

jh160048-NAJ

自然災害予測に資する流体・固体連成解析の V&V

浅井 光輝（九州大学）

災害大国である我が国においては、防災・減災を目的とした対策事業が幅広く展開されているが、それでもなお毎年のように災害の被害は繰り返されている。そのため、様々な物理現象が複合的に連成し、時間・空間スケールも大規模になる自然災害予測シミュレーションを合理的に取り扱う解析手法の確立が求められている。自然災害のシミュレーションに対して、大規模計算資源を活用することによって数値解析の検証・妥当性の確認を実施したうえで、信頼性の高い解析技術の基盤を構築し、これまでにない詳細かつ高精度な自然災害予測シミュレータの構築を目指す。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

参加研究者

浅井 光輝	(九州大学：代表者)
牛島 省	(京都大学)
鳥生 大祐	(京都大学)
柳生 大輔	(京都大学)
樫山 和男	(中央大学)
松本 純一	(産業技術総合研究所)
寺田 賢二郎	(東北大学)
森口 周二	(東北大学)
高瀬 慎介	(東北大学)

2. 研究の目的と意義

(研究の目的)

災害大国である我が国においては、防災・減災を目的とした対策事業が幅広く展開されているが、それでもなお毎年のように災害の被害は繰り返されている。これらの災害の被害を効率的に抑制するためには、想定する災害に対して信頼性の高い被害予測を行うこと

が極めて重要な課題である。そのアプローチの1つとして、数値シミュレーションを用いた被害予測手法が注目されており、様々な物理現象が複合的に連成し、時間・空間スケールも大規模になる自然災害予測シミュレーションを合理的に取り扱う解析手法の確立が求められている。

本研究では、必然的に現象が複雑となり、時間・空間スケールが大規模となる自然災害のシミュレーションに対して、大規模計算資源を活用することによって数値解析の検証・妥当性確認を実施したうえで、これまでにないより詳細かつ正確な災害予測と評価に資する数値解析手法の基盤を構築することを目的とする。これまで、上記の目的のために様々な手法や枠組みが提案されているが、対象とする時間・空間スケールの規模の大きさから自然災害を直接模擬した室内実験は非現実的であり、また同時に固体と流体の連成現象でありかつ固体の接触や摩擦等を含む複合現象となるため、数値解析手法の検証・妥当性確認の手順が明確化されていない。

そこで土木学会の分野横断的な計算力学研究者が中心になり、地盤(粒状体)・構造(固体)・水理(流体)など、複数の分野の研究者でグループを形成し、まずは①流体・構造連成解析の検証のためのベンチマーク問題を設定し、参加メンバーが所有する各種計算手法による

結果と実験との比較検証を通して精度検証 (Verification) を実施するとともに、計算手法の特徴を整理する。次に、②実際の災害を数ケースとりあげ、同一の問題を各種計算手法で解析し、各解析結果を相互比較することで実スケール問題での妥当性確認 (Validation) を行う。上記の 2 つの手順により、信頼性の高い解析技術の基盤を構築し、これまでにない詳細かつ高精度な自然災害予測シミュレータの構築を目指す。

(研究の意義)

本研究により、人的・物的災害を引き起こす自然災害現象を、各種の力学現象の連成問題として定式化し、大規模な計算資源を活用することによって、従来不可能であった詳細かつ正確な災害予測を行うことができれば、被災規模を適切に把握し、災害対策を事前に提案することが可能となる。このような意味で、本研究の社会的な意義は極めて大きい。

また数値シミュレーションによる予測を実務 (防災・減災計画等) に活用するには、事前に解析手法の Verification (検証) & Validation (妥当性確認) を入念に実施する必要がある。このためにも当拠点公募型研究を通じて分野横断的な計算力学研究者で連携することで、複雑現象に関するベンチマーク問題を設定し、まずは解析手法の精度を担保しつつ、実験ができない実スケールでの問題については各種解析結果を相互比較することで妥当性確認する。以上の内容は単独の研究者では実施が不可能であり、当拠点公募型研究による研究者間での連携が重要となる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

これまでの土木工学の分野における自然災害予測シミュレーションでは、構造、流体、地盤の各専門分野において独立に研究が進められ、個々の分野で求められる精度や限定された物理の範囲内で議論が展開されてきた。しかし、本研究で対象とする時間・空間

