

令和元年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17978

研究課題名(和文) 平滑化有限要素法による複雑形状を持つ微圧縮性材料に対する大変形解析技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of large deformation analysis techniques for nearly incompressible materials with complex shapes using smoothed finite element methods

研究代表者

大西 有希 (Onishi, Yuki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：20543747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ゴム・生体・成形樹脂などの微圧縮性材料は多くの場合大きな変形を伴う環境で使用される。材料の変形のコンピュータシミュレーションには有限要素法(FEM)と呼ばれる手法が一般に用いられるが、微圧縮大変形は解析が難しく、特に複雑形状を持つ物体の解析で精度と安定性を確保することは困難であることが知られている。

本研究では平滑化有限要素法(S-FEM)と呼ばれる新しい定式化手法を用いることにより、複雑形状の微圧縮大変形を高精度かつ安定に解く手法の開発に取り組んだ。期間中に完全解決させることは出来なかったが、従来手法と同じ計算時間で安定性に優れるS-FEM定式化を見つけることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有限要素法(FEM)の定式化は数学的に整合性のとれた物が必ずしも良い解を与える訳ではなく、偶然生まれた不整合な要素が何故か良い解を与えるという事例が数多くある不思議な研究分野である。本研究で得られた知見は一見偶然良い解を与えるS-FEM定式化が何故良いのかというメカニズム解明の一助となる学術的意義を持つ。また、本研究が対象とした微圧縮性材料はタイヤ・生体・成形樹脂などの幅広い応用があり、産業界からの技術確立のニーズが高い事案である。研究家成果が実用化されれば充分な社会的意義が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Nearly incompressible materials such as rubber, biomaterials and molding resins are often used in environments with large deformation. Finite element method (FEM) is generally used for computer simulation of material deformation, whereas large deformation analysis of incompressible materials is known to be difficult. It is still challenging to ensure accuracy and stability in such kind of analysis especially when the target has a complex shape. In this research, we worked on the development of a method to solve incompressible large deformation problems with high accuracy and stability by using a new kind of FEM formulation called S-FEM. Although it could not be resolved completely in this research period, we succeeded in finding an S-FEM formulation with excellent stability in the same calculation time in comparison to the conventional method.

研究分野：計算工学

キーワード：平滑化有限要素法 微圧縮性材料 大変形解析 四面体要素 ロッキング 圧力振動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

タイヤ等のゴム材料・熱成形中の樹脂材料・生体材料などは微圧縮性材料と呼ばれ、その変形挙動解析は産業のあらゆる場面で必要となっている。微圧縮性材料は大変形を伴う環境で使用される機会が多く、また6面体自動メッシングが適用できない様な複雑形状を持つことが多い。このため、この種の問題は有限要素法 (FEM) による解析において四面体要素分割を使用して微圧縮大変形問題を解く必要がある。しかし、FEM 解析においてその精度と安定性を確保することは困難であることが知られている。具体的にはせん断・体積ロッキングおよび圧力チェッカーボーディングを引き起こすため低精度な解しか得ることが出来ない。汎用 FEM コードには2次ハイブリッド要素を用いてその解決を図っているものもあるが、大変形解析における安定性は十分とは未だ不十分である。

2. 研究の目的

複雑形状を持つ微圧縮性材料の大変形問題を四面体要素を用いて高精度に解くための新しい有限要素定式化の確立と産業応用を目的とする。本研究では近年新たな有限要素定式化として注目される平滑化有限要素法(S-FEM)を用いて問題の解決を図る。古典的な S-FEM をベースとし、精度と安定性を向上させる様々な工夫を施した定式化を試行錯誤することにより最良な S-FEM 定式化を新たに提案する。また、産業応用を目指すにあたり定式化の精度と安定性だけでなく計算速度についても検討を行い、真に利用価値のある解析技術の確立を試みる。

3. 研究の方法

研究開始当初に既に提案されていた S-FEM 定式化をベースとし、その問題点を調査しその原因を1つ1つ分析しながら改良を重ねて行く方法を探った。様々な解析条件における問題点を明らかにするため、超弾性体だけでなく弾塑性体や粘弾性体などの微圧縮性が現れる他の材料の解析への手法拡張も同時に行う方針とした。加えて、接触解析や動解析への適用における問題点も明らかにするため、それらの実装も並行して実施することとした。さらに、計算時間の短縮が可能な新たな定式化の探求も行い、実用性の面でも従来法と競争出来る手法の提案も目指した。

