

災害影響評価のための 大規模マルチフィジックス・シミュレータの高度・高性能化

田上 大助 (九州大学)

概要 我々は数値シミュレーションを利用した災害影響評価に基づいた防災・減災対策の推進に寄与するために、高精度かつ高効率な大規模マルチフィジックス・シミュレータのプラットフォーム構築を目指している。プラットフォーム構築の第一段階として昨年度の当拠点公募型共同研究課題から我々が着目している、地震および地震に伴って生じる津波が構造物に与える影響評価に向けて、粒子法に基づく流れ問題に対する高精度なシミュレーション手法の構築と高効率な計算機実装手法の検討、および領域分割法に基づく構造計算に対する高効率な次世代並列計算機環境への実装手法の検討、の2点について、本年度の進捗状況について述べる。

1. 研究の目的と意義

2011年3月11日の東日本大地震によって引き起こされた津波が太平洋沿岸地域に甚大な被害をもたらしたことは、地震から2年以上を経た現在も我々の記憶に刻まれている。この津波災害を表現する際に用いられてきた「想定外」という言葉は、これまでに行われてきた津波対策だけでは十分な対応の出来ないより大規模な津波災害の可能性を示唆している。

このような大規模災害に対して、防波堤・防潮堤などの構造物を用いて居住地域などへの津波の遡上を防ぎ、経済的被害と人的被害の両者を抑える「防災」と、河川や港湾における津波の遡上経路や損壊した構造物からなる瓦礫の動きなどを予測して、一定の経済的被害を容認しつつ人的被害を抑える「減災」との両面を考慮した、総合的な災害対策が検討されている。対策を検討する際に重要な指標となる災害影響評価を、現実の大規模複雑人工物や自然地形を利用した実験を通して行うことは事実上不可能であるため、実験の代替手段として高性能・高効率な数値シミュレーションを通して行うことが模索されている。しかしながら、災害発生時には複数の物理現象（マルチフィジックス現象）が互いに連成した非常に複雑な現象が生じているため、適切な数理モデル・数値シミュレーション手法・実装手法が十分に構築されているとは言えない。

そこで我々は、数値シミュレーションを利用した防災・減災対策の推進に寄与するために、

従来よりも高精度かつ高効率で災害の影響を評価することが可能と成り得る大規模マルチフィジックス・シミュレータのプラットフォーム構築を、昨年度の当拠点公募研究課題などによって着手している。本研究課題では、特に、地震および地震によって引き起こされる津波が構造物に与える影響に着目し、

- (A) 波動・流れ・弾塑性の連成現象に対する高精度な数理モデル・シミュレーション手法の構築;
- (B) 次世代並列計算機アーキテクチャにおける高効率な実装手法の確立;

の2点を大きな目標として研究を進めている。これらの目標に対して今年度は、提案した粒子型解法を用いた津波遡上シミュレーションのより現実に即した検証問題への適用や並列計算環境へのより高効率な実装手法の検討、開発した実装手法を用いた構造シミュレーションの次世代計算機アーキテクチャを持った他の計算機への適用、などを推進している。

本研究課題の目的が実現されれば、数値シミュレーションを利用したより高精度かつより高効率な災害影響評価を用いた総合的な防災・減災対策の推進への貢献が期待できる。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究課題は、超大規模数値計算系応用分野を共同研究分野、九州大学情報基盤研究開発センターを共同研究機関、九州大学情報基盤研究開

