

# スパコンを用いた 自然災害被害予測シミュレーションの現状

CURRENT SITUATION OF PREDICTION OF NATURAL DISASTER  
BY USING SUPER COMPUTERS

浅井 光輝<sup>1</sup>・市村 強<sup>2</sup>・M. L. L. Wijerathne<sup>3</sup>・堀 宗朗<sup>4</sup>

Mitsuteru ASAII, Tsuyoshi ICHIMURA, M. L. L. Wijerathne and Muneo HORI

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>東京大学地震研究所（〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1）

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>東京大学地震研究所（〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1）

E-mail: lalith@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>東京大学地震研究所（〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1）

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

**Key Words:** super computer; high performance computing, natural disaster prediction

## 1. 大学のスパコン環境と「京」

「スパコン」と聞くと、名前からしても一般的なパソコン、ワークステーション、あるいはパソコンをネットワークで繋いだ PC クラスターとは違い、(一部の研究者のみが使える)超ハイエンドな計算機であり、これさえ使えば大規模な計算が高速に実施できると思われる方がまだ多いのかもしれない。第一著者も自身が使い始めるまでは、上記のような誤解をしており、ハイパフォーマンスコンピューティングを専門とする研究者が実際に何をしているのか理解はしていなかった。最近では、平成 22 年から開始した学際大規模情報共同利用・共同拠点事業 (JHPCN)，あるいは「京」の運用と同時にこうした大型計算機の効率的な体制を構築することを目的とした HPCI 事業がスタートしており、若手の研究者も公募に応募し採択されれば、無償あるいは少ない予算で大型の計算機を使うことができるようになり、先のような誤解も少なくなってきたと思われる。本稿では、各大学でのスパコン環境、あるいは一時期「世界一じゃなきゃダメですか？」

で話題になった「京」に関する正しい知識について紹介し、特に自然災害‘被害’予測に関する大型計算の現状について報告することで、今後、少しでも多くの研究者がスパコンを使った大規模計算に興味を持っていただけることを期待する。

「スパコン」の定義は Wikipedia の情報によると『一般的にはその時代の最新技術が投入された最高クラスの性能の計算機を指す。現時点では一般的に使用されるサーバ機よりも浮動小数点演算が 1000 倍以上の速さのコンピュータを「スーパーコンピュータ」と呼ぶことが多い。』となっているように、その定義はちょっと曖昧であり、具体的な演算速度は時代とともに進化している。スパコンを所有している北大・東北大・筑波大・東大・東工大・名古屋大・京都大・大阪大・九州大では、大学研究者であれば所属大学に関係なく、一定の使用料金を拠点大学でのスパコンを共同利用という形で使うことができる。さらに、JHPCN あるいは HPCI は公募型のプロジェクトであり、採択されれば無償でスパコン環境が得られるため、大型の PC クラスターなどの環境が整備することが困難

な若手研究者にとっては非常にありがたい制度・環境が与えられている。

ここで「京」は、文部科学省の次世代スーパーコンピュータ計画の一環として理化学研究所に設置され、ご存知の通り、スパコンの世界ランク付け TOP500 では 2011 年 6 月および同 11 月に世界最速と認定され(2012 年 6 月 2 位, 2012 年 11 月 3 位, 2013 年 6 月 4 位), HPC チャレンジ1クラス1, 同クラス2, ゴードン・ベル賞など世界基準の賞を複数受賞した実績がある。なお、CPU としては富士通製 SPARC 64 VIIIfx 単体の理論性能は 128GFLOPS (=1 秒に 1280 億回以上の浮動小数点演算) であり、これはインテル XEON-E5-2650 と同程度のものである。京ではこの CPU が 50m × 60m の部屋にある 864 個ラックを使い、全部で 82,944 個も格納されており、各 CPU が 8 コア搭載されているため、総数で 66 万コアもの演算器が使える。ちなみにその後に同社が商用版として販売している PRIMEHPC-FX-10 では CPU 性能が 2 倍弱に増強されていることからもわかるように、京の最大のウリは CPU 単体ではなく、計算ノード数の多さとそれを繋ぐ安定したネットワークにある。このため、京を使えば必然的に計算が高速化するのではなく、こうした数多くの計算ノードを同時に使いこなすための解析コードを準備することが必要不可欠となり、先に述べたハイパフォーマンスコンピューティングの研究者は、日々こうした高並列環境下において、いかにして使用メモリを減らし、無駄な通信を減らす、キャッシュ効率の良いプログラムを書くことで並列化の効率向上を図っている。世界一を目指に掲げているため、先の大学スパコンと比べると敷居が高いが、これも HPCI 事業として公募制となっているため、大学スパコンでは計算リソースが足りない場合にはありがたい環境である。

