

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04214

研究課題名(和文) レーザビーム制御による造船用厚鋼板溶接技術に関する研究

研究課題名(英文) Welding Technology using Laser Beam Controlling on Thick Steel Plate for Shipbuilding

研究代表者

山本 元道 (Yamamoto, Motomichi)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30274111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザスポット形状制御が容易な半導体レーザによるビーム形状制御およびウィーピングヘッドを用いた開先内高速ウィーピングによる高裕度・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鋼板溶接技術の開発を検討した。
開先をガスカットしたままの板厚約28mmの厚鋼板を、低入熱で1パス溶接可能な溶接プロセスおよび適正条件の導出を実現した。作製した継手は、溶融境界部で一部問題はあるものの、十分な強度・靱性を有することも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, the hot-wire laser welding method with low heat input for a thick-steel plate by combination with the high-tolerance and high-precision heat input control by beam shaping using diode laser which is easy to control laser spot shape and high speed weaving, and hot-wire system having low heat input / high efficiency properties was investigated.
The welding process which could be applied for a single-pass welding with a low heat input on a thick steel plate with a 28 mm thickness with a gas-cutted groove was developed. And It was clarified that the joint which produced using the developed welding process had sufficient strength and toughness, although there are some problems at the fusion boundary.

研究分野：溶接・接合

キーワード：低入熱溶接 レーザ溶接 ホットワイヤ 造船 厚鋼板 強度・靱性

1. 研究開始当初の背景

現在また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。例えば、近年実施された YP47 高張力鋼板の適用に関する研究においても、溶接金属部および熱影響部 (HAZ) の靱性確保が最重要課題の一つであった。これまでは、日本の製鐵および溶材メーカー等の先端技術を駆使して溶接部靱性を確保してきたが、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。

一方、レーザ発信器の高出力化・高品質化に伴い、特に薄板溶接の分野でレーザ溶接の適用が広がっている。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、レーザ光をレンズによって極力絞ってキーホールを発生させ、1パス深溶込みで幅の狭い溶接部を形成する。したがって、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 (一般的に 1mm 以下)、開先加工精度や施工精度などの制約から、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

申請者等の研究室では、以前より、レーザ溶接およびホットワイヤシステムを用いた革新的溶接技術の開発を行ってきた。本研究では、これまで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制御が容易な半導体レーザによるビーム形状制御およびウィーピングヘッドを用いた開先内高速ウィーピングによる高裕度・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鋼板溶接技術の開発を検討する。また、レーザ熱源を使用した際に問題となる溶接施工モニタリング技術の開発も同時に行う。革新性の詳細は次項で述べるが、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ている。

(1) 従来アーク溶接に比べて大幅な入熱低減 (1/2 以下)

- (2) 従来アーク溶接に比べて同等以上の施工能率
- (3) 従来アーク溶接に比べて大幅な母材溶融量 (希釈) 低減
- (4) 従来アーク溶接と同等の開先加工裕度や施工裕度

