

平成 30 年 4 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06232

研究課題名(和文) 流体・構造連成災害および再生可能エネルギー利用に関するマルチフェイズ並列計算法

研究課題名(英文) Multiphase parallel computation methods for fluid-solid interactions in natural disaster and renewable energy

研究代表者

牛島 省 (Ushijima, Satoru)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：70324655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流体・構造連成災害などに見られるような、流体と固体間の運動量と熱の連成を伴うマルチフェイズ現象を対象とする並列計算法を提案し、その有効性を検討した。解法として、(1) Lagrangian-Eulerianモデルと、(2) full-Eulerianモデルの2種類の解法を提案した。これらの解法では、抗力係数のような経験則を使用せず、現象を従来の解法より高精度に予測できる。並列演算手法を導入し、スーパーコンピュータによる大規模計算を行った結果、実験結果とよく一致する計算結果が得られるとともに、数値実験結果では物理的に妥当な計算結果が得られることが確認され、解法の有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：Parallel computation methods were investigated to predict multiphase phenomena as observed in natural disasters, in which mechanical and thermal interactions between fluid and solid phases are essentially important. Two types of computation methods were mainly examined: (1) a Lagrangian-Eulerian method that solves gas and liquid phases in Eulerian cells while solid phases represented by multiple tetrahedron elements are calculated in a Lagrangian way and (2) a full-Eulerian method that deals with all phases including largely deformable solid objects in Eulerian cells fixed in space. Both computation methods allow us to estimate fluid forces acting on solid objects accurately in addition to the solid-solid interactions. The applicability of the computation methods using parallel supercomputers were confirmed through the comparisons with experimental results obtained with about 17,000 gravel particles as well as numerical experiments including about 100,000 solid particles.

研究分野：計算科学

キーワード：マルチフェイズモデル 流体構造連成 並列計算 個別要素法 有限体積法 津波漂流物 自由液面 土砂輸送

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の極端な気象変化などにより、各種の災害に対する予測・評価手法を確立することが必要となっている。また、産業の基盤となる再生可能エネルギーの検討が緊急な課題である。

津波漂流物による2次災害に対しては、流体と固体との力学的相互作用や、固体間の接触力を精度よく扱うことが重要となる。一方、再生可能エネルギーの1つとして期待される、地熱利用エネルギー(例えば、地熱発電)の分野では、岩石の割れ目や多孔質中における、流体(空気・水・水蒸気等)と地盤との熱力学的な連成問題を扱える手法の開発が期待されている。以上の背景から、本研究では流体と固体の力学のおよび熱的な連成という「複数の相が互いに影響する現象」、すなわちマルチフェイズ現象を適切に評価する数値解法の検討を行った。

(2) 従来の流体・固体連成問題の数値解法では、抗力係数などを用いる簡易な手法が用いられてきた。これに対して、物体表面に作用する粘性応力と圧力を面積積分して、物体に作用する流体力をより高精度に評価する手法が近年提案されている。しかしながら、物体が衝突する場合や、多数の物体を扱う場合には、この手法では格子生成や表面積分に関する困難が伴うことが多い。これらの問題を解決するため、研究代表者らは、本研究で扱うマルチフェイズ計算手法を開発している。

(3) 本研究で扱うマルチフェイズ計算手法の特徴は以下のように要約される。

・流体・固体間の力学的相互作用：物体に作用する流体力を、粘性応力や圧力の表面積分ではなく、気液相の圧力勾配項と粘性応力項の体積積分から計算する。このため、複雑な形状の物体に作用する流体力を容易に算出可能で、数值的に極めて安定である。

・高精度の流体計算法：運動方程式の5次精度陰的解法や、密度急変場でも安定な圧力解法など、研究代表者が新しく提案した、高精度かつ数值的に安定な解法を用いている。

・固体計算法：任意形状の1つの固体は多数の四面体要素で表される。複数の物体間の接触力は、物体内部表面付近の任意の位置に複数配置した「衝突判定球」により個別要素法により計算する。これらの流体力と接触力を利用して、全四面体要素の回転・並進運動を計算する。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、津波・洪水・高潮氾濫流などにより、車両や建築材などが流送され、それらが衝突して建造物や住民などに被害をもたらす流体・構造連成災害や、地熱を利用する再生可能エネルギー開発における流体・固体熱連成問題など、固気液相が連成するマルチフェイズ現象を評価する計算モデルと数値解法を高度化し、その有効性を確認することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 計算モデルの高度化：熱伝導率などの物性値が異なる固気液相が共存する場における熱連成現象を再現できる計算モデルとする。また、1つの固体は複数の四面体要素で表現されるが、形状の異なる多数の固体を含むマルチフェイズ現象を扱えるよう固体形状の設定を行う。

