

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360384

研究課題名(和文) 熱加工時におけるプロセス物理現象を考慮した船舶メガ構造体の高精度工作

研究課題名(英文) Precise Thermal Fabrication of Ship Mega-Structures Considering Phenomena of Thermal Process Physics

研究代表者

望月 正人 (MOCHIZUKI, Masahito)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10304015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：船体工作における切断や溶接，さらには溶接後のガス加熱などの矯正作業に代表される熱加工時の工作精度向上のために，熱加工におけるプロセス物理と熱加工力学の融合により精緻化される熱変形支配因子に基づいた高精度変形予測・制御手法を提案し，これらと組立順序の影響を組み合わせた船舶メガ構造体に代表される大型構造物の高精度形状予測・制御手法ならびにニアネットシェイプ工作法を開発した．すなわち，「ミクロプロセス物理－マクロ熱加工力学－メガ構造体力学」のマルチスケールな連結・融合によってもたらされる，大型構造物の革新的な高精度工作，ひいては，より柔軟性のある船体工作の実現を可能とする評価手法を構築した．

研究成果の概要(英文)：Thermal fabrication processes such as plasma-cutting, gas-cutting, arc-welding, laser-welding, or straightening induce thermal and residual distortion. Improvement of fabrication accuracy strongly depends on these distortions, therefore precise predicting and controlling method of thermal and residual distortions must be one of the important technique for ship-building. Hybrid method by using "thermal process physics" and "thermal process mechanics" has been developed in this research in order to effectively improve fabrication accuracy during thermal fabrication process. Furthermore, multi-scale linkage among "microscopic process physics", "macroscopic thermal process mechanics," and "megascopic structural mechanics" considering assembling order with a simplification by using inherent strain methodology achieves the condition of higher accuracy and robustness in welded structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学(船舶海洋工学)

キーワード：建造・艦装 切断・溶接・矯正 溶接変形 プロセス物理 溶接力学

### 1. 研究開始当初の背景

船舶などの大型構造物の製作において、切断や溶接によって生じる変形・残留応力が構造物の強度や性能に影響を及ぼすことは周知の事実であり、古くから多くの取り組みがなされている。しかし、近年の国際競争のさらなる激化に伴う生産コスト削減に向けた取り組みの中で工作精度管理が果たす役割の重要性の高さが今一度指摘されており、熱加工時に生じる変形量を更に高精度に制御することが極めて重要な技術課題となっている。

ここで近年、計測技術・数値解析技術の進歩によって溶接変形の高精度な評価が可能になりつつあり、船舶を対象とした工作精度予測システムの構築も進められている。一方で、工作精度のより一層の向上や効率的な船体工作法の確立に向けた要求は上述のようにますます強くなっており、これに対しては、「従来の固定観念にとらわれない革新的な方法論」の確立が求められていると言える。そのような背景から、溶接熱源とは別の熱源あるいは冷却源を用いて溶接中の温度分布を積極的に制御することによるインプロセス溶接変形制御法を提案し、以下の取り組みを実施してきた。

