

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：17102  
研究種目：挑戦的萌芽研究  
研究期間：2014～2015  
課題番号：26630458  
研究課題名(和文) 船殻建造工程へのレーザー・アークハイブリッド溶接適用のための実用的な拘束条件の検討

研究課題名(英文) Practical constraint condition of hull structural members for application of laser-arc hybrid welding to the hull construction process

研究代表者  
後藤 浩二 (Gotoh, Koji)  
九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60274487  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高品質の溶接継手を製作可能な、レーザー・アークハイブリッド溶接を船体建造工程に導入するためには、実施工時の煩雑な段取りおよび大規模な部材拘束装置をできる限り省略することが必要である。本研究では、溶加材を使用しないレーザー照射のみにより部材仮付けを適切な間隔で施工する手法を提案し、同手法を用いて完全溶込みT継手を製作した。製作後に種々の継手性能を照査し、提案する簡便な仮付け手法を利用して健全な継手の製作が可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Laser-arc hybrid welding technology, which has the advantages of laser and normal arc welding, provides high-quality welds and is expected to improve productivity and accuracy. A strong advantage of laser-arc hybrid welding is its low heat input compared with conventional arc welding. Large reductions in residual welding deformation are expected when applying laser-arc hybrid welding. Such improvements will increase the productivity of hull construction and permit structural styles that reduce the net weight of a hull. Meanwhile, the large-scale constraint device of members must be equipped in the laser-arc hybrid welding systems to fabricate high quality welded joints. New tack welding procedure, which laser irradiation without filler wire was applied to melt the region of connection to fix between the stiffener and base plate, is proposed and verified by macroscopic observation of weld bead appearance and cross section, measurement of angular distortion and fatigue tests.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：レーザー・アークハイブリッド溶接 溶接施工条件 仮付け溶接

1. 研究開始当初の背景

近年、レーザの高出力化が進むとともにその発振効率も向上しており、優れたビーム品質の高出力レーザが従来よりも安価で利用可能となりつつあるため、厚板鋼板へのレーザ溶接法の適用による高速・高効率溶接の実用化が期待されている。一方、レーザを単独で使用した溶接を大型溶接構造物建造へ適用するには、(1)開先ギャップ裕度が小さい、(2)高精度な開先加工の必要性、(3)ポロシティやアンダーフィルなどの溶接欠陥が発生しやすい、などの欠点がある。そこで、これらの欠点を克服するためにレーザ熱源とアーク熱源を組み合わせたレーザ・アークハイブリッド溶接に関する研究が各種行われている。比較的板厚が薄い部材が多用される客船や艦艇を建造する欧州圏の造船所では、積極的なハイブリッド溶接の導入が進みつつあるが、これらの造船所ではレーザ照射位置に精度良く部材を配材かつギャップ裕度要求を満足させるため、開先の機械加工と強固な拘束を実現する大掛かりな部材拘束装置を用いている。レーザ発振機に比較的高額な初期投資コストが要求される現状で、このような大がかりな付帯装置を用いる工法では投資コストが増大するため、我が国の造船所にハイブリッド溶接を積極的に導入するには、配材や開先精度確保のためだけに大規模な付帯装置を必要としない溶接施工法の開発が必要である。

我が国の造船工作では、溶接前の部材拘束は仮付け溶接でなされることが一般的である。一方、レーザ・アークハイブリッド溶接による本溶接施工を行うために通常のアーク溶接を用いて仮付けを行った後に施工すると、仮付けビード幅が、熱源が集中するという特色を有するレーザ・アークハイブリッド溶接の幅よりも大きいため、本溶接時に仮付け部を完全に溶融させることができない場合がある。この場合、仮付け位置において本溶接の融合不良が生じ、結果として溶接欠陥が発生する可能性が大きい。また、仮付け溶接の拘束力が充分でない場合には溶接変形に起因する反力により仮付けビードに割れが発生し部材の拘束力が低下するため、溶接施工後に手直しが必要となるような大きな溶接変形が生じる可能性もある。これらの問題の解決策の一つとして、仮付けビードを完全に溶融できるようにレーザ出力を増大させる等の方法も考えられるが、不揃いの仮付けビードの大きさや長さに対応してハイブリッド溶接の条件をインラインで変化させた溶接施工を実施することは、現状では困難である。