スケールの大規模自然災害は、様々な物理が重なり合う複合現象であるため、各専門分野内で完結する問題ではない。そのため、研究を遂行する上で、専門分野間の横断的な協力が不可欠になる。(参加者らはそれぞれ、構造、流体、地盤の専門家が含まれている。)

上記に加えて、計算力学では、力学法則に基づいて複雑な現象の素過程を可能な限り忠実に扱うため、導出された基礎方程式系の計算負荷は一般に膨大なものとなり、大規模計算資源を有効に活用することが研究遂行のキーポイントとなる。このような理由から、本研究を推進するには、当拠点公募型研究で設定されている構成拠点の計算機科学者との協調的・相補的な研究体制が必要である。さらに、本研究で実施する計画の成果が得られれば、高性能な計算機アーキテクチャおよび大規模・高速計算技術の社会的な有用性を示すことができるため、計算機科学者にとっても意義があると考えられる。計算力学分野の研究者と構成拠点の計算機科学者が連携する体制に基づく本研究により、上記の展開が実現し、将来にわたり双方の協力がより緊密に維持されると期待される。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

当拠点公募型研究については、平成 21 年度後期の試行段階から、土木学会の分野横断的な複数の計算力学研究者と構成拠点の計算機科学者の協調的な体制のもとで、平成 27 年度まで継続的に共同研究を展開している。申請課題名等は研究の進展とともに変遷しているが、いずれも「計算力学」をキーワードとして、順調に発展的な成果が得られている。

平成 27 年度においては、学術論文 7 件、国際会議 4 件、国内会議発表 8 件の研究成果を公開している。平成 27 年度は、様々な物理現象が複合的に連成し、時間・空間スケールも大規模になる自然災害予測シミュレーションを合理的に取り扱う解析手法の確立、災害

被害の予測精度の向上のため、津波による複合災害現象、雪崩災害に焦点を絞り、広範囲の自由水面流れを取り扱える平面 2 次元の浅水長波方程式と、局所的に詳細な計算が行える 3 次元の粒子法との連成解析手法を提案し、その高速化を行ってきた。また、津波漂流物輸送に着眼し、流体・固体間の力学連成を考慮できる並列解析手法を構築し、四面体要素で表現される多数の任意形状の物体運動を取り扱う連成手法の並列化を行った。流体・構造連成解析技術はすべて、京都大学の CRAY XE6 において、4096 コア程度までの環境であれば、並列化効率がスケールすることを実証済みのコードである

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 橋梁に対する津波作用力のベンチマーク問題(浅井, 寺田, 森口, 高瀬)

橋梁に対する津波作用力に対する数値実験との比較を通して、同問題により粒子法 (SPH 法) と有限要素法の両者の妥当性確認を行った。実験の概要図を図-1, 図-2 に示す。また、橋梁模型には、図-3, 図-4 に示す直橋模型と斜橋模型の 2 つについて解析を行った。粒子法はすべてを 5 mm 間隔の粒子で離散化することで、総粒子数は約 250 万の解析モデルを使用した。有限要素法では、両解析モデルとも総要素数が 2600 万前後になっており、橋梁模型付近は 2mm のメッシュサイズになっている。粒子法では、壁境界はすべり境界としており、有限要素法ではゲート、橋梁模型部分は non-slip 条件、その他の壁面は slip 条件により解析した。

図-5 には粒子法による解析結果例として、圧力がピークを迎えた時間近傍での圧力コンター図を示す。また図-6 には、有限要素解析結果例として、それぞれ直橋時の橋梁付近の自由表面形状を示す。また、両手法により 2 つの橋梁模型にかかる抗力・揚力の結果をまとめて図に示す。図-7 には直橋の結果を、図-9 には斜橋時の結果をそれぞれ示す。以上

の比較より、両手法とも、抗力のピーク値はほぼ実験値と同程度の値を評価できているが、揚力の下方向の力が実験値より両ケースとも過大評価していた。これは、図-5 に示す通り計算結果は橋梁模型下部に剥離が生じているが、実験ではここまでの剥離は観測されなかった。また実験では、ロードセルを支点とした片持ち梁となっていたため、実験では模型自体が振動してしまった。このため、特に斜橋時の抗力の計測も振動していることが確認できる。