(2) 高速演算解法の導入：メニーコアシステム(MIC: Many Integrated Core)を利用するスーパーコンピュータにより、大規模かつ高速な演算が行えるよう、MPIとOpenMPを使うハイブリッド並列処理を導入する。

(3) 実験結果との比較および数値実験：堰を越流落下する水流により、礫粒子が輸送され、洗掘および堆積が生ずる現象の水理実験を行い、計算結果と比較する。また、京都大学・防災研究所と共同研究を行い、大型の津波造波水槽を利用して、都市模型の間を通過する津波漂流物の挙動を計測し、その数値計算を行って結果と比較する。さらに、各種の数値実験を行い、物理的妥当性や現象のメカニズムを考察する。

4. 研究成果

(1) 計算モデルの高度化に関しては、主として、基礎方程式にエネルギー式を加えた解法とし、有限体積法で用いる流体セルをさらに細分化したサブセルを利用して、熱輸送の非等方性を考慮できる解法とした。また、固体モデルについては、複雑な形状の境界壁面との接触を考慮できるものとした。後述する礫粒子輸送の計算においては、実験で利用された礫粒子の代表的な26種類の形状を抽出して、形状の異なる多数の固体を含むマルチフェイズ計算を行った。

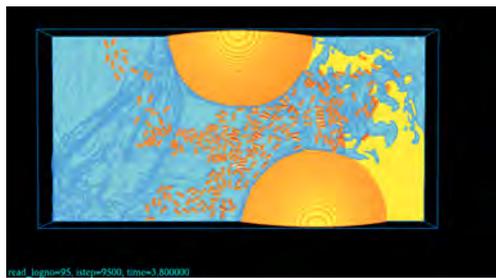
(2) 高速演算解法の導入については、従来のflat MPIによる解法に加えて、MPIとOpenMPを使うハイブリッド並列処理法を実装した。MICを備えた京都大学のスーパーコンピュータ(Camphor 2, Xeon Phi KNL 68cores / node × 1800 nodes)等を利用して、後述するような大

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

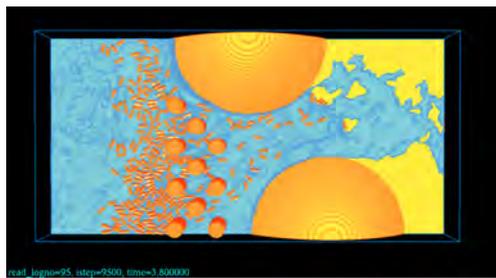
規模計算, 例えば Comphor 2 の 50 ノードを利用した計算により, 固体モデルの個数が 10^5 オードとなる計算を実施した.

(3) 計算手法の有効性を確認するため, いくつかの実験結果との比較や, 数値実験を行った. 代表的な研究成果とその概要を以下に示す.

(4) 車両形状を模擬した津波浮遊物と津波漂流物制御構造物 (以下, DCS = Debris Control Structures) の数値実験: トラックの形状を模擬した固体モデルを 240 個配置し, 起伏のある地形上でダムブレイク流れにより輸送される過程を計算する数値実験を行った. 図 1 に示すように, 計算領域内には半円形の 2 個の凸地形があり, その間を図の左から右方向へ固体モデルが輸送されていく. 図 1 (a) は DCS が無い場合, また (b) は 10 本の円柱状 DCS (底面に固定) を設けた場合の計算結果である. これらの結果に示されるように, 浮遊物が DCS 前面でトラップされ, 流下方向への移動を妨げる状況が数値計算により再現できることが確認された.



(a) $t = 3.8$ [s], DCS 無し

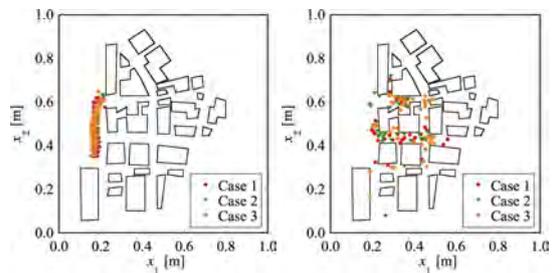


(b) $t = 3.8$ [s], DCS 有り

図 1 ダムブレイク流れによる起伏地形上の車両モデル群輸送の計算結果

(5) 津波造波実験結果と数値計算結果の比較: 京都大学・防災研究所との共同研究として, 津波造波水路を利用して, 都市モデル内を漂流物が輸送される状況を把握する実験を行った. この実験を対象として, 本研究の計算手法による計算を行い, 結果を比較した. 図 2 に 3 回の実験により計測された漂流物の重心点分布を示す. また, 図 3 は, 図 2 に対応する計算結果であり, 漂流物の初期配置をわずかに変えた 2 ケースの

