

令和元年6月21日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04605

研究課題名(和文) 完全自動化線状加熱システムの開発

研究課題名(英文) Development of full-automatic line heating system

研究代表者

柴原 正和 (Shibahara, Masakazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20350754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では線状加熱の自動化をめざし、固有ひずみ法を用いた線状加熱方案自動決定システムを開発した。モンテカルロ法による線状加熱方案自動作成システムを用いることで、基本形状である椀型、鞍型、ねじれ型について目的形状に良好に一致する形状が得られた。本システムにより作成された加熱方案を用いて熱弾塑性解析を実施した結果、目的形状と良好に一致することが分かった。実船の船首部にある大曲率を持った形状の作成を行った結果、目的形状の傾向を良好に再現する形状が得られた。また、AIによる線状加熱方案自動作成システムを用いることで、基本形状について目的形状に良好に一致する形状が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

任意形状外板が完全自動で作成可能な線状加熱システムを開発することを目的として本研究を実施した。本システムの開発により、従来では、造船現場において熟練技能者のノウハウに基づき行われていた作業の自動化につながることから、今後、あらゆる産業分野で求められる完全自動化生産につながるものといえる。また、線状加熱による変形量が固有変形量という形でデータベースに蓄積され、それを基に、開発システムが、加熱位置や熱源出力を自動的に決定するため、造船分野における板曲げ技術伝承問題の解決に大きく前進する。

研究成果の概要(英文)：In this research, a line heating planning system based on the inherent strain method was developed. By using the system based on the Monte Carlo simulation, the fundamental shape of bowl shape, saddle shape and twisted shape were formed. According to the obtained heating plan, a thermal elastic plastic FE analysis was performed. As a result, it was found that the deformed shape also agrees with the target shape. The system was also applied to the generation of the shape of a bow of real ship which has a large curvature. The targeted shape was also reproduced in the real complex shape. In addition, another system based on Artificial Intelligence (AI) was also proposed. By using AI based system, it was found that fundamental shapes can be formed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：線状加熱 船体構造 有限要素法 モンテカルロ法 人工知能 固有ひずみ法 熱弾塑性解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船舶の船首、船尾部における複雑な曲面形状は、複数の鋼板に対して曲げ加工を行い、それらを溶接で接合することにより製作される。その多くが椀型、鞍型、擦れ型等の非可展曲面であり、平らな鋼板を非可展曲面に加工するためには曲げと同時に絞り(縮めること)が必要となるため、ぎょう鉄の手法として線状加熱が広く用いられている。線状加熱によるぎょう鉄は表面をガスバーナーで加熱した際に発生する熱変形を利用するものであり、現在国内の多くの造船所で採用されている技術である。その変形は縦収縮・横収縮、縦曲がり・横曲がりが混在する複雑なものであり、入熱量や速度、加熱位置等にも依存するため、予測が困難である。また、この造船固有の技能である線状加熱によるぎょう鉄は技能者の知識と経験の基に成り立っているのが現状であるが、習得するのに10年以上を要すると言われており、近年のベテラン層の減少に伴ってその技能伝承が問題となっている。よって、作業者の技能や経験に頼らず加熱法案の決定プロセス、および施工手順を含む線状加熱の自動化が急務である。

2. 研究の目的

本研究では、任意形状外板が完全自動で作成可能な線状加熱システムを開発することを目的とする。本システムの開発により、熟練技能者のノウハウに基づく作業が大幅に削減され、さらには作業時間が1/10程度に大幅に短縮される。また、線状加熱による変形量が固有変形量という形でデータベースに蓄積され、それを基に、開発システムが、加熱位置や熱源出力を自動的に決定するため、造船分野における板曲げ技術伝承問題の解決に大きく前進する。

3. 研究の方法

本研究では、完全自動で任意形状が作成可能な線状加熱シミュレータを開発する。さらに、複数のTIGトーチを用いた新しい全自動線状加熱装置を開発する。

平成28年度:

本申請研究の基盤技術となる加熱条件算出システム、固有ひずみデータベース、および、加熱方案および修正加熱方案作成システムを開発し、これらを統合することで任意形状が作成可能な線状加熱シミュレータを開発する。さらに、目的形状(設計曲面)と本システム適用後の曲面形状(線状加熱後曲面)との不足変形量を測定するための、デジタルカメラを用いた画像相関法による高精度三次元形状検証システムを別途開発する。

平成29年度:

TIGトーチ1電極を対象とし、基礎形状の完全自動での作成を試みる。設計曲面と線状加熱後曲面との間に差が生じた場合には、修正加熱を行う。なお、作成する曲面形状に、残留応力が大きく影響することが予想されるが、事前に残留応力下での線状加熱シミュレーションを実施しておくことにより、その対処法について検討を重ねておく。

平成30年度:

設計曲面の曲率が最も大きく造船現場での作業が最も困難と考えられる、船首部・船尾部複雑形状外板の作成に対し本手法を適用する。さらに、造船現場における作業時間の短縮を目的に、複数トーチを対象とした線状加熱シミュレータに機能拡張する。また、本システムの実機適用に向けて必要な拡張を実施する。以上の研究開発により、線状加熱を用いて任意形状の完全自動作成が可能なことを確認する。

4. 研究成果

4.1 線状加熱方案自動作成システムの提案

本解析システムの概要をFig. 1に示す。本解析システムでは、加熱線の始末端をランダムに選択し、その2点間の直線上にある要素に固有ひずみを付与して固有ひずみ法による弾性解析を実施する。その結果得られた形状を目的形状と比較し、加熱線の位置とその加熱線位置での目的形状との誤差を保存する。これを指定回数実施し、最も目的形状に近づいた条件を第1の加熱条件とし、次の加熱線位置の決定へと移る。次の加熱線位置の決定においては、これまでの過程で決定された加熱条件に対し、目的形状との誤差がより小さくなるような加熱位置を探索する。この手順を繰り返し、目的形状との誤差が十分に小さくなった時点での加熱本数および加熱位置を、目的形状成形のための加熱方案とする。

4.1.1 鞍型の成形に関する検討

本節では提案した線状加熱方案自動作成システムの妥当性を検証するため、基本となる形状の成形を行う。固有ひずみ法に用いるメッシュ分割図をFig. 2に示す。板長さを500mm、板幅を500mmとし、シェル要素を用いた。節点

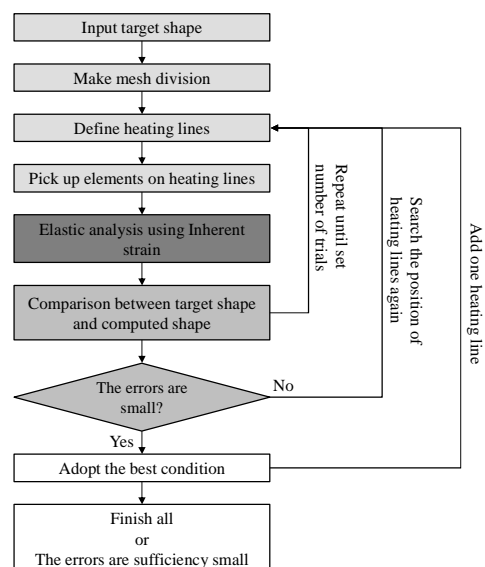


Fig. 1 Flow of the proposed method.

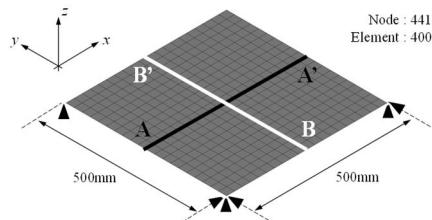


Fig. 2 Analysis model.

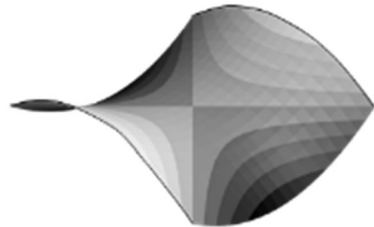


Fig. 3 Target shape.

数,要素数はそれぞれ 441, 400 である。板厚は 16mm と仮定した。また目的形状として, Fig. 3 に示す鞍型を想定した。

Fig. 4 に目的形状と提案手法により成形した鞍型の面外方向変位分布, 作成した加熱方案を用いた熱弾塑性解析により成形した鞍型の面外方向変位の比較を示す。同図より提案手法により成形された形状は目的形状の傾向を良好に捉えており, 作成した加熱方案を用いた熱弾塑性解析においても目的形状に良好に一致した結果が得られることが確認できる。Fig. 5 に Fig. 2 に示した A-A'ラインおよび B-B'ラインでの面外方向変位分布を示す。同図より, 提案手法により成形された形状, および作成した加熱方案を用いた熱弾塑性解析により成形された形状は目的形状と良好に一致していることがわかる。