## 2. 京の重点分野：第 3 分野の地震・津波課題の取り組み

### (1) 重点分野の概要

京の運用前から、具体的に以下に示す 5 つの重点分野が選定され、現在でも重点分野に多くのリソースが与えられ運用をしている。

分野 1)予測する生命科学・医療および創薬基盤

分野 2)新物質・エネルギーの創成

分野 3)防災・減災に資する地球変動予測

分野 4)次世代ものづくり

分野 5)物質と宇宙の起源と構造

著者も関連する分野 3 は以下示すように、主に気象

系のテーマと地震・津波のテーマに分けられている。

- ・防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究
- ・地震・津波の予測精度高度化に関する研究

また上記 2 つ目のテーマは以下の 3 つのグループに細分化され、最終的にはそれらの統合化を図る計画である。

- ・地震の予測精度高度化に関する研究
- ・津波の予測精度高度化に関する研究
- ・都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

ここでは、著者らが直接担当しているグループ課題である都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究内容の一部について報告する。

### (2) 都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

節のタイトルであるサブテーマは、構造物の地震応答シミュレーションと都市の地震・津波応答シミュレーションのグループに分かれて研究を推進している。東大地震研の堀宗朗教授をグループリーダーとして、システムコンピューティング考えに基づき、複数のモジュールを組み合わせた統合地震シミュレーターの開発を進めている(図-1 を参照)。既往の広域震災想定は過去の地震被害の統計分析に基づくため、地震シナリオの変更による入力地震動の性質の変化や構造物の劣化や補強による強度向上等の構造物の変化を、想定結果に十分反映することが難しい。断層から都市までの地震波の伝播・構造物の地震応答・社会の応答といった地震災害の各過程を詳細な数値シミュレーションを使って多数シナリオ解析(10000 回のオーダー)することで、既往の広域震災想定の信頼性を向上できる可能性があり、これを目的として統合地震シミュレータの開発がすすめられている。特に、京上ではその大規模問題適用へ向けた開発を行っている。

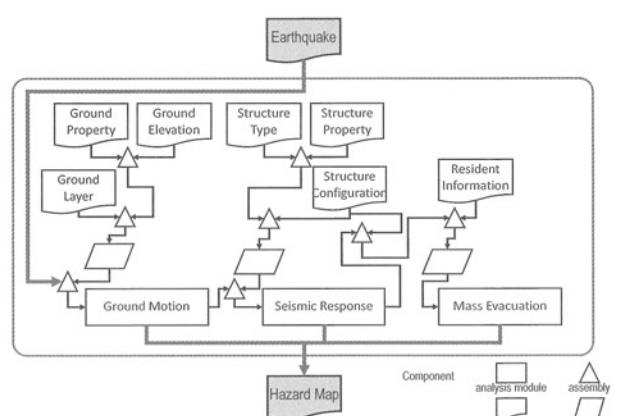


図-1 IES の概念図

### 3. IES の各モジュールと統合化の一例

ここでは、IES のモジュールあるいはそれらの統合化した例の一部を紹介する。

#### (1) 都市地震被害予測シミュレーション

統合地震シミュレータでは、「工学的基盤層から地表面までの地震波の伝播を計算する地盤応答解析」、「構造物応答解析」、「津波遡上解析」、「ひとの避難時シミュレーション」など従来は個別の問題として扱ってきた種々のスケールの地震現象を統合化することで、最終的に工学者が必要となる構造物および人的被害をより精緻に評価することを目指している。また震災想定の信頼性を向上させるためには多数の地震シナリオを考慮することが重要である。すなわち、都市への入力地震動を多種類用意しそれに対する都市の応答を多数回シミュレーションする必要がある。例として、253,405 棟の構造物の動的応答をシミュレーションの 1 ケースに対して 160 プロセスの計算資源を使用する設定で、2,000 ケースの解析した例を図-2 に示す<sup>1)</sup>。また、都市の構造物群のモデルパラメータを確定的に設定することは困難であり、その曖昧さを考慮するためのモンテカルロシミュレーション手法の開発も進められている<sup>2)</sup>。統合地震シミュレータによれば都市の構造物一棟一棟の地震応答を得ることが出来る。震災想定を行う上で、このような一棟一棟の動的挙動と都市全体の動的挙動を理解することは重要であるが、そのデータサイズが膨大となるため、このような理解をサポートするような可視化は難しいとされていた。粗視化とメインメモリと GPU の効率的な連携アルゴリズムを実装したマルチスケール可視化手法を考案することで、この可視化を実現している<sup>3)</sup>。都市部における地盤は複雑な構造をもっていることが多い。その地震応答想定の高度化のために 100 億自由度以上を取り扱い可能な 3 次元非線形有限要素法の開発も行われている<sup>4)</sup>。なお、このシミュレーションは 2014 年度のゴードン・ベル賞ファイナリスト 5 件のうちのひとつに選ばれている。領域が広く、高い分解能が求められる自然災害被害シミュレーションは必然的に大規模シミュレーションとなることが多く、スパコン研究者からも有望なアプリケーションとして期待されている。

