

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360235

研究課題名（和文） 数値波動水槽を機軸とした沿岸域波浪災害の定量的減災シナリオの構築

研究課題名（英文） Development of numerical wave flume for a resilient design of coastal structures against violent waves

研究代表者

後藤 仁志（GOTOH HITOSHI）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40243068

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の自由表面流解析手法を導入可能な新しい耐波設計手段としての『数値波動水槽』を構築した。数値波動水槽を用いてベンチマークテストを実施することで、各計算手法の特性について把握するとともに、GPU 並列計算機を導入して計算時間の短縮化を図った。さらに、東日本大震災で実際に発生した津波被害について数値波動水槽を用いて被災過程を再現し、数値波動水槽の耐波設計への適用性について検討を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, 'Numerical Wave Flume' for a resilient design of coastal structures against violent waves was constructed by introducing free-surface flow models, including particle method. The characteristic of numerical models were investigated by 4 types of benchmark tests. And GPGPU computing was introduced to make calculation as fast as possible. One of the tsunami disasters in the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake was simulated by 'Numerical Wave Flume' to examine its applicability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
22 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
23 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：数値波動水槽・海岸構造物の耐波設計・漂砂力学・侵食減災・自由表面流解析・GPU 並列計算

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴う海面上昇は、防波堤・防潮堤等の海岸防災施設の機能を相対的に低下させ、沿岸災害の被害ポテンシャルを増大させる要因である。海面上昇が顕在化すると既存の海岸構造物の計画・設計の前提となっている設計潮位自体を変更し、既存の構造物の耐波・越波特性を再検討する必要が生じる。この問題に対する対応は緊急性を有するも

のであり、既存の構造物設計法の延長線上で緊急対応策を早期に講じる必要があることは言うまでもないが、中・長期的な観点からは、耐用年数を過ぎた構造物の改築時に海面上昇や巨大台風、巨大津波の外力に対して有効な耐力を有する構造物の様式を適正に決定する必要がある。過大設計を避けて、安全な構造物を建設費用を抑制しつつ構築するには、既存の設計法に加えて、巨大台風、巨

大津波の極值的波浪外力に対する構造物の耐力を合理的に推定できる手法の開発が不可欠と言える。その基本となるのが、極值的波浪の外力推定のための波・流れ場の解析である。

既存の設計法が、多くの水理実験の結果に基づいて提案された設計公式（実験公式）を基礎として構築されているのに対して、既往の水理実験で対象とした条件よりさらに過酷な極值的波浪に対しても検討を要する事態に対応するには、水理実験の追加だけでは充分ではない。海面上昇シナリオのバリエーションに見られるように、多岐にわたる予測シナリオの全てをカバーする水理実験を行うことは現実的には不可能であり、適切な代替手段が不可欠である。このための具体的な手段として有力視されるのが、自由表面を有する流体運動を直接的に解析する計算方法の導入である。越波の飛沫の追跡や浮体を伴う砕波・遡上の追跡なども可能な手法が近年活発に開発されており、極值的波浪来襲時の海岸構造物近傍の波・流れ場の解析が詳細に行えるようになってきた。

本研究では、自由表面流解析コードの先端的開発に従事する海岸工学関連の研究者が連携して、極值的波浪来襲時の海岸構造物近傍の波・流れ場の解析を効率的に実施するための基幹ツールである『数値波動水槽』の開発を推進することを目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新しい耐波設計手段としての『数値波動水槽』の提案である。本研究では、数値波動水槽に基づく海岸構造物の耐波設計法の再構築と数値波動水槽による漂砂力学および侵食減災シナリオの構築を具体的な課題として掲げ、VOF法、CIP法（セミラグランジュ法を含む）、粒子法（MPS法、SPH法）を計算エンジンとした『数値波動水槽』を比較検討し、極值的波浪来襲時の海岸構造物近傍の波・流れ場の解析を効率的に実施するための基幹ツールの開発を推進する。

また、平成22年度末に発生した東北地方太平洋沖地震の際においては、多数の海岸構造物の津波に対する脆弱性が明らかとなり、現在、被災した構造物の再建や被災地域外の構造物の設計条件の照査および改修の実施が全国的に行われ、『数値波動水槽』の実務への貢献が急務である。そこで津波災害の具体的な被災事例について、大規模津波を対象とした計算を実施した。

