

レーザ・アークハイブリッド溶接による片側完全溶込みT継手の適用板厚範囲拡大に関する研究

藤井, 裕聡
九州大学大学院工学府 : 修士課程

内村, 友哉
九州大学工学部技術部

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

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/2324/7385548>

出版情報 : 溶接学会九州支部講演論文集. 22, pp.1-4, 2025. 溶接学会九州支部
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 片側完全溶込み T 継手の適用板厚範囲拡大に関する研究

○藤井裕聡*¹, 内村友哉*², 松田和貴*³, 後藤浩二*³

Key Words: レーザ・アークハイブリッド溶接, 片側完全溶込み T 継手, 逆レ形開先, 凝固割れ

1. 緒 言

船体建造工程における溶接作業は大きな割合を占め、溶接技術は船体の品質と生産性に直結する重要な要素である。近年、裏当て材を用いず、かつ溶接変形を大幅に抑制できるレーザ・アークハイブリッド溶接（以下、ハイブリッド溶接と称す）の導入が注目されている。国内主要造船所で建造される船種は一般商船が大半を占め、その適用部材の板厚は 10 mm から 30 mm が大半である¹⁾ことを念頭に、著者の一人ら²⁾はハイブリッド溶接により立板厚（以下、単に板厚と称する）14 mm、溶接長 1,000 mm の片側完全溶込み T 継手の製作に成功したが、より大型船舶への適用を考慮するとさらに厚い鋼板での施工条件の導出が求められている。

ハイブリッド溶接の適用により、従来アーク溶接で施工されるすみ肉溶接継手を、強度的に優位な完全溶込み継手へ置き換えることが可能となり、高剛性化・軽量化など新たな構造設計の実現が期待される。一方で、構造物の信頼性を確保するためには、溶接変形の予測と制御が不可欠である。これまで佐藤と寺崎³⁾による Q_{net}/h^2 （ Q_{net} : 正味の溶接入熱）の入熱パラメータに基づく溶接変形の評価式が提案され、溶接変形の支配因子として広く用いられてきた。しかし、厚板 T 継手においてハイブリッド溶接条件下で得られる変形量と、従来アーク溶接条件下での変形量を同一入熱パラメータで比較した例は少ない。

本研究では、先行研究で検討されていない板厚 16 mm における溶接欠陥のない片側完全溶込み T 継手の施工条件を検討した。次に、製作された継手を対象に角変形を実測し、入熱パラメータ Q_{net}/h^2 との関係を整理した。さらに、従来アーク溶接で製作された継手との比較を行い、ハイブリッド溶接による溶接変形低減効果とその実用的有効性について検討した。

2. 板厚 16 mm における良品施工条件の探索

2.1 使用材料、実験装置および実験方法

供試鋼板および供試溶接ワイヤの機械的性質（規格値）ならびに化学組成（規格値）を Table 1 に示す。供試材には、立板（ウェブ）として一般構造用鋼 SS400（板厚 16 mm）を用い、レーザ切断により I 形開先を設けた。主板（フランジ）には日本海事協会規格の KA36 鋼（板厚 20 mm）を使用した。シールドガスには 100% CO₂を採用し、溶接材料にはソリッドワイヤ MG-50（JIS Z 3312: YGW11）を用いた。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of applied steel plate and weld wire.

	Chemical compositions [mass %]					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	YS [MPa]	TS [MPa]	El [%]
SS400	-	-	-	≤0.05	≤0.05	≥235	≥400	≥21
KA36	0.18	0.50	0.90	0.035	0.035	≥355	490~620	≥21
MG-50	0.08	0.51	1.10	0.010	0.010	490	570	31

原稿受付 2025 年 9 月 12 日、2025 年度九州支部研究発表会で発表

*1 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

*2 九州大学 工学部技術部 Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

*3 正 員 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門 Member, Department of Marine System Engineering, Kyushu University

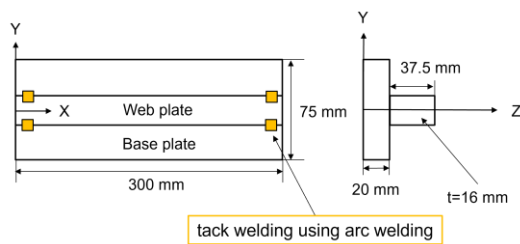


Fig. 1 Geometry of the test specimen.