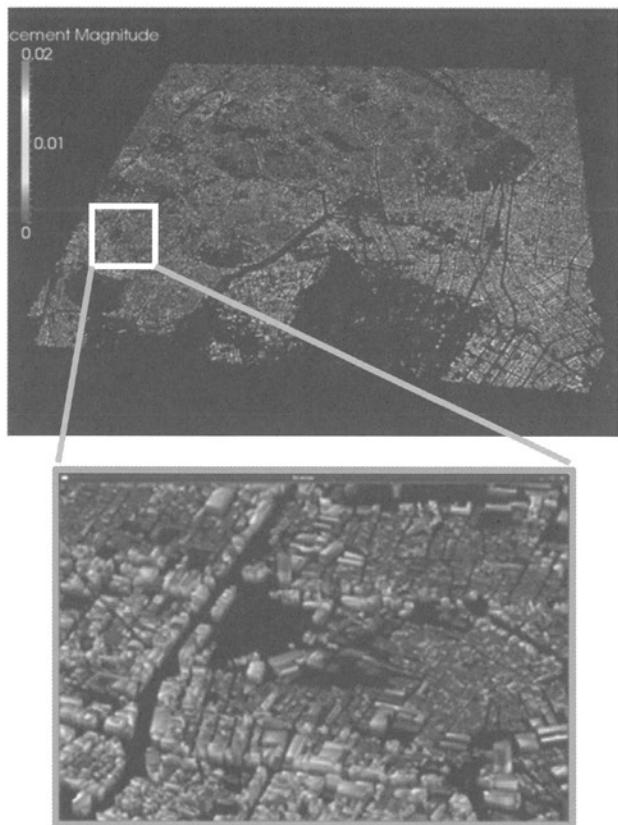


図-2 253,405 棟の建物の動的応答シミュレーション

#### (2) 都市津波被害予測シミュレーション

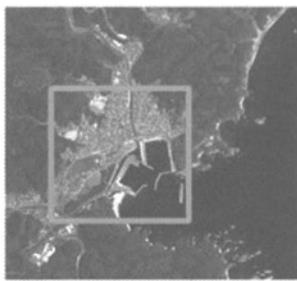
都市 WG 課題の内、第一著者が担当しているのはこの箇所である。ここでは、地震後に巨大津波が来襲し、地上へ遡上し、構造物、あるいは人的な被害をできるだけ精緻に予測することを目標に、粒子法を用いた 3 次元流体解析<sup>5)</sup>モジュールを開発している。

津波遡上計算を三次元粒子法で解析するには、建物を含む地形データをできるだけ正確に再現することが重要となる。また、解析対象とする地域ごとに解析モデルを作成する必要があるため、こうした解析の入力データを極力簡易な手順で作成することが望ましい。粒子法は、粒子のみを用いた解析手法であるため、複雑な形状のモデル化が容易に行える。たとえば、航空測量（海底面は深浅測量）で得られる生の観測データである点群の地形モデルから、解析に必要となる粒子上のデータへと変換（図-3 参照）すれば、これをそのまま解析モデルとして使用できる。現在の航空測量の技術を用いれば、1m 程度の間隔で建物を含む外観の標高データを計測することが可能である<sup>6)</sup>。なお、この計測データを用い、数 km × 数 km の領域を 1m 間隔の粒子にて解析するには、必要となる粒子数は数億に到達する。最先端のスパコンを数日から数週間占有すれば解析できない規模ではないが、まだ一般的な計算機環境では困