(1) 平成 15～16 年度：若手研究 (B) 「溶接変形のアクティブインプロセス制御による工作精度向上へのアプローチ」

・溶接変形低減・制御手法として、溶接と同時に加熱もしくは冷却を施すことにより、溶接変形をリアルタイムで制御し、工作精度の向上を達成する見通しを得ることができた。

(2) 平成 17～18 年度：基盤研究 (B) 「温度分布制御による溶接変形のアクティブインプロセスコントロールと工作精度向上」

・提案した手法を用いて溶接変形を効果的に制御するために有効な温度分布を明らかにし、適正な加熱条件および冷却条件を提示した。

(3) 平成 20～22 年度：基盤研究 (B) 「溶接時の温度分布及び材料特性制御による船体ブロックの高精度ニアネットシェイプ工作」

・温度分布制御によるアプローチに加えて、溶接部の相変態膨張を利用する溶接変形低減手法を取り上げ、変形低減に有効な適正溶接施工条件などに関する指針を提示した。

言い換えると、これまでは、「如何に変形を生じさせずに工作精度を向上させるか」が注目され、上述の研究を含めた多くの研究がなされてきたが、今後の発展形として、元々の材料の形状不整や切断時の変形に応じて溶接後の形状を意図的に制御することを考えた施工が可能となれば、船体の工作精度向上に大きく貢献できると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、上述のような背景、そして研究の進捗の元で、「より柔軟性のある船体工作の実現」に向けて、熱加工に伴う変形のより高精度な予測・評価のために、プロセス物理・熱加工力学の融合により、メガ構造体形状制御に向けたマルチスケールな取り組みに展開するという着想に至った。すなわち、種々の計測実験と数値解析を用いた検討を併用することによって、革新的な溶接変形制御手法を提案し、それを基盤として、船体ブロックに代表される船舶メガ構造体への適用に向け、切断・溶接・矯正といった実際の建造工程に沿った「高精度ニアネットシェイプ工作法」の確立へ向けた手法を開発することを研究の目的ならびに目標とした。

### 3. 研究の方法

上記の目的ならびに目標を達成するために必要となる、本研究の具体的な研究方法を以下に示す。

(1) 溶接科学に基づく熱輸送現象と熱弾塑性力学挙動を連成させた高精度溶接変形解析手法の開発・・・数値解析による溶接中の温度場特性と固有ひずみ発生特性の関係の明確化

(2) 溶接に伴う残留応力-ひずみ場および溶接変形の高精度実験計測手法の開発・・・実験による溶接中の温度場特性と固有ひずみ発生特性の関係の明確化

(3) 熱源および温度場制御による切断・溶接時における変形低減手法の開発・・・項目 1 および 2 で得た知見に基づく低減プロセスの提案と他の熱加工プロセスへの展開

(4) 溶接条件依存型固有ひずみ分布データベースの拡充・・・項目 1 で提案した解析手法を用いた固有ひずみ分布データベースの拡充

(5) 組立順序を考慮した固有ひずみ法による船体工作精度評価手法の開発・・・上述の詳細知見を活かした高精度な大型構造物の形状予測と適正組立工程の提案

ここで、従来の溶接変形に関する研究は、国内外を含めて、「溶接熱伝導論」と「熱弾塑性力学」の組合せによる、いわゆる「溶接力学 (Welding Mechanics)」という比較的狭い一つの工学分野における取り組みであり、プロセス物理やアーク物理といった溶接現象そのものを取り扱う「溶接科学 (Welding Science)」分野との融合といった革新的な取り組みはほとんど例がない。すなわち、溶接「科学」と溶接「工学」の「マルチスケール」な「異分野融合」という従来には見受けられなかった着想を本研究で用いる手法によつ

て具体化する。そのためには、熱・材料・力学という熱加工現象の本質的なメカニズムの解明が必要であることから、学術的な観点からも極めて有意義であり、工学の将来への大きな発展が期待できる。

一方で、変形矯正などの機械加工、熱加工の必要性を限りなく少なくすることによって、製造効率の向上も大いに期待できる。また、本研究によって得られた知見は、溶接に限らず、材料の熱・材料・力学挙動の連成する熱処理、製鋼、鋳造、半導体製造など、工学プロセス一般に適用することが可能であり、さらには将来のそのシステム化との統合も十分に適應できることから、本科学研究費補助金の助成により、学術、工学のどちらの将来の発展にも大きく寄与することが期待される。

#### 4. 研究成果

(1) 溶接科学に基づく熱輸送現象と熱弾塑性力学挙動を連成させた高精度溶接変形解析手法の開発

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開発

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、溶接変形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することができた。

プロセス物理に基づく熱輸送現象と熱弾塑性力学挙動の連成解析手法の開発

上述の新しい溶接温度場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によって、固有ひずみの発生機構および溶接後の分布特性を評価した。さらに、実用的な計算時間のレベルで用いることができる溶接温度場解析手法と熱弾塑性解析手法の「逐次」連成解析手法も併せて開発した。

