



Title	Effective FE Simulation Methods for Thermal Mechanics of Welding and Post-welding Processes
Author(s)	Guan, Xiaoyu
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/103226">https://doi.org/10.18910/103226</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( GUAN XIAOYU )	
論文題名	Effective FE Simulation Methods for Thermal Mechanics of Welding and Post-welding Processes (溶接および溶接後プロセスの熱力学解析における効率的な有限要素シミュレーション手法に関する研究)
論文内容の要旨	
<p>溶接で生じる変形と残留応力は、鋼構造部材の製作精度、美観、耐荷性能に影響を及ぼすため、溶接変形と残留応力を精度良く予測し、制御することが重要とされている。溶接プロセスを再現するツールとして有限要素法による熱弾塑性解析が広く用いられているが、複雑な開先形状を考慮するための立体要素の適用、熱源の移動を考慮するための多数の時間ステップの設定、材料的および幾何学的な非線形性などにより、溶接シミュレーションは計算時間が長くなることが知られている。溶接現象の理想化によるシミュレーション効率の向上に関する種々の研究が実施されているが、専門知識や熟練を要する方法は汎用性が高いとはいえず、より簡便で容易な方法が求められる。本研究では、熱弾塑性解析による溶接シミュレーションにおいて、計算負荷が高くなる要因の一つである立体要素の使用を最小限に抑えるため、六面体ソリッド要素と平面シェル要素を混用するモデル化手法に注目した。また、時間ステップ数を削減するための熱源移動モデルの適用を試みた。さらに、これらの手法を溶接のみならず溶接の後工程として実施されるガス炎加熱による変形矯正のプロセスにも適用した。これにより、有限要素法による溶接および溶接後プロセスの効率的な解析手法について検討し、その有用性を検証した。論文の構成と内容は、以下のとおりである。</p> <p>第1章では、熱弾塑性解析による溶接シミュレーションに関する既往の研究と現状の課題を整理するとともに、本研究の背景と目的を述べた。</p> <p>第2章では、基本的な溶接継手形式の一つであるT継手を対象として、ソリッド要素とシェル要素を組み合わせでモデル化する方法と、単層すみ肉溶接の入熱プロセスを簡易的にモデル化する方法を検討した。鋼板表面に溶接金属が置かれるすみ肉溶接によるT継手の形状を再現するため、六面体ソリッド要素で継手全体をモデル化すると節点数と要素数が膨大になる。これに対し、三角形断面の溶接金属のみをソリッド要素で構成し、鋼板部分はシェル要素で構成することで節点数と要素数を削減するモデルを構築した。さらに、熱エネルギーの分布形状が時間とともに移動する状態を再現するサブルーチンを組み込むことで、細かい時間ステップの設定を不要にする入熱方法を提案した。これらの方法により、実験で得られた溶接時の温度履歴、変形、残留応力を精度良く再現できることを示した。また、ソリッド要素のみで継手全体を構成し、多数の時間ステップで熱源を逐一移動させる既往の方法に対し、提案した方法による計算時間は約16%に抑えられることを明らかにした。</p> <p>第3章では、単層の溶接から複層の溶接、また、すみ肉溶接と異なる継手形式に対する本手法の適用性を検証するため、3パス突合せ溶接を対象とした一連の実験とシミュレーションを実施した。開先を中心とした溶接部周辺のみをソリッド要素で構成し、その他の部分をシェル要素で構成する突合せ継手モデルを構築した。さらに、熱エネルギー分布の移動を考慮したサブルーチンを、3パス溶接により重畳する入熱部分に拡張した。ソリッド要素で構成された溶接部周辺からシェル要素で構成される鋼板部分への熱伝導を適切に考慮することで、溶接時の温度履歴、変形、残留応力を精度良く再現できることを示した。ソリッド要素のみで継手全体を構成し、多数の時間ステップで熱源を逐一移動させる既往の方法に対し、提案した方法による計算時間は約50%に抑えられることを明らかにした。</p> <p>第4章では、溶接の後工程として実施されるガス炎加熱による変形矯正プロセスをシミュレーションする方法を検討した。第2章で用いたT継手を対象に、ガス炎加熱による溶接面外変形の矯正実験を実施した。また、熱流体解析に基づき、ガス炎による鋼板表面の温度分布を再現する入熱モデルを構築した。このモデルにより、実験で得られた温度履歴、変形、残留応力の傾向を再現できることを確認し、入熱条件を種々変化させたパラメトリックスタディを行い、検討対象の範囲内で変形矯正効果を最大化するための入熱量と加熱時間の関係を明らかにした。</p> <p>第5章では、以上の結果を総括した本研究の結論をまとめた。本研究で提案する解析手法は、溶接で生じる変形と残留応力、ガス炎加熱による変形矯正効果を効率的、高精度に再現するものであり、溶接構造部材の合理的な製作に活用できる有用なツールとなる可能性を示した。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( GUAN XIAOYU )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	廣畑 幹人
	副 査	教授	鎌田 敏郎
	副 査	教授	乾 徹

