

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630454

研究課題名(和文) 粒子法と有限要素法を組み合わせた強非線形流体・構造連成解析法の構築

研究課題名(英文) Development of analysis methods for fluid-structure interaction by combining particle methods and finite element methods

研究代表者

橋本 博公 (Hashimoto, Hirotada)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：30397731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：強非線形自由表面流れと構造物の動的応答を連成させて解くために、メッシュレス法である粒子法とメッシュ法である有限要素法を組み合わせた強非線形流体・構造連成解析手法の構築を行った。流体ソルバーには大規模計算向けのSPH法と陽的MPS法を採用し、いずれもGPU上での計算が可能な計算コードを使用した。これらの粒子法と組み合わせるべきFEMソルバーには、非定常解析が可能なオープンソースであるlibMeshを採用した。一方向ではあるが、実問題への適用が可能な大規模粒子法とFEMを組み合わせた強非線形流体・構造連成解析を実現できたことは、今後の流体・構造連成解析の発展に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to solve interaction between strongly nonlinear free-surface flows and structural dynamic responses, a numerical analysis method for fluid-structure interaction was developed by combining mesh-less particle methods and mesh-based finite element methods. The SPH method and the explicit MPS method which are adequate for large-scale simulation were adopted as the fluid solver, and a GPGPU code of each was used. As the FEM solver to be coupled with these particle methods, an open source "libMesh" which is capable for unsteady structural analysis was adopted. Although it is one way coupling, the fact that we could realize a fluid-structure coupled simulation by combining a large-scale particle method, which is applicable to realistic engineering problems, and FEM, would contribute to the future development of fluid-structure interaction analysis.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：流体・構造連成 粒子法 有限要素法 SPH 陽的MPS GPGPU 一方向連成 強制動揺試験

## 1. 研究開始当初の背景

船舶海洋工学分野において学術的な進展が求められている課題のひとつとして、青波衝撃や砕波などの強非線形流れと船舶などの構造物の動的応答との相互作用を扱う強非線形流体・構造連成解析法の構築が挙げられる。強非線形流れと構造応答の連成解析のためには、流力弾性問題の単なる延長では取り扱いが困難であり、最新の数値流体力学的手法と大規模な構造解析手法を組み合わせる必要があるが、国内の研究者不足の事情もあり、諸外国に後れを取りつつあるのが現状である。

強非線形流体・構造連成解析法に関する学術的進展によって、流体力学と構造力学の融合・同時解析のための先端的な数値計算手法に関する基礎が確立されたならば、巨大津波や荒天海象下での浮体・沿岸構造物の損壊など、自然災害の被害を定量的に予測可能となり、効果的な防災・減災対策を講じることができると考えられる。

## 2. 研究の目的

荒天海象下での青波衝撃や砕波など強非線形自由表面流れの解析に優れる粒子法と複雑形状を有する構造物の非定常構造応答解析が可能な有限要素法 (FEM: Finite Element Method) を組み合わせることで、強非線形流れと構造応答の連成解析手法を構築する。この際、単なる数値計算法の開発に留まらず、現実の問題へも適用可能な計算速度と精度を有する計算ツールとして確立することを目指して開発を行う。

これにより、従来の流力弾性問題としては取り扱いが困難な船舶の波浪中損傷事故の解析をはじめ、津波に代表される自然災害の被害低減や厳しい自然環境での運用が求められる海洋エネルギー開発など、今後の国内の重要課題に供する解析ツールとしての基礎を確立する。

## 3. 研究の方法

流体解析および構造解析の両者にいわゆるメッシュ法を用いた場合には、流体および構造に大変形を伴う問題に対して計算が不安定化しやすいが、メッシュフリー法である粒子法とメッシュ法である FEM の組み合わせは数値安定性の観点で非常に相性がよい。流体ソルバーとして、強非線形自由表面流れの解析を得意とする粒子法を用いるが、スケラビリティに優れる陽解法型の粒子法として SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法もしくは陽的 MPS (Moving Particle Simulation) 法を採用し、陰的時間積分による非定常構造解析が可能な FEM コードとの組み合わせを検討する。相互の情報交換と各計算モジュールへの反映が容易であることが特徴である。

