

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390127

研究課題名(和文)階層型領域分割型高精度MPS法による流体構造連成解析フレームによる大規模津波解析

研究課題名(英文) Large scale tsunami analysis using fluid structure interaction analysis framework based on high precision MPS method by hierarchical domain decomposition

研究代表者

室谷 浩平 (MUROTANI, Kohei)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・鉄道力学研究部・副主任研究員

研究者番号：20434061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模分散メモリ並列粒子法フレームワークの開発と地上構造物に対する津波被害の定量的/定性的評価を実施した。大規模分散メモリ並列粒子法フレームワークの開発では、CPU/GPU/MIC向けの高速計算アルゴリズムの開発を行い、高精度なMPS法の半陰的解法の実装と検証を行った。地上構造物に対する津波被害の定量的/定性的評価では、気仙沼市街地にある駅舎に対して津波波圧を外力とした構造解析を実施し、構造健全性を評価した。加えて、33台の乗用車を配置し、駅舎の周りを浮遊する解析を実施した。本研究成果を、LexADV_EMPSという名前のオープンソースソフトウェアとしてWEBに公開した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the development of the large scale distributed memory parallel framework for the particle method and the quantitative and qualitative estimation of tsunami damage for ground structure are performed. In case of large scale distributed memory parallel framework for the particle method, the development and estimation of the fast computational algorithm for CPU/GPU/MIC and the high precision semi-implicit solution of the MPS method are performed. In case of the quantitative and qualitative estimation of tsunami damage for ground structure, the structural integrity is estimated using the structure analysis with external force by tsunami wave pressure for the station building in Kesenuma urban area is performed. Additionally, the floating analysis of 33 cars by tsunami is performed. The research product is published in WEB as the open source software named "LexADV_EMPS".

研究分野：超並列計算

キーワード：超並列計算 粒子法 MPS法 津波解析

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日14時46分に、牡鹿半島の東南東沖130kmの海底を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生した。地震の規模はマグニチュード9.0で、宮城県栗原市で最大震度7を記録し、日本周辺における観測史上最大の地震であっただけでなく、世界的にみても稀な巨大地震であった。この地震により、波高10m以上、最大遡上高40mにも上る巨大な津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸部は甚大な被害にみまわれた。東日本大震災による被害は、地震による被害よりも津波による被害の方が深刻であった。その様な背景から、津波被害を再現することができ、減災防災に生かすことができる解析手法の構築が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、津波による被害を再現できる解析手法の開発を行い、津波波圧による地上構造物の被害予測と複数の浮遊物の衝突を含む解析を行うことができる手法の開発を目指す。本研究で開発されたソフトウェアは、オープンソースソフトウェアとして公開することで、津波被害の減少に役立てることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、大規模粒子法流体構造連成解析フレームの開発に向けて、(1)津波波源から市街地までの実地形津波解析手法の開発、(2)高精度なMPS法の開発、(3)高速計算アルゴリズムの開発の3つの研究開発を行った。

(1) 津波波源から市街地までの実地形津波解析手法の開発

本研究では、東日本大震災の際に発生した津波が市街地の地上構造物へ及ぼす影響を解析することを目的としている。市街地の地上構造物を対象とした3次元の津波解析を行う際に問題となるのは、津波の流入流出境界条件である。実際の津波では、数km~数十kmの幅の波が数十分以上押し寄せてくる。さらに、震源における断層のすべり量、海底と地上の地形、地上構造物の配置などの多くの要素が複雑に絡み合い、解析対象の地上構造物に対する津波の挙動を正確に再現することは困難である。そこで、本研究では、図1のような、津波波源から対象となる地上構造物までを、マルチスケールに3段階に分けて解析を行う手法を開発した。本手法を利用して、第2第3の解析では、流体剛体連成解析による浮遊物解析や流体構造連成解析による地上構造物の構造健全性評価を行った。