発センターが所有する Fujitsu PRIMECHPC FX10, Fujitsu PRIMERGY CX400S1, および Fujitsu PRIMERGY RX200S6 を主たる計算機資源とし、九州大学と名古屋大学に所属する教員からなる共同研究体制を組んでいる。第1節で述べたように、災害の影響を評価する際には、対象となるマルチフィジックス現象に対する適切な数値モデル・シミュレーション手法の選択を行うことが必要不可欠である。またこのような人工物・自然現象に対する数値シミュレーションを行う場合、その計算モデルは非常に大きな規模となり、これを効率良く求解することも必要不可欠である。さらに可視化などを通してシミュレーション結果に基づいた現象の評価を行う場合、生成されるデータが非常に大きな容量となるために、データを効率よく取り扱うことも必要不可欠である。これらの要求される特徴から、2008年に1ペタフロップスを達成したアメリカ Los Alamos 国立研究所の Roadrunner を皮切りに、2011年に運用が開始され10ペタフロップスを達成した日本理化学研究所の京、20ペタフロップスを最終目標に開発中のアメリカ Lawrence Livermore 国立研究所の IBM Sequoia、最近になって新しく開発が検討されている我が国の次世代計算機など、国内外で整備されつつあるペタスケールあるいはエクサスケール以上の演算性能を持つ次世代スーパーコンピュータを活用する有用なアプリケーションの一つとして、数値シミュレーションを利用した災害影響評価を捉えることが出来る。従って、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の下で、超大規模計算機や超大容量ストレージといった情報基盤を十分に有効活用するためのアプリケーション構築を図ることが重要となる。

3. 研究成果の詳細

本節では本研究課題の主たる成果と研究計画の達成状況を、マルチフィジックス・シミュレーションの観点から津波遡上問題に対する粒子型解法を用いた数値シミュレーションに関する成果を、また次世代並列計算機アーキテクチャへの実装の観点から領域分割法 (Domain Decomposition Method: DDM) 法におけるハイブリッド並列実装に関する成果を、それぞれ取り上げる。

3.1. 粒子型解法を用いた数値シミュレーション

粒子型解法は、Lagrange 的に動く粒子を用いた計算手法であり、我々が解析の対象とする津波のように、流体の占める領域が時間とともに変動する流れ問題でしばしば用いられる。そこで本年度は、差分法や有限要素法でも用いられている時間積分に対する分離型解法を粒子型解法に適用した Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH) 法を用いて、津波遡上や関連する問題に対する数値シミュレーションを行った結果を報告する；研究成果 [1]-[3], [12]-[15], [23], [29]-[31]を参照。

3.1.1. 津波遡上の数値シミュレーション

まず最初に、昨年度の当拠点公募研究課題において精度検証を実施したシミュレーション手法を用いて、本研究課題では津波遡上シミュレーションを実施した結果を報告する。

本研究課題の津波遡上シミュレーションで取り上げる岩手県宮古市田老町は、昭和三陸地震以降、津波に強い街づくりを目指して防波堤の建設を進め、最終的には高さ10m、総延長2,500mに及ぶX字状の堤防を建設した；Fig.1参照。ここでは、海側に建設された赤線、緑線の堤防を第1線堤、第1線堤より町側に建設された青線の堤防を第2線堤と呼ぶことにする。

計算モデルは、震災前に岩手県が独自に津波被害予測調査をした際にレーザープロファイラで計測した地形および海底面の標高データを基に作成した。粒子間隔は4mであり、地形を含む全粒子数は約800万である。津波を模擬した波の入力は、津波が堤防を越流するために必要となる総水量からその高さを3m、流入境界部の水深が約10mであることと長波理論に基づく流速とからその伝搬速度を10m/sとした。また、粒子間隔から設定される安定性の条件が



Fig.1 田老町に築かれていた堤防の航空写真



Fig.2: シミュレーションによる浸水領域 (上) と実際の浸水領域 (下) の比較

ら時間増分を 0.01s とし、実時間 5 分の解析を行った。

Fig.2 は、津波の入力開始から 5 分後におけるシミュレーションによる浸水領域と実際の浸水領域との比較を示す。実際の浸水領域は、日本地理学会津波被災マップの 2011 年津波遡上範囲より引用した。なお Fig.2 のシミュレーション結果は、レイトレーシング法を用いた粒子レンダリングによる可視化を行っている。東日本大震災時には、第 1 線堤のうち赤線部分がほぼ全壊し、第 1 線堤のうち緑線部分は堤防法面の被覆コンクリートが複数流出したものの決壊は免れた。Fig.2 で示したシミュレーションに用いた計算モデルでは十分な解像度がないため堤防の影響を完全には議論できないものの、シミュレーションによって得られた浸水領域が、実際の浸水領域と良く一致している様子が分かる。

