

平成 31 年 4 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18324

研究課題名(和文) 超大規模解析手法を用いた溶接力学・構造崩壊挙動統合解析手法による船体構造解析

研究課題名(英文) Structural analysis of ship hull using ultra large-scale welding mechanics analysis and collapse analysis

研究代表者

生島 一樹 (Ikushima, Kazuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80734003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では鋼構造物の最終強度予測を高精度化するために、溶接力学解析手法と最終強度解析手法を統合した解析システムを構築した。本システムでは、船体などの大規模な解析を行うために、代数マルチグリッド法と画像処理装置(GPU)による並列化を解析手法に対して導入した。本システムを用いて、基礎的な防撓構造物の4点曲げ時の最終強度解析を実施した結果、本システムを用いることで、高精度な解析が行えることを確認した。また、船体ブロックの最終強度の予測を実施した結果、得られた荷重-変位曲線は実験結果とよく一致し、本解析システムを用いることで、製作時の溶接が強度に及ぼす影響についても検討できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では鋼構造物の最終強度解析の高度化を目的に、最終強度に対して影響を持つと考えられる溶接の影響を考慮するため、溶接力学解析手法を最終強度解析手法に対して統合した手法を新たに開発した。船体構造物の最終強度解析は古くからなされているが、その多くは溶接組み立て時の変形や残留応力に対して何らかの仮定をしている。本研究で開発された解析手法を用いることで、溶接力学解析手法を用いて直接的にこれらの影響を考慮可能となることから、本研究は最終強度解析の高精度化に寄与するものといえる。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to achieve accurate prediction of the ultimate strength of structures, an analysis system was developed by integrating the both welding mechanics analysis and ultimate strength analysis. In the developed system, to perform a large-scale analysis, algebraic multigrid method and parallelization using a graphics processing unit were introduced. The developed system was applied to the ultimate strength analysis of the 4-point bending of fundamental stiffened structure. As a result, it was found that the developed analysis system can accurately predict the ultimate strength. To show the applicability to the large-scale structure, the developed system was applied to the ultimate strength analysis of ship hull block model. The results showed that the developed system can investigate the effect of welding on the ultimate strength of the structure.

研究分野：計算力学、構造力学、溶接力学

キーワード：非線形有限要素解析 大規模解析 座屈崩壊挙動 溶接変形 残留応力

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

### 1. 研究開始当初の背景

船舶が極限的に厳しい海象に遭遇し、さらに、衝突や座礁により一部の部材が損傷したり、腐食衰耗により板厚が減少したりして、構造が初期に有していた剛性および強度を発揮できなくなった状況では、ローカルな構造要素の損傷だけでなく、構造の全体崩壊を起こす可能性もある。このような船体構造の全体崩壊は、言うまでもなく船体構造における致命的な事象であり、人命の損失や輸送物の流失による海洋汚染に直結するため、社会的な問題にまで発展し得る。そのため、現在の船舶の設計指針として、信頼性工学を導入することで、船舶が重大な事故を起こす確率を評価し、船舶事故に関するリスクを社会が許容できるレベルになるように設定されるべきであるという考え方が主流となっている。

船体構造の全体崩壊の確率を評価するためには、船体構造の崩壊様式を想定し、そのシナリオで船体構造に働く荷重を精度よく推定するとともに、パネルや防撓パネル等のローカルな構造要素が逐次崩壊し、構造の全体崩壊に至る過程を再現することで、船体構造の最終強度を推定する必要がある。この要求にこたえるためには、弾塑性挙動を表現する材料的非線形性と大変形現象を表現する幾何学的非線形性を考慮した解析手法 1) を用いることが解決法になると考えられる。

一方、船体構造は、建造時に溶接が使用されるため、残留応力や変形が必然的に発生するが、残留応力や溶接変形が座屈形式の大変形現象の引き金となることも想定される。特に溶接変形は、座屈問題における初期不整ともなり得ることから、その影響は無視できないと考えられる。溶接変形や残留応力を予測するためには、材料の局所の溶融を伴う極めて非線形性の強い問題を解析する必要があり、大規模な強非線形問題の解析となることから、解析が困難となっている。加えて、構造の崩壊挙動解析においては、溶接変形や残留応力を考慮することは難しく溶接変形や残留応力の影響を考慮した事例は少ない。

