

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01548

研究課題名（和文）ホットワイヤ法を用いたハイブリッド技術による高効率・高品質溶接手法に関する研究

研究課題名（英文）Development of high-efficiency and high-quality using hybrid welding technology by combining 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） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：今後の適用拡大が期待される9%Ni鋼等の高機能材料へホットワイヤ溶接法を適用し、効能率化、低変形化、欠陥防止、継手特性向上などを実現できるプロセスの開発などを行なった。ホットワイヤ法と、アーク熱源およびレーザ熱源と組み合わせ、適正な条件を適用することで、大幅な施工効率向上が実現できた。ホットワイヤ・レーザ溶接法ではその特徴を活かし、9%Ni鋼への1パス立向き溶接プロセス、極低変形すみ肉溶接プロセスなど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

今後の船建造分野における大型化や軽量化による輸送効率向上および燃費向上、あるいは新燃料（LNG、水素、アンモニアなど）の使用による大幅なCO2排出量削減などが検討されており、高性能材料の適用拡大が強く求められている。大型船舶は過酷な環境で稼働するとともに400mに達する大型溶接構造物であるため、高品質化と生産性向上とのこれまでにない高いレベルでの両立が必要不可欠になっている。本研究では、ホットワイヤ法とアークおよびレーザ熱源とを組み合わせた新しい溶接法を開発・適用し、上記課題に対して検討を行い、今後の日本造船業界に資する、これまで以上に効能率かつ高品質な溶接施工技術を実現することができた。

研究成果の概要（英文）：The hot-wire welding method was applied to high-performance materials such as 9%Ni steel, which is expected to expand its application in the future, and a process was developed to achieve higher efficiency, lower deformation, defect prevention and improved joint properties. By combining the hot-wire method with arc and laser heat sources and applying the appropriate conditions, a significant improvement in the efficiency was achieved. By utilising the features of the hot-wire laser welding method, a one-pass vertical welding process for 9%Ni steel and an ultra-low deformation fillet welding process were achieved.

研究分野：溶接・接合工学

キーワード：高性能材料 ホットワイヤ レーザ溶接 大型船舶

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

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および燃費向上、あるいは新燃料（LNG、水素、アンモニアなど）の使用による大幅なCO₂排出量削減などが検討されており、他製造分野と同様に、高張力鋼、極低温用鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金などの高性能材料の適用拡大が強く求められている。大型船舶は過酷な環境で稼働するとともに400mに達する大型溶接構造物であるため、中厚板の適用材料およびその溶接継手には、強度、靱性、アレスト性能、変形能など多くの特性が要求される。また、高品質化と生産性向上とのこれまでにない高いレベルでの両立が必要不可欠になっている。

多電極片側サブマージアーク溶接や2電極片側エレクトロガスアーク溶接などの高能率溶接法が開発・適用されてきたが、必然的に大入熱溶接法となり、溶接継手部（溶接金属、熱影響部）の各種特性確保は困難になりつつある。溶接後の残留変形も大きな問題となっており、溶接施工後の変形修正工程が生産性・品質の低下を招いている。しかしながら大電流アーク溶接は、後述のレーザ溶接に比べて導入・維持コストが格段に安い、施工裕度が大きい、屋外での使用が容易であるなどのメリットがある。

レーザ発振器の高出力化・高品質化に伴い、大型船舶建造分野においても極低入熱化・低変形化を目指して、中板のすみ肉部や突合せ部のレーザ単独溶接あるいはレーザ・アークハイブリッド溶接の適用が一部検討されたが、導入・維持コスト、施工裕度、安全性など課題が多く、実適用はごく一部にとどまっている。

2. 研究の目的

これまでの溶接技術開発において、施工能率の大幅な向上と入熱の大幅な低減、施工裕度確保、溶接部特性制御を同時に実現することは非常に困難であった。当該課題に対して、革新的な入熱制御技術、溶着金属添加技術、溶接金属組成制御技術が必要不可欠である。本研究では、ホットワイヤ法をレーザ熱源、アーク熱源それぞれと組み合わせ、高能率施工と高品質継手、さらに施工裕度の両立を可能にする新しい溶接技術について検討する。また、ホットワイヤ法の持つ高いワイヤ選択自由度の特徴を活かし、これまで実現困難であった溶接金属特性制御と施工能率・施工裕度向上の両立の実現も目指す。さらに、本溶接技術を用いた更なる生産性向上および自動化を目指し、安価で実施工現場への適用が可能なモニタリング技術について検討する。

