究についてその概要を紹介する。

2. 横向き・立向き施工に向けた検討

ハイブリッド溶接は大型の装置を利用した下向き姿勢で施工することが一般的であるが、レーザ発振器が未だ安価ではないことから、これをできる限り活用できなければ費用対効果の観点から、従来のアーク溶接に替わり建造工程への導入を進めようとする意欲は少ないと懸念される。大型構造物の建造では建造が進むにつれ、下向き以外の溶接姿勢での施工が増えることから、ハイブリッド溶接が適用可能な溶接姿勢を増やすことは有意義である。そこで、横向きと立向き上進溶接の適用可能性を検討した。本研究の一部内容は文献⁽²⁾を参照いただきたい。

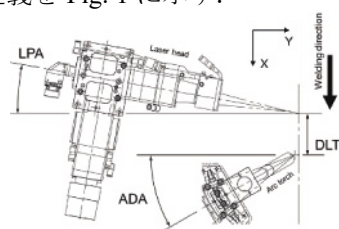
2.1 横向き溶接による継手製作

レーザ単体による横向き溶接^{(3),(4)}については、適応性が高いことが報告されているものの、ハイブリッド溶接における検討事例は著者らが把握している限りは十分でない。そこで、主に施工裕度の観点から横向き溶接により、溶接長 500 mm の突合せ溶接継手を製作した。横向き溶接の検討に際してはアーク溶接としてスパッタを抑制し良好なビードを形成できる J-STAR[®]溶接を採用している。同溶接法はハイブリッド溶接と親和性の高いことが先行研究⁽⁵⁾で報告されている。

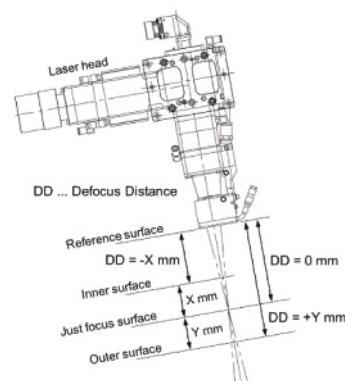
Table 1 Welding conditions for horizontal welding (PC).

Steel grade	SM400B (JIS)
Plate thickness [mm]	12
Groove cutting method	milling
Root gap [mm]	abt. 0
Arc current [A]	300
Arc voltage [V]	26.0
Laser power [kW]	10.0
Trave speed [mm/min]	800

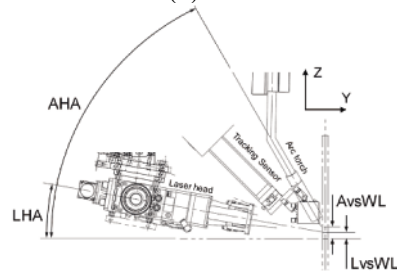
ハイブリッド溶接では多数の施工パラメータを設定しうるが、本研究では、レーザとアークの狙い位置間距離 (DLT), レーザデフォーカス距離 (DD), レーザヘッドの傾斜角度 (LHA) の影響を調査した。これらの定義を Fig. 1 に示す。



(a) DLT



(b) DD



(d) LHA

Fig. 1 Definition of Laser welding parameters.

上記 3 つのパラメータについての設定を Table 2 に示す。

Table 2 Applied welding parameters.

ID	A1	A2	B1	B2	C1	C2
DD[mm]	+10	+20	+15			
DLT[mm]	2		0	5	2	
LHA[deg.]	10				5	15

上記の設定により溶接施工した後にビード外観を確認した結果の概要は以下の通りであった。

- DD: 表および裏ビード外観に明瞭な差は生じない。
- DLT: 0 mm (条件 B1) の際に、溶接長後半部で裏ビードが消失。
- LHA: 15° (条件 C2) の際に裏面の一部に融合不良発生。

この結果を踏まえ、DD=15 mm, DLT=2 mm, LHA=10° の設定を採用し、開先加工を実機適用の観点からプラズマ切断とした継手の製作を行った (継手 ID: HB1)。この結果のビード外観例を Fig. 2 に示す。ビード外観についてはアンダカットなど調査しているが、全線に渡って良好なビードを形成できた。

