

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420873

研究課題名(和文) GPGPUコンピューティングを活用した大規模構造物の高精度溶接変形予測法の開発

研究課題名(英文) Development of Precise Prediction System of Welding Deformation for Large-scale Structure Using GPGPU Computing

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本申請研究では、理想化陽解法FEMに新たにGPGPUを導入し、なおかつ超並列処理を施した大規模・高速化解析システムを開発した。本システムは、実溶接施工における仮付け、ルートギャップ、目違い、部材間の寄せ作業等の組立工程におけるあらゆる因子の影響についても検討することができる。本システムの開発により、船舶建造時の溶接組立工程における溶接部個々の変形からブロック構造全体の変形に至るまで、作業工程ごとに発生する溶接変形を予測することが可能になった。本システムは、船舶分野における溶接変形のみならず、各種構造物の溶接変形・残留応力予測についても適用することができ、今後の発展性に期待が持てる手法である。

研究成果の概要(英文)：In this research, a new analysis system based on Idealized Explicit FEM using GPU was developed. Additionally, massively parallel processing is introduced to this system for high-speed computation. The proposed system is method is effective in large-scale analysis. Using this system, it's possible to predict the influence of several factors related to welding procedure such as tack welds, behavior of root gap, misalignment in an assembly process.

By developing this system, the prediction of deformation during welding assembling process in ship building becomes to be possible. Since this system can be applied to not only welding deformation problem in ship building but also welding residual stress problem of various structure. This means that the proposed system is promising in the future.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：GPGPU 溶接変形 大規模解析 高速解析 熱弾塑性解析 船体構造 理想化陽解法FEM ルートギャップ

## 1. 研究開始当初の背景

船舶や橋梁などの鋼構造物の建造においては、工作精度において問題が生じる場合があります。特に船舶の建造においては、船体ブロック同士を接合する前に、熟練工による油圧ジャッキを用いた寄せ作業や歪取り作業等の手直し作業が必要となり、それがドック内工事期間の延長に繋がる場合もあり、生産コストを著しく上昇させる原因の一つとなっている。よって、ブロック組立全工程を精度良くシミュレートできる手法があれば、生産性の向上に少なからず貢献できると考えられる。しかしながら、船体ブロックの溶接組立工程における変形要因は複雑で、溶接による熱変形の他に、ブロック同士の配置によるギャップや目違い、溶接中におけるルートギャップの変化、油圧ジャッキなどを用いた寄せ作業に起因する変形量等、さまざまな要因が絡み合っている複合問題である。よって、それらを考慮に入れた解析手法を構築することで、溶接変形の発生原因(寄せ作業、目違い、ルートギャップ、熱変形等)をその成分ごとに分離して定量的に把握することができ、溶接変形メカニズムの解明および溶接変形の低減に繋がると考えられる。しかし、これらの諸因子を考慮に入れた検討方法/解析手法は、野本ら、村川ら、望月ら一の研究グループによって提案されているが、その手法を船体大型ブロック同士の溶接接合を想定した大規模な構造物に適用するには、多くの課題が存在する。よって、これらの課題を解決し、設計/施工段階において実用可能な船体大型ブロック溶接組立時における新しい変形予測システムが求められている。

## 2. 研究の目的

本申請研究では、申請者が独自に開発した陽解法をベースとする大規模解析手法である「理想化陽解法 FEM」を GPU(Graphics Processing Unit)の導入によりさらに改良し、大規模構造物を溶接組立により製造する際に発生する溶接変形を予測するシステムを開発する。すなわち、製造現場で用いられる CAD 情報から部材形状および溶接箇所に関する情報を抽出することにより、FEM 解析のための要素分割および溶接される要素を抽出し、組立時における強度部材を溶接することにより、製品が完成する全過程における溶接変形を、溶接工程に従って予測可能なシステムを開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### 平成 25 年度

申請者らが平成 21 年に開発した理想化陽解法 FEM に対し GPGPU を導入した新しい超並列大規模・高速解析手法を開発する。さらに、仮付け、ルートギャップ、目違い、ブロックの寄せ作業等の組立工程における諸因子の影響について検討可能な溶接変形解析手法を、構築する。具体的な検討項目は以下の通

りである。

- ① GPGPU の導入による超並列大規模解析用理想化陽解法 FEM の開発
- ② 仮付け、ルートギャップ、目違い、ブロックの寄せ作業等の組立工程における諸因子の影響を考慮可能な溶接変形解析法の構築
- ③ 基礎試験(板継溶接・T 継手隅肉溶接)の実施および画像計測