(2) 高精度なMPS法の開発

本研究では、空間微分高精度モデル、圧力と速度の陰的解法、高精度ノイマン境界条件、Rotational pressure-correction scheme

による半分散化式の導入を行った。その結果を確認するために、7項目のV&Vを実施した。

(3) 高速計算アルゴリズムの開発

本研究では、「①分散メモリ向け計算アルゴリズムの開発」を京コンピュータと名古屋大学FX100を用いて行い、「②CPU、GPU、MIC向け計算アルゴリズムの開発」を、Xeon E5-2697 v2, SPARC64 IXfx, Tesla K20, Xeon Phi 3120を用いて実施した。

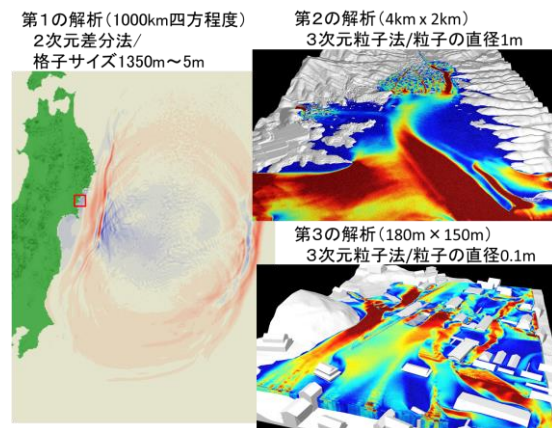


図1 3段階ズームアップ津波解析の概略

4. 研究成果

(1) 津波波源から市街地までの実地形津波解析手法の開発

本研究では、1000km四方程度、4km×2km、180m×150mの3つの解析領域を設定し、大きな解析領域から小さな解析領域に順次に境界条件を渡す3段階のズームアップ解析を実施する。第1の解析では、震源で発生する津波波源から沿岸部までの津波伝播解析を実施する。この解析は、1000km四方程度の広範囲な解析が必要となるため、計算コストが低い2次元の浅水長波解析を用いる。第1の解析で得られた解析結果を用いて、第2の解析のための流入流出境界条件を生成する。第2の解析では、沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析を実施し、第3の解析のための流入流出境界条件を生成する。第3の解析では、解析対象である市街地に津波が侵入する市街地浸水解析を実施する。第2第3の解析では、遡上計算が容易な3次元MPS法を用いて計算を行う。MPS法は、解析領域の大きさに比例する粒子数を必要とするため、第2の解析では、直径1mの粒子を用いて解析を行い、第3の解析では、直径10cmの粒子を用いて解析を行う。第3の解析では、津波がどのように市街地に押し寄せるかを再現し、図2のような流体圧力による地上構造物の評価を行った。

東日本大震災後、気仙沼市街地の鹿折唐桑駅周辺の構造物が殆ど倒壊しているにもかかわらず、駅舎は、ほぼ原形を留めて残っていた。そこで、本研究の第3の解析では、鹿折唐桑駅の駅舎を対象に津波波力による影響を評価することで、駅舎が原型を留めて残

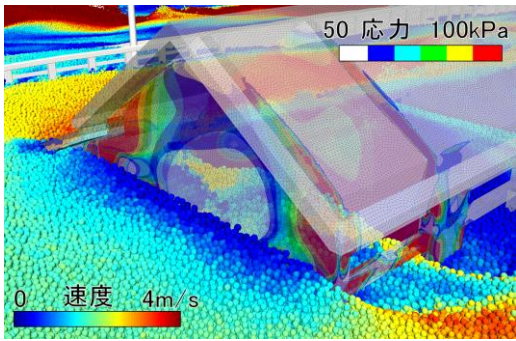
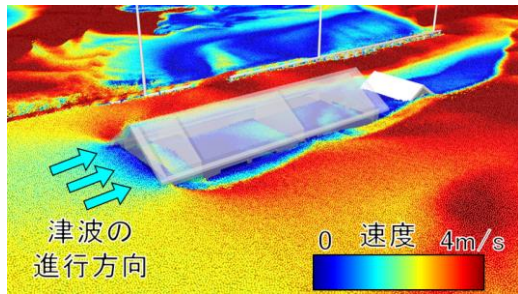
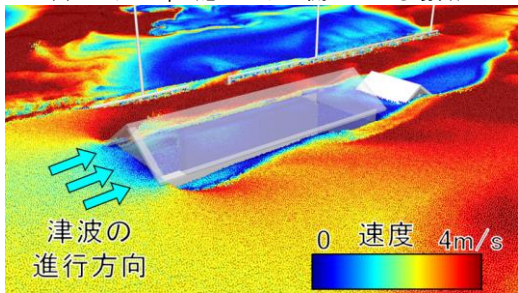