以上より, 提案手法を用いることで目的形状を良好に再現する加熱方案が作成可能であることから提案手法の妥当性を確認した。

4.1.2 船体外板模擬形状の形成に関する検討

本章では, 本研究で提案した線状加熱方案自動作成システムの実機適応性について検討を行う。固有ひずみ法に用いるメッシュ分割図を Fig. 6 に示す。実寸法より板長さを 7000mm, 板幅を 5000mm とした。節点数, 要素数はそれぞれ 936, 875 である。板厚は 40mm と仮定した。目的形状として, Fig. 7 に示すような実船の船首部に存在するような大曲率を持つ部材を想定した。

Fig. 8 に目的形状と提案手法により成形した船体外板模擬形状の面外方向変位分布の比較を示す。同図より, 提案手法により成形された形状は鋼板の一部が盛り上がり, 他方でくぼむという目的形状の傾向を良好に捉えていることが確認でき, 目的形状と良好に一致した結果が得られることが確認できる。Fig. 9 に Fig. 6 に示した A-A'ライン, での面外方向変位分布を示す。同図より, 若干変形の不足する部分はあるものの, 提案手法により成形された形状は目的形状と良好に一致していることが確認できる。

以上より, 提案した線状加熱方案自動作成システムを用いることで, 実寸法の板を実船に使用されているような大曲率を持つ形状に加工できる加熱方案が作成できることを確認し, 提案手法が十分な精度および適用性を持つことを確認した。

4.2 AI の導入と任意形状成形のための加熱法案決定

本研究では, さらに, AI を導入する事により任意形状作成のための本解析システムの高度化を図った。概要を Fig.10 に示す。

AI の学習手法の一つである強化学習とは, 試行錯誤の過程から自立的に学習する学習方法であり, 学習によってある”環境”中におかれた”エージェント”が, 現在の”状態”を観測し, とるべき”行動”を決定するための最適な方策 π を得るという手法である。ここで, 最適な方策とは, 価値関数 Q が最大となるような行動を選択することを言う。本研究では, この価値関数 Q を CNN (Convolutional Neural Network: 畳み込みニューラルネットワーク) によって近似する DQN (Deep-Q-Network) と

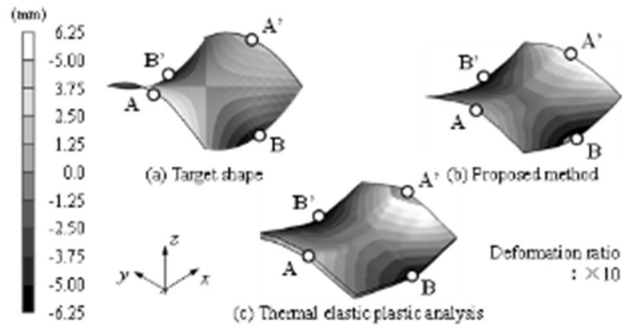


Fig. 4 Comparison in out-of-plane deformation.

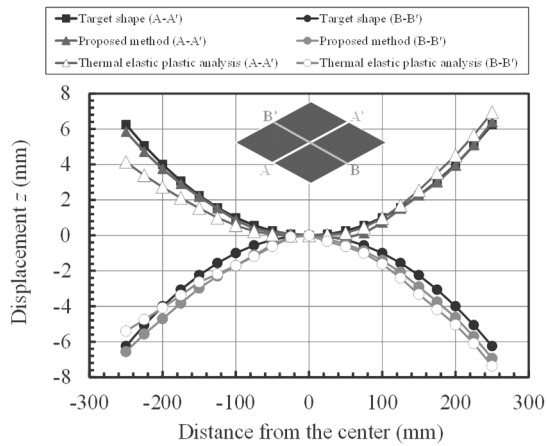


Fig. 5 Out-of-plane deformation.

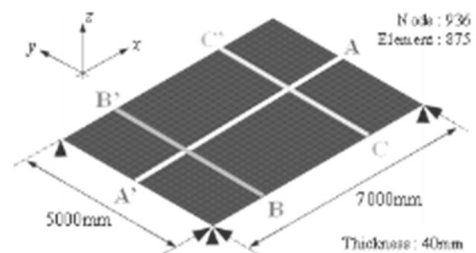


Fig. 6 Analysis model.