本研究で提案する溶接法および溶接継手は、以下の新規性を有している。

- ✓ 「任意の形状・エネルギー分布」を有する比較的大きなレーザ熱源として半導体レーザを用い、レーザビーム形状制御とホットワイヤ法とを組み合わせた溶接技術は世界初である。
- ✓ 提案する溶接法は、「反射レーザ光」を活用した全く新しいレーザ溶接技術であり、大型船舶をはじめとする大型構造物建造時に問題となる当該課題の多くを一挙に解決でき、後述の画期的な溶接継手を実現することが可能になる。
- ✓ ホットワイヤ技術は、主熱源 (レーザなど) と独立した溶着量制御、ワイヤ寸法・形状・組成に制約のない加熱などの特徴を有している。特に、レーザ熱源と組み合わせることによって、その特徴を十分に活かすことができ、「反射レーザ光」を活用することによって、極低入熱、極低希釈、低変形を実現することが可能になる。
- ✓ 提案するホットワイヤ・レーザ溶接法は、「ホットワイヤ技術」、「半導体レーザによるビーム形状制御」、「反射レーザ光」を組み合わせた全く新しい溶接技術である。現状のアーク溶接と同等以上の施工能率を確保しつつ、極低入熱化、母材希釈低減、レーザ出力低減などが実現できる。その結果、溶接金属の高品質化、熱影響部 (HAZ) 組織の改善、軟化域の極小化、低変形化などが実現できる。
- ✓ 提案するホットワイヤ・レーザ溶接法は、アーク溶接の代替としてだけでなく、その特徴から、他の溶接継手部へも幅広く適用することが可能と考えられる。本研究で検討する「半導体レーザによるビーム形状制御」が確立できれば、任意形状・エネルギー分布の熱源を設定することが可能になるため、より高裕度に、種々の溶接継手への適用が期待できる。
- ✓ 本研究で提案・検討する「マルチセンサーカメラを用いたレーザ溶接現象モニタリング技術」は、溶接現象の解明、適正溶接条件の導出、溶接施工モニタリングなどに必要不可欠な、「温度」、「可視化画像」を同時に、2次元で高速に非接触で取得することができる、画期的な技術である。当該モニタリング技術が確立できれば、他の溶接法も含めた溶接現象の解明、実施工時の品質管理などに大きく貢献すると考えられる。

3. 研究の方法

母材には、高張力鋼 YP47 の中で E 級グレードである KE47 鋼を用い、添加ワイヤには、直径 1.6mm の YM-60A (JIS Z3312 G59JA1UM3M1T), YM-80A (JIS Z 3312 G78A4UMN5C1M3T) を用いた。YM-60A は、590MPa 級高張力鋼に用いられる MAG 用ソリッドワイヤである。YM-80A は、780MPa 級高張力鋼に用いられる MAG 用ソリッドワイヤである。

小型試験片は、板厚 28mm, 幅 100mm, 高さ 200mm, 開先幅 10mm とし、開先面はフライス加工した。現象観察のため、一部検討で、板厚 28mm, 幅 100mm, 高さ 60mm, 開先幅 10mm の試験片を用いた。大型試験片は板厚 28.5mm, 幅 250mm, 高さ 500mm, 開先幅 10mm とし、超大型試験片は板厚 28.5mm, 幅 500mm, 高さ 1000mm, 開先幅 10mm とし、開先面はガスカットとした。高さ 1000mm 以外の試験片では I 形開先を用い、高さ 1000mm の試験片では I 形開先および V 形開先を用いた。

半導体レーザー発振器には、LDF6000-40 (Laserline 社製, 定格出力 6kW) を用いた。半導体レーザーでは、集光レンズおよびホモジナイザを変更することで、任意のスポット寸法、形状を得ることが可能である。ファイバーレーザー発振器には、YLR-3000S (IPG 社製, 定格出力 3kW) を用いた。溶接時には焦点を外して、開先幅と同じ寸法の 10mm にぼかしてレーザーを照射した。大きな矩形ビームを開先幅に合わせてウィーピングするために、新たにウィーピングヘッド (Laserx 製) を開発・製作した。ウィーピングの最大周波数は 15Hz であり、波形制御ソフトにより任意の波形でのウィーピングを行うことが可能である。ワイヤの加熱には、ワイヤ加熱用電源を用いて、一般のコンタクトチップより給電を行った。添加ワイヤをパルス通電 (100Hz) により加熱した。また、制御用コントローラを用いて、ワイヤ電流およびワイヤ送給速度を設定できる。ホットワイヤの極性は添加ワイヤをプラス極、母材をマイナス極とした。また 2 ワイヤの場合は両ワイヤの極性を逆転させている。

