

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02372

研究課題名（和文）レーザ加工技術の援用による溶接継手の卓越的疲労寿命向上技術の開発

研究課題名（英文）Development of a method for significantly improving the fatigue life of welded joints by the laser processing

研究代表者

後藤 浩二（Gotoh, Koji）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60274487

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：船舶・海洋構造物、橋梁、高層建築鉄骨構造等の大型溶接構造物の耐疲労性能を向上させることを目的に、建造直後から経年変化を考慮しつつ、複数の対処法を建造段階で一括導入する手法として、（1）レーザ局部照射により母材結晶粒を微細化することで亀裂伝播を抑制、（2）疲労亀裂発生領域に浸炭処理を施すことで硬化させ、疲労亀裂発生を抑制、（3）溶接継手製法としてレーザ・アークハイブリッド溶接を採用することで溶接変形に起因する二次応力を抑制、を達成するための施工条件を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶接構造物の高サイクル疲労強度への主な影響因子は亀裂発生領域近傍の応力集中であるが、溶接により構造体を製作する以上これを回避することは難しい。本研究は建造本来の道具として導入する大出力レーザを、溶接止端部近傍の硬化や結晶粒微細化という疲労寿命改善効果が期待される複数の対策に活用することを考えた結果、応力集中場の生成が避けられなくとも大幅な寿命改善を達成した点が学術的かつ社会的に高い意義を有している。また、本研究で基礎知見を得た手法を用いれば、社会インフラである大型溶接構造物の寿命を大きく改善できるため、これに要する費用の削減が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Topics (1) to (3) that could be introduced during the construction stage to improve the fatigue performance of large welded structures such as ships, offshore structures, bridges and steel structures of high-rise buildings were studied.

(1) Suppression of crack propagation by localised laser irradiation to refine the base metal grains; (2) Suppression of fatigue crack initiation by hardening the crack initiation surface area by carburization; and (3) Expansion of the range of application (welding position) of laser-arc hybrid welding that can achieve secondary stress suppression due to weld deformation.

研究分野：溶接構造物の疲労及び破壊強度評価、溶接及び熱切断技術を中心とする大型溶接構造物の建造技術

キーワード：疲労 特殊加工 溶接 構造・材料 維持管理工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋構造物、橋梁、高層建築鉄骨構造等の大型溶接構造物では、構造的応力集中部に存在する溶接継手止端部等の局部的応力集中箇所から疲労損傷が発生・成長する。この主因として、溶接継手の疲労強度改善に母材性能の改善が寄与しないことが挙げられる。

現在広く認識されている金属材料の強度と靱性を同時に改善する手法は、結晶粒微細化のみである。素材の結晶粒微細化手法は種々提案されているが、溶接継手では溶接入熱に起因する材質変化影響で、疲労破壊起点である溶接止端部近傍で結晶粒微細化の効果が消失するため、溶接継手製作後に適用可能な溶接部近傍の結晶粒微細化手法の開発が期待される。溶接継手の構造強度健全性担保の観点に立てば、建造コストの観点も考慮しての溶接止端部の応力集中緩和(すなわち、溶接止端半径の緩和)対策の確立も重要である。

船舶等の大型溶接構造物における疲労損傷は、溶接止端部である自由表面で発生して板厚方向に成長、板厚貫通後に板幅方向に成長する段階を経るのが一般的であるため、疲労亀裂発生が懸念される自由表面部を局所的に強化できれば、構造物の耐疲労性能を改善できる。金属材料の局所的表面強化法一つとして「レーザ焼入れ」技術が知られているが、被強化材の炭素含有量に強化の程度が大きく依存することから、大型構造物の材料として主に用いられる低炭素鋼及びその溶接部に対する表面強化法の研究開発も期待されている。

大型溶接構造物の建造で多用されるアーク溶接法では溶接変形の発生が避けられず、この結果、設計段階で想定外の二次応力が誘起され、耐疲労性能が大きく低下する場合がある。そのため、従来のアーク溶接以上に溶接変形を低減できる溶接法を構造物建造に採用することも、耐疲労特性の改善に寄与する。