(2) 溶接に伴う残留応力-ひずみ場および溶接変形の高精度実験計測手法の開発

溶接中の温度分布・変形挙動のリアルタイム計測

高精度溶接変形解析手法の精度検証に用いるため、熱電対および接触型変位計を用いた溶接中の温度分布および変形挙動をリアルタイムかつ高精度に計測することができた。

溶接後の残留応力-ひずみ場および溶接変形の三次元計測

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、三次元計測機を用いて溶接変形を計測し、高精度切断・溶接変形解析手

法が十分な精度を有することの検証を行った。

(3) 熱源および温度場制御による切断・溶接時における変形低減手法の開発

熱源制御による変形低減手法に関する基礎検討

高精度切断・溶接変形解析手法を用いて、熱源・温度場制御ハイブリッド化へ向けた熱源制御による変形低減手法の有効性に関する基礎検討を実施し、支配パラメータを整理した。

熱源・温度場のハイブリッド制御による変形低減手法の開発

高精度切断・溶接変形解析手法と高精度実験計測手法を併用しながら、変形低減に有効な制御指針に基づいて、熱源・温度場のハイブリッド制御による革新的変形低減手法を開発した。

切断・ガス加熱矯正時の温度分布と変形挙動のリアルタイム計測

溶接とは別の熱源による温度場と変形挙動を把握し、溶接を対象としたこれまでの検討の結果と比較・検証することにより、また、切断およびガス加熱に特有となるパラメータについて整理した。

船体ブロックの変形制御への展開

熱源・温度場のハイブリッド制御法を、船体ブロックのような実構造モデルに適用し、変形コントロール効果を実証実験により確認した。

(4) 溶接条件依存型固有ひずみ分布データベースの拡充

高精度切断・溶接変形解析手法の精度検証と固有ひずみ発生機構の一般化

高精度切断・溶接変形解析手法と高精度実験計測手法を併用することにより、パラメトリック解析を行う上での解析手法の精度を検証するとともに、従来知見を踏まえながら固有ひずみの発生機構を一般化するための方法論を導出した。

溶接熱・継手寸法・構造形状を考慮した固有ひずみ分布データベースの拡充

船体ブロックに代表される複雑形状・大型構造体の切断・溶接変形予測が可能となるように、溶接入熱条件・継手寸法・構造形状に起因する拘束度などをパラメータとして、高精度切断・溶接変形解析手法および高精度実験計測手法を用いて、固有ひずみ分布データベースを拡充した。

熱源・温度場制御法を対象とした固有ひずみ分布データベースの拡充

熱源・温度場のハイブリッド制御法を用いた場合の船体ブロック等の工作精度の評価

が可能なように、熱源・温度場のハイブリッド制御法で適用される施工条件範囲を対象として、高精度溶接変形解析手法を用いて、固有ひずみ分布データベースを拡充した。

(5) 組立順序を考慮した固有ひずみ法による船体工作精度評価手法の開発

固有ひずみ法を用いた大型構造物における溶接変形の弾性解析手法の開発

組立順序を考慮した固有ひずみ法による船体工作精度評価手法の開発に向けて、固有ひずみ法を用いた大型構造物の組立時における溶接変形の弾性解析手法に関する基礎検討を基本的な継手モデルを用いて実施し、解析手法の妥当性を確認した。

組立順序の影響を考慮できる大型溶接構造物の溶接変形解析手法の開発

固有ひずみ法による船体工作精度評価手法を、組立順序の影響を考慮できるように拡張し、この解析手法を用いて切断・溶接・矯正といった一連の船体ブロックなどの組立工程の適正化の基本指針を得ることができた。

船体ブロックの工作精度評価とニアネットシェイプ工作法への適用

高精度切断・溶接変形解析手法と組立順序を考慮した大型溶接構造物の変形解析手法を併用し、船体ブロックの工作精度の評価ならびにニアネットシェイプ工作法の有効性を評価した。さらに、種々の船舶メガ構造体のような実機を対象としてその適用性・有効性を確認した。

