

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14871

研究課題名（和文）非線形領域分割法を用いた高速な大規模並列溶接力学解析の実現

研究課題名（英文）Realization of fast large-scale parallel welding mechanics analysis using nonlinear domain decomposition method

研究代表者

遊佐 泰紀 (Yusa, Yasunori)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：70756395

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：溶接問題や金属積層造形問題のための並列非線形有限要素法解析手法を提案した。溶接・金属積層造形解析では、固体になる部分に予め剛性ゼロ有限要素を配置する。並列有限要素法の一つである領域分割法で、この剛性ゼロの有限要素を適切に考慮する実装法を開発した。提案実装法は損傷解析やトポロジー計算にも水平展開した。また、並列非線形有限要素法解析技術の蓄積のため、高速な並列大変形弾塑性解析のフレームワークを開発した。1980年ごろに盛んに研究されていた準Newton法に基づく非線形有限要素法に注目し、現代の分散メモリ型計算機への実装法と近代的な大変形弾塑性材料モデルに基づく解析フレームワークを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶接問題、金属積層造形問題など、機械の製造時の複雑な力学挙動を従来よりも短い計算時間で解析できるようになり、過度に安全側でない合理的な設計に貢献できる可能性がある。また、破壊時などの他の力学挙動に対しても適用できるような解析技術を提案したため、合理的な保守などにも貢献できる可能性がある。また、領域分割法は実際にスーパーコンピュータで使用されている基盤的な解析手法であるため、本研究成果によって、スーパーコンピュータを用いた複雑な力学挙動の解析の発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A parallel nonlinear finite element analysis method for welding problems and metal additive manufacturing problems were proposed. In the welding and metal additive manufacturing analyses, zero-stiffness finite elements are placed in advance at the portion to be welded. An implementation method that considers the zero-stiffness finite elements appropriately in the domain decomposition method was developed. The proposed implementation method was also applied to damage analysis and topology computation. Furthermore, a framework of fast parallel large-deformation elastic-plastic analysis was developed. Using quasi-Newton-based nonlinear finite element methods, which were studied extensively in the 1970s and the 1980s, an analysis framework that is based on an implementation method for present distributed-memory parallel computers and on a modern large-deformation elastic-plastic material model was proposed.

研究分野：計算力学

キーワード：並列有限要素法 領域分割法 非線形有限要素法 熱弾塑性解析 大変形弾塑性解析 溶接 金属積層造形

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

溶接継手から離れた部分の溶接変形や継手付近の残留応力を最小化する溶接施工条件の最適化のためには、溶接継手周辺に留まらない複雑な構造全体を考慮した溶接解析が必須である。このような溶接解析には、PC クラスタやスーパーコンピュータなどの分散メモリ型並列計算機の活用が不可欠である。しかし、既往の解析手法のほとんどは分散メモリ型並列計算に適したアルゴリズムを有しておらず、それらの解析手法を用いて実用的な並列解析プログラムを開発することは困難である。

一般に、溶接解析は数百から数千の多大な解析ステップ数を伴う非線形有限要素法解析であるため、計算コストが非常に大きい。そのため、高速化・大規模化を目的とした溶接解析特化型解析手法がいくつか提案されている。一方、大規模並列有限要素法解析の分野では、領域分割法を用いた線形弾性有限要素法解析や基礎的な非線形有限要素法解析が行われている。両者は独立的であり、大規模かつ非線形の並列有限要素法に関する研究は未だ発展途上である。

以上より、本研究の課題は、非線形解析を前提としたときの大規模有限要素法はどうあるべきかである。これまでの大規模有限要素法のほとんどは連立一次方程式解法に基づくものである。一方、連立非線形方程式解法に基づく大規模有限要素法もありうるはずである。さらに、本研究で対象とする溶接解析は、非線形性の局所性、熱源に伴って移動する非線形性、多大な解析ステップ数などの特徴がある。高速な計算のためには、このような問題ごとの特徴に適応する解析手法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、溶接変形・残留応力を最小化する溶接施工条件最適化を可能にするような高速な大規模非線形有限要素法解析を実現することである。移動熱源に駆動される熱弾塑性問題に適した並列有限要素法解析手法を提案する。また、移動熱源に駆動される熱弾塑性解析の手法の研究を推し進めることによって、図 1 のように、溶接解析以外の非線形有限要素法解析へと水平展開できる並列非線形有限要素法解析技術を蓄積する。

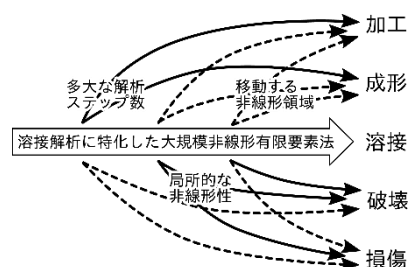


図 1 並列非線形有限要素法解析技術の水平展開

## 3. 研究の方法

移動熱源に駆動される熱弾塑性解析のための領域分割法の実装法を開発した。溶接解析や、溶接解析と物理現象の面で類似する金属積層造形解析では、固体になる部分に予め剛性ゼロの有限要素を配置する。剛性ゼロの部分を含む領域に対し、並列計算のための領域分割を行うと図 2 のようになる。剛性ゼロの有限要素を領域分割法の中で適切に考慮する実装法を開発し、ジャーナル論文にて発表した。

