

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02329

研究課題名(和文) 熱加工プロセスのマルチフィジクス現象を考慮した船舶構造体信頼性評価手法の構築

研究課題名(英文) Structural integrity and quality assurance of welded components in ship-building process considering with multi-physics phenomena of thermal processing

研究代表者

望月 正人 (MOCHIZUKI, Masahito)

大阪大学・工学研究科 教授

研究者番号：10304015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マルチフィジクス解析と高精度計測実験を併用した溶接品質保証支援システムを提案・開発し、それを基盤として実施工への適用を想定した確率論的アプローチによる信頼性評価システムを確立することを目的としている。すなわち本研究は、船体工作における切断や溶接、溶接後の熱的な歪取り作業に代表される熱加工時における「材料科学」、「プロセス物理」、「熱加工力学」のマルチフィジクス現象の異分野融合をによってもたらされる構造体品質・信頼性評価技術を、数値解析的アプローチと実験的アプローチを適切に組み合わせながら開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、材料・熱・力学という熱加工現象の本質的なメカニズムの解明を必要とするものであって、ISOにおいて特殊工程とされる溶接・接合プロセスの科学技術イノベーションと、より柔軟性のある船体建造工法の実現に繋がることから、学術・工学のどちらの面からも極めて有意義なものであると言える。また、本研究で得られる知見は、溶接に限らず、材料・熱・力学挙動が連成するプロセス一般に適用可能であり、さらには将来のそのシステム化との統合も十分に適応できることから、工学の将来の発展にも大きく寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Structural integrity and quality assurance of welded components in ship-building process are developed considering with multi-physics analysis and high-precision measurement in this study. Numerical simulation of the thermal process treatments such as cutting, welding, and correcting are investigated with the scope of three fundamental elements; materials science, process physics, and thermal process mechanics.

研究分野：熱加工力学，材料力学，破壊力学

キーワード：建造・艦装 品質 信頼性評価システム 溶接 切断 矯正

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

1. 研究開始当初の背景

船舶の建造時や保守・補修時の切断・溶接などの熱加工プロセスに伴って生じる“本質的な形状不連続や融合不良、割れなどの欠陥”；金属材料組織に起因する強度的不均質や靱性劣化”、“残留応力・変形”は、構造体の強度・破壊に影響することが知られている。コンテナ船 MOL COMFORT などのような海難事故においても、必ずしも全ての事例の主因とまでは言えないものの、溶接や歪取りなどの熱加工部の取り扱いが極めて重要であることは論を待たず、我が国の造船・海洋構造物産業の国際競争力を高める方策の一つとしても、構造信頼性のより一層の向上が重要であり、そのためにも、熱加工プロセスの詳細にまで立ち返った総合的・包括的なアプローチに基づく新しい評価手法が求められる。申請者は、これまで、船舶構造体の高精度工作のための「従来の固定観念にとらわれない革新的な方法論」の確立に向けて種々の取り組みを実施してきた。

2. 研究の目的

本研究では、マルチフィジックス解析と高精度計測実験を併用した溶接品質保証支援システムを提案・開発し、それを基盤として実施工への適用を想定した確率論的アプローチによる信頼性評価システムを確立することを目的とし、以下のような具体的な目標を掲げた。

- (1) マルチフィジックスモデリングによる熱加工プロセスの数値シミュレーション技術の開発
・・・「材料科学」「プロセス物理」「熱加工力学」を統合した加工部特性予測
- (2) 溶接プロセス中のマルチフィジックス現象を考慮した溶接欠陥・割れの発生評価手法の構築
・・・項目(1)で開発した技術と非破壊検査を併用した溶接部欠陥・割れの発生条件の解明
- (3) マルチフィジックス現象を考慮したマルチスケール残留応力・破壊力学解析手法の構築
・・・項目(1)で開発した技術と非破壊応力計測を併用したミクロ組織からメガ構造体に至る残留応力・破壊力学パラメータの評価
- (4) マルチフィジックス現象を考慮した溶接部ミクロ組織・強度・靱性評価手法の構築
・・・項目(1)で開発した技術と破壊力学実験を併用した溶接部ミクロ組織・強度・靱性評価
- (5) 溶接・熱加工プロセス事象の確率論的アプローチによる構造体品質・信頼性評価技術の開発
・・・溶接・熱加工プロセス事象の確率論的取り扱いと LRFD (荷重・耐力係数設計法) 的アプローチを用いた構造体品質・信頼性の評価