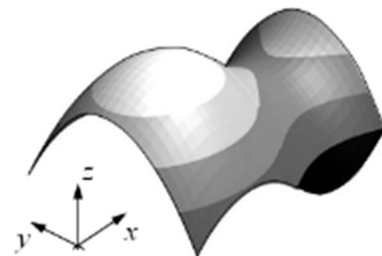


Fig. 7 Target shape.

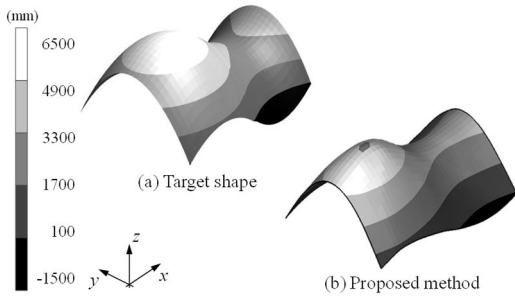


Fig. 8 Comparison in out-of-plane deformation between target shape and proposed method.

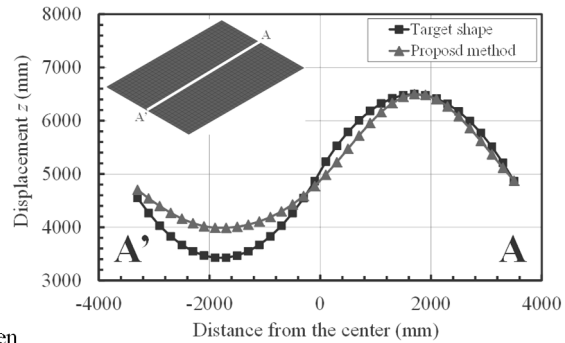


Fig. 9 Distribution of out-of-plane deformation.

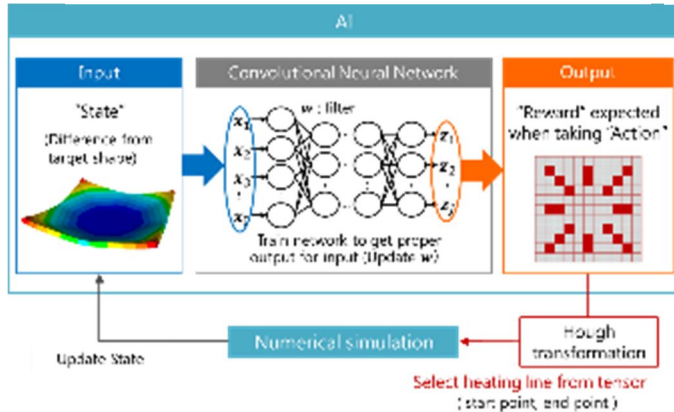


Fig. 10 Proposed system using AI

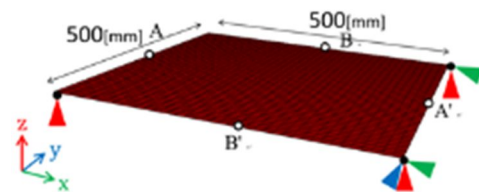


Fig. 11 Analysis model

いう手法を用いる。CNNの学習は入力を”状態”，出力をある”行動”をとったときの”報酬”の期待値として学習を行う。以上の手法を用いて，目的形状との差（面外方向変位）を入力として，最も目的形状に近づく加熱方案を出力するシステムを構築した。

解析モデルを Fig.11 に示す。鋼板の寸法は幅 500mm，長さ 500mm である。要素分割は，幅方向および奥行方向に 40 分割しており，節点数は 1,681，要素数は 1,600 とした。SM490A を材料とする同寸法かつ板厚 16mm の 3D モデルに対して熱弾塑性解析を行った結果によって決定した固有ひずみおよび曲率を，加熱線が通る要素に付与することで解析を行う。目的形状は，碗型および鞍型とした。

提案手法による AI の学習を行い，目的形状から AI 予測させた加熱方案に従って解析を行った。Fig.12 に目的形状と解析結果の面外方向変位分布について示す。変形倍率は 20 倍としている。また，Fig.13 に目的形状および解析結果について，直線 A-A' と B-B' 上の面外方向変位について示す。これらを比較することにより，碗型および碗型の傾向を良好にとらえていることが分かる。以上より，AI を用いて加熱位置と変形との関係を再現することが可能であることが確認できた。

