

称号及び氏名	博士（工学） 生島 一樹
学位授与の日付	平成 26 年 3 月 31 日
論文名	「理想化陽解法 FEM を用いた溶接構造物の変形・残留応力の予測手法の開発に関する研究」
論文審査委員	主査 深沢 塔一 副査 池田 良穂 副査 大塚 耕二 副査 村川 英一 副査 柴原 正和

## 論文要旨

現在、日本の科学技術は世界でも最高水準にあり、これを反映して、日本の産業は高い競争力を有している。しかしながら、近年は、諸外国、特にアジア圏をはじめとする新興国の台頭が著しく、このような環境で、今後も我が国が引き続き競争力を維持していくためには、産業における生産性を高め、製品の高度化・高品質化を行うことが必須である。

生産性の向上や製品の品質化に資する技術として、シミュレーションを高度に活用した研究開発、すなわち CAE(Computer Aided Engineering)が注目されており、現在、産業界において積極的に導入が進められている。設計や生産の現場でシミュレーションを活用することで、試作回数を削減し、設計段階における検討を迅速化することで、設計から製作に至るまでの時間的コストを大幅に短縮することが可能である。シミュレーション技術の中でも特に普及しているのが、有限要素法(Finite Element Method: FEM)を用いた構造解析であり、設計や生産の現場においても汎用の FEM ソフトウェアを用いた解析が盛んにおこなわれている。

一方、溶接はその作業効率の良さ、および、気密性、水密性の観点から、小型の機械製品の製造から船舶や橋梁、また、原子力プラントや環境プラントといった大型の構造物の建造に至るまで幅広く用いられている接合技術であり、種々の製品の製造を支える基盤技術の一つであるといえる。しかしながら、溶接は、その施工に伴い、変形や残留応力が必然的に発生する。これは、溶接が局所に多量の熱量を投与することで、被溶接部材を熔融させ部材同士の接合を行うためであり、溶接部への熱の集中的な投与により溶接部近傍に局所的な熱膨張が発生するものの、周囲の非加熱部からの拘束により自由な変形を生じ得ないため、永久的な変形、すなわち固有ひずみが生じた結果、残留変形が発生する。このように、溶接の施工に伴い発生する残留応力、残留変形は、製品の寸法精度の悪化や割れの発生につながるこ

とから、製品の品質低下や製造コストの増大を引き起こし問題となっている。これらの問題を改善し、製品の品質向上や生産性の向上を図るためには、溶接の施工に伴う力学現象の発生機構を理解し、適切な溶接施工条件を設定すること、あるいは製品に対して設計上の工夫を加えることが必須であり、そのためには溶接現象を力学的に解析することが重要であると言える。

現在、溶接変形・残留応力を解析するために一般的に用いられているのは、熱弾塑性理論を基にした非線形 FEM 解析である。FEM 熱弾塑性解析では、加熱の開始時から完全冷却時までの時間の進展に伴う溶接現象の変化を逐次解析することで、溶接変形・残留応力を予測する。しかしながら、溶接は材料の局所的な溶融や塑性を伴う非線形性の強い問題であるため、通常の FEM 解析と比べて計算負荷が非常に大きく、溶接継手以上の規模の問題を解析するのは大変困難となっている。そのため、実用的な構造物の溶接変形や残留応力の問題は、設計・生産における重要な課題と認識されているにもかかわらず、熱弾塑性解析を用いた検討はあまり実施されていないのが現状である。

そこで、本研究では溶接変形・残留応力の問題に注目し、製品全体、もしくは部品全体の溶接に伴う変形や残留応力を予測可能な解析手法の開発を目的とする。また、開発手法を種々の溶接変形や残留応力の問題に対して適用することで、開発手法が持つ基本的な性能を明らかにする。