4. 研究成果

1年目は4節点四面体メッシュに対して等積変形と体積変形それぞれの歪み成分に対して異なる S-FEM をそれぞれ行ってそれらを F-bar 法で組み合わせる手法(F-bar-ES-FEM-T4)について研究を実施した。弾塑性解析および接触解析における同手法の性能評価を行い、両解析における同手法の高い精度と安定性を示した。

2年目は引き続き F-barES-FEM-T4 に対する性能評価と手法改良についての研究を実施した。粘弾性解析における同手法の性能評価を行い、弾塑性と同様に有効であることを示した。また、F-barES-FEM-T4 を動解析にも適用できるよう手法の改良を行い、微圧縮大変形の激しい衝突解析においても同手法が高精度かつ安定であることを示した。

3年目はより実用的な定式化へと研究をシフトさせた。具体的には10節点四面体メッシュに対してせん断応力と静水圧応力それぞれの応力成分に対して異なる要素内 S-FEM をそれぞれ行ってそれらを Selective 法で組み合わせる手法(SelectiveCS-FEM-T10)を提案し研究を実施した。要素内のみで S-FEM を行うことにより一般的な10節点四面体要素と同じ計算時間で解が得られる利点がある。SelectiveCS-FEM-T10 は精度と安定性の面では F-barES-FEM-T4 よりやや劣るものの、計算時間の面では数倍程度高速であり一般的な10節点四面体要素とほぼ同じ速度である。限られた時間内で解を得ることが求められる産業応用において同手法は従来手法よりも優位性があることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

1. Yuki ONISHI. ``A Concept of Cell-Based Smoothed Finite Element Method Using 10-Node Tetrahedral Elements (CS-FEM-T10) for Large Deformation Problems of Nearly Incompressible Solids'', International Journal of Computational Methods, Vol. 16, p. 1845009, 2019. [査読有]
2. Ryoya IIDA, Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. ``A stabilization method of F-barES-FEM-T4 for dynamic explicit analysis of nearly incompressible materials'', International Journal of Computational Methods, Vol. 15, No. 3, p. 1850121, 2018. [査読有]
3. Yuki ONISHI, Ryoya IIDA, Kenji AMAYA. ``Accurate viscoelastic large deformation analysis using F-bar aided edge-based smoothed finite element method for 4-node tetrahedral meshes (F-barES-FEM-T4)'', International Journal of Computational Methods, Vol. 15, No. 7, p. 1845003, 2018. [査読有]
4. Yuki Onishi. ``F-Bar Aided Edge-Based Smoothed Finite Element Method With 4-Node Tetrahedral Elements for Static Large Deformation Elastoplastic Problems'', International Journal of Computational Methods, Vol. 15, No. 1, p. 1840010, 2018. [査読有]

5. 飯田稜也, 大西有希, 天谷賢治. ``4 節点四面体要素を用いた F-bar 援用の平滑化有限要素法による微圧縮性材料の大変形動的陽解法'', 日本計算工学会論文集, Vol. 2017, p. 20170001, 2017. [査読有]
6. Y. Onishi, R. Iida, K. Amaya. ``F-bar aided edge-based smoothed finite element method using tetrahedral elements for finite deformation analysis of nearly incompressible solids'', International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 109, No. 11, pp. 1582--1606, 2017. [査読有]

[学会発表](計 21 件)