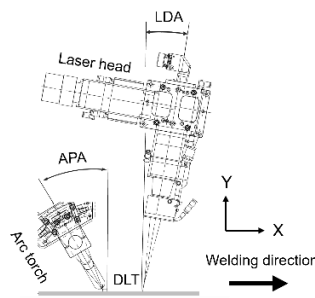


Fig. 2 Top view.

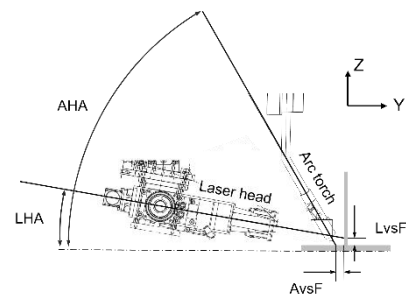


Fig. 3 Side view.

試験片形状を Fig. 1 に示す. 実験装置の上面図を Fig. 2 に, 側面図を Fig. 3 にそれぞれ示す. 施工に際して, ウェブとフランジ間の初期ギャップを 0 mm に設定した. 仮付け溶接は, アーク溶接による始端点付けにより施工し, その後, レーザ先行によるハイブリッド溶接を実施した.

2.2 開先形状の比較：I 形開先および逆レ形開先

板厚 16 mm における良品施工条件を探索するため、開先形状の影響を検討した。本研究では、I 形開先と逆レ形開先（立板を傾けることで逆レ形開先を擬似的に表現）を対象に比較実験を行った。逆レ形開先は、内野ら⁴⁾の A 形開先の着想を基にしており、余剰溶着金属の抑制を目的としている。良品の判定基準として、裏ビード外観および断面マクロ観察による欠陥の有無を評価した。これは、ボックス構造等の閉所での溶接において、表面のみの手直しが可能であることを想定したためである。

施工条件を Table 2 に、I 型開先、逆レ形開先の試験片で得られた断面マクロ観察結果を Fig. 4, 5 にそれぞれ示す。I 形開先での施工では、Fig. 4 に赤丸で示すレーザ入射側と反対のスティフナ位置にオーバーラップが確認されたのに対し、逆レ形開先では生じていなかった。この理由は、I 形開先に比べて裏側に空間を有する逆レ形開先の方が、熔融する母材量が少ないことに起因すると考えられる。また、逆レ形開先でレーザ照射位置の高さ方向ずれに対する許容差として、最大 1.5 mm の狙いずれ裕度が確認された。これは、レーザで貫通させる板厚が短く、裏空間にレーザが到達しやすいためと考えられる。

次に逆レ形開先を用いて長さ 1,000 mm の T 継手を製作した。その結果、良好なビード外観と十分な溶込み幅が得られたが、断面マクロ観察において溶接長 700 mm 地点で割れが確認された (Fig. 6)。

Table 2 Welding conditions.

Travel speed [cm/min]	80
Arc current [A]	350
Arc voltage [V]	26.5
Laser power [kW]	18.0
Heat input [J/mm]	2045.6

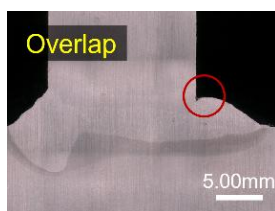


Fig 4 Macroscopic observation of square groove.

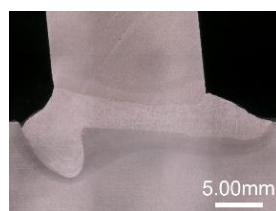


Fig. 5 Macroscopic observation of single bevel groove.

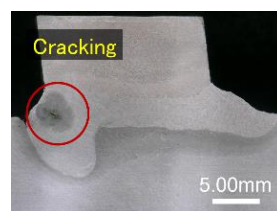


Fig. 6 Macroscopic observation at 700 mm in single bevel groove.