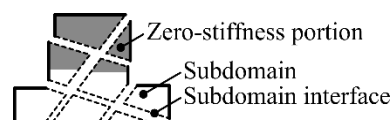


図 2 剛性ゼロの部分を含む領域に対する領域分割

また、移動熱源に駆動される熱弾塑性解析とは別に、並列非線形有限要素法解析技術の蓄積のため、高速な並列大変形弾塑性解析のフレームワークを開発した。1980 年ごろに盛んに研究されていた準 Newton 法に基づく非線形有限要素法に注目し、現代の分散メモリ型並列計算機への実装法と近代的な大変形弾塑性材料モデルに基づく解析フレームワークを提案し、ジャーナル論文にて発表した。

## 4. 研究成果

剛性ゼロの有限要素を考慮した領域分割法の実装法を用い、実際に金属積層造形解析を実施した。図 3 は解析結果の応力分布である。加熱過程では、熱源の位置と熱源が通過した部分が主に引張の応力を示し、それを取り囲むように圧縮の応力が分布していることがわかる。また、冷却過程終了後には、造形部がほぼ一様な引張の残留応力分布を示していることがわかる。さらに、解析技術の水平展開のため、提案実装法を用いて図 4 のような損傷解析とトポロジー計算も実施した。損傷解析では、左端の部分の有限要素が損傷のために剛性ゼロに至っている。一方、トポロジー計算では、主に板厚方向の中央部分と右端の外周部分が剛性ゼロになっている。以上のような解析の領域分割法による分散メモリ型並列計算を実現した。

さらに、残留応力がほぼ一樣になることに注目し、提案した領域分割法の実装法の下で熱源モ

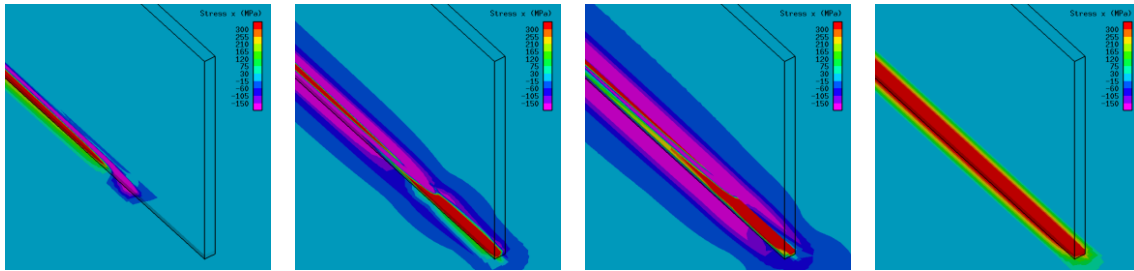


図3 金属積層造形解析結果の応力分布 (左から順に 0.05 s、0.29 s、0.53 s、33,557 s)

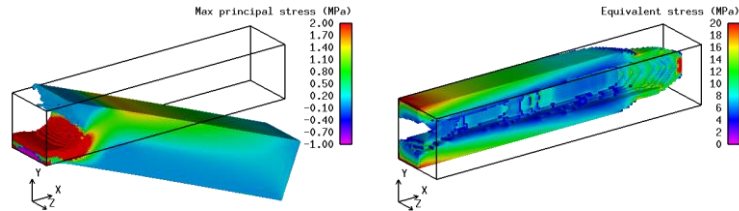


図4 剛性ゼロの有限要素を考慮した領域分割法の実装法を用いた損傷解析 (左) とトポロジー計算 (右)

デルを簡略化することで、造形物全体の熱弾塑性解析を行った。解析結果の変位の分布を図5に示す。平板の両端の高さ方向の中央部分が大きく変形していることがわかる。左端の変位をグラフにプロットしたものを図6に示す。横軸が水平方向の変位、縦軸が高さ方向の座標である。実線は解析結果、丸印は

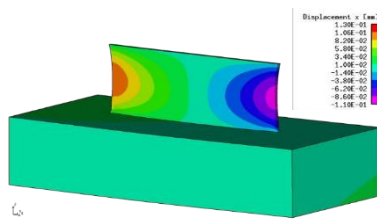


図5 平板の金属積層造形解析の結果の変位分布

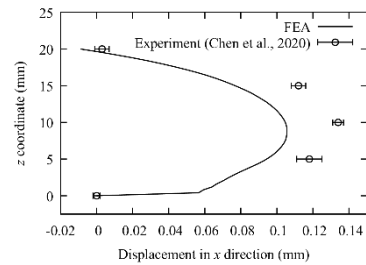


図6 図5の平板の左端における変位

Chen et al. (Int. J. Adv. Manuf. Technol., 110 (11): 3467-3478, 2020) による実験結果である。両者は定量的には一致していないものの、傾向は良く一致している。この解析では、熱源モデルを簡略化することで、解析ステップ数が332分の1、計算時間が751倍高速化された。

