

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02375

研究課題名（和文）建造・強度・信頼性一貫解析システムの開発による船体最終強度の不確実性の明確化

研究課題名（英文）Clarification of uncertainty in ultimate strength of ship structure by developing integrated analysis system of construction, strength and reliability

研究代表者

生島 一樹 (Ikushima, Kazuki)

大阪公立大学・大学院工学研究科 准教授

研究者番号：80734003

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、理想化陽解法FEMに対して領域分割やシェルソリッド混合解法を導入し、大規模構造物の溶接力学解析システムを構築した。本手法を使用して、2億自由度規模の溶接力学解析を実施した。溶接力学解析と最終強度解析を統合した解析システムの開発し、溶接変形や残留応力が最終強度に及ぼす影響についての試解析を実施した結果、これらの影響により最終強度が変化することが確認した。また、最終強度試験を実施し、画像計測により試験中の変形挙動の計測を行った。解析結果と計測結果を比較し、最終強度が良好に一致することを確認した。

以上を通して、本研究の目的であった建造工程が構造強度の及ぼす影響についての検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では理想化陽解法FEMに基づく溶接力学解析手法に対して領域分割を導入することで、従来手法では難しい2億自由度の熱弾塑性解析を達成した。これにより、超大構造物の建造時の変形の評価につながる可能性がある。また、溶接力学解析と最終強度解析の統合はこれまでになされておらず、これを実施した本研究は今後同分野の基礎となる可能性がある。加えて、本研究では最終強度試験中の変形の画像計測を実施した。これにより、従来計測が難しかった構造崩壊中の変形が分布かつ時系列で計測可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this research, a large-scale welding mechanics analysis system was developed by introducing domain decomposition method and shell-solid coupling method. Using the developed method, a 2000 million DOFs problem was solved for a trial. An analysis system that integrates the welding mechanics analysis and the ultimate strength analysis was developed. Using the developed analysis system, the influence of welding deformations and residual stresses on the ultimate strength was investigated. As a result, it was found that the ultimate strength varies with these factors. An ultimate strength test of a stiffened panel structure was conducted. The distribution of displacement was measured by the image measurement method during the test. Through the comparison between the measurement and predicted result, it was found that both results are in good agreement.

From these investigations, the effect of building process of the structure on the ultimate strength was investigated.

研究分野：船舶工学、溶接力学

キーワード：船体構造 溶接力学解析 溶接変形 残留応力 座屈崩壊 最終強度 画像計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

船体構造は、鋼板を溶接し建造される。そのため、船体最終強度には、材料自体の強度のほか、工作の影響など様々な不確実性が含まれている。特に、近年は貨物輸送需要に対応するため船体が大型化している。これに伴い高強度鋼板の使用が拡大しており、溶接時の残留応力の影響が大きくなることが懸念される。また、環境問題への対応として薄板化による船体重量の削減も想定されるが、この場合は溶接変形が大きくなることが考えられる。このように、今後、最終強度に及ぼす溶接の影響が大きくなる可能性があるが、これまでに十分議論されているとは言えず、不確実性を生む大きな要因の一つとなっている。特に、船体構造は実験的な検討が難しく、計算技術の活用なしに議論することは極めて困難である。溶接組立に伴う不確実性を明確化するためには溶接と最終強度の両方を考える必要があるが、両者を一体的に取り扱える手法は存在していない。この点に注目したのが本研究である。本研究では、建造・強度・信頼性一貫解析手法を開発することで溶接や材料強度が最終強度に及ぼす影響を明らかにする。こうした因子のパラツキが最終強度に与える影響について統一的に検討できるのが本研究の大きな特徴であり、船体最終強度における工作の影響を体系的に解明でき、船体構造設計規則に対してパラツキの観点を導入することにつながる。また、開発される手法は他の構造物の検討に容易に適用可能であり、各産業分野における様々な構造物の強度の信頼性向上のための有効なツールになると予想される。