図2 粒子法による津波解析とFEMによる駅舎に対する構造解析の結果



(a) モデル0p (窓とドアが開いている場合)



(b) モデルC1 (窓とドアが閉まっている場合)

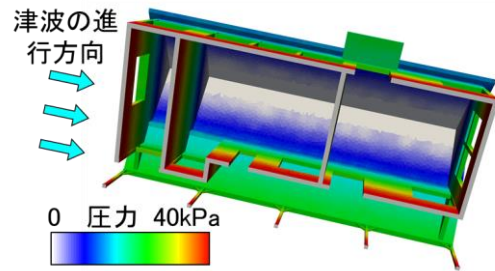
図3 地震発生から3250秒後の窓とドアが開いている場合と閉まっている場合の津波解析の結果

った理由を検討する。なお、第3の解析は、地震発生から3000秒後からの解析である。

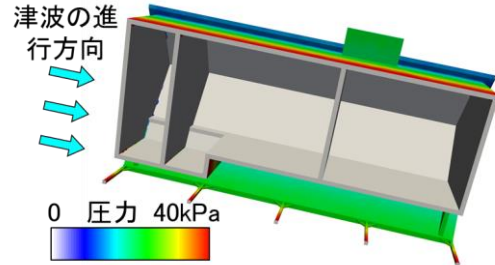
鹿折唐桑駅の駅舎の津波波力による影響を評価するために、駅舎の窓とドアが開いている「モデル0p」と、窓とドアが閉まっている「モデルC1」を作成して、それぞれ津波波圧による駅舎の構造解析を実施する。図3(a)では、津波が押し寄せてくるに従い、ドアや窓などの開口部から駅舎内に津波が侵入し、海水に満たされていく様子が確認できる。図3(b)では、津波が押し寄せてきても、ドアや窓は閉じられているため、津波の侵入口がなく、駅舎内に海水は入ってこない様子が確認できる。

図4(a)と(b)は、駅舎にかかる水圧の分布である。図4(a)と(b)を比べたところ、水位に応じて駅舎外壁に作用する水圧が変化しているところは類似している。しかしながら、図4(a)では駅舎内部に水圧が作用しているのに対して、図4(b)では駅舎内部には水圧が作用していないことが見て取れる。

図5は構造解析の結果である相当応力分布である。構造解析には、「ADVENTURE_Solid 1.2」を用いた。メッシュサイズを5cmとし、

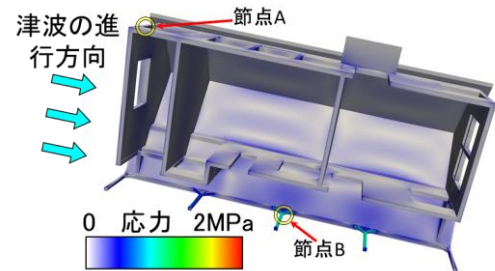


(a) モデル0p (窓とドアが開いている場合)

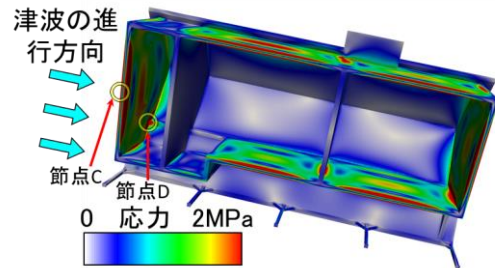


(b) モデルC1 (窓とドアが閉まっている場合)

