

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18062

研究課題名(和文) 津波減災設計のための包括的連成解析システム開発とそのV&V

研究課題名(英文) Development and V&V of Integrated Coupled Analysis System for Tsunami-Resilient Design

研究代表者

三目 直登 (Mitsume, Naoto)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：10808083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、粘り強く健全性を維持するための構造物の耐津波設計を実現するため、漂流物や波と構造との相互作用を考慮しつつ、大規模な津波の影響を効率に並列計算するための解析システムの開発を実施した。

大規模並列解析システム開発に関しては、既存の並列化アルゴリズムの拡張および一般化を行い、様々な手法が混在する複雑な解析においても並列計算効率を損なわない動的負荷分散アルゴリズムを開発した。連成解析モデルの開発に関しては、固体の解析において信頼性の高い有限要素法と、波の解析に利点が多い粒子法とを組み合わせるための壁境界モデルの開発を行った。また、開発したアルゴリズム・手法・プログラムの妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で扱っている「津波と構造物との相互作用」という現象は、対象の複雑さ故に、数値解析の事例がきわめて少ない。それに対して本研究では、並列化時の効率性までを考慮に入れ、手法開発という部分からボトムアップ的に問題の解決を図った。開発した負荷分散アルゴリズムや連成モデルは学術的新規性を有している。

「津波と構造物との相互作用」を考慮した沿岸構造物の設計は、現在の設計方法から見るとかなり未来的なものである。しかしながら、計算機性能が発達した未来においては、想定外規模の災害に対する「建築物の粘り強さ」を評価することができ、より定量的に安全性を評価するための基礎手法として大きな意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：This research has developed an analysis system for tsunami-resilient design of structures, which can deal with interactions between floating objects and waves, and effect of large-scale tsunami by using parallel computer efficiently.

Regarding the large-scale parallel analysis, we have developed a dynamic load balancing algorithm that enables us to handle complicated analyses adopting multiple numerical methods by generalizing existing parallel algorithms. In terms of the coupled model between waves and solids, we have proposed a coupled model between finite element methods, which have widely used for analyses of solids because of its reliability, and particle methods, which has several advantages in analyses of waves. We have conducted simulations for verification and validation of our proposed algorithms, methods, and programs.

研究分野：計算工学

キーワード：計算工学 大規模並列 連成解析 壁境界モデル 津波解析

1. 研究開始当初の背景

2011年の東北地方太平洋沖地震津波に代表されるように、津波や高潮等は沿岸部に立地する重要施設・設備に重大な被害を及ぼす。これらに対し国内では、原子力発電所等の重要構造物に対する耐津波設計ガイドラインが制定されており、波圧等の経験則や水槽実験を用いた予測の他に、数値流体シミュレーションが実用的な形で設計プロセスに組み込まれつつある。しかし、特に2011年の津波では、設計基準を大きく上回る超過津波であったという点に加え、漂流物の衝突・洗掘・浮力による基礎の破壊・変形した水密扉からの浸水等、既存の設計手法での事前評価が難しい複雑現象がみられた。設計基準を超える状況下において、このような複雑現象を考慮した粘り強い構造物の設計が必要とされてきているが、流れの解析のみならず、複数の力学現象が相互作用するマルチフィジクス問題の数値解析が必要となる。一方、マルチフィジクス問題全般に対しては、数値シミュレーションを用いた研究が様々な分野で盛んとなっており、大きな発展を遂げている。しかし、マルチフィジクス問題に関する既存研究の知見を減災設計に活用する際には、付加的に以下の要件が課せられるため、数理的な扱いが難しくなる。

- (a) 自由表面等の複雑な移動境界の扱いが容易
- (b) 不確実性に対する試行錯誤を行うために、初期条件(波形や構造物の配置)の変更が容易
- (c) 波の発生・伝播から構造物の変形までを現実的な計算コストで解析

しかし、既存研究を単純に組み合わせるだけでは、これらの要件を満たす解析を実現することは困難である。

まず、上記の(a)と(b)の問題に対し申請者らは、粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の両者の利点を統合した流体構造連成モデルを開発した。粒子法はLagrange的に流れを記述し、メッシュ分割を必要としないため、複雑な移動境界や初期条件の変更に対してもメッシュの再分割を必要とせず、解析が破綻しないためロバストな解析が可能となる。さらに、有限要素法を構造解析に用いることで高い精度と信頼性を担保する。次に、(c)の問題に対して、有限要素法による波の2次元モデルの解析と、開発された流体構造連成モデルによる3次元解析とを組み合わせた波の2D-3Dモデルを開発し、スケールが大きく異なる波の発生・伝播とそれによる構造物の変形の解析を現実的な計算コストで解析する方法を提示した。また、精度および妥当性検証のための解析を多数行い、開発したモデルの正当性を示した。