以上に述べた現状を分析した結果、建造段階で稼働初期から長期の供用期間までに対応する疲労強度改善効果を、建造段階で一括して付与する建造法の開発が必要である、との問題認識を得るに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は「建造コスト増加を抑えつつ、メンテナンスフリーで大幅に優れた耐疲労性能を有する大型溶接構造物の建造手法構築」である。

従来の疲労性能改善に関する研究はピーニング等の単独の二次加工処理によるため、長期供用後の効果について十分に考慮されていない。本研究では、建造直後から経年変化を考慮しつつ、複数の対処法を建造段階で一括導入する手法を検討した。具体的には、(1)レーザ局部照射により母材結晶粒を微細化することで亀裂伝播を抑制、(2)疲労亀裂発生領域に浸炭処理を施すことで硬化させ、疲労亀裂発生を抑制、(3)溶接継手製作方法としてレーザ・アークハイブリッド溶接を採用することで溶接変形に起因する二次応力を抑制、を達成するための施工条件を検討した。これらは製造現場に大出力レーザが導入されることを前提とするため、個々に独立した処理ではなく、建造現場で順次施工され、継手完成時にはすべての効果が付与された耐疲労性能が極めて優れた継手を製造できると期待される。また、疲労亀裂発生領域近傍の板表面に浸炭処理を施すことで、腐食衰耗の抑制にもつながり、結果として板厚減少に起因する作用応力上昇への対策になると期待される。加えて、(1)(2)の処理による副次的効果として溶接止端部を局所的に再溶融させる結果により得られる応力集中の低減も、溶接継手の疲労寿命改善に寄与すると期待される。

3. 研究の方法

本研究の実施項目を以下(1),(2)に示す。

- (1) 溶接継手へのレーザ照射による結晶粒微細化処理及び局所レーザ焼入れに関連する検討。
 - 局所浸炭処理の施工条件検討。
 - 結晶粒微細化位置(板厚方向)とレーザ照射条件の関係の定量化。
 - 疲労試験による耐疲労性能評価。
- (2) 溶接変形を大幅に低減できるレーザ・アークハイブリッド溶接施工条件の拡張として、溶接姿勢について水平及び立向きで施工可能な条件の探索。

4. 研究成果

(1) 局所浸炭条件に関する検討

船体用圧延鋼板 KD36 鋼(機械的性質は一般構造用圧延鋼板 SS400 鋼相当、板厚 17 mm)を供試材とした。なお、表面に塗布されているプライマ成分の溶融による硬さへの影響が懸念されたため、予めハンドグライダを用いてプライマを除去した。工数削減の観点から、プライマ除去を不要とすることは将来課題であると認識している。

Table 1 Laser irradiation conditions.

Laser power [kW]	1.18
Defocusing distance [mm]	-5
Travel speed [mm/min]	120
LPA: Laser push angle [deg.]	10

浸炭に供した黒煙粉末(平均粒径 32~42 μm 、不純物含有率 0.1%未満)は、これと少量の水を混ぜてペースト状としたものを、厚さが 0.2 mm となるように塗布し、レーザ照射条件で浸炭させた。レーザ照射条件は予備検討の結果から Table 1 に示す条件とした。その後、浸炭部の断面

マクロ観察及びビッカース硬さの測定を実施した。なお、黒煙粉末の調達先を多岐に求めることを想定し、黒煙粉末に加えて、あらかじめ細かく砕いた木炭を目開き 700 μm のふるいにかけて一定粒径以下の粉末(木炭粉末と称す)としたものも使用した。硬さ試験の結果を Fig. 1 に示すが、硬さ分布の様子に若干の差が見られるものの両方の浸炭処理部の硬さは前述の JIS G 0557 に規定される限界硬さ(550HV)を概ね超えていることから、木炭と黒鉛の使用差による硬度への影響は小さいと推察される。