1. 大西有希. ``10 節点四面体要素を用いた平滑化有限要素法の汎用有限要素ソフトへの実装'', 第 31 回計算力学講演会, Nov. 2018.
2. Yuki ONISHI. ``Selective cell-based smoothed finite element method using 10-node tetrahedral elements for large deformation of nearly incompressible solids'', The 9th International Conference on Computational Methods (ICCM2018), Aug. 2018. (Keynote)
3. Ryoya IIDA, Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. ``Performance Evaluation of Stabilized F-bar Aided Edge-based Smoothed Finite Element Method with Four-node Tetrahedral Elements (SymF-barES-FEM-T4) for Contact Problem'', The 13th World Congress in Computational Mechanics (WCCM2018), Jul. 2018.
4. Yuki ONISHI, Ryoya Iida, Kenji Amaya. ``Element-wise Selective Smoothed Finite Element Method for 10-node Tetrahedral Elements in Large Deformation Problems'', The 13th World Congress in Computational Mechanics (WCCM2018), Jul. 2018.
5. 大西有希. ``複雑形状を持つ微圧縮性材料の大変形に対する 10 節点四面体要素を用いた要素内選択的平滑化有限要素法'', 第 23 回計算工学講演会, Jun. 2018.
6. 飯田稜也, 大西有希, 天谷賢治. ``F-bar 援用の平滑化有限要素法を用いたゴム材料の高精度大変形解析'', ゴムの力学ワークショップ, Nov. 2017.
7. 大西有希, 飯田稜也, 天谷賢治. ``F-bar 援用の四面体平滑化有限要素法によるゴム粘弾性大変形解析'', 第 30 回計算力学講演会, Sep. 2017.
8. 飯田稜也, 大西有希, 天谷賢治. ``4 節点四面体要素を用いた F-bar 援用の平滑化有限要素法の動的陽解法における安定化'', 第 30 回計算力学講演会, Sep. 2017.
9. Yuki ONISHI. ``F-bar aided edge-based smoothed finite element method with 4-node tetrahedral elements for viscoelastic large deformation problems'', The 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), Jul. 2017.
10. Yuki ONISHI, Ryoya IIDA, Kenji AMAYA. ``Accurate viscoelastic large deformation analysis using F-bar aided edge-based smoothed finite element method for 4-node tetrahedral meshes (F-barES-FEM-T4)'', The 8th International Conference on Computational Methods (ICCM), Jul. 2017. (Keynote)
11. Ryoya IIDA, Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. ``A stabilization method of F-barES-FEM-T4 for dynamic explicit analysis of nearly incompressible solids'', The 8th International Conference on Computational Methods (ICCM), Jul. 2017. (Invited)
12. 大西有希. ``四面体平滑化有限要素法による高精度な粘弾性大変形解析'', 第 22 回計算工学講演会, Jun. 2017.
13. 大西有希. ``四面体を用いた平滑化有限要素法による大変形解析の最新動向'', 日本学会第 6 回計算力学シンポジウム, Dec. 2016. (招待)
14. 大西有希, 飯田稜也, 天谷賢治. ``ゴム大変形解析における F-barES-FEM-T4 の接触安定性評価'', 第 29 回計算力学講演会, Sep. 2016.
15. R. Iida, Y. Onishi, K. Amaya. ``Accurate Dynamic Simulations of Multi-Material Models with Rubber-like Materials using F-barES-FEM-T4'', The 10th International Conference on Fracture & Strength of Solid (FEFOS), Aug. 2016.
16. R. Iida, Y. Onishi, K. Amaya. ``Performance Evaluation of Various Smoothed Finite Element Methods with Tetrahedral Elements in Large Deformation Dynamic Analysis'', The 7th International Conference on Computational Methods (ICCM), Aug. 2016.
17. Y. Onishi, R. Iida, K. Amaya. ``F-bar aided edge-based smoothed finite element methods with 4-node tetrahedral elements for static large deformation hyperelastic and elastoplastic problems'', The 7th International Conference on Computational Methods (ICCM), Aug. 2016. (Keynote)
18. R. Iida, Y. Onishi, K. Amaya. ``Performance Evaluation of F-barES-FEM-T4 in Dynamic Analysis'', The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), Jul. 2016.
19. Y. Onishi, R. Iida, K. Amaya. ``A Locking-free and Pressure Oscillation-free Elasto-plastic Large Deformation Analysis using F-barES-FEM-T4'', The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), Jul. 2016.
20. 飯田稜也, 大西有希, 天谷賢治. ``微圧縮性材料の動解析における種々の四面体平滑化有限要素法の安定性評価'', 第 21 回計算工学講演会, Jun. 2016.

21. 大西有希, 飯田稜也, 天谷賢治. ``F-barES-FEM 四面体要素による圧力振動フリー弾塑性大変形解析'', 第 21 回計算工学講演会, Jun. 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

・大西有希のウェブサイト, <http://www.a.sc.e.titech.ac.jp/~yonishi/>

6. 研究組織

東京工業大学 工学院 システム制御系 助教 大西有希

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

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、研究者個人に帰属されます。