また，現在の目的形状との差から次の加熱線を選択するのにかかる時間は約 10 秒程度であった。これは，実際の施工現場においても実用的な解析時間であると言える。

4.3 結言

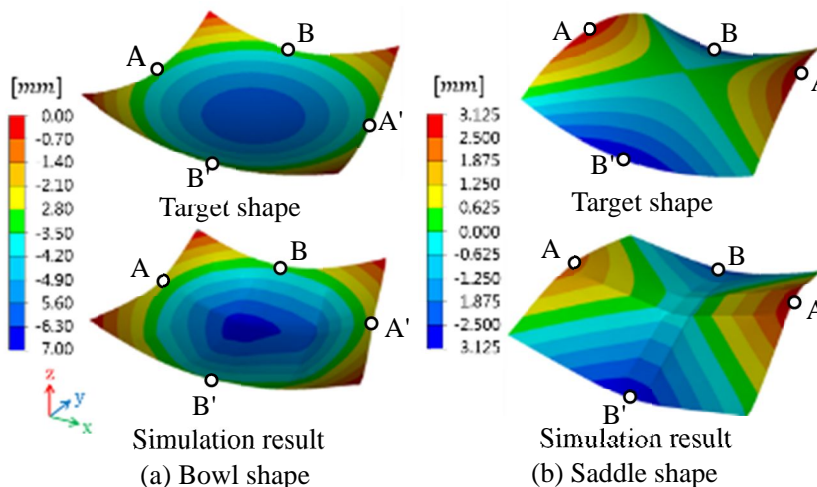


Fig. 12 Comparison between target shape and shape by AI

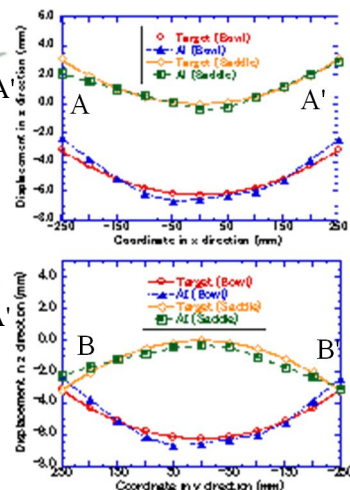


Fig. 13 Displacement in z direction

本研究では線状加熱の自動化をめざし、固有ひずみ法を用いた線状加熱方案自動決定システムを開発した。また、AI の強化学習を用いた新たなシステムについても検討を行った。これら一連の開発システムを用いて鞍型、および船体外板模擬形状の作成に必要な加熱法案を算出した結果、以下の知見が得られた。

A) モンテカルロ法による線状加熱方案自動作成システムについて

- 1) 本解析システムを用いることで、基本形状である椀型、鞍型、ねじれ型について目的形状に良好に一致する形状が得られた。また本システムにより作成された加熱方案を用いて熱弾塑性解析を実施した結果、目的形状と良好に一致することが分かった。
- 2) 実船で用いられる寸法の鋼板を模擬したモデルを用い、船首部にある大曲率を持った形状の作成を行った結果、目的形状の傾向を良好に再現する形状が得られた。また変形量についても目的形状とほぼ一致する結果が得られた。

B) AI による線状加熱方案自動作成システムについて

- 1) 本解析システムを用いることで、基本形状である椀型、鞍型、ねじれ型について目的形状に良好に一致する形状が得られた。また本システムにより作成された加熱方案を用いて熱弾塑性解析を実施した結果、目的形状と良好に一致することが分かった。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 2 件)

Kazuki Ikushima and Masakazu Shibahara, Nonlinear Computational Welding Mechanics for Large Structures, ASME, 141(2), 021603, 2018 (査読有)

Kazuki IKUSHIMA, Yusuke YAMADA, Masakazu SHIABHARA and Koichi AKITA, Numerical Analysis for Stress Behavior During Shot Peening, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 12, 2018/9 (査読有)

生島一樹、柴原正和、河原充、前田新太郎、桑原仁志、金武完明, 大規模溶接熱弾塑性解析手法の実機適用, 溶接構造シンポジウム 2017, 101-108 (査読有)

Shintaro MAEDA, Kazuki IKUSHIMA and Masakazu SHIBAHARA, Numerical study on weld buckling distortion in thin plate, International Seminar on Welding Science and Engineering 2017 (WSE2017), 482-483 2017/10 (査読有)

Kazuki Ikushima, Yoshitaka Kawajiri, Masakazu Shibahara, Nonlinear computational welding mechanics for large scale structures, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'17) 2017/6 (査読有)

Masakazu Shibahara, Takaaki Harada, Shintaro Maeda, Kazuki Ikushima, Influence of various factors on welding distortion of thin-plate structures, 溶接学会論文集, 1, 146s-150s 2017/6 (査読有)

