

レーザ・アークハイブリッド溶接技術の一般商船建造工程への導入に向けた研究

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

上村, 崇杜
九州大学大学院工学府建設システム専攻 : 博士後期課程

内野, 一成
株式会社名村造船所生産管理部生産技術課

成松, 久雄
常石造船株式会社常石工場品質管理部品質技術グループ

他

<https://hdl.handle.net/2324/4794502>

出版情報 : レーザ加工学会講演論文集. 91, pp.67-74, 2019-06. Japan Laser Processing Society
バージョン :
権利関係 :



レーザ・アークハイブリッド溶接技術の一般商船建造工程への導入に向けた研究

Overview of Joint Industrial Project on the Introduction of Laser-Arc Hybrid welding to the Hull Construction Stage in Japanese Shipyard

後藤浩二^{*1}, 上村崇杜^{*2}, 内野一成^{*3}, 成松久雄^{*4}, 前田利光^{*5}, 鳥越功^{*5}, 森山厚夫^{*6}

^{*1}九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

^{*2}九州大学 大学院工学府 建設システム専攻 博士後期課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

^{*3}株式会社名村造船所 生産管理部 生産技術課
(〒848-0121 佐賀県伊万里市黒川町塩屋 5-1)

^{*4}常石造船株式会社 常石工場品質管理部 品質技術グループ
(〒720-0394 広島県福山市沼隈町常石 1083)

^{*5}前田工業株式会社
(〒476-0002 愛知県東海市名和町四ノ下 22)

^{*6}一般財団法人 日本船舶技術研究協会
(〒107-0052 東京都港区赤坂 2-10-9 ラウンドクロス赤坂 4 階)

Koji GOTOH^{*1}, Takamori UEMURA^{*2}, Issei UCHINO^{*3}, Hisao NARIMATSU^{*4},

Toshimitsu MAEDA^{*5}, Takumi TORIGOE^{*5}, Atsuo MORIYAMA^{*6}

^{*1}Kyushu University, Department of Marine Systems Engineering, Faculty of Engineering

^{*2}Doctoral Course, Department of Civil and Structural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University
(744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan)

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

^{*3}Production Control Department, Production Engineering Section, Namura Shipbuilding Co. Ltd.
(5-1 Shioya, Kurokawa-cho, Imari, Saga 848-0212, Japan)

^{*4}Technical Group, Quality Control Department, Tsuneishi Factory, Tsuneishi Shipbuilding Co., Ltd.
(1083 Tsuneishi, Numakuma-cho, Fukuyama, Hiroshima, 720-0394, Japan)

^{*5}Maeda Industry Co., Ltd.

(22 Yon-No-Shimo, Nawa-Machi, Tokai, Aichi, 476-0002, Japan)

^{*6}Japan Ship Technology Research Association
(Round Cross Akasaka Floors 4, 2-10-9 Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-0052, Japan)

我が国造船業で主に建造される船種（主要部板厚 15~20mm 程度）への適用を可能とするレーザ・アークハイブリッド溶接技術に関して 2012 年度より業界共同研究が実施されており，第一期研究の概要は第 82 回講演会において，第二期研究前半の概要を第 86 回講演会において紹介した．今回は第二期研究後半の概要について紹介する．

Japan Ship Technology Research Association (JSTRA) had organized the joint industry project in collaboration with university, classification society and some shipyards in order to apply this technology in construction of general merchant ships which the plate thickness in main structural member is thicker than passenger ships and high speed craft. Overview of main research results of the second and third phase JIP are introduced in this paper.

Key words: instruction, manuscript, journal, JLPS, five to ten keywords

1. 緒言

我が国造船業界は激しい国際競争の環境にあるが，

この状況を克服する方策の一つとして新技術の積極的な適用により船舶建造工程の生産性を一層高める必要がある．この目的を達成するため，日本財団の

助成を得て一般財団法人日本船舶技術研究会により推進された「船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究」プロジェクト(2012~2013年度)において、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)の調査研究委員会が設置され、同溶接技術の船舶建造工程への適用に向けた研究⁽¹⁾が実施され、同工程への導入に向けた期待が高まった。

一方で、一般商船建造工程にハイブリッド溶接を導入するに残された課題に対処するため、2014~2017年度に第2及び第3期業界共同研究が実施された。本稿では、この共同研究成果の概要を紹介する。なお、第2及び第3期業界共同研究でも第1期と同様に、アーク溶接材料は JIS Z 3312 に規定される YGW11 を満たすソリッドワイヤ MG-50 (ワイヤ径 1.6mm) を、シールドガスは 100%CO₂ ガスを使用した。

2. 溶接施工に及ぼす諸因子の影響

2.1 開先加工方法の影響

ハイブリッド溶接では開先加工精度が継手品質に影響を及ぼすことが一般的であるため、客船建造へのハイブリッド溶接導入で先行する欧州の造船所では、開先面を機械加工仕上げしている。一般商船建造に際してはコスト面の観点から熱切断による開先加工が志向される。そこで先行研究⁽¹⁾では熱切断の中で加工精度に優れるレーザ切断で開先加工することとして、良好な品質を有する継手製作を可能とした。一方、国内造船所ではプラズマ切断やガス切断が多用されている上、Y開先のようにガス切断のみで開先加工可能な場合もある。そこでプラズマ切断及びガス切断で開先加工した場合も、ハイブリッド溶接により良好な品質の継手を製作可能な条件について検討した。

