

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01640

研究課題名(和文) 半導体レーザーとホットワイヤ法の融合による中厚板材料の高品質溶接技術に関する研究

研究課題名(英文) High quality welding technology for thick plate with combination of diode laser and hot-wire method

研究代表者

山本 元道 (Yamamoto, Motomichi)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：30274111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：厚鋼板(板厚20mmの下向き1パス突合せ継手, 板厚50mmの立向き1パス突合せ継手)に対する低入熱・高品質溶接法として, ホットワイヤ法と高出力半導体レーザー(6kWx2台)を組み合わせた溶接技術の検討を行なった。両継手共に, 矩形レーザービーム形状および照射条件(照射位置, ウィービングなど)を適正化することで, 融合不良のない, 十分な強度を有する継手を実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型船舶, 橋梁, 建築鉄骨, 発電プラント, エネルギータンクなど, 多くの重要インフラ製造分野において今後必要不可欠となる, 高品質・高効率溶接技術の開発を目的としている。これまでのレーザー溶接と全く異なるコンセプトを提案・実現することで, 施工裕度向上, 溶接金属特性制御, 自動化, 高強度・高靱性母材の適用拡大なども可能となる。本溶接法の概念は他の様々な製品製造にも応用できるため, 幅広い本研究成果の活用を検討している。

研究成果の概要(英文)：The welding technique combining the hot wire method and a high power diode laser (6kW x 2) was investigated as a low heat input, high quality welding method for thick steel plates (one pass butt joint of 20 mm thickness and one pass vertical butt joint of 50 mm thickness). By optimizing the shape of the rectangular laser beam and irradiation conditions (irradiation position, weaving, etc.), joints with sufficient strength and without defects were achieved for both joints.

研究分野：溶接・接合

キーワード：ホットワイヤ法 レーザ溶接 厚鋼板 1パス溶接 高強度・高靱性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 今後の大型船舶建造分野において、更なる大型化や軽量化による輸送効率向上あるいはCO₂排出量の削減などが求められており、中厚板高張力・高靱性鋼板の適用が必要不可欠になっている。大型船舶に要求される溶接継手部の破壊靱性やアレスト性能を、サブマージアーク溶接やエレクトロガス溶接などの高能率・大入熱溶接法適用時に満足する鋼材および溶接材料の開発は困難を極めている。今後、更なる高張力化に向けた材料側の対応は非常に困難になることが予想される。したがって、現在適用されている大入熱溶接に比べて大幅に入熱を低減できる新しい溶接・施工技術の開発が求められている。

(2) レーザ発信器の高出力化・高品質化に伴い、中板のすみ肉溶接部や突合わせ溶接部においても、レーザ単独溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接の適用が検討されており、一部適用され始めている。一般的なレーザ溶接は、対象材料が厚板になると非常に高価な大出力レーザ発信器が必要になり、ギャップ裕度は非常に小さいためその適用範囲は限定されてしまう。特に造船建造現場では、開先面精度、ギャップ裕度、施工裕度などの問題から、板厚10mm程度までの鋼板に対するレーザ・アークハイブリッド溶接の検討・適用が一部実施されているのみである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまでに蓄積された基礎データ・技術を基盤に、レーザスポット形状・エネルギー分布制御が容易な高出力半導体レーザによる高裕度・高精度入熱制御と、入熱低減・高能率溶接技術として実績のあるホットワイヤとを組み合わせ、ホットワイヤ・レーザ溶接法による低入熱中厚高張力鋼板溶接技術の開発を検討することにした。

(2) 本研究では、既存の大入熱溶接技術の現状を踏まえ、以下の主目標を掲げた。

- ・サブマージアーク・エレクトロガスアーク溶接に比べて大幅な入熱低減（1/2以下）
- ・サブマージアーク・エレクトロガスアーク溶接に比べて同等以上の施工能率
- ・サブマージアーク・エレクトロガスアーク溶接に比べて大幅な母材溶融量の低減
- ・サブマージアーク・エレクトロガスアーク溶接と同等の開先加工裕度や施工裕度

