



Title	Large Scale Thermal Elastic-Plastic Analysis Based on Dynamic Mesh Refining Method and Iterative Substructure Method
Author(s)	黃, 輝
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/56004
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Hu i H u a n g)	
Title	Large Scale Thermal Elastic-Plastic Analysis Based on Dynamic Mesh Refining Method and Iterative Substructure Method (動的メッシュ細分化法と反復サブストラクチャー法に基づく大規模熱弾塑性解析)

In welded structures, deformation and residual stress are inevitable due to the concentrated heat effect. Effective prediction and control of those welding consequences are crucial for ensuring and improving the dimensional accuracy and strength of structures. Transient thermal elastic-plastic FEM which is an accurate numerical method is currently limited to solve small scale problems. Characteristics of welding phenomena are that the strongly nonlinear region is confined in a small area and it moves with the heat source. Also the location of fatigue initiation is limited to an area with high stress concentration. Thus it is desirable to employ fine mesh only in these focused areas from computational efficiency point of view. For this, methods such as multi-level refining technique, dynamic mesh refining method and heat transfer localization method are proposed.

Chapter 1 reviews the history of computational welding mechanics and the current stage of numerical methods. The faced problems and challenges for computational welding mechanics are addressed. In addition, the outline of this research is described.

Chapter 2 introduces Multi-Level Refining Technique (MLRT) which allows flexible subdivision in different directions. The continuity of displacement between elements with different level of refinements is maintained with a transformation matrix. The mesh size required for the focused area to ensure accurate thermal analysis is investigated.

Chapter 3 presents the Dynamic Mesh Refining Method (DMRM) which employs locally fine computational mesh and generally fine background mesh. The advantage of this method is that the high resolution is maintained by background mesh and computational efficiency is achieved by computational mesh. Proposed DMRM is applied to fillet welding joint model with more than one million degrees of freedom and the computational efficiency is improved by nine times compared to conventional FEM.

In Chapter 4, Heat Transfer Localization Method (HTLM) is proposed as an alternative acceleration method for welding thermal conduction analysis and compared with DMRM. In case of thermal analysis, HTLM is superior to DMRM in saving computing time and memory.

Chapter 5 proposes DMRM* which is a combination of DMRM and existing Iterative Substructure Method (ISM) for further improvement of computational efficiency. In case of pipe-to-flange welding model, it is demonstrated that DMRM* is over fifty times faster than the commercial code ABAQUS.

Chapter 6 delivers the application of developed methods to large scale practical problems such as plate forming by line heating and manufacturing stiffened panel structure by welding. The numerical models have more than one million degrees of freedom, and number of time steps are more than ten thousands. The analyses of such large scale problems are all completed in one week using single CPU. The effectiveness and high performance of DMRM and DMRM* are proved through comparison with experimental results.

Chapter 7 shows the application of proposed mesh refining method to fatigue analysis and stress measurement by contour method which requires locally fine mesh. In case of fatigue analysis, relatively coarse mesh used for welding simulation can be employed with local mesh refinement. In the case of contour method, the multi-level refinement technique is employed to generate fine mesh which is necessary for high resolution.

Chapter 8 summarizes the development and application of proposed numerical methods. The difficulties, pending problems and outlook regarding this research are also addressed.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (H u i H u a n g)	
	(職) 氏 名
論文審査担当者	主査 教授 村川 英一
	副査 教授 藤久保 昌彦
	副査 教授 大沢 直樹
	副査 准教授 芹澤 久