小型試験片用治具を用いたツインレーザーでの実験では、半導体レーザーおよびファイバーレーザーを併用している。片側から半導体レーザーによる矩形レーザーをウィーピング照射し、もう一方の側からファイバーレーザーによる丸型スポットを開先の板厚方向端部に照射した。ワイヤは、半導体レーザー側から 1 ワイヤで送給し、上方より高速度ビデオカメラによる撮影を行った。小型試験片用治具を用いた半導体レーザーのみによる実験では、片側から半導体レーザーによる矩形レーザーをウィーピング照射し、もう一方の側からワイヤを 1 ワイヤ、もしくは 2 ワイヤで送給し、上方より高速度ビデオカメラ

ラによる撮影を行った。大型試験片継手の実験では、熱源に半導体レーザーのみを使用している。水冷銅製治具からシールドガスを供給し、反対側には非水冷の裏当て銅板を設置した。現状の簡易エレクトロガスアーク溶接方と同様に、実際の施工を考慮して、片側に裏当て材として銅板を設置し、もう一方の側にウィーピングヘッドを接続した半導体レーザーヘッド、ワイヤトーチ等、全ての治具を配置した。溶接装置一式を保持した治具が一体となってガイドレールを自走する、現行の簡易エレクトロガスアーク溶接と同様なシステムとした。

4. 研究成果

4.1 レーザビーム制御

本項目では、6kW 半導体レーザーに加えて、3kW ファイバーレーザーを照射し、総出力 9kW と上昇させ溶接をおこなった。ファイバーレーザーは、最も融合不良が発生しやすい開先端部に照射することで局所的な入熱付加を行い、総出力を上昇させずに融合不良の抑制が可能か検討した。溶接速度は 2, 3, 4m/h と変化させて実験を行った。試験片高さ方向中央部 100mm の位置での水平断面写真と融合不良率、希釈率、ビード幅、熱影響部幅を図 1 に示す。図 1 から明らかなように、融合不良が発生しやすい開先端部に局所的にレーザーを照射して当該部のエネルギー密度を上昇させることにより、融合不良発生を効果的に防止できることが明らかとなった。融合不良は開先両端部で発生しやすいため、レーザーパワーを均一に上昇させるのではなく、当該部のエネルギー密度のみを上昇させることで、より効果的に融合不良を抑制できることが明らかになった。

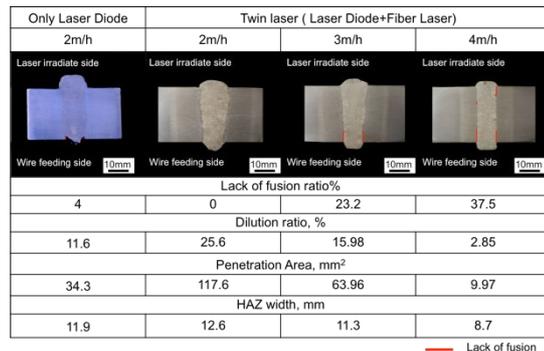


図 1 ツインレーザーでの断面観察結果

開先両端部のエネルギー密度が高くなるように設計したホモジナイザを使用して実験を実施した図 2 に、両端部のエネルギー密度が高い矩形ビームを適用して 6kW 半導体レーザーのみを用いて作製した継手、および 3kW ファイバーレーザーと 6kW 半導体レーザーを用いたツインレーザーで作製した継手、均一なエネルギー密度の矩形ビームを適用して 6kW 半導体レーザーのみを用いて作製した継

手の外観写真を示す。図2から明らかなように、レーザの出力をあまり上昇させることなく、欠陥を生じやすい開先両端部のエネルギー密度を局所的に上昇させることができる光学レンズを用いることで、効果的に融合不良を抑制できることが明らかになった。さらに、本手法を用いることで入熱抑制による継手特性向上、溶接システム導入コストの抑制が可能になることが明らかとなった。