さらに適用可能な板厚拡張を志向し、板厚 16 mm での施工を試みた (継手 ID: HB2)。ただし、供試材準備の都合で開先はレーザ切断により加工した。この結果のビード外観の一部にアンダカットらしき外観を確認したため、当該部位を拡大観察したとこ

ろ、深さ 0.4 mm 程度のアンダカットを確認したが、ISO 5817⁽⁶⁾に規定されるアンダカット許容レベル (Level B で 0.5 mm 以下) は満たしている。

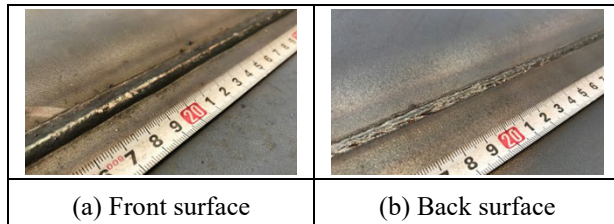


Fig. 2 Example of weld bead appearance.

引き続き継手 HB1, HB2 の両者に対して日本海事協会による“レーザ・アーク溶接ガイドライン (ver. 3)”のに沿って、前節で製作した継手の機械試験 (引張, 側曲げ, シャルピー衝撃, 断面マクロ観察およびビッカース硬さ) と非破壊検査 (RT, UT) を実施した。すべての項目で要求条件を満足したので、最終判定を合格とした。

2.2 横向き溶接の施工裕度拡大に向けた検討

横向き溶接では表側ビードの垂れを抑制することが良好なビードを得るための条件となっていることから、Fig. 3 に例示する摺動型水冷表当て銅板を付帯設備として導入することを検討した。詳細は割愛するが、2.1 で述べた条件を基準に施工条件を検討した結果、摺動型水冷表当て銅板を活用することで板厚 20 mm の横向き溶接を 1 パスで製作できることを確認している。得られたビード外観を Fig. 4 に、断面マクロ写真を Fig. 5 に示す。

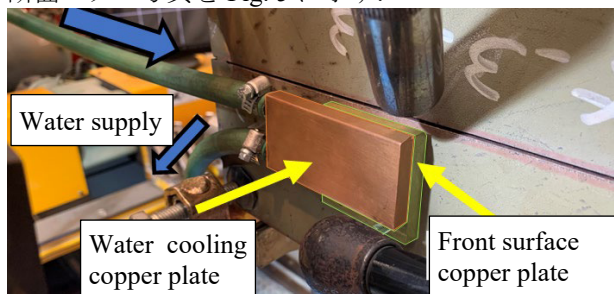


Fig. 3 Sliding type front surface arranged copper plate.

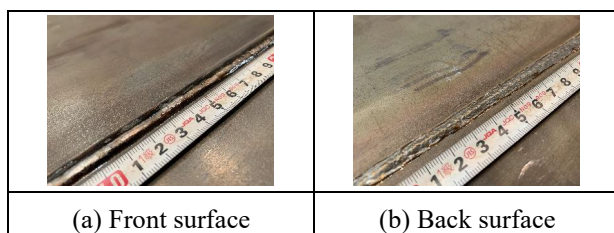


Fig. 4 Example of weld bead appearance.

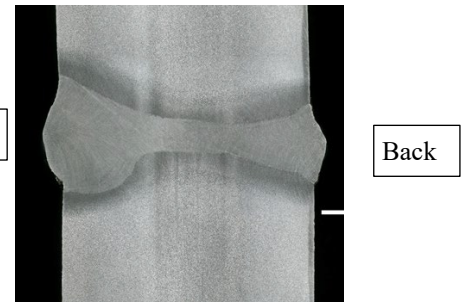


Fig. 5 Macroscopic observation of cross section of welded region.

2.3 立向き上進溶接による継手製作

立向き上進溶接により、溶接長 500 mm の突合せ溶接継手を製作した。ここでは溶接ビードの垂れ対策を考慮し、上進溶接用の溶接ワイヤ (DW-100V) を採用した。主な溶接施工条件を Table 3 に示す。

Table 3 Welding conditions for vertical up welding (PF).

