

11-NA22

# 災害影響評価のための 大規模マルチフィジックス・シミュレータの構築

田上 大助 (九州大学)

**概要** 我々は、数値シミュレーションによる自然災害の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本研究課題で着目している、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、流れ現象に対する粒子法に基づく高精度なシミュレーション手法の構築、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検討、の2点について、本年度の成果と今後の展望について述べる。

## 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により、太平洋沿岸地域に甚大な被害が発生したことは記憶に新しい。今回の地震による津波被害に対してしばしば用いられる「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災害に対する備えとして不十分であることを示唆している。

これを受け、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」との両面から、総合的な災害対策を実施することが検討されている。その際、現実の大規模複雑人工物や自然地形を利用した実験を行うことは事実上不可能であるため、実験代替として高性能・高効率な数値シミュレーションを行うことは重要であると考えられている。実際、ペタスケールの演算性能を持つスーパーコンピュータの整備に代表されるような計算機性能の向上に伴い、災害影響評価を行う手段としてコンピュータを用いた数値シミュレーションの利用が試みられている。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・シミュレーション手法・実装手法の構築には多くの困難があり、数値シミュレーションによって十分な災害影響評価が行える状況にあるとは言えない。

そこで我々は、数値シミュレーションによる自然災害の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、従来よりも高精度かつ高効率な災害影響評価技術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目指している。本研究課題では、特に、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点に重点を置いて研究を進めている。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災害影響評価による総合的な防災・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 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。

既に述べたように自然災害の影響を評価する際には、マルチフィジックス現象に対する適切な数理モデル・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。また自然災害に見られる自然現象・実構造物を対象とした数値シミュレーションを行う場合、その過程に現われる計算モデルは大規模となり、これを効率良く求解することも必要不可欠である。さらにシミュレーション結果に基づいて現象に対する知見を得ようとする場合、生成されるデータが大容量となるため、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、災害影響評価の数値シミュレーションは近年、2008 年に 1 ペタフロップスを達成した米ロスアラモス国立研究所の Roadrunner や、昨年に運用が開始され 10 ペタフロップスを達成した日本次世代スパコンの京など、国内外で整備されつつあるペタスケールの演算性能を持つ次世代スパコンの持つ演算性能を活用する有用なアプリケーションの一つとして考えることが出来る。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の有効活用を目指したアプリケーション構築を図ることが重要となる。

### 3 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

本研究課題の主たる成果と研究計画の達成状況を、津波の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た流れ問題に対する粒子型解法の実装とその並列化、および構造計算に対していくつかの並列計算機環境で高い並列効率を実現している Balancing Domain Decomposition-DIAGonal (BDD-DIAG)法の実装、の 2 点について述べる。

#### 3.1 粒子型解法に基づく流れ解析

##### 3.1.1 粒子型解法と圧力評価の安定化

1990 年代以降、数値流体力学の一手法としてラグランジュ的に動く粒子を用いた計算手法である粒子型解法の開発が盛んに行われてきた。粒子型解法では、メッシュが潰れ計算が破綻するなどの心配がない、全体の体積(質量)の保存性も比較的良好である、などの特徴がある。これらの特徴が注目された結果、我々が解析の対象とする津波のように、自由表面が激しく変動する流れ問題では粒子型解法がしばしば用いられる。そこで我々は、射影法を用いた非圧縮性流れ問題に対する Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH)法に基づいて研究成果[1]-[4], [11]で提案した、ある粒子型解法を用いて数値計算を行った。

なお我々が提案した粒子型解法では以下の 2 項目の導入により、圧力振動や体積保存性悪化などの問題点を解消し、従来よりも安定した圧力評価を得ることが可能となっている。まず、射影法を用いることで現われる圧力ポアソン方程式のソース項に、以下のような緩和係数  $\alpha$  付きの密度修正項を導入した:

$$\nabla^2 p^{(n+1)} = \rho^{(0)} \frac{\nabla \cdot \mathbf{u}^*}{\Delta t} + \alpha \frac{\rho^{(0)} - \rho^{(n)}}{\Delta t^2} \quad (1)$$