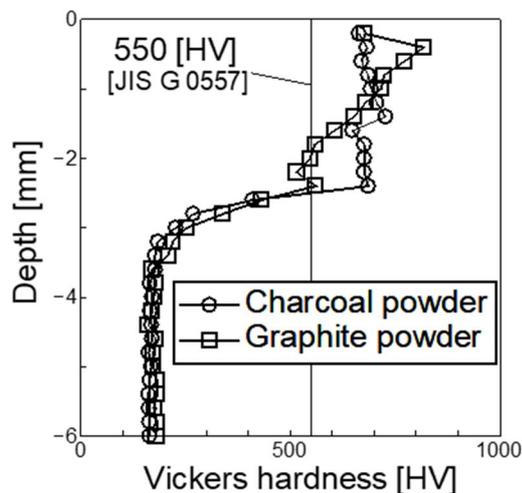
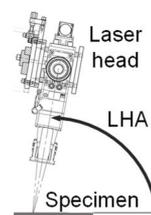


Fig. 1 Comparison of Vickers hardness distributions.

次に溶接止端部に対するレーザー照射浸炭の施工性を検証した。KD36 鋼と機械的性質がほぼ等しい一般構造用圧延鋼材 SS400 鋼(板厚 16 mm)を母材とし、これに炭酸ガスアーク溶接によるビードオンプレート溶接で試験用の溶接ビードを表面に付加した。平板に対するレーザー照射と異なり、溶接止端部に対する最適なレーザー照射角度の検討が必要であるため、試験体を 100 mm ずつ 5 区間に分け、Table 2 に示すレーザー照射条件を設定した。表中に示す第 3 区間は炭素塗布を行わないレーザー単独照射であり、表中に記載がない照射条件は Table 1 に示す条件と同じである。溶接方向左右の溶接止端部において、黒鉛ペーストの乾燥時間を 5 分および 10 分に分けてレーザー照射を実施した。

Table 2 Irradiation conditions.

Section	L.P.*1	LHA*2
1	1.15	90
2	1.52	90
3	1.52	90
4	1.52	45
5	1.15	45



*1 L.P.: Laser power [kW]

*2 LHA: Laser head angle

with horizontal [deg.]

施工外観を Fig. 3 に、それぞれの区間の照射開始位置から 40 mm 地点で試験体を切断し、断面のマクロ観察を実施した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 中の黄色矢印先端に気孔欠陥を確認した。溶接ビードに対し向かって左側が黒鉛ペーストを 5 分間乾燥させた照射部、右側が 10 分間乾燥させた照射部である。Fig. 4 (D) に示す第 4 区間(黒鉛ペーストを 10 分間乾燥させた照射部)以外の全ての浸炭部において気孔欠陥を確認した。Fig. 4 (C) に示す第 3 区間のレーザー単独照射部において気孔欠陥が確認されないことから、気孔欠陥の発生原因として、塗布した黒鉛成分または水分が影響していると考えられる。



Fig. 3 Photograph of bead appearance.



(A) Section 1.

(B) Section 2.

(C) Section 3.

(D) Section 4.

(E) Section 5.

Fig. 4 Photographs of sectional macroscopic observation.

気孔欠陥の発生原因に関する考察を追加実験も行い検討した結果、鋼種に応じてレーザー照射浸炭による気孔欠陥の発生状況は異なり、鋼材の特性として気孔欠陥の発生傾向があるのは SS400 鋼のみであること、レーザー照射浸炭で発生する気孔欠陥の原因は、照射部に存在する酸素成分と塗布した炭素成分のガス化反応により発生した気体が急速な凝固により溶融部内に残存したことであり、酸素成分を溶融部から排出する手法として、脱酸材である Si 粉末を黒鉛粉末の 2 倍の質量で混合した塗布材を使用することが効果的であり、硬さを損なわず気孔欠陥の発生をほぼ抑制できる、ただし Si 成分の添加は、表面のスラグ生成も招くため、施工性を損なわないために添加量の詳細な検討が必要であること、などを確認した。

(2) 結晶粒微細化条件に関する検討

沓名らや西尾らによる先行研究より、結晶粒微細化する手法としてレーザー照射を活用する方法が報告されているものの、レーザー出力、走査速度ならびにデフォーカス距離(レーザー焦点距離を基準とした移動量)等のレーザー照射条件に関して詳細には検討されていない。また、西尾らの

方法は表層部の結晶粒微細化を目的しているため鋼材を溶融させないことが要求されているが、本研究では経年劣化後も微細化領域が存在することを目指しているため、板表面から数 mm 程度内部に微細化領域を生成することを目指した。そして、微細化領域発現位置やその厚さを照射前に予測する手法の確立を目的に、レーザ照射条件や温度履歴の観点から検討した。