2.3 凝固割れ防止に向けた検討

柴原ら⁵⁾は種々の溶接条件で溶接を行い、アスペクト比 1.5 以上 2.0 以下の範囲で凝固割れが発生することを報告している。前節で示した凝固割れが確認された Fig. 6 の施工結果を柴原らの報告に基づくグラフ上に描画した結果を Fig. 7 に示すが、凝固割れが生じるアスペクト比と入熱の組み合わせに近かったことが確認できる。Fig. 7 を概観すると入熱を増加させることで凝固割れを抑制できると思われるが、著者らの経験では、ハイブリッド溶接では単純に入熱を増加させるとビード外観に悪影響が生じるため、レーザとアークの入熱割合の組み合わせや先行極の交代などの対策を講じつつ、入熱量を適正にコントロールする必要がある。そこで、AHA および LvsF

(Fig.3 参照) の設定, 先行極をアークに変更するなどの対策を講じ, アスペクト比の低減と入熱抑制が同時に可能な施工条件を探索した. この結果, アスペクト比を 1.0 以上 1.5 以下に保つ必要性を確認すると共にビード外観も良好に保てる施工条件を確認した. 引き続き, これを適用して長さ 1,000 mm の T 継手を製作した. 得られたビード外観写真と断面マクロ観察結果を Fig. 8 と Fig. 9 に順に示すが, 良好なビード外観と十分な溶込み幅が得られたことがわかる. さらに, 開先加工材でも良好に継手製作が可能であることを確認した. なお, ここで導出した施工条件は, レーザ照射位置の高さ方向ずれに対して 1.5 mm 程度の裕度を有することも確認した.

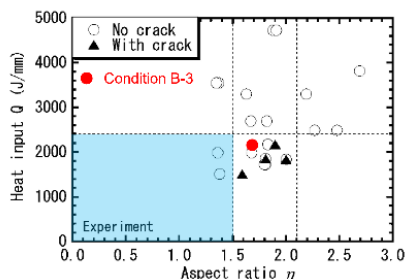
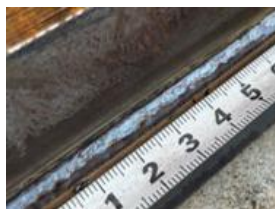


Fig. 7 Effect of heat input and η on crack formation.



(i) Front bead



(ii) Back bead

Fig. 8 Photographs of bead appearance.



Fig. 9 Macroscopic observation.

3. ハイブリッド溶接により製作された完全溶込み T 継手の角変形低減効果

3.1 試験体形状, 温度履歴計測位置および変形計測位置

ハイブリッド溶接の適用による溶接変形低減効果を検証するため, 本節では前節で得られた良品条件による施工結果に対して角変形量を計測した. 試験体の形状および寸法, 熱電対設置位置を Fig. 10 に示す. 温度履歴は, 溶接線中央のフランジ裏面 3 点とウェブ両面各 1 点に熱電対を設置し計測した. 角変形量は, 溶接始端, 中央, 終端の各位置 (Fig. 10 の D1, D2, D3) における Z 方向変位量 H_i (Fig. 11) を測定し, これらの平均値を主板半幅で除して算出した.

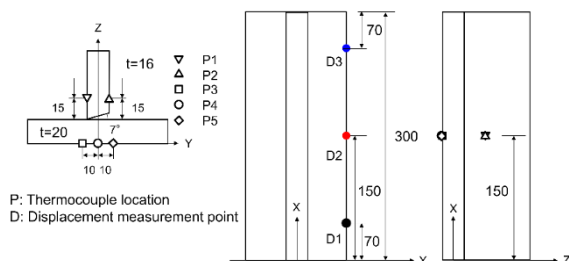


Fig. 10 Location of measuring temperature and vertical displacement.

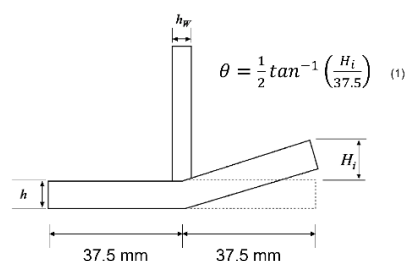


Fig. 11 Procedure for measuring the angular distortion.

3.2 計測結果および角変形量の比較

温度履歴計測結果を Fig. 12 に示す. 測定点では, 最高温度到達後の 200~250 秒の間に各点の温度が一様となったため, 200 秒および 250 秒後の温度の平均値と溶接開始前の温度との差を平均温度上昇 T_{ave} として定義した. この平均温度上昇 T_{ave} を用いて, 正味の入熱量を算出した. 次に, ばら積み船構造の共通規則⁶⁾に基づき F0~F2 等級の継手に必要な脚長を算出し, 脚長形成に必要な入熱量を評価した. 佐藤と寺崎³⁾が近似した角変形量推定曲線より算出したすみ肉溶接継手に生じる角変形量と良品条件での角変形量を比較した結果を Fig. 13 に示す. F0, F1, F2 等級と比較して, 良品条件ではいずれの場合も角変形量が少なく, 従来のすみ肉溶接継手を強度面で優位な完全溶込み継手に置き換えつつ, 角変形の低減が可能であることを確認した. 以上より, ハイブリッド溶接を用いることで, 従来のすみ肉溶接継手に比べて強度面で優れ, かつ溶接変形の低減効果を有する継手を製作することが示された.