ここに、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\mathbf{u}^*$  は中間流速、 $\Delta t$  は時間刻みであり、上付き添え字 ( $i$ ) は時間ステップを表わす。次に、粘性に LES 乱流モデルの一種で、物質固有の物性値である粘性  $\nu$  に、渦粘性  $\nu_t$

$$\nu_t = (C_s L)^2 S \quad (2)$$

を考慮した粘性  $\nu + \nu_t$  を用いる Smagorinsky 渦粘性モデルを導入した。ここに、 $C_s$  は Smagorinsky 定数、 $L$  は初期の粒子間隔に依存するモデル定数、 $S$  は  $S = \sum \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$  で定まるひずみ率、 $S_{ij}$  は  $S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$  で定まるひずみ速度テンソル、 $u_i$  は流速である。

##### 3.1.2 流体力評価を用いた精度検証

数値流体シミュレーションを活用した流体

力を受ける構造物の設計の可能性を検討するため、Fig.1 に示す清水の斜面流下試験を実施し、上で述べた ISPH 法の精度、特に流体力予測の精度を検証した。

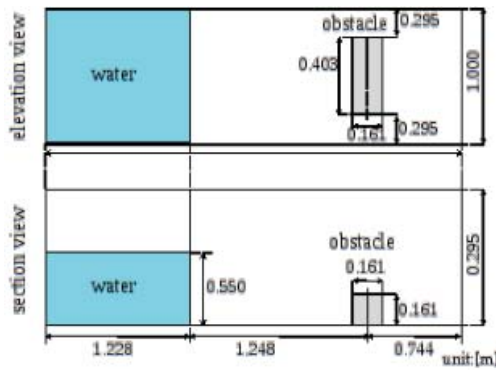


Fig.1: Geometry of the 3-D dam break experimental test.

Fig.2 は流路内に設置された圧力センサーにおける、流体力の実験値といくつかの計算手法による計算値との比較である。2 箇所いずれのセンサー部分においても、赤い実線で示された緩和係数付き密度修正項と Smagorinsky 渦粘性モデルを取り入れた ISPH 法による計算値が、数値振動も少なく、実験結果と良く一致してお

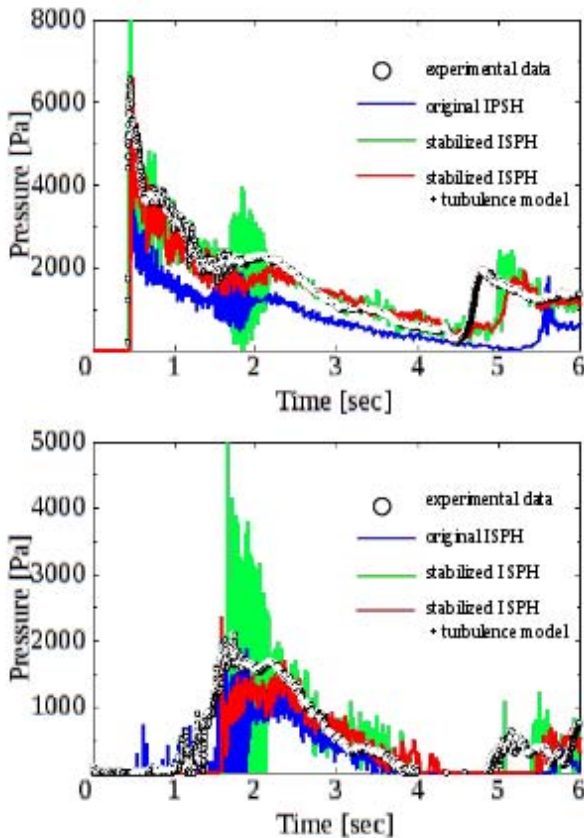


Fig.2: History of hydrodynamic force on the obstacle.