そこで、本研究では、溶接施工時に構造に生じる変形や残留応力を解析するためのツールとして申請者が提案している理想化陽解法 FEM1) を船体構造の崩壊挙動解析に対して応用することで、構造の崩壊挙動の解析において溶接変形や残留応力の影響を考慮可能な解析手法の構築を試みる。理想化陽解法 FEM を用いることで、1000 万自由度程度の規模を有する船体ブロックの建造工程における溶接変形問題の解析を PC レベルの計算機 1 台を用いて実施できることが示されており、本研究では、理想化陽解法 FEM を用いた大規模溶接力学解析手法と大規模崩壊挙動解析手法を開発し、両手法を統合することで超大規模非線形構造解析手法を構築し、船体構造の崩壊挙動解析を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、船体構造の崩壊挙動解析において、大きな影響を持つと考えられる溶接変形および残留応力を考慮した新しい解析手法の構築を目指す。これらの影響を検討するためには、きわめて大規模な非線形構造解析が可能な手法が必要であり、本研究では、すでに溶接力学問題の解析において、実用的な計算資源で大規模解析を実現している理想化陽解法 FEM を基に手法の構築を行う。本手法の開発により、現状では検討が困難な建造時の溶接組立の影響を考慮した船体構造の最終強度予測を実現することができるため、船体構造設計に及ぼす影響は大きいと考えられる。また、本手法は、輸送機器や建築物等の溶接構造物の解析にも容易に応用できることから、大きな発展性を有しており、その開発を行う本研究は将来性に期待できるものであると言える。

### 3. 研究の方法

#### (1) 理想化陽解法 FEM を用いた溶接時の幾何学的非線形問題に関する検討

船体構造などの大型薄板構造物の溶接時においては、幾何学非線形に起因する座屈などの大変形現象が生じる場合が想定される。座屈を生じない場合においても、幾何学的非線形性を考慮することで、後続の崩壊挙動解析において、初期不整となり得る溶接変形を高精度に解析することにつながる。本項目では、理想化陽解法 FEM に対して、座屈を含む大変形現象を高精度に解析するための検討を行う。

従来の幾何学非線形問題の解析においては、静的陰解法 FEM を基にした手法が一般的に用いられているため、分岐座屈のように変形モードが極端に変化するような問題を解析するためには、固有値解析を実施し、分岐後の変形モードを決定する等の複雑な解析手法が必要とされる。一方、理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM をベースに定式化を行っているため、従来手法では複雑な手順が必要な分岐問題において、動的陽解法 FEM のもつ動的効果により、複雑な手順を実行することなく、スムーズに解析できるようになることが期待される。加えて、理想化陽解法 FEM の高速、かつ省メモリで大規模問題を解析可能であるという特徴を活用することで、従来手法では困難な解析規模、たとえば、数百万要素を超える大規模構造物の溶接変形・残留応力解析を実現することも期待できる。

#### (2) 構造物の崩壊挙動解析システムの構築

理想化陽解法 FEM に基づき、構造物の座屈崩壊挙動を解析可能なシステムを構築する。解析システムの構築にあたっては、項目と同様の幾何学的非線形性の考慮による座屈を含む大変形現象の解析に加えて、弧長増分法などの荷重、変位負荷方法の検討を行う。

座屈崩壊挙動の解析においては、弾塑性現象を表す材料非線形性と大変形現象を表す幾何学的非線形性の2つが問題となる。特に、構造の崩壊時は大きな塑性ひずみと変位が発生することから、これらの影響が大きくなり解析が不安定になることが予想される。この点に関して、理想化陽解法 FEM は、動的陽解法 FEM を基に定式化を行っているため、従来手法に比べ、非線形問題における収束性に優れており、その動的効果により安定的に解析を進めることが期待できる。