本論文は、以下の 9 つの章から構成される。

第 1 章では、構造物の製作において、溶接の施工により発生する変形、残留応力に伴う問題について述べるとともに、本研究で開発される大規模溶接構造物の変形、残留応力予測手法の重要性を示す。また、本研究を実施するにあたり、本研究の基盤となる大規模構造解析および数値溶接力学の研究分野に関して、その歴史と現状を概観するとともに、今後の計算機の発展の方向性に鑑み、本研究で開発される解析手法が有すべき特性について示す。

第 2 章では、本研究において開発される解析手法の基盤技術となる理想化陽解法 FEM を、動的陽解法 FEM を基に開発する。また、理想化陽解法 FEM を基礎的な溶接問題に対して適用し、溶接変形および残留応力に関して、従来手法による解析結果と比較することで、理想化陽解法 FEM の解析精度について検証する。さらに、理想化陽解法 FEM の計算速度およびメモリ消費量についても議論し、理想化陽解法 FEM の基本的な性能を明らかにする。

第 3 章では、熱弾塑性解析において必要となる溶接中の温度場を解析するための熱伝導解析に対して、理想化陽解法 FEM を導入することで、溶接変形・残留応力解析全体の高速化を図り、基礎継手の溶接中の温度場の解析に対して適用し、従来手法の解析結果と比較することで、理想化陽解法 FEM を用いた熱伝導解析手法の妥当性を示す。また、計算時間とメモリ消費量に関する比較を行い、大規模問題における開発手法の優位性について示す。

第 4 章では、開発された理想化陽解法 FEM に対して画像処理装置(GPU: Graphics Processing Unit)を用いた並列化技術を導入することで基盤解析技術のさらなる高度化を図る。基礎的な T 字継手の両側同時溶接問題に対して開発手法を適用し、計算時間に関する従来手法との比較を通して、その基礎的な性能について議論するとともに、理想化陽解法 FEM における並列処理の有効性を示す。また、従来解析技術では解析が困難であった、厚板突合せ継手の移動熱源を考慮した 3 次元多層溶接残留応力問題に対して開発手法を適用することで、開発手法の有用性を示す。

第 5 章では、応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)において問題となる溶接時の残留応力分布について検討するために、円筒継手の X 開先及び V 開先の多層溶接の残留応力問題に対して GPU を用いた並列化を導入した理想化陽解法 FEM を適用する。解析結果と残留応力の計測結果を比較することで、溶接残留応力解析における開発手法の妥当性、および、大規模解析における有用性について示す。また、V 開先円筒多層溶接継手の解析においては、加工硬化則に対して、等方硬化則、移動硬化則、および、複合硬化則を用いた解析を行い、加工硬化則の違いが残留応力分布に及ぼす影響について検討する。X 開先円筒多層溶接継手

の解析においては、多層溶接の残留応力解析において使用される溶接パスのグルーピングを用いた解析や異なる溶接順序の解析を実施し、これらの因子が残留応力分布に及ぼす影響を明らかにする。

第 6 章では、理想化陽解法 FEM の様々な溶接方法への適用性について検討するため、4 章までに開発した理想化陽解法 FEM による熱弾塑性解析手法、熱伝導解析手法、および、新たに開発する理想化陽解法 FEM を用いた静電ポテンシャル解析を連成させたシミュレーション手法を構築し、単一のスポット溶接箇所を有する基礎的な問題の解析に適用することで、スポット溶接により形成されるナゲットの形状について検討する。また、複数のスポット溶接箇所を有する問題に対して開発手法を適用し、施工の際に問題となる多点スポット溶接時の溶接電流の分流の影響について議論する。更に、自動車の構造部材として使用される片ハット部材の解析に対して開発手法を適用することで、開発手法が実構造物の製造工程における分流や溶接変形の検討に対して適用可能であることを示す。