3.1.2. 粒子型解法の並列実装

本研究課題で採用している ISPH 法では、粒子型解法で必要となる近傍粒子探索と圧力 Poisson 方程式の求解との 2 箇所において計算負荷が特に高くなる。本年度は、このうち近傍粒子探索の並列実装手法に関して、比較的良く用いられている KDtree 検索法と Link-list 検索法の並列効率を調査した。

最初に KDtree 検索法の調査を行った。このときノード内並列が未対応であったことが要因の一つではあるものの、計算ノード数を増やしても並列効率の向上に頭打ちがあり、およそ 700 コア以上では効率向上が停滞した。さらに KDtree 検索を用いたノード間並列のプログラムは煩雑となること、近傍粒子探索に限定した性能でも計算負荷の低減がさほど期待できないこと、などから KDtree 検索法ではなく Link-list 検索法を用いる方針とした。

Link-list 検索法とは、近傍粒子探索をする際に構造格子状のバックグラウンドセルを用いて検索候補数を減らすことで、近傍粒子探索の速度向上を図る手法である。このため用いるバックグラウンドセルを単位に領域分割を行えば、ノード間並列が容易になる利点がある。また領域分割の大きさを各計算ノードが担当する粒子数の均一化を念頭に定めれば、動的な負荷分散も容易に実施可能である利点もある。本研究課題では、ノード内並列におけるメモリアクセス性能を向上するために、各時刻ステップで粒子の番号付けをやり直すことでキャッシュのヒット率を向上させるように実装する。ISPH 法が近傍粒子の情報のみを必要とすることを利用した通信情報の限定により通信速度の向上を図る、などの点も実装における特徴である。これらの特徴を備えた実装の結果、以下のような並列効率に関する結果を得た。

まず総粒子数 5,000 万粒子の計算モデルを用い、ストロングスケールによる並列効率を計測した。コア数は 16, 32 コアの 2 ケース、ノード数は 16, 32, 64, 128 ノードの 4 ケースについて全てのケースについて並列効率を調査した。いずれの場合も、計算ノード数を増やすに連れて、ほぼ理論性能に近い、約 80% の並列化効率が得られた。

次に総粒子数 2,500 万, 5,000 万, 1 億粒子の計算モデルを用い、ウィークスケールによる並列効率を計測した。使用するノード数を計算モデルの規模に合わせて 32, 64, 128 ノードと増加させた。また各ノードのコア数は 16, 32 コア

の2 ケースの計測を実施した。いずれのコア数の場合でも、理論性能の約 70%の並列効率を得られた。

3.2. 領域分割法のハイブリッド型並列実装

第1 節で述べた通り、災害影響評価の数値シミュレーションを実用化するためには、要求されるモデル規模と計算コストの観点から高効率な数値シミュレーション手法が必要とされる。その際、次世代の計算機アーキテクチャにおいても高い演算効率を得られる数値シミュレーション手法を構築する必要がある。特に将来のエクサスケール級スーパーコンピュータでは、マルチコアCPU、メニーコア、GPUなどの異種混在かつ分散メモリ型のアーキテクチャであることが予想されており、高効率な負荷分散が可能な数値シミュレーション手法が必要とされる。

そこで本年度は、既に我々が一定の有効性を示している領域分割法 (Domain Decomposition Method: DDM) のハイブリッド並列実装技術において、通信時間の隠ぺいについて検証した結果を報告する。本節の内容は研究成果[4], [16], [17], [19], [25], [32]-[34]に関連している。