り、より精度の高い数値モデルの構築・計算手法の提案となっていることが分かる。

### 3.1.3 並列計算性能評価

次に、前節で述べた計算手法の高効率化に向けた、並列計算性能評価について述べる。ここではその第一段階として、時間ステップごとに必要となる近傍粒子計算を行う際に、ハイブリット並列に対応済みのリンクリスト検索を用いた場合の並列化効率についての検証結果を

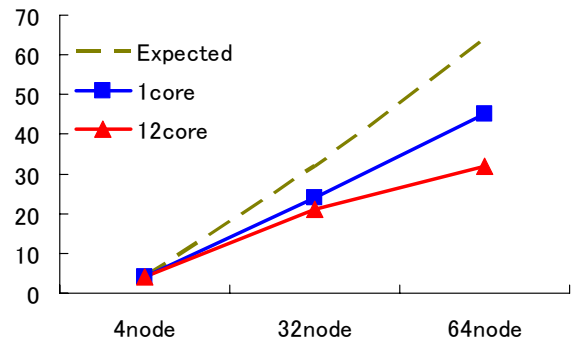


Fig.3: Efficiency of parallel computations in the particle search.

示す。Fig.3 はノード数が 4, 32, 64 それぞれの場合における、ノード数が 1 の場合と比較した計算時間の短縮率を示している。比較は 1, 12 コアの 2 通りの場合について行った。いずれのコア数においても、ノード数 4 程度まではほぼ理想的な短縮率が得られていることが分かった。さらにノード数 64 でも、12 コアの場合で 50% 程度、ノード間並列処理のみを考慮した 1 コアの場合で 70% 程度の並列効率が得られた。

以上の結果から、粒子型解法を用いた場合の並列計算の高効率化に対する障害の一つに予想される近傍粒子計算において、基礎的な検討を行うことができた。

### 3.2 BDD-DIAG 法のハイブリッド並列実装

概要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、京コンピュータをはじめとする国内外に設置される様々なスパコン上で稼働し、さらに次世代スパコンを見据えた上で、高い演算効率が得られるアプリケーションとして構築する必要がある。特に、次世代ス

パソコンはマルチコア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に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解析アルゴリズムが重要となってくる. そこで本年度は有限要素法による構造解析を対象に, これまで多様な並列計算機上で高い並列効率が得られ, 研究成果[18]-[20]などで用いられているBDD-DIAG法を九州大学情報基盤研究開発センターが所有するFujitsu PRIMERGY RX200S6 に移植し, 性能評価を行った.

### 3.2.1 BDD-DIAG 法

BDD-DIAG 法は, 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. また前処理として, 対角スケールリングとコースグリッド修正を組み合わせ合わせた方法を用いる. まず, 有限要素解析などで最終的に得られる線形な連立一次方程式

$$Ku = f \quad (3)$$

を考える. ただし,  $K$  は係数行列,  $u$  は未知ベクトル,  $f$  は右辺ベクトルである. 次に, 解析領域を重なりのない  $N$  個の部分領域に分割し, 部分領域内部独立自由度を静的縮約することで, 式(3)に対して部分領域間境界上自由度に関する方程式

$$Su_B = g \quad (4)$$

が得られる. ただし,  $S$  は  $K$  に対する Schur 補行列,  $u_B$  は部分領域間境界上の未知ベクトル,  $g$  は右辺ベクトルである. ここで,  $S$  は次式で表す部分領域  $(i)$  ごとのローカル Schur 補行列  $S^{(i)}$

$$S^{(i)} = K_{BB}^{(i)} - K_{IB}^{(iT)} \left( K_{BB}^{(i)} \right)^{-1} K_{IB}^{(i)} \quad (5)$$

の重ね合わせで得られる. ここで, 添え字  $I$ ,  $B$  はそれぞれ部分領域内部自由度と部分領域間境界上自由度に関する量であることを表す.

式(4)に対するBDD-DIAG法の前処理行列は

$R_0$  をコースグリッド空間への射影オペレータ,  $T_D$  を対角スケールリング前処理行列とすると

$$M_{B-D}^{-1} = \left( I - R_0^T \left( R_0 S R_0^T \right)^{-1} R_0 S \right) T_D \quad (6)$$

で表わされる.