第 7 章では、反復サブストラクチャー法と呼ばれる溶接現象の力学的特徴に注目した高速化手法を導入することで、理想化陽解法 FEM の一層の効率化を試みる。開発手法の解析精度および性能について検討するために、円筒継手の解析に対して開発手法を適用し、従来手法との比較を行う。また、高レベル放射性廃棄物の格納容器の一部として検討されている人工バリアオーバーパック蓋部を模擬した試験体の溶接施工時の残留応力および変形の解析に対して開発手法を適用し、残留応力分布と変形を従来手法による簡易モデルの解析結果および実験計測結果と比較することで大規模解析における開発手法の妥当性を示す。

第 8 章では、理想化陽解法 FEM の薄板構造物の解析への適用性を向上させるためにマルチグリッド法を導入した手法の開発を行う。開発手法を基礎的な薄板構造の溶接変形問題に適用し、溶接変形および残留応力に関して従来手法の解析結果と比較することで開発手法の妥当性を示すとともに、板厚の異なる問題における計算時間に関する考察を通して開発手法の薄板構造物の解析における有用性を示す。最後に、開発手法を船体二重底ブロックの溶接建造工程を模擬した工程の解析に適用することで、大規模複雑薄板構造物の溶接変形解析における開発手法の適用性を示す。

第 9 章では、一連の研究を通して得られた研究成果についてまとめるとともに、本研究の総括を行う。

以上、本研究では、一連の解析技術の開発を通して、実構造物の溶接変形・残留応力の解析を行うことが可能となった。このことにより、製品全体の溶接変形の予測が初めて実現されたことから、今後、産業界において問題とされている溶接変形・残留応力問題への適用が期待される。よって、その適用可能性について詳細に検討した本研究は、新世代の数値溶接力学解析における先駆的な役割を果たしたと言える。

## 審査結果の要旨

本論文は、溶接構造物の製作において問題となっている残留応力、変形を対象に、溶接構造物全体にわたる残留応力、変形を予測可能な新しい非線形構造解析手法である理想化陽解法 FEM を開発するとともに、理想化陽解法 FEM に対して、高速化や並列化などの手法の高度化を行い、種々の溶接構造物の残留応力、変形の予測に対して理想化陽解法 FEM を適用することで、その有用性について研究したものであり、以下の研究成果を得ている。

- 1) 動的陽解法 FEM を基に、溶接変形、残留応力の予測に対して効率化を図った理想化陽解法 FEM を開発し、基礎的問題における従来手法との比較を通して、理想化陽解法 FEM が従来手法と同等の解析精度を有し、従来手法に比べて大幅に計算効率を向上可能であることを示した。
- 2) 溶接中の過渡の温度場の予測を効率化するために、非定常熱伝導解析に対して理想化陽解法 FEM を導入することで、大規模問題において非常に高い計算効率を実現できることを明らかにした。また、抵抗スポット溶接における電流場を予測するために、静電位場の解析に対して理想化陽解法 FEM を適用し、理想化陽解法 FEM を用いることで、従来手法では困難であった抵抗スポット溶接における 3 次元変形、残留応力解析が実行可能であることを明らかにした。
- 3) 理想化陽解法 FEM に対して像処理装置による並列化、反復サブストラクチャー法を適用し、種々の多層溶接における変形、残留応力の予測に対して適用し、残留応力に及ぼす諸因子の影響について検討した。また、これらの問題は従来手法では困難な大規模解析であり、理想化陽解法 FEM を用いることで実用可能な計算時間で解析を完了できることを示した。
- 4) 理想化陽解法 FEM に対してマルチグリッド法と呼ばれる手法を導入することで、船体構造をはじめとする 1000 万自由度規模の大規模薄板構造物の溶接変形問題を、PC レベルのハードウェア一台で解析可能であることを明らかにした。

以上の研究成果は、これまで計算規模の問題から実用化されていなかった溶接構造物全体の変形、残留応力の予測を実現する手法であり、本研究は溶接変形、残留応力の予測における先駆的研究であると位置づけることができる。また、申請者が研究者として自立的に活動できる能力と学識を有することを証明するものである。