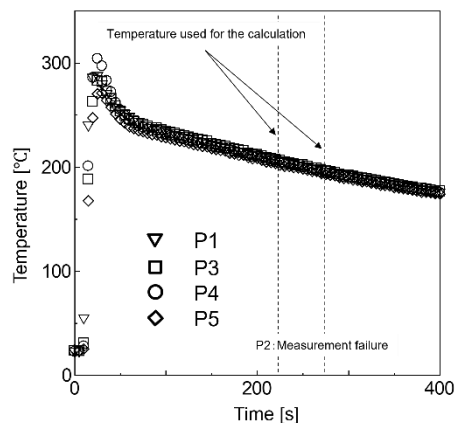


Fig. 12 Measured temperature history.

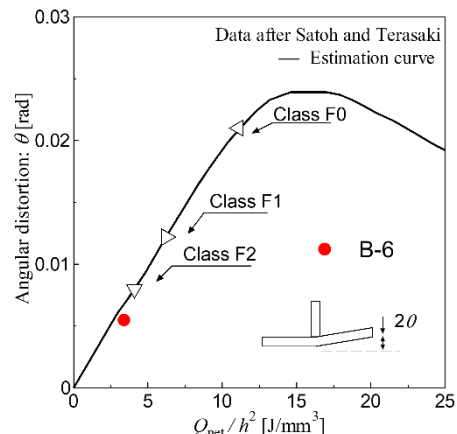


Fig. 13 Comparison of angular distortion of T-joint made by LAHW.

5. 結 論

本研究では、板厚 16 mm の片側完全溶込み T 継手を対象に、ハイブリッド溶接による良品施工条件の探索および溶接変形挙動の評価を行い、以下の知見を得た。

- 1) 板厚 16 mm を用いた継手において、I 形開先ではオーバーラップが発生したが、逆レ形開先を採用することで解消した。
- 2) 溶接長 1,000 mm の長尺溶接において凝固割れが発生したが、アークトーチ角度(AHA)、レーザ狙い高さ(LvsF)の最適化およびアーク先行の適用により、溶け込み形状のアスペクト比を 1.0 以上 1.5 以下にすることで、凝固割れを抑制しつつ良好なビード外観と十分な溶込み幅を確保できた。
- 3) 良品条件での角変形量および正味の入熱量を求め、ばら積み船構造の共通規則に基づく脚長形成に必要な入熱量とその角変形量とを比較した。その結果、良品条件では F0, F1, F2 等級と比較していずれも角変形量が少なかった。

以上より、ハイブリッド溶接は、従来のすみ肉溶接継手を強度的に優位な完全溶込み継手に置き換えつつ、溶接変形を低減できる有効な手法であり、厚板 T 継手への適用拡大に有望であることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の実施に際して、井手章博 氏（住友重機械工業株式会社）より種々有益なご助言をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Uchino, I.(2021). Fundamental research for constructing parallel parts of large ships with excellent construction accuracy by applying laser arc hybrid welding, Kyushu University Doctoral Dissertation. [in Japanese]
- 2) Gotoh, K., et al. (2020). Study on application of laser-arc hybrid welding to hull construction stage of general merchant ships. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 32, 231–245. [in Japanese]
- 3) Satoh, K., et al. (1976). Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials. Journal of the Japan Welding Society, 45(4), 42–50. [in Japanese]
- 4) Uchino, I., et al. (2020). A study on adopting Λ -shape groove for laser-arc hybrid welding to construct thick plate butt welded joints. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 38(4), 403–417. [in Japanese]
- 5) Shibahara, M., et al. (2009). Prediction of pear-shaped bead cracking under full penetration welding of T-joints using temperature dependent interface element. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27(1), 73–80. [in Japanese]
- 6) Satoh, K., et al. (1976). Effect of transformation expansion on welding residual stresses distributions and welding deformation. Journal of the Japan Welding Society, 45(7), 560–566. [in Japanese]