

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760634

研究課題名（和文）メガ構造体における溶接変形超高速並列解析システムの開発

研究課題名（英文）Development of parallelized analysis system of welding deformation for mega steel construction.

研究代表者

伊藤 真介 (SHINSUKE ITOH)

大阪府立大学 大学院工学研究科 准教授

研究者番号：50535052

研究成果の概要（和文）：

3D-CAD データからの溶接線を考慮したモデル作成法の開発および反復サブストラクチャー法を基に高速溶接変形解析手法の開発を行った。モデル作成法に関しては、CAD ソリッドデータを基にモデルを作成するが、固有ひずみ解析を行う上で、溶接線の交差部を除く直線部に関しては自動的に要素分割を行うことができるようになった。その後、熱弾塑性解析によって得られた適切な継手モデルの塑性ひずみ分布を用いて大型船体ブロックの溶接線に固有ひずみを与えた固有ひずみ解析を行った。本解析結果とレーザー変位計による実機計測の変形を比較したところ、変形傾向の良好な一致を示した。さらに溶接線の各方向が大型ブロックの変形に及ぼす影響について検討を行った。

研究成果の概要（英文）：

Welding is one of the essential processes for assembling steel structures such as ships and bridges. However, it is impossible to avoid residual stress and distortion. To prevent or minimize these problems, quantitative prediction and effective control of welding residual stress and deformation are necessary.

To compute welding deformation, two methods are often used. One is the thermal elastic plastic finite element method (FEM) and the other is elastic FEM using inherent deformation. Thermal elastic plastic FEM is effective for accurate evaluation of welding deformation but requires large computational time. Elastic FEM using inherent deformation requires very short computational time, but the inherent deformations of all welding joints composing the structure must be known beforehand. However, these two methods can be combined to take advantage of both. The inherent deformations of welding joints are computed using thermal elastic plastic FEM and stored in a database, which is used to compute the welding deformations of large structures using elastic FEM.

Nevertheless, these methods for welding analysis can require very long computational time and memory, even if the model is a simple weld joint. Therefore, for faster calculations and analyzing large structures, we developed the iterative substructure method (ISM) and idealized explicit FEM for welding simulation. In this study, a thermal elastic plastic analysis using ISM is applied to a weld joint model. The plastic strain distribution obtained by ISM is used for inherent strain analysis using idealized explicit FEM to analyze a block model of a large ship. The block model is 8.5 m x 8.5 m x 4.4 m with more than 300 welding lines. The simulated results agree well with the measured distortion. In addition, the influence of the welding direction on the welding deformation of the targeted ship block is investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
--	------	------	----

2010 年度	1300000	390000	1690000
2011 年度	1300000	390000	1690000
年度			
年度			
年度			
総 計	2600000	780000	3380000

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：材料・構造工学

## 1. 研究開始当初の背景

船舶や圧力容器などの大型の鋼構造物においては、多くの場合、溶接によって部材の組立てが行われている。しかし、このような大型溶接構造物では、組立部材の目違いや座屈などの溶接を原因とした変形がしばしば問題となっている。これらの問題に対して従来、様々な研究が行われており、その中でも数値解析による予測も注目を浴びているが、未だに十分に活用されているとは言い難い。その理由として、溶接問題は、加熱から冷却までの全過程を時間経過に従って追跡する逐次解析が必要となり、詳細なモデルを使用すると計算時間が膨大になることが挙げられる。また、溶接部近傍では高温となるため、物性値の温度依存性を考慮した熱弾塑性解析を実施しなければならない。このように非定常強非線形問題である溶接現象の力学的解析には数千～数万ステップの計算が必要となり、設計で実施可能な通常の応力解析の規模と比較して、実施可能な溶接解析の規模は数万自由度程度の試験片レベルのモデルに限られるのが現状である。そのため、造船や自動車などの溶接構造物を生産する企業では、実製品を直接対象とした大規模溶接解析手法の開発が強く望まれている。近年では、溶接を対象とした様々な汎用ソフトが開発されているものの、解析モデルを構成する要素数の制限や計算時間の制約から CAE 推進という時代の流れの中で、溶接のシミュレーションが十分に活用されていないのが現状である。