### 2. 研究の目的

現在までに、船体最終強度の検討において、溶接力学解析により得られる知見を直接取り入れた事例は少ない。これは溶接力学解析において膨大な計算時間が必要となるためである。本研究では、研究実施者の一人が独自に開発している大規模構造解析手法である「理想化陽解法 FEM」に対して「領域分割法」を導入することで、GPU クラスタを用いた船体構造建造工程の超高速溶接力学解析を実現する。従来手法では継手程度の溶接力学解析にとどまっていたが、船体ブロック建造工程の大規模な解析を実現可能となる。また、薄板で構成される船体構造の解析においては、溶接力学解析で使用されるソリッド要素を用いるのは極めて非効率である。本研究では、構造全体をシェル要素、溶接部をソリッド要素でモデル化し、両者をシェルソリッド連成解析手法で一体的に取り扱うことで効率的かつ高精度な解析手法を構築する。本研究では更に構造信頼性解析手法を導入することで、建造時の諸因子のパラツキが最終強度に及ぼす影響を体系的に検討し、建造時の変形や残留応力の影響を破損確率の観点から明らかにする。以上のように、本研究では、独自に学術的発展を遂げてきた溶接力学解析と最終強度解析を統合し、さらに、信頼性解析を行うことで、超大規模建造・強度・信頼性一貫構造解析技術を構築する。これを用いて船体構造設計における不確実性の大きな要因の一つである船体最終強度に及ぼす建造工程の影響を解明するのが本研究の目的である。こうした検討は、計算規模の制約から困難であったが、本研究は、独自の解析手法を開発し最終強度に対する建造工程の不確実性の明確化するという点で、革新的な研究であるといえる。

### 3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するために、溶接力学解析手法と最終強度解析手法の連携を図る。溶接力学解析では、ソリッド要素を用いて溶接組み立て時の入熱による過渡の変形と応力を求めるが、最終強度解析では、構造全体の崩壊挙動をシェル要素を用いて予測する。そのため、両者を統合するために、変位や応力、ひずみの分布をソリッド要素からシェル要素に変換する手法を構築する。また、大規模構造物を取り扱うためには、溶接力学解析の高速化、効率化が必要であることから、理想化陽解法 FEM に対して、領域分割手法の導入による一層の高速化、シェルソリッド混合解析手法の導入による効率化を図る。構造物の最終強度における不確実性を可視化するためには、信頼性の観点からのアプローチが必要であり、初期不整や残留応力が最終強度に及ぼす影響の統計モデルの構築を試みる。また、解析による検討を検証するために構造崩壊試験を実施する。

### 4. 研究成果

2020 年度は、理想化陽解法 FEM に基づく高速大規模溶接変形解析システムの開発するために、熱弾塑性理論に基づき船体ブロックの建造を対象にした解析システムを構築した。構築手法では、Element Birth法を導入することで、溶接後の各部材間のギャップや目違いをモデル化した。理想化陽解法 FEM は、従来手法に比べて圧倒的に大規模な非線形構造解析を実現しており、ここでは、本手法に基づく溶接力学解析手法を導入し、更に、領域分割法により GPU クラスタを用いて一層大規模な高速解析手法を構築した。また、本手法を使用して、図 1 に示す 2 億自由度規模の溶接力学解析の試解析を実施し、本手法が船体ブロック規模の熱弾塑性解析を実施可能であることを示した。

加えて、本研究では溶接力学解析と最終強度解析を連携させることで、構造物の最終強度に及ぼ

す溶接組立の影響の明確化することを目標としていることから、実大の船体ブロック構造物の最終強度を解析するために、動的陽解法 FEM に対して GPU 並列化を導入した高速解法を構築した。構築した GPU 並列化は、上記の理想化陽解法 FEM の解析システムに動的陽解法 FEM を導入する形で実装した。本手法を基礎的な動的弾塑性解析に適用し、本手法により大規模な動的弾塑性解析が高速に実行できることを確認した。