また、高速な並列大変形弾塑性解析のフレームワークを用い、亀裂付き試験片の解析とスケラビリティテストを行った。解析結果の相当応力分布と相当塑性ひずみ分布を図7に示す。全体的に大きく変形し、特に、亀裂先端近傍では相当応力や相当塑性ひずみが集中していることがわかる。このような解析に対してウィークスケーリングテストを実施したところ、標準手法であるNewton-Raphson法に対する準Newton法の高速化率は、10.0万自由度規模では22.6、76.7万自由度では46.7であった。数十倍の高速化を達成した。さらに、自由度数が大きくなるほどに高速化率が增大することを示した。

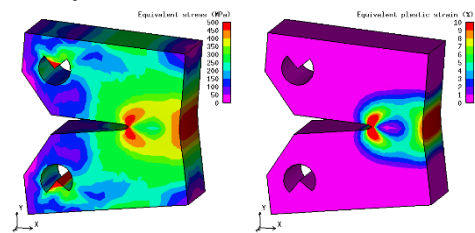


図7 亀裂付き試験片の解析結果の相当応力分布 (左) と相当塑性ひずみ分布 (右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yasunori Yusa, Hiroaki Kobayashi, Yuma Murakami, Hiroshi Okada	4. 巻 in press
2. 論文標題 Implementation of balancing domain decomposition method for parallel finite element analysis involving inactive elements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.6995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasunori Yusa, Shota Miyauchi, Hiroshi Okada	4. 巻 8
2. 論文標題 Performance investigation of quasi-Newton-based parallel nonlinear FEM for large-deformation elastic-plastic analysis over 100 thousand degrees of freedom	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 21-00053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.21-00053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hiroki Suwa, Yasunori Yusa
2. 発表標題 Development of parallel parametric analysis system using coupling-matrix-free iterative s-version FEM for design of structure with a hole
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Yusa, Hiroaki Kobayashi, Yuma Murakami, Hiroshi Okada
2. 発表標題 Implementation of balancing domain decomposition method for inactive elements and its applications
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上卓, 岡田裕, 小林宏晃, 遊佐泰紀
2. 発表標題 大規模有限要素法を用いた金属積層造形問題解析と実験の比較 (造形サンプルの反り変形の予測と評価)
3. 学会等名 第 27 回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 大角俊太, 小林宏晃, 岡田裕
2. 発表標題 領域分割法と簡略化熱源モデルを用いた金属積層造形解析の検討
3. 学会等名 第 27 回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 小林宏晃, 村上悠真, 岡田裕
2. 発表標題 balancing領域分割法へのインアクティブ要素の実装と金属積層造形シミュレーションへの適用
3. 学会等名 日本機械学会第 34 回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Suwa, Yasunori Yusa
2. 発表標題 Fracture mechanics evaluation of V-bending die with a hole using parametric analysis system with coupling-matrix-free iterative s-version FEM
3. 学会等名 XVI International Conference on Computational Plasticity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Yusa, Shota Miyauchi, Hiroshi Okada
2. 発表標題 Performance investigation of quasi-Newton-based parallel large-deformation elastic-plastic analysis of crack problems
3. 学会等名 XVI International Conference on Computational Plasticity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 諏訪浩貴, 遊佐泰紀
2. 発表標題 反復型重合メッシュ法を用いた孔を有する V 曲げ加工用金型のパラメトリック解析および破壊力学評価
3. 学会等名 第 26 回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Kobayashi, Yuma Murakami, Yasunori Yusa, Hiroshi Okada
2. 発表標題 Study on an analysis methodology for metal additive manufacturing process using a large scale parallel finite element computation
3. 学会等名 11th International Conference on Computational Methods (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasunori Yusa, Yuma Murakami, Hiroshi Okada
2. 発表標題 Large-scale parallel thermal elastic-plastic welding simulation using balancing domain decomposition method
3. 学会等名 ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuma Murakami, Yasunori Yusa, Hiroshi Okada
2. 発表標題 Parallel thermal elastic-plastic simulation by domain decomposition method using PC cluster (application to additive manufacturing)
3. 学会等名 7th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 宮内彰太, 岡田裕
2. 発表標題 準 Newton 法に基づく高速な大変形弾塑性解析の研究
3. 学会等名 第 24 回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遊佐泰紀, 村上悠真, 岡田裕
2. 発表標題 領域分割法を用いたマルチバス溶接シミュレーションの検討
3. 学会等名 日本機械学会第 32 回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------