図4 地震発生3400秒後の鹿折唐桑駅の駅舎に作用する水圧



(a) モデル0p (窓とドアが開いている場合)



(b) モデルC1 (窓とドアが閉まっている場合)

図5 地震発生3400秒後の鹿折唐桑駅の駅舎の津波波圧による構造解析の結果 (相当応力分布)

四面体2次要素を用いた。底部の節点を固定し、図4の水圧を節点荷重に変換した。駅舎の壁は厚さ20cmとし、物性値にはコンクリートのヤング率とポアソン比を与えて静弾性解析を行った。図5(a)と(b)を比べると、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、「モデルC1」では「モデル0p」に比べて大きな応力が発生していることが分かる。

図6は、相当応力の最大値を示した図5の節点の位置である。図7は駅舎にかかる最大圧力の時系列、図8は駅舎にかかる最大相当応力の時系列である。図7では、両方の駅舎のモデルにおいて、時間が進むにつれ駅舎が受ける最大圧力は同じように大きくなって

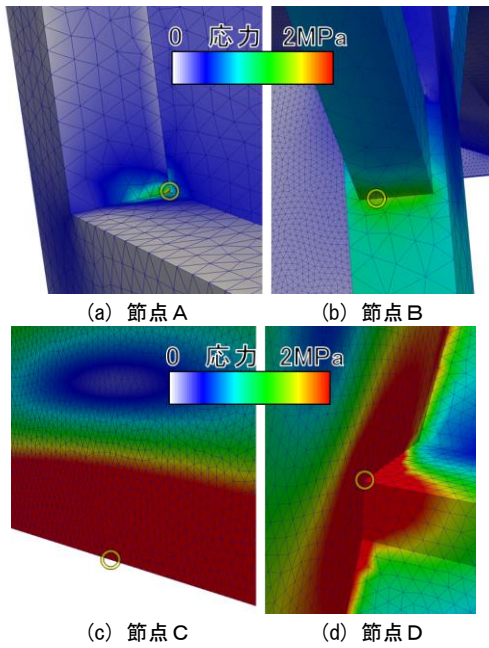


図6 最大相当応力を示した図5の
節点A, B, C, Dの位置

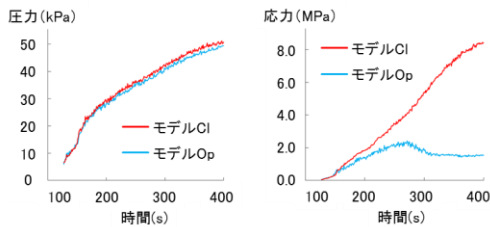


図7 駅舎にかかる
最大圧力の時系列

図8 駅舎にかかる
最大応力の時系列

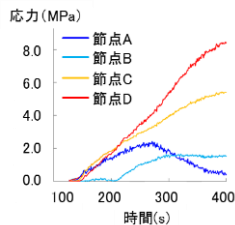


図9 節点A～Dの応力の時系列

いる。津波の水圧は静水圧による影響が大きいため、底部の要素ほど大きな水圧を受ける傾向にある。

図6 (a)に示す「モデル0p」の節点Aと図6 (b)の節点Bの相当応力の時系列と、図6 (c)に示す「モデルC1」の節点Cと図6 (d)の節点Dの相当応力の時系列を図9に示す。「モデル0p」では、時刻146s～312sで節点Aの応力が最大相当応力となり、時刻313s～400sで節点Bの相当応力が最大相当応力となっている。「モデルC1」では、時刻152s～213sで節点Cの応力が最大相当応力となり、時刻214s～400sで節点Dの相当応力が最大相当応力となっている。節点Cが最大相当応力を示すのは、津波の直撃を受ける場所であるためと考えられる。また、最大相当応力となっている節点A, B, Dは、津波が押し寄せる背面の凹形状の場所であり、構造的