2. 研究の目的

申請者らは、流体構造連成モデルの数理的な基礎を構築してきた。そこで本研究では、設計上重要な漂流物と波の相互作用を考慮しつつ、大規模な計算スケールにも対応できるように、スーパーコンピュータ上で動作させるためのアルゴリズム開発を行い、実用に資する解析システムの構築を目的とした。具体的には、本研究を以下の2つの小課題に分割し、研究を実施した。

- (1) 並列解析システムの開発
- (2) 漂流物と流れの相互作用のモデル化 (流体剛体連成モデル)

3. 研究の方法

(1) 並列解析システムの開発

既存の粒子法向け領域分割型並列アルゴリズム(図1)は、近傍粒子探索のための格子を動的に分割し、各並列プロセスが同一程度の粒子数をもつように領域を分割する。しかし、既存手法では各粒子の計算時間がすべて同一であるという仮定のもと設計されており、連成問題など、複数の現象や数値解析手法が混在する系に対しては、並列化効率が低下するという問題がある。そこで本研究では、既存アルゴリズムを拡張および一般化(文献②および③)することでこの問題を解決した。

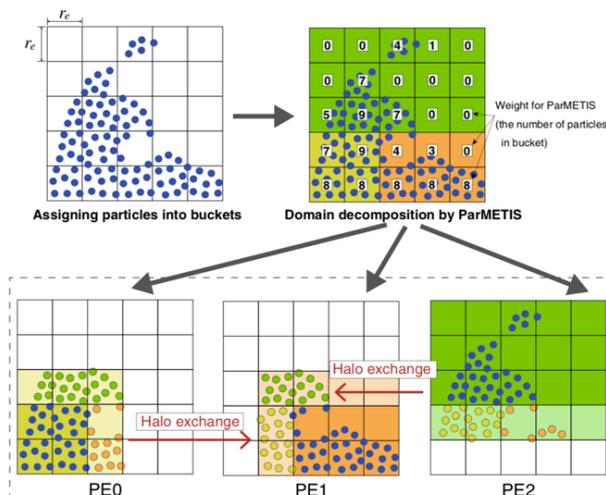


図1 粒子法における領域分割型並列アルゴリズム

(2) 漂流物と流れの相互作用のモデル化 (流体剛体連成モデル)

漂流物と流れの相互作用を扱うために、本研究では任意の四面体や六面体メッシュで表現された固体との相互作用を直接扱うことができる二つの壁境界モデルを提案した。

一つ目の方法 (文献①) は、課題代表者が過去に開発した explicitly represented polygon (ERP) 壁境界モデルを用いた方法 (図2) であり、このモデルは漂流物の表面メッシュのみを用いて流体と剛体との連成解析が可能となる。また、連成面での物理量が運動量保存則を満たすようにモデル化した。

二つ目の方法 (文献④および⑤) は、有限要素法等において数値積分を行う際に用いられる積分点を用いた方法である。図3の(c)のように、要素の重心に積分点が置かれている一点積分を前提とし、この積分点を粒子として扱える方法を提示し、任意のメッシュを壁境界として扱うことを可能とした。