Steel grade	SM400B (JIS)	
Plate thickness [mm]	12	
Groove cutting method	plasma	milling
Root gap [mm]	abt. 0	1.0
Arc current [A]	150	200
Arc voltage [V]	20.0	24.0
Laser power [kW]	6.0	
Trave speed [mm/min]	200	400
Backing	FB-B3T	None

複数回の事前検討の結果、Table 3 にも示しているセラミック裏当て材 (FB-B3T) を使用することで良好なビード外観を形成する継手 (ID: VB1) の製作に成功した。また、裏当て材無しでの施工を目指して試行錯誤的に施工条件を検討したが、ルートギャップを厳密に設定することで溶融池からのブルーム放出を安定化できれば施工可能であることを確認した (施工条件は Table 3 参照, 継手 ID: VB2)。ただし、このためには開先を機械加工により精度よく仕上げ、かつ施工前の段取りでギャップが変動しないように注意する必要がある。

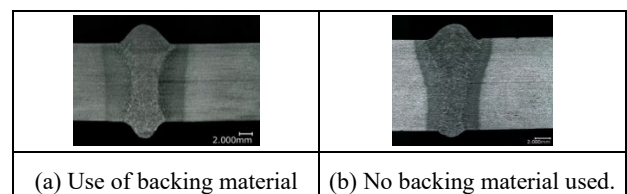


Fig. 6 Comparison of macroscopic observations.

裏当て材を使用した場合と機械加工による開先を

用いた裏当て無し施工による継手の断面マクロの比較を Fig. 6 に示す。

引き続き、継手 VB1, VB2 の両者に対して日本海事協会による“レーザ・アーク溶接ガイドライン (ver. 3)” に沿って、前節で製作した継手の機械試験（引張、側曲げ、シャルピー衝撃、断面マクロ観察およびビッカース硬さ）と非破壊検査（RT, UT）を実施した。この結果、継手 VB2 はすべての項目で要求条件を満足したので、最終判定を合格であったが、裏当て材を使用して製作した継手 VB1 においては、溶接金属とボンド部にノッチを配置した試験片の一部でシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーが要求値に達しなかったこと、および UT により許容値以上の欠陥が検出されたため、不合格の判定とした。

この不合格と判定された理由については以下のよう

- 板を貫通したレーザービームが裏当て材を溶かし、一部が溶融金属に溶け込んでしまった可能性がある。
- 裏面から放出される高温の金属蒸気または裏当て材がガス化した痕跡と思われる筋状の欠陥が UT により検出された。

したがって、現時点における立向き上進施工としては、開先加工と初期ギャップ管理を厳密に行い、裏当て材は使用しない方がよいと考えている。

3. 突合せ継手製作時の良好な裏波形成に向けた検討

著者の一部は、ハイブリッド溶接 1 パス施工により、板厚 17 mm の突合せ溶接継手を製作した実績⁽¹⁾を有するが、施工の安定性には課題が残っている。そこで、安定して 1 パス施工による突合せ継手を製作するための検討を継続している。

ハイブリッド溶接による 1 パス施工突合せ継手の製作に対して、これまでの検討により、

- 裏ビードの確実な形成
- 高温割れ防止
- ギャップ裕度拡張

への対応が必要であることを認識している。これらへの対策として、内野ら⁽⁸⁾は逆 Δ 形開先の採用を提案し、板厚 20 mm の 1 パス突合せ溶接継手を良好に製作できることを示している。本研究では内野らの手法を参照し、開先加工工数削減の観点から、「逆レ形」開先を採用した。

溶接長 300 mm の突合せ継手（板厚 20 mm）を複数の開先形状に対して製作し、ビード外観および断面マクロ観察により良好性を確認した。なお、供試鋼は船体用鋼材 KA36、溶接ワイヤは MG-50 である。

（溶接施工条件については講演において紹介する。）

一連の施工結果より、母材裏側の空間面積が大き

くなると高温割れが、ギャップ距離が大きくなると融合不良が発生したため、これらを共に回避できた「レ形開先角度 3° 、ルート面無し、表面におけるギャップ 0」とすることで良好な施工が可能となることを確認した。これによる断面マクロ写真を Fig. 7 に示す。