3. 研究の方法

本研究は、船体工作における切断や溶接、溶接後の熱的な歪取り作業に代表される熱加工時における「材料科学」-「プロセス物理」-「熱加工力学」のマルチフィジックス現象の異分野融合によって初めてもたらされる革新的な構造体品質・信頼性評価技術を開発するものである。

研究目的欄で挙げた5項目の具体的な目標に対し、数値解析的アプローチと実験的アプローチを適切に組み合わせながら研究を進めた。特に、実験的アプローチについては、民間企業との共同研究的アライアンスを積極的に活用し、進捗状況に応じて柔軟に民間企業に研究協力者の提供を依頼、支援・協力を求めながら研究を確実に遂行した。

4. 研究成果

- (1) マルチフィジックスモデリングによる熱加工プロセスの数値シミュレーション技術の開発
・プロセス物理に基づく熱輸送現象を考慮した溶接温度場解析手法の構築
従来の熱伝導モデルと、アーク・プラズマ熱源モデル、ビード表面形状モデル、溶融池内対流熱輸送モデルを連成させた溶接温度場解析手法を開発し、熱加工部特性への影響が大きい溶融部近傍の温度場特性を高精度に評価できる手法を構築した。
・材料科学に基づく溶接メタラジを考慮したミクロ組織・強度解析手法の構築
開発した溶接温度場解析手法と、凝固組織モデル、相変態モデルなどを連成させた解析手法を継手品質・強度信頼性に寄与する材料挙動に注目したモデル化を含めて開発し、熱加工部のミクロ組織やそれに起因するミクロ強度特性を高精度に評価できる手法を構築した。
・材料科学・プロセス物理を融合させた熱加工力学解析手法の構築
開発した溶接温度場解析手法、ミクロ組織・強度解析手法と従来の熱弾塑性解析手法の連成解析手法を開発し、溶接中の熱弾塑性挙動の詳細解析が可能な手法を構築する。合わせて、各モデルの「逐次」連成解析手法も併せて開発した。
・開発した熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法の検証
熱変形は各現象が重畳した結果として現れる最も敏感な事象であり、全体的な検証にも有用なパラメータであるため、開発したマルチフィジックス解析手法の検証として、溶接に伴う熱変形履歴の計測実験を行い、結果の比較を行い、解析手法の妥当性を検証した。
- (2) 溶接プロセス中のマルチフィジックス現象を考慮した溶接欠陥・割れの発生評価手法の構築
・熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法による欠陥・割れ発生評価
開発した熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法により、溶接時の欠陥発生ならびに

各種割れ発生に及ぼす材料特性や溶接施工条件の影響について明確化した。

- ・非破壊検査技術による欠陥・割れ評価

超音波探傷をはじめとする各種非破壊検査技術による溶接欠陥や割れ評価手法を再整理するとともに、構造健全性に影響を及ぼす溶接時の欠陥発生ならびに各種割れ発生に及ぼす溶接施工条件の影響について実験的に調査した。

- ・マルチフィジックス解析と非破壊検査技術を併用した溶接欠陥・割れ発生限界評価

開発したマルチフィジックス解析と確立した非破壊検査技術を併用して、溶接時の欠陥や各種割れの発生限界条件を明らかにするとともに、防止のための方向性および対策を提示した。

(3) マルチフィジックス現象を考慮したマルチスケール残留応力・破壊力学解析手法の構築

- ・熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法による残留応力・破壊力学解析

開発した熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法を応用した、ミクロ組織レベルからメガ構造体に至る溶接構造体残留応力解析手法を構築した。また、得られた残留応力を考慮した破壊力学解析手法について整理した。

