

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760637

研究課題名（和文）ホットワイヤ・レーザ溶接技術による船舶用超高張力鋼板溶接技術の開発

研究課題名（英文） Development of High-tensile Strength Steel Welding Method for Shipbuilding using Hot-wire Laser Welding Technology

研究代表者

山本 元道（YAMAMOTO MOTOMICHI）

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30274111

研究成果の概要（和文）：

大型船舶に使用される高張力鋼板を対象に、新しく開発したホットワイヤ・レーザ溶接法を用いて、大入熱エレクトロガス溶接の代替技術となる極厚鋼板立向き溶接技術の開発を行った。本研究では、リモートレーザシステムとマルチホットワイヤシステムとを組み合わせることで、極低入熱・極低希釈・高能率施工の目処を得ることが出来た。

研究成果の概要（英文）：

The novel technology of vertical welding for a heavy joint as a alternative technology of electro-gas welding by using the new-type hot-wire laser welding method were developed. The prospects of ultra-low heat input, ultra-low dilution ratio, high-efficiency and so on could be obtained by combining remote-laser or high-power diode laser and a hot-wire system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：建造・艤装

## 1. 研究開始当初の背景

大型船舶の建造時には、被覆アーク溶接、半自動 MAG (CO<sub>2</sub>) 溶接、サブマーシアーク溶接、エレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接など、各種溶接法が使用されている。造船分野では、一部の大手重工業メーカーによるレーザ・アークハイブリッド溶接技術に関する研究・開発が行われているものの、造船不況、円高、韓国との熾烈な価格競争、中国などの台頭などによって、常に建造コスト

を最重要課題に置いた技術開発・実用化が行われてきており、造船分野特有の建造工程や既存設備等の問題もあり、近年の新しい溶接・接合技術に対する新たな取り組みがあまり行われていない。今後の中国等の台頭を考えると、船舶の基本性能や船舶建造技術を革新的に進歩させる種々の取り組みが、広範囲にわたって必要不可欠であると考えられる。

溶接・接合技術は大型船舶建造の根幹をなす技術であり、船舶の強度信頼性や性能を大

大きく左右する技術でもある。上に述べたように現在の大型船舶建造分野では、長年使用されている古い溶接技術を駆使して、いかに効率良く、コストを下げながら、品質を保つあるいはあげるにはどうすればよいかと、血のにじむような改善が行われている。反面、造船分野に適した、これまでにない新しい溶接・接合技術の開発・実用化の検討はあまり行われていない。造船分野に適した革新的な新しい溶接・接合技術が開発・実用化できれば、現在の大型船舶建造時の問題点を解決できるだけでなく、新しい溶接・接合技術を最大限に活かした新しい建造工程の採用や、新しい溶接・接合技術特有の性能を活かした高性能船舶の建造の可能性が検討できるようになる。

特に、本研究で取り組む高張力・超高張力鋼板の大型船舶への適用拡大は、早急な対応が必要不可欠な造船業界での CO<sub>2</sub> 削減問題に直結する非常に重要な課題の一つである。大型船舶の分野では、要求される継手強度・靱性レベルが高く、また建造現場の環境問題から、高張力・超高張力鋼板の採用が極一部にとどまっている。最も大きな課題が、高張力・超高張力鋼板の溶接技術の開発である。

これまでの研究成果から、造船分野において上記高張力・超高張力鋼板の適用を可能にする溶接技術の革新的な進歩を成し遂げるには、まず入熱・材料の溶融現象をきめ細かくコントロールすることの出来る技術の確立が必要不可欠である。優れた特長を有する新しく開発された高張力・超高張力鋼板を適用するためには、いかに溶接継手部の強度・靱性を確保するかが最終的な課題となる。溶接時の入熱・母材材料の溶融をこれまで以上にきめ細かく制御することが出来れば、上記溶接継手部の強度・信頼性が大きく向上するだけでなく、新しく開発された材料の優れた特長を十分に活かした設計が可能になる。また造船分野では、厚板鋼材の現場突き合せ溶接や補強材の隅肉溶接など、中厚板材料の高エネルギーで各種継手形状や溶接環境にフレキシブルに対応できる現場溶接技術の開発・実用化が必要である。特に高張力・超高張力鋼板の使用による効果が大きく、革新的な溶接技術が望まれている厚板鋼板のドック内縦向き溶接技術の開発を行う。