結晶粒微細化層を制御するには、その温度履歴の条件範囲（最高到達温度、冷却速度）を求める必要があるが、これを簡潔に行うために瞬間線熱源または移動点熱源による温度場の理論解を適用することを志向し、移動点熱源および瞬間線熱源が付与さえるときの温度場に関する理論解の適用性を調査した。Table 3 に示すレーザ照射条件にて Fig. 5 に示す 5 点の温度履歴を測定し、理論解と比較した。結果の一部を Fig. 6 に示す。

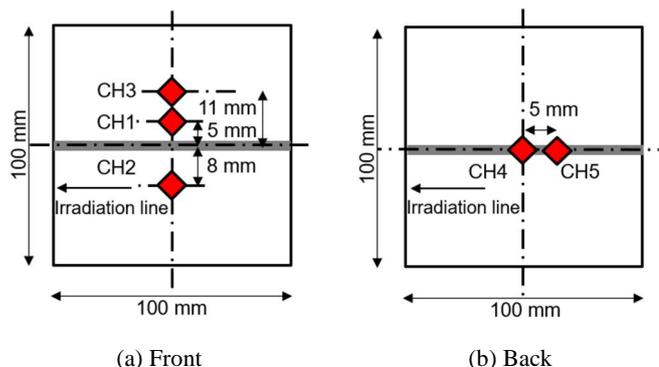
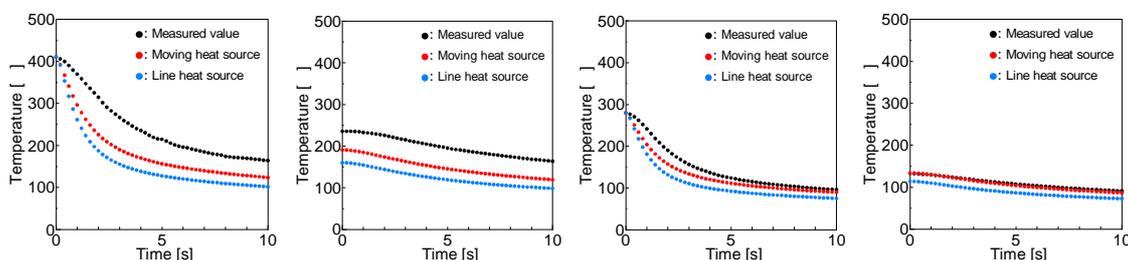


Fig. 5 Temperature history measuring points.

Table 3 Laser irradiation conditions.

Specimen ID	A	B
Laser power [kW]	3.0	
Travel speed [mm/min]	500	
Defocus distance (D.D) [mm]	+5	+25
Plate thickness [mm]	12	
Steel grade	KA	



(a) Front CH1(D.D +5 mm) (b) Back CH5(D.D +5 mm) (c) Front CH1(D.D +25 mm) (d) Back CH4(D.D +25 mm)

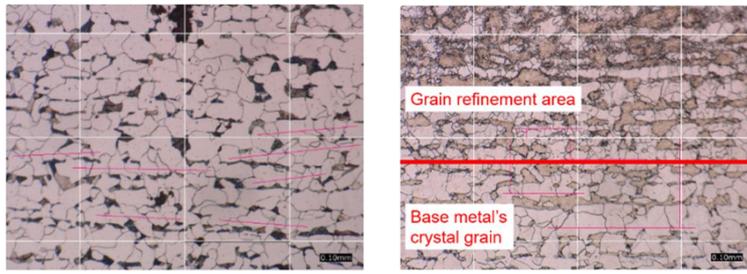
Fig. 6 Comparison of measured temperature history with theoretical solution.