また、本研究の目標である溶接組立の最終強度への影響の明確化にアプローチするために、図 2 に示すように、基礎的な試験片において、溶接初期不整のバラツキを統計的手法を用いてモデル化し、最終強度への影響について評価を実施した。

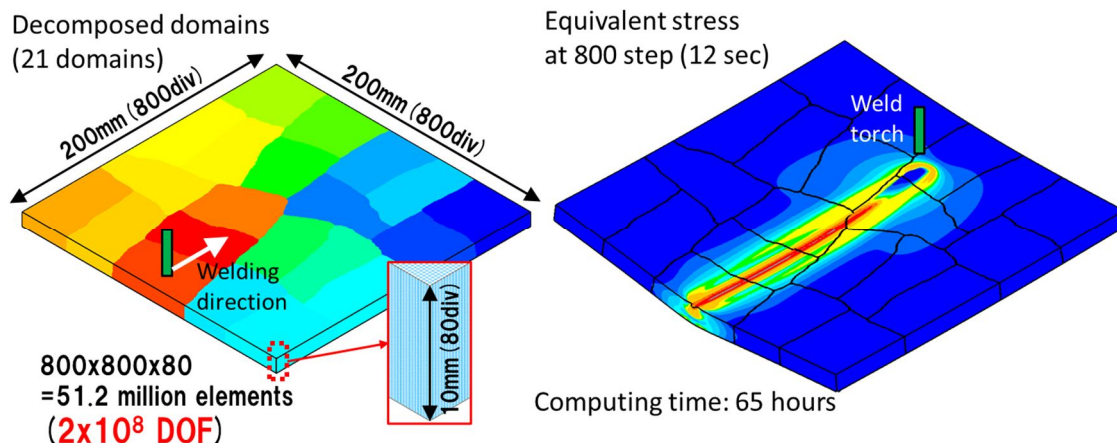


図 1 領域分割法を導入した理想化陽解法 FEM による 2 億自由度熱弾塑性解析

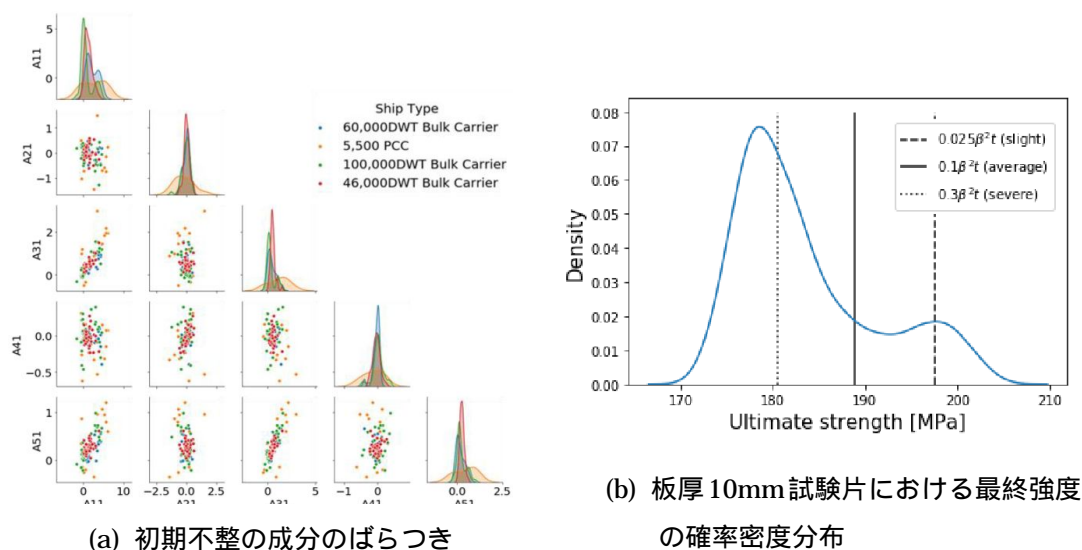
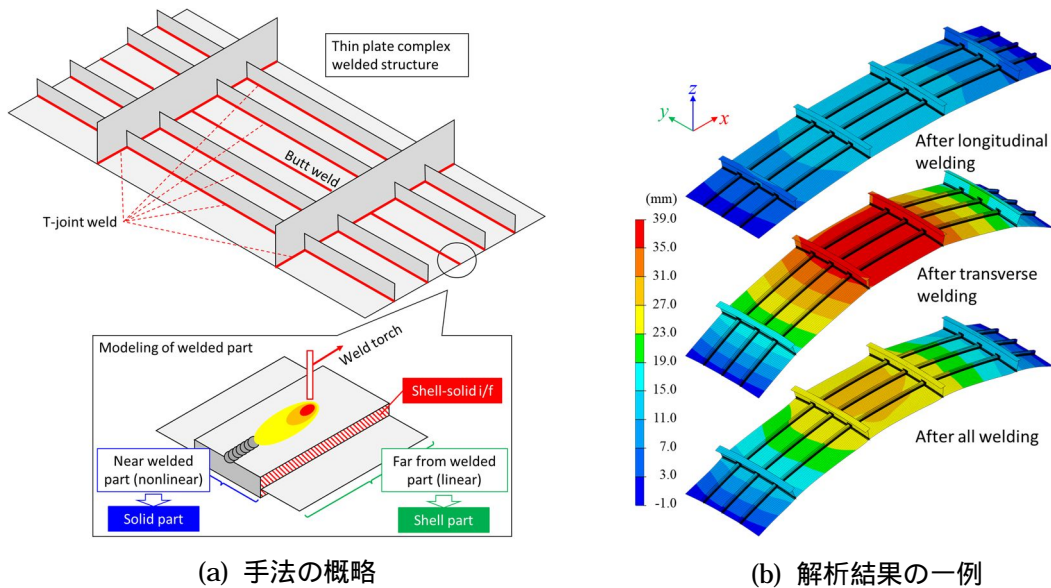