### 3.2.2 ハイブリッド並列実装

式(4)に対する共役勾配法反復処理, 並びに式(6)の前処理ではSchur補行列  $S$  とのベクトル積を求める必要があるが, 式(4)の形を考慮すれば部分領域ごとに並列計算可能な

$$\begin{bmatrix} x_I^{(i)} \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{II}^{(i)} & K_{IB}^{(i)} \\ K_{IB}^{(iT)} & K_{BB}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -p_B^{(i)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{II}^{(i)} w_I^{(i)} = x_I^{(i)} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ y_B^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{II}^{(i)} & K_{IB}^{(i)} \\ K_{IB}^{(iT)} & K_{BB}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_I^{(i)} \\ -p_B^{(i)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

の各式を計算することで得られる量と等価となる. ただし,  $p_B^{(i)}$  は乗じるベクトルの部分領域  $(i)$  に関する量であり, 式(9)で得られる  $y_B^{(i)}$  を領域間境界上で重ね合わせることで求める行列ベクトル積が得られる. これらの式はそれぞれ, 式(7)は領域間境界に課されたDirichlet条件処理, 式(8)は領域内部独立自由度の求解処理, および式(9)は領域間境界上の反力演算処理, と各部分領域において有限要素解析を行っていると思なすことができる.

ここで, BDD-DIAG法では部分領域数  $N$  に任意の値を設定できるが, 特に式(8)の演算量に関係して, 1 部分領域あたり数百から数千自由度程度とするのが総計算時間で最適になることが知られており, 大規模自由度問題を並列計算する場合には部分領域数  $N$  は並列プロセス数に比べて非常に大きくなる. そこで各MPIプロセスに複数の部分領域を割り当て, それぞれのMPIプロセスでは担当する部分領域数に対してOpenMPによるスレッド並列処理を行うハイブリッド並列実装方法を採用する. 部分領域方向ループ処理のOpenMPプログラム例をFig.4に示

```
#pragma omp parallel for schedule(dynamic,1)
for (i = 0; i < N; i++) {
    (x(i), *)T = K(i) (0, p(i))T
    w(i) = KII(i-1) x(i)
    (*, y(i))T = K(i) (w(i), p(i))T
}
#pragma omp critical
y += y(i)
```

Fig.4: An example of dynamic load distributions on loop of the subdomains by OpenMP

す。MPIプロセスあたりの部分領域数は演算ノードが有するコア数よりも十分に大きく、かつ、部分領域あたりの演算量は比較的大きいため、チャンクサイズを1とした動的サイクリック割付を採用している。これにより、一般的に用いられる行列ベクトル積自身をOpenMP並列化する実装に比べて、非構造格子を用いた有限要素法においても効率的な負荷分散を行いやすいという特徴がある。

### 3.2.3 ハイブリッド並列実装の数値実験例

九州大学情報基盤研究開発センターが所有する Fujitsu PRIMERGY RX200S6 を用いて性能評価を行う。CPU は 12 コア搭載の Intel Xeon X5670 であり、各演算ノードは InfiniBand 4x QDR(4GB)で結合されている。MUMPS が依存するライブラリ BLAS, BLACS, ScaLAPACK には SSL II を用いた。

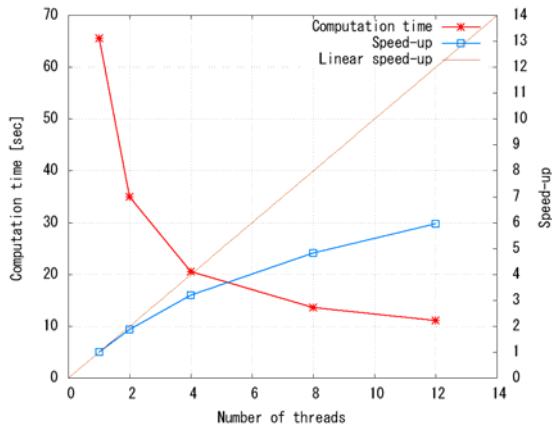


Fig.5: Parallel performance of the strong scaling by the OpenMP

まず約 100 万自由度規模静弾性解析の結果を用いて、OpenMP スレッド並列化によるストロングスケール性能を Fig.5 に示す。部分領域数は 2,016 とし、1 ノードを用いて OpenMP スレッド数を 1, 4, 8, 12 とした場合の計算時間並びに高速化率を表す。Fig.5 より、スレッド数 4 までは 80%以上の高い並列効率が得られたこと、その後並列効率が低下するものの、スレッド数 12 においても 50%程度の並列効率が得られた。

