

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630007

研究課題名(和文) 陰的増分形約合方程式に基づく大変形リゾーニング有限要素解析シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of finite element simulators based on implicit incremental equilibrium equations for large deformation mesh rezoning problems

研究代表者

大西 有希 (Onishi, Yuki)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：20543747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：四面体要素分割を用いて大変形問題を高精度に解析可能な新しい有限要素解析シミュレータを開発した。新たに提案した有限要素定式化であるF-barES-FEM-T4を組み込み、既存手法で問題となっている各種ロッキングや圧力振動などを抑制することに成功した。四面体要素を用いているが故、工業製品に現れる複雑な形状に対しても適用することができる。加えて、四面体要素の自動メッシュ生成と組み合わせることにより、ゴム材料などの解析に現れる厳しい大ひずみ問題に対しても適用することができる。種々の解析例を示すことにより、開発されたシミュレータの有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：An accurate novel finite element simulator for large deformation problems with tetrahedral element discretization was developed. The simulator adopts a newly proposed finite element formulation named F-barES-FEM-T4, and succeeded in suppressing various kinds of locking and pressure oscillation issues and so on. Since the simulator handles tetrahedral elements, it can be applied to practical problems having complex body shapes. Combining with the tetrahedral auto meshing functionality, it can be also applied to severe large strain problems that appears in analyses of rubber-like materials. The effectiveness of the simulator was demonstrated through various examples of analyses.

研究分野：計算工学

キーワード：大変形解析 有限要素法 四面体要素 メッシュリゾーニング

1. 研究開始当初の背景

数値固体力学分野において有限要素法は事実上の標準手法であり、幅広い解析に用いられている。ゴムやプラスチック等の大変形を伴う解析においても有限要素法は広く用いられているが、厳しい大歪みを伴う場合には解析の途中でメッシュが潰れてしまうことに起因する収束困難や精度低下に陥ることが知られている。この問題に対し、時間進展に伴ってメッシュを切り直す手法(リゾーニング)が用いられている。しかし、任意の変形形状に対して自動でリメッシングを行うためには四面体要素を使わねばならず、ロッキング等による精度低下が問題となる。加えて、陰解法リゾーニングではリメッシング後に釣合方程式を解き直す必要があり、しばしば解析が不安定となる問題がある。従って、厳しい大歪みを伴う大変形問題に対する精度と安定性を両立した解析手法は未だ確立されておらず、上記の精度と安定性に関する問題の解決が課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、既存技術では解くことが出来ない厳しい大歪みを伴う大変形問題を高精度かつ安定に解くための新しい有限要素解析手法の開発を目的とする。メッシュの潰れを解消するリゾーニングにおいて、四面体要素を使用してもロッキング等による精度低下を引き起こさず、釣合方程式の解き直しによる安定性低下も引き起こさない定式化の確立を目指す。

3. 研究の方法

まず、四面体要素を用いてもロッキング等による精度低下を引き起こさない定式化として平滑化有限要素法に着目する。平滑化有限要素法は2007年に提唱された比較的新しい有限要素定式化であり、4節点四面体要素を用いてロッキングを防ぐことが出来る定式化として注目を集めている。本研究では近年提案されている平滑化有限要素法に更なる改良を加え、高精度な4節点四面体要素を提案する。

次に、リゾーニングによる釣合方程式の解き直しの際に生ずる不安定を解消するため、陰的増分形釣合方程式を導入する。陰的増分形釣合方程式はその名の通り増分形であるため、リゾーニングによる釣合方程式の解き直しを必要としない。ただし、その代わりに節点外力を旧メッシュから新メッシュにマッピングする必要が新たに生ずる。

最後に、上記2つを組み合わせることによって、四面体による全自動リメッシングで精度と安定性を保った大変形リゾーニング解析の実現を試みる。

4. 研究成果

まず、四面体を用いる平滑化有限要素法の新たな定式化を2種提案し、それらの性能評

価を行った。

1つ目の定式化は従来の Selective ES/NS-FEM-T4 に偏差/体積分解を導入した定式化である。これにより、従来は線形弾性体しか扱うことが出来なかった手法がほぼ全ての材料モデルを扱える手法へと進化し、大変形解析でも高精度な解が得られることを示した。ただし、以下の3個の問題点は解決出来なかった。i) 偏差/体積連成項がある材料を扱えないこと、ii) 微圧縮性材料の解析における圧力振動を抑制出来ないこと、iii) 大変形解析において角部の変形が固くなるコーナーロッキングが生じること。