図1および図2に、提案する溶接法による極厚鋼板立向き溶接継手の特徴、および提案する溶接法の特徴を示す。

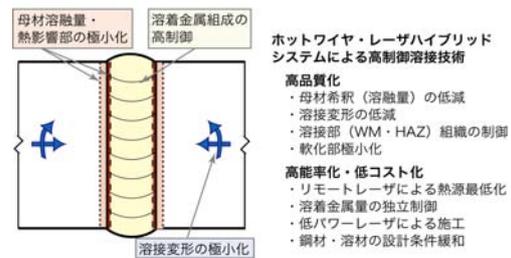


図1 提案溶接法による溶接継手部の特徴

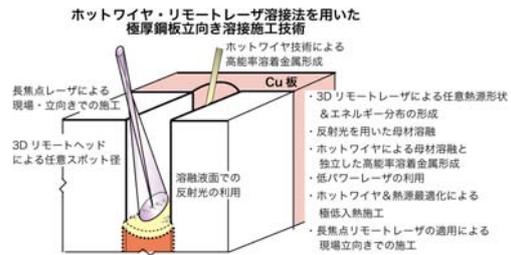


図2 提案する溶接法の特徴

## 2. 研究の目的

本研究では上記の点に注力し、大型船舶建造を想定した新しい溶接技術の開発・実用化を目指す。すなわち、以下の点について検討する。

- (1) 反射光を利用した低出力レーザーによる高能率溶接現象の解明
- (2) 超精密入熱制御ホットワイヤ・レーザハイブリッド溶接技術の開発
- (3) 厚板鋼材の高能率かつ現場適用可能なマルチホットワイヤ・レーザ溶接技術の開発

本研究では、近年その進歩が顕著なレーザーを主熱源として考える。特に上記項目(3)を考慮して、メンテナンスフリーで現場適用が比較的容易なファイバーレーザーあるいはLDレーザーを用いる。また、これまで困難とされてきたレーザー溶接への溶加材(フィラーワイヤー)の直接挿入をホットワイヤ技術によって検討し、最終的にホットワイヤのマルチ化を目指す。本研究の特徴は、上記項目

(1)に示したこれまでに無い全く新しい溶融現象を利用した溶接技術の開発を行うとともに、最終的に、造船建造現場への適用を考慮した、低出力レーザーの利用やマルチワイヤの挿入を行うレーザー溶接技術の開発を行うことにある。具体的な検討項目を以下に示す。

- (a) マルチホットワイヤ・レーザ溶接時の反射光による溶融現象の把握と解析
- (b) マルチホットワイヤ・レーザ溶接技術の開発
- (c) 超低入熱・精密制御溶接による溶接継手の特性調査と予測技術の確立

### 3. 研究の方法

本研究で提案する溶接技術は、これまでに無い反射光を利用した極低入熱・高能率溶接技術である。まず当該溶接・溶融現象を、高速度カメラや放射温度計などの新しい機器を用いて詳細に観察・解明する。さらに、これまでの研究成果などを最大限に活用して、提案する溶接技術の確立を目指す。研究協力者の篠崎賢二教授は溶接冶金の専門家であり、申請者が得意とする強度・プロセス分野に制限されることなく、これまでに無い革新的な溶接継手部の特性評価を行うことが出来る。また、レーザ機器、ホットワイヤ機器などの高価な溶接設備に関しては、研究室所有の既存機器にとどまらず、研究協力企業の力を借りて効率的に行う。以下に、具体的な研究方法を示す。

#### (1) ホットワイヤ・ファイバーレーザおよびマルチホットワイヤ・レーザ溶接時の溶接・溶融現象の把握

- ・高速度カメラを用いたホットワイヤおよび母材の溶融現象の詳細な把握
- ・非接触高精度放射温度計を用いたホットワイヤおよび母材の温度履歴の把握
- ・反射光による母材およびワイヤ溶融現象の解明

これまで詳細な把握が非常に困難であったレーザ溶接時の溶接・溶融現象を、高速度カメラおよび非接触式温度計を用いて詳細に把握する。特に、反射光による母材溶融現象およびレーザ照射中での通電加熱されたホットワイヤの溶融現象を詳細に把握する。

#### (2) 低入熱ホットワイヤ・ファイバーレーザ溶接部の各種特性評価

- ・ビード形状、欠陥形成特性、材質特性の把握
- ・各種強度の把握

溶接部の詳細な観察および引張試験等により、各種溶接条件下での低入熱ホットワイヤ・レーザ溶接でのビード形状、欠陥形成特性、溶接部材質特性、溶接部強度特性などを定量的に把握する。