なお、広島大学所有のレーザ発振器（6kW半導体レーザ x2台）の能力を鑑み、以下の板厚・継手を検討対象とする。

【対象1】板厚：20mm，継手形状：下向き突合せ継手

【対象2】板厚：50mm，継手形状：立向き突合せ継手

3. 研究の方法

3.1 板厚20mmの鋼材を用いた狭開先下向き突合せ溶接

(1) 供試材料には、母材として板厚20mmの造船用圧延鋼材KE36を、添加ワイヤとして直径1.6mmのMG-60を使用した。試験片寸法は幅38mm（突合せ溶接後約80mm）、長さ125～135mmとし、開先形状はベベル角3°、ルートギャップ2mm、ルートフェイス1mmのU形とした。引張試験用試験片は幅200mm（溶接後約400mm）、長さ200mmとした。

(2) 主熱源には6kW半導体レーザを2台用い、それぞれ光学レンズを種々組み合わせて、17×2mm、23×2mm、26×2mmの3種類のスポット形状を形成した。この3種類のスポットを組み合わせて、スポット形状および相互の照射位置等の影響を調査した。溶接速度は、0.3～0.5m/minとした。ホットワイヤ送給速度は8.4～14.2m/minと変化させ、送給速度に応じた適正な電流値を設定した。シールドにはArガスを使用した。溶接中は高速度カメラを用いた可視化を行い、溶融池挙動、ホットワイヤ送給挙動などを詳細に観察・評価した。

(3) 各種条件での溶接後、断面観察、ビッカース硬さ計測、シャルピー衝撃試験、引張試験などを実施して、継手の健全性や機械的特性の取得・評価を行なった。シャルピー衝撃試験は、溶接金属部および溶融境界にノッチ先端を加工した試験片（JIS Z 2202）を用い、0℃にて実施した。引張試験片は板厚16mm、平行部幅25mmのJIS14B号試験片（JIS Z 2241）を用い、室温大気中にて実施した。

3.2 板厚50mmの鋼材を用いた立向き突合せ溶接

(1) 供試材料には、母材として板厚50mmの造船用圧延鋼材KE40を、添加ワイヤとして直径1.6mmのYM-80を使用した。試験片寸法は幅100mm（突合せ溶接後約210mm）、高さ200mmとし、開先幅10mmのI形継手とした。

(2) 主熱源には6kW半導体レーザを2台用い、それぞれ光学レンズを組み合わせていくつかのスポットを形成した。ビームAは8×51mm（長さ両端部でエネルギー密度が高いエネルギー密度分布）とし、ビームBは10×48mm、5×56mm、2×56mmの3種類のスポット形状を形成した。10×48mmのビームは定常照射とし、5×56mmおよび2×56mmのビームはウィービングヘッドと組み合わせて周波数5Hzで揺動照射した。溶接速度は3.3cm/minとし、ホットワイヤ送給速度は3.3m/minで送給速度に応じた適切な電流値を設定した。シールドには80%Ar+20%O₂ガスを使用した。溶接中は高速度カメラを用いた可視化を行い、溶融池挙動、ホットワイヤ送給挙動などを詳細に観察・評価した。

4. 研究成果

4.1 板厚 20mm の鋼材を用いた狭開先下向き突合せ溶接

(1) レーザ出力 6kW、溶接速度 0.5m/min、レーザスポット 23×2mm (照射角度 25°) および 17×2mm (照射角度 5°) の条件では、可視化画像ならびに溶接終端部の溶融池先端形状から、開先上部 (試験片表面近傍) にて溶融池が大きく形成されて開先底部への入熱が阻害されていた。その結果、底部に大きな融合不良が発生していた。

(2) 上記溶接条件のまま、溶接速度 0.3m/min とした場合には、開先上部での溶融池幅が広く形成されて開先底部への入熱が阻害されていた。その結果、底部に大きな融合不良が発生していた。

(3) レーザ出力 6kW、溶接速度 0.5m/min、レーザスポット 17×2mm (照射角度 25°) および 23×2mm (照射角度 5°) の条件では、開先中央部のレーザが重なる部分で溶込み幅が大きくなり、底部には融合不良が発生していた。また当該中央部で凝固割れが発生していた。

(4) レーザ出力 6kW、溶接速度 0.5m/min、レーザスポット 17×2mm (照射角度 25°) および 26×2mm (照射角度 5°) の条件では、溶融池は開先上部から底部まで安定して形成され、底部の融合不良も大幅に改善された。