図 2 溶接初期不整が平板の最終強度に及ぼす影響の統計的評価

2021 年度は、昨年度構築した理想化陽解法 FEM に基づく溶接力学解析と、最終強度解析システムを統合するためのシステムの開発を行うことを目標とした。これを達成するために、2021 年度は、溶接力学解析側のソリッド要素と、最終強度解析側のシェル要素の節点と積分点上の物理量に対して、形状関数を用いて補間するシステムを開発した。本システムを用いて、溶接力学解析により得られるソリッド要素の解析結果を、最終強度解析で使用するシェル要素の解析モデル上に補間した結果、溶接解析により得られた変位、応力、塑性ひずみなどの物理量が、シェル要素モデル上に正しく補間できていることが確認できた。そのため、溶接解析と最終強度解析を連携させるシステムを当初の予定通り構築できたといえる。また、図 3 に示すシェル要素とソリッド要素を混合させることで効率的に溶接力学解析を行う解析手法を開発し、防撓構造の溶接組み立て解析に適用することで、その有用性を示した。

また、構築したシステムを使用して、溶接変形や残留応力が最終強度に及ぼす影響についての試験解析を実施した結果、これらの影響により、最終強度が変化することが確認されたことから、本研究の目的である工作が構造最終強度に及ぼす影響の解明にアプローチできる手法を構築できた。更に、図 4 に示すように、上記のシステムを使用して得られる溶接組立が最終強度に及ぼす影響を検証するための 3 体の試験体の製作も 2021 年度中に完了させた。



(a) 手法の概略

(b) 解析結果の一例

図3 開発したシェルソリッド混合解析手法の概略



図4 製作した防撓構造試験体

2022年度は、本研究で昨年度までに構築した理想化陽解法 FEM に基づく高速大規模溶接変形解析システムと、シェル要素を用いた最終強度解析システムを統合したシステムを用いて、最終強度に及ぼす溶接組み立ての影響について検討した。