2. 研究の目的

船体構造中に多数存在する T 継手（現状はアーク溶接による、すみ肉溶接継手）を高品質の完全溶込み継手として、レーザ・アークハイブリッド溶接で製作するための簡便な仮付け手法を検討することである。

3. 研究の方法

造船用鋼KD36を用いて、図1に示す完全溶込み T 継手を製作する。継手製作に際しては、付加材の左右 1 パスずつ（合計 2 パス）の溶接施工で完全溶込みを達成する溶接プロセス（以降では両側完全溶込み溶接と称する）、並びに片側 1 パスの溶接施工で完全溶込みを達成する溶接プロセス（以降では片側完全溶込み溶接と称する）の 2 方法を適用した。

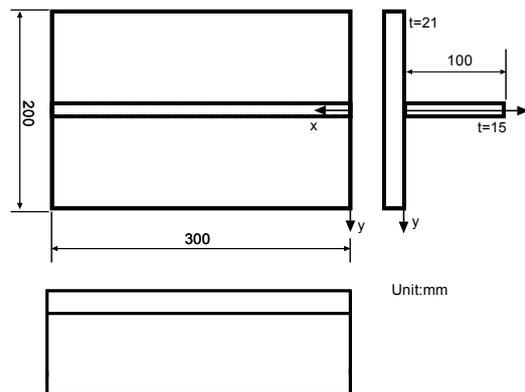


図1 製作した T 継手.

これらの継手を製作するに際して、付加物を基板に仮付けするが、本研究では溶加材を用いずにレーザ単独の照射で母材を溶融させることにより仮付けを行う。仮付け位置について図2に示す。また、仮付け施工条件を表1に示す。

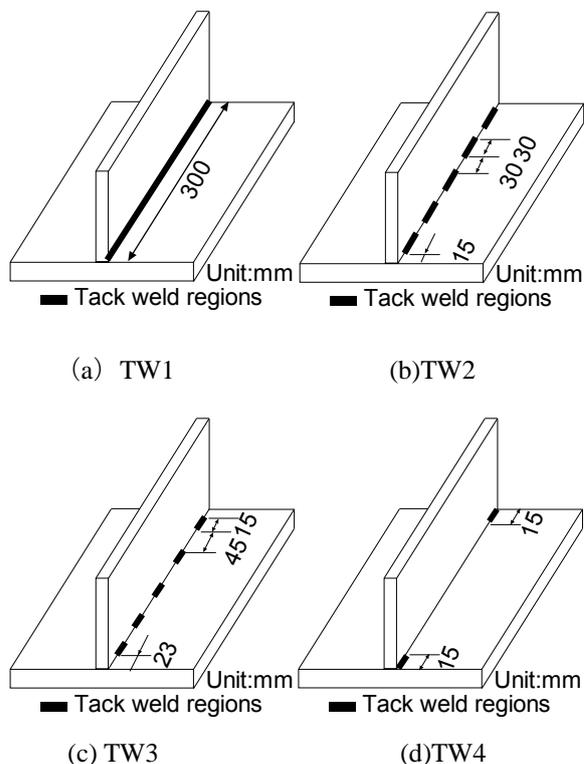


図2 検討した仮付け条件

表 1 仮付け施工条件.