次に、約 1 億自由度規模静弾性解析の結果を用いて、MPI によるストロングスケール性能を Fig.6 に示す。部分領域数は 60,000 とし、OpenMP スレッド数を 12 に固定して MPI プロ

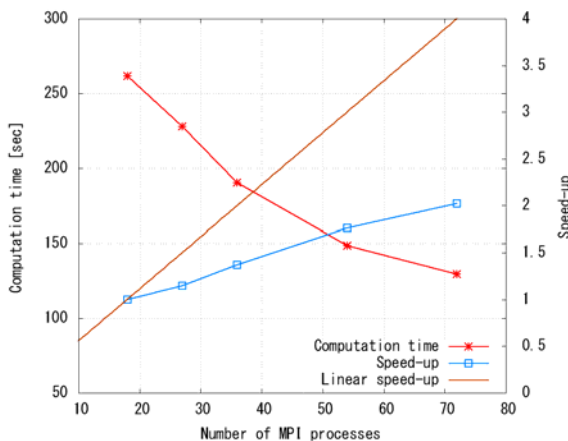


Fig.6: Parallel performance of the strong scaling by the MPI

セス数(演算ノード数に等しい)が 18, 27, 36, 54, 72 における計算時間並びに高速化率を表す。Fig.6 より、18 ノード使用時における計算時間を基準として、36 ノードで並列効率 68%, 72 ノードで約 50%となった。これは、コースグリッド修正に必要な MUMPS によるコース問題係数行列の分解処理コストが影響している。MUMPS は分散メモリ並列に対応しているが、ストロングスケール性能が十分ではないため、大規模解析においてはコースグリッド修正部分の並列効率低下が全体に与える影響が大きくなるからである。

以上のことから、用いる計算機資源を考慮すると未だ改良の余地は残されているものの、一定の並列効率を得ることが可能なハイブリッド並列実装を行うことが可能となった。

## 4 今後の展望

最初に、津波の遡上の際に見られるマルチフィジックス現象を見据えた流れ問題に対する粒子型解法の実装に関して、本年は、用いた計算手法の精度検証、および高効率化に向けた計算手法の並列化の検討を中心に行った。粒子型解法を用いた清水の斜面流下問題を用いた検証により、提案した緩和係数付き密度修正項と Smagorinsky 渦粘性モデルを取り入れた ISPH 法を用いれば、数値的な圧力振動が低減され流体力を一定の精度で見積もることが可能となった。従って、見積もられた流体力をそのまま構造設計へ適用し、津波によって生じる流体力を受ける防波堤などの構造物の挙動把握など、構造問題と流れ問題との連成問題の数値シミュレーションに関する検討を始めることが可能となった。ただし、土石流災害や津波災害などの異常時を対象とするには、不確実性の扱い方に加えて、広範な領域内に存在する構造物周辺の全体の流れの状況をいかに正確に想定するかが課題である。また、今回の比較対象は清水のみであったが、流体の密度、土砂などの混入物、あるいは漂流物等の衝突の影響などについては、今後、継続して検討する予定である。さらに、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の高効率化に向けた基礎的な検討の結果、まだ改良の余地は有るものの、並列効率を得られることが分かった。今後は、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したさらなる高効率化を検討していく予定である。

次に構造計算に対する BDD-DIAG 法の実装に関しては、領域間境界上における  $y_B^{(i)}$  の重ね合わせなど OpenMP 化されていない箇所の影響から、スレッド数やノード数が増加した際の並列効率が十分でない計算結果となっているが、今後に検討を予定しているマルチカラー化による重ね合わせ処理の並列化などによって、さらなる並列効率の向上が期待できる。また、計算モデルがより大規模となった場合に備えた、次元数の大きなコース問題に対する検討も必要となることが想定されるが、我々は既に、コースグリッド修正を不完全に行うアルゴリズム

を提案し、ある種の構造問題においては高い効率性が得られることを実証済みであるため、これを応用することで、高並列環境における効率的な不完全コースグリッド修正の実装方法を開発していく。