3.2.1. 領域分割法

本研究課題で用いる領域分割法は反復型領域分割法と呼ばれ、解析領域を重なりのない部分領域に分割し部分領域内部独立自由度を部分領域間境界上自由度に静的縮約を行った式を前処理付き共役勾配法などで解くアルゴリズムを基本としている。まず、有限要素近似で最終的に得られる連立一次方程式

$$Ax = b \tag{1}$$

を考える。ただし、 A は正定値対象な係数行列、 x は未知ベクトル、 b は右辺ベクトルとする。次に解析領域を重なりのない N 個の部分領域に分割し節点の番号付けを適当にやり直すと、 A 、 x 、 b はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} A_I^{(1)} & & O & A_{IB}^{(1)} R_B^{(1)} \\ & \ddots & & \vdots \\ O & & A_I^{(N)} & A_{IB}^{(N)} R_B^{(N)} \\ R_B^{(1)T} A_{IB}^{(1)T} & \cdots & R_B^{(N)T} A_{IB}^{(N)T} & \sum_{i=1}^N R_B^{(i)T} A_{IB}^{(i)} R_B^{(i)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_I^{(1)} \\ \vdots \\ x_I^{(N)} \\ x_B \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_I^{(1)} \\ \vdots \\ b_I^{(N)} \\ b_B \end{pmatrix}$$

と書くことができる。ただし上付き添え字は部分領域の番号を、下付き添え字 I および B は部分領域内部自由度に関する成分および部分領域間自由度に関する成分であることを、 $R_B^{(i)}$ は部分領域間自由度の番号付けと全自由度の番号付けとの対応を定める Boolean 行列を、それぞれ表している。ここで部分領域内部独立自由度を静的縮約することで、式(1)に対して部分領域間境界上自由度に関する方程式

$$Sx_B = g \tag{2}$$

が得られる。ただし、 S は A に対する Schur 補行列で、部分領域ごとのローカル Schur 補行列の重ね合わせより

$$\sum_{i=1}^N R_B^{(i)T} \left\{ A_{BB}^{(i)} - A_{IB}^{(i)T} \left(A_{II}^{(i)} \right)^{-1} A_{IB}^{(i)} \right\} R_B^{(i)} \tag{3}$$

で得られる。

3.2.2. ハイブリッド型並列実装

反復型領域分割法では、式(2)に対して共役勾配 (Conjugate Gradient: CG) 法を適用する場合、係数行列に表れるブロック行列 $A_{II}^{(i)}$ 、 $A_{IB}^{(i)}$ 、 $A_{IB}^{(i)}$ とあるベクトル p^n との積が必要となり、

```

for i = 1, ..., Nj
  s(i)n = -AIB(i) RB(i) pn
  t(i)n = AII(i-1) s(i)n
  q(i)n = ABB(i) RB(i) pn + AIB(i)T t(i)n
  qjn = qjn + RB(i)T q(i)n
endfor
qn = qn + qjn
    
```

Fig.3: DDM に表れる係数行列とベクトル積

例えば Fig.3 に示すアルゴリズムで計算する。ここで N_j は j 番目の MPI プロセスが担当する部分領域数を表す。

スレッド並列処理は、ループ間でデータ依存性がない for ループなどに対して行うものである。一般的には行列ベクトル積における行方向や列方向ループなどに対して行われるが、Fig.3 に示されるように、DDM では部分領域方向ループが存在している。そこで本研究課題では、この部分領域方向ループの OpenMP によるスレッド並列化を検討した。このとき各スレッドが

担当する部分領域数が均等になるように負荷分散を行うために、静的スケジューリングの導入が考えられる。しかし本研究課題が対象とする非構造格子を用いた有限要素法では、部分領域毎の計算量を均一にすることは困難であり、静的スケジューリングでは均等な負荷分散とならないことが予想される。そこで本研究課題では動的スケジューリングを適用する。このとき最初に指定したチャンクサイズで各スレッドに部分領域が割り振られ、その後は計算が終わったスレッドに次の部分領域が割り振られるよう設定する。ループ内の計算量にばらつきが生じる DDM には、この動的スケジューリングが適している。