論文審査の結果の要旨

構造物の局部に熱が集中的に投入される溶接では、熱収縮による変形や残留応力が必然の結果として発生する。これら変形や残留応力は構造物の寸法精度や各種強度の低下の原因となるので、これらの発生を予測し効果的に制御する必要がある。精度が高い予測法としては熱弾塑性有限要素法が挙げられるが、溶接が非線形過渡現象であるため解析に多大な計算時間とメモリーが必要となるので、適用可能な対象は実験室レベルの小さな構造物に限られる。一方、溶接の特徴は、強い非線形性を示す領域が熱源近傍の狭い高温領域に限られ、これが溶接トーチとともに移動するという点である。また、溶接継手で疲労などの損傷が発生するのは応力が集中するごく限られた領域である。したがって計算速度と精度を向上させるためには、これらの高温部や応力集中部のみを細かい要素で分割し、その他の部分には大きな要素を用いる方法が有効である。そこで本研究では、計算精度を保持しながら計算速度を飛躍的に向上させる方法として、マルチレベル細分割法(multi-level refining technique: MLRT)や動的メッシュ細分化法(dynamic mesh refining method: DMRM)、さらには局所化伝熱解析法(heat transfer localization method: HTLM)を開発している。

本論文は、以下の 8 章から構成される。

第 1 章では、数値溶接力学および計算技術の現状について調査し、実規模の構造物に発生する溶接変形や残留応力が予測可能な熱弾塑性有限要素法を実現するために解決すべき課題を述べるとともに、本研究の目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章では、熱弾塑性解析の効率化の鍵となるマルチレベル細分割法(MLRT)を提案している。この方法では異なる分割レベル間での変位の受渡しを行う変換行列を導入し、任意方向に任意レベルの細分割が柔軟に実行できるようになっている。計算の精度は荷重に相当する過渡温度場の精度に依存するため、必要な精度を得るための要素サイズおよび時間増分の大きさが満たすべき条件を示している。

第 3 章では、局部的に細分割された computational mesh および全体的に細分割された background mesh の 2 種類のメッシュを併用する動的メッシュ細分化法(DMRM)を提案している。この方法の特長は、精度の高い変位、ひずみ、応力などの計算結果は background mesh で保持しながら、計算は規模が小さい computational mesh を用いて実施することで高速化を図る点にある。提案した DMRM を、100 万自由度を超える隅肉溶接継手の熱弾塑性問題に適用し、従来の FEM と比較して計算速度が約 9 倍向上することを示している。

第 4 章では、溶接における熱伝導解析を対象に、熱伝導問題の局所性に注目した局所化伝熱解析法(HTLM)を提案し DMRM との比較を行っており、メモリーの節約の点では HTLM が優れていることを示している。

第 5 章では、熱弾塑性解析の更なる効率化を目指して、本研究で提案した DMRM と反復サブストラクチャー法に改良を加えたものを融合した DMRM* を提案し、汎用 FEM コードと比較して 50 倍以上の計算速度が達成できることを示している。

第 6 章では、本研究で開発した DMRM および DMRM* を線状加熱による板曲げ問題や防撓パネルの溶接変形問題などに

適用し、その有効性を実験結果との比較を通して検証している。いずれの問題も自由度が 100 万を超え、計算ステップ数が 1 万ステップに及ぶ大規模問題であるが、ひとつの CPU を用いて 1 週間以内という現実的な時間で計算を完了している。

本研究の基本となっているマルチレベル細分割法は、溶接止端部における応力集中が問題となる疲労寿命評価や切断面近傍の細分割が必要なコンター法による残留応力計測にも有効であり、第 7 章では、これらに対する有効性を数値実験により示している。特に従来は計測対象物が切断面に対して対称であることが条件であったコンター法に固有変形の概念を導入することにより、この制約が排除できることを示している。

第 8 章では、本論文で得られた研究結果を総括すると共に、今後の課題を示している。

以上のように、本論文は、船体をはじめとする構造物の建造中に溶接や線状加熱などの熱加工により発生する変形や残留応力の予測を目的として、大型実構造物にも適用可能な熱弾塑性解析の方法として動的メッシュ細分化法およびこれを発展させた方法を提案するとともに、それらの有効性を検証している。さらに、同じ考え方が溶接継手の疲労寿命評価ならびに溶接残留応力計測の精度向上のために活用できることを示しており、その成果は溶接に関わる各種の力学現象の解明、さらには溶接構造物の品質および信頼性向上に大いに貢献するものと期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。