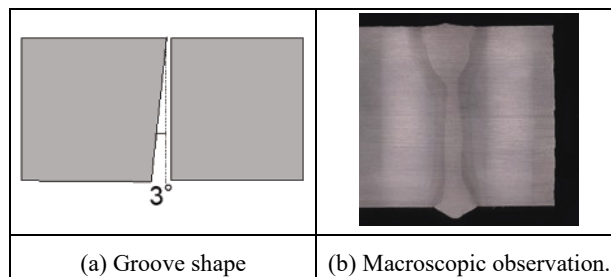


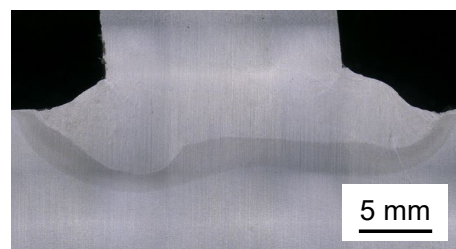
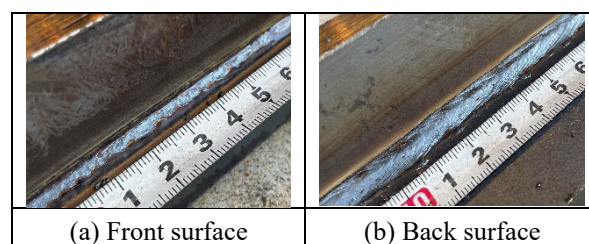
Fig. 7 Recommended groove shape and macroscopic observations.

また、本項で示した逆レ形開先と逆 Δ 開先による継手の施工に関する比較も実施しており、これについても講演時に紹介する予定である。

4. 片側隅肉 1 パス溶接による継手製作

立板厚 16 mm の T 字隅肉溶接継手について、ハイブリッド溶接 1 パス施工による完全溶け込み溶接を検討した。

開先形状や種々の溶接条件について条件探索を実施し、アーク先行とし、トーチ角度等を適宜設定することで、仮付け部も含めた 1,000 mm の長尺溶接において、安定した貫通溶接を実施できることを確認した。得られた溶接部の外観写真を Fig. 8 (a, b) に、断面写真を (c) にそれぞれ示す。



(c) Macroscopic observation of cross section
Fig. 8 Appearances and observation results of fillet weld joint.

5. まとめ

本稿では著者らのグループが継続して取り組んでいる、レーザ・アークハイブリッド溶接による厚板接合に関する研究の状況を紹介した。著者らは継手品質に優れ、製造に資する総工数の削減にも寄与するハイブリッド溶接が実機建造に積極的に導入されることを期待している。技術的な課題は年々克服できていると考えているので、導入の機運が高まるためにも、レーザ発振器やレーザヘッドの初期導入およびランニングコスト、堅牢性の向上を期待してやまない。

参 考 文 献

- (1) 後藤 浩二, 上村 崇杜, 津村 秀一, 竹下 竜平, 内野 一成, 森山 厚夫: レーザ・アークハイブリッド溶接の一般商船建造工程への導入に向けた諸検討, 日本船舶海洋工学会論文集, **32**, (2020), 231-245.
- (2) Uemura, T., Gotoh, K., Uchino, I.: Expansion of laser-arc hybrid welding to horizontal and vertical-up welding, *Welding in the World*, **66**, (2022), 495-506.
- (3) Guo, W. et al.: Comparison of laser welds in thick section S700 high-strength steel manufactured in flat (1G) and horizontal (2G) positions, *CIRP annals*, **64-1**, (2015), 197-200.
- (4) 松本 直幸, 猪瀬 幸太郎: レーザ溶接によるインフラ溶接構造物の補修技術. 溶接学会誌, **87-4**, (2018), 257-260.
- (5) 角博幸 他: REM 添加ワイヤを適用したレーザ・アークハイブリッド溶接技術, 第 81 回レーザ加工学会講演論文集, (2014), 29-32.
- (6) ISO 5817: Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections, (2023)
- (7) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Guidelines on Laser-Arc Hybrid Welding, (Ver. 3), (2016).
- (8) 内野 一成, 上村 崇杜, 後藤 浩二: レーザ・アークハイブリッド溶接を厚板突合せ継手製造に適用するための Λ 形開先採用に関する一検討, 溶接学会論文集, **38-4**, (2020), 403-417.