### (3) 溶接変形残留応力解析システムと構造崩壊挙動解析システムの統合

項目(1)と(2)で開発される理想化陽解法 FEM に基づく大規模溶接力学解析手法と大規模構造崩壊挙動解析手法を統合した解析システム開発し、本システムを用いた解析と実験結果との比較を通して、溶接変形や残留応力が崩壊挙動に及ぼす影響について検討する。また、本解析システムを用いて船体構造の溶接変形残留応力解析、および、崩壊挙動解析を実施する。本解析では、構造崩壊挙動解析で用いられることが多いシェル要素や ISUM 要素ではなくソリッド要素を用いて船体構造をモデル化することで、溶接変形ならびに残留応力を考慮した解析を実現する。そのため、本解析においては、従来の構造解析比べて解析規模が飛躍的に大きくなり、解析が困難になることが予想される。理想化陽解法 FEM は GPU 並列化に対して非常に高い親和性を有しているため、本解析においては、GPU ワークステーションの使用を想定している。また、マルチグリッド法を導入した手法を用いることで、解析の効率化を図り、実用可能な計算時間での解析を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 理想化陽解法 FEM を用いた溶接時の幾何学的非線形問題に関する検討

本項目では、溶接により発生する座屈を含む大変形現象を高精度に解析するために、理想化陽解法 FEM に対して幾何学的非線形性を考慮した解析手法による検討を行った。理想化陽解法 FEM による大変形溶接変形解析システムを溶接時の座屈問題に対して適用することで、大変形問題における理想化陽解法 FEM の適用性を検証した。本検討では、検討対象として、基礎溶接継手と、数本程度の補剛材を有する簡単な防撓構造における溶接中の座屈問題を解析した。

T 継手の解析においては、図 1 に示す解析対象に対して、入熱量や溶接速度が変形に及ぼす影響について検討した。その結果、理想化陽解法 FEM に基づく解析システムにおいて、入熱量の増加に伴い、大きな座屈形式の変形が発生することを再現できることを確認した。また、図 2 に示すように、溶接速度を変化させることで、同じ入熱量においても変形形式が異なる可能性があることを確認した。

図 3 に示す防撓構造製作時の溶接変形に関して、長手方向に 1200mm、幅方向に 600mm のスキンプレートに対して、高さ 50mm の補剛材を長手方向に 2 本、幅方向に 3 本を径 10 回の溶接により接合する試験体を製作し、同様の解析を実施することで、理想化陽解法 FEM に基づく解析システムの妥当性について検討した。その結果、解析と実験の両方においてねじれ形式の大きな座屈が発生することを確認した。また、変形量が実験と解析で良好に一致することを示した。