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を保ったシミュレーション、および高効率化へ向けた基礎付けが可能となり、かつ、BDD-DIAG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機アーキテクチャにおける高効率な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[6]-[7], [12], [22], [23]), 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[8], [24], [25]), 大容量データなどの効率的な取り扱いの検討([13], [14]), 津波などから生じる流体力を受けた構造物の破壊現象など流体-構造連成への拡張を睨んだ破壊現象の数理モデルの基礎的な検討(研究成果[9]-[10], [26]-[27]), 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[15]-[17])などの成果も得られている。

以上、本研究課題で得られた成果を元に、今後は粒子型解法のさらなる高効率化へ向けた並列実装の検討、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ための基礎的な数理モデルの検討、などを進めていく予定である。

## 5 研究成果リスト

### (1) 学術論文

- [1] 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, vol.58A (2012), 掲載決

定.

- [2] Aly, A.M., Asai, M. and Sonoda, Y.: Simulation of free falling rigid body into water by a stabilized incompressible SPH method, International Journal of Ocean Systems Engineering, vol.1 (2011), pp.207-222.
- [3] Aly, A.M., Asai, M. and Sonoda, Y.: Modelling of surface tension force for free surface flows in ISPH method, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, to appear.
- [4] Asai, M., Aly, A. M., Sonoda, Y., and Sakai, Y.: A stabilized incompressible SPH method by relaxing the density invariance condition, International Journal for Applied Mathematics, to appear.
- [5] Nakashima, N., Fujino, S., Tateiba, M.: The IDR-Based IPNMs for the Fast Boundary Element Analysis of Electromagnetic Wave Multiple Scattering, IEICE Transaction Electron., vol.E95-C (2012) pp.63-70.
- [6] 尾上 勇介, 藤野 清次: Multi-Restarts 型 Look-Back GMRES(k)法の提案, 日本応用数理学会論文誌, vol.21 (2011), pp.175-195.
- [7] 東慶幸, 藤野清次, 尾上勇介: Eisenstat 版 GS 型前処理付き MRTR 法の収束性について, 日本計算工学会論文集, No.20110006 (2011), published online.
- [8] Yamamoto, N., Nakao, M.-T., and Watanabe, Y.: A theorem for numerical verification on local uniqueness of solutions to fixed-point equations, Numerical Functional Analysis and Optimization, to appear.
- [9] Kimura, M. and Takaiishi, T.: Phase field models for crack propagation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, vol.59 (2011), pp.85-90.
- [10] Kimura, M. and Wakano, I.: Shape derivative of potential energy and energy release rate in fracture mechanics, Journal of Math-for- industry, vol.3 (2011), pp.21-31.
- (2) 国際会議プロシーディングス
- [11] Aly, A.M., Asai, M. and Sonoda, Y.: A study of violent water induced impact problems using ISPH method, Proceeding of 9th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp.217-224, 2011.
- [12] Onoue, Y. and Fujino, S.: Reduction of communication time for sparse matrix-vector multiplication, Proceedings of MMA2011, p.88, 2011.
- [13] Nanri, T. and Kurokawa, M.: Effect of dynamic algorithm selection of all-to-all communication on environments with unstable network speed, 2011 International Conference on High Performance Computing and Simulation, 2011.07
- [14] Morie, Y., Nanri, T., Susukita, R., and Inoue, K.: A method for predicting a penalty of contentions by considering priorities of routing among packets on direct interconnection network, in Proceedings of the International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization 2011, 2011.04
- (3) 国際会議発表
- [15] Tagami, D.: An iterative domain decomposition method of magnetostatic problems, ICIAM2011, Canada, Jul., 2011.
- [16] Tagami, D.: Numerical computations of Stokes flows with the moving boundary by an area-preserving scheme, Workshop on Reliability in Scientific Computing and Related Topics, Japan, Nov., 2011.
- [17] Tagami, D.: Efficient numerical computations on large scale electromagnetic field problems using an iterative domain decomposition method, Joint Workshop on "Multiscale Mathematics: Hierarchy of Collective Phenomena and Interrelations between Hierarchical Structures", Japan, Dec., 2011.
- [18] Ogino, M., Kawai, H., Shioya, R., Yoshimura, S.: Scalable and high performance implementation of a balancing domain decomposition method for multicore clusters, ICMR2011, South Korea, Nov., 2011.
- [19] Yoshimura, S., Kawai, H, Sugimoto, S., Murotani, K., Miyamura, T., and Ogino M.: High Performance Computation of Seismic Responce of