2.1.1 開先面粗度

通常の船体建造工程で適用される切断面性状が得られる条件下でレーザ切断、プラズマ切断、並びにガス切断の3種類の熱切断により得られた開先加工面の表面粗度を JIS B 0601⁽²⁾ に規定された算術平均粗さにより評価した。Fig. 1 に測定結果を示す。

機械加工面と比較するとガス切断面の粗度は非常に大きい。また、レーザ切断鋼板とプラズマ切断鋼板の表面粗度は機械加工面に比べると大きいものの、両者はほぼ同レベルであった。この結果より、レーザ切断と同様にプラズマ切断により準備した開先でも健全な継手が製作できることが期待される。

2.1.2 継手品質評価

先行研究⁽¹⁾でレーザ切断による開先を適用して健全な継手製作が可能であることは検証済みであるので、ここではプラズマ切断およびガス切断により開先加工を行い、突合せ継手を製作した。

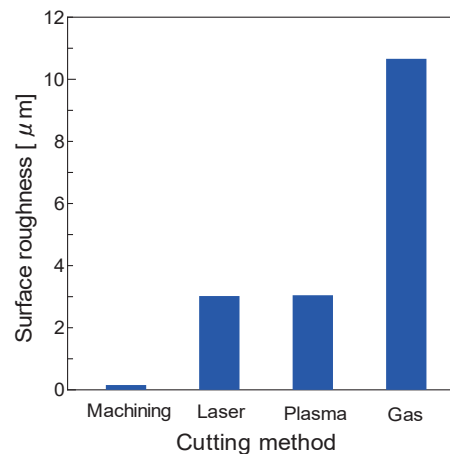


Fig.1 Arithmetic average roughness of beveled surface by each cutting method.

供試材は板厚 17mm, 板幅 100mm, 板長 300mm の造船用鋼 KD36 である。開先形状は I 形で、切断後に開先面に残存した酸化被膜及び接合部近傍の防錆プライマをグラインダで剥離した後に溶接施工した。

得られたビード外観及び溶接長中央付近の断面マクロをプラズマ切断について Fig. 2 に、ガス切断について Fig. 3 に示す。両者とも表ビード側にスパッタが散見されたが、ビード形状自体は良好である。

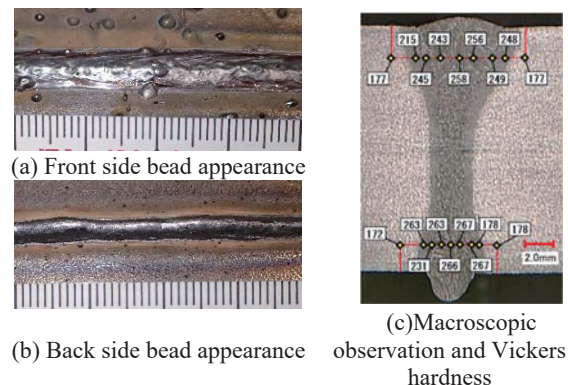


Fig.2 Weld bead fabricated a test piece with a bevel by plasma cutting.

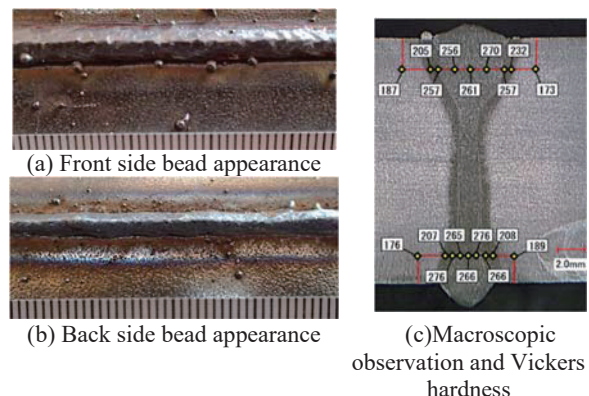


Fig.3 Weld bead fabricated a test piece with a bevel by gas cutting.

プラズマ切断材では裏ビードの余盛高さが 2.2mm

あり、レーザ切断材 (1.2mm) 及びガス切断材 (1.7mm) と比較して高い結果が得られた。この原因は、プラズマ切断特性から形成される R 形状 (肩ダレ) の結果、他の試験体よりも試験体裏側のルートギャップが相対的に大きかったことが原因と推察される。別途実施した断面マクロ観察では、内在欠陥は確認されなかった。次に、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⁽³⁾に従い溶接部のビッカース硬さ (測定荷重 10kgf) を測定した (Fig.2 (c)及び Fig.3 (c)参照)。硬さの最高値はプラズマ切断材で 267HV, ガス切断材で 276HV であり、ガイドラインで規定された上限値 380HV を十分に下回る値であった。