- ・非破壊応力計測技術による溶接残留応力-ひずみ場の三次元計測

X線回折法，圧子押し込み法，DHD法，応力弛緩法の各種計測法を用いて溶接後の残留応力-ひずみ場を計測し，開発した溶接残留応力解析手法との比較検討を行った。

- ・マルチフィジックス解析と非破壊応力計測技術を併用した溶接残留応力・破壊評価

開発したマルチフィジックス解析と確立した非破壊応力計測技術を併用して，溶接構造体の残留応力ならびに破壊力学パラメータを評価した。さらに，ミクロ組織レベルの評価も加味することにより，マルチスケールな残留応力・破壊力学評価手法を構築した。それらの技術を駆使することにより，残留応力低減・制御法を明示するとともに，その適正施工指針を明らかにした。

(4) マルチフィジックス現象を考慮した溶接部ミクロ組織・強度・靱性評価手法の開発

- ・熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法によるミクロ組織・強度分布評価

開発した熱加工プロセスのマルチフィジックス解析手法を用いて，熱加工部におけるミクロ組織ならびにそれに起因したミクロ強度分布を評価した。また，それらに及ぼす材料特性や溶接施工条件の影響について整理した。

- ・破壊力学的実験手法による溶接部のミクロ組織・強度・靱性評価

破壊靱性試験，シャルピー衝撃試験，疲労試験，応力腐食割れ試験によって，材料の各種破壊・割れ・き裂進展に対する抵抗特性を調査するとともに，溶接部特有の強度的不均質やミクロ組織に注目した系統的な整理を行った。

- ・マルチフィジックス解析と破壊力学試験を併用した溶接部強度・靱性評価

開発したマルチフィジックス解析と破壊力学試験を併用した熱加工部のミクロ強度・靱性評価を行うとともに，熱加工部のミクロ強度・靱性分布に及ぼす材料特性および溶接施工条件の影響について明らかにする。

(5) 溶接・熱加工プロセス事象の確率論的アプローチによる構造体品質・信頼性評価技術の開発

- ・材料・溶接施工条件のばらつきを考慮した溶接品質の確率論的データベース構築

項目(1)～(4)で確立したマルチフィジックス解析を援用して，材料特性や溶接施工条件のばらつき・変動の確率分布を明らかにし，マルチフィジックス解析を援用することで，材料・溶接施工条件のばらつき・変動に基づいた溶接品質の確率論的データベース構築の方向性を検討した。

- ・LRFD法を用いた溶接構造体信頼性評価手法の確立

溶接による欠陥，ミクロ組織に起因する強度・靱性の分布，残留応力，ビード形状や溶接変形に起因する形状ミスマッチなどの諸因子の確率論的取り扱いとLRFD(荷重・耐力係数設計)法による溶接構造体信頼性評価手法について整理した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

(1) S. Tadano, S. Okano, T. Hino, H. Ohnishi, M. Mochizuki and Y. Nakatani, A Simplified Methodology for Estimating Residual Stresses in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing, Materials Transaction, 査読有, Vol. 59, 2018, pp. 420-424.
DOI: 10.2320/matertrans.M2017229

(2) S. Okano, H. Tsuji, R. Ihara, and M. Mochizuki, Coupling Computation between Weld Mechanics and Arc Plasma Process for Residual Stress Analysis, Materials Performance and Characterization 7, 査読有, No. 4, 2018, pp. 559-573.
DOI: 10.1520/MPC20170089

(3) S. Okano and M. Mochizuki, Engineering Model of Metal Active Gas Welding Process for Efficient Distortion Analysis, ISIJ International, 査読有, Vol. 57, 2017, pp. 511-516.

(4) S. Okano, H. Tsuji and M. Mochizuki, Temperature Distribution Effect on Relation Between Welding Heat Input and Angular Distortion, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol. 22, 2017, pp. 59-65.

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) 徳丸大樹, 岡野成威, 望月正人, 溶接金属部ミクロ組織の入熱条件依存性からみた X 線応力測定法の適用性評価, 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会 第 52 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, 2018.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www7.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/pml/en/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：岡野 成威

ローマ字氏名：OKANO Shigetaka

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁) : 00467531

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。