(5) レーザ出力 6kW、溶接速度 0.3~0.5m/min、レーザスポット 32×2mm (照射角度 23°) および 26×2mm (照射角度 5°) の条件では、2つのビームスポットの相対位置を変化させた (Condition A: 開先底部で2つのレーザスポットが重なる, Condition B: 開先上部で2つのレーザスポットが重なる)。図 1 に、2つのビーム照射条件での各溶接速度での融合不良率および希釈率を示す。Condition A の比較的溶接速度が速い条件 (0.4, 0.5m/min) において、良好な結果が得られている (図 2 参照)。溶接速度 0.4m/min では、融合不良のない良好な継手を得ることができた。

(6) 良好な結果が得られた Condition A で作製した継手の組織観察、硬さ分布計測を行なったところ、0.3~0.5m/min のどの溶接速度においても、ビード幅 3.5mm 以下、溶接熱影響部 (HAZ) 幅 3mm 以下であった。一般のアーク溶接 (MAG 溶接) に比べて大幅な低入熱化、低希釈化を実現することができ、一般のレーザ溶接・レーザアークハイブリッド溶接に比べても低入熱を維持しつつ、安定した溶接金属形成・施工裕度の向上を実現することができた。

(7) 良好な結果が得られた Condition A の溶接速度 0.4m/min の条件で作製した継手から試験片を切り出し、引張試験を実施した。2本のうち1本は融合不良により若干低い強度となったが、もう一本は母材破断となり、十分な引張強度を得ることができた。

(8) 良好な結果が得られた Condition A の溶接速度 0.4m/min の条件で作製した継手から試験片を切り出し、シャルピー衝撃試験を実施した。融合不良の発生していない箇所の結果は、溶接金属部および溶融境界部ともに、47J を超える高い吸収エネルギーを得ることができた。

(9) 以上の結果から、出力 6kW のレーザ発振器を 2 台用い、ツインビームの形状・寸法および相対位置を適正化することで、板厚 20mm の鋼材を 1 パスで溶接可能であることがわかった。作製した継手の特性は良好であった。より安定した継手の作製を行うためには、若干のレーザ出力増加が必要であることもわかった。

4.2 板厚 50mm の鋼材を用いた立向き突合せ溶接

(1) 3種類のレーザビームスポットおよび定常・揺動照射を組み合わせた場合の結果を図 3 に示す。ビーム B も定常照射とした場合には融合不良が発生 (融合不良率 8%) しており、溶込み面積も他の 2 条件の 1/2 以下となった。開先幅に比べて幅の狭いビームを揺動させた場合の結果では、融合不良は発生しておらず、均一で必要十分な溶け込みを得ることができている。一方、HAZ 幅や溶融境界近傍の結晶粒径は、定常照射の場合とほぼ同じであり、低入熱を実現できていることがわかった。

(2) 図 3 に示した断面中央部の硬さ分布を測定したところ、適切なオーバーマッチ (母材 160HV 程度、溶接金属 270HV 程度) が実現できていた。また低入熱化によって、狭い HAZ 軟化幅および小さな軟化度を実現できていた。

(3) 溶接金属部および溶融境界部のそれぞれにおいて、板厚方向 3 箇所 (鋼板表面近傍×2, 中央部) から試験片を切り出し、シャルピー衝撃試験を実施した。溶接金属部では、適切なワイヤ選択およびシールドガス組成の適正化によって、100J 以上の十分な吸収エネルギーを得ることができた。一方、溶融境界部では 47J 以上の十分な吸収エネルギーを得ることができた試験片が半数程度あったものの、比較的低い吸収エネルギーとなったものもいくつかあった。破断面近傍の詳細な観察を行なったところ、比較的フラットで平面状に形成される溶融境界部 (面) がシャルピー衝撃試験片切り欠き方向と一致し、亀裂が溶融境界面に容易に沿って進展してしまうことが明らかになった。開先形状 (角度) の適正化などを行うことで、特性の向上は達成できるものと考えられる。

(4) 以上の結果から、板厚 50mm の極厚鋼板の立向き 1 パス溶接を、12kW のレーザ出力で実現できることがわかった。レーザスポット形状を適正化して揺動照射と組み合わせることで、効率の良い安定した母材溶融が実現できることが明らかになった。当該溶接プロセスを用いることで、大幅な入熱低減が実現でき、より高張力・高靱性な極厚鋼板の適用が実現できるものと考えられる。