3. 研究の方法

(1) 『数値波動水槽』の計算エンジンとなる各計算手法において、特性を詳細に把握し、実務上の要求と計算技術面での対応の可能性に関して検討を行い、状況に応じて個別に

改良を行った（本報告では主として、研究代表者が実施した粒子法に関する検討に関して述べる）。

(2) 並列計算機（GPU 計算機）を購入して計算環境を整備し、計算エンジンを並列計算機に対応させるためのコード開発を行い、システムの動作試験や性能確認計算を実施した。

(3) 土木学会・海岸工学委員会では、『数値波動水槽』を新しい海岸構造物設計の機軸として位置付け、学会がイニシアティブをとってこの種の研究活動を推進する目的で、数値波動水槽研究小委員会が設置されたが、本研究の連携研究者の大部分が同委員会のコアメンバーである。この小委員会と連携して『数値波動水槽』の基礎理論と実務応用の現状に関して詳細なレビュー活動を実施して報告書にまとめ、書籍として出版した（本報告書作成時点では、書籍は印刷中）。

(4) 東北地方太平洋沖地震の津波災害において、混成防波堤では、ケーソンの滑動・転倒被害が数多く報告されたが、この被害の原因として、防波堤を挟んで港湾内外に発生した大きな水位差によってケーソンに作用した通常を大きく上回るレベルの流体力と、その水位差の存在を原因とする落下流による防波堤マウンドの洗掘に起因する支持力低下が挙げられている。このような現象は『数値波動水槽』を生かす格好の対象である。そこで、本研究で開発した数値モデルを用いて、現象の再現計算を試みた。

4. 研究成果

(1) 並列計算機の性能確認計算

『数値波動水槽』の計算エンジンの一つである MPS 法を用いて、並列計算機の性能確認計算を実施した。図-1および図-2に示すような2次元ダム崩壊流れ計算において、従来の計算コード（図中の only CPU）と GPU 並列計算コード（図中の GPU+CPU）の計算速度を比較した。

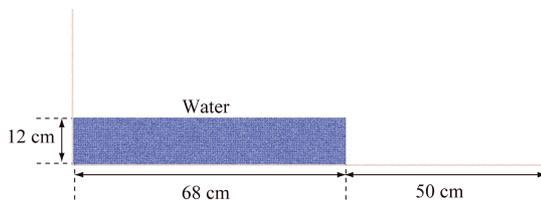


図-1 2次元ダム崩壊流れ計算（初期配置）

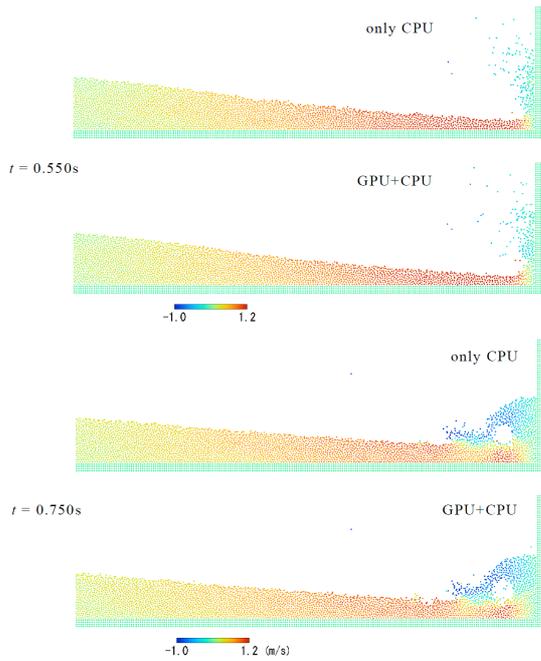


図-2 2次元ダム崩壊流れ計算（瞬間像の一例）

図-2の色の濃淡はx方向速度レベルを示す。両者の瞬間像を比較すると、目視可能なレベルの相違はわずかであり、大略的には、水面形状および流速分布は、同一の結果となった。

図-3に、1計算ステップあたりの計算時間の内訳を示す。only CPUでもGPU+CPUでも、計算時間の大部分を反復計算が占めていることが確認できる。図-4に、only CPUに対するGPU+CPUの加速率を示す。加速率も、全体の計算時間だけでなく、計算過程の内訳ごとにも示している。粒子数が多くなるほど加速率は上がり、計算時間全体としては最大で概ね7倍程度である。MPS法では、圧力のPoisson方程式から導かれる連立一次方程式を陰解法による反復計算を行って解くが、その過程の一つである行列の生成(matrix)や前処理計算(scaling)は比較的並列計算に適合しやすいので、加速率は10倍以上となった。