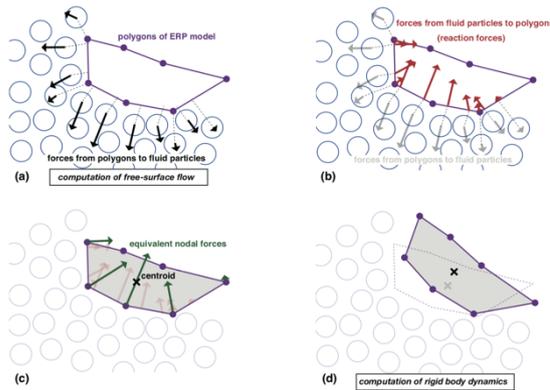


図2 ERP 壁境界モデルを用いた流体剛体連成モデル

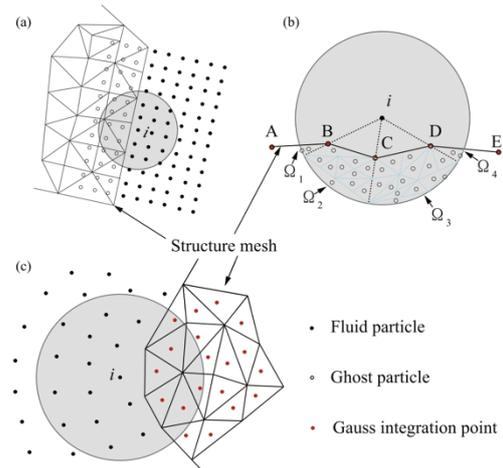


図3 Ghost cell boundary モデルによる連成モデル

4. 研究成果

(1) 並列解析システムの開発

既存アルゴリズムのもつ「各粒子の計算時間がすべて同一であるという仮定」が成立しない例として、課題代表者が過去に開発した ERP 壁境界モデルを用い、並列化効率を定量的に評価 (文献③) した。図4は、名古屋大学のスーパーコンピューター FX100 を用いて並列解析を行った際のスピードアップと理論値との比較を示している。このスーパーコンピュータは、各計算ノードがそれぞれ36コアを保有しており、それらを64ノードを用いた2,048並列までの計算速度向上を定量的に評価した。2,048並列のケースでは、並列化効率は理論的な最高効率の約67%である

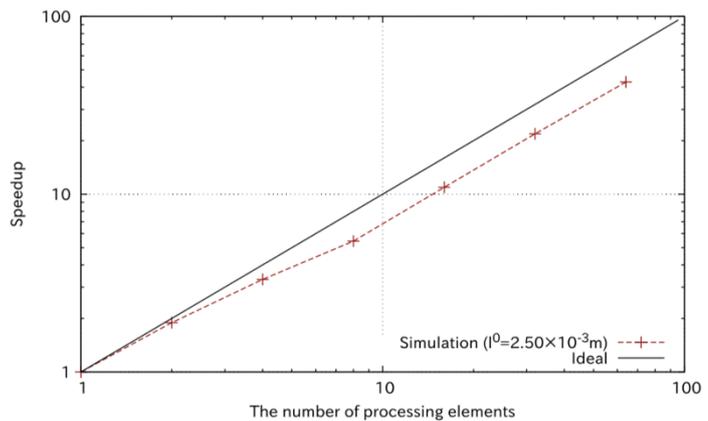


図2 提案アルゴリズムの並列計算における64台 (2,048並列) までのスピードアップ

が、2,048並列に至っても並列効率が頭打ちになっていないことから、提案アルゴリズムは大規模な計算対象に対してもスケラブルであると言える。また、提案アルゴリズムを用いてダムブレイク問題を解析し、実験的に計測された圧力値との比較を実施し、妥当性の検証を行った。その結果、数値計算における圧力の時刻歴が実験結果と基本的に良い一致を示すことと、空間解像度を高くすることで明確に精度が向上することを確認した。

(2) 漂流物と流れの相互作用のモデル化 (流体剛体連成モデル)

本研究で開発した二つのモデルに対して、数値解析結果と理論解、または実験値と比較することで精度および妥当性の検証を実施した。図5はERP 壁境界モデルを用いた流体剛体連成モデルに対する検証例 (文献①) であり、球を水面に落下させる問題を用いている。図5左のグラフは赤線で球の中心位置の時刻歴が示されており、黒の破線は定常状態における球の最終位置を表している。また、図5右はそれぞれの時刻における可視化結果を示している。流体と剛体の

密度比を様々な値に変え、数値実験を行った結果、定性的にも定量的にも、提案手法が妥当な精度をもつことが示された。Ghost cell boundary モデル（文献④）に対しても、ダムブレイク等による検証を実施し、手法としての信頼性を担保した上で、流体構造連成解析への拡張（文献⑤）を実施した。これにより、漂流物が変形する場合においても連成解を可能とする理論的基盤が築かれたと言える。