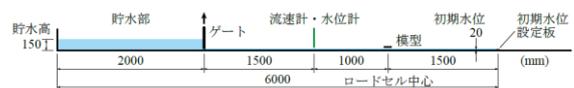


図-1：解析領域の寸法

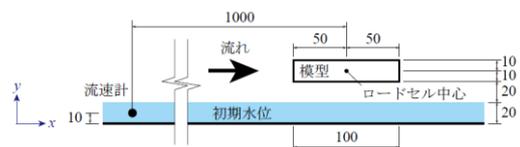


図-2：橋梁模型付近の拡大図

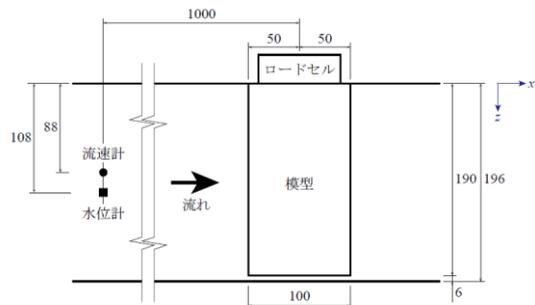


図-3：直橋模型を設置した平面図

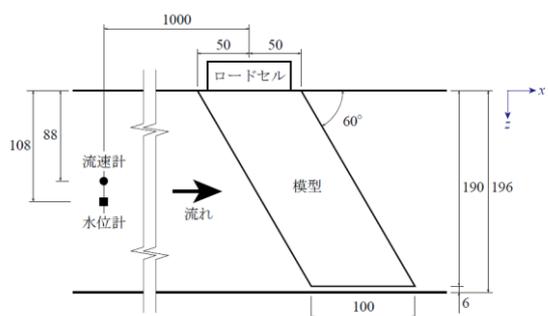


図-4：斜橋模型を設置した平面図

実験



解析

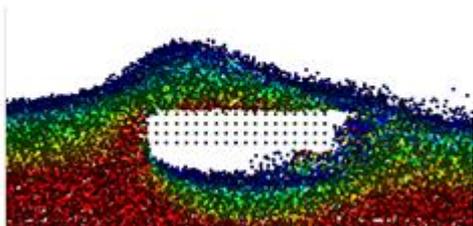
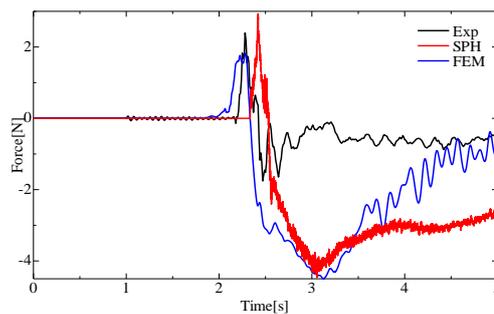
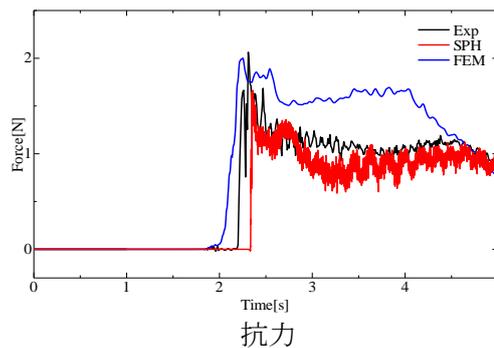
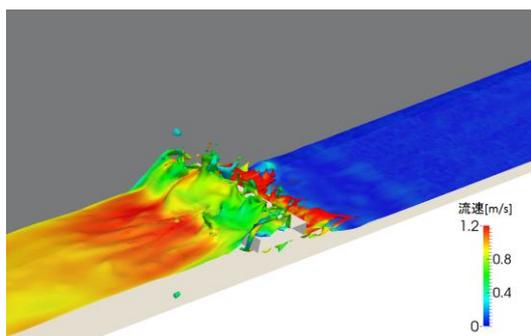


図-5：2.9 秒後の実験と解析の比較 (SPH)