3. 研究の方法

【ホットワイヤ法+レーザ熱源】

ホットワイヤ法と、レーザスポット形状制御およびエネルギー分布制御が容易な高出力半導体レーザとを組み合わせ、高裕度、高精度入熱制御溶接法による低入熱中厚板溶接技術の開発を検討する。また、今後の建造合理化・省人化を目指した、モニタリング・溶接制御技術の検討も同時に行う。

[対象材料] 高張力鋼、極低温用鋼（Ni鋼）

[対象継手1] 板厚：30mm程度、継手形状：1パス立向き突合せ継手

[対象継手2] 板厚：10mm程度、継手形状：下向きすみ肉継手

【ホットワイヤ法+アーク熱源】

ホットワイヤ法と、導入コストが安価で施工裕度が大きく、安全管理の観点からも適用範囲の広いアーク熱源とを組み合わせ、高能率・低入熱溶接法による中厚板溶接技術の開発を検討する。特に、これまで実現不可能とされてきた、溶接金属特性制御および低入熱化と施工能率向上を同時に実現できる、革新的アーク溶接・プラズマ溶接の開発を行う。本施工技術開発においても、モニタリング・溶接制御技術の検討も同時に行う。なお、既存溶接技術の革新的向上を目指し、以下の板厚・継手を検討対象とする。

[対象材料] 高張力鋼

[対象継手] 板厚：20mm程度および40mm程度、継手形状：下向き突合せ継手

4. 研究成果

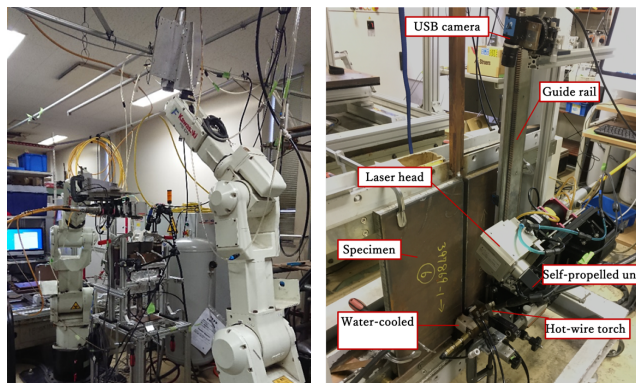
4.1 1パス立向き突合せ継手

母材には板厚27mmの高張力KE47鋼板および板厚26mmの9%Ni鋼を、添加ワイヤにはNi基（φ1.2mm）YGT9Ni-2供試した。溶接現象解明および適正条件導出には小型試験片（幅100mm、高さ200mm）を、実施工を考慮した溶接試験には大型試験片（幅250mm、高さ500mm）を供試した。開先幅は全て10mmとした。

主熱源には定格出力2台の6kW半導体レーザを、ワイヤの抵抗加熱には高出力ホットワイヤ電源を用いた。開先寸法に合わせた大きな矩形ビーム成形およびレーザ光揺動を実現するために、ホモジナイザ光学レンズならびにウィービングヘッドを用いた。シールドにはアルゴンガスを用いた。小型試験片および大型試験片を用いた両試験とも、溶接施行中は開先上部からUSBカ

メラを用いて溶融池形成，ワイヤ送給状況などの溶接現象を観察した。小型試験片および大型試験片での実験の様子を，それぞれFig. 1に示す。

大型試験片を用いた実験では装置の都合上，1台の半導体レーザーのみ使用可能であったため，最大出力 6kW での実験を実施した。4×28.5mmの矩形スポットとなるように光学レンズを組み合わせ，ウィービングヘッドを用いて，開先幅（10mm）方向に揺動させた。6kWのレーザー出力では十分な母材壁面の溶融が得られず，試験片表裏面での開先端部の未溶融が認められた。適用したNi基ワイヤの融点が母材に比べて低く，溶融池の温度を適正に上昇させるにはより高いレーザー出力が必要と考えられる。



