

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390157

研究課題名(和文) 自由自在なリメッシングに基づく三次元任意形状き裂の非線形進展解析

研究課題名(英文) Nonlinear 3-D crack propagation analysis with arbitrary crack shape based on a remeshing technique

研究代表者

岡田 裕 (Okada, Hiroshi)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：50281738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、リメッシングを必要とする大変形弾塑性解析に対して有効な手法であるMDP-FEMを提案した。リメッシングの際、応力など各種物理量を新しく生成した有限要素法メッシュに移し替えるマッピングが必要となる。新手法は、それらをMDP (Mesh-independent Data Point) とよぶ点群で保持することで、有限要素法メッシュ間でのマッピングを不要にし、自由自在なリメッシングを可能にした。

研究成果の概要(英文)：In present research, a new numerical technique “MDP-FEM” for large deformation elastic plastic analysis was proposed. In “remeshing” which is often carried out to avoid excessive element distortions, “data mapping” of strain history dependent physical quantities such as the stresses from old to new finite element analysis model is necessary. This course of investigation proposes the use of MDPs (Mesh-independent Data Points) which are distributed over the problem domain independently from the finite element mesh. With the MDPs, the data mapping is not necessary and arbitrary remeshings can be carried out.

研究分野：計算力学

キーワード：計算力学 三次元き裂進展解析 数値計算手法 弾塑性解析 大変形

1. 研究開始当初の背景

現在、日本では原子力機器に代表されるエネルギー機器、高速道路や鉄道に代表される社会的インフラストラクチャーの経年化が進みつつある。例えば、国内原子力発電所の多くは1970年代に建設され、高経年化が進行している。また、東名高速道路や東海道新幹線は建設から40年以上経過している。これらのエネルギー機器や社会的インフラストラクチャーは無くしてはならないものであるが、経年化による突然の故障や破壊の危険性が年々増すばかりである。世界に目を向ければ、ミネアポリスの橋梁崩落などの事故が発生している。社会的に重要なエネルギー機器やインフラストラクチャーの破壊事故を未然に防ぐためには、計算破壊力学を用いた経年構造物に対する構造健全性評価や余寿命予測が大変有用である。特に、構造のき裂損傷を適切に評価する計算破壊力学解析は大変重要な役割を果たすであろう。長期間の使用による構造損傷を的確に予測し、評価するための計算破壊力学技術は着実な進歩を遂げてきた。例えば、三次元構造物を対象とした疲労や応力腐食割れによるき裂進展解析については一般に線形弾性解析に基づいて行われ、本研究の提案者による自由自在なリメッシングを用いるき裂進展解析に関する研究成果(参考文献[1,2])などにより実用化が近い。このように、疲労や応力腐食割れといった、安定的なき裂損傷進行に対して実用的な予測が可能になりつつある。経年構造物の検査・メンテナンス計画立案に対して大変有用な計算力学解析技術として、今後も発展が期待される。

2. 研究の目的

計算破壊力学解析技術は、一般に二次元問題で基盤が構築され、三次元問題へと拡張されてきた。また近年では、拡張有限要素法[3]や重合メッシュ法[4]、あるいはリメッシング技術[1,2]を活用した三次元構造物中の(疲労や応力腐食割れ)き裂進展解析に大きな進歩があった。

ところが、三次元構造物に対する最終破壊の予測や再現は、動的なき裂進展や大変形・弾塑性変形という非線形性を有し、さらにき裂進展経路が三次元的な曲面になるなど依然大変困難な問題である。三次元的曲面を有する解析モデル生成が困難だけでなく、材料各点で変形履歴を記憶しておく必要があるが、き裂進展に伴うリメッシングで有限要素法解析モデルの節点や要素情報が時々刻々変化する(図2を参照)ため、変形履歴を有限要素法解析モデルで記憶できなくなる。本来、有限要素法解析モデル(有限要素)は”離散化(変位や重み関数の内挿)”と”弱形式の積分”のためのものである。

ボトルネックは、”変形履歴の記憶”も有限要素法解析モデル(有限要素)によって行われているために自由自在なリメッシング

ができないことにある。

3. 研究の方法

本研究で開発する計算手法では、変形履歴記憶機能は、本研究でMesh-independent data point (MDP) と呼ぶ、材料中に埋め込まれ、変形とともに移動する、有限要素に独立な点群が担う。MDPは三次元空間内に規則的、あるいはランダムに配置された点であり、変形履歴記憶機能だけを受け持つ。そのため、それらの配置は有限要素法メッシュと独立に設定でき、また、リメッシングを行ってもMDPの配置に影響は無い。