さらに各 MPI プロセスが担当する部分領域の計算が完了したのちに、部分領域からの寄与を全体領域ベクトルへ重ね合わせることが必要となる。この処理は MPI_Isend・Irecv などの通信処理となる。ここで他 MPI プロセスに送信すべき部分領域からの寄与分は、MPI プロセス間の袖部分にある部分領域の情報であり、事前に調べることができる。よって、送信対象となる部分領域を先に計算し、その結果の通信を送信対象でない部分領域計算で隠ぺいする。

3.2.3. 数値実験例

以上の実装について、数値実験を行った。また、部分領域からの寄与分に対する書き込み競合を critical 指示行で回避した場合、スレッドの処理待ち時間が発生することが考えられる。そこで、部分領域番号のマルチカラーオーダリング法などを導入すべきかについても合わせて検証した。Table 1 に 100 万自由度と 1,000 万自由度規模モデルにおいて、それぞれ CG 法を 1,000 回と 100 回反復させた場合における処理経過時間を示す。

Table 1 OpenMP のスケジューリング手法の違いによる計算時間の比較

Model [DOFs]	10 ⁶	10 ⁷
Static	15.4587	7.9067
Dynamic	15.1912	7.8055
Overlapped	15.1480	7.8067
(Dynamic w/o critical)	(15.1664)	(7.7993)

Table 1 より、DDM で部分領域方向ループを OpenMP スレッド並列処理する場合には動的スケジューリングが適していることが分かる。一方、通信の隠ぺい効果は十分なものが得られなかった。また動的スケジューリングにおいて

critical 指示を外した場合の計算時間も Table 1 に示してある。このとき一定の効果はあるが大きな改善は得られなかった。これは、一般的にマルチカラーオーダリングが要求される事例に比べて、書き込み競合が発生する回数が非常に少ないなどの原因が考えられる。これより、DDM におけるスレッド並列処理においては、通信処理の計算による隠ぺいやマルチカラーオーダリング法などによるメモリ書き込み競合回避の効果は少ないことが得られた。今後は、スレッド間で計算量を均等にする方法について検討していく。

4. これまでの進捗状況と今後の展望

本年度はまず最初に、津波遡上の際に見られるマルチフィジックス現象の数値シミュレーションを見据え、流れ問題に対する粒子型解法の実装に関する検討および実際の津波シミュレーションへの適用可能性を検討した。用いたシミュレーション手法は、昨年度の当拠点公募型共同研究課題で精度検証を行なった計算手法を用いた。その際、より実用問題のシミュレーションで必要となる計算規模の増大に備え、近傍粒子探索を中心に並列化手法の比較検討も行った。

取り上げた実問題は、2011 年 3 月 11 日の東日本大地震によって引き起こされた津波を想定した、岩手県宮古市田老町における津波遡上問題である。現在は、提案した手法の実問題への適用性を検討するための第 1 段階であるため、シミュレーションには比較的小規模な計算モデルを採用した。そのため計算モデルは、実現象の全てを再現するに十分な解像度を備えていないため、津波遡上に対する堤防の影響を定量的にかつ詳細に議論することはできない。しかしながら、津波遡上領域の実際の測定結果を良く再現するシミュレーション結果を得ることができ、実現象に対する一定の定性的評価を行うことは可能となった。

またバックグラウンドセルを用いて近傍粒子検索の対象粒子数を減らすことで計算コストの削減が可能な Link-list 検索法の並列実装について、その効率を検証した。その結果、ストロングスケールリングで約 80%、ウィークスケールリングで約 70%という、並列効率を得ることができた。