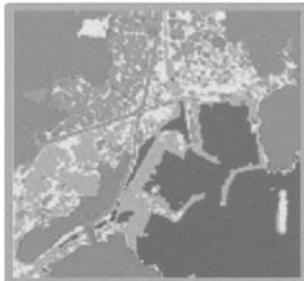
難な解析規模である。図-3(b)に示す解析モデルおよび図-4に示す解析例では、4m 間隔の粒子を再配置してモデルを作成した。解析対象は、岩手県宮古市田老地区(X字状の巨大な津波防波堤が築堤されていた地域)である。

現在、京などのハイエンドのスペックを使用すれば、1m~2m 程度の間隔で津波遡上現象を数値解析することが現実的なものとなってきた。このレベルの空間解像度での数値解析を実施した結果を用いれば、図-5に示すように人の目線から見た(これぐらい拡大しても現実的に見える)津波動画が作成できる。最大でどの程度の津波が来襲するのか、よく知る地元の景色の上に仮想的な津波解析結果を表示することで、津波の脅威をより現実的なものとして認識することができるため、こうしたリアリスティックビジュアリゼーションは効率的な防災教育への応用が期待できる。

津波遡上計算の現状から想像できるように、津波遡上計算と同時に構造物に作用する流体力までを評価することも現実味を帯びてきた。以下では、橋梁の耐津波設計への応用の第一段階として、橋梁の上部構造の流失現象の再現事例を示す。



(a) 航空写真と解析対象



(b) 4m 粒子モデル

図-3 宮古市田老の解析モデル

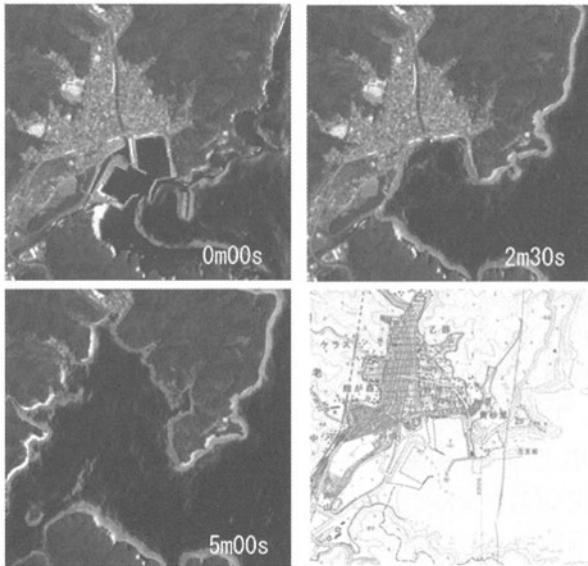


図-4 宮古市田老における遡上解析結果と被害状況



図-5 津波遡上解析結果の3次元立体視事例

図-6には具体的なポストテンション式PCのI桁橋を対象として上部構造の流失解析モデルと、今回設定した仮想的な津波の入力を示す。津波遡上を実施したものと同じ粒子解析ツールを用いれば、図-7に示すように複雑な形状の構造周りの流れも解析ができ、さらに剛体移動まで考慮すれば、図-8に示すような上部構造の流失予測へと応用できる。このような構造物周辺の詳細な流れを解析するには最低でも10cm程度の解像度をもつ高解像モデルを用いた解析が必要となるため、先の都市域の津波遡上解析と同時に解析するのは、京などの最先端の計算資源を用いても現状では非現実的である。このためにも、今後には多段階のスケールの解析を連成させるマルチスケール解析技術等が必要となる。