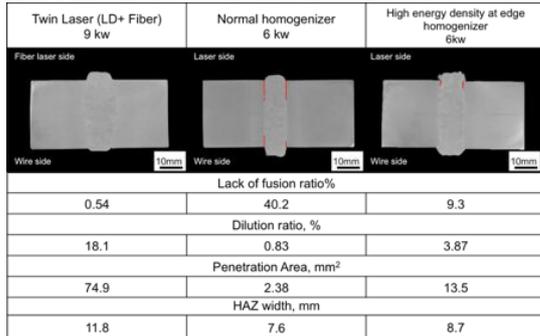


図2 両端高エネルギー矩形レーザでの断面観察結果

4.2 シールドガス・ワイヤ選択

溶接金属中の酸素量を増加させ、溶接金属の組織および機械的特性を向上させることを目的に、Ar ガスに酸素を混合したシールドガスを用いて継手の作製を行った。シールドガス中の酸素の割合を、0% (Ar-100%)、5% (Ar-95%)、10% (Ar-90%)、20% (Ar-80%) と変化させた4種類のシールドガス条件で継手を作製し、ビード外観および溶け込みに与える影響を調査した。図3に、ツインレーザを用い、シールドガスを変化させて作製した継手の外観写真、溶接金属中の酸素・窒素量の分析結果を示す。図3から明らかなように、シールドガスに酸素を混合し、その混合割合を増加させることで、溶接金属中の酸素量を60ppm程度まで上昇させることが明らかになった。また、母材に与える入熱量を上昇させることなく、融合不良を大きく減少させることがわかった。シールドガスを適切に選択することで、溶接金属の組織および機械的特性向上のみならず、より低いレーザ出力での溶接や、溶接速度の上昇が可能となり、低入熱溶接あるいは導入コストの低減が実現できると考えられる。

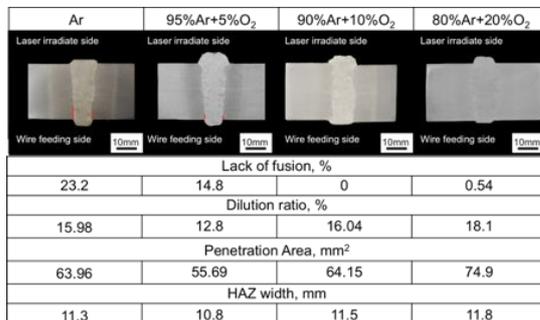


図3 O₂混合シールドガスでの断面観察結果

添加ワイヤに YM-60A および YM-80A を使用し、添加ワイヤの種類が溶接金属の組織

および特性に与える影響を調査し、適性ワイヤの検討を行った。図4に、YM-60A および YM-80A それぞれを用いて作製した継手の、ビッカース硬さ計測結果およびシャルピー衝撃試験結果を示す。添加ワイヤに YM-60A を用いた条件では、ほぼイブンマッチの継手となっており、YM-80A を用いた条件ではややオーバーマッチの継手となっている。YM-60A でのシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーの平均値は 36.4 J であり、各試験片の値は大きくバラついており、YM-80A に比べて低くなっている。これは YM-80A に比べて生成される組織が大きく、大きさがバラついていいるためであると考えられる。

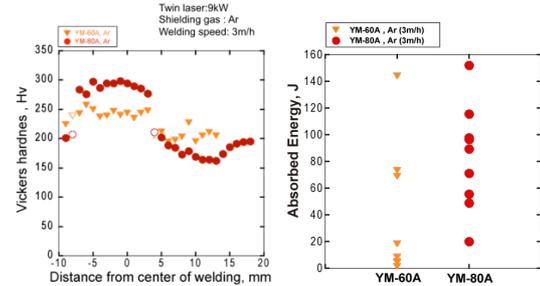


図4 ワイヤ選択での硬さ試験・シャルピー衝撃試験結果

図5に、シールドガス変化させた場合のビッカース硬さ分布およびシャルピー衝撃試験結果を示す。図5から明らかなように、溶接金属部の硬さに大きな差がないことが確認できる。酸素を混合させたシールド条件では、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが上昇している。MAG 用ワイヤに適したシールドガスを使用することで、組織が適正化されたためと考えられる。