弱形式の積分を行うためには、MDPと有限要素の間で変形履歴を表す諸量のマッピングを行う必要があるが、有限要素などは使用しない局所最小自乗法や移動最少自乗法を用いる。MDPの変形履歴諸量のアップデートはMDPにおけるひずみ増分に基づき行うことができる。

従来、大変形に伴い発生する有限要素法メッシュのゆがみを解消する方法として、リメッシングが採用される場合があるが、応力など変形履歴に依存する物理量は有限要素の積分点で保持する。一般にリメッシュの際に、それら応力など物理量をリメッシュ前の節点に与え、連続な量にする。次に、節点から有限要素法の形状関数による補間を行うことによって、更新された有限要素法解析モデルの節点に移していく。このとき、新しい有限要素法解析モデルの積分点に与えられた応力等の物理量の分布は更新前のモデルの形状関数に支配される。一般に一次関数などの低次関数分布である。提案手法では、物理量を物体の変形とともに移動する、有限要素法メッシュに独立なMDPでラグランジュ的に保持するため、解析中に応力等物理量の空間解像度が変化しない。

上記の発想に基づき、自由自在なリメッシングを伴う大変形材料非線形解析に基づく「三次元任意形状き裂の非線形進展解析」を可能にするため、“離散化・弱形式の積分”機能と“変形履歴記憶”機能が分化した、新しい大変形の材料非線形問題に対する新しい計算力学技術を本研究で開発してきた。

また、プログラム実装では、テンソル・ベクトル計算ライブラリ AutoMT を利用し、プログラム実装作業の効率化と計算速度の高速化を図った。

4. 研究成果

(1) 提案手法の詳細

はじめに、本研究で提案した解析手法のアルゴリズムを図1に示す。本手法の特徴は、変形履歴に依存する各種物理量を有限要素の積分点(ガウス点)ではなく、Mesh-independent Data Point (MDP) と呼ぶ、物体の変形とともに移動する点で Lagrange 的に変形履歴に依存する各種物理量を保持することである。そのため、図2に

示すように有限要素法解析モデル (図 2(a)) とは独立に MDP を配置 (図 2(b)) し、両者は図 2(c) のように重なり合うものである。

更新ラグランジュ法に基づく有限変形弾塑性解析を実施するにあたり、図 1 のように、変位増分、変位増分の勾配、ひずみ増分、スピンを有限要素の積分点 (ガウス点) から MDP にマッピングし、MDP 上で応力や塑性ひずみ、相当塑性ひずみなどの変形履歴に依存する各種物理量を更新する。さらに、更新した物理量は続く増分ステップで剛性マトリクスを生成するために有限要素の積分点 (ガウス点) にマッピングする必要がある。

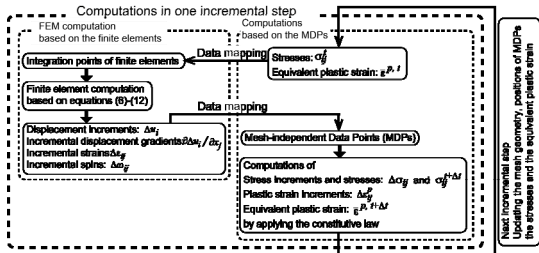


図 1 提案手法の解析アルゴリズム

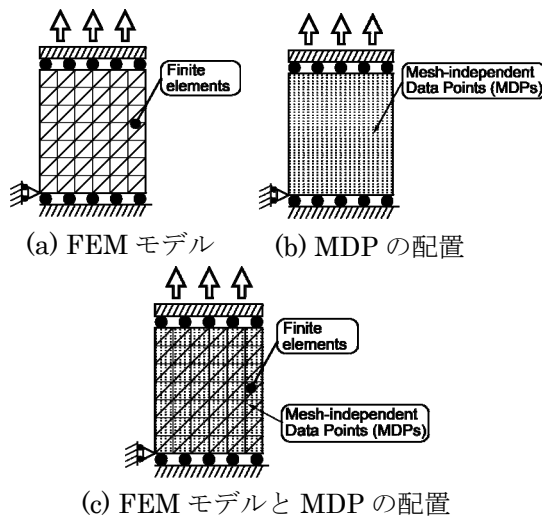
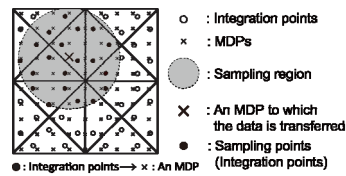
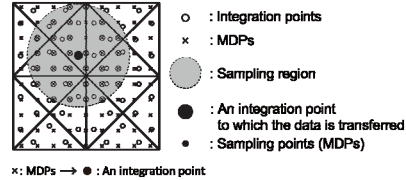


図 2 有限要素法メッシュ分割と MDP (Mesh-independent Data Point) の配置

マッピングは基底関数に一次関数を用い、データを与える点 (MDP または有限要素の積分点) を中心に局所最小二乗法によって行う。その際、使用するデータを有するデータ点を、データを与える点の周囲で収集する必要がある。本研究では、データを与える点を内部に含む有限要素の代表寸法を半径とする球内部の点のデータを用いた。それらのような点のことを本研究ではサンプリング点と呼ぶ。サンプリング点とデータを与える点の関係について図 3 に示す。データ点が MDP か有限要素の積分点であるかに係わらず、データの移し替え (データマッピング) は全く同様な点のデータから点のデータへの局所最小二乗法マッピングを使用する。これにより、両者でほぼ同じ解析アルゴリズムを使用することができる。



(a) データ点: MDP サンプリング点: 積分点



(b) データ点: 積分点 サンプリング点: MDP

図 3 データを与える点とサンプリング点

(2) 拡散くびれ問題への適用

提案手法を、引張を受ける角柱の拡散くびれ問題に適用し、本研究で提案・開発してきた手法の評価を行った。引張を受ける角柱とその境界条件を図 4 に示す。

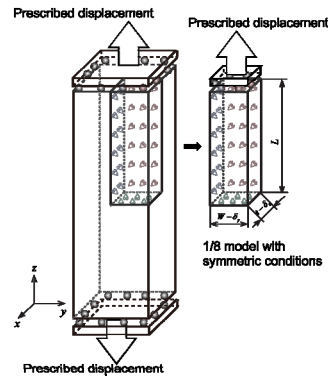


図 4 引張を受け、拡散くびれ変形を生ずる角柱の問題

初期の幅 W と厚さ t の比 t/W を 4 種類 (1, 1/4, 1/10, 1/20) 設定し解析を行った。 $t/W = 1$ の場合の有限要素法解析モデルを図 5、要素数と節点数のサマリ表 1 にそれぞれ示す。有限要素法メッシュの大きさを変え、三種類の解析モデルを準備し、有限要素の寸法が解析結果に及ぼす影響を調査した。さらに、MDP-FEM の初期要素分割と MDP の配置を図 6 に示す。図 6 からわかるように、MDP の配置密度は有限要素法解析モデルのメッシュ密度よりも細かく設定している。MDP-FEM の初期有限要素法解析モデルは有限要素法解析モデルのうち、最も粗な要素分割の場合と同じである。しかし、MDP の配置密度を細かくすることで、各種物理量の分布の空間解像度が粗くなりすぎないようにしている。

公称応力-公称ひずみ関係を、三種類の有限要素法解析モデルを使用した結果と MDP-FEM の結果に加え、参照解 (岡澤ら[*]) を図 7 に示す。さらに、公称ひずみが 38.8% での有限要素法解析と MDP-FEM で得た変形と相当塑性ひずみ分布の様相を図 8 と図 9 に示

す. 図7では, 本研究で実施した通常の有限要素法解析による公称応力-公称ひずみ関係で, 粗いメッシュ分割 (Coarse mesh) では公称ひずみ 0.3 以上, 細かいメッシュ分割 (Fine mesh) では 0.33 以上, 最も細かいメッシュ分割 (Finest mesh) では 0.35 以上で公称ひずみの増加に伴う公称応力の減少が鈍くなる. 一方, MDP-FEM を用いた場合は公称応力の減少が鈍くなることはない.

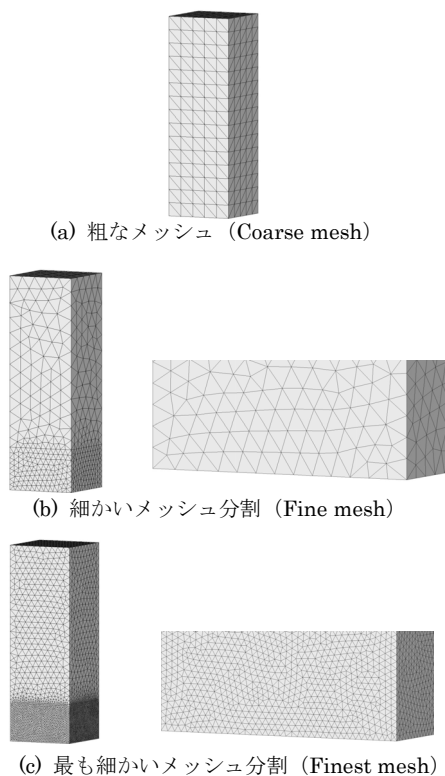


図5 拡散くびれ問題解析のための有限要素法解析モデル

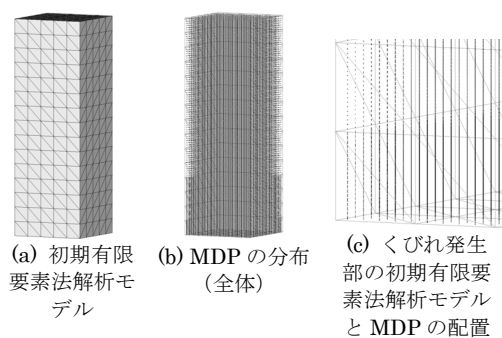


図6 拡散くびれ問題解析のためのMDP-FEM 初期解析モデル

表1 有限要素法解析モデルの総節点数と総要素数のサマリ ($t/W = 1/1$)

Type of model	Total number of nodes	Total number of elements	Element size in the location of necking	Element size at remote location
Coarse	4585	2878	0.2	0.2
Fine	21025	14182	0.075	0.2
Finest	263136	186253	0.025	0.1

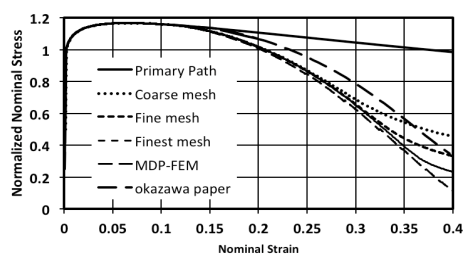


図7 公称応力-公称ひずみ線図 ($t/W = 1$)

この現象は, 例えば, 図8(a)の粗いメッシュ (Coarse mesh) を用いた場合のメッシュ変形図から見られるように, くびれ部の有限要素が大きく伸びてしまい, くびれ部の局所的な断面収縮を表現できなくなってしまったために発生したと考えられる. 細かいメッシュ分割 (Fine mesh), 最も細かいメッシュ分割 (Finest mesh) のように要素分割による変形図 (図8(b)と(c))でも同様に, くびれ部の有限要素の有限要素が大きく変形することで局所的な断面収縮を妨げている.

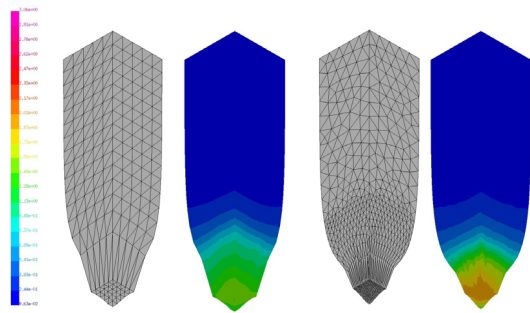
一方, MDP-FEM を用いた場合は, 図8(d)に見られるように, リメッシュを重ねていくことで, 大きく伸びたような有限要素の形状にならず, 断面収縮を適切に表現していくことが可能と思われる. そのため, 断面収縮による公称応力 (過重) の減少が鈍くならず継続する. 他に, 初期の板厚 t と幅 W の比が 4, 10, 20 の場合も解析しているが, 同様な結果を得ている.

拡散くびれ問題の解析結果から, 提案手法を利用した自由自在なリメッシング機能により, 有限要素の大変形に起因する解析精度の低下を抑制することができることがわかった.

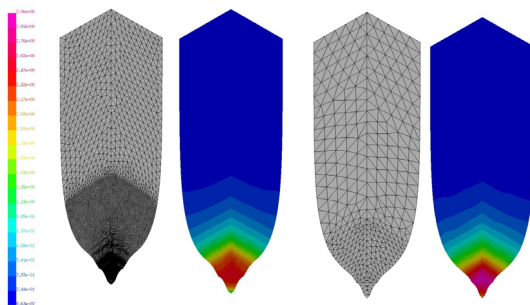
(3) き裂問題への適用

さらに, 図9に示す表面き裂を有する平板の弾塑性大変形解析を通常の有限要素法 (C-FEM) と MDP-FEM で実施した. 図10に両方で共通に使用した有限要素法解析モデル, MDP-FEM で使用した MDP の分布, さらに, 解析の結果得られた公称ひずみと正規化した荷重関係を示す. 荷重を初期断面積と初期降伏応力の積で除すことで正規化を行っている. 材料はヤング率 206GPa, ポアソン比 0.3, 初期降伏応力 250 MPa を仮定した. 線形硬化を仮定し, 加工硬化係数を 20.0 MPa とした. 全断面降伏状態であったため, 公称ひずみ 0.003 以上で荷重は変形とともに減少している. 通常の有限要素法によるものと MDP-FEM によるものでよく一致している. き裂を有する場合でも, MDP-FEM で巨視的な変形を精度良く解析できたと考える.

しかし, き裂前縁近傍では MDP-FEM のよる解析で期待した解析精度を得ることができなかった. 現在き裂前縁近傍の解析精度に関する問題の解決を図るとともに, き裂進展解析を行うための機能拡張が進行中である. ごく近い将来, き裂進展解析を実施できる見通しである.



(a) C-FEM (Coarse mesh) (b) C-FEM (Fine mesh)



(c) C-FEM (Finest mesh) (d) MDP-FEM

図 8 変形と相塑性ひずみ分布 (公称ひずみ 0.388)

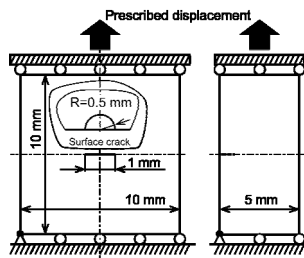
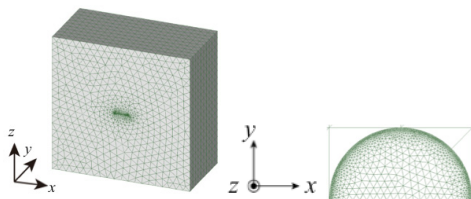
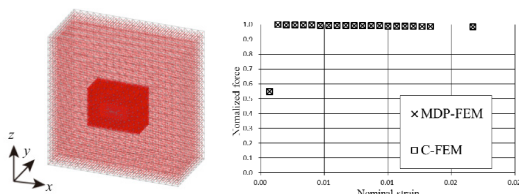


図 9 仮定した平板の表面き裂問題



(a) FEM モデル (b) き裂面



(b) MDP の初期配置 (c) 公称ひずみ-正規化荷重関係

図 10 表面き裂問題で採用した有限要素法解析モデル, MDP の初期配置, 解析で得られた公称ひずみ-正規化荷重関係

(4)まとめ

本研究の研究成果は、本手法の提案とそれに基づく大変形弾塑性有限要素法解析プログラムの開発と、例題解析による提案手法の有用性を確認したことである。

しかし、破壊力学問題解析では精度に問題がある。その解決を今後の課題とする。

<引用文献>

- ① S. Kaneko, H. Okada, H. Kawai, Development of Automated Crack Propagation Analysis System (Multiple Cracks and their Coalescence) , Journal of Computational Science and Technology, Vol. 6(2012) No. 3, pp.97-112.
- ② H. Okada, H. Kawai, T. Tokuda, Y. Fukui, Fully Automated Mixed Mode Crack Propagation Analysis based on tetrahedral finite element and VCCM (Virtual Crack Closure-Integral Method), International Journal of Fatigue, in Press, 2012. (Available on line April 2012)
- ③ N. Sukumar, D.L. Chopp, B. Moran, Extended Finite Element Method and Fast Marching Method for Three-Dimensional Fatigue Crack Propagation, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 70 (2003), pp. 29-48.
- ④ H. Okada, S. Endoh, M. Kikuchi, On Fracture Analysis Using an Element Overlay Technique, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72 (2005), pp. 773-789.

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 2 件)

- ① Hiroshi Kawai, Kohmei Satoh, Yasunori Yusa, Takayuki Uomoto, Ryuji Shioya, Hiroshi Okada, AutoMT, a library for tensor operations and its performance evaluation for solid continuum mechanics applications, Mechanical Engineering Letters, 査読有, Vol. 1 (2015) p. 15-00349, doi:doi.org/10.1299/mel.15-00349
- ② Tetsuya Koshima, Hiroshi Okada, Three-dimensional J-integral evaluation for finite strain elastic-plastic solid using the quadratic tetrahedral finite element and automatic meshing methodology, Engineering Fracture Mechanics, 査

読有, Vol. 135, pp. 34–63, 2015. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.01.014

[学会発表] (計 11 件)

- ① 鈴木力, 魚本貴之, 佐藤皓明, 遊佐泰紀, 岡田裕, 新しい物理量保持手法を導入した大変形有限要素法によるき裂問題解析, 第 21 回 計算工学講演会, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市), 2016 年 5 月 31 日.
- ② 魚本貴之, 佐藤皓明, 遊佐泰紀, 岡田裕, 新しい変形履歴の保持手法を用いた有限要素法による拡散くびれ問題の解析, 第 28 回 計算力学講演会(CMD2015), 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市), 2015 年 10 月 10 日~10 月 12 日.
- ③ Hiroshi Okada, Yuki Wakashima, Hiroshi Kawai, Interaction Integral Method for Arbitrary Shaped 3-D Cracks and its Application in Crack Propagation Problems, 13th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM13), San Diego (アメリカ), 2015 年 7 月 26 日~7 月 30 日.
- ④ 魚本 貴之, 佐藤 皓明, 岡田 裕, 新しい変形履歴の保持手法を用いた有限要素法による大変形弾塑性解析に関する研究, 第 20 回 計算工学講演会, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市), 2015 年 6 月 8 日.
- ⑤ Yuki Wakashima, Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, 3D fracture software system based on ordinary finite element method with minimal meshing effort, PANACM 2015 (1st.Pan-American Congress on Computational Mechanics), 2015 年 4 月 27 日~4 月 29 日, Buenos Aires (アルゼンチン).
- ⑥ 若島由樹, 岡田裕, 河合浩志, テトラ要素による相互積分法を用いた混合モード応力拡大係数の計算とき裂進展解析 (キンクを有するき裂の解析), 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会 (CMD2014), 2014 年 11 月 23 日, 岩手大学 (岩手県・盛岡市).
- ⑦ Yuki Wakashima, Hiroshi Okada, On mixed mode stress intensity factor evaluation using Interaction Integral Method for the tetrahedral finite element (for cracks with kinks), ICCM (International Conference on Computational Method) 2014, 2014 年 7 月 30 日, Cambridge (イギリス).
- ⑧ Yuki Wakashima, Tetsuya Koshima, Ryutaro Daimon, Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, Stress intensity factor evaluation for three-dimensional crack

with minimal meshing effort, 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) 5th. European Conference on Computational Mechanics (ECCM V), Barcelona (スペイン), 2014 年 7 月 23 日.

- ⑨ Yuki Wakashima, Tetsuya Koshima, Ryutaro Daimon, Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, Stress Intensity Factor and J-integral Evaluations based on Automatically Generated Tetrahedral Meshes, ICCES'14 (International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences), Changwon (韓国), 2014 年 6 月 16 日.
- ⑩ Hiroshi Okada, Ryutaro Daimon, Tetsuya Koshima, Yuki Wakashima, Three-dimensional J- and Interaction Integral Evaluations for Unstructured Finite Element Mesh around the Crack Front, 5th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM 2013 & ISCM 2013), 2013, シンガポール (シンガポール), 2013 年 12 月 11 日~14 日.
- ⑪ Tetsuya Koshima, Hiroshi Okada, Three-dimension J-integral for Large Deformation Elastic-plastic Problems Using Quadratic Tetrahedral Finite Elements, 5th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM 2013 & ISCM 2013), 2013, シンガポール (シンガポール), 2013 年 12 月 11 日~14 日.

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 裕 (OKADA, Hiroshi)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 50281738

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

越間 哲也 (KOSHIMA, Tetsuya)
若島 由樹 (WAKASHIMA, Yuki)
魚本 貴之 (UOMOTO, Takayuki)
佐藤 皓明 (SATO, Kohmei)