に最も弱い場所の一つであるためである。図8から、水圧による駅舎内部からの支えの有無により、窓とドアが「閉まっている」場合は、「開いている」場合に比べて、時刻400sの時点では5.5倍、時系列中の最大値では3.5倍の相当応力が作用することを示す結果となった。

以上のことから、鹿折唐桑駅周辺の構造物が殆ど倒壊しているにもかかわらず、鹿折唐桑駅の駅舎がほぼ原形を留めて残ったのは、駅舎は窓やドアが開いたオープンな構造であり、津波が駅舎内部を通過したことで、駅舎に作用する応力が大きくならず済んだため、駅舎は倒壊を免れたものと考えられる。

本研究では、鹿折唐桑駅の駅舎の構造健全性評価の他に、図10と図11のような、浮遊物解析をおこなった。図10は第2の解析において巨大船舶が浮遊する津波解析、図11は第3の解析において多数の自動車が浮遊する津波解析のフォトリアリスティックな可視化結果である。

本研究で開発された津波解析手法は、津波波源から市街地に至るまでの高解像度な実地形津波解析であり、実施が技術的に困難と思われていた手法あるため、学協会で高い評価を受けた。本手法を、気仙沼以外の沿岸部の重要地上構造物に対して実施することで、様々な提案が可能となると考えられる。

本研究を実施するために、国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データの提供の支援を受けたことを、ここに感謝する。



図10 第2の解析において巨大船舶が浮遊する津波解析のフォトリアリスティックな可視化結果



図11 第3の解析において自動車が浮遊する津波解析のフォトリアリスティックな可視化結果

(2) 高精度なMPS法の開発

本研究では、7項目のV&Vを実施した。「①微分演算子の適合性」、「②ポアソン方程式の収束性」では、理論値に近い収束率を達成することができた。「③ポアズイユ流れによる

速度の検証」では、理論値とほぼ同等な速度分布の時間発展を達成できた。「④液滴伸長解析による圧力の検証」では、理論値とほぼ同等な中心圧力の時間発展を達成できた。「⑤ダムブレイク解析による圧力の妥当性評価」では、衝撃圧力とその直後の圧力低下を、実験値に近い値で達成することができた。「⑥静止流体における剛体の浮力の検証」では、水面から剛体の重心位置までの距離の剛体の厚さに対する相対誤差は、1%~4%程度であった。「⑦複数剛体の接触挙動の確認」では、目視での確認では自然な挙動を示した。以下に、⑤ダムブレイク解析による圧力の妥当性評価について述べる。

Hu and Kashiwagi (2004) が行ったダムブレイクの実験の結果を用いて、MPS法の妥当性確認を行った。図12はダムブレイク実験体系である。図13は、粒子の直径 l_0 を0.5mm, 1mm, 2mmに変化させた場合のMPS法の解析結果である。粒子の直径を小さくして解析を行うと実験値に近づく傾向が確認できた。Hu and Kashiwagi (2004) は、格子間隔0.2mmの2次元のCIP法を用いたが、本解析は3次元解析であるため、直径0.5mmの粒子を用いた場合で約1億粒子の大規模解析となった。このような3次元解析を行う際には、大規模並列計算が必要であると確認できた。