レーザ出力 (kW)	3
照射速度 (mm/min)	600

仮付け位置の断面マクロ写真を図 3 に示すが、付加物と基板をともに溶融接合できていることが確認できる。

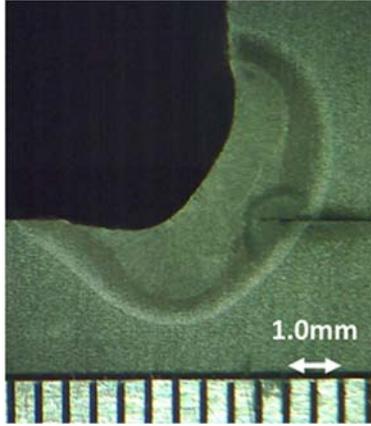


図 3 仮付け位置の断面マクロ

次に、図 2 に示した位置に仮付けした継手に対して、レーザ・アークハイブリッド溶接を施工して T 継手を製作した。両側完全溶込み溶接ではレーザ出力を 8kW とし、片側完全溶込み溶接ではレーザ出力を 20kW とした。

両側完全溶込み溶接では第 1 パス目の溶接方向と逆向きに第 2 パス目の溶接を行った。ハイブリッド溶接のアーク溶接においては、Ar と CO<sub>2</sub> の混合ガスをシールドガスとする場合が一般的であるが、本研究では国内造船所での普及を考慮し、CO<sub>2</sub> のみをシールドガスとしている。

表 2 試作した T 継手

仮付け条件	両側貫通 T 継手	片側貫通 T 継手
TW1	TW1-B	TW1-S
TW2	TW2-B	-
TW3	TW3-B	-
TW4	TW4-B	TW4-S

試作した T 継手の記号を表 2 に示す。片側完全溶込み溶接については、始末端部を仮付けした試験体 (TW1-S) と溶接線全線を仮付けした試験体 (TW4-S) の両者で良好に溶接施工が行えることが確認されたため、TW1 試験体と TW4 試験体の中間の仮付け条件にあたる TW2 試験体、並びに TW3 試験体については実験を省略した。両側完全溶込み溶接については、TW1 試験体から TW4 試験体までの全ての仮付け条件に対して実験した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 付加物の横倒れ変形

溶接施工後の溶接終端部における縦板の横倒れ変形量  $\theta$  を試験体ごとに比較した結果を図 4 に示す。両側完全溶込み溶接においては第 1 パス目側へ倒れる変形量を、片側完全溶込み溶接においては溶接施工側へ倒れる変形量を正としている。

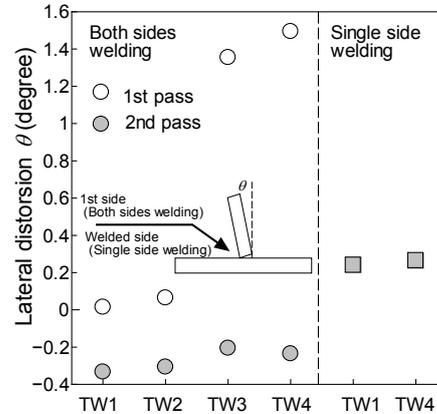


図 4 横倒れ変形

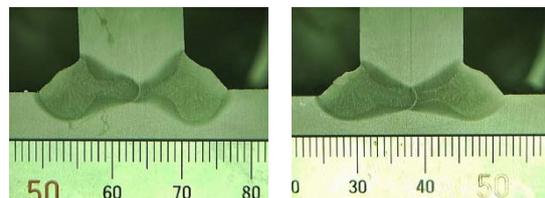
両側完全溶込み溶接継手の第 1 パス目溶接施工後の変形量 (○印) を比較すると TW3-B 試験体、並びに TW4-B 試験体では溶接施工条件は同程度であるが、TW1-B 試験体並びに TW2-B 試験体と比して大きく傾斜した。

この理由であるが、TW3-B 試験体並びに TW4-B 試験体では溶接終端部の仮付けビードに割れが発生しており、仮付けの拘束力が失われた結果、溶接変形が増大したためと推察される。

両側完全溶込み溶接の第 2 パス目溶接施工後 (●印) においては、全ての試験体で 0.4° 以内に留まっている。片側完全溶込み継手の溶接変形 (□印) に注目すると、溶接線全線を仮付け溶接した TW1-S 試験体の方が若干変形量は小さいが、両者の変形量にほとんど差異はない。また、片側完全溶込み継手では、溶接施工中に仮付け部が割れるか否かに関わらず変形は同程度であった。