溶接問題に適用可能な大規模解析法に注目すると、オープンソースの大規模並列 CAE システムである ADVENTURE を発展させて開発された商用コードを用いても熱弾塑性解析が可能であるが、溶接問題に適用した例の報告は無い。また、2003 年には（財）高度情報科学技術研究機構が中核機関となって開発された GeoFEM を用いて、64 億自由度の熱応力問題が 4,096 台のプロセッサを使った並列計算により解析されているが、この解析は弾性解析であり物性値の温度依存性についても考慮されていない。その他にも溶

接問題の解析例を報告している文献はあるが解析モデルの自由度は数千から数万程度のものである。このように大規模解析法の開発は行われているものの、溶接問題に適用されている例は見受けられなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、申請者らにより開発された反復サブストラクチャー法（Iterative Substructure Method; ISM）の並列化を基本軸とし、ブロック構造物の組立てを考慮する際に必要となる条件を考慮できる大規模溶接変形解析システムの開発を目指す。船体の大型ブロック組立てを考慮できるよう 3D-CAD データからのモデル作成、ISM による継手部の固有ひずみ量の同定、ソリッド要素における固有ひずみ解析を一連のシステムとして開発を行う。現在、経験則によって作成されている溶接変形量であるが、曲り部のブロックでは、この経験則が当てはまらないことが多い。そのため、本開発コードを曲り部ブロックの溶接変形予測に適用し、その変形の影響因子について検討を行う。

(1)近年の設計現場において、3D-CAD が主流となってきており、3D-CAD からの FEM モデル作成も容易になってきている。しかし、溶接変形の解析を行う場合には、溶接部近傍はある程度細かい要素作成が必要となるため、溶接線をあらかじめ登録することで、溶接線を考慮したメッシュ作成法が出来るよう開発を行う。

(2)次に申請者らによって開発された反復サブストラクチャー法により、従来と比較して十数倍から百倍の高速化が図られた。しかしながら、反復サブストラクチャーは直接法を基に開発が行われているため、並列化が非常に困難である。そこで、先述の大規模な弱非線形解析においては反復法を導入する。さらに PC クラスタによって並列化を行い、並列効率等について確認を行い、並列の最適化について検討を行うとともに、中組立程度の逐次解析を行い、その妥当性について検討を行う。

(3)また、上記において開発された並列シス

テムを使用して、溶接ひずみ解析手法の開発を行い、大型ブロックへの適用を目指す。さらに、仮付け、溶接、背焼きなどのひずみ取り、ギャップ補正や治具の取り付けなど生産現場において発生する熱的、力学的な負荷について考慮し、これらが変形に与える影響について検討する。

(4)最後に本手法を船体の大型ブロックへ適用し、ブロック組立が変形に与える影響について検討を行うとともに変形の主要因子の特定を図る。

### 3. 研究の方法

本研究は、解析コードの開発と実験の計測結果と解析結果の比較によって、本手法の有効性についての検討を行い、本手法を曲り部の大型ブロックに適用する。初年度では、3D-CAD データより溶接線近傍において詳細な要素分割を行える要素分割法の開発を行うとともに、反復サブストラクチャー法の並列化を目指し、大規模高速化を目指す。また、1m程度の比較的大規模な試験片を使用し、その妥当性について検討を行う。

次年度では、反復サブストラクチャー法によって得られた塑性ひずみを固有ひずみとして抽出、大型ブロックへの挿入を容易に行えるソリッド要素における固有ひずみ解析コードを開発し、実機の大型構造物における溶接変形解析を行う予定である。

### 4. 研究成果

3D-CAD データからの溶接線を考慮したモデル作成法の開発および反復サブストラクチャー法の並列化手法の開発を行った。モデル作成法に関しては、CAD ソリッドデータを基にモデルを作成するが、固有ひずみ解析を行う上で、溶接線の交差部を除く直線部に関しては自動的に要素分割を行うことができるようになった。その後、熱弾塑性解析によって得られた適切な継手モデルの塑性ひずみ分布を用いて図1に示すような大型船体ブロックの溶接線に固有ひずみを与えた固有ひずみ解析を行った。本解析結果とレーザー変位計による実機計測の変形を比較したところ、図2に示すような変形傾向の良好な一致を示した。さらに溶接線の各方向が大型ブロックの変形に及ぼす影響について検討を行った。