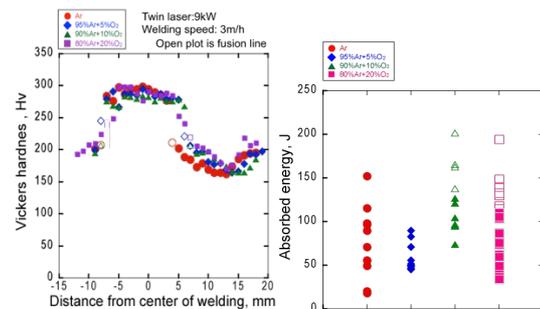


図5 シールドガス選択での硬さ試験・シャルピー衝撃試験結果

4.3 大型試験片での検討

試験片寸法 28.5 t × 250 w × 500 h および 28.5 t × 500 w × 1000 h の2種類を供試して溶接実験を行い、作製した継手の諸特性を調査した。なお、開先は現場施工を考慮して、ガスカットとした。図6に、同板厚、同サイズの試験片を用いて、簡易エレクトロガスアーク溶接法を用いて作製した継手および本溶接法で作製した継手の断面写真、融合不良率、溶け込み面積、HAZ 幅を示す。本溶接法ではわずかに融合不良が存在するものの、良好な継手が作製可能であることが明らかとなった。エレクトロガスアーク溶接と比較す

ると、希釈率は約 3 分の 1 に、溶け込み面積は約 8 分の 1 に抑えられており、母材溶融を大幅に抑制できることがわかった。熱影響部幅は、エレクトロガスアーク溶接と比較すると溶接速度が遅いにもかかわらず、約 4 分の 3 に抑えられていることが確認できた。

図 7 に、添加ワイヤそれぞれのシャルピー衝撃試験結果をノッチ位置ごとに示す。溶接金属部 (WM) の値は、ばらつきはあるものの比較的高い値を示しており、YM-80A の方がばらつきが小さく高い平均値を示している。溶融境界 (FL) の値は、両ワイヤでの結果とも非常に小さく、溶融境界から離れるに従って (FL+1, FL+2) 上昇している。本溶接法は、エレクトロガスアーク溶接に比べ入熱量が小さく、熱影響部の組織も小さいものの、溶融境界 (FL) に沿って比較的粗大な粒界フェライト生成しているためであると考えられる。

図 8 に、引張試験後の試験片写真を示す。YM-60A の試験片では溶接金属部分が大きく伸び、YM-80A の試験片では母材部分が大きく伸びたことが確認できる。また両試験片共に母材破断している。ピッカース硬さ試験の結果から、YM-60A ではイープンマッチとなっていたために溶接金属部の変形が大きくなり、YM-80A ではオーバーマッチとなっていたために溶接金属部の変形が小さくなったと考えられる。試験片は共に母材破断しており、十分な引張強度が得られることが明らかとなった。