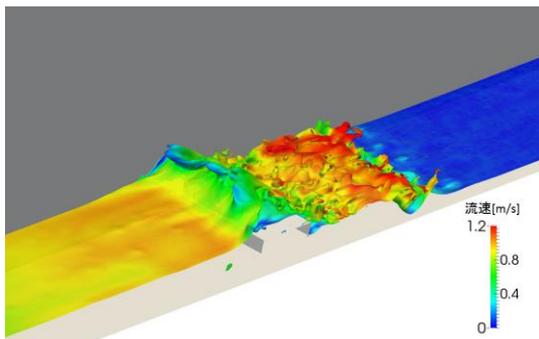


揚力

図-7：各手法における直橋モデルの各方向に作用する力の時刻歴図

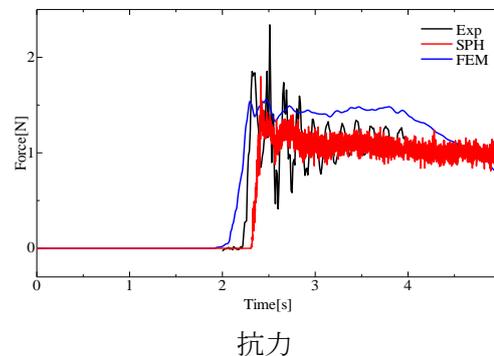


2.3 秒後

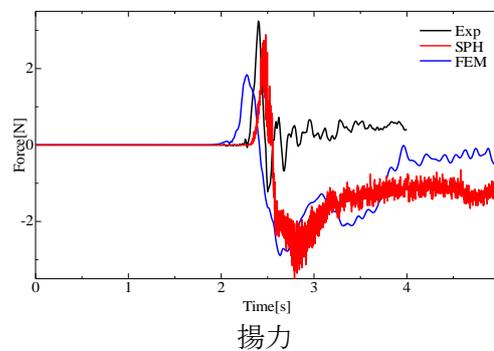


2.5 秒後

図-6：直橋モデルにおける自由表面形状 (FEM)



抵抗力



揚力

図-8：斜橋モデルにおける各方向に作用する力の時刻歴図 (粒子法)

(2) 複数固体（漂流物）と流体の連成（牛島，鳥生，柳生）

3次元固気液多相場の解法 MICS¹⁾を用いて、156 個の津波漂流物が沿岸市街地内を輸送される大規模数値実験を行った。

計算領域の寸法を図-9 に示す。図-9 に示される Inlet Area には、鉛直方向上向きの流入速度が $4.8 \times 10^{-3} \text{m/s}$ となるように設定した。漂流物の初期配置については、合計 156 個の漂流物を図-10 に示されるように配置した。また、図-10 に示されるように、本研究において沿岸市街地の表面は三角形要素の集合体として表現される。この沿岸市街地の設定は、京都大学防災研究所が所有する CAD データを数値的に加工して設定し、そのスケールは 250 分の 1 である。

漂流物は図-11 に示すように直方体であり、各辺の長さはそれぞれ $d_{f1} = d_{f2} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ [m]}$ 、 $d_{f3} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ である。本研究の数値解法では、各直方体は、合計 134 個の四面体要素で表現される。漂流物の回転運動に利用される慣性テンソルなど、漂流物の物理特性量は、これらの四面体要素を利用して算定される。一方、漂流物間、または漂流物と市街地建物や地面との衝突を考慮するために、図-12 に示されるように複数の衝突判定球を各漂流物に配置した。衝突判定球は、漂流物間の接触、あるいは漂流物と市街地建物や地面などの境界面との接触を扱う場合にのみ用いられる。漂流物の密度は 600kg/m^3 とした。漂流物は海上コンテナを想定しており、密度はコンテナの最大積載荷重から算出した。また、漂流物、台座、構造物間の静止および動摩擦係数は 0.60 とした。

計算格子数は各方向に対し、 $345 \times 231 \times 64$ とした。なお、計算格子の各方向の長さは $4.9 \times 4.9 \times 5.9 \text{mm}$ である。並列計算では 3次元の領域を各方向に $15 \times 11 \times 2$ に分割、並列数を 330 とし、時間増分 Δt は $1.5 \times 10^{-4} \text{s}$ とした。なお、 $t = 24.0 \text{s}$ までに要した計算時間は

約 59 時間であった。図-13 に各時刻における計算結果を示す。図-13 に示されるように、市街地内部への水の流入に伴い、配置した 156 個の漂流物が、冠水した主要道路を輸送経路として、市街地模型の間を輸送されていく状況が計算された。

また、図-14 に、 $t = 24.0 \text{s}$ における構造物周辺での漂流物の輸送状況を示す。図-14 より、各漂流物が接触し、姿勢を様々に変えながら構造物間を輸送されていく状況が 3次元的に計算されていることが分かる。