(a) 小型試験編 (b) 大型試験片

Fig. 1 実験の様子

小型試験片(KE47鋼)を用いた実験では2台の半導体レーザー(LD1, LD2)を用い，LD1を固定照射(スポット形状8×29mm)，LD2を揺動照射(スポット形状3.4×29mm)として，それぞれのレーザー出力を変化させてその現象を観察した(Fig. 2参照)。固定照射側(LD1)を最大出力の6kWとし，揺動照射側(LD2)を3kWとした場合には未接合部が多く存在し，適切な継手を得ることができなかった。一方，LD2を6kWとしてLD1を3kWとした場合には，板厚方向にほぼ均一な溶込みが実現でき，平均1.4mmの溶込み深さとなった。LD1のレーザー出力の増加に伴って溶込み深さも増加していた。

小型試験片(9%Ni鋼)を用い，2台の半導体レーザー(LD1, LD2)のLD1を固定照射(スポット形状8×29mm)，LD2を揺動照射(スポット形状3.4×29mm)として継手作製を実施した。KE47鋼での結果を参照し，実適用に向けた十分な溶込みを得るために，LD1およびLD2ともに最大出力6kWとして溶接を実施した。Fig. 3に示すように，外観および断面上に欠陥は認められず，十分な溶込みのある適正な継手を得ることができた。

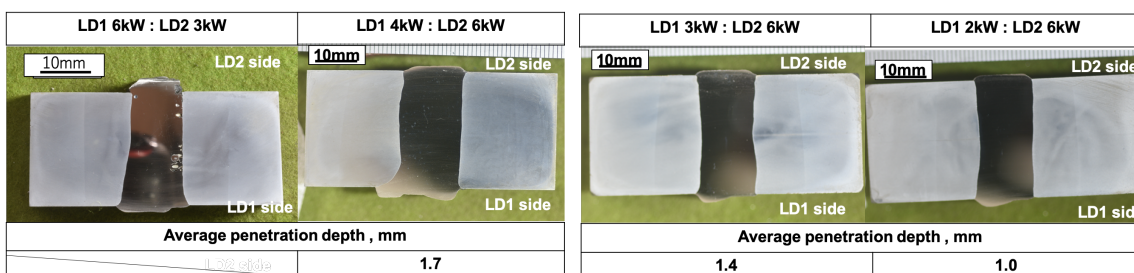


Fig. 2 2台の半導体レーザーによる小型試験片での施工結果(KE47鋼)

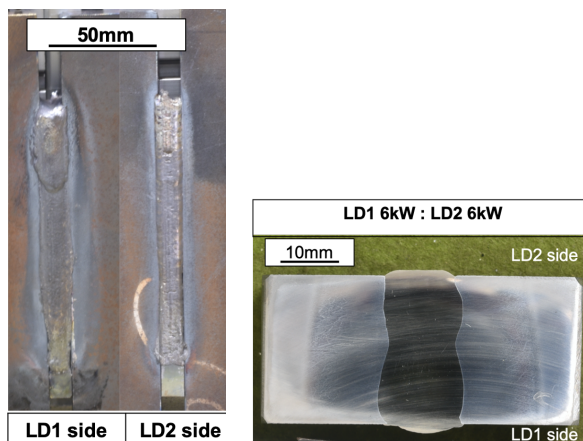


Fig. 3 2台の半導体レーザーによる小型試験片での施工結果(9%Ni鋼)

4. 2 下向きすみ肉継手

母材には板厚 9mm の 9%Ni 鋼を、添加ワイヤには Ni 基 (φ1.2mm) YGT9Ni-2 供試した。溶接現象説明および適正条件導出には小型試験片 (幅 140mm, 長さ 140mm) を、施工安定性確認・変形測定には中型試験片 (幅 250mm, 長さ 600mm) を供試した。目標すみ肉脚長 5~7mm に対してレーザスポット径を 10~15mm と変化させるとともに、溶接速度を 0.5~1.0m/min と変化させた。Fig. 4 にスポット径 12mm での各溶接速度での断面写真を示す。各溶接速度で 3 断面とも安定しており変動が少ないことがわかる。溶込みの小さい良好なビードが得られているものの、一部の断面でルート部の溶込み不足やガス欠陥が認められた。