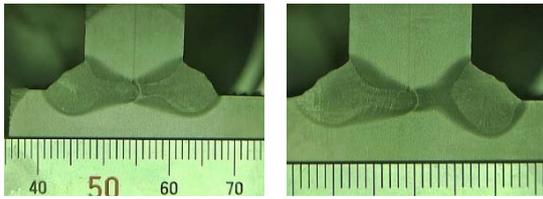
##### (2) 断面マクロ

両側完全溶込み溶接継手 (TW1-B~TW4-B) の溶接線中央における断面マクロの例を図 5 に示す。TW1-B~TW3-B 試験体の断面マクロは仮付け位置の断面マクロであるが、仮付けに阻害されることなく内在欠陥のない健全な断面マクロが得られており、両側完全溶込み溶接の溶接プロセスに対するレーザ溶接による仮付け溶接の有用性が確認された。



(a) TW1-B

(b) TW2-B

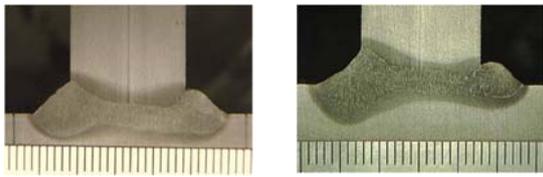


(c) TW3-B

(d) TW4-B

図5 両側完全溶込み継手の断面マクロ

片側完全溶込み溶接継手 (TW1-S, TW4-S) の溶接線中央における断面マクロを図6に示す. TW1-S 試験体の断面マクロは仮付け位置の断面マクロであるが, 仮付けビードに阻害されることなく内在欠陥のない良好な断面マクロが得られており, 片側完全溶込み溶接の溶接プロセスに対してもレーザ溶接による仮付け溶接の有用性が確認された.



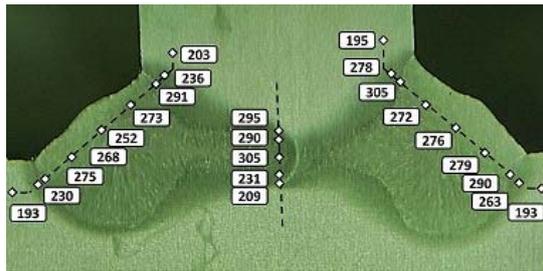
(a) TW1-S

(b) TW4-S

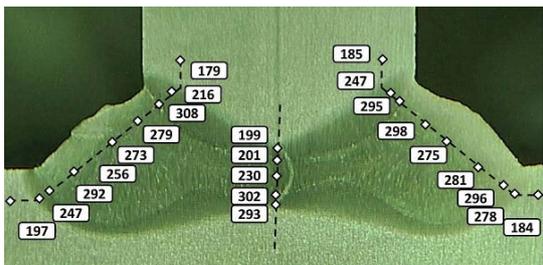
図6 両側完全溶込み継手の断面マクロ

### (3) 硬さ

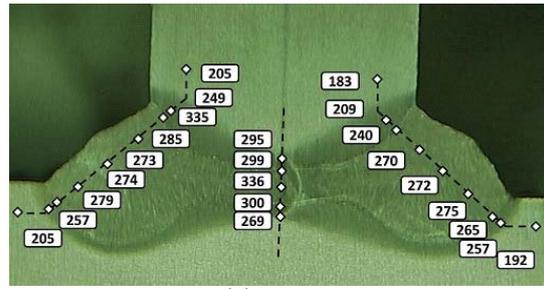
ビッカース硬度 (試験荷重 1kgf) の測定結果を図7に示す. 全ての試験結果において, 日本海事協会による「レーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン」に規定された硬さ基準値である 380HV を下回っていたことから, 継手の機械的性質も良好であると推察される.