### 平成 26 年度以降

3D-CAD データから直接、溶接用自動要素分割作成システムを開発し、以上の手法を統合した溶接変形大規模解析システムを構築した上で、船体大型ブロック組立溶接時に発生する溶接変形の発生予測を実施する。さらには、溶接変形低減方法・制御方法についても検討する。

- ④ 3D-CAD データからの溶接線を自動抽出可能な要素分割作成システムの開発
- ⑤ ①②④の要素技術を統合化した船体大型ブロックの溶接組立変形解析システムの開発
- ⑥ 提案システムを用いた船体大型ブロック溶接組立時に発生する変形の発生予測
- ⑦ 船体大型ブロック溶接組立時の変形低減・制御を可能とする最適化システムの構築

## 4. 研究成果

船体大型ブロック同士を接合する際の溶接変形を解析する場合においては、解析規模や解析時間の制限があり実現困難である。そこで、この問題を解決するために、本申請研究では、理想化陽解法 FEM に新たに GPGPU を導入し、なおかつ超並列処理を施した高速解析法を開発した。この手法は、解析自由度数が大きいほど省メモリ・高速化の効果は大きく、申請研究のような大規模解析を実現するためには非常に有効である。また、本手法は動的陽解法 FEM をベースに理論展開しているため、大きなマトリクス演算を必要としないことから、大規模解析に適した手法である。また、本手法は、実溶接施工における仮付け、ルートギャップ、目違い、部材間の寄せ作業等の組立工程におけるあらゆる因子の影響についても検討することができる。

図 1 に、解析結果の一例として、仮付け間隔が横収縮に及ぼす影響について示す。仮付け間隔が大きくなるほど、横収縮量が大きくなるのが分かる。一方、図 2 に示す、溶接速度が速い  $v=15\text{mm/s}$  の場合においては、仮付け間隔が小さいほど横収縮が小さくなる傾向にある。このように本手法を用いることで、溶接速度や仮付け間隔が溶接時のルートギャップに影響を与え、それにより残留変形が変化の様子を再現することができる。

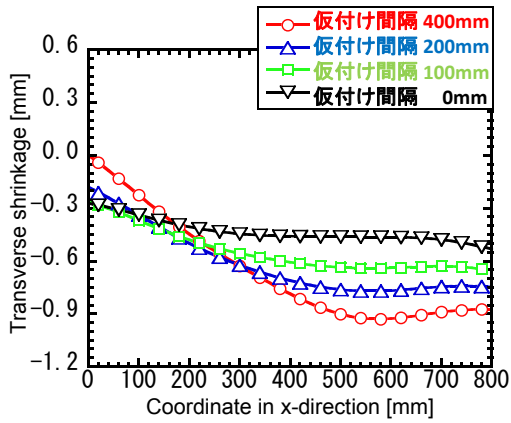


図1 低速溶接時における仮付け間隔が横収縮に及ぼす影響(v=1.6 mm/sec)

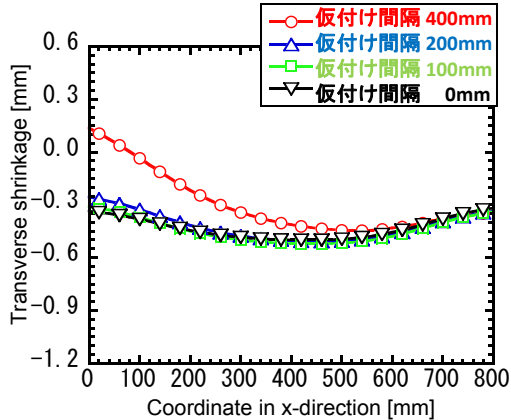


図2 高速溶接時における仮付け間隔が横収縮に及ぼす影響(v=15 mm/sec)

次に、開発システムを船体大型ブロック溶接組み立て時の大規模解析に適用した事例について示す。図3は、解析対象となる小組立および大組立工程の解析の際に用いた解析規模(要素数)を示す。また、図4には、解析に用いた要素分割図を示す。解析では、部材数42、溶接線69本すべての溶接を考慮した。節点数は約550万、要素数は440万、自由度は1650万、ステップ数は20万である。図5に解析結果として得られた変位分布を示す。同図に示す様に、開発システムを用いることで、船体大型ブロック溶接組み立て時に発生する変形の発生予測が可能となること分かった。