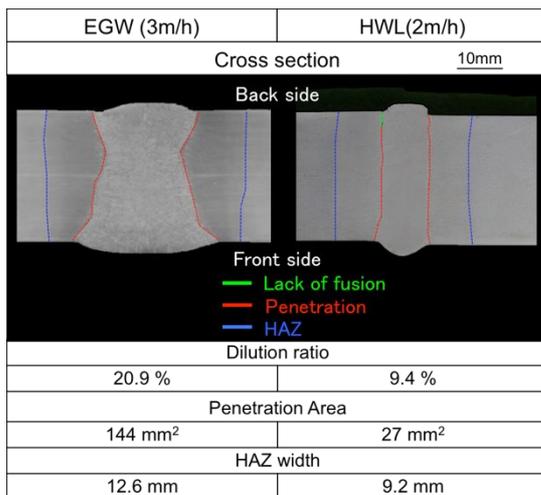


図 6 大型試験片での断面観察結果

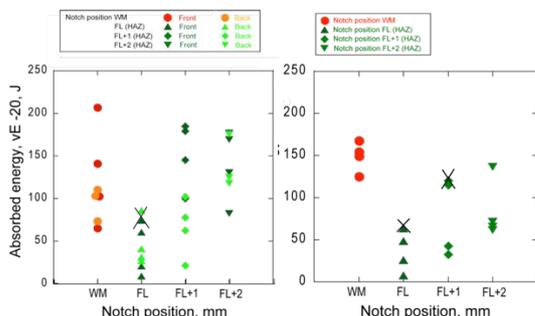


図 7 大型試験片でのシャルピー衝撃試験結果

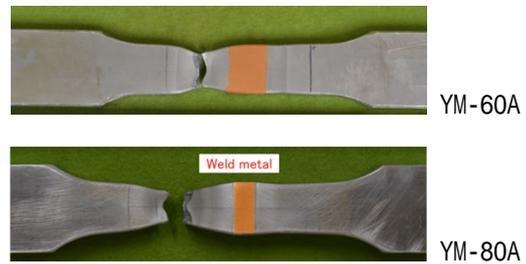


図 8 大型試験片での引張試験結果

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 4 件)

(1) D. Wang, K. Kadoi, K. Shinozaki, M. Yamamoto : Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility for Austenitic Stainless Steel during Laser Trans-Varestraint Test Using Two-dimensional Temperature Measurement, ISIJ International, 査読有, 56-11, 2016, 2022-2028.

<https://www.isijint.net/jp>

(2) 山本元道, 篠崎賢二, 矢島浩, 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接技術の開発, 溶接学会誌, 査読無, 85-3, 2016, 282-286. <http://www.jweld.jp>

(3) 山本元道, 山下正太郎 : マルチセンサーカメラを用いた溶接中その場観察・温度計測手法の開発, 溶接技術, 査読無, 64-9, 2016, 104-105.

<http://www-it.jwes.or.jp/technology/>

(4) E. Warinsiriruk, K. Hashida, M. Yamamoto, K. Shinozaki, H. Yajima, 他 : Oblique laser irradiation technique for vertical welding of thick steel plates employing hot-wire laser welding, 溶接学会論文集, 査読有, 33-4, 2015, 326-331.

<http://www.jweld.jp>

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) 山本元道, 他 : アルミニウム合金レーザ溶接中のその場温度計測, H29 年度溶接学会秋季全国大会, 2017.

(2) 山本元道, 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接条件の適正化, H29 年度溶接学会秋季全国大会, 2017.

(3) 山本元道, 他 : ホットワイヤ・レーザ法による各種溶接・接合技術, LMP シンポジウム 2017, 2017.

(4) M. Yamamoto, 他 : Monitoring of Penetration Shape during Hot-wire

Laser Narrow-gap Welding ,
Visual-JW2016 , 2016.

(5) M. Yamamoto , 他 : Development of Vertical Welding Technology for Thick Steel Plate using Hot-wire Laser Welding Method , Trends in Welding Research , 2016.

(6) 山本元道 , 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接技術の大型試験片継手への検討 , H28 年度溶接学会秋季全国大会 , 2016.

(7) 山本元道 , 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接技術の開発 , 第 82 回溶接学会高エネルギービーム加工研究委員会 , 2016.

(8) 山本元道 , 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接技術の開発 , 第 85 回レーザ加工学会講演会 , 2016.

(9) 山本元道 , 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法による高強度・高靱性溶接継手の実現 , 日本溶接協会鉄鋼部会 H28 年度総会 , 2016.

(10) 山本元道 , 他 : ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた厚鋼板立向き溶接時のレーザ照射条件の検討 , H28 年度溶接学会春季全国大会 , 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔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・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 30274111

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

篠崎 賢二 (SHINOZAKI Kenji)
矢島 浩 (YAJIMA Hiroshi)
金沢 辰徳 (KANAZAWA Tatsunori)
臼井 寛之 (USUI Hiroyuki)