今回の施工結果では、切断面の表面粗度の違いは継手品質に大きな影響を与えないことを確認した。

2.2 防錆プライマと酸化皮膜の影響

ハイブリッド溶接により良好な品質を有する溶接継手を製作するには、施工前に接合部近傍の防錆プライマ除去することが有用である。また熱切断により開先面を加工する場合、切断面に酸化皮膜が残存したままではプライマと同様に溶接欠陥を誘発することが懸念される。一方、現在の船体建造工程で用いられるアーク溶接ではプライマや酸化皮膜を事前に除去せずとも良好な品質の溶接継手が製作できることから、ハイブリッド溶接を船体建造工程に導入するには、プライマや酸化皮膜が残存しても良好な継手品質を確保できることが望ましい。そこで、これらが残存した場合の継手品質に及ぼす影響について検討した。

溶接施工に先立ち、試験材のプライマ及び酸化被膜の厚さについて膜厚計 (サンコウ電子計測器: SWT 9200 プローブ: FN-325) を用い測定した。試験材はレーザ切断により切断されたものを使用した。このため、鋼板下面にレーザ切断時に付着したと思われるヒュームによる汚れが確認された。膜厚計測位置は板幅中央位置の端部から試験体長さ方向 100mm 及び 200mm の 2 箇所を 5 回ずつ、6 試験体 (合計 60 点) について測定した。酸化被膜に関しては、板厚中央位置で長さ方向の 100mm, 200mm, 300mm の 3 箇所を 7 回ずつ、4 試験体 (合計 84 点) について測定した。測定結果の平均値は試験材上面のプライマが 50.0 μ m, 下面のプライマが 63.2 μ m, 切断面の酸化皮膜が 23.0 μ m であった。試験材上面と下面ではプライマ膜厚には約 10 μ m の差が確認されたが、これは切断ヒュームによる汚れも一緒に計測したためと考えられる。各測定点におけるプライマ及び酸化被膜の膜厚計測値のばらつきはほとんど無かった。

2.2.1 突合せ継手

試験材上面のみにプライマを残存させ下面プライ

マ及び切断面酸化皮膜を除去した試験片 (ID:B1), 下面プライマのみ残した試験片 (ID: B2), 酸化被膜のみを残してプライマを全て除去した試験片 (ID:B3) を準備し、それぞれ突合せ継手を製作した。

溶接施工条件は先行研究⁽¹⁾で同定した条件を元にアーク電流と電圧を微調整しつつ探索した Table1 に示す条件とした。

Table 1 Detected suitable welding condition.

Travel speed (mm/min):	1,200
Laser power (kW):	12
Arc current (A):	400
Arc voltage (V):	26.0

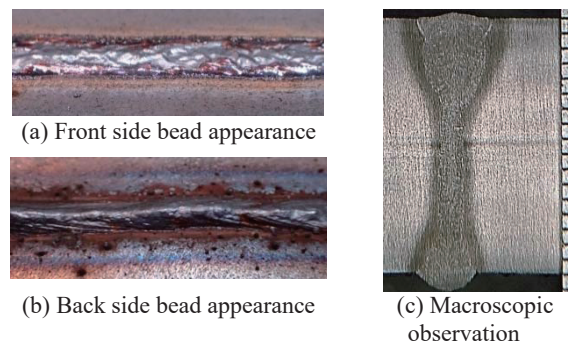


Fig.4 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: B1).

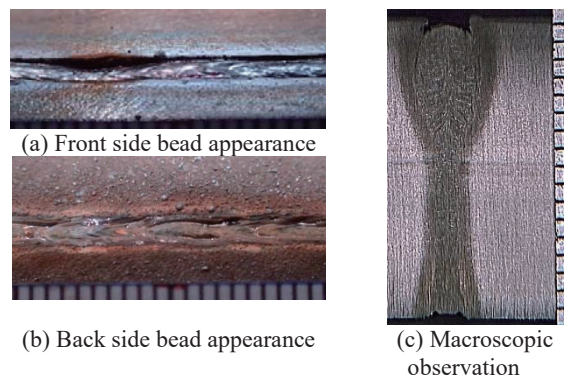


Fig.5 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: B2).

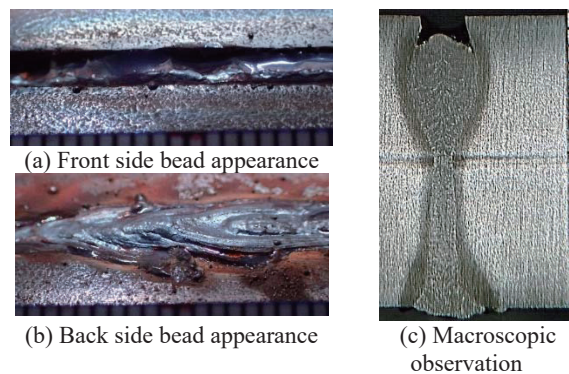


Fig.6 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: B3).