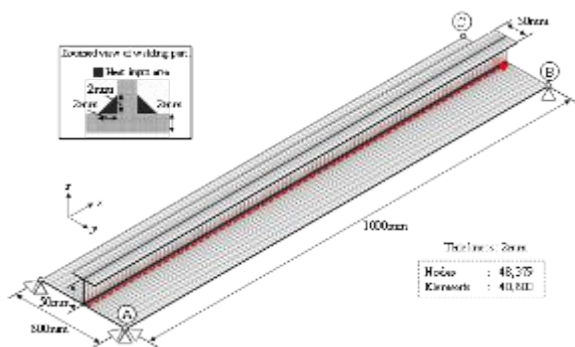


図 1 T 継手解析モデル

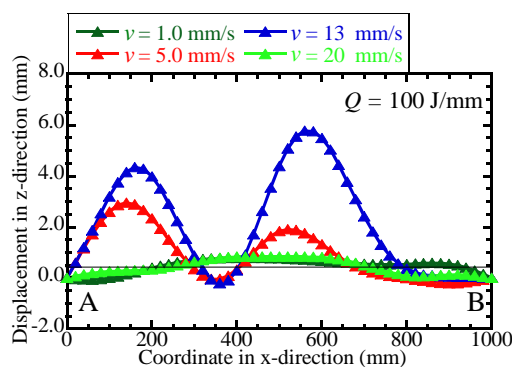


図 2 入熱速度による変形の差

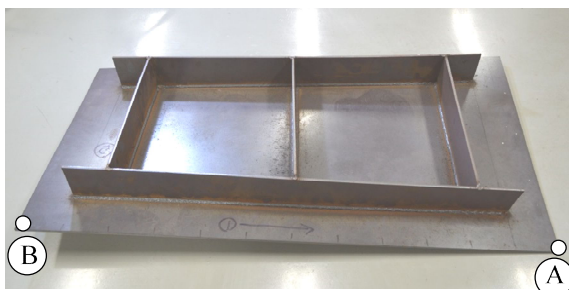


図 3 防撓構造試験体

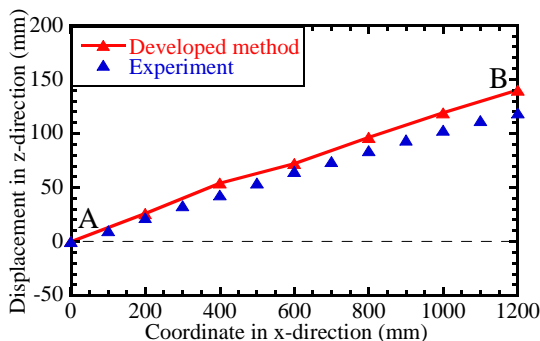


図 4 変形量の比較

(2) 構造物の崩壊挙動解析システムの構築

溶接構造物に対して最終強度を超える大荷重が作用した際の座屈崩壊現象を高精度に解析するために、理想化陽解法 FEM による座屈崩壊時の大変形弾塑性問題の解析システムを構築した。構築した理想化陽解法 FEM に基づく大変形弾塑性解析手法を座屈問題に対して適用することで、大変形問題における理想化陽解法 FEM の適用性について検討した。

検討対象としては、鋼板で制作された箱型の構造物に対して防撓材を溶接した構造物を想定し、図 5 に示す箱型防撓構造の 4 点曲げ時の座屈崩壊問題を解析した。箱型防撓構造の解析においては、座屈崩壊挙動解析において一般的に用いられるシェル要素ではなく、今後、溶接時の残留応力や変形の予測結果を考慮するために、ソリッド用を用いた解析を実施した。これにより、実大構造物レベルの鋼構造物において、溶接の影響を考慮した解析を実施できるシステムを構築した。

解析の結果、図 6 に示すように得られた荷重-変位曲線は過去に実施された実験時の結果とよく一致し、本解析システムを用いることで、ソリッド要素を用いた場合においても鋼構造物の座屈崩壊時の挙動を解析できることを示した。

(3) 溶接変形残留応力解析システムと構造崩壊挙動解析システムの統合

本項目では、大型鋼構造物の溶接組み立て時の変形や残留応力が最終強度に及ぼす影響について検討するために、項目(1)と(2)で構築した解析手法を統合した解析システムを構築した。図 6 に示す船体ブロック構造物を模擬した解析モデルを構築し、これに対して縦曲げならびにねじり荷重が作用した際の最終強度の予測を本解析システムを用いて実施した。また、本解析において溶接時の変形や残留応力の影響について検討するために、ソリッド要素を用いて解析モデルを構築した。以上のように、本解析では、船体ブロック規模の大規模な構造物をソリッド要素を用いて解析することから、代数マルチグリッド法と画像処理装置(GPU)による並列化を解析手法に対して導入した。

解析の結果、得られた荷重-変位曲線は実験結果とよく一致し、本解析システムを用いることで、ソリッド要素を用いた場合においても大規模鋼構造物の座屈崩壊時の挙動を解析できることを示した。また、大型鋼構造物製作時の溶接が強度に及ぼす影響についても検討できることを示した。