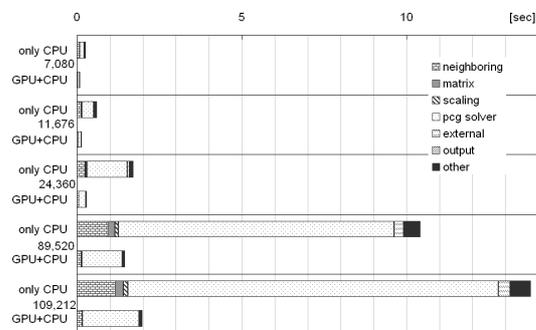


図-3 1計算ステップあたりの計算時間の内訳

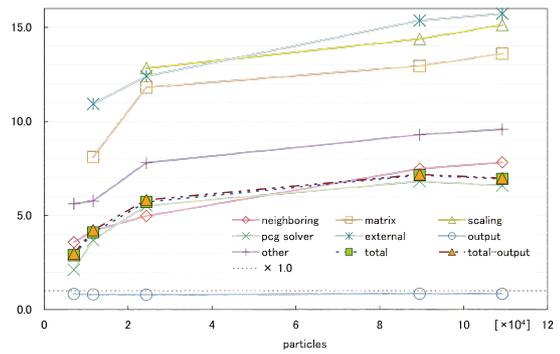


図-4 粒子数に伴う加速率の変化

(2) ベンチマークテスト

本研究で実施したベンチマークテストは以下の4種類である。1) Dam-break on a wet bed, 2) 3D dam-break and impact, 3) Violent sloshing flow, 4) Splashing droplet. 各計算エンジンを用いてこれらのテストを行い、既往の水理実験結果との比較を通して、それぞれの特性を把握した。以下に、テスト結果の一例（粒子法による Splashing droplet の解析）を示す。

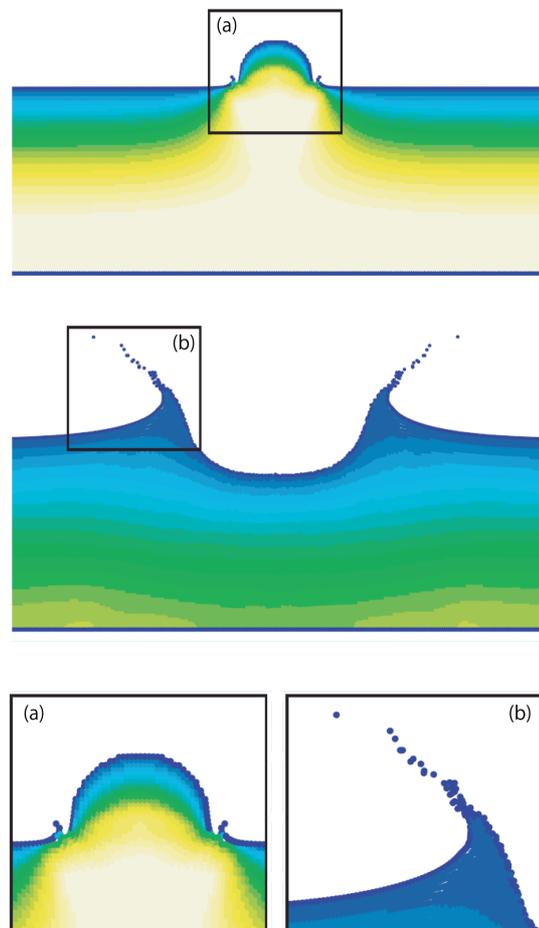


図-5 Splashing droplet (MPS法)

(3) 『数値波動水槽』の海洋構造物の津波被災事例解析への適用

東日本大震災における防波堤の津波被害の一つとして、ケーソンのマウンドからの滑落がある。被災の様子を撮影した映像等の解析から、これは、ケーソン天端を乗り越えた越流水がケーソン背後のマウンドあるいは海底地盤を浸食したことによる支持力および滑動抵抗力の低下から発生したものであるとの推測が示されている。このような複雑な被災過程に対して、従来の解析手法で被害予測を行うことは非常に困難である。しかし、本研究で開発した『数値波動水槽』であれば、複雑な水面変動や地盤変形も時間発展的に追跡できるので、この種の現象は『数値波動水槽』を生かす格好の材料である。