今後は、より高解像度で大規模な計算モデルを用いた数値シミュレーションなどを実施し、

得られるシミュレーション結果と被災後の調査より明らかになっている遡上域とを、既存堤防の影響などまで含めて比較するなどしてその妥当性を検討する。また、得られた数値シミュレーション結果を基に堤防の受ける流体力を評価するなど流体構造連成シミュレーションに向けた準備も行う。さらに、より大規模な計算モデルを用いる際にも高い計算効率を維持するために、バックグラウンドメッシュを用いた粒子型解法に対する並列計算手法のさらなる効率化の検討、BDD-DIAGの実装で得られた知見などを元に使用する計算機資源の特長を活かす並列計算手法の検討などを行っていく予定である。

次に構造シミュレーションに対するDDMのハイブリッド並列実装に関して検討を行った。100万および1,000万自由度の小から中規模計算モデルに対してDDMを適用した並列計算を行うことで、スレッド並列処理のいくつかの手法に対する効率の検証を行った。その結果、静的スケジューリングと比較して、動的スケジューリングが数%の計算コストの短縮に有効であることを確認した。また、通信処理の隠蔽やマルチカラーオーダリング法などによるメモリ書き込み競合回避の効果は少ないことを確認した。今後は、スレッド間での計算量の均一化を図り、より均等な負荷分散を実装可能な手法について検討を進めていく。

以上のように、地震および地震に伴って生じる津波が構造物に与える影響を考えるための第一歩として掲げた2つの重点項目について、粒子型解法を用いた流れ問題の数値計算において一定の精度・効率を保ったシミュレーションの実問題への適用に向けた基礎付けが可能となり、かつ、DDM法を用いた構造問題の並列計算において次世代並列計算アーキテクチャにおける実装手法の基礎付けが可能となった。

さらに共同研究体制に参画している各々の研究者らが得た知見を活かし、大規模連立1次方程式のための並列化実装を含めた高効率な求解手法の検討(研究成果[5],[18],[24])、より高精度な数値計算を行うための精度保証演算の検討(研究成果[6]-[8],[26],[35])、津波などから生じる流体力を受けた構造物の破壊現象に関連する数理モデルや計算モデルの検討(研究成果[9],[27],[36]-[37])、および最終的に必要となる波動・流れ・構造連成問題のより適切な数理モデルおよび計算手法の構築へ向けた基

礎的な検討(研究成果[10]-[11],[20]-[22],[28])なども平行して行っている。また本研究課題に関連する内容での学会賞受賞(研究業績[38],[40])、報道機関取材や雑誌記事掲載(研究業績[39],[41])など本研究課題の外部に対する公開・周知活動も積極的に行っている。

以上で述べた本研究課題で得られた成果を元に、より並列効率の高い粒子型解法の実装手法の検討、より計算機資源に適したハイブリッド並列実装の検討、より高精度なシミュレーションを可能とする基礎的な数理モデルの検討、マルチフィジックス・シミュレーションのための流体構造連成シミュレーションの準備などを進める。そして、我々の長期的な目標である数値シミュレーションを利用した災害影響評価に基づいた防災・減災対策の推進に寄与できるよう、研究を推進していく予定である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- [1] 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, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 69 (2013), 採録決定.
- [2] Asai, M., Aly, A. M., Sonoda, Y., and Sakai, Y.: A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, *Int. J. Appl. Math.*, (2012), Article ID 139583 (24pages).
- [3] 浅井 光輝, 別府 万寿博, 石川 信隆, 眞鍋 慶生, 斎藤 展, 丹羽 一邦: 数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 58A (2012), pp.1021-1028.
- [4] 吉村 忍, 小林 敬, 秋葉 博, 鈴木 智, 荻野 正雄: 3次元有限要素法による沸騰水型原子炉のフルスケール地震応答解析, 日本原子力学会論文誌, 11 (2012), pp. 203-221.
- [5] Nakashima, N., Fujino, S., and Tateiba, M.: The IDR-based IPNMs for the fast boundary element analysis of electromagnetic wave multiple scattering, *IEICE Trans. Electron.*, E95-C (2012), pp.63-70.