#### (3) ホットワイヤ・ファイバーレーザ溶接のための基本施工条件の提案

- ・各種要求性能を満足しつつ低入熱・高能率を実現できる溶接・溶融現象の実現と条件の提案
- ・当該溶接法のシミュレーション技術の基礎検討

上記項目 (1) (2) の結果から、最終目標である超低入熱・高能率溶接法の実現に向けた検討を行う。また、ホットワイヤとレーザとを組み合わせた新しい溶接・溶融現象を精度良くシミュレーションできる手法の基礎検

討を始める。

### 4. 研究成果

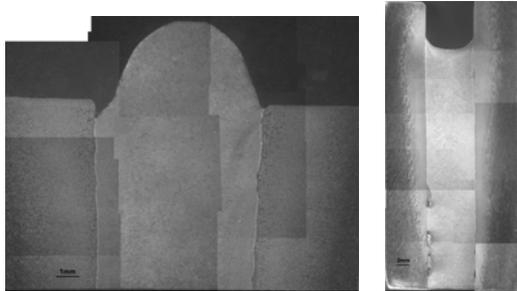
供試材料母材として、板厚 25mm の軟鋼板 (SS400) と板厚 60mm の高張力鋼板 (EH40 相当) を用いた。添加ワイヤには、直径 1.4mm の軟鋼ワイヤ (YGW11) および直径 1.2mm の高張力ワイヤ (YGT60) を使用した。板厚 25mm の軟鋼板の場合 50mm x 50mm の大きさに加工した試験片を、板厚 60mm の高張力鋼板の場合 50mm x 50mm あるいは 100mm x 100mm の大きさに加工した試験片を供試した。溶接面は、試験片製作時の機械加工のままとし、溶接前にアセトンで脱脂した。

YAG レーザ発振器は、トルンプ社製ディスクレーザ TruDisk4002 (定格出力 4kW) を使用した。この発振器は、発振源に固体レーザ媒質 Yb-YAG を用いており、レーザ波長は 1030nm である。リモートレーザスキャナヘッドには、トルンプ社製 2 次元加工ヘッド PF020 および 3 次元加工ヘッド PF03D を使用した。それぞれ、プログラミングによって、200mm x 200mm 程度の 2 次元高速加工が可能であり、PF03D では Z 軸方向にも 100mm 程度の移動が可能である。ジャストフォーカスにおけるスポット径は、約 0.4mm である。半導体レーザ発振器は、Laserline 社製 LDF6000-40 (定格出力 6kW) を使用した。この発振器のレーザ波長は、910nm, 940nm, 980nm, 1030nm の 4 波長混合であり、ジャストフォーカスにおけるスポット径は約 2mm である。ホットワイヤ電源には、バブコック日立製 PowerAssist IV-662 を用いた。

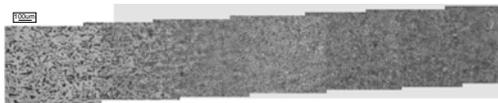
図 3 に、試験片断面 (水平断面、垂直断面) の観察結果お一例を示す。各断面を見ると、母材希釈が非常に少ないことが分かる。溶融液面での反射レーザ光を用いた当該プロセスの有効性が確認できた。水平断面を見ると、試験片開先中央部から開先端部まで均一に溶着金属が形成されており、また母材希釈も非常に少ない状態で安定して接合できている。リモートスキャナヘッドを用いた仮想光学系の有効性、およびホットワイヤシステムによる高能率な添加ワイヤ供給が確認できた。縦断面を見ると、開先底部に融合不良が多数確認されるが、溶接が進むにつれて母材希釈が非常に少ない状態で安定した接合が実現できている。このように、ホットワイヤシステムとリモートスキャナヘッドを用いたレーザ溶接システムとを組み合わせることで、反射レーザ光を活用した革新的溶接プロセス実現の目処を得ることができた。

図 4 に、試験片溶融境界部から母材のミクロ組織観察結果を示す。母材部はフェライトパーライト組織を呈しており、溶接部に近づくにつれて、一般的な溶接部と同様に、球状パーライト部、微細組織部、混粒組織部、粗

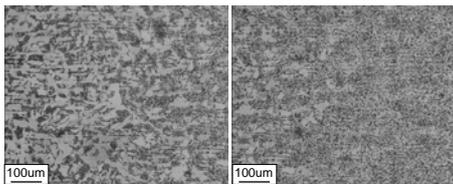
粒部，溶接金属部となっている．また，マクロ観察では確認できなかったが，非常に少ない母材希釈でも十分に接合していることが分かる．