- Full Scale Nuclear Power Plant, ICMR2011, Korea, Nov., 2011.
- [20] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., and Yoshimura, S.: BDD Solver on Large-scale PC Clusters using Parallel Skyline Method for Coarse Grid Correction, ICMR2011, Korea, Nov., 2011.
- [21] Ogino, M., Terada, S., Sugimoto, S., and Kanayama, H.: Large-scale Magnetostatic Analysis using an Iterative Domain Decomposition Method based on the Minimal Residual Method, International Workshop on application of iterative methods to engineering and its mathematical element, Japan, Oct., 2011.
- [22] Fujino, S., Yasue, T., Nakagawa, H. and Onoue, Y.: Preconditioned linear solvers for nonsymmetric matrix which stems from earthquake response analysis of dam, ICCCM2011, Germany, Jun., 2011.
- [23] Fujino, S.: A proposal of Multi-Restarts type of Look-Back GMRES(k) methods, ILAS2011, Germany, Aug., 2011.
- [24] Watanabe, Y.: Self-validating numerical computations for functional equations based on infinite dimensional sequential iteration, Workshop on Reliability in Scientific Computing and Related Topics, Japan, Nov., 2011.
- [25] Watanabe, Y.: Computer-assisted proof for functional equations based on infinite dimensional sequential iteration, Japanese- German Workshop on Computer-Assisted Proofs and Verification Methods, Germany, Sep., 2011.
- [26] Kimura, M.: Truncation error analysis for particle methods, EASIAM2011, Japan, Jun. 2011.
- [27] Kimura, M.: Gradient flow models in elasticity — crack and dislocation dynamics, Workshop on Reliability in Scientific Computing and Related Topics, Japan, Nov., 2011.
- [28] 古田 賢司, 田上 大助, 木村 正人: 面積保存スキームを用いた移動境界問題の数値計算, 第16回計算工学講演会, 柏, May, 2011.
- [29] 田上 大助: 粘弾性流れ問題の数値計算, 第24回計算力学講演会, 岡山, Oct., 2011.
- [30] 荻野正雄, 大規模構造解析の高速化とその応用, 第1回計算力学シンポジウム, 港区, Nov., 2011.
- [31] 荻野正雄, 河合浩志, 塩谷隆二, 吉村忍: BDD法における大規模疎行列向けコースグリッド修正法, HPCS2012, 愛知, Jan., 2012.
- [32] 荻野正雄: 大規模構造解析の高速化とその応用, 第1回計算力学シンポジウム, 港区, Nov., 2011.
- [33] 荻野正雄: BDDC 法による多階層並列前処理アルゴリズム, 第24回計算力学講演会, 岡山, Oct., 2011.
- [34] 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍: 領域分割法のハイブリッド並列化のためのOpenMP ベース部分領域ソルバー, 第16回計算工学講演会, 千葉, May, 2011.
- [35] 藤野清次, 関本幹, 中島真司: 積型反復法における交代漸化式の役割再考, 情報処理学会 2011 年並列/分散/協調処理に関する鹿児島サマー・ワークショップ, 鹿児島, Jul., 2011.
- [36] 中島真司, 藤野清次, 村上啓一, 尾上勇介: IDR(s)法システムの反復法における slim dense 行列の改良, 情報処理学会 2011 年並列/分散/協調処理に関する鹿児島サマー・ワークショップ, 鹿児島, Jul., 2011.
- [37] 渡部 善隆: 逐次反復に基づく関数方程式の計算機援用証明, 日本応用数理学会 2011 年度年会, 京都, Sep., 2011.
- [38] 木村 正人: 連続版および離散版のエネルギー勾配型亀裂進展モデル, 熊本大学応用解析セミナー, 熊本, May, 2011.
- [39] 木村 正人: 亀裂進展および転位運動のエネルギー勾配流モデル, 第11回盛岡応用数学小研究集会, 盛岡, Nov., 2011.
- (4) 国内会議発表
- (5) その他(特許, プレス発表, 著書等)
- なし.