- [6] 渡部 善隆: 微分方程式の精度保証付き数値計算 逐次反復に基づく計算機援用証明, 講究録別冊 (研究集会 “可積分数理の進化”, 広田 良吾, 高橋大輔 編), B30 (2012), pp. 145-155.
- [7] Watanabe, Y.: A simple numerical verification method for differential equations based on infinite dimensional sequential iteration, *Nonlinear Theory Appl.*, IEICE, 4 (2013), pp. 23-33.
- [8] Cai, S., Nagatou, K., and Watanabe, Y.: A numerical verification method for a system of FitzHugh-Nagumo type, *Numer. Funct. Anal. Opt.*, 33 (2012), pp. 1195-1220.
- [9] Abe, K. and Kimura, M.: Vibration-fracture model for one dimensional spring-mass system, to appear in *J. Math-for-Indust.*
- (2) 国際会議プロシーディングス
- [10] Tagami, D., An iterative domain decomposition method with mixed formulations, *Proc. of Propagation of Ultra-large-scale Computation by the Domain decomposition method for Industrial Problems 2012*, COE Lecture Note, 45, Kyushu University, pp.19-26, 2012.
- [11] Tagami, D.: Efficient numerical computations on large scale electromagnetic field problems using an iterative domain decomposition method, *Proc. of Multiscale Mathematics: Hierarchy of Collective Phenomena and Interrelations between Hierarchical Structures*, COE Lecture Note, 39, Kyushu University, pp.96-101, 2012.
- [12] Asai, M., Fujimoto, K., and Isshiki, M.: Large scale tsunami run-up simulation by a hybrid-parallel SPH, *Proc. of Propagation of Ultra-large-scale Computation by Domain Decomposition Method for Industrial Problems*, COE Lecture Note, 45, Kyushu University, pp.44-53, 2013.
- [13] Fujimoto, K., Asai, M., and Isshiki, M.: Large scale tsunami simulation by the incompressible SPH and its efficiency of hybrid parallel computation, *Proc. of 4th International Conference on Computational Methods*, paper ID 43 (5pages), 2012.
- [14] Asai, M., Fujimoto, K., and Isshiki, M.: A large scale tsunami simulation by a stabilized incompressible SPH, *Proc. of International Workshop on Information and Computation in Civil and Environmental Engineering*, pp. 23-24, 2012.
- [15] Asai, M., Fujimoto, K., Aly, A.M., and Sonoda, Y.: Fluid-soil-structure coupling analysis for tsunami disaster simulation, *Proc. of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics and CAE 2012*, No.12-1, pp.11-16, 2012.
- [16] Ogino, M.: A hybrid CPU-GPU implementation of finite element method based on the domain decomposition method, *Proc. of Propagation of Ultra-large-scale Computation by Domain Decomposition Method for Industrial Problems*, COE Lecture Note, 45, Kyushu University, pp.98-106, 2012.
- [17] Ogino, M. and Shioya, R.: A scalable and high performance implementation of the domain decomposition method, *Proc. of the 4th International Conference on Computational Methods*, 2012.
- [18] Ogino, M., Sugimoto, S., and Kanayama, H.: Iterative domain decomposition solvers for 3D magnetostatic field problems, *Proc. of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics and CAE 2012*, No.12-1, pp.25-32, 2012.
- [19] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., and Yoshimura, S.: Performance tuning of parallel structural analysis code based on hierarchical domain decomposition method for K supercomputer, *Proc. of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics and CAE 2012*, No.12-1, pp.243-244, 2012.
- (3) 国際会議発表
- [20] Tagami, D.: Efforts to establish a disaster assessment with the high performance computings, *Forum “Math-for-Industry” 2012 Information Recovery and Discovery*, Japan, Oct., 2012.
- [21] Tagami, D.: Numerical analysis of moving boundary problems using an area-preserving