製作した継手のビード外観及び溶接中央位置での

断面マクロをそれぞれ Fig. 4~Fig. 6 に示す。Fig. 4 に示す条件 ID : B1 は、表ビード高さが若干低くなっているもののビード外観及び断面マクロは良好である。一方、Fig. 5 に示す条件 ID : B2 では、表裏の両ビードにアンダーフィルが生じている。Fig. 6 に示す条件 ID : B3 でも同様に表ビードにアンダーフィルが生じた。以上の結果より、ハイブリッド施工において試験体下面のプライマ及び酸化被膜が溶接継手製作時の欠陥形成の要因となる可能性が懸念される。一方、試験体上面のプライマは溶接性能に大きな影響を与えないと推察される。アンダーフィルが発生した原因として、プライマ及び酸化被膜が溶接により熱分解されガスを生成し、これが熔融金属を攪拌することで材料裏面からスパッタとして飛散した可能性が挙げられる。レーザー溶接により酸化被膜が熱分解され生成されるガス⁽⁴⁾とプライマがアーク溶接により熱分解され生成されるガス⁽⁵⁾では共通して CO が多く含まれており、FCW 等のワイヤが欠陥低減に有効である可能性が考えられる。試験体上面プライマの場合は溶接時に生成されたガスは大気中に放出され熔融金属内に混入しないため、プライマ影響が確認されなかったと推測される。

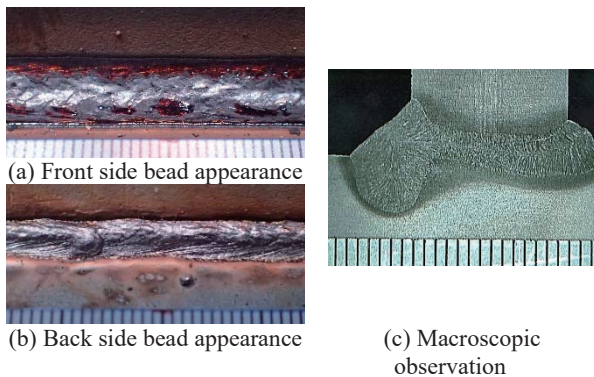


Fig.7 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: T1).

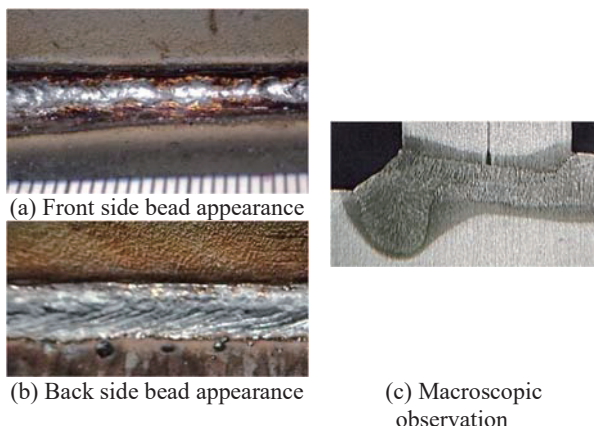


Fig.8 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: T2).

2.2.2 片側完全溶込み T 継手

突合せ溶接継手と同様にプライマ及び酸化被膜を除去した試験体 (ID:T1) , プライマ及び酸化被膜ままの試験体 (ID: T2) に、先行研究⁽¹⁾で導出した施工条件により T 継手を製作した。

製作した継手のビード外観及び溶接中央位置での断面マクロを Fig. 7 及び Fig. 8 に示す。いずれの試験体のビード外観及び断面マクロには欠陥は確認されないことから、T 継手製作時にはプライマ及び酸化被膜の除去は不要と判断できる。

3. シームトラッキング装置の導入

長尺の溶接を安定して施工するためには、溶接線の確実な追従及びギャップ変動を検知し、これに応じて溶接条件を適宜変動させることが必要である。本 PJ では自動車製造時の溶接向けに開発されたシームトラッキング装置^{(6)~(8)}に着目し、本装置を導入して安定した長尺溶接の施工可能性を検討した。

Fig. 9 に示すように、始点では溶接線に狙いを合わせ、終点に向かうにつれて溶接狙い位置がそれぞれ 15mm 遠ざかりながら下り坂になる様にフランジを持ち上げてワークを設置した。シームトラッキング機能を有効にして溶接するため、ワーク両端を 2 点クランプしたのみで、溶接中にワークが自由に変形する状態とした。トラッキングにより得られた情報から、動作は溶接ヘッドを取り付けたロボットのリニア軸のみを動作させ、始終点の 2 点のみの直線補間ティーチングとした。評価は、センサーガラス面 (撮像窓) が溶接中にセンサがヒュームやスパッタで汚染されないか目視確認するとともに、溶接線を見失うことがないか、異常値を除去できているかについて確認した。検証は、溶接長 4800mm, レーザ出力は 20kW, 溶接電流 300A, 速度 1.0m/min で評価した。

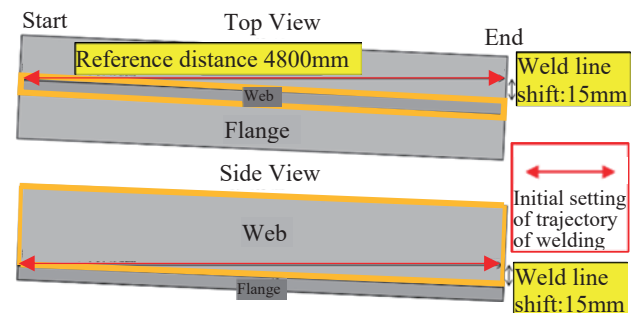


Fig. 9 Specimen setting condition.