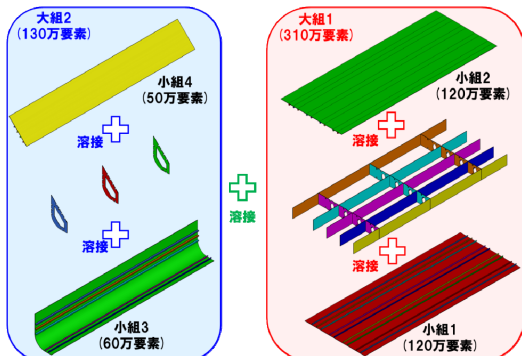


図3 船体大型ブロック解析時の要素数

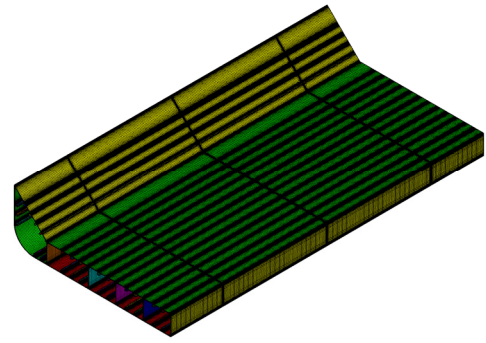


図4 船体大型ブロック解析のための要素分割図

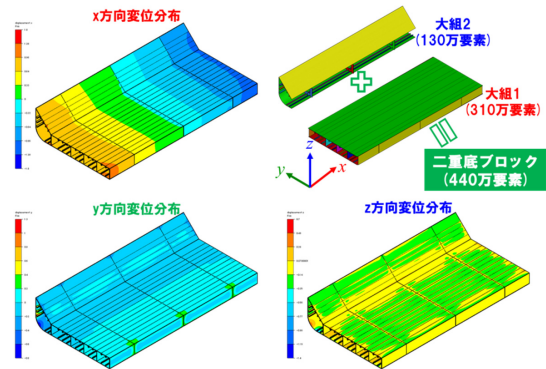


図5 船体大型ブロックの溶接変形

本研究による一連の要素技術の開発およびそれらを統合した変形予測システムの開発により、船舶建造時の溶接組立工程における溶接部個々の変形からブロック構造全体の変形に至るまで、作業工程ごと(溶接線1本ごと、小組立ごと、大組立ごと)に発生する溶接変形をその発生因子(ギャップや目違い、ルートギャップ、寄せ作業等)ごとに影響度を分離して予測することが可能になる。ここで得られる知見を設計/施工に活用することにより、変形を考慮した設計指針あるいは最適溶接順序等の工作手順を得ることができるため、構造全体としての変形量を低減する事ができ、船全体の工作精度の向上に繋がると考えられる。このことにより、建造ドックにおいてブロックを搭載する際の作業ロスを低減することができるため、作業コストの低減のみならず、ドック内工事期間の短縮にも繋げることができると考えられ、建造現場に対する波及効果は大きいと考えられる。

また本手法は、船舶分野における溶接変形のみならず、図6に示す様に各種構造体の溶接変形・残留応力予測についても適用することができ、今後の発展性に期待が持てる手法であると言える。

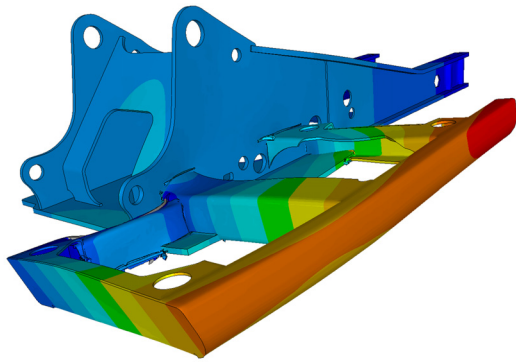


図6 建機構造体溶接時の溶接変形

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9件)