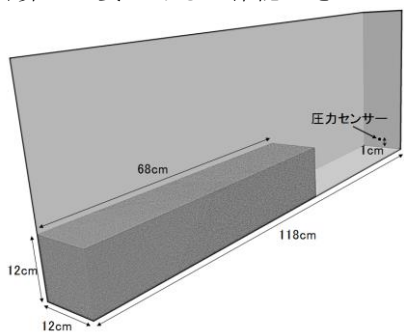


図12 ダムブレイク実験体系

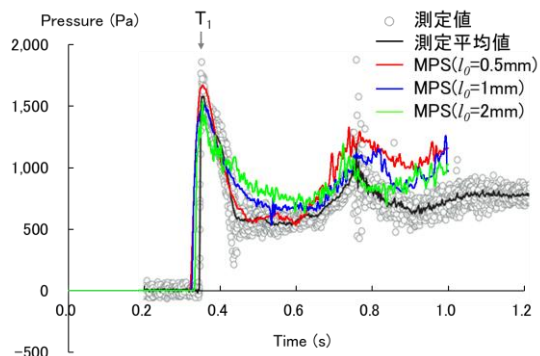


図13 粒子の直径を0.5mm, 1mm, 2mmに変化させた場合のMPS法による解析結果

(3) 高速計算アルゴリズムの開発

本研究では、「①分散メモリ向け計算アルゴリズムの開発」を京コンピュータと名古屋大学FX100を用いて行い、「②CPU, GPU, MIC向け計算アルゴリズムの開発」を、Xeon

E5-2697 v2, SPARC64 IXfx, Tesla K20, Xeon Phi 3120を用いて実施した。

「①分散メモリ向け計算アルゴリズムの開発」では、並列化効率の改善を行った。図14は、京コンピュータとFX100での並列化効率である。10億粒子モデルを用いて、京コンピュータ48ノードから12,288ノードの並列化効率88.2%を達成することができた。FX100では、12ノードから864ノードの並列化効率90.9%を達成することができた。

京コンピュータにおいて、各計算ノードでは、極低い確率でキャッシュラッシングが発生することが確認され、その影響により高並列下でキャッシュラッシングが一定頻度で発生してしまうことが確認された。ある一つの計算ノードでキャッシュラッシングが発生してしまうと、その計算ノードの計算に遅延が生じてしまい、他の計算ノードは待機状態となり、計算全体の遅延となってしまう。その対策として、配列のマージとパディングを実施し、キャッシュラッシングの発生確率を更に低くし、高並列下においてもキャッシュラッシングによる並列化効率の低下が発生し難くするようにした。

通信関係では、隣接間通信にIsend-Irecvを用いると24,576ノード以上では“Unexpected Message”が多発することによるデッドロックが発生する問題があった。この問題を回避するために、Isend-IrecvをAlltoall_vに置き換えることで、72,000ノードまでの実行が可能となったが、Alltoall_vを用いた並列化効率は良くなく、今後の改良が必要であると確認された。

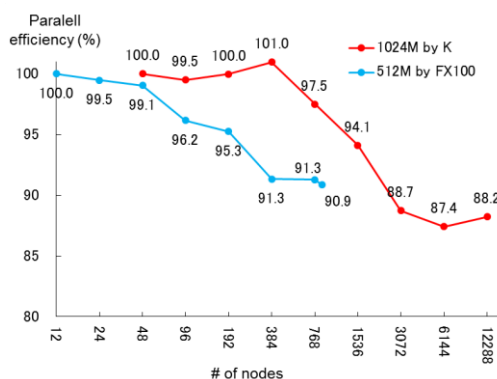


図14 京コンピュータとFX100の並列効率

「②CPU, GPU, MIC向け計算アルゴリズムの開発」では、単体性能の向上を行った。図15は計算アルゴリズムの改良やチューニングを行った各プロセッサ/アクセラレータの実行効率である。図15では、オリジナルのMPS法の勾配モデルとラプラシアンモデル、1次精度の微分モデルと2次精度の微分モデルを評価に用いた。1次精度の微分モデルは3×3の行列、2次精度の微分モデルは9×9の行列の連立一次方程式を解く必要があり、データの読み込み量が少なく、演算量とレジスタ利用量が大きいことが特徴の計算である。

まず、勾配モデルとラプラシアンモデル、1次精度の微分モデルについて述べる。全てのプロセッサ/アクセラレータにおいて、Forward Star のデータ構造が有効であった。Tesla K20 では、重み関数をテンソル積型に変更した計算アルゴリズムの変更と、バケットサイズを小さくするチューニングと、Texture cache を利用したチューニングが有効であった。Xeon E-2697 v2 では、重み関数をテンソル積型に変更した計算アルゴリズムの変更と、メモリのアライメントを揃えるチューニングが有効であった。Xeon Phi 3120 では、第一世代ということもあってか、高い実行効率を出すことができなかった。SPARC64 IXfx では、他に比べB/F値が高いため、SIMDを有効にするディレクティブの挿入により高い実行効率を出すことができた。