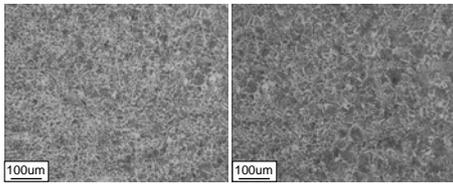
(a) 水平断面 (b) 垂直断面  
 図3 試験片水平・垂直マクロ断面  
 (t: 25mm, No.31)



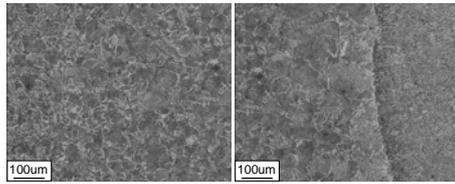
(a) ミクロ組織全体



(b) HAZ 母材側 1 (c) HAZ 母材側 2



(d) HAZ 中央部 1 (e) HAZ 中央部 2



(d) HAZ 溶接部側 (e) 溶融境界部

図4 ミクロ組織  
 (t: 25mm, No.31)

ボンド部（粗粒部）の結晶粒径を測定したところ，約 100 $\mu$ m であった．ミクロ組織から分かるように，粗粒部の幅は非常に狭く，2～3 結晶粒程度の幅のみ粗粒化しており，その粗粒化した結晶粒サイズも非常に小さいことが分かった．このように，レーザ反射光を活用した当該溶接プロセスを用いると，母材への入熱が大幅に低減され，粗粒幅および

粗粒部内結晶粒寸法を大幅に抑制できる可能性を得ることができた．

図5に，ビッカース硬さ分布計測結果を示す．溶接部金属では 140～150HV，ボンド部では 180～190HV 程度の硬さを示していた．また，熱影響部幅は 3～4mm 程度であった．硬さ分布計測結果からも，非常に低い入熱，低希釈，狭い熱影響部を実現できていることが分かった．

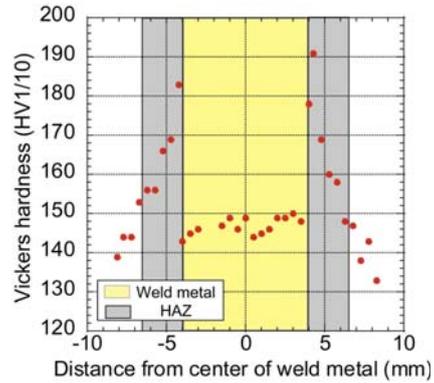


図5 ビッカース硬さ計測結果

図6に，板厚 60mm の高張力鋼板を供試して，3次元加工ヘッドを用いた溶接試験後の試験片断面マクロ組織を示す．板厚 60mm の高張力鋼板を供試しての実験では，適切な溶接条件を導出することができなかった．溶着金属は十分に供給されているものの，母材との界面において酸化物が確認され，適切に融合されていないことが分かる．開先両サイドに設置したホットワイヤトーチの上部にシールド用の Ar ガス供給パイプを設置して多量の Ar ガスを供給したが，治具銅板の隙間から空気を巻き込み，シールド環境が非常に悪くなったと考えられる．一方，板厚 60mm の溶接に際しても，マルチホットワイヤシステムを用いて適切なワイヤ供給条件を選定することで，安定した溶着金属を形成することができている．

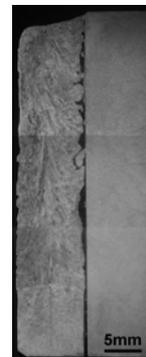


図6 極厚鋼板垂直マクロ断面  
 (t: 60mm)

本研究では、大型船舶建造時の極厚高靱性高張力鋼板立向き高能率溶接施工に対応するべく、ホットワイヤシステムとリモートスキナヘッドを用いた革新的なレーザ溶接法の検討を行った。以下に得られた成果の概要を示す。

(1)ホットワイヤシステムを用いて適切なワイヤ加熱・送給条件を選定することで、極厚鋼板高能率施工に十分対応できる溶着金属形成実現の目処を得た。本ホットワイヤシステムでは、ワイヤ寸法、形状、種類によらず、母材材質あるいは要求継手性能に対応した添加ワイヤの選択が可能になる。

(2)2次元あるいは3次元リモートスキナヘッドを用いることで、これまでのレーザ溶接では不可能であった開先裕度を実現できる目処を得た。本技術を用いることで、溶接施工中の開先幅変動などにも対応できると考えられる。