- ① K. Ikushima, T. Minamino, A. Kawahara, H. Yuto, A. Nagai, K. Tani, T. Tsuji, J. Yamada, M. Nakatani, M. Shibahara, Enhanced large-scale analysis method and its application to multi-axial pipe weld, *Welding in the World*, 第60巻, 2016, pp.1-15. (査読有)  
DOI: 10.1007/s40194-016-0350-8
- ② K. Ikushima, M. Shibahara: Large-scale Non-linear Analysis of Residual Stresses in Multi-pass Pipe Welds by Idealized Explicit FEM, *Welding in the World*, 第59巻, 2015, pp.839-850.  
DOI: 10.1007/s40194-015-0263-y (査読有)
- ③ S. TAKABA, M. SHIBAHARA, M. MOCHIZUKI, Study on Deformation Behavior of Multi-pass Weld Joints for I-girder Bridge by Using Idealized Explicit FEM, *溶接学会論文集*, 第33巻, 2015, pp.139s-142s. (査読有)  
DOI: 10.2207/qjjws.33.139s
- ④ K. Ikushima, K. Kaigaishi, M. Shibahara, Large-Scale Welding Deformation Analysis of Ship Structure by Idealized Explicit FEM Using Multigrid Method Using Multigrid Method, *The Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2015, pp.263-270. (査読有)
- ⑤ K. Ikushima, M. Shibahara: Study on Welding Distortion of Stiffened Thin-Plate Structures Using Idealized Explicit FEM, *溶接学会論文集*, 第33巻, 2015, pp.175s-179s. (査読有)  
DOI: 10.2207/qjjws.33.175s
- ⑥ K. Ikushima, S. Itoh, M. Shibahara: Development of Idealized Explicit FEM Using GPU Parallelization and Its Application to Large-scale Analysis of Residual Stress of Multi-pass Welded Pipe Joint, *Welding in the World*, 第59巻, 2015, pp.589-595.  
DOI: 10.1007/s40194-015-0235-2 (査読有)
- ⑦ 生島 一樹, 伊藤 真介, 西川 聡, 柴原 正和: 理想化陽解法 FEM による円筒多層溶接継手の3次元移動熱源残留応力解析, *溶接学会論文集*, 第33巻, 2015, pp.69-81  
DOI: 10.2207/qjjws.33.69 (査読有)
- ⑧ 生島 一樹, 伊藤 真介, 高倉 大典, 津乗 充良, 柴原 正和: 反復サブストラクチャー法を導入した理想化陽解法 FEM による大規模溶接変形残留応力解析, *溶接学会論文集*, 第32巻, 2014, pp.223-234.  
DOI: 10.2207/qjjws.32.223 (査読有)
- ⑨ K. Ikushima, M. Shibahara: Prediction of Residual Stresses in Multi-pass Welded Joint using Idealized Explicit FEM accelerator by a GPU, *Computational Material Science*, 第93巻, 2014, pp.62-67. (査読有)

〔学会発表〕(計 22件)

- ① T. SAITO, M. SHIBAHARA, K. IKUSHIMA, A. KAWAHARA, Y. KITAMURA, D. TAKAKURA: The study of groove shape optimization on T-joint weld, *International Seminar on Welding Science and Engineering 2015 (WSE2015)*, 2015年9月22日, 北京, 中国
- ② K. IWATA, K. IKUSHIMA, M. SHIBAHARA: Analysis of Welding Deformation Under 1st Pass Welding Considering Root Gap and Tack Welds, *International Seminar on Welding Science and Engineering 2015 (WSE2015)*, 2015年9月22日, 北京, 中国
- ③ K. Ikushima, T. Harada, M. Shibahara: Analysis of Welding Deformation on Construction of Large Thin-plate Structure by Idealized Explicit FEM Using Multigrid Method, *11th International Seminar Numerical Analysis of Weldability*, 2015年9月30日, グラーツ, オーストリア
- ④ K. Ikushima, M. Shibahara: Large-scale Residual Stress Analysis of Multi-pass Welded Pipe Joint Using Idealized Explicit FEM Accelerated by a GPU, *11th International Seminar Numerical Analysis of Weldability*, 2015年9月30日, グラーツ, オーストリア
- ⑤ 山田 順也, 山里 久仁彦, 中谷 光良, 河原 充, 南野 寿造, 生島 一樹, 柴原 正和: 大型円筒構造物における溶接変形低減のための製作方法の検討, *溶接学会全国大会*, 2015年9月2日, 北海道科学大学(北海道札幌市)