図-6に、本計算で用いた防波堤モデルを示す。本計算では、MPS法を用いた鉛直2次元計算を実施した。ケーソンおよび港内側（上図右側）の被覆ブロック（黒色）は剛体として運動させ、被覆ブロックとマウンド（DEM粒子・濃い茶色）では流体（青色）を透過させた。消波ブロックおよび港外側（上図左側）の被覆ブロック（淡い灰色）も流体を透過させたが、簡単のため、これらは流体力により移動しないものと仮定して座標を固定した。港外側の水位を徐々に上昇させることによって津波の来襲を模擬し、港内側へ越流させた。港内側水位は、引き波時を想定して、水位を下げた。海底地盤（淡い茶色）は、固定壁であるが、地表面近傍の流速に基づいて流砂量を算出し、それに合わせて固定壁の位置を下げて浸食を表現した。

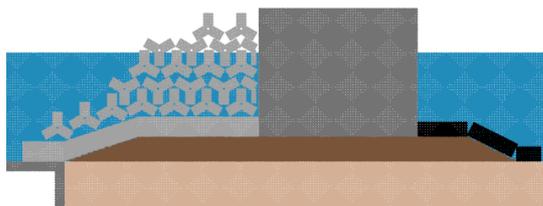


図-6 ケーソン防波堤モデル

図-7に、計算結果の瞬間像の一例を示す。津波越流水がケーソン防波堤背後の海底地盤を叩き、洗掘孔が発生した。洗掘孔の幅が大きくなり、防波堤側へと広がってくるにつれて港内側の被覆ブロックが洗掘孔内へ次々と転落する様子が模擬された。さらに、マウンド材も洗掘孔へ滑落し、徐々にケーソンも港内側へ移動した。そして最終的には、ケーソンの滑落が発生した。

以上のように、ケーソン防波堤被災の解析への数値波動水槽の適用性の一端が示されたが、本計算ではケーソン基礎部の地盤内応力を計算対象としていないため、ケーソン基

礎部の地盤の変形が計算されていない。現実には洗掘孔の発達に伴ってケーソン基礎部地盤の側方流動が生じ、これがケーソンの滑落を早めたことも危惧されるが、本計算ではこの点を考慮できていない。