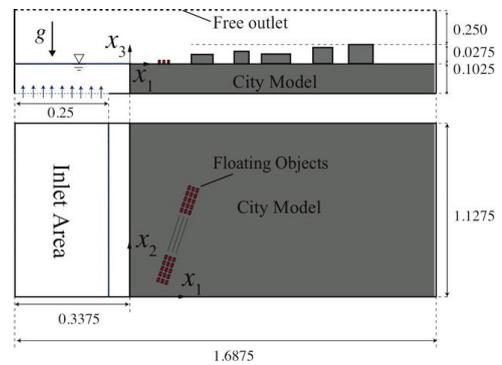


図-9：計算領域の寸法(単位：[m])



図-10：津波漂流物の初期配置

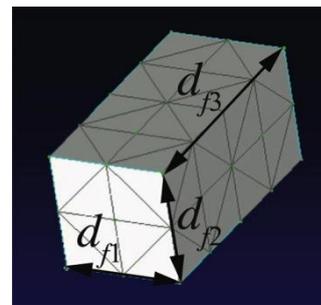


図-11：四面体要素で表現された漂流物モデル（四面体要素数：134）

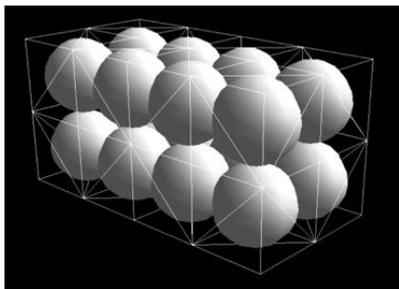


図-12：漂流物モデルに配置された衝突判定球（衝突判定球数：16）

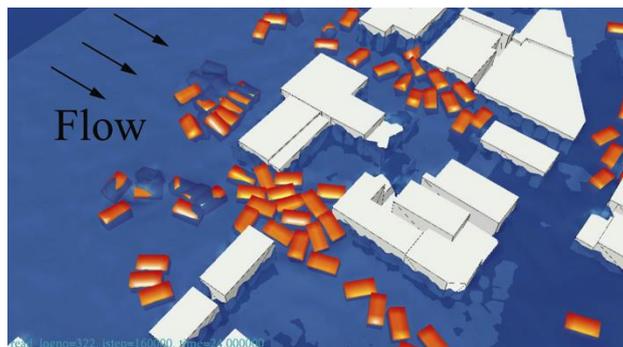
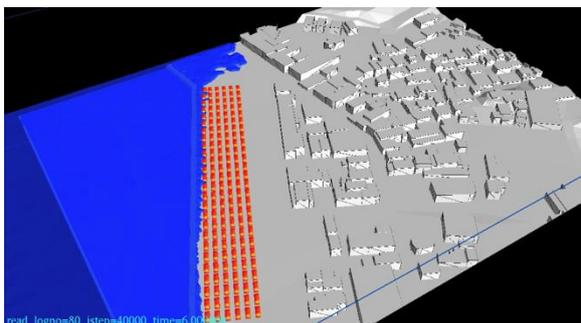
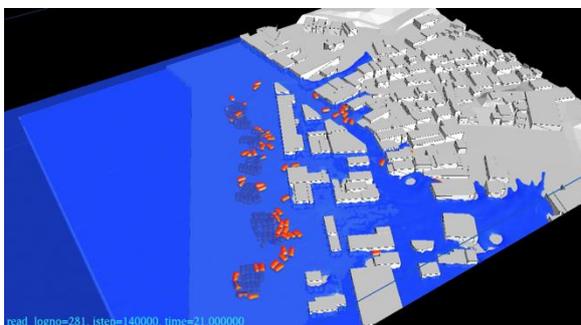


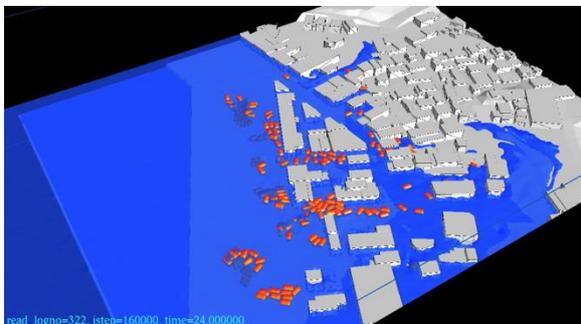
図-14：構造物周辺における漂流物の輸送状況 ($t = 24.0s$)