- ⑥ 齋藤 俊明, 生島 一樹, 河原 充, 柴原正和, 高倉 大典: 統合的設計管理手法 (TDM) を用いた開先形状の最適化に関する研究, 溶接学会全国大会, 2015 年 9 月 2 日, 北海道科学大学(北海道札幌市)
- ⑦ 生島 一樹, 北村 徳識, 河原 充, 南野 寿造, 柴原正和, 湯藤 尚人, 永井 昭弘, 谷 和彦, 辻 丈彰, 山田 順也, 中谷 光良: 理想化陽解法 FEM を用いた多重パイプ継手の残留応力解析, 溶接学会全国大会, 2015 年 9 月 2 日, 北海道科学大学(北海道札幌市)
- ⑧ 岩田 昂士, 生島 一樹, 柴原正和: ルートギャップおよび仮付けを考慮した初層溶接時における溶接変形の解析, 溶接学会全国大会, 2015 年 9 月 2 日, 北海道科学大学(北海道札幌市)
- ⑨ K. Ikushima, T. Minamino, A. Kawahara, M. Shibahara, H. Yuto, A. Nagai, K. Tani, T. Tsuji, J. Yamada, M. Nakatani: Enhanced large-scale analysis method and its application to multi-axial pipe weld, The 68th Annual Assembly of the International Institute of Welding, 2015 年 7 月 3 日, ヘルシンキ, フィンランド
- ⑩ K. Ikushima, K. Kaigaishi, M. Shibahara: Large-Scale Welding Deformation Analysis of Ship Structure by Idealized Explicit FEM, 25th Annual International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015 年 6 月 21 日, コナ, ハワイ
- ⑪ 山田順也, 山里久仁彦, 谷 和彦, 中谷 光良, 河原 充, 生島一樹, 柴原正和: 大型円筒構造物多層溶接時の溶接変形に及ぼす拘束治具の影響, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑫ 山田順也, 山里久仁彦, 山崎洋輔, 中谷 光良, 河原 充, 生島一樹, 柴原正和: 大口径リング長手多層溶接時の溶接変形に及ぼす溶接方法の影響, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 4 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑬ 齋藤俊明, 高倉大典, 柴原正和, 生島一樹, 河原充: 溶接順序を考慮した開先形状の最適化に関する研究, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 4 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑭ 生島一樹, 竹内啓洋, 貝ヶ石康平, 柴原正和, 阿部雄太, 木内大貴: 理想化陽解法 FEM を用いた建機構造体モデルの溶接変形解析, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑮ 生島一樹, 柴原正和: マルチグリッド法を導入した理想化陽解法 FEM による大規模薄板構造物の溶接変形解析, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑯ 生島一樹, 柴原正和: 重合メッシュを用いた理想化陽解法 FEM による溶接変形・残留応力解析, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑰ 鷹羽新二, 柴原正和, 望月正人: 鋼橋多層盛溶接継手における溶接変形解析, 溶接構造シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 大阪大学銀杏会館(大阪府吹田市)
- ⑱ S. TAKABA, M. SHIBAHARA, M. MOCHIZUKI: Study on Deformation Behavior of Multi-pass Weld Joints for I-girder Bridge, Visual JW 2014, 2014 年 11 月 28 日, ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田市)
- ⑲ K. Ikushima, M. Shibahara: Study on Welding Distortion of a Stiffened Thin Plate Structure Using Idealized Explicit FEM, Visual JW 2014, 2014 年 11 月 26 日, ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田市)
- ⑳ K. Ikushima, M. Shibahara: Large Scale Non-Linear Analysis of Residual Stresses in Multi-Pass Pipe Welds by Idealized Explicit FEM, The 67th Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), 2014 年 7 月, Seoul, Korea
- ㉑ K. Ikushima, M. Shibahara, H. Murakawa: Large-scale Analysis of Welding Residual Stress Problem by Idealized Explicit FEM Using Iterative Substructure Method, the 5th International Conference on Welding Science and Engineering (WSE2013), 2013 年 10 月 12 日, Weihai, China
- ㉒ K. Ikushima, M. Yamamoto, A. Kawahara, M. Shibahara: Numerical Analysis of Welding Deformation for Thin Plate Welded Structures Using Idealized Explicit FEM, the 5th International Conference on Welding Science and Engineering (WSE2013), 2013 年 10 月 12 日, Weihai, China

[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

<http://www.marine.osakafu-u.ac.jp/~lab03/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴原正和 (SHIBAHARA, Masakazu)  
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：20350754

### (2) 研究分担者

伊藤真介 (ITOH, Shinsuke)  
大阪府立大学・大学院工学研究科・客員准教授  
研究者番号：50535052

村川英一 (MURAKAWA, Hidekazu)  
大阪大学・接合科学研究所・教授  
研究者番号：60166270

### (3) 連携研究者

なし