2つ目の定式化はF-bar法とES-FEM-T4を組み合わせた定式化、F-barES-FEM-T4である。F-bar法を用いることで上記i)の問題点を解決し、さらに繰り返し平滑化の手法を用いることで上記ii)とiii)の問題点も解決した。様々な大変形解析に対して商用ソフトとの結果比較を行い、提案手法の精度の高さを示した。検証の結果、提案手法は四面体要素として現時点では世界最高精度であると考えられる。ロッキングや圧力振動の問題はゴム材料のような元より微圧縮の超弾性材料だけでなく、ガラス転移点付近で加工される粘弾性材料や降伏後の加工硬化率が小さい弾塑性材料でも起こりうる。従って、提案手法の適用範囲は極めて多岐に渡ることが予想される。

次に、陰的増分形釣合方程式に基づくリゾーニング法を実装し、その性能評価を行った。釣り合いを増分形で評価するため、目論見通りリゾーニング後に釣合方程式を解き直す必要性がなく、従って不安定性は解消された。しかし、節点外力のマッピングによる誤差の混入が避けられず、その影響がリゾーニング回数に比例して大きくなってしまいう現象が確認された。この誤差は塑性変形が卓越する様な解析においては大きな問題とならない。一方、スプリングバックが重要となる超弾性体の解析においてはこの誤差のために除荷後も初期形状に戻らない問題が起こる。よって、提案した陰的増分形釣合方程式によるリゾーニング法は塑性が卓越する解析においては有効であるが、ゴム弾性の解析においては有効でないことが確認された。そこで、ゴム弾性の解析に対しては従来通りの釣合方程式を用いたリゾーニング法を採用することとした。

最後に、上記のF-barES-FEM-T4と従来通りの釣合方程式によるリゾーニング法を組み合わせたプログラムを実装した。種々の大変形解析で検証を行い、4節点四面体要素を用いた大変形リゾーニング解析において提案手法が精度と安定性を両立できることを確認した。これにより、今後はタイヤゴムなどの超弾性体、樹脂成形などの粘弾性体、バルク金属加工などの弾塑性体の大変形解析において提案手法の適用による技術貢献が期待される。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. Performance Evaluation of the Selective Smoothed Finite Element Methods using Tetrahedral Elements with Deviatoric/Hydrostatic Split in Large Deformation Analysis, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol. 63, pp. 55-65, Oct. 2015.
DOI: 10.11345/nctam.63.55

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. A locking-free selective smoothed finite element method using tetrahedral and triangular elements with adaptive mesh rezoning for large deformation problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, Vol. 99, No. 5, pp. 354-371, Aug. 2014.
DOI: 10.1002/nme.4684

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. A Novel Static-Implicit Finite Element Formulation for Large Deformation Analysis Based on the Incremental Equilibrium Equation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol. 61, pp. 135-144, May. 2013.
DOI: 10.11345/nctam.61.135

[学会発表](計20件)

Yuki ONISHI. Performance Evaluation of Smoothed Finite Element Methods with Tetrahedral Elements in Large Deformation Elasto-Plastic Analysis, The 22nd International Symposium on Plasticity and Its Current Applications (Plasticity2016), Jan. 6, 2016. カイルア・コナ(アメリカ)

Yuki ONISHI. F-barES-FEM-T4: a new finite element formulation of nearly incompressible solids with tetrahedral elements, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM III), Oct. 14, 2015. 第一ホテル両国(東京)

大西有希, 天谷賢治. 四面体要素を用いた F-bar aided edge-based smoothed finite element method (F-barES-FEM-T4) による微圧縮性材料の静的陰解法大変形解析, 第 28 回計算力学講演会, Oct. 10, 2015. 横浜国立大学(横浜市)

飯田稜也, 大西有希, 天谷賢治. 四面体要素を用いた F-bar aided edge-based smoothed finite element method