以上のように、船体工作における切断や溶接、さらには溶接後のガス加熱などの矯正作業に代表される熱加工時の工作精度向上のために、熱加工におけるプロセス物理と熱加工力学の融合により精緻化される熱変形支配因子に基づいた高精度変形予測・制御手法を提案し、これらと組立順序の影響を組み合わせた船舶メガ構造体に代表される大型構造物の高精度形状予測・制御手法ならびにニアネットシェイプ工作法を開発することができた。すなわち、「ミクロプロセス物理 - マクロ熱加工力学 - メガ構造体力学」のマルチスケールな連結・融合によってもたらされる、大型構造体の革新的な高精度工作、ひいては、より柔軟性のある船体工作の実現を可能とする評価手法を構築した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

M. Mochizuki, "Numerical Simulations of Micro-, Macro-, and Mega-Scale Structurization by Welding Processes," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 10, Edited by H. Cerjak and N. Enzinger, TU Graz Publishing, Graz, Austria, pp.

131-139 (2013) 査読有.

H. Kitano, S. Okano and M. Mochizuki, "High Accurate Residual Stress Evaluation by Deep Hole Drilling Technique Considering Three-dimensional Stress Fields," Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 31, No. 4, pp. 124s-128s (2013) 査読有.

D. Sugitani and M. Mochizuki, "Experimental Study on Effects of Root Gap and Fillet Size of Welds on Joint Strength," Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 31, No. 4, pp. 104s-108s (2013) 査読有.

N. Ochi, S. Okano and M. Mochizuki, "A New Welding Process Simulation Using a Hybrid Particle and Grid Method with Explicit MPS," Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 31, No. 4, pp. 40s-43s (2013) 査読有.

M. Mochizuki and S. Okano, "Effect of Weld Imperfection on Fracture Assessment of Undermatched Joint of High Strength Steel for Penstocks," High Strength Steels for Hydraulic Plants - Design Concepts - Pressure Conduits, H. Cerjak, N. Enzinger, R. Greiner and G. Genz, Eds, Verlag der Technischen Universitaet Graz, ISBN 978-3-85125-292-7, pp. 273-282 (2013) 査読有.

辻明宏, 橋本匡史, 岡野成威, 望月正人, "溶接残留応力場における主応力の変化に関する考察", 材料, 第62巻, 第7号, pp. 424-429 (2013) 査読有.

越智申久, 岡野成威, 望月正人, "MPS 陽解法と格子法の連成による溶接プロセスの数値シミュレーション", 日本計算工学会論文集, 第2013巻, No. 20130005, pp. 1-8 (2013) 査読有.

M. Hata, S. Itoh, T. Sugihira, Y. Yamashita, A. Kamio, M. Shibahara, and M. Mochizuki, "Investigation of Factors Influencing Welding Deformation of Ship Block by Inherent Strain Analysis Using Idealized Explicit FEM," Journal of Physics, Conference Series, Vol. 379, No. 012055 (2012) 査読有.

DOI:10.1088/1742-6596/379/1/012055

H. Kitano, S. Okano and M. Mochizuki, "A Study for High Accuracy Measurement of Residual Stress by Deep Hole Drilling Technique," Journal of Physics, Conference Series, Vol. 379, No. 012049 (2012) 査読有.

DOI:10.1088/1742-6596/379/1/012049

S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda and T. Ueyama, "Effect of Welding Conditions on Reduction of Angular Distortion by Welding with Trailing Heat Sink," Science and Technology of Welding and Joining, Vol.

17, No. 4, pp. 264-268 (2012) 査読有.

A. Kawaguchi, S. Itoh, M. Mochizuki and M. Kameyama, "Large-Scale Computation of Welding Residual Stress," Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 2, pp. 613-619 (2011) 査読有.

S. Okano, M. Mochizuki, K. Yamamoto and M. Tanaka, "An Attempt to Enhance Numerical Models of Angular Distortion by Considering the Physics of the Welding Arc," Welding in the World, Vol. 55, No. 5/6, pp. 93-100 (2011) 査読有.