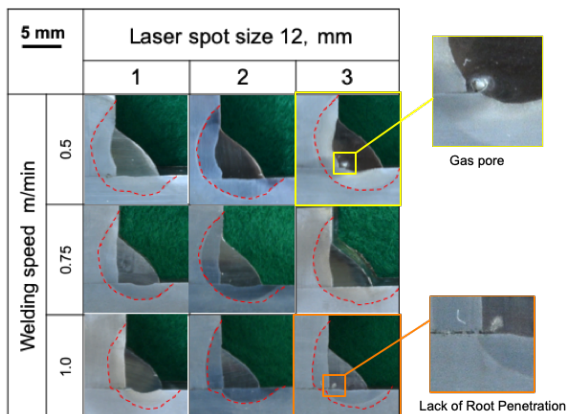


Fig. 4 すみ肉断面 (スポット径 12mm)

そこで、ルート部の確実な溶融を目的に、すみ肉溶接前にレーザ単独での溶接を行う 2 パス施工を検討した。Fig. 5 に示すように、2 パス施行による過剰な母材溶融は認められず、安定したビード形成が実現できている。また、レーザ単独での 1 パス目の施行で、ルート部の溶込み不足は解消され、封止効果によるガス欠陥の防止も実現できている。

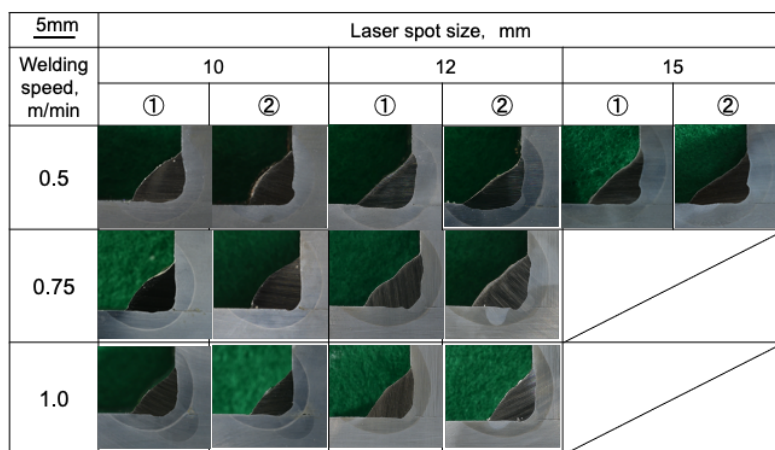


Fig. 5 2 パス施工でのすみ肉断面

Fig. 6 に、2 パス施行後の 3 条件 (スポット径 10mm, 溶接速度 0.5m/min ; スポット径 10mm, 溶接速度 1.0m/min ; スポット径 15mm, 溶接速度 0.5m/min) での角変形計測結果を示す。スポット径が 10mm と同じで溶接速度が異なる場合、溶接速度が速い方が母材の溶込み量が小さくなるため変形量も小さくなっている。溶接速度が 0.5m/min と同じでスポット径が異なる場合、スポット径の小さい、すなわちビード脚長 (溶着金属量) の小さい方が変形も小さくなっている。角変形が最も大きなスポット径 15mm, 溶接速度 0.5m/min の条件でも、ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いることで、母材への溶け込みを最小限に抑えることができ、角変形量も 1°以下と、非常に小さく抑制することができた。角変形量 1°以下であれば、溶接施行後の変形修正工程を削減することができるため、大幅な施行能率向上が実現できる。

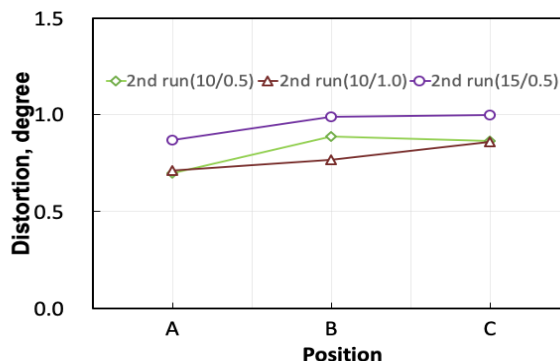


Fig. 6 2 パス施工での角変形計測結果

まとめ

今後の適用拡大が期待される 9%Ni 鋼等の高機能材料へホットワイヤ溶接法を適用し、効能率化、低変形化、欠陥防止、継手特性向上などを実現できるプロセスの開発などを行なった。ホットワイヤ法と、アーク熱源およびレーザ熱源と組み合わせ、適正な条件を適用することで、大幅な施工能率向上が実現できた。ホットワイヤ・レーザ溶接法ではその特徴を活かし、9%Ni 鋼への 1 パス立向き溶接プロセス、極低変形すみ肉溶接プロセスなどを実現することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------