Koichi Akita, Masakazu Shibahara, Kazuki Ikushima, Satoru Nishikawa, Takashi Furukawa, Hiroshi Suzuki, Stefanus Harjo, Takuro Kawasaki, Vladimir Luzin, In-situ Residual Stress Analysis during Thermal Cycle of a Dissimilar Weld Joint Using Neutron Diffraction and IEFEM, 溶接学会論文集, 1, 112s-116s 2017/06 (査読有)

Shintaro MAEDA, Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA, Large deformation analysis of thin plate structure welding, Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'17) 2017/6 (査読有)

K. Ikushima, T. Harada, M. Shibahara, Analysis of Welding Deformation on Construction of Large Thin Plate Structure by Idealized Explicit FEM Using Multigrid Method, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 11, 295-307 2017/1 (査読有)

Takaaki Harada, Shintaro Maeda, Kazuki Ikushima, Masakazu Shibahara, Study on influence of various factors on welding distortion of thin-plate structures, Visual JW 2016, 1, 239-240 2016/10 (査読有)

K. Ikushima, M. Shibahara, NONLINEAR COMPUTATIONAL WELDING MECHANICS FOR LARGE STRUCTURES, Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016), 54313(1-9) 2016/6 (査読有)

Kazuki Ikushima, Toshizo Minamino, Atsushi Kawahara, Hisato Yuto, Akihiro Nagai, Kazuhiko Tani, Tomoaki Tsuji, Junnya Yamada, Mitsuyoshi Nakatani, Masakazu Shibahara, Enhanced large-scale analysis method and its application to multiaxial pipe weld, Welding in the World, 60, 915-929 2016/5 (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

前川真奈海、橋詰光、芦田峻、井上陽介、生島一樹、柴原正和, AI を用いた線状加熱方案の自動作成に関する検討, 2019 年度溶接学会秋季全国大会, 2019 年 9 月

井上陽介、山田祐介、芦田峻、生島一樹、柴原正和, 線状加熱における加熱位置自動決定法についての検討, 2019 年度溶接学会秋季全国大会, 2019 年 9 月

橋詰光、前川真奈海、生島一樹、柴原正和, AI を用いた溶接力学問題の最適化, 2019 年度溶接学会秋季全国大会, 2019 年 9 月

前川真奈海、橋詰光、生島一樹、柴原正和, 強化学習を用いた線状加熱の自動化に関する研究, 2019 年度溶接学会春季全国大会, 2019 年 4 月

橋詰光、前川真奈海、生島一樹、柴原正和, AI を用いた金属 3D 積層造形時に発生する残留応力・変形の解析, 2018 年度溶接学会秋季全国大会, 2018 年 9 月

生島一樹, 柴原正和, 領域分割法による溶接力学解析の大規模化に関する検討, 2018 年度溶接学会秋季全国大会, 2018 年 9 月

山田祐介, 前川真奈海, 生島一樹, 伊藤真介, 柴原正和, 線状加熱における加熱位置に関する検討, 2018 年度溶接学会秋季全国大会, 2018 年 9 月

前川真奈海, 生島一樹, 柴原正和, 溶接力学問題に対する AI の応用, 2018 年度溶接学会春季全国大会, 2018 年 4 月

前川真奈海, 生島一樹, 柴原正和, 溶接力学問題に対するニューラルネットワークの応用について, 2017 年度溶接学会秋季全国大会, 2017 年 9 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 線状加熱による金属板の曲げ加工に用いる加熱法案の算出方法

発明者: 柴原正和, 生島一樹, 山田祐介, 前川真奈海, 阪本啓志

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2018-169713

出願年: 平成 30 年

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 4 件)

名称: AI と理想化陽解法 FEM の組合せによる解析システム

発明者: 柴原正和, 生島一樹, 前川真奈海

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特開 2019-48309

取得年: 平成 31 年

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.marine.osakafu-u.ac.jp/~shibahara/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 伊藤 真介

ローマ字氏名: ITOH, Shinsuke

所属研究機関名: 大阪府立大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 客員研究員

研究者番号 (8 桁): 50535052

研究分担者氏名: 生島 一樹

ローマ字氏名: IKUSHIMA, Kazuki

所属研究機関名: 大阪府立大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 80734003

研究分担者氏名: 大沢 直樹

ローマ字氏名: OSAWA, Naoki

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 90252585

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。