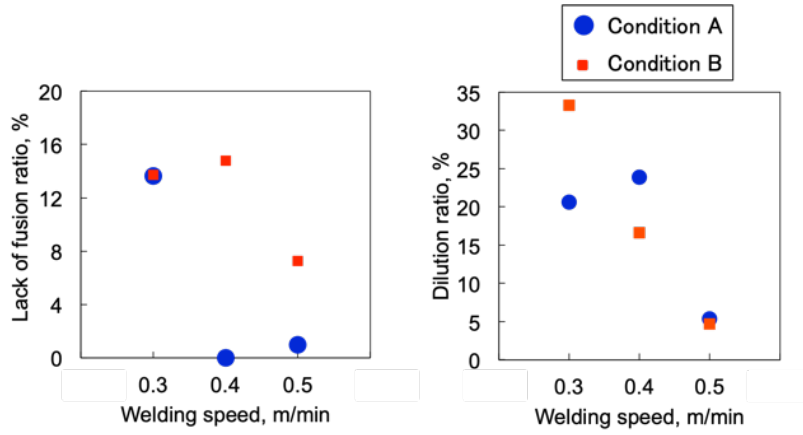


図1 融合不良率と希釈率

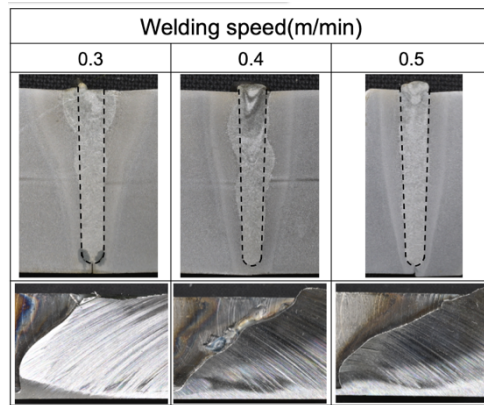


図2 断面観察結果(Condition A)

Stable and weaving laser beams		Double stable laser beams
8x51 mm and 2x56 mm	8x51 mm and 5x56 mm	8x51 mm and 10x48 mm
Lack of fusion, mm		
0	0	8
Dilution Area, mm ²		
114	111	52
HAZ width, mm		
13	15	14
Coarse grain region, mm		
1.47	1.5	1.43

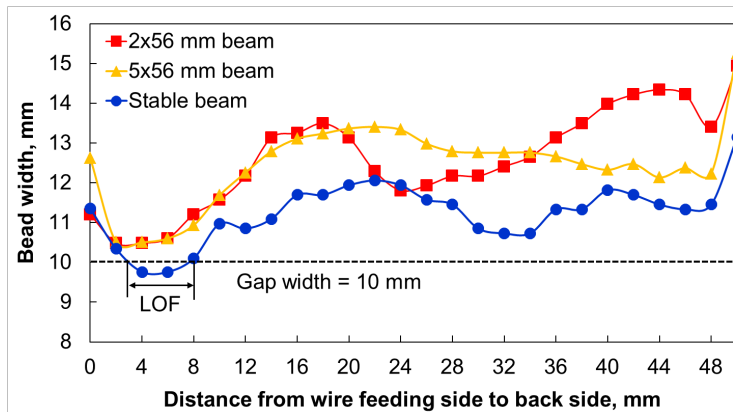


図3 断面観察・溶け込み形状計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 SITTISAK Charunetratsamee, EAKKACHAI Warinsiriruk, SHINOZAKI Kenji, YAMAMOTO Motomichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Optimization of Laser-Irradiating Conditions for Vertical Welding on Thick Steel Plate using Hot-Wire Laser-Welding Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 187 ~ 192
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.37.187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 SITTISAK Charunetratsamee, EAKKACHAI Warinsiriruk, SHINOZAKI Kenji, YAMAMOTO Motomichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Melting by Reflected Laser Beam during Vertical Welding via Hot-Wire Laser Welding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 208 ~ 214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.37.208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sittisak Charunetrasamee, 山本元道
2. 発表標題 ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いて作製した厚鋼板立向き1パス溶接継手の特性
3. 学会等名 溶接学会秋季全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sittisak Charunetrasamee, Motomichi Yamamoto
2. 発表標題 Development of Vertical Welding Process for Heavy-thick Steel Plate using Hot-wire Laser Welding
3. 学会等名 IIWAP2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------