(a) $t = 6.0s$



(b) $t = 21.0s$



(c) $t = 24.0s$

図-13：各時刻における計算結果

(3) 2次元・3次元ハイブリッド津波解析（榎山，松本）

安定化有限要素法に基づくオーバーラッピング手法を用いた 2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法により，障害物を有する段波問題の解析を行った。

図-15 に解析モデルを示す．図中，緑の枠で囲まれた領域を 2次元解析領域とし，青の枠内は 3次元解析領域とする．青の線は波が 3次元解析領域に到達したか否かを感知する位置を表し，到達を感知したら緑の線の内部の 2次元要素を取り除き 2次元・3次元ハイブリッド津波解析を開始する．また，青の枠と内部の緑の枠の間はオーバーラップ領域である．解析メッシュは非構造格子を用い，2次元解析領域の最大メッシュ幅は 0.1m，3次元の最大メッシュ幅は 0.05m とする．時間増分量は 0.001s を用いている．

図-16 に段波が設置した 3次元領域に到達前後の解析結果を示す．2次元領域と 3次元領域の間で波が安定に伝播している様子が再現できた．これにより，今後，大規模な実地形解析に適用した場合には効率化の効果は期待できると考えられる．

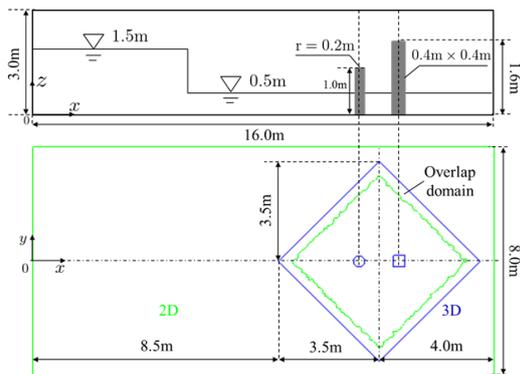
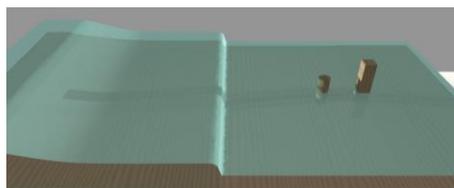
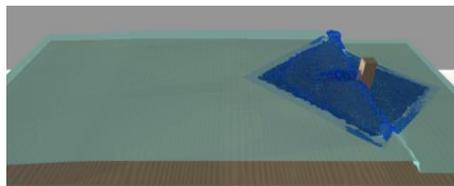


図-15 解析モデル



(a) 波が 3 次元解析領域に到達前(0. 8s)



(b) 波が 3 次元解析領域に到達後(2. 25s)

図-16 解析結果

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(1) 橋梁に対する津波作用力のベンチマーク問題

基本となるベンチマークとして本研究は位置づけており、同じ実験例題を通して、粒子法(SPH法)と有限要素法の精度確認を行った。角部の境界のモデル化誤差に伴い剥離現象が実験とは異なっていたが、それ以外は両手法とも実験とほぼ同等の結果を得ることができた。

(2) 複数固体(漂流物)と流体の連成

平成 28 年度前期の利用では、3次元固気液多相場の解法 MICS を用いて 156 個の津波漂流物が沿岸市街地内に流入する大規模数値実験を行った。その結果、冠水した主要道路を輸送経路として、多数の漂流物が市街地模型間を輸送されていく状況が 3 次元的に計算された。

(3) 2次元・3次元ハイブリッド津波解析

去年度と比べ、2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法は構造格子に適用から任意格子に対応できるようになり、その汎用性を向上できた。また、計算の初期は2次元解析で全体領域の解析を行い、波が3次元領域に到達してからハイブリッド解析を行うアルゴリズムを導入したことで、効率的な解析が可能となった。今後は実地形津波を解析する予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. 凌国明, 松本純一, 樫山和男: 任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた 2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学) 特集号, (doi:10.2208/jscejam.72.I_285), 2016年(査読有)
2. Masaharu Isshiki, Mitsuteru Asai, Shimon Eguchi, Hideyuki O-tani 「3D tsunami run-up simulation and visualization using particle method with GIS-based geography model」, Journal of Earthquake and Tsunami, (doi:10.1142/S1793431116400200), 2016年8月(査読有)
3. Mitsuteru Asai, Yoshiya Miyagawa, Nuralization using particle method with GIS-b 「Coupled tsunami simulation based on a 2D shallow water equation based finite difference method and 3D incompressible smoothed particle hydrodynamics」, Journal of Earthquake and Tsunami, (doi: 10.1142/S1793431116400194), 2016年9月(査読有)
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
4. D. Yagyu, S. Ushijima, D. Toriu and H. Itada: Parallel computation method for many floating objects and static structures, IAHR-APD 2016, Colombo, Sri Lanka, 2016.8.
5. D. Toriu, D. Yagyu, K. Maruyama, K. Aoki, H. Itada and S. Ushijima: Parallel computations for