Fig. 6 より、デフォーカス距離 (D.D) +25 mm で移動点熱源の理論解を採用した場合に、実測値と温度履歴がおおよそ一致することを確認した。また、断面マクロ観察と数値解析の比較により溶融領域形状について比較検討を行い、実測値と理論解の温度分布に相違が生じる理由は、溶融領域形状の差異が原因であること、および瞬間線熱源の条件を施工条件が満たしていないことに起因することを確認した。

溶接冶金学分野の知見である、最高到達温度ならびに 800 から 500 までの冷却時間 ($\Delta t_{8/5}$) が溶接熱影響部の最高硬さの支配パラメータとなることおよび、最高硬さと結晶粒径の相関を考慮すると、微細化層の出現位置に $\Delta t_{8/5}$ が何らかの関りを有することが期待される。そこで、デフォーカス距離+25 mm 時の試験体のレーザ照射線直下における結晶粒微細化層の深さ位置を計測した後、移動点熱源による理論解により同位置の温度履歴を解析した。なお、試験体表面を原点とし、母材の平均結晶粒径よりも小さな結晶粒径が確認される層を結晶粒微細化層と定義した。

母材組織写真を Fig. 7(a)、結晶粒微細化層を含む組織写真を Fig. 7(b) に示す。レーザ走査線直下の最深部において、結晶粒微細化層は試験体表面から 2.18 ~ 2.35 mm に位置した。また、移動点熱源による理論解での温度履歴の解析結果を Fig. 8 に示す。溶融領域に最も近い結晶粒微細化層の最高到達温度は 930 で、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.384 秒であった。また、溶融領域から最も遠い結晶粒微細化層の最高到達温度は 839 で、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.424 秒であった。以上の結果より、結晶粒微細化層が発生する条件は最高到達温度が 839 から 930、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.384 秒から 0.424 秒の間に収まる必要があると考えられる。一般的な軟鋼の A3 点は 900 前後であり、この熱サイクルは冶金学的な観点から妥当と言える。

以上の結果、レーザ照射により出現する結晶粒微細化層の発現位置を移動点熱源による温度場の理論式とこれから得られるパラメータ $\Delta t_{8/5}$ の値に基づき予測が可能であることを確認した。



(a) Base metal (b) Grain refinement area
 Fig. 7 Comparison of sectional macroscopic observation

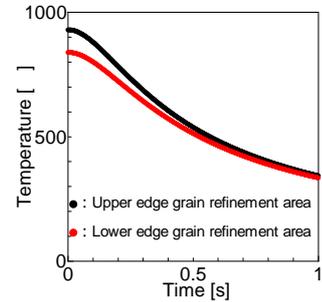


Fig. 8 Temperature histories of grain refinement area saluted by theoretical formula of moving point heat source.

(3) 耐疲労性能評価

上記(1)(2)に関する知見に基づき、アーク溶接で製作したすみ肉溶接継手に対し、浸炭処理及びレーザー照射(結晶粒微細化)処理を施し、三点曲げ試験片を取り出して疲労試験を実施した。レーザー照射条件を Table 4 に示す。

Table 4 Laser irradiation conditions.

ID	C	LI 01	LI 02	LI 03
Laser power [kW]	1.5	3	1.5	3
Defocusing distance [mm]	-5	25	-5	25
Travel speed [mm/min]	120	500	120	1000

[Note] C: Carburizing, LI: Laser Irradiation

比較対象のため、溶接ままの試験片も採取して疲労試験を実施した。結果を Fig.9 に示す。

Fig. 9 からわかるように、溶接ままの継手と比較して止端処理を施した継手では破断までの繰返し数が1オダ以上改善した。止端処理方法が寿命改善に及ぼす影響については、作用応力範囲が小さいと浸炭処理の効果が大きいと読み取れる。作用応力範囲が小さい段階では疲労亀裂発生領域を浸炭により硬化させたため、亀裂が発生しにくい状態となったことが主因であると考えられる。また、溶接まま継手と比較するとレーザー照射により応力集中が緩和したことも寿命改善に寄与しており、研究開始時に予想した傾向を呈していた。一方、本試験では亀裂伝播履歴中の伝播速度変化を測定できなかったため、レーザー照射により継手内部に生成した結晶粒微細化領域で亀裂成長が一時的に遅くなる効果を定量的に検証することが出来なかった。これについては試験片形状を変更するなどの対策を講じ、今後検討を進めたい。