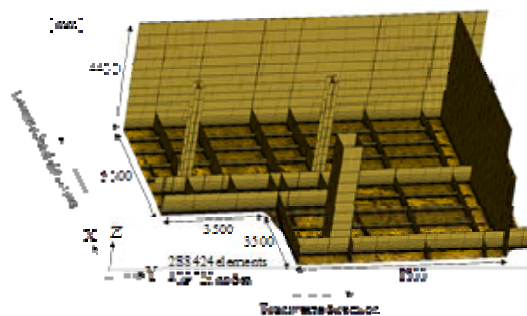


図1 大型船体ブロック

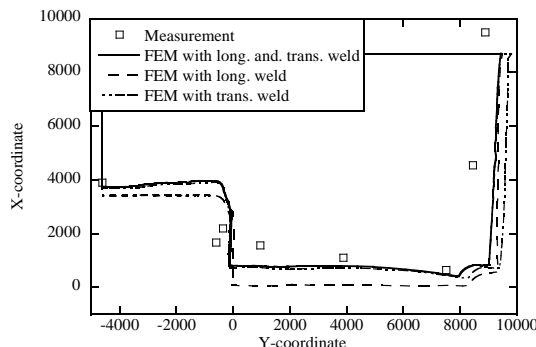


図2 計測結果との比較

また、これまでに開発された高速な熱弾塑性解析手法である反復サブストラクチャー法について、相変態を考慮した、より高精度な溶接残留応力予測手法を開発した。本手法の妥当性の検証のために、あらかじめ熱処理された初期残留応力が除去された鋼材を用いて、主に原子力発電機器の補修に用いられるテンパービード溶接を行い、残留応力分布の計測を行い計測結果と比較したところ良好な一致を示した。さらに、反復サブストラクチャー法の並列化手法を開発し、汎用ソフトとの比較を行い、解析結果である溶接変形および残留応力と計算時間の比較を行った。その結果、溶接変形および残留応力については良好な一致を示し、計算時間においては優位な差を認めることができた。

上記システムである熱弾塑性解析によって得られた継手モデルの塑性ひずみ分布を用いて大型船体ブロックの溶接線与える固有ひずみ解析手法を理想化陽解法 FEM に導入し、GPU による並列計算によりさらに高速に解析が行うことが出来るようになった。本年度は昨年度の大型ブロックモデルのおよそ2倍の自由度である60万要素、180万自由度の解析をおよそ2.5時間の計算時間で計算することができた。これは従来の1CPUでは2週間以上の計算時間を必要としたものである。PC クラスタを構築すると100台以上のPCを必要となると考えられるが、グラフィックボードを用いた並列化による計算であるため、1台のPCによる計算である。変形傾

向は、従来の解析および実測と良好な一致を示した。

また、溶接による防撓パネルの座屈変形について検討を行うために四角形シェル要素による大変形項を考慮した固有変形解析手法の開発も併せて行った。板厚6mmの薄板を用いて、T継手の溶接実験を行い、画像計測により変形を計測した。パネル端部の面外方向変位を比較したところ、実験結果と良好な一致を確認することができ、さらに微小変形解析では再現することのできない座屈変形を精度よく予測できることが確認できた。さらに、車両運搬船の車両甲板部の溶接変形問題に適用し、従来では解析不可能な規模の計算を行うことが出来た。さらに、隅肉溶接における溶接方法によって座屈変形が大きく異なることを確認することが出来た。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Shinsuke Itoh, Masashi Hata, Masakazu Shibahara and Masahito Mochizuki, Application of Inherent Strain Analysis Using Idealized Explicit FEM for Prediction of Welding Deformation in Ship Block Building, Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.111-116 (査読有)

[学会発表] (計1件)

- ① 畑将司、伊藤真介、杉廣武俊、神尾淳、山下泰生、柴原正和、望月正人、理想化陽解法FEMによる大型船体ブロックの固有ひずみ解析  
溶接学会全国大会講演概要 87巻 pp.74-75 (査読無)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊藤 真介 (SHINSUKE ITOH)  
大阪府立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：50535052

##### (2) 研究分担者

##### (3) 連携研究者