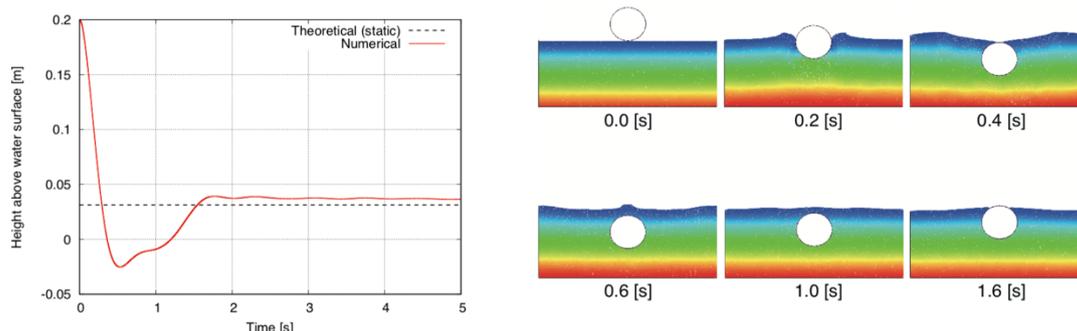


図 3 球の水面落下問題における球の理論的な最終位置との比較およびその可視化結果

上記 (1) および (2) によって、耐津波減災設計のための解析システム構築の基礎部分は完成したといえる。今後の課題は、津波再現水槽を用いて波と構造物との相互作用を含む実験を実施し、その実験と解析結果とを比較することで、システム全体の信頼性を担保することである。また、解析システムを用いてスーパーコンピュータ上で解析された結果に対し、データサイエンス分野（多変量解析分野）の方法論を導入し、実設計で利用可能なサロゲートモデルを構築することが実用上重要であると考えられる。

<引用文献>

- ① Y. Mizuno, N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura. Fluid-Rigid Body Interaction Analysis for Mesh-Free Particle Method with Polygon Boundary Representation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 64, pp.133-142, 2018.
- ② Y. Mizuno, N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura. Time-Based Dynamic Load Balancing Algorithm for Domain Decomposition with Particle Method Adopting Three-Dimensional Polygon-Wall Boundary Model, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 282-297, 2019.
- ③ N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura. Parallel Analysis System for Free-Surface Flow Using MPS with Explicitly Represented Polygon Wall Boundary Model, Computational Particle Mechanics, Vol.7, No.2, pp.279-290, 2020.
- ④ Z. Zheng, G. Duan, N. Mitsume, S. Chen, S. Yoshimura. A Novel Ghost Cell Boundary Model for The Explicit Moving Particle Simulation Method in Two Dimensions, Computational Mechanics, Vol.66, pp.87-102, 2020.
- ⑤ Z. Zheng, G. Duan, N. Mitsume, S. Chen, S. Yoshimura. An Explicit MPS/FEM Coupling Algorithm for Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Analysis, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.121, pp.192-206, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Z. Zheng, G. Duan, N. Mitsume, S. Chen, S. Yoshimura	4. 巻 121
2. 論文標題 An Explicit MPS/FEM Coupling Algorithm for Three-Dimensional Fluid-Structure Interaction Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Analysis with Boundary Elements	6. 最初と最後の頁 192-206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enganabound.2020.10.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Z. Zheng, G. Duan, N. Mitsume, S. Chen, S. Yoshimura	4. 巻 66
2. 論文標題 A Novel Ghost Cell Boundary Model for The Explicit Moving Particle Simulation Method in Two Dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 87-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00466-020-01842-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura	4. 巻 7
2. 論文標題 Parallel Analysis System for Free-Surface Flow Using MPS with Explicitly Represented Polygon Wall Boundary Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 279-290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40571-019-00269-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Mizuno, N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura	4. 巻 6
2. 論文標題 Time-Based Dynamic Load Balancing Algorithm for Domain Decomposition with Particle Method Adopting Three-Dimensional Polygon-Wall Boundary Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 282-297
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15748/jasse.6.282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Mizuno, N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura	4. 巻 64
2. 論文標題 Fluid-Rigid Body Interaction Analysis for Mesh-Free Particle Method with Polygon Boundary Representation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics Japan	6. 最初と最後の頁 133-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11345/nctam.64.133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura
2. 発表標題 Parallel Tsunami Analysis Based on MPS Method with ERP Wall Boundary Model
3. 学会等名 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura
2. 発表標題 Parallel Analysis of Fluid-Structure Interaction with Inconsistent Interfaces
3. 学会等名 5th Japanese-German Workshop on Computational Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Mitsume, T. Yamada, S. Yoshimura
2. 発表標題 Validation of Parallel Fluid-Structure Interaction Analysis System with Consistent-Interface Model
3. 学会等名 The 6th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三目直登
2. 発表標題 粒子法を用いた複合現象の連成シミュレーション
3. 学会等名 Prometech Simulation Conferece 2019 (PSC2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野芳規, 三目直登, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 ポリゴン壁境界モデルを適用した並列 MPS 解析の動的負荷分散
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水野芳規, 三目直登, 山田知典, 吉村忍
2. 発表標題 計算時間に基づく粒子法の動的負荷分散アルゴリズムの検討
3. 学会等名 日本機械学会第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------