- fluid-structure interaction problems in civil engineering using multiphase modeling, JSST2016, Kyoto, Japan, 2016.10.
6. Guoming Ling, Junichi Matsumoto, Kazuo Kashiwama: A 2D-3D TSUNAMI HYBRID MODEL USING OVERLAPPING METHOD BASED ON THE STABILIZED FEM, ECCOMAS Congress 2016, MS 413-2, ID7912, Crete Island, Greece, 2016.6.
 7. Junichi Matsumoto, Guoming Ling, Hiroki Hanazawa, Kazuo Kashiwama: FINITE ELEMENT PARALLEL COMPUTING FOR A COUPLING METHOD OF 2D SHALLOW WATER FLOW AND 3D GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW, ECCOMAS Congress 2016, MS 413-2, ID11071, Crete Island, Greece, 2016.6.
 8. Junichi Matsumoto, Guoming Ling, Hiroki Hanazawa, Kazuo Kashiwama: Large Scale Interaction Analysis using Stabilized MINI Element of 2D Shallow Water Flow and 3D Gas-Liquid Two-Phase Flow, WCCM XII&APCOM VI, MS102, Paper No.151788, Seoul, Korea, 2016.7.
 9. Y. Yamaguchi, S. Takase, S. Moriguchi and K. Terada: Simulations of snow avalanches using 3-D stabilized finite element method, WCCM XII&APCOM VI, Seoul, Korea, 2016.7.
- (4) 国内会議発表
10. 浅井光輝【招待講演】「安定化非圧縮性 SPH 法の精度検証と妥当性確認」日本応用数学会 2016 年度年会, 2016 年 9 月, 北九州
 11. 浅井光輝【招待講演】「マルチスケール粒子法による構造物に作用する流体力評価」日本原子力学会 2016 年秋の大会, 2016 年 9 月, 久留米
 12. 浅井光輝【基調講演】「粒子法による流体解析の現状と津波防災への応用」対津波設計のベンチマークテストに関するシンポジウム, 2016 年 8 月, 東京
 13. 井唯博史, 牛島省, 鳥生大祐, 柳生大輔: 沿岸市街地モデル内を輸送される津波漂流物の水理実験に対する並列数値解法の適用性: 第 19 回応用力学シンポジウム, 100062 (ポスター), 2016 年 5 月, 北海道
 14. 凌国明, 松本純一, 樫山和男: 任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法, 第 19 回応用力学シンポジウム, 100102, 2016 年 5 月, 北海道
 15. 凌国明, 松本純一, 樫山和男: 任意格子を用いた 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析モデルの構築, 第 21 回計算工学講演会, 0S3-2, C-6-1, 2016 年 6 月, 新潟
 16. 凌国明, 樫山和男: Discontinuous Galerkin 法による浅水長波流れ解析に関する検討, 平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, II-097, 2016 年 9 月, 仙台
 17. 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎: 安定化有限要素法による雪崩の流動解析, 第 21 回計算工学会, 0S3-1, C-5-4, 2016 年 6 月, 新潟
 18. 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎: 微地形情報を考慮した安定化有限要素法による雪崩解析, 平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, CS8-028, 2016 年 9 月, 仙台
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)
- 謝辞:** 本研究では, 京都大学防災研究所の平石哲也教授, 森信人准教授, および関西大学環境都市工学部の安田誠宏准教授よりご提供いただいた沿岸市街地の CAD データを数値的に加工し, 人工都市モデルを設定して計算を行いました. 快くデータをご提供いただいた上記お三方に厚く御礼申し上げます.
- 参考文献:**
- 1) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集B, Vol. 64/II, pp.128-138, 2008.