次に、2次精度の微分モデルについて述べる。2次精度の微分モデルは演算量が大きいため、高い実行効率ができることを期待されたが、全てのプロセッサ/アクセラレータにおいて、低い実行効率しかでなかった。これは、 9×9 の行列の連立一次方程式を解く必要があるため、81変数をレジスタ上に載せる必要があるが、どのプロセッサ/アクセラレータもレジスタが不足し、キャッシュへのスワップが発生したため、実行効率の低下が起こった。Tesla K20 と SPARC64 IXfx の実行効率の低下が顕著である一方で、Xeon E-2697 v2 と Xeon Phi 3120 ではそれほど大きな低下が発生しなかった。複雑なデータを扱う際には、Intel のアーキテクチャとコンパイラは、自動的に高いレベルの最適化してくれているためと考えられる。

本研究で開発された高速計算アルゴリズムは、高並列環境下において高効率で安定的に実行できる粒子法向けアルゴリズムであり、学協会で高い評価を受けている。また、本研究で開発されたプログラミングコードは、LexADV_EMPS という名前のオープンソースソフトウェアとしてWEBで公開し、多くのユーザーが存在する。

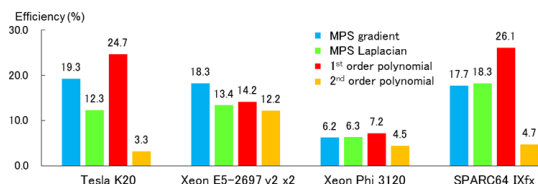


図 15 CPU, GPU, MIC の実行効率

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① 室谷浩平, 玉井佑, 越塚誠一, 流体シミュレーションにおける粒子法:MPS法とLSMPS法の数値解析精度の比較, 応用数理, 査読有, Vol.26, No.2, 2016, pp.2-13, DOI:10.11540/bjsiam.26.2_2
- ② Kohei Murotani (7名中1番目): Performance Improvements of Differential

Operators Code for MPS method on GPU, Computational Particle Mechanics, 査読有, Vol.2, No.3, 2015, pp.261-272, DOI:10.1007/s40571-015-0059-2

- ③ Kohei Murotani (10名中1番目), Development of Hierarchical Domain Decomposition Explicit MPS Method and Application to Large-scale Tsunami Analysis with Floating Objects, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 査読有, Vol.1, No.1, 2014, pp.16-35, DOI:10.15748/jasse.1.16

[学会発表] (計 32 件)

- ① Kohei Murotani, Development of distributed memory parallel MPS method and some applications, The 35th JSST Annual Conference / International Conference on Simulation Technology, 2016年10月27~29日, 京都大学国際科学イノベーション棟(京都府京都市)
- ② 室谷浩平, 分散メモリ並列粒子法ライブラリの開発とズームアップ津波遡上解析システムの構築, 第5回計算力学シンポジウム, 2015年12月7日, 日本学術会議講堂(東京都港区)
- ③ Kohei Murotani (4名中1番目), Development of Explicit Moving Particle Simulation Framework and Zoom-Up Tsunami Analysis System, SC15 Regular Poster post131s1, 2015年11月15~20日, Austin(USA)

[図書] (計 2 件)

- ① Kohei Murotani (8名中1番目), Springer, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering, 2016年, pp.157-178
- ② 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平, 丸善出版, 粒子法入門, 2014年, pp.105-185

[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

LexADV (本研究成果をオープンソースソフトウェアとして公開しているWEBページ)

<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

室谷 浩平 (Murotani, Kohei)

鉄道総合技術研究所・鉄道力学研究部・副主任研究員

研究者番号: 204340