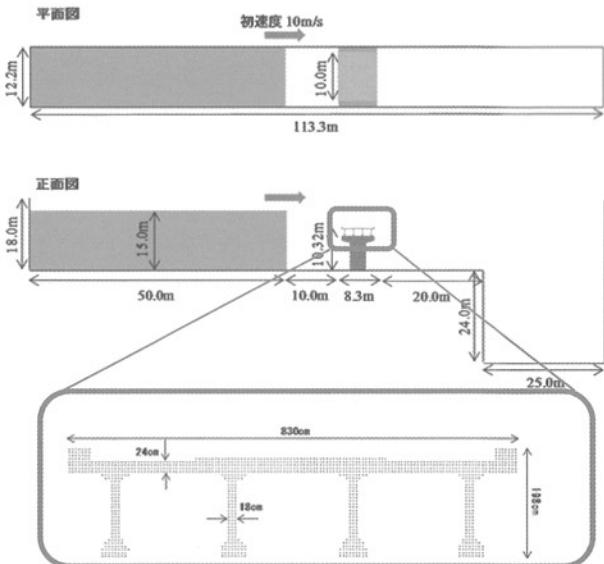


図-6 橋梁上部構造の流失解析の問題設定

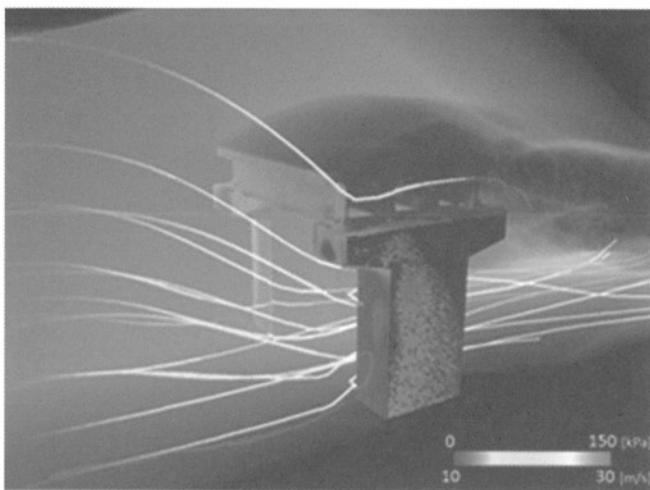


図-7 橋梁周辺の流跡線と構造に作用する流体圧



図-8 橋梁上部構造の流失解析結果の可視化

### (3) 地震・津波被害時のマルチエージェント避難シミュレーション<sup>7)</sup>

前述の都市部の地震、津波のシミュレーションは、主に構造物の被害予測を目的として実施されており、ハード防災への応用が期待される内容であった。ただし、最終的に防災・減災に資する計算に応用するには、人的被害を最小限に抑えためにも「ひと」の動きまでを予測することが要求される。マルチエージェントシミュレーションは、「ひと」の行動を理想化したエージェントを仮想空間に与え、地震時あるいは津波発生時の避難過程を予測する計算である。この計算では「ひと」の行動の理想化・数式化が計算精度に大きく影響を与えるため、複数の思考・機能を備えたエージェントを計算モデルに導入していく必要がある。基本的には、図-9に示すように常時使用可能な道をネットワーク構造として計

算モデルに与え、たとえば地震時に構造物の倒壊等が発生した場合には、図-10に示すように、構造物の損傷によりネットワークの一部が断線されたものとすることでマルチエージェントシミュレーションを行う。主なエージェントの種類としては、該当都市全体の道と避難場所を把握している住民エージェント、観光等で訪れており道に不案内な観光客エージェント、消防署職員など避難を呼びかけ、かつ正しい避難経路を案内するオフィシャルエージェントに分類されており、また年齢構成により避難時のスピードを分布させることも可能である。図-11には、高知市全体を対象とし、地震後に構造物が損傷した上で、その後に津波が来襲することを想定した30万人のエージェントの避難シミュレーション結果を与えている。このエージェントシミュレーションに先に述べた津波遡上解析結果等を重層することで、人的な被害の推定に応用できる。