- scheme, 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS2012), Austria, Sep., 2012.
- [22] Tagami, D., Efficient numerical computations on magnetic field problems using an iterative domain decomposition method, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), Brazil, Jul., 2012.
- [23] Asai, M., Fujimoto, K., Mikami, T., and Tatesawa, H.: High performance incompressible SPH method and its application to Tsunami disaster simulation, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), Brazil, Jul., 2012.
- [24] Ogino, M., Takei, A., Notsu, H., Sugimoto, S., and Yoshimura, S.: An iterative method based on the domain decomposition method for large-scale complex symmetric linear systems, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), Brazil, Jul., 2012.
- [25] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., and Yoshimura, S.: A ddm implementation using local schur complement approach on peta-scale supercomputer, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), Brazil, Jul., 2012.
- [26] Watanabe, Y.: A multiple-precision interval arithmetic library and its applications to fluid dynamics, International workshop on HPC (High performane computing), Krylov subspace method and its applications, Japan, Jan., 2013.
- [27] Kimura, M.: A fracture model in spring-block system, ALGORITMY 2012 Conference on Scientific Computing, Slovakia, Sep., 2012.
- (4) 国内会議発表
- [28] 井元 佑介, 田上 大助: SPH法における勾配作用素の打切り誤差解析, 第 17 回情報・統計科学シンポジウム, 福岡市, 2012年12月.
- [29] 藤本 啓介, 浅井 光輝, 園田 佳巨, 三上 勉, 館澤 寛: 大規模津波遡上解析に向けた高効率な並列化ISPH法の開発, 第 17 回計算工学講演会, 京都市, 2012年5月.
- [30] 浅井 光輝, 上坂 隆志, 園田 佳巨, 西本 安志, 西野 好生: 都市型水害対策用の止水板の構造解析と実験の比較検証, 第 17 回計算工学講演会, 京都市, 2012年5月.
- [31] Aly, A.M., Asai, M., and Sonoda, Y.: Fluid-structure-soil foundation interaction simulation by 3D-ISPH, 第 17 回計算工学講演会, 京都市, 2012年5月.
- [32] 荻野 正雄, 塩谷隆二: MPI-OpenMPハイブリッド並列領域分割法による 100 億自由度規模有限要素解析, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸市, 2012年10月.
- [33] 荻野 正雄, 藤瀬 遼平, 金山 寛: 領域分割型有限要素法による線形弾性解析のGPU実装, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸市, 2012年10月.
- [34] 河合 浩志, 荻野 正雄, 塩谷 隆二, 吉村 忍: 領域分割法に基づくローカルソルバーの京コンピュータでの性能評価, 第 17 回計算工学講演会, 京都市, 2012年5月.
- [35] 渡部 善隆: 精度保証とHPC, 2013年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2013), 目黒区, 2013年1月 (招待講演).
- [36] 木村 正人: 亀裂進展・破壊現象の数理モデリング, IMIチュートリアル “数学モデリングの基礎と展開”, 福岡市, 2013年2月.
- [37] 木村 正人: 破壊現象の離散版フェーズ・フィールド・モデルとその解析, RIMS研究集会 “次世代計算科学の基盤技術とその展開”, 京都市, 2012年10月.
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)
- [38] 浅井 光輝: 第 17 回計算工学講演会グラフィックスアワード, 日本計算工学会, 2012.
- [39] 浅井 光輝: スパコンを用いた3D津波解析の現状, 福岡Now, NHK福岡, 2012.
- [40] 荻野 正雄, JACM Young Investigator Award, 日本計算力学連合, 2012.
- [41] 渡部 善隆: 偏微分方程式の精度保証付き数値計算/Plum理論の紹介, 数学セミナー, 2012年10月号, pp.32-36, 2012.