

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03795

研究課題名（和文）高性能計算を利用した構造物地震応答解析の解析モデル妥当性の方法論の考案

研究課題名（英文）Validation of numerical analysis model for structural seismic response analysis

研究代表者

堀 宗朗（Hori, Muneo）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門・部門長

研究者番号：00219205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高性能計算を利用した構造物地震応答解析の解析モデル妥当性の方法論の考案を目的とする。そのため、超大規模解析モデルの地震応答解析と、超多数解析モデルの地震応答解析を実行し、この二つの地震応答解析を基にした妥当性確認の方法論を考案した。地震応答解析を実行する並列有限要素法の改良も行いながら、二つの解析に成功した。この結果を基に、主応力を可視化することで解析モデルや解析結果の不具合を判定する、解析モデル妥当性の方法論を考案した。主応力の可視化は、主応力の方向を滑らかに繋げて作られる曲線座標を用いるが、この曲線座標を決定する境界値問題を導出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は、研究の目的である解析モデルの妥当性確認の方法を考案したことである。2階テンソルである応力の6成分を可視化するのではなく、3つの主応力が曲線座標を構成することを示し、かつ、その曲線座標を決定する境界値問題を導出したことは重要である。
研究成果の社会的意義は、構造物地震応答解析での高性能計算の利を促進を図った点である。構造物地震応答解析の品質保証には、100万自由度を超える解析モデルを扱う高性能計算の利用が必須である。この解析モデルの妥当性を確認する方法を示すことで、小自由度の解析モデルと比較して、高性能計算を利用した数値解析がより高い品質が保証できることを示した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a methodology for validation of analytical models for structural earthquake response analysis using high-performance computation. For this purpose, we performed a seismic response analysis of a very large analysis model and a seismic response analysis of a very large number of analysis models, and developed a methodology for validation based on these two seismic response analyses. The two analyses were successfully performed while improving the parallel finite element method used to perform the seismic response analysis. Based on the results, an analytical model validation methodology was devised to determine the failure of the analytical models and results by visualizing the principal stresses. The visualization of principal stresses is based on the curve coordinates created by smoothly connecting the directions of principal stresses, and we succeeded in deriving a boundary value problem to determine the curve coordinates.

研究分野：地震工学・応用力学・計算力学

キーワード：地震応答解析 妥当性確認 主応力方向 大規模数値解析 高性能計算

1. 研究開始当初の背景

工学全般で数値解析の品質保証は重要事項である。構造物地震応答解析で用いられる有限要素の場合、品質保証の方法が確立している。その方法の要諦は、解析プログラムに不備がないことを調べる検証と、解析モデルに不備がないことを調べる妥当性確認である。解析プログラムの検証は解析解との比較が標準であるが、解析解のない問題を解く解析プログラムでは検証が難しい。提案者は、数値創成解の手法を考案し、この問題を解決しつつある。

構造物地震応答解析では、解析モデルの妥当性確認の具体的な方法が未解決となっている。新設構造物の場合、試作品が作れず、実構造物と比較するという狭義の解析モデルの妥当性がそもそも適用できない。既設構造物の場合、全ての部材の材料・構造特性を計測することは難しく、実構造物と解析モデルの比較には限界がある。さらに、地盤構造物の場合、各地層の3次元形状や材料特性を計測することすら難しい。大型社会基盤施設の数値解析全般に関わる課題とも考えられるが、構造物地震応答に使う解析モデルの妥当性確認の方法には工夫が必要である。

縮小モデルや模擬地盤を使った実験結果を再現することで、数値解析の検証・妥当性確認が行うことが現状である。しかし、そもそも計測できない量を予測することが数値解析の真価であり、再現は必要条件にしかすぎない。構造物地震応答の数値解析の品質を保証するために、「いかなる方法で解析モデルの妥当性確認を行うか」は重要課題である。試作品の実験結果との比較を基本とする通常の方法論とは別の、構造物地震応答解析に適した解析モデル妥当性確認の方法論を確立することが必要とされる。

2. 研究の目的

本研究は、構造物地震震応答解析の品質保証のために、解析モデルの妥当性確認の方法論を考案することを目的とする。なお、数値解析の品質保証は、一定の度合いの品質を保証することが目的であり、必ずしも高品質を保証するものではない。構造物地震震応答解析の場合、構造物の重要度に応じて要求される耐震性も異なるため、数値解析の品質も異なることが自然である。解析モデルの妥当性確認の方法論を考案するために、本研究は、高性能計算の利用を前提とする。高性能計算は、規模の大きい問題を解く capability computing と、多数の問題を解く capacity computing の二つがあるが、本研究は両者を使う。

3. 研究の方法

試作品が作れないことや実構造物の計測に限界があることを考慮すると、狭義の妥当性とは異なる意味で、構造物地震震応答解析の解析モデルの妥当性を定量的に定義することが合理的である。本研究は、1) モデル縮約の適切性、2) モデルの信頼性、という二つの定義を考える。第一の定義は解析精度に関する。物理的な観点からは構造物の地震応答は連続体力学の問題として設定される。この観点では、地震震応答解析は波動方程式を解くことに尽きる。従来、空間3次元、時間1次元の4次元の偏微分方程式を正確に解くことは不可能であり、このため、空間の次元を落とす、解の形式を設定する等、さまざまな近似解法が提案されてきた。このような近似解法は連続体力学のモデル縮約と考えることができる。すなわち、モデル縮約された数値解は、4次元波動方程式を解いた数値解の近似解である。4次元波動方程式の数値解を基準とした、モデル縮約の数値解の精度が本研究で考える解析精度である。

モデル縮約の適切性という第一の妥当性を確認する方法論の素案は、構造物・地盤の超大規模解析モデルを作り、これを仮想供試体として利用することである。仮想供試体は4次元波動方程式の(数値計算の精度内で)正解を与える。前述のように、妥当性確認を行う解析モデルのモデル縮約の適切さは、この仮想供試体を使った数値解析結果と比較することになり、比較によって得られる解析精度を定量的指標として使う。仮想供試体の数値解析には、高性能計算の capability computing を利用する。この capability computing には有限要素法を使って4次元波動方程式を解く。正確に波動方程式と解くために仮想供試体はソリッド要素のみを使う(完全ソリッド解析モデル)。一方、妥当性確認の対象となる解析モデルは、梁・シェル要素等の構造要素を使った解析モデル(ハイブリッド解析モデル)や多質点系モデルである。連続体力学の波動方程式に対し、物理的仮定を一切設けることなく、数理的近似を施すだけで、梁・シェル理論を使う構造力学の支配方程式や、多質点系モデルの運動方程式が導出できることを、提案者はメタモデリング理論として、証明している。

超大規模解析モデルとはいえ、仮想供試体は文字通り仮想であり、実際の構造物や地盤とは異なる。仮想供試体の幾何形状や材料特性のモデルパラメータが実際の構造物と地盤とは一致しないことが大きな一因である。モデルパラメータの不確定性に対処するため、第二の妥当性である解析モデルの信頼性が必要となる。信頼性を評価するために不確定性定量化を行う。不確定性定量化は、元来、数値解析の品質保証の一つの手段であり、解析モデルのモデルパラメータを様々に変えた解析を行い、解析結果の変化を定量的に求める方法である。解析結果の分布の幅が小さいほど、解析モデルの信頼性は高くなる。

不確定性定量化は、モデルパラメータが応答に与える影響を調べる感度解析と考えることも

できる。しかし、本研究では、高性能計算の capacity computing を使うことで、100 万のオーダーで、モデルパラメータの異なる解析モデルを生成し、地震応答に与える影響を包括的に調べる。これが信頼性のための不確定性定量化である。高性能計算の capacity computing は「力づく」の感がある。しかし、有意な解析モデルを 100 万のオーダーで生成すること、さらに、解析結果を分析しモデルパラメータが応答に与える影響を定量化することは決して単純ではない。例えば、1 つの解析モデルの計算結果が 10 MB である場合に 100 万の解析モデルでは計算結果は 10 TB となり、効率的なデータ処理が必要である。高性能計算の capacity computing は、元来、量の計算であるが、データ処理の観点からは、「(通常とは異なる)質」の計算ともみなすことができる。

本研究の学術的独自性は、構造物地震応答解析の品質保証のために、解析モデルの妥当性をモデル縮約の適切性と解析モデルの信頼性の二点で定義し、解析精度と解析結果の分布の幅という定量的指標を設定し、高性能計算を利用することでこの二つの指標を計算するという、妥当性確認の方法論を考案するところにある。現状の妥当性確認の方法論は、試作品が作れることを前提に、対象構造物の完全な情報が得られる状況が考えられている。地盤も含む構造物地震応答解析では、対象構造物の完全な情報が得られない状況にあり、そもそも現状の妥当性確認の方法論が適用できない。この結果、妥当性確認に関して思考停止に陥り、妥当性確認という手段を使って果たす数値解析の品質保証が進まないように見受けられると提案者は分析している。本研究では、対象構造物の完全な情報が得られない状況でも、一定の品質を保証するために、構造物地震応答解析の解析モデルの妥当性を定義し、その上で、高性能計算の利用を前提とした、妥当性の確認を可能とする方法論を考案するのである。

本研究の創造性は、地震工学分野において高性能計算を有効利用するための方法論を考案することである。構造物毎に設計が異なる建設分野では、膨大な数となる全構造物に対し、高性能計算を利用することは現実的ではない。さらに、数値解析の精度検証のためだけに、高性能計算を利用することは有効ではないことも自明である。本研究で考案する高性能計算の有効利用は、モデル縮約の適切性の評価に関して高性能計算の capability computing、解析モデルの信頼性に関して高性能計算の capacity computing を行うというものである。

地盤構造物の場合、地層の幾何形状・材料特性を完全に計測することは不可能である(全てを「掘り返す」ことが完全に計測する手段である)。地盤の地震応答を評価するためには、実際の地盤と異なるものの、地盤の解析モデルを疑似地盤と位置付けて、数値解析を行うことは合理的な手段である。重要な点は、疑似地盤を使う数値解析の品質である。本研究は、一定の品質を保証して地盤の地震応答を解析できることを目指すため、高性能計算を利用し、疑似地盤の適切さと信頼性を調べるという方法論を考案する。実用に使われる疑似地盤に対し、解析精度で評価される適切性は超大規模解析モデルとなる仮想地盤との比較、モデルパラメータの信頼性は超多数解析モデルの解析結果の分布の幅を使って調べる。なお、実地盤の観測データは信頼性に利用される。超多数解析モデルの解析計算の分布の適切な位置に観測データが入るよう、モデルパラメータの分布を設定するのである。

4. 研究成果

本研究の具体的な研究課題は、(1) 仮想供試体と位置付けた超大規模解析モデルの地震応答解析、(2) 超多数解析モデルのモデル構築と地震応答解析、(3) 二つの地震応答解析を基にした妥当性確認の方法論の考案、に分けられる。各々の研究課題の成果を以下に説明する。

(1) 超大規模解析モデルの地震応答解析

第一の研究課題は、既往の研究で構築済みの自由度 1,000 万の解析モデルに対し、適切な要素分割によって自由度 10 億の超大規模解析モデルを構築し、地震応答解析を実行することである。当初の計画通り、この超大規模解析モデルの構築に成功し、並列有限要素法 (HPC-FEM) を使った地震応答解析に成功した。

超大規模解析モデルの仮想供試体を解析する HPC-FEM には高速化が必要である。高速化は共役勾配法のソルバの前処理の改良に主眼を置く。より少ない繰り返し計算で所定の誤差以下とすることに成功し、HPC-FEM に実装した。改良された前処理の要諦は、併進と回転の剛体変形モードを含む、低周波数領域での低次モードの近似解を求めた後に、高周波数領域での高次モードまでの正解を求めるといふ、標準的な共役勾配法の前処理ではあるが、地震応答解析に適した前処理である。

超大規模解析モデルに対し、適切な構造要素を導入することで、自由度を下げながら、解析精度を逆に上げるようなハイブリッドの超大規模解析モデルの構築にも成功した。全ソリッド要素の超大規模解析モデルと比較して、ハイブリッド超大規模解析モデルの自由度は下がる。一方、高次の多項式を使う構造要素を、部材の適切な箇所に配置することで、収束速度は向上する。さらに、メタモデリング理論に基づき、連続体力学と完全に整合する曲梁とシェルの汎関数を定式化した。この汎関数を利用することで、ソリッド要素の解に整合する曲梁とシェルの構造要素の開発と、HPC-FEM への実装を進めている。さらに、ソリッド要素と構造要素を接続する最適 MPC の自動設定アルゴリズムも考案した。HPC-FEM の実装を進めている。

(2) 超多数解析モデルの地震応答解析

第二の研究課題は、構造物の超多数解析モデルの構築と、全モデルに対し地震応答解析を実行することである。鉄筋コンクリート、鋼、地盤の各々の材料のモデルパラメータの確率分布は、概ね、既知と考えることができる。この確率分布を使うことで任意の数の超多数解析モデルが構築できることを示した。また、従来の研究で見過ごされてきた接合部の不確定性に関して、接合部のモデルパラメータの確率分布と接触剥離を考慮した摩擦特性の不確定性を扱う数値解析手法を考案した。

ハイブリッド解析モデルは、超多数解析モデルとは別に、超大規模解析モデルにも適用することができる。前述の連続体力学と完全に整合する曲梁とシェルの汎関数には、テンソル形式で表現される連続体の3次元構成則が、曲梁の1次元構成則とシェルの2次元構成則に変換される。この変換は線形弾性を超えて元非線形弾塑性にも適用可能であり、非線形弾塑性のモデルパラメータの不確定性が構造要素の1次元ないし2次元構成則に変換されるかを検討した。

第一と第二の研究課題に密接に関連するが、構造物地震応答の数値解析の過程で発生する「数値解析の不安定化」が、当初予定していたHPF-FEMソルバの高精度化で解決できないことが判明した。このため、ソルバの高精度化とは異なる着想で「数値解析の不安定化」を解決した。この着想は、「数値解析の不安定化」の原因は、構造物地震応答という数理問題の「解の安定性の喪失」であるという分析に基づく。「解の安定性喪失」とは微小な擾乱が含まれると、解が正解から大きくずれて変わってしまうことであり、この数理問題を数値解析すると、必然的に「数値解析の不安定化」が発生する。「数値解析の不安定化」の解決のために、数理問題の解法ではなく、数理問題そのものを変えることが必要と考察される。非線形弾塑性理論を再定式化し、「解の安定性喪失」の主要因である塑性領域の特定を特定することで、「解の安定性喪失」が発生しないことを示した。従来の定式化と比較して、より適切な数理問題が設定されることが期待できる。当初の計画にはなかったものの、構造物地震応答解析の「数値解析の不安定化」という難問を、非線形弾塑性理論の再定式化が抜本的に解決する可能性を見出したことは、重要な成果と考えている。

(3) 妥当性確認の方法論の考案

第三の研究課題は、解析モデルの妥当性確認の方法論の素案を考案することである。実大の供試体を作らずとも、数値解析による構造物の地震応答の予測は可能であるが、この予測を支えている理論は、構造物の応答を決定しているのは材料の挙動であるという連続体力学である。構成則を適切に評価することで、解析モデルの妥当性が確認できることになる。重要な点は、解析モデルの妥当性は、一定の精度と信頼度での予測ができるという意味であり、構造物の挙動を完全に予測するという意味ではない。精度と信頼度を明示することが妥当性確認に必須であることを解明した。

超大規模解析モデルを用いる地震応答解析の数値解は、超多数解析モデルの地震応答の数値解の集合の中に入るようになる。特に設計上、重要な応力に対して、超大規模解析モデルの応力が、構造物の全領域で、超多数解析モデルの応力範囲の中に入ることが重要である。逆に、超大規模解析モデルの応力が超多数解析モデルの応力範囲に入らない部材や領域があれば、解析モデルの妥当性は確認できないことになる。

解析モデルの妥当性確認のために、2階テンソルである応力分布をより効果的に可視化することが重要な課題となった。このため、主応力の方向を滑らかに繋げて作られる主応力座標を利用した可視化に成功した。より具体的には、2階対称テンソルである主応力の方向を滑らかに繋ぐ直交曲線座標が唯一存在することを証明し、その曲線座標を決定する偏微分方程式を支配方程式とする境界値問題を導出し、この境界値問題を解く数値解析手法を開発した。

曲線座標である主応力座標は、主応力の流れに対応し、この流れが滑らかになることは、解析モデルに些末のミスがないことの必要条件である。さらに、主応力座標は直交する3つの曲線座標群を形成する。この結果、網羅的に解析モデルのミスを見つけられることになる。より具体的には、3つの主応力に対して、各々、曲面群が決定される。主応力が直交するため、異なる主応力の曲面群の交線は互いに直交する。したがって、3つの曲面群から3次元空間を覆う直交メッシュが構成される。この直交メッシュの曲率の時間・空間変化が妥当性確認の指標となる。曲率の変化が一定の閾値を超えた場合、解析モデルや解析条件に不備があることが示唆される。3つの主応力の方向に平行となる3次元直交メッシュの曲率変化は、妥当性確認の指標として汎用的に利用できることが期待できる。

なお、3次元の曲線座標では、2つの座標の値を固定し、1つの座標の値を増減させると曲線となり、1つの座標の値を固定し、2つの座標の値を増減させると曲面となる。この曲線は、流体で多用される流線に対応する。流線は、一本ずつ、常微分方程式の数値解として決定される。一方、曲線座標は境界値問題の解として領域全体で一括して決定できる。曲線座標を決定する数値解析手法は、現在の流線の数値解析手法の代替となることも期待される。

解析モデルの妥当性確認を考案する際、解析モデル構築の理論の再検討も行った。この理論の要諦は、通常、用いられる直交座標ではなく、数値解析に最適な曲線座標を選択することである。この理論は1次元曲梁の解析モデルを参考としている。1次元曲線座標は曲梁の曲線に沿っているため、形状にあった曲線座標が選択されているように見受けられる。しかし、トラクションフリーの境界条件を満たす側面では、曲梁の非0の主応力は1つであり、曲梁の1次元曲線座標

はこの主応力に平行な曲線座標である。すなわち、形状にあった選択ではなく、主応力を考慮した曲線座標が選択されたとも考えることができる。前述の曲線座標を決定する境界値問題が導出できたため、解析モデルの妥当性確認の副産物として、直交座標に代わって主応力座標を利用する解析モデルの構築を考案することができた（このアイデアは新たな科研費の獲得につながっている）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Amit Gill, Madgededara Lalith, Sebastian Poledna, Muneo Hori, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura	4. 巻 32
2. 論文標題 High-Performance Computing Implementations of Agent-Based Economic Models for Realizing 1:1 Scale Simulations of Large Economies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS	6. 最初と最後の頁 2101 ~ 2114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPDS.2021.3060462	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 該当する

1. 著者名 Fujita Kohei, Koyama Kentaro, Minami Kazuo, Inoue Hikaru, Nishizawa Seiya, Tsuji Miwako, Nishiki Tatsuo, Ichimura Tsuyoshi, Hori Muneo, Madgededara Lalith	4. 巻 49
2. 論文標題 High-fidelity nonlinear low-order unstructured implicit finite-element seismic simulation of important structures by accelerated element-by-element method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Science	6. 最初と最後の頁 101277 ~ 101277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jocs.2020.101277	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 -

1. 著者名 Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Koyama Kentaro, Kikuchi Yuma, Kusakabe Ryota, Minami Kazuo, Inoue Hikaru, Nishizawa Seiya, Tsuji Miwako, Nishiki Tatsuo, Hori Muneo, Madgededara Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 1
2. 論文標題 Fast scalable implicit solver with convergence of equation-based modeling and data-driven learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3468267.3470616	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 -

1. 著者名 Kusakabe Ryota, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Hori Muneo, Wijerathne Lalith	4. 巻 1
2. 論文標題 Large-Scale Stabilized Multi-physics Earthquake Simulation for Digital Twin	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Science	6. 最初と最後の頁 3-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-77964-1_1	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 -

1. 著者名 Kusakabe Ryota, Fujita Kohei, Ichimura Tsuyoshi, Yamaguchi Takuma, Hori Muneo, Wijerathne Lalith	4. 巻 50
2. 論文標題 Development of regional simulation of seismic ground motion and induced liquefaction enhanced by GPU computing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 197-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3369	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 -

1. 著者名 Khaji Naser, Mirzajani Mohsen, Hori Muneo	4. 巻 13
2. 論文標題 Analysis of Elastic Pulse Dispersion in Periodically Layered Composite Rods using Wave Finite Element Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Mechanics	6. 最初と最後の頁 21500050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S1758825121500502	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 該当する

1. 著者名 Takeyama Tomohide, O-Tani Hideyuki, Oishi Satoru, Hori Muneo, Iizuka Atsushi	4. 巻 26
2. 論文標題 Automatic Construction of Three-Dimensional Ground Model by Data Processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 2881-2887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2021.3105062	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 -

1. 著者名 Motoyama H., Sawada M., Hotta W., Haba K., Otsuka Y., Akiba H., Hori M.	4. 巻 50
2. 論文標題 Development of a general purpose parallel finite element method for analyzing earthquake engineering problems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 4180-4198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3551	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 -

1. 著者名 Chen Jian, O-tani Hideyuki, Takeyama Tomohide, Oishi Satoru, Hori Muneo	4. 巻 32
2. 論文標題 A Probabilistic Liquefaction Hazard Assessment for Urban Regions Based on Dynamics Analysis Considering Soil Uncertainties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Earth Science	6. 最初と最後の頁 1129-1138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12583-021-1431-1	査読の有無 無
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 Chen Jian, Takeyama Tomohide, O-tani Hideyuki, Yamanoi Kazuki, Oishi Satoru, Hori Muneo	4. 巻 117
2. 論文標題 Code verification of soil dynamics simulations: A case study using the method of numerically manufactured solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 103258 ~ 103258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2019.103258	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 -

1. 著者名 Yamaguchi Takuma, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Hori Muneo, Wijerathne Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 ICC2 2020
2. 論文標題 Data-Driven Approach to Inversion Analysis of Three-Dimensional Inner Soil Structure via Wave Propagation Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Conference on Computational Science	6. 最初と最後の頁 3-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-50420-5_1	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 -

1. 著者名 Murakami Sota, Yamaguchi Takuma, Fujita Kohei, Ichimura Tsuyoshi, Lalith Maddagedara, Hori Muneo	4. 巻 ICC2 2020
2. 論文標題 Data Assimilation in Volcano Deformation Using Fast Finite Element Analysis with High Fidelity Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Conference on Computational Science	6. 最初と最後の頁 18-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-50420-5_2	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 -

1. 著者名 Yamaguchi Takuma, Fujita Kohei, Ichimura Tsuyoshi, Naruse Akira, Wells Jack C., Zimmer Christopher J., Straatsma Tjerk P., Hori Muneo, Maddegedara Lalith, Ueda Naonori	4. 巻 1
2. 論文標題 Low-Order Finite Element Solver with Small Matrix-Matrix Multiplication Accelerated by AI-Specific Hardware for Crustal Deformation Computation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACM Digital Library	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3394277.3401860	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 -

1. 著者名 Quaranta Lionel, Maddegedara Lalith, Okinaka Tomoo, Hori Muneo	4. 巻 65
2. 論文標題 Application of PDS?FEM to simulate dynamic crack propagation and supershear rupture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1289-1304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-020-01819-z	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 -

1. 著者名 Kusakabe Ryota, Fujita Kohei, Ichimura Tsuyoshi, Hori Muneo, Wijerathne Lalith	4. 巻 11537
2. 論文標題 A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 349-362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_25	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 -

1. 著者名 Yamaguchi Takuma, Ichimura Tsuyoshi, Fujita Kohei, Hori Muneo, Wijerathne Lalith	4. 巻 11537
2. 論文標題 Heuristic Optimization with CPU-GPU Heterogeneous Wave Computing for Estimating Three-Dimensional Inner Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 389-401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_28	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 -

1. 著者名 Fujita Kohei, Horikoshi Masashi, Ichimura Tsuyoshi, Meadows Larry, Nakajima Kengo, Hori Muneo, Maddegedara Lalith	4. 巻 11537
2. 論文標題 Development of Element-by-Element Kernel Algorithms in Unstructured Implicit Low-Order Finite-Element Earthquake Simulation for Many-Core Wide-SIMD CPUs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 267-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22734-0_20	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 -

1. 著者名 Lalith Maddegedara, Gill Amit, Poledna Sebastian, Hori Muneo, Hikaru Inoue, Tomoyuki Noda, Koyo Toda, Ichimura Tsuyoshi	4. 巻 11536
2. 論文標題 Distributed Memory Parallel Implementation of Agent-Based Economic Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 419-433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_30	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 該当する

1. 著者名 Yamaguchi Takuma, Fujita Kohei, Ichimura Tsuyoshi, Hori Muneo, Maddegedara Lalith	4. 巻 13
2. 論文標題 Acceleration of unstructured implicit low-order finite-element earthquake simulation using OpenACC on Pascal GPUs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of High Performance Computing and Networking	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJHPCN.2019.097044	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 -

1. 著者名 Maddegedara Lalith, Amit Gill, Sebastian Poledna, Muneo Hori, Inoue Hikaru, Noda Tomoyuki, Toda Koyo and Tsuyoshi Ichimura	4. 巻 ICCS2019
2. 論文標題 Distributed Memory Parallel Implementation of Agent Based Economic Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Science	6. 最初と最後の頁 419-433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_30	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 該当する

1. 著者名 Kohei Fujita, Masashi Horikoshi, Tsuyoshi Ichimura, Larry Meadows, Kengo Nakajima, Muneo Hori and Lalith Maddegadara	4. 巻 ICCS2019
2. 論文標題 Development of Element-by-Element Kernel Algorithms in Unstructured Implicit Low-Order Finite-Element Earthquake Simulation for Many-Core Wide-SIMD CPUs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Science	6. 最初と最後の頁 267-280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22734-0_20	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 該当する

1. 著者名 Yamaguchi T., Ichimura T., Fujita K., Hori M., Wijerathne L.	4. 巻 ICCS2019
2. 論文標題 Heuristic Optimization with CPU-GPU Heterogeneous Wave Computing for Estimating Three-Dimensional Inner Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Science	6. 最初と最後の頁 389-401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_28	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 -

1. 著者名 Ryota Kusakabe, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori and Lalith Wijerathne	4. 巻 ICCS2019
2. 論文標題 A Fast 3D Finite-element Solver for Large-scale Seismic Soil Liquefaction Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Science	6. 最初と最後の頁 349-362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_25	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 -

1. 著者名 Lionel Quaranta, Lalith Maddegadara, Muneo Hori	4. 巻 131
2. 論文標題 Interaction of horizontally aligned coplanar 3D penny cracks under compression	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE MECHANICS AND PHYSICS OF SOLIDS	6. 最初と最後の頁 180-203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmps.2019.07.002	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20件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 19件）

1. 発表者名 A. Gill, M. Lalith, S. Poledna, M. Hori, T. Ichimura, K. Fujita
2. 発表標題 Development of High-performance Computing Extension for an Agent Based Economic Model for Fine-grained Post-disaster Economy Simulations
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chen Jian, O-tani Hideyuki, Takeyama Tomohide, Oishi Satoru, Hori Muneo
2. 発表標題 Study of effects of uncertainty in ground motion and soil permeability on citywide liquefaction using HP
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hori
2. 発表標題 Challenges of Computational Earthquake Engineering - from Fault Failure to Social Responses
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣部 紗也子、小國 健二、堀 宗朗
2. 発表標題 主軸線を用いた応力テンソル場の座標系非依存可視化手法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Naonori Ueda
2. 発表標題 Fast Multi-Step Optimization with Deep Learning for Data-Centric Supercomputing
3. 学会等名 Proceedings of the 2020 4th International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Maddegedara, Naonori Ueda, Yuma Kikuchi
2. 発表標題 A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks
3. 学会等名 2020 IEEE/ACM 11th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScalA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山紘希, 飯山かほり, 金田義行, 白木渡, 藤澤一仁, 堀宗朗
2. 発表標題 都市の地震動シミュレーションのための地盤モデルの堅牢な構築手法と適用
3. 学会等名 土木学会第23回応用力学シンポジウム講演概要集 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗
2. 発表標題 地表断層変位の予測解析 2016年熊本地震を対象として
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会概要集 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山紘希, 飯山かほり, 金田義行, 白木渡, 藤澤一仁, 堀宗朗
2. 発表標題 地盤モデルの堅牢な構築手法を統合した都市の地震被害シミュレーションの適用例
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会概要集 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田昌孝, 羽場一基, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗
2. 発表標題 広域・詳細2段階のFEMによる2008年岩手・宮城内陸地震の断層変位解析
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会概要集 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masataka Sawada, Kazumoto Haba and Muneo Hori
2. 発表標題 Analysis of surface fault displacements in 2014 Nagano-ken-hokubu earthquake by high performance computing
3. 学会等名 2019 Rock Dynamic Summit ISRM Specialized Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Motoyama and Muneo Hori
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD USING HIGH-FIDELITY MODEL FOR LARGE-SCALE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES CONSIDERING SOIL-STRUCTURE INTERACTION
3. 学会等名 2nd International Conference on Seismic Design and Analysis of Structures and Foundations (SeismiCON 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumoto Haba, Masataka Sawada and Muneo Hori
2. 発表標題 Surface Earthquake Fault Simulation Using High Performance Computing Consideration of Uncertainty
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataka Sawada, Kazumoto Haba and Muneo Hori
2. 発表標題 Simulation of Surface Earthquake Fault 2014 Nagano-ken-hokubu Earthquake Using High Performance Computing
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Motoyama and Muneo Hori
2. 発表標題 Development and Efficiency Investigation of Parallel Computing Seismic Response Analysis for High-Fidelity Model of Large-Scale Reinforced Concrete Structures
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataka Sawada, Kazumoto Haba and Muneo Hori
2. 発表標題 Analysis of surface fault displacements in 2014 Nagano-ken-hokubu earthquake by high performance computing
3. 学会等名 2019 Rock Dynamic Summit ISRM Specialized Symposi (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Motoyama and Muneo Hori
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD USING HIGH-FIDELITY MODEL FOR LARGE-SCALE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES CONSIDERING SOIL-STRUCTURE INTERACTION
3. 学会等名 2nd International Conference on Seismic Design and Analysis of Structures and Foundations (SeismiCON 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumoto Haba, Masataka Sawada and Muneo Hori
2. 発表標題 Surface Earthquake Fault Simulation Using High Performance Computing Consideration of Uncertainty
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataka Sawada, Kazumoto Haba and Muneo Hori
2. 発表標題 Simulation of Surface Earthquake Fault 2014 Nagano-ken-hokubu Earthquake Using High Performance Computing
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Motoyama and Muneo Hori
2. 発表標題 Development and Efficiency Investigation of Parallel Computing Seismic Response Analysis for High-Fidelity Model of Large-Scale Reinforced Concrete Struct
3. 学会等名 The Structural Mechanics in Reactor Technology 25 conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M. Hori, T. Ichimura, and L. Maddegedara	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Riytkedgem Taylor & Francis Group	5. 総ページ数 190
3. 書名 Integrated Earthquake Simulation	

〔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
研究分担者	本山 紘希 (Motoyama Hiroki) (00732281)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・講師 (82723)	
研究分担者	澤田 昌孝 (Sawada Masataka) (80371417)	一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・上席研究員 (82641)	
研究分担者	市村 強 (Ichimura Tsuyochi) (20333833)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	
研究分担者	Maddegedara L. (Maddegedar Lalith) (20426290)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	

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
---------	---------