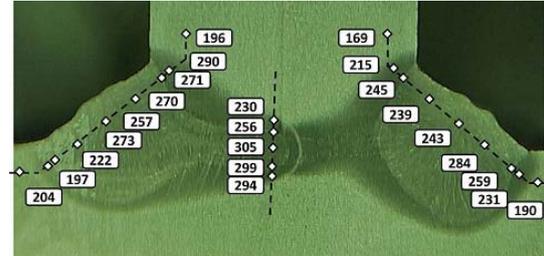
(a) TW1-B



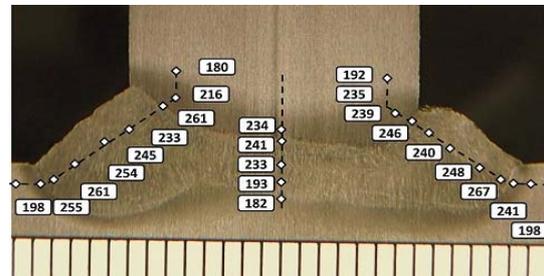
(b) TW2-B



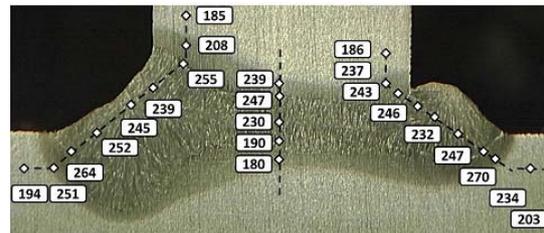
(c) TW3-B



(d) TW4-B



(e) TW1-S



(f) TW4-S

図7 ビッカース硬さ分布

### (4) 疲労強度

製作した T 継手に繰返し曲げ荷重を付与した疲労試験を実施した. 得られた S-N 曲線を図8に示す.

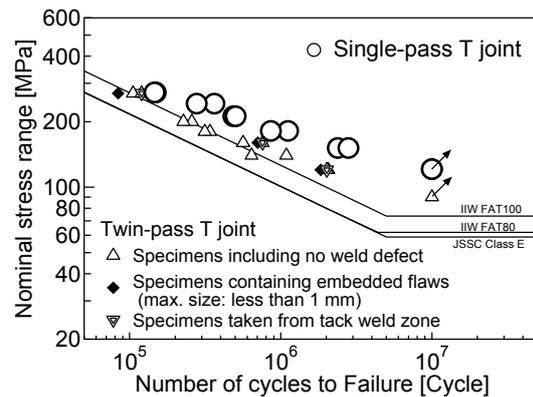


図8 S-N 曲線

両側貫通 T 継手については、非破壊検査により溶接欠陥が検出された箇所から抽出した試験片（黒ひし形印）および仮付け部から抽出した試験片（二重逆三角印）であっても、図中に示す設計曲線レベル程度の性能を確保できている。また、片側貫通 T 継手についても良好な耐疲労特性を有することが確認できる。

#### (5) まとめ

レーザー単独照射による仮付け方法を検討し、本研究で提示した方法により、良好な継手性能を有する完全溶込み T 継手が製作可能であることを確認した。

本研究成果を利用する、大規模な拘束装置の導入なしに、レーザー・アークハイブリッド溶接法を船体建造に導入することが可能になると期待される。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- 1) 津村修一, 青柳了太, 後藤浩二: レーザ・アークハイブリッド溶接を対象としたレーザー溶接による仮付け溶接の有用性に関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 21, pp. 405-408, 2015.
- 2) Koji Gotoh and Shuichi Tsumura: Fatigue Strength and Angular Distortion of the Full-Penetration Tee Type Joint Fabricated by One-Side Single-Pass Laser-Arc Hybrid Welding, Proceedings of ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2016), OMAE2016-54173.

〔学会発表〕（計 2 件）

- 1) 津村秀一 (後藤浩二): レーザ・アークハイブリッド溶接を対象としたレーザー溶接による仮付け溶接の有用性に関する検討, 日本船舶海洋工学会 2015 年秋季講演会, 2015 年 11 月, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区)
- 2) Koji Gotoh: Fatigue Strength and Angular Distortion of the Full-Penetration Tee Type Joint Fabricated by One-Side Single-Pass Laser-Arc Hybrid Welding, ASME 2016 35<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2016), June 2016, Busan (Korea) .

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

後藤 浩二 (GOTOH, Koji)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 60274487