船舶海洋工学分野においては、構造変形に比べて気液界面を有する流体側の変形が総

じて大きく、流体側シミュレーションの精度向上と大規模化が重要となるため、流体側の計算コードの GPGPU (General Purpose computing on GPU) 化を図ることで実問題への適用性を高める必要がある。

本研究では、GPGPU に適していると思われる陽的時間発展を採用した粒子法計算コードとして、SPH 法ではオープンソースの DualSPHysics を使用し、MPS 法では連携研究者と共同開発した独自の計算コードを使用する。

以上のようにして開発した粒子法と有限要素法を組み合わせた強非線形流体・構造連成解析手法の妥当性を検証するために、神戸大学の 2 次元水槽において薄板に強制回転運動を与える実験を実施し、薄板の動揺により生じる気液界面の大変形を伴う非線形流れと薄板の構造変形の計測を行うことで、構築した流体・構造連成解析手法の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

海水打ち込みや砕波などの強非線形自由表面流れと構造物の動的応答を連成させて解くため、流体解析には半陰解法の MPS 法、構造応答解析には非線形解析に優れる陽解法の FEM を用いた連成解析手法を検討した。流体・構造間の情報伝達に関しては、MPS 法側では構造物の変形を移動物体境界として考慮し、陰的に時間発展させることで流体の流れと圧力場を計算する。FEM 側では各接点に対して圧力場から重み平均値として得られる圧力を荷重として作用させ、陽的に時間発展させることで構造物の変位を得ることができる。

構築した MPS/FEM 連成解法について、弾性板へのダム崩壊流の衝突問題に関する実験結果と数値計算結果の比較により、強非線形流れと弾性構造物との連成問題に適用可能であることが確認できた一方で、流体・構造ソルバー間のタイムステップが 3 桁程度異なり、情報伝達の頻度の問題が確認された。

そこで、陽解法型の粒子法と陰解法型の有限要素法の組み合わせについて検討することとした。はじめに、代表的な陽的粒子法である SPH 法に着目し、GPGPU 対応のオープンソースである DualSPHysics を船舶への海水打ち込み問題に適用し、各種模型実験との比較を行った。その結果、図 1 のように甲板への海水打ち込みを伴う強非線形流れの水波と船体の相互作用を高精度に再現できることが判明した。

一方、従来は半陰解法として知られていた MPS 法についても陽解法アルゴリズムが提案されており、独自の GPGPU 計算コードを開発し、さらに GPU クラスタ上での実行を可能とすることで、図 2 のように巨大地震下での石油タンクのスロッシング問題に適用可能であることを確認した。

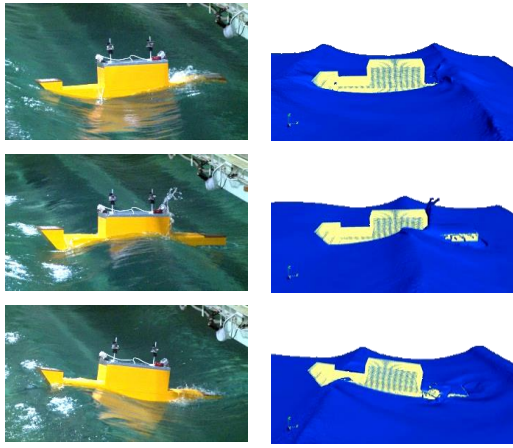


図1 SPH法による強非線形水波と浮体の相互作用シミュレーション



図2 スロッシング発生時の液面動揺と浮き屋根の相互作用シミュレーション

海水打ち込みについては船体全体の構造応答と入射波の相互干渉、スロッシングについては液面動揺と浮き屋根の構造変形の連成が問題となる。SPH法およびMPS法の流体ソルバーと組み合わせるべきFEMソルバーには、非定常解析が可能なオープンソースであるlibMeshを用いた。libMeshはライブラリとしての自由度が高く、将来的な拡張性に優れている。