その結果、ドライ運転 (レーザーとアーク溶接無し) の場合、十分なトラッキング精度を有することを確認したが、完全溶込み片側貫通 T 継手の施工時には、溶接ヒュームの影響により溶接線を検出するセンサのレンズが曇り、溶接長が長くなるにつれて検出精度が低下する可能性及びセンサが過熱されて耐久性

に問題が生ずることが確認されたため、ヒューム除去のエアパージ機構やセンサ付近に冷却機構を新たに設置するなどの対策を講じ、長尺の施工にも耐えうるように装置改良を行った。以上の結果、狙いずれ、高さずれ共に±0.2mm以内であるトラッキングが可能であることを確認した。

また、溶接長 2,000mm とした片側完全溶込み T 継手製作の施工条件検討実験において、溶接長 1,000mm 進行後に仮付が外れたため狙い位置が大きく変化する状況が生じた際でも、トラッキング機構により適切に施工可能であることを確認している。

Fig. 10 にこれに相当する試験体の外観と立板の水平方向ズレ量を示す。

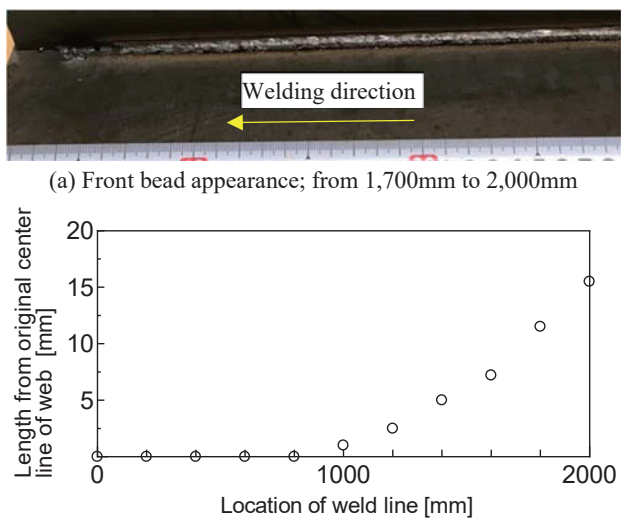


Fig. 10 Performance check result of the tracking system.

4 長尺溶接継手製作の試み

4.1 片側貫通 T 継手

シームトラッキング装置を活用しつつ、溶接線全長 5,000mm の継手製作を試みた。なお、施工距離が延びる（連続しての施工時間が延びる）に従いレーザ出力が低下すること及び、レーザ発振モジュールの一部が故障した事により発振能力（最大 20kW）が一部抑制（最大 18kW 程度）されたため、溶接長 2,000mm の段階で一旦施工停止し、その後 3,000mm の施工を行うこととした。加えて、シームトラッキングにより得られたギャップ幅に応じてレーザ出力を自動的に変動させた。初期ギャップはトラッキング検知の観点から 1.5mm と設定した。

Fig. 11 に最初の溶接長 2,000mm の範囲の一部についてビード外観を示すが、表ビードは一部の区間でビードオン溶接のように縦板から離れて主板の上にビードが形成された。裏ビードはレーザにより裏に流し込まれたような形跡があり、アーク狙い位置が不適切であった可能性が推測される。Fig.12 (a)に

施工中のレーザ出力変化を示すが、トラッキングによるギャップ幅検知とこれに応じたレーザ出力制御は問題なく動作したことが確認できる。初期ギャップ設定のため、厚さ 1.5mm のフィラーゲージを 500mm 間隔毎で立板と基板の間に挿入したため、その部分はギャップ 0.0mm と判断され、瞬間的にレーザ出力が増大していることも確認できる。

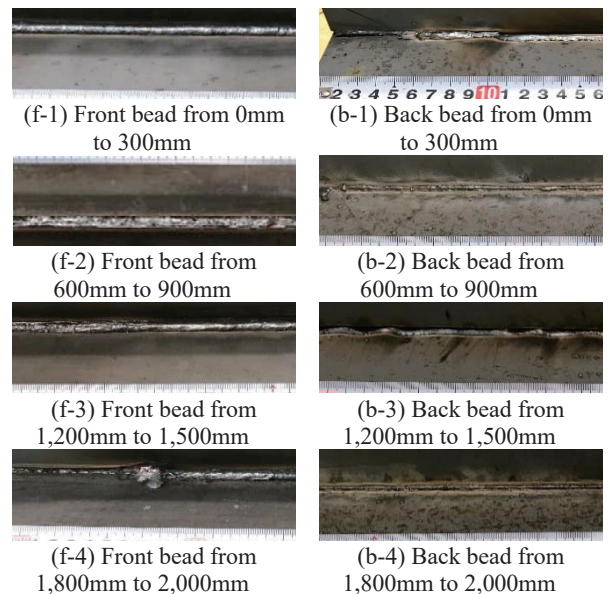


Fig.11 Weld bead appearance of full-penetration tee joint fabricated by one-side single pass welding. (Welding section from 0mm to 2,000mm, Initial gap 1.5mm, using seam tracking system).