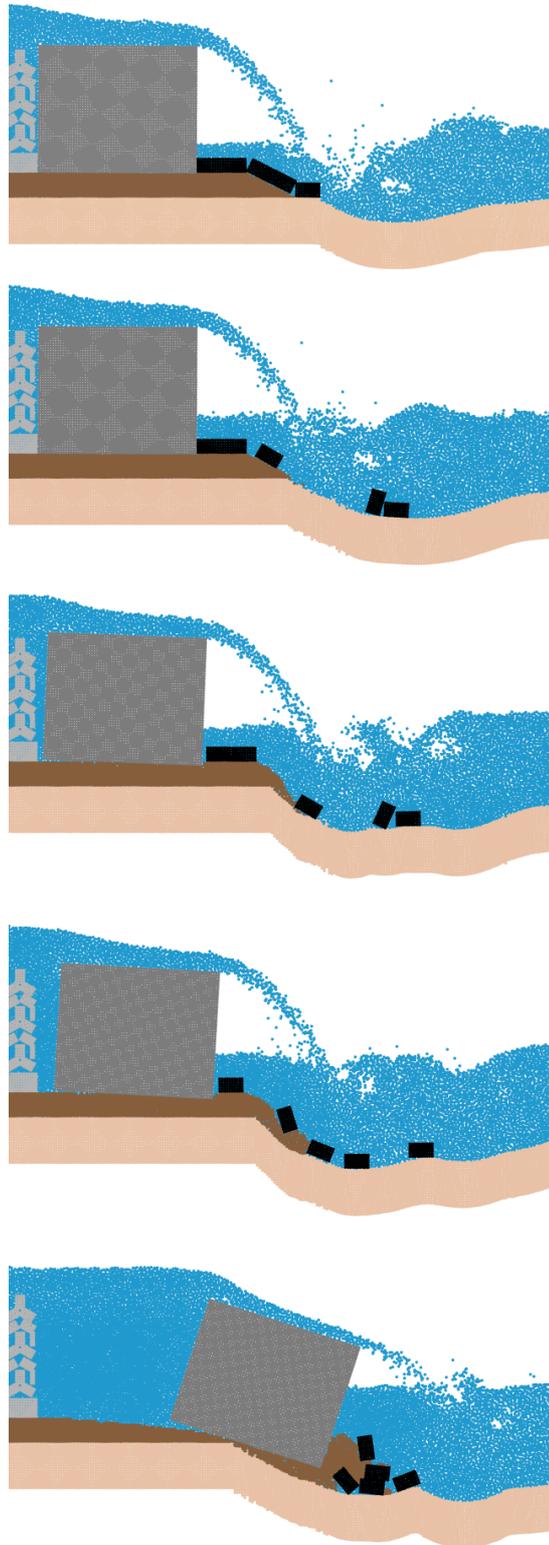


図-7 津波越流によるケーソン防波堤の崩壊過程

今後は、ケーソン基礎部地盤には粘弾塑性モデルを導入した粒子法計算を導入し、これを本解析とハイブリッド化するなど、さらなるモデルの改良が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① C. Hori, H. Gotoh, H. Ikari and A. Khayyer, GPU-acceleration for Moving Particle Semi-implicit method, Computer and Fluids, Vol.51(1), pp.174-183, 2011 (査読有) <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.08.004>
- ② 五十里洋行・後藤仁志・吉年英文, ケーソン式混成堤の大変形解析のための改良型弾塑性 MPS 法の基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, p p.731-735, 2011, (査読有) https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/67/2/67_2_I_731/_pdf
- ③ A. Khayyer, H. Gotoh and H. Ikari, Refined simulations of violent sloshing flows by an enganced particle method, Proc. of Coastal Engineering, Vol.2, pp.6-10, 2011 (査読有)
- ④ A. Khayyer, and H. Gotoh, On particle-based simulation of a dam break over a wet bed, Jour. Hydraulic Res., IAHR, Vol 48(2), pp. 238-249, 2010 (査読有) <http://dx.doi.org/10.1080/00221681003726361>
- ⑤ 後藤仁志・堀智恵実・五十里洋行・Khayyer Abbas, GPU による粒子法半陰解法アルゴリズムの高速化, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.217-222, 2010, (査読有) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejb/66/2/66_2_217/_pdf
- ⑥ 堀智恵実・後藤仁志・五十里洋行・Khayyer Abbas, 数値波動水槽のための 3D-MPS 法の GPU による高速化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.56-60, 2010 (査読有) https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/66/1/66_1_56/_pdf

[学会発表] (計 6 件)

- ① 五十里洋行, ケーソン式混成堤の大変形解析のための改良型弾塑性 MPS 法の基礎的検討, 第 58 回海岸工学講演会, 2011 年 11 月, 盛岡市.
- ② Khayyer Abbas, Refined simulations of violent sloshing flows by an enganced

particle method, 第 58 回海岸工学講演会, 2011 年 11 月, 盛岡市.

- ③ 堀智恵実, 数値波動水槽のための 3D-MPS 法の GPU による高速化, 第 57 回海岸工学講演会, 2010 年 11 月, 京都市.

[図書] (計 1 件)

- ① 土木学会海岸工学委員会数値波動水槽研究小委員会 (後藤仁志, 岡安章夫, 渡部靖憲, 川崎浩司, 平石哲也, 重松孝昌, 陸田秀実, 森信人, 原田英治, 平山克也, 五十里洋行他), 土木学会, 数値波動水槽一砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して一, 2012, p.228 (印刷中)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

粒子法ベンチマークテストの HP : <http://particle.kuciv.kyoto-u.ac.jp/eresearches-pmb.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 仁志 (GOTOH HITOSHI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40243068

(2) 研究分担者

岡安 章夫 (OKAYASU AKIO)
東京海洋大学・海洋学部・教授
研究者番号: 20213994
平石 哲也 (HIRAISHI TETSUYA)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 20371750

(3) 連携研究者

重松 孝昌 (SHIGEMATSU TAKA AKI)
大阪市立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80206086
川崎 浩司 (KAWASAKI KOJI)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 20304024
陸田 秀実 (MUTSUDA HIDE MI)
広島大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 80273126
渡部 靖憲 (WATANABE YASUNORI)
北海道大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 20292055
森 信人 (MORI NOBUHITO)
京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号 : 90371476

原田 英治 (HARADA EIJI)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 00362450

平山 克也 (HIRAYAMA KATSUYA)

港湾空港技術研究所・海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム・チームリーダー

研究者番号 : 60371754

Khayyer Abbas

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号 : 80534263

五十里洋行 (IKARI HIROYUKI)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号 : 80554196