(F-barES-FEM-T4) による微圧縮性材料の動的陽解法, 第 28 回計算力学講演会, Oct. 10, 2015. 横浜国立大学(横浜市)
Yuki ONISHI. Application of Preconditioned Iterative Methods in Selective Smoothed Finite Element Methods with Tetrahedral Elements for Nearly Incompressible Materials, The 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM13), Jul. 29, 2015. サンディエゴ(アメリカ)

Yuki ONISHI. F-bar aided edge-based smoothed finite element method with tetrahedral elements for large deformation analysis of nearly incompressible materials, The 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), Jul. 17, 2015. オークランド(ニュージーランド)

大西有希, 天谷賢治. 四面体要素に内部節点を追加した平滑化有限要素法による高精度大変形解析, 第 20 回計算工学講演会, 計算工学講演論文集, Vol. 20, Jun. 8, 2015. つくば国際会議場(つくば市)

Yuki ONISHI. Recent Advancement in Smoothed Finite Element Methods for Locking-free Analysis with Tetrahedral Elements, The 7th Korea-Japan Workshop on Computational Mechanics, Proceeding of the 7th Korea-Japan Workshop on Computational Mechanics, Apr. 10, 2015. 釜山(韓国)
大西有希, 天谷賢治. 平滑化有限要素法による四面体要素を用いたゴムの大变形解析, 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会 (CMD2014), 第 27 回計算力学講演会予稿集, Nov. 22, 2014. 岩手大学(盛岡市)

大西有希, 天谷賢治. 四面体要素を用いた大变形解析における種々の平滑化有限要素法の性能評価, 第 63 回理論応用力学講演会, 第 63 回理論応用力学講演会講演論文集, Sep. 28, 2014. 東京工業大学(東京)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. Performance Evaluation of the Selective Smoothed Finite Element Method with Deviatoric/Hydrostatic Split, The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Jul. 29, 2014. ケンブリッジ(イギリス)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. A Locking-free smoothed finite element formulation (modified selective FS/NS-FEM-T4) with tetrahedral mesh

rezoning for large deformation problems, The 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Jul. 21, 2014. バルセロナ (スペイン)
大西有希, 天谷賢治. 大変形問題に対する四面体要素を用いたロッキングフリー選択的平滑化有限要素法, 第 19 回計算工学講演会, 計算工学講演会論文集, Vol. 19, Jun. 11 2014. 広島国際会議場 (広島市)

大西有希, 天谷賢治. 平滑化有限要素法 (S-FEM) に基づくロッキングフリー四面体要素, 第 17 回応用力学シンポジウム, 第 17 回応用力学シンポジウム講演概要集, May. 10, 2014. 琉球大学 (那覇市)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. Locking-Free Smoothed Finite Element Method with Tetrahedral/Triangular Mesh Rezoning in Severely Large Deformation Problems, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2014), Apr. 14, 2014. 仙台国際センター (仙台市)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. Smoothed Finite Element Method Based on Incremental Implicit Equilibrium Equation for Large Deformation Mesh Rezoning Analysis, 5TH ASIA PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS & 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL MECHANICS, Dec. 12, 2013. シンガポール.

大西有希, 天谷賢治. 幾何学非線形および材料非線形を含むメッシュリゾーニング解析に対する平滑化有限要素法の定式化, 第 26 回計算力学講演会, 第 26 回計算力学講演会 講演論文集, Nov. 3, 2013. 佐賀大学 (佐賀市)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. A Novel Smoothed Finite Element Formulation Based on the Implicit Incremental Equilibrium Equation for Large Deformation Analysis with Mesh Rezoning, 12th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM12), Vol. 12, Jul. 24, 2013. ローリー (アメリカ)

大西有希, 天谷賢治. 平滑化有限要素法と増分形釣合方程式を組み合わせた大変形問題に対する安定かつ高精度なリゾーニング手法, 第 18 回計算工学講演会, 計算工学講演論文集, Vol. 18, Jun. 19, 2013. 東京大学 (東京)

Yuki ONISHI, Kenji AMAYA. An Accurate and Stable Static-Implicit Finite Element Rezoning Method for Large Deformation Elasto-Plastic Analysis,

The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solid, Jun. 11, 2013. チェジュ (韓国)

〔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
<http://www.a.mei.titech.ac.jp/~yonishi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 有希 (ONISHI YUKI)
東京工業大学・大学院情報理工学研究所・助教
研究者番号 : 20543747

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし