

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249066

研究課題名(和文)ヘテロコンピューティングと超高詳細モデルによる地震・津波外力想定高度化手法の開発

研究課題名(英文) Enhancement of Earthquake and Tsunami Analysis with Hetero-computing and High-fidelity Model

研究代表者

市村 強 (Ichimura, Tsuyoshi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20333833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：地震・津波外力想定信頼性をさらに向上させることが出来ると期待される高詳細モデルを用いた解析は、領域が大きく、かつ、必要とされる分解能が高いため、解析コストが莫大となり、その実現が難しいとされていた。本研究課題では、大規模有限要素モデル構築手法の開発とともに、可変前処理や精度混合演算や解空間の疎密を活用した新しい大規模有限要素解析用アルゴリズムを開発し、CPU-GPUからなるヘテロコンピューティング環境上でこれを実装することにより、この解析コストの削減を図った。開発した手法によるいくつかの適用例により、高詳細モデルを用いた解析の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：A finite element analysis using the high-fidelity model is expected to be able to further improve the reliability of the earthquake and tsunami hazard analysis. However, it was too difficult to conduct such a finite element analysis due to its huge computational cost since the target domain is huge and its required resolution is very fine. This research has developed a new method for constructing a huge-scale finite element model and a new finite element analysis method for computing responses of such huge finite element models enhanced by adaptive preconditioner, mixed precision computation and fine-coarse solution space constrain etc. These new methods on hetero-computing environment with CPU and GPU show several application examples which present effectiveness of a finite element analysis using the high-fidelity model.

研究分野：地震工学，計算科学

キーワード：ヘテロコンピューティング 地震・津波 高詳細モデル 解析手法

1. 研究開始当初の背景

豊富な観測データに裏打ちされた三次元の高詳細な地盤構造モデルや地殻構造モデルが提案されつつあったものの、地震外力生成過程(地震発生-地殻内地震波動伝播-地盤震動)・津波外力生成過程(地震発生-地殻変形-津波伝播)でこれらを用いることは難しいとされていた。なぜなら、領域が大きく、かつ、必要とされる分解能が高いため、高詳細モデルを用いた解析の解析コストは莫大過ぎ、従来のアプローチでは解析の実行が難しかったためである。そのため、せつかくの高詳細モデルを簡単化したモデルを用いての地震・津波外力想定手法が一般に使用されていた。この簡単化したモデルを用いても十分な信頼性が担保されている場合もあるが、場合によっては高詳細モデルを用いることで地震・津波外力想定信頼性をさらに向上させることが出来ると期待されていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の膨大な解析コストの軽減により高詳細モデルを用いた解析の実現を試みた。また、例えば、完全にはモデルの構造が明らかとなっているわけではないため、このような曖昧さを考慮し、解析結果の妥当性を担保するためにはモンテカルロシミュレーションのような多数回解析が必要となる。また、例えば、震源の状態を推定するためには逆解析が必要となり、こちらも多数回解析が必要となる。そのため、このような多数回解析を可能とする手法の開発も併せて行うこととした。上記の開発により、高詳細モデルを用いた地震・津波外力想定が可能となり、その解析結果の信頼性向上に資すると期待された。

3. 研究の方法

まず、最大で 1000 億自由度程度の地盤・地殻の高詳細有限要素モデル構築を可能とする手法の開発を行った。次に、ヘテロコンピューティング用の新しい求解アルゴリズムを開発し、これを用いた大規模有限要素法プログラムを CPU 上で実装・有効性の確認を行い、最後に CPU-GPU からなるヘテロコンピューティング環境にこれを実装し、高詳細モデルを用いて高速に多数回解析を可能とする手法の開発を行った。

4. 研究成果

開発した可変前処理、精度混合演算、解空間の疎密を活用した大規模有限要素解析手法は、CPU-GPU からなるヘテロコンピューティングだけではなく、CPU のみの通常の計算機環境でも有効である。また、通常の有限要素法を近似なく高速化しただけであるので、地震・津波に関する様々な有限要素解析にも適用可能であり、研究成果は多様なものとなった。その詳細は「5. 主な発表論文等」に掲載したが、ここでは、その主なものの概要

を説明する。

100 万～1000 億自由度の有限要素モデルを用いた地盤震動解析が可能となった。複雑な地盤構造を持つ地域では、地震動の局所的な増幅が生じるが、このような増幅評価の信頼性向上に役立つと期待されている。100 万～1000 万自由度程度であれば、小規模な計算機環境でも解析可能となり、実務にも展開できる程度の解析負荷となっている。観測データとの比較による手法の妥当性確認を行い、すでに埋設管等の地震時挙動評価等への適用の検討がなされている。また、開発したアルゴリズムを京コンピュータに実装することで、首都圏中心部 10X10km を対象とした 1000 億自由度を超える三次元地盤増幅解析を行った。この規模の地盤増幅解析は世界初の成果であり、高性能計算分野においても高い評価を得ている。

高詳細な地殻モデルを用いた地殻変動により生じる地表変位の分布の解析が可能となった。具体的な適用例として、琵琶湖西岸断層帯を含む 240 km × 240 km × 300 km の領域の地殻データを用いて 4.2 億自由度の有限要素モデルを構築し、10000 通りの異なる断層すべりシナリオに対する地殻変動解析を行い、地殻変動により生じる地表変位の分布の解析を行った。これらのすべての断層すべりシナリオによる地殻変動解析により得られた地表面変位応答を評価し、地殻変動性状・断層すべりの曖昧さの影響を検討し、本手法の有効性を示した。

超高詳細モデルを用いた地殻変動解析とこれを用いた津波解析を行い、従来のアプローチと比較することで、超高詳細モデルを用いた本手法の有効性を示した。超高詳細モデルを用いた地殻変動解析は、断層すべりが深部に留まる場合には従来の地殻変動解析との差は小さいが、昨今の観測結果から推察されるトレンチ近傍の浅部まで断層すべりが到達する場合には従来の地殻変動解析との差が大きくなる可能性が示された。地殻変動解析結果が異なれば、津波解析結果にも大きな差が生じうる可能性がある。従来は深部に留まる断層すべりを重点的に想定してきたが、浅部への断層すべり到達も考えた想定を今後行う場合には、本手法の有効性が際立つと考えられる。一方で、このような超高詳細モデルを用いた解析の信頼性を向上させるためには、地殻構造の物性や幾何形状の曖昧さを考慮することが重要となる。そのため、超高詳細モデルを用いた解析を行う上でボトルネックとなる解析コストの低減を図るため、開発を続けてきたヘテロコンピューティング用の高速反復ソルバーの高速化を行った。この高速化により、地殻構造の物性や幾何形状の曖昧さを超多数回解析によるモンテカルロシミュレーションにより陽に考慮した解析を行うことが可能となり、その解析結果を整理することでその有効性を示した。具体的には、例えば、東日本の領域

(976X784X400km)で構築した幾何形状に曖昧さをもつ確率地殻モデルでの、断層すべり量分布逆推定手法を開発した。具体的には、この確率モデルをもとに1000種類の約8000万自由度の各地殻有限要素モデル(図1参照)を生成し、各モデルに対してグリーン関数360本を計算する解析(約8000万自由度の有限要素解析を36万回実行)をCPU-GPUのヘテロコンピューティング環境を用いて約9日で実行できるほどの高速計算手法の開発に成功した。ひとつの有限要素モデル当たり得られた360本のグリーン関数を用いて断層すべり量分布逆推定を行い、これを1000種類分重ね合わせることで、確率地殻モデルでの断層すべり量分布がモンテカルロシミュレーション的に得られることになる。このように情報の曖昧さを定量化することで、解析結果の信頼性を高めることが出来ると期待される。

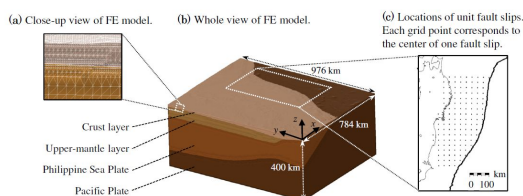


図1: 東日本領域で構築した確率モデルをもとに生成した1000種類の有限要素モデルのうちの一つ(左は有限要素モデルの拡大図, 中央は有限要素モデル全体図, 右はグリーン関数を計算するために設定した単位断層の設定)。

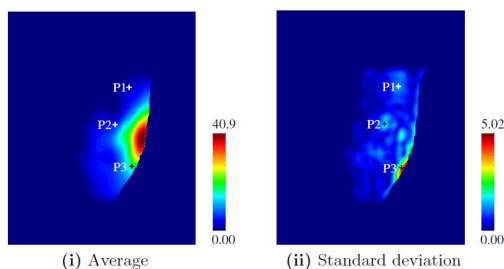


図2: 逆推定によって得られた幾何形状に曖昧さをもつ確率地殻モデルでの断層すべり量分布(左は平均, 右は標準偏差)。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計27件, すべて査読あり)

- (1) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Masashi Horikoshi, Larry Meadows, Kengo Nakajima, Takuma Yamaguchi, Kentaro Koyama, Hikaru Inoue, Akira Naruse, Keisuke Katsushima, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, A Fast Scalable Implicit Solver with Concentrated Computation for Nonlinear Time-evolution Problems on Low-order Unstructured Finite Elements, 2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), 620-629, 2018.
- (2) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Motoki Kazama, Susumu Ohno, Shingo Sato, Development of three-dimensional soil-amplification analysis method for screening for seismic damage to buried water-distribution pipeline networks, Geosciences, 8, 170, 2018.
- (3) Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, and Kengo Nakajima, Implicit Low-Order Unstructured Finite-Element Multiple Simulation Enhanced by Dense Computation Using OpenACC. In: Chandrasekaran S., Juckeland G. (eds) Accelerator Programming Using Directives. WACCPD 2017. Lecture Notes in Computer Science, 10732, 2018.
- (4) Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Takane Hori, Kazuro Hirahara, Chihiro Hashimoto, Muneo Hori, An adjoint-based simultaneous estimation method of the asthenosphere's viscosity and afterslip using a fast and scalable finite element adjoint solver, Geophysical Journal International, 213, 461-474, 2018.
- (5) Kohei Fujita, Keisuke Katsushima, Tsuyoshi Ichimura, Masashi Horikoshi, Kengo Nakajima, Muneo Hori, and Maddegedara Lalith, Wave Propagation Simulation of Complex Multi-Material Problems with Fast Low-Order Unstructured Finite-Element Meshing and Analysis, Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region, HPC Asia 2018, 24-35, 2018.
- (6) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Atsushi Yoshiyuki, Pher Errol Quinay, Muneo Hori, Takashi Sakanoue, Performance Enhancement of Three-dimensional Soil Structure Model via Optimization for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, Journal of Earthquake and Tsunami, 11, Article No. 1750019, 2017.

- (7) Tsuyoshi Ichimura, Ryoichiro Agata, Takane Hori, Kenji Satake, Kazuto Ando, Toshitaka Baba, Mueno Hori, Tsunami Analysis Method with High-Fidelity Crustal Structure and Geometry Model, Journal of Earthquake and Tsunami, 11, Article No. 1750018, 2017.
- (8) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Kentaro Koyama, Hikaru Inoue, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Fast and Scalable Low-order Implicit Unstructured Finite element Solver for Earth's Crust Deformation Problem, PASC'17 Proceedings of the Platform for Advanced Scientific Computing Conference, Article No. 11, 2017.
- (9) Takuma Yamaguchi, Tsuyoshi Ichimura, Yuji Yagi, Ryoichiro Agata, Takane Hori, and Muneo Hori, Fast crustal deformation computation method for multiple computations accelerated by a graphic processing unit cluster, Geophysical Journal International, 210, 787-800, 2017.
- (10) Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Takane Hori, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Fast Finite Element Analysis Method Using Multiple GPUs for Crustal Deformation and its Application to Stochastic Inversion Analysis with Geometry Uncertainty, Procedia Computer Science, 108C, 765-775, 2017.
- (11) 山口拓真, 懸亮一郎, 市村強, 堀宗朗, Lalith Wijerathne, GPU クラスタを用いたモンテカルロ地殻変動想定手法の開発, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 73, I310-I320, 2017.
- (12) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Pher Errol Quinay, Muneo Hori, Takashi Sakanoue, Ryo Hamanaka, Fumiki Ito, Iwao Suetomi, Comprehensive Seismic Response Analysis for Estimating the Seismic Behavior of Buried Pipelines Enhanced by Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Ground Motion and Soil Amplification, Journal of Pressure Vessel Technology, American Society of Mechanical Engineers, 138, Paper No. PVT-15-1184, 2016.
- (13) Tsuyoshi Ichimura, Ryoichiro Agata, Takane Hori, Kazuro Hirahara, Chihiro Hashimoto, Muneo Hori, Yukitoshi Fukahata, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-D island-scale high-fidelity model, Geophysical Journal International, 206, 114-129, 2016.
- (14) Kohei Fujita, Keisuke Katsushima, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Maddegedara Lalithe, Octree-Based Multiple-Material Parallel Unstructured Mesh Generation Method for Seismic Response Analysis of Soil-Structure Systems, Procedia Computer Science, 80, 1624-1634, 2016.
- (15) Agata, Ryoichiro, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori, and Muneo Hori. Robust and portable capacity computing method for many finite element analyses of a high-fidelity crustal structure model aimed for coseismic slip estimation, Computers & Geosciences, 94, 121-130, 2016.
- (16) 宮本崇, 入原渉, 鈴木猛康, 藤田航平, 市村強, 3次元非線形地盤震動解析を用いた堆積層における地盤ひずみの集中効果の検証, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 72, I768-I776, 2016.
- (17) Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddegedara, Acceleration of Element-by-Element Kernel in Unstructured Implicit Low-order Finite-element Earthquake Simulation using OpenACC on Pascal GPUs, WACCPD'16 Proceedings of the Third International Workshop on Accelerator Programming Using Directives, 1-12, 2016.
- (18) Tsuyoshi Ichimura, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Yujin Yamamoto, Hiroshi Dobashi, Mitsumasa Osada, Naoto Ohbo, Takemine Yamada, Full Three-Dimensional Seismic Response Analysis of Underground Structures with Large Complex Cross Sections and Two-Step Analysis Method for Reducing the Computational Costs, Journal of Earthquake and Tsunami, 10, 1640016, 2016.
- (19) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Development Of Large-Scale

Three-Dimensional Seismic Ground Strain Response Analysis Method and Its Application to Tokyo using Full K Computer, Journal of Earthquake and Tsunami, 10, 1640017, 2016.

- (20) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Pher Errol Balde Quinay, Lalith Maddegadara, Muneo Hori, Seizo Tanaka, Yoshihisa Shizawa, Hiroshi Kobayashi and Kazuo Minami, Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No. 4, 2015.
- (21) 藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, Lalith MADDEGEDARA: 3次元地盤震動解析と多数シナリオの構造物応答解析による都市地震シミュレーション, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 71, 1680-1688, 2015.
- (22) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddegadara and Seizo Tanaka, Scalable many-case urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, Procedia Computer Science, 51, 1483-1493, 2015.
- (23) Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori, Chihiro Hashimoto and Muneo Hori, Numerical verification criteria for coseismic and postseismic crustal deformation analysis with large-scale high-fidelity model, Procedia Computer Science, 51, 1534-1544, 2015.
- (24) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Maddegadara Lalith, Yoshihisa Shizawa, and Hiroshi Kobayashi, Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation, SC14: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 15-26, 2014.
- (25) 田中聖三, 市村強, 堀宗朗, WIJERATHNE Maddegadara L. L., 高詳細モデルを用いた大規模地盤-複雑構造物の地震応答解析手法の開発, 土木学会論文集 A2(応

用力学), 70, 1613-1620, 2014.

- (26) Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori and Muneo Hori, Several hundred finite element analyses of an inversion of earthquake fault slip distribution using a high-fidelity model of the crustal structure, Procedia Computer Science, 29, 877-887, 2014.
- (27) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Takashi Sakanoue, Ryo Hamanaka, Three-dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, Journal of Pressure Vessel Technology, American Society of Mechanical Engineers, 136, Paper No: PVT-13-1131, 2014,

[学会発表](計27件)

- (1) Tsuyoshi Ichimura, Fast Scalable Implicit Solver for Low-Ordered Unstructured Finite Element Analysis and Its Application, 18th Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, 9th of March, 2018 (招待講演).
- (2) Tsuyoshi Ichimura, Fast and scalable finite element analysis method on low-order unstructured elements for Earthquake and AI, 2nd International Symposium on Research and Education of Computational Science (RECS), 18th of December, 2017 (招待講演).
- (3) Tsuyoshi Ichimura, Fast Scalable Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting, Makuhari Messe, 24th of May, 2017 (招待講演).
- (4) Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Wijerathne, Fast Crustal Deformation Computation Method Using Openacc for Stochastic Inversion Analysis, 18th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, 2018.

- (5) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Masashi Horikoshi, Larry Meadows, Kengo Nakajima, Muneo Hori, and Lalith Maddegadara, Recent Progress on Low-Order Unstructured Implicit Finite-Element Earthquake Simulation on Oakforest-Pacs, 18th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, 2018.
- (6) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Masashi Horikoshi, Muneo Hori, and Lalith Maddegadara, Adaptive multistep predictor for accelerating dynamic implicit finite-element simulations, Research Poster in International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, (SC17).
- (7) Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Mamoru Hyodo, Sylvain Barbot and Takane Hori, Quasi-static simulation method of earthquake cycles based on large-scale viscoelastic finite element analyses, AOGS 14th Annual Meeting, 2017.
- (8) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Kentaro Koyama, Hikaru Inoue, Muneo Hori, and Lalith Maddegadara, Fast Implicit Unstructured Low-Order Finite-Element Solver for Enhancing Integrated Earthquake Simulation, HPC in Asia Poster Session, ISC High Performance, 2017.
- (9) Takuma Yamaguchi, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, and Wijerathne Lalith, Unstructured low-order implicit finite element earthquake simulation using OpenACC on Pascal GPUs, GPU Technology Conference, 2017.
- (10) 山口拓真, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne Lalith. OpenACCによる地殻変動計算高速化手法の開発, 第22回計算工学講演会, 2017.
- (11) 山口拓真, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne Lalith. マルチGPUを用いた高速な疎行列ベクトル積による多数回地殻変動計算, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017.
- (12) Takuma Yamaguchi, Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Wijerathne. Crustal deformation analysis using

heterogeneous computing, The 12th World Conference on Computational Mechanics, 2016.

- (13) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Development of High-Performance Finite-Element Solver and Application to Seismic Ground Strain Analysis of Tokyo, Techno-Ocean 2016, 2016.
- (14) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Kentaro Koyama, Masashi Horikoshi, Hikaru Inoue, Larry Meadows, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Maddegadara Lalith and Takane Hori, A Fast Implicit Solver with Low Memory Footprint and High Scalability for Comprehensive Earthquake Simulation System, Research Poster for SC16: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2016.
- (15) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura Muneo Hori, Integrated earthquake simulation enhanced with fast wave propagation analysis using full K computer, WCCM XII & APCOM VI (The 12th World Congress on Computational Mechanics and 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics), 2016.
- (16) 山口拓真, 縣亮一郎, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne Lalith. GPU クラスタにおける多数回地殻変動解析のための高速ソルバーの開発, 第19回応用力学シンポジウム, 2016.
- (17) 山口拓真, 縣亮一郎, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne Lalith. GPU クラスタを用いたモンテカルロシミュレーションによる地殻変動被害予測, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.

上記他 10 件 .

〔その他〕
ホームページ等
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sensing_and_simulation/J/information/ichimura.htm
#

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市村 強 (Ichimura, Tsuyoshi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：20333833