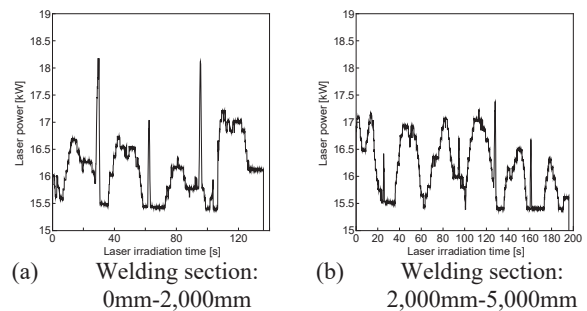


Fig. 12 History of laser power during the welding.

前半の溶接施工ではアークトーチの位置が実施時に変動した可能性があるため、トーチを強く固定し直して同一施工条件で後半の溶接長 3,000mm の施工を実施した。得られたビード外観の一部を Fig. 13 に、施工時のレーザ出力履歴を Fig. 12 (b)に示す。3,700mm 地点付近 (Fig.13, (b-4)参照) から裏ビードが波打つような現象が確認できる。レーザ出力変動を見ると、この地点 (約 113 秒付近) ではレーザ発振器自体から約 17kW 程度の出力であった。一方、溶接長 750mm (50 秒付近) 並びに 1,200mm (80 秒付近) 地点でも同程度の出力であるが安定した裏ビードが形成された。

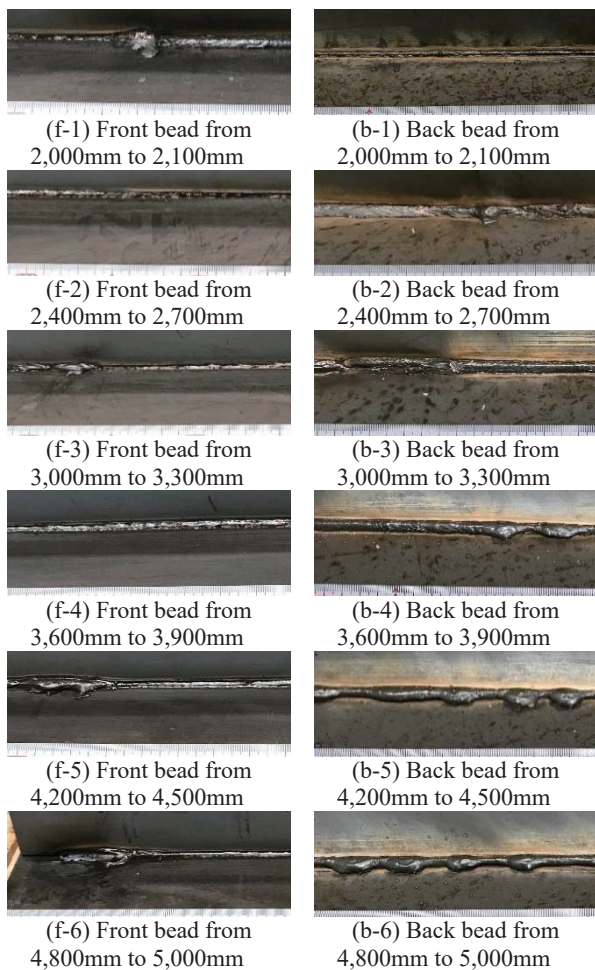


Fig.13 Weld bead appearance of full-penetration tee joint fabricated by one-side single pass welding. (Welding section from 2,000mm to 5,000mm, Initial gap 1.5mm, using seam tracking system).

同程度のレーザー出力でも裏ビード形状が異なった理由として、レンズ膨張によるレーザー焦点シフトまたは加工点周辺に発生するヒュームとブルームの滞留に起因する出力低下が生じた可能性が考えられるが、主因の特定には至っていない。また、表ビードは脚長が非常に短く、立板に沿うビードを形成した。裏ビードの溶加材量も考慮すると、現状の溶接条件（ワイヤ送給量）では全体の溶加材量が不足していると考えられ、溶接速度の低減等の対策を講じる必要がある。レーザー出力は6区間で変動しているが、これは溶接長 3,000mm におけるフィラーゲージ設置間の区間数（設置間隔 500mm）と合致している。すなわち、トラッキング装置の各機能が十分に発揮されていたことが確認できる。

4.2 突合せ継手

溶接線全長 5,000mm の突合せ継手製作を試みた。ただし、施工距離が延びる（連続しての施工時間が

延びる）に従いレーザー出力が低下すること及び、熱レンズ効果に起因するレーザー焦点シフト等を考慮して施工回数を複数回に分割し、数分程度の小休止後に施工を再開する方法を採用した。また、初期ギャップを 0mm とした場合と、0.2mm とした場合のそれぞれについて検討した。

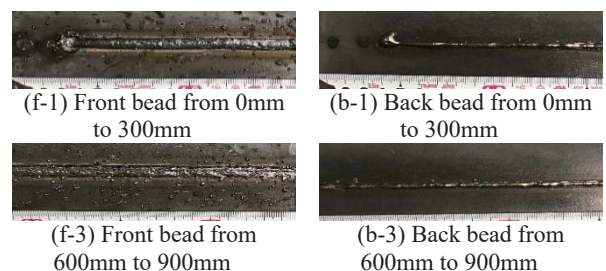
4.2.1 初期ギャップ 0mm の場合

本施工前に溶接電源を変更（Fronius TPS5000 MV-R からダイヘン Welbee Inverter M500G に）したことから、溶接条件を調整し、比較的安定した条件の元で施工した。更新した主な条件を Table 2 に示す。仮付はレーザー単独照射（レーザー出力 6kW）による点付けであり、ピッチは 250mm とした。また、使用したレーザー発振器自体の有する特性として連続出力時間が延びるに従い出力低下が生じるため、溶接長 250mm 毎にレーザー出力を初期指令値よりやや高い指令値に変更することで意図するレーザー出力を平均的に維持する対策に加えて、溶接長 1,000mm ごとに一旦施工を3分程度休止し、再び施工する対策を講じた。

Table 2 Updated welding condition.