本検討では、簡易な防撓構造を対象とし、図5に示すように構造物の組み立て時の溶接によって生じる残留応力と変形を、理想化陽解法 FEM を用いた解析システムにより予測した。本解析では、溶接条件が組み立て後の変形や残留応力に及ぼす影響について検討した。その後、最終強度予測を行うために、昨年度構築したシステムを用いて溶接力学解析により得られた初期不整と残留応力の予測結果を最終強度解析において考慮し、シェル要素を用いた防撓構造の崩壊挙動予測を行った。また、溶接力学解析で使用したソリッド要素モデルをそのまま使用した崩壊挙動予測も実施した。

また、図6に示すように、昨年度までに製作した試験体に対して最終強度試験を実施し、防撓構造の最終強度を計測した。試験実施に先立って、製作した防撓構造試験体の初期不整を、レーザー変位計を使用して計測した。計測に際しては、荷重ストローク線図、および、各パネルのひずみ履歴を取得した。また、非接触で面計測を行える画像計測手法を使用して、従来の手法では難しい構造崩壊試験中の変形挙動の計測を行った。解析結果と計測結果を比較し、両者の最終強度が良好に一致することを確認した。また、溶接力学解析の結果を考慮することで、最終強度に至る崩壊挙動が変化し、溶接組み立てが構造物の最終強度に影響を及ぼすことを示した。以上を通して、本研究の目的であった建造工程が構造強度の及ぼす影響についての検討を行った。