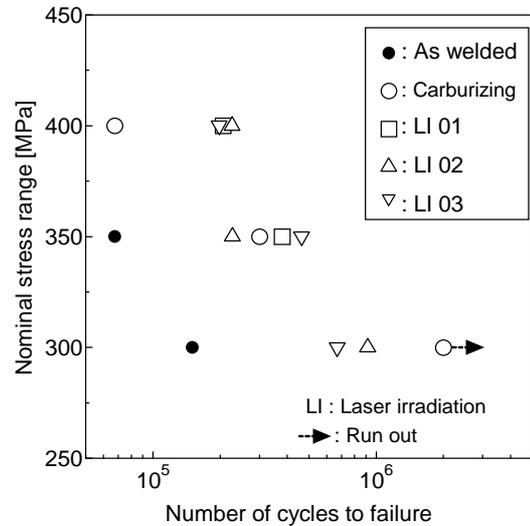


Fig. 9 S-N curves.

(4) レーザ・アークハイブリッド溶接施工条件(水平及び立向き溶接姿勢)に関する検討

耐疲労性能に優れるレーザー・アークハイブリッド溶接の適用可能な継手(溶接姿勢)の拡張を目的に、横向水平および立向上進ハイブリッド溶接による突合せ継手製作に関する溶接施工条件検討ならびにガイドラインに準じた溶接施工法承認試験級の継手製作を試みた。得られた知見を以下に示す。

板厚 12 mm の横向水平突合せ継手について、デフォーカス距離、アークおよびレーザー Torch 間距離、対水平レーザーヘッド角度の施工裕度について検討し、適正条件を確認した。施工長 1,000 mm の横向水平突合せ継手は板厚 16 mm まで施工可能であることを確認した。立向上進突合せ継手について、裏当て材の使用により溶融池垂下現象を生じないような安定したビードを取得可能であるが、鋼板を貫通したレーザーが裏当て材を溶融させることで、裏当て材成分の一部を溶融池内に巻き込み、継手の靱性を低下させる危険性を有することを確認した。

裏当て材を適用せずに立向上進突合せ継手の製作を試みる場合、モールド効果を十分に発揮するスラグ量を得るため溶融池の希釈率について留意し、スラグ量とスラグ層に保持される溶融金属の平衡を保つ施工条件を検討または選定する必要があることを確認した。本研究で同定した施工条件により製作された突合せ継手は、日本海事協会によるレーザー・アークハイブリッド溶接ガイドラインが定める各要求値を満足することを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 田門 岳大, 後藤 浩二, 森園 靖浩	4. 巻 34
2. 論文標題 溶接継手の疲労強度改善のためのレーザー照射による局部浸炭処理に関する基礎検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 467-472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 寺辻 和陸, 内村 友哉, 松田 和貴, 後藤 浩二	4. 巻 19
2. 論文標題 疲労強度改善のためのレーザー照射による結晶粒微細化に関する基礎検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 溶接学会九州支部講演論文集	6. 最初と最後の頁 37-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Takehiro Tamon and Koji Gotoh	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study on Working Conditions for Improving Fatigue Strength of Welded Joints by Localized Carburizing Treatment Using Laser Irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 34th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2020/21)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takehiro Tamon and Koji Gotoh
2. 発表標題 A Study on Working Conditions for Improving Fatigue Strength of Welded Joints by Localized Carburizing Treatment Using Laser Irradiation
3. 学会等名 34th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2020/21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田門 岳大, 後藤 浩二, 森園 靖浩
2. 発表標題 溶接継手の疲労強度改善のためのレーザー照射による局部浸炭処理に関する基礎検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 令和4年春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺辻 和陸, 内村 友哉, 松田 和貴, 後藤 浩二
2. 発表標題 疲労強度改善のためのレーザー照射による結晶粒微細化に関する基礎検討
3. 学会等名 溶接学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

論文の機関リポトリジ公開URL http://hdl.handle.net/2324/4793671 http://hdl.handle.net/2324/4822550

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
研究協力者	村上 幸治 (Murakami Koji)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	丹羽 敏男 (Niwa Toshio)		
研究協力者	福井 努 (Fukui Tsutomu)		
研究協力者	森影 康 (Morikage Yasushi)		
研究協力者	成松 久雄 (Narimatsu Hisao)		

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