船舶海洋工学分野で取り扱われる問題では、構造物の変形による流れへの影響は総じて小さく、構造物の存在や動揺によって生じる流動の変化が支配的であるため、一方向の流体・構造連成解析法の構築を行った。ただし、オープンソースを採用することにより、今後の双方向連成解析への拡張は容易である。流体から構造へのデータの受け渡しについては、汎用性を優先してFEM用メッシュとは独立したMPSの壁粒子データから重み付けして抽出する方法を採用した。粒子法で使用しているCADデータからの壁粒子自動生成法では、曲率が大きい場所に多くの壁粒子が配

置されるため、構造解析用メッシュとの相性が良い。

構築した強非線形流体・構造連成解析法の妥当性を確認するために必要となる検証用データの取得のため、図3に示すような2次元水槽での薄板の強制動揺試験を実施し、自由表面の大変形を伴う流れと流体からの力を受けて変形する薄板の時刻歴データを得た。図4には流体・構造連成解析の数値シミュレーション結果を示しているが、時間不足のため、実験結果との定量的な変位量の比較にまでは至っていない。

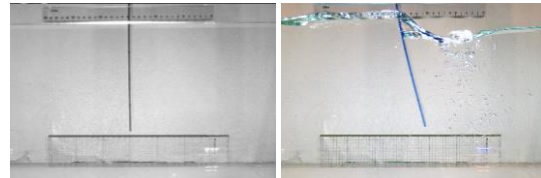


図3 薄板の強制動揺試験

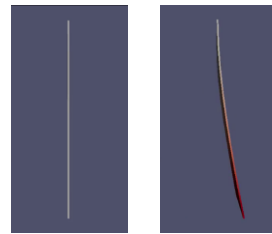


図4 流体・構造連成解析の結果

一方向ではあるが、実問題への適用が可能な大規模粒子法とFEMによる構造解析を組み合わせた強非線形流体・構造連成解析を実現できたことは、今後の流体・構造連成解析の発展に貢献するものと考えられる。その一方で、流体解析に比べて商用コードの高度化・低価格が顕著なFEM解析については、オープンソースの使用に過度にこだわる必要もなく、例えば船舶や掘削リグなどの大型で複雑な構造物に対して流体・構造連成解析を行う場合には、ユーザ関数を介して双方向の弱連成解析が実行可能な商用コードと組み合わせることも選択肢となる。

## 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 4 件)

- ① 橋本博公, 長邊七海, 河村昂軌, 粒子法と有限要素法を組み合わせた流体・構造連成解析手法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 24, pp. 689-691, 2017, 査読無
- ② Hashimoto, H., Hata, Y., Kawamura, K., Estimation of oil overflow due to sloshing from oil storage tanks subjected to a possible Nankai Trough earthquake in Osaka bay area, Journal of Loss Prevention in the Process

Industries, in press, 査読有  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.10.008>

- ③ Kawamura, K., Hashimoto, H., Matsuda, A., Terada, D. : SPH simulation of ship behaviour in severe water-shipping situations, *Ocean Engineering*, 120, pp. 220-229, 2016, 査読有  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.026>
- ④ Kawamura, K., Hashimoto, H., Onodera, N., Munesue, T. : GPGPU simulation of oil tank sloshing based on explicit MPS method, *Proceedings of the 3rd International Conference on Violent Flows*, CD-ROM のため頁数記載無し, Osaka, 2016, 査読有

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 博公 (HASHIOMOTO, Hirotada)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号 : 30397731

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

河村 昂軌 (KAWAMURA, Kouki)

海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・研究員  
研究者番号 : 80757724

### (4) 研究協力者

松田 秋彦 (MATSUDA, Akihiko)  
水産研究・教育機構・水産工学研究所・グループ長

寺田 大介 (TERADA, Daisuke)  
水産研究・教育機構・水産工学研究所・主任研究員 (研究当時)

長邊 七海 (OSABE, Natsumi)  
神戸大学・海事科学部・学生 (研究当時)