岡野成威, 田中学, 望月正人, "溶接アークの熱源特性を考慮した溶接変形の数値解析 - 入熱パラメータと溶接角変形の関係に関する一考察", 溶接学会論文集, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 77-85 (2011) 査読有.

岡野成威, 望月正人, 豊田政男, 上山智之, "熱源後方に冷却を伴う突合せ溶接中に生じる面内回転変形に及ぼす収縮変形の影響", 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 70-76 (2011) 査読有.

[学会発表](計 25 件)

M. Mochizuki, "Micro-, Macro-, and Mega-Scale Structural Analysis of Welded Components by Using Numerical Simulations and Their Experimental Validations in Japan," International Conference on Welding and Related Technologies - Present and Future, Paton Welding Institute (Kiev, Ukraine) (2013 年 11 月 25 日) 査読有・招待講演.

M. Mochizuki, "Analysis of SCC Initiation and Propagation Based on Probabilistic Fracture Mechanics Under Residual Stresses by Machining and Welding Processes of Pipes," Residual Stress Summit 2013, The Hilton Garden Inn Idaho Falls (Idaho Falls, USA) (2013 年 10 月 7 日) 査読無・招待講演.

A. Tsuji, S. Okano and M. Mochizuki, "Improving Reliability of X-Ray Residual Stress Measurement on Phase Transformed Welds," 66th Annual Assembly of the International Institute of Welding, Congress Center Essen (Essen, Germany), IIW Doc. X-1737-13 (2013 年 9 月 11 日) 査読無.

越智申久, 岡野成威, 望月正人, "粒子法を用いた溶接施工時の高精度温度場評価に向けた検討, 日本保全学会第 10 回学術講演会, ホテル阪急エキスポパーク (大阪府吹田市) (2013 年 7 月 25 日) 査読無.

小林真治, 岡野成威, 望月正人, "高精度品質管理のための溶接構造体形状制御に関する検討", 日本保全学会第 10 回学術講演会, ホテル阪急エキスポパーク (大阪府吹田市) (2013 年 7 月 25 日) 査読無.

張朔源, 葛蒲敬久, 城鮎美, 橋本匡史,

辻明宏, 岡野成威, 望月正人, "溶接時応力その場測定システムの開発", 第 47 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区) (2013 年 7 月 18 日) 査読無.

S. Okano and M. Mochizuki, "Mitigation of Welding-Induced Tensile Residual Stress at Surface of Heavy Section Plate by In-Process Control Welding with Trailing Heat Sink," Proceedings of the 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Paris Marriott Rive Gauche Hotel & Conference Center (Paris, France), PVP2013-98071 (2013 年 7 月 14 日) 査読有.

越智申久, 岡野成威, 望月正人, "数値安定性に優れた動的緩和法と MPS 粒子法を用いた静的熱変形解析手法と FEM 連成に関する検討", 第 18 回計算工学講演会, 東京大学 (東京都目黒区) (2013 年 6 月 19 日) 査読無.

M. Mochizuki, "Numerical Simulation of Weld Residual Stress from Mega- to Micro-Structures," 9th International Conference on Residual Stresses, Garmisch-Partenkirchen International Congress Center (Garmisch-Partenkirchen, Germany) (2013 年 7 月 14 日) (査読無・招待講演).

越智申久, 岡野成威, 望月正人, "MPS 陽解法の溶接解析への適用性に関する基礎的検討", 第 17 回計算工学講演会, 京都教育会館 (京都市) (2012 年 5 月 29 日) 査読無.

[図書](計 1 件)

M. Mochizuki, "Minimizing Angular Distortion in Welding by Reverse-Side Heating," Minimization of Welding Distortion and Buckling: Modeling and Implementation, P. Michaleris, Ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, United Kingdom, pp. 273-288 (2011).

[その他]

ホームページ等

[http://www7.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/Pro-M\\_Lab\\_Home.html](http://www7.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/Pro-M_Lab_Home.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

望月 正人 (MOCHIZUKI, Masahito)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10304015

### (2) 研究分担者

岡野 成威 (OKANO, Shigetaka)  
大阪大学・大学院工学研究科・特任助教  
研究者番号: 00467531