Laser power (kW):	16.0
Arc current (A):	320
Arc voltage (V):	26.5
Defocusing distance (mm):	-5

Fig.14 にビード外観を示す。表ビード外観について一部の箇所では溶け落ちに近い現象が見られるものの、全体的に安定したビードが形成できている。一方、スパッタが多く見られるが、ビード上にも金属粒が常に付着していたことを考えると、アーク溶接に起因するスパッタではなくレーザー照射によるキーホールから上空方向に向かって噴出されたブルームにより散った金属粒であると考えられる。裏ビードについては、第3施工区間（溶接長 2,000mm から 3,000mm 区間）が他の区間と比べてビードの形成が不安定であった。これは溶加材が必要以上のレーザー照射により吹き飛ばされたことによる溶け落ちと考えられる。本溶接条件はレーザー切断 I 型開先で初期ギャップが 0.0mm に対するものであるため、ギャップがある程度拡大した場合には良好な施工ができないと考えられる。これは仮付による拘束力が不足して面内回転変形が生じたためと推察される。



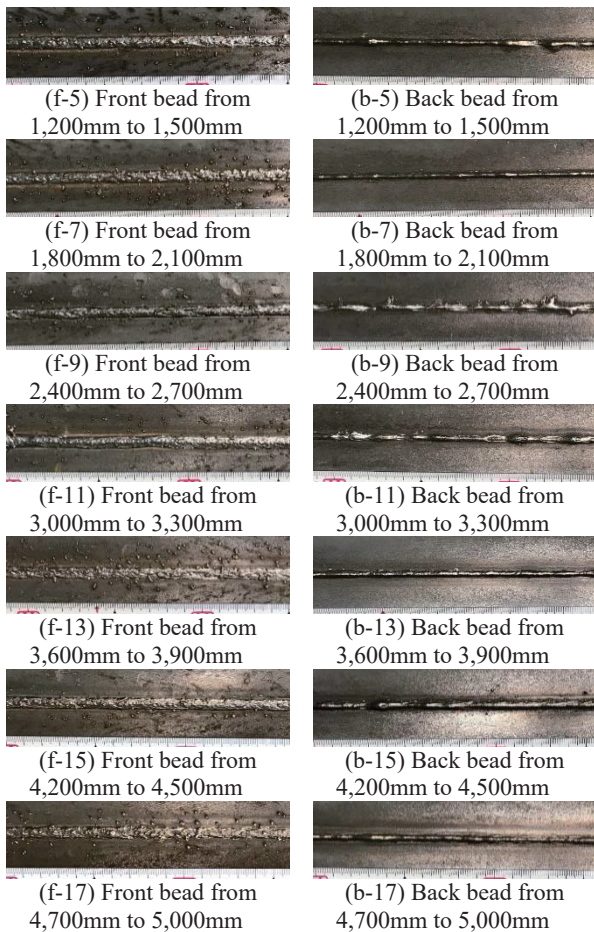


Fig.14 Weld bead appearance of butt welded joint. (Initial gap 0mm).

4.2.2 初期ギャップ 0.2mm の場合

ギャップに応じた溶接条件を Table 2 の条件をベースに溶接長 500mm 程度で再検討し、アーク電流などを微調整することで適切に施工できることを確認し、これらの条件で施工した。ここではできる限り連続して長尺の溶接施工を行うことを念頭に、溶接長 2,000mm の施工後一旦休止し、数分後に施工を再開して 3,000mm の溶接を施工した。仮付は 4.2.1 で適用した方法と同じ方法を採用した。初期ギャップを 0.2mm 以上確保するために厚さ 0.5mm のフィラゲージを溶接始端から 250mm 毎に設置し、これを溶かすように仮付け溶接を実施することで、ギャップを設定した。また、前節と同じくレーザ出力の定期的な指令値更新も行った。

Fig. 15 にビード外観を示す。Fig. 14 に示した初期ギャップ 0mm の結果と比較して、溶接距離が長いにもかかわらず表ビードと裏ビード共に非常に安定した外観を得た。一方で一部仮付け溶接箇所でも溶加材過剰による溶落ちが生じたことが確認できる。また、表側では初期ギャップ 0mm の場合と比較してスパッタの低減が確認できる。初期ギャップを設けた試験体では、レーザがアーク溶接により形成される溶融池を裏面に押し流し出す際、突合せ部に隙間

があることで隙間の無い初期ギャップ 0mm の試験体に比べてプルームの発生量が低下したと共に、発生したプルームが裏面にも流れやすくなったことが影響していると推測される。溶接長 4,800mm 以降に見られた溶け落ちは、エンドタブを設置せずに施工した上、面内回転変形を抑制する治具を定盤都合により十分に設置できなかったことによる拘束力の不足に起因すると推察される。