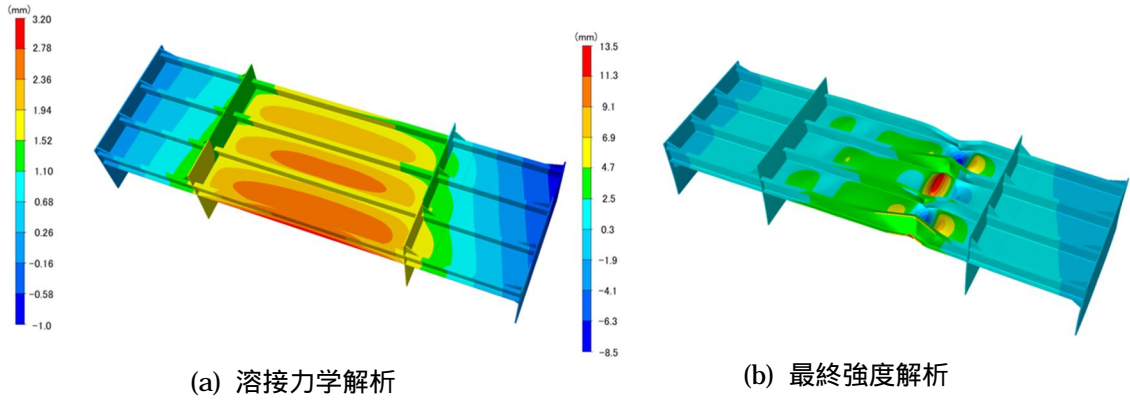


図5 溶接初期不整と最終強度時の変形の予測結果

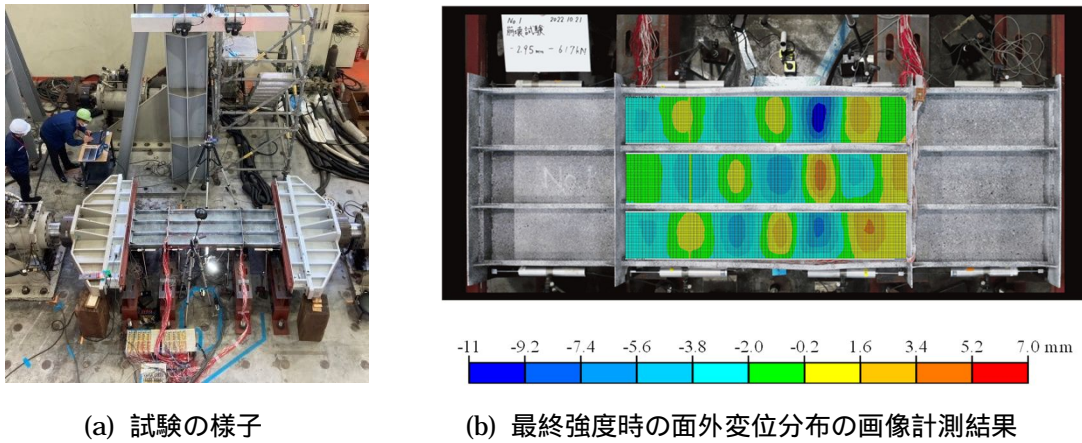


図6 構造崩壊試験の様子と画像計測結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Ikushima, R. Ashida, M. Shibahara	4. 巻 38
2. 論文標題 Efficient modelling on analysis of welding mechanics using mesh superposition method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 pp.120s-125s
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.38.121s	査読の有無 有
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 K. Ikushima, S. Maeda, T. Uchimura, A. Kawahara, M. Shibahara, H. Kuwabara, H. Kanetake	4. 巻 38
2. 論文標題 Prediction of welding deformation of automotive component using large-scale thermal elastic plastic analysis method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 pp.149s-153s
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.38.149s	査読の有無 有
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 K. Ikushima, S. Maeda, T. Ieshita, A. Kawahara, Y. Abe, H. Kiuchi, M. Shibahara	4. 巻 33
2. 論文標題 Enhanced idealized explicit FEM for predicting welding deformation in complex large-scaled structure and application to the real structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Welding International	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09507116.2020.1860485	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhihao LI, Yuki YAMAUCHI, Shintaro MAEDA, Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA	4. 巻 41
2. 論文標題 Shell-solid coupling analysis for mechanical behavior of complex thin-plate weld structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 31s-35s
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.41.31s	査読の有無 有
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 Shintaro MAEDA, Yuki YAMAUCHI, Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA	4. 巻 41
2. 論文標題 Study on application of efficient FE modeling technique in analysis of welding mechanics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 16s-20s
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2207/qj jws.41.16s	査読の有無 有
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8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 田中 亮匡, 加藤 拓也, 峰松 伸行, 高橋 毅, 河原 充, 吉田 昇平, 生島 一樹, 柴原 正和
2. 発表標題 溶接時の面外変形に及ぼす諸因子の影響に関する検討
3. 学会等名 溶接学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野 進, 高橋 陸, 木谷 悠二, 生島 一樹, 柴原 正和
2. 発表標題 温度履歴を用いたデータ同化による熱伝導パラメータ推定手法
3. 学会等名 溶接学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 陸, 木谷 悠二, 麻 寧緒, 生島 一樹, 柴原 正和
2. 発表標題 データ同化手法を用いた熱伝導現象のパラメータ推定に関する基礎的検討
3. 学会等名 溶接学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ikushima
2. 発表標題 Nonlinear mechanical FE analysis of thin-plate complex structures using the shell-solid mixed method
3. 学会等名 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 景山 裕司, 辰巳 晃
2. 発表標題 平板構造の溶接初期たわみのベイズ統計モデル化とその最終強度評価
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhihao LI, Shintaro MAEDA, Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA
2. 発表標題 Shell-solid coupling analysis of mechanical behavior in complex thin-plate structure during welding
3. 学会等名 Visual-JW 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhihao LI, Shintaro MAEDA, Kazuki IKUSHIMA, Masakazu SHIBAHARA
2. 発表標題 Study on application of efficient FE modeling technique in analysis of welding mechanics
3. 学会等名 Visual-JW 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Akira Tatsumi , Yuji Kageyama and Masahiko Fujikubo
2. 発表標題 Development of Bayesian statistical model of welding initial deflection and ultimate strength assessment of plates under in-plane compression
3. 学会等名 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔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
研究分担者	辰巳 晃 (Tatsumi Akira)  (60736487)	大阪大学・工学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	藤 公博 (Toh Kimihiro)  (80790716)	九州大学・工学研究院・助教  (17102)	
研究分担者	小森山 祐輔 (Komoriyama Yusuke)  (90805110)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	

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
---------	---------