(3)ホットワイヤシステムとリモートスキナヘッドを用いたレーザ溶接プロセスでは、反射レーザ光を活用することで、母材希釈の非常に少ない、極低入熱の溶接継手を実現できることが明らかになった。ボンド部の結晶粒寸法および熱影響部幅は、他の溶接法に比べて非常に小さくできる可能性が大きいことが分かった。

(4)ホットワイヤシステムとリモートスキナヘッドを用いたレーザ溶接プロセスでは、母材希釈が非常に少なく、任意の添加ワイヤを選択できるため、要求される特性に適切に対応できる高品質な溶接継手を作製できる可能性が示唆された。

先に述べたように、本研究で提案するレーザ光の制御方法は世界初である。「リモートレーザヘッドを用いた仮想光学系」によって「任意形状・エネルギー分布」を有する熱源を高精度に創り出す本アイデアと、ホットワイヤ技術とを組み合わせることで、今後、多くの新溶接技術を提案・開発する予定である。また、比較的大きなレーザ光を用いた反射光による溶接技術も研究者等独自のアイデアであり、本技術に半導体レーザを組み合わせた溶接技術も世界初である。本研究内で、当該アイデアを活用した高能率・高品質すみ肉溶接技術も開発している。

一般的にレーザ溶接では、大出力レーザ発振器を用いて、出来るだけ小さなレーザスポット径によって、高速・1パスのキーホール溶接を指向しており、発振器の導入コスト、施工裕度などに大きな課題を抱え、その解決の目処は得られていない。提案する溶接技術は、比較的大きなレーザ光による反射光を用いたこれまでに無いレーザ溶接技術であり、半導体レーザも使用可能となるなど、上述の問題点を大きく改善できる可能性がある。本

溶接技術は、レーザ溶接の既成概念を大きく変える独自性を有している。また、提案する新しい溶接法は、エレクトロガス溶接の代替としての極厚鋼板立向き溶接技術のみならず、これまでの溶接技術では成しえなかった、高能率（高溶着量、高溶接速度）および高品質（低変形、低希釈、止端部形状など）化を、種々の継手、部位において実現できるものと考えられる。また、これまでのレーザ溶接で最大の課題であった、大出力レーザ発振器導入のための高コスト、非常に小さな施工裕度を大きく改善することが出来る。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

1. Kota Kadoi, Kenji Shinozaki, Motomichi Yamamoto, Katsura Owaki, Koutarou Inose and Daisuke Takayanagi, Development of High-efficiency / High-quality Hot-wire Laser Fillet Welding Process, 溶接学会論文集, 29-3, 査読有, 2011, pp62-65

〔学会発表〕（計4件）

1. Motomichi Yamamoto, Kenji Shinozaki, Kota Kadoi, Katsura Oowaki, Koutarou Inose, and Akira Room Fujinaga, Development of High-Efficiency / High-Quality Fillet Welding Process Using Hot-Wire Laser Welding Method, The 25th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, 26-29 Sep. 2011, Incheon, KOREA

2. 門井 浩太, 篠崎 賢二, 山本 元道, 宝蔵雄一, 井上 寛康, 大脇 桂, 猪瀬 幸太郎, ホットワイヤ・レーザ溶接法による極低変形すみ肉溶接技術の開発, 2011年9月7-9日, 溶接学会平成23年度秋季全国大会, 三重県

3. Motomichi Yamamoto, Kenji Shinozaki, Kota Kadoi, Katsura Oowaki, Koutarou Inose, Development of High-efficiency / High-quality Fillet Welding Process using Hot-wire Laser Welding Method, 64th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding, 17-22 Jul. 2011, Chennai, India

4. Motomichi Yamamoto, Kenji Shinozaki, Kota Kadoi, Katsura Oowaki, Koutarou Inose, Development of High-efficiency / High-quality Fillet Welding Process using Hot-wire Laser Welding Method, The First East Asia Symposium on Technology of Welding & Joining, 31 May - 2 Jun. 2011, Shanghai, China

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：ホットワイヤレーザ溶接法と装置  
発明者：篠崎賢二，山本元道，門井浩太，金  
沢辰徳，永島利治  
権利者：パブ日立工業  
種類：特許  
番号：特願 2011-074315  
出願年月日：2011 年 3 月 30 日  
国内外の別：国内

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 元道 (YAMAMOTO  
MOTOMICHI)

広島大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：30274111

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：