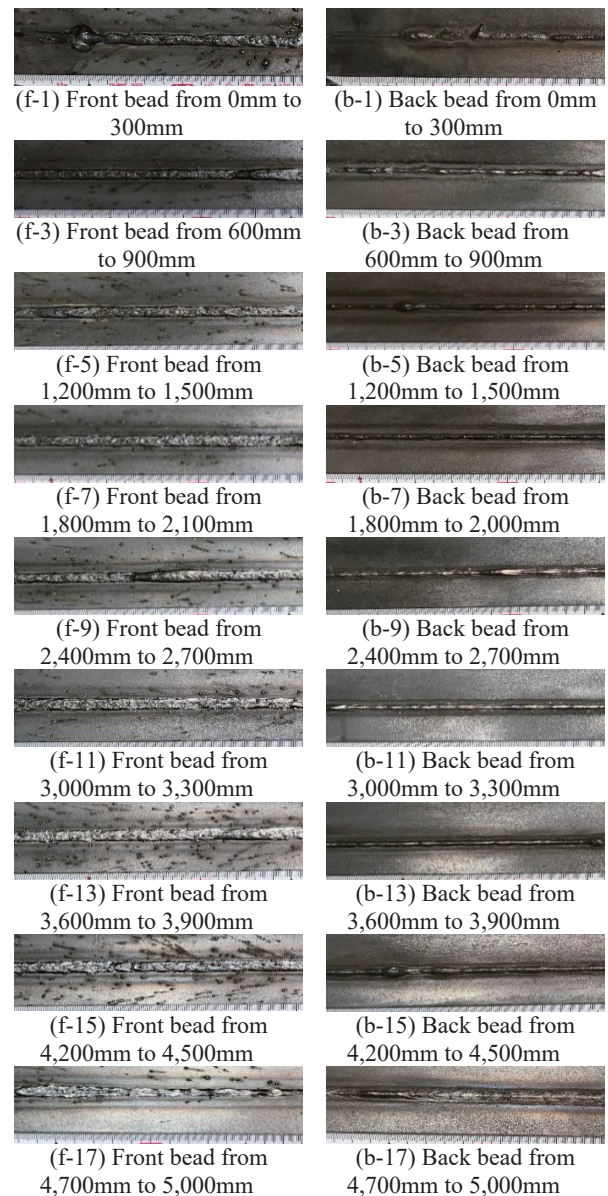


Fig.15 Weld bead appearance of butt welded joint. (Initial gap 0.2mm).

5. まとめ

本稿では、我が国造船業で主に建造される船種(主要部板厚 15~20mm 程度)へレーザ・アークハイブリッド溶接を適用することを目的とした業界共同研究の第 2 期研究後半から第 3 期における実施内容について概説した。

これら一連の研究の結果, 一般商船建造工程へレーザー・アークハイブリッド溶接を適用するための基礎知見は十分に蓄積できたと考えられる. 実船建造に際しては個々の造船所における建造船種を考慮しつつ詳細に施工条件を検討し, 船級協会から溶接施工承認を取得することが必要であるため, 同溶接装置を多くの造船所が導入, 施工条件を確立することで, 高品質の船体建造が可能になると期待される.

謝 辞

本研究は (一財) 日本造船技術センターからの委託を受け, (一財) 日本船舶技術研究協会に実施委員会を設置して実施したものである. 供試鋼材は JFE スチール株式会社より提供いただきました. また, 本研究の実施委員会委員には種々有益なコメントをいただきました. ここに記して御礼申し上げます.

参 考 文 献

- (1) 一般財団法人日本船舶技術研究協会: 船舶建造高品質・効率化技術の調査研究, 研究成果概要報告書, <https://www.jstra.jp/a4b02/a4b2c01/2012/>, (2013), accessed on May 13, 2019.
- (2) JIS B0601: 製品の幾何特性仕様 (GPS) – 表面性状: 輪郭曲線方式 – 用語, 定義及び表面性状パラメータ, (2013).
- (3) 一般財団法人日本海事協会: レーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン 第3版, (2016).
- (4) 鎌田政男: プライマの種類と耐気孔性, 溶接学会誌, **62-7**, (1993), 507.
- (5) 小野数彦, 安達馨, 堅田寛治, 三代正幸, 宮本勇, 井上孝: 酸化膜付着鋼材のレーザー溶接現象, 溶接学会論文集, **20-2**, (2002), 213-219.
- (6) 前田利光, 鳥越功, 杳名宗春: レーザ溶接におけるシームトラッキング技術の研究, 溶接学会全国大会講演概要, **99**, (2016), 64-65.
- (7) 前田利光, 鳥越功, 杳名宗春: レーザ・アークハイブリッド溶接のシームトラッキングと継手ギャップ適応制御の研究, 溶接学会全国大会講演概要, **100**, (2017), 58-59.
- (8) 前田利光, 鳥越功, 春日翔貴, 杳名宗春: 仮付ビード識別機能を持ったレーザー溶接用シームトラッキングシステムの研究, 溶接学会全国大会講演概要, **101**, (2017), 358-359.