**論文審査の結果の要旨**

溶接で生じる変形と残留応力は、鋼構造部材の製作精度、美観、耐荷性能に影響を及ぼすため、溶接変形と残留応力を精度良く予測し、制御することが重要とされている。溶接プロセスを再現するツールとして有限要素法による熱弾塑性解析が広く用いられているが、複雑な開先形状を考慮するための立体要素の適用、熱源の移動を考慮するための多数の時間ステップの設定、材料的および幾何学的な非線形性などにより、溶接シミュレーションは計算時間が長くなることが知られている。溶接現象の理想化によるシミュレーション効率の向上に関する種々の研究が実施されているが、高度な専門知識や熟練を要する方法は汎用性が高いとはいえず、より簡便で容易な方法が求められる。本研究では、熱弾塑性解析による溶接シミュレーションにおいて、計算負荷が高くなる要因の一つである立体要素の使用を最小限に抑えるため、六面体ソリッド要素と平面シェル要素を混用するモデル化手法に注目している。また、時間ステップ数を削減するための熱源移動モデルの適用を試みている。さらに、これらの手法を溶接のみならず溶接の後工程として実施されるガス炎加熱による変形矯正のプロセスにも適用している。これにより、有限要素法による溶接および溶接後プロセスの効率的な解析手法について検討し、その有用性を検証している。論文の構成と内容は、以下のとおりである。

第 1 章では、熱弾塑性解析による溶接シミュレーションに関する既往の研究と現状の課題を整理するとともに、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、基本的な溶接継手形式の一つである T 継手を対象として、ソリッド要素とシェル要素を組み合わせてモデル化する方法と、単層すみ肉溶接の入熱プロセスを簡易的にモデル化する方法を検討している。鋼板表面に溶接金属が置かれるすみ肉溶接による T 継手の形状を再現するため、六面体ソリッド要素で継手全体をモデル化すると節点数と要素数が膨大になる。これに対して本研究では、三角形断面の溶接金属のみをソリッド要素で構成し、鋼板部分はシェル要素で構成することで節点数と要素数を削減するモデルを構築している。さらに、熱エネルギーの分布形状が時間とともに移動する状態を再現するサブルーチンを組み込むことで、細かい時間ステップの設定を不要にする入熱方法を提案している。これらの方法により、実験で得られた溶接時の温度履歴、変形、残留応力を精度良く再現できることを示している。また、ソリッド要素のみで継手全体を構成し、多数の時間ステップで熱源を逐一移動させる既往の方法に対し、提案した方法による計算時間は約 16%に抑えられることを明らかにしている。

第 3 章では、単層の溶接から複層の溶接、また、すみ肉溶接と異なる継手形式に対する本手法の適用性を検証するため、3 パス突合せ溶接を対象とした一連の実験とシミュレーションを実施している。開先を中心とした溶接部周辺のみをソリッド要素で構成し、その他の部分をシェル要素で構成する突合せ継手モデルを構築している。さらに、熱エネルギー分布の移動を考慮したサブルーチンを、3 パス溶接により重畳する入熱部分に拡張している。ソリッド要素で構成された溶接部周辺からシェル要素で構成される鋼板部分への熱伝導を適切に考慮することで、溶接時の温度履歴、変

形、残留応力を精度良く再現できることを示している。ソリッド要素のみで継手全体を構成し、多数の時間ステップで熱源を逐一移動させる既往の方法に対し、提案した方法による計算時間は約 50%に抑えられることを明らかにしている。

第 4 章では、溶接の後工程として実施されるガス炎加熱による変形矯正プロセスをシミュレーションする方法を検討している。第 2 章で用いた T 継手を対象に、ガス炎加熱による溶接面外変形の矯正実験を実施している。また、熱流体解析に基づき、ガス炎による鋼板表面の温度分布を再現する入熱モデルを構築している。このモデルにより、実験で得られた温度履歴、変形、残留応力の傾向を再現できることを確認し、入熱条件を種々変化させたパラメトリックスタディを行い、検討対象の範囲内で変形矯正効果を最大化するための入熱量と加熱時間の関係を明らかにしている。

第 5 章では、以上の結果を総括した本研究の結論をまとめている。本研究で提案する解析手法は、溶接で生じる変形と残留応力、ガス炎加熱による変形矯正効果を効率的、高精度に再現するものであり、溶接構造部材の合理的な製作に活用できるツールとなり得ることを示している。

以上のように、本論文では、鋼構造物の製作において不可欠な溶接とその後工程の熱力学的な挙動を解析するための効率的な手法を提示しており、鋼構造物の製作における合理化、高精度化に資する有用な知見を与えるものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。