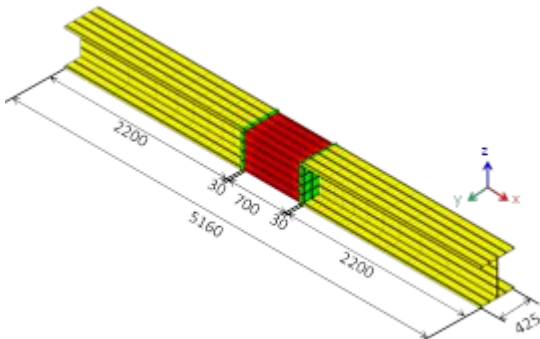


図 5 4 点曲げ解析モデル

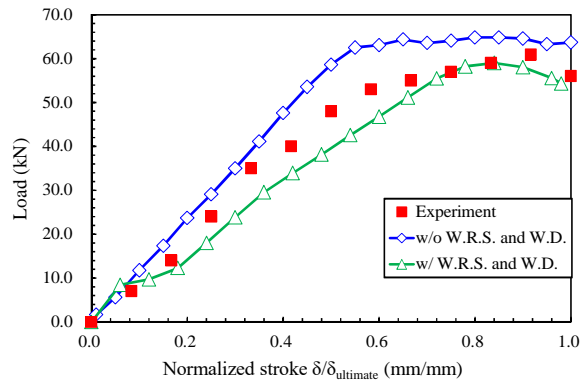


図 6 荷重履歴の比較

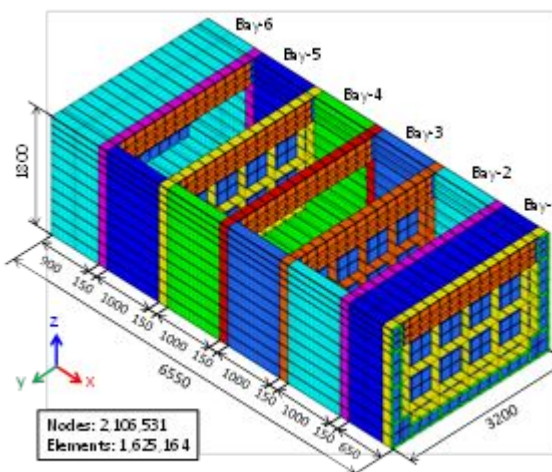


図 7 1/13 船体ブロックモデル

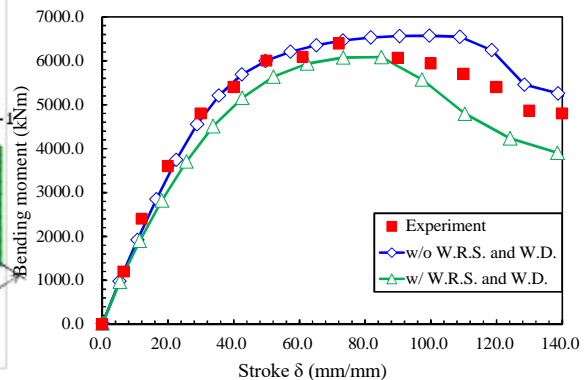


図 8 曲げモーメント履歴の比較

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

- 1) M. Shibahara, T. Harada, S. Maeda, K. Ikushima: Influence of Various Factors on Welding Distortion of Thin-plate Structures, 溶接学会論文集, Vol.35, No.2, 2017, pp.146s -150s, DOI: 10.2207/qjws.35.146s
- 2) K. Ikushima, M. Shibahara: Nonlinear Computational Welding Mechanics for Large Structures, Journal of Offshore Mechanics and Ocean Engineering, Vol.141, No.2, 2018, Paper no.021603, DOI: 10.1115/1.4041395

〔学会発表〕(計 7件)

- 1) T. Harada, S. Maeda K. Ikushima, M. Shibahara: Study on influence of various factors on welding distortion of thin-plate structures, Visual JW 2016, 2016.
- 2) 前田 新太郎, 原田 貴明, 生島 一樹, 河原 充, 柴原 正和: 溶接時における薄板構造物の大変形解析, 溶接学会秋季全国大会, 2016.
- 3) S. Maeda, K. Ikushima, M. Shibahara: Numerical study on weld buckling distortion in thin plate, 7th International Conference on Welding Science and Engineering, 2017.
- 4) 前田 新太郎, 生島 一樹, 柴原 正和: 理想化陽解法 FEM を用いた溶接座屈変形解析, 溶接構造シンポジウム 2017, 2017.
- 5) 生島 一樹, 原田 貴明, 柴原 正和: 溶接変形・残留応力を考慮した構造物の最終強度解析, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2017.
- 6) 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, 溶接学会秋季全国大会, 2018.
- 7) K. Ikushima, T. Harada, M. Shibahara: Ultimate strength analysis of structures considering effect of welding distortions and residual stresses, 7th International Maritime Conference on DESIGN FOR SAFETY, 2018.

〔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)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

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。