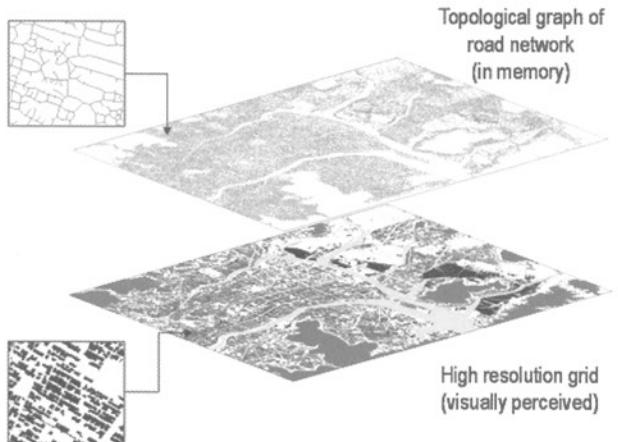


図-9 マルチエージェントシミュレーションモデル



(a) 構造物の被害考慮(赤色部) (b) 構造物の被害なし

図-10 地震動による構造物の被害有無の影響

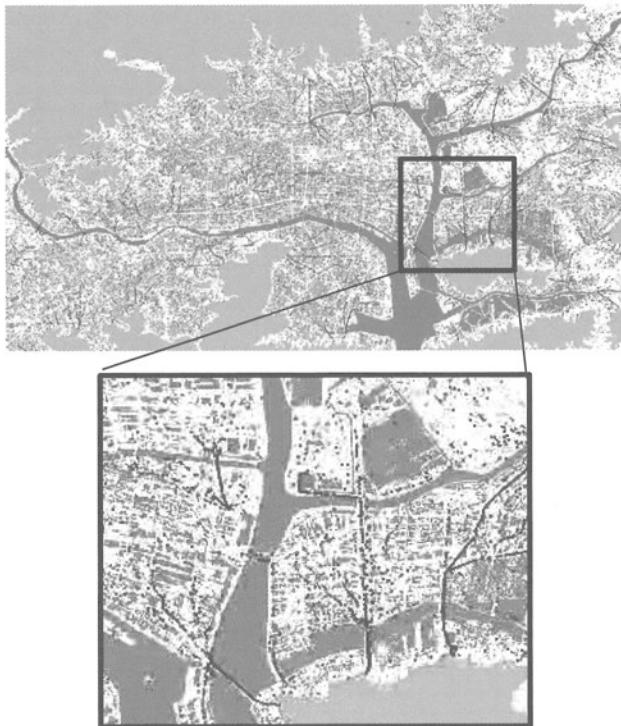


図-11 高知市における津波時避難シミュレーション例

#### 4. おわりに

京の重点のひとつである防災・減災に資する地球変動予測(分野 3)のサブテーマのひとつである地震・津波の予測に関する研究として堀宗朗教授をグループリーダーとした統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation : IES) の現状の一部をここでは紹介した。地震・津波に限らず、自然災害被害予想、および非常時に「ひと」の行動予測には、広範な領域を同時に解くことが要求されるため、京をはじめとした大規模スパコンの使用が前提となる研究を推進すべきである。また、複数の分野にまたがる研究テーマも扱わなくてはならない。こうした現状を考えると、図-1 に示したシステムコンピューティングの概念に基づき、複数の研究者が得意とする研究成果をひとつのモジュールとして組み込み、各モジュール間をシームレスに繋ぐためのデータ構造を共有化していく必要がある。また統合化した結果ができるだけ分かり易く見える化(可視化)することも重要となる。最後に、地震・津波被害予測に限らず、自然災害予測は複数の研究分野にまたがる学際的な研究が望ましく、今回紹介した IES のように複数の研究者の参加を想定したシステムの設計が重要となるであろう。

**謝辞:** 本論文の結果(の大部)は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです(課題番号 hp120308)。

#### 参考文献

- 1) 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman, 田中聖三, 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のための HPC による基礎検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 69, I415-I424, 2013.
- 2) Shunsuke Homma, Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Seckin Citak and Takane Hori, A physics-based Monte Carlo earthquake disaster simulation accounting for uncertainty in building structure parameters, *Procedia Computer Science*, 29, pp.855--865, 2014. DOI:10.1016/j.procs.2014.
- 3) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, M. L. L. Wijerathne and Seizo Tanaka, A quick earthquake disaster estimation system with fast urban earthquake simulation and interactive visualization, *Procedia Computer Science*, 29, pp.866-876, 2014. DOI: 10.1016/j.procs.2014.
- 4) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, Yoshihisa Shizawa, Hiroshi Kobayashi, Physics-based Urban Earthquake Simulation Enhanced by 10.7 BInDOF×30 K time-step Unstructured FE Non-linear Seismic Wave Simulation, *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, New Orleans, USA, November 2014.
- 5) Mitsuteru Asai, Abdelraheem M. Aly, Yoshimi Sonoda and Yuzuru Sakai, A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *International Journal for Applied Mathematics*, Volume2012(2012), Article ID 139583, 24 pages, 2012.
- 6) 藤本啓介, 浅井光輝, 一色正晴, 館澤寛, 三上勉  
高解像度地形モデルを用いた ISPH 法による津波シミュレーション, 地震工学講演会論文集(土木学会論文集 A1 特集号), A1S-0224, 2013.
- 7) M.L.L. Wijerathne, L.A. Melgar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, HPC Enhanced Large Urban Area Evacuation Simulations with Vision based Autonomous Navigating Multi Agents, *Procedia Computer Science*, Vol. 18, pp 1515-1524, 2013.

(2014. 5. 9 受付)