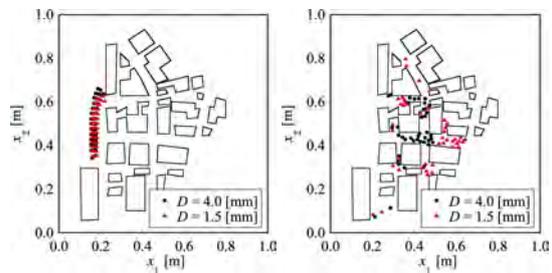
結果を示している. これらの結果に示されるように, 都市モデル内で津波漂流物が輸送されていく経路や分布が本計算手法によりほぼ妥当に再現されることが示された.



(a) $t = 0.0$ [s]

(b) $t = 6.0$ [s]

図 2 津波漂流物輸送の実験結果 (3 ケース)

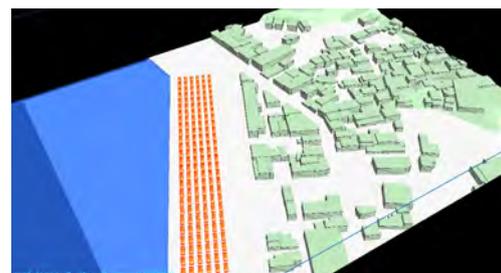


(a) $t = 0.0$ [s]

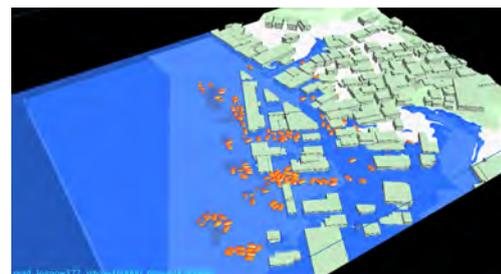
(b) $t = 6.0$ [s]

図 3 津波漂流物輸送の計算結果 (2 ケース)

(6) 津波漂流物の数値実験: 上記の実験を通じて検証された数値解法を用いて, 浮遊物の個数を増やし, 都市モデルの範囲を拡大した数値実験を行った. 図 4 に計算結果を示す.



(a) $t = 0.0$ [s]



(b) $t = 24.0$ [s]

図 4 都市内の津波漂流物の数値実験結果

(7) 落下水流による礫群の輸送：津波・高潮や洪水時に堤防を越流した水流により水理構造物の地盤に被害が生ずる事例がある。これを基礎的に考慮した水理実験を行い、計算手法の適用性を検討した。図5に計算領域の概略を示す。切り欠き堰から落下した水流が、下流に敷き詰められた礫群(平均粒径約7mm)に衝突し、礫群が移動して洗掘・堆積が生ずる。図6は、礫群の一部を拡大したもので、固体モデル群は、このように実際の礫形状を代表的に表す26種類の異なる形状から構成されている。

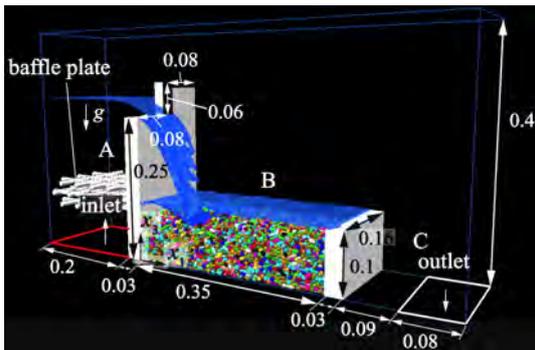


図5 計算領域の概略(単位[m])

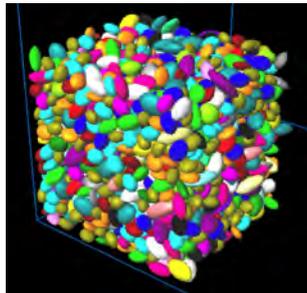
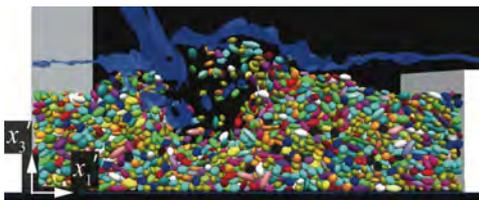


図6 礫群分布の一部



(a) 実験結果



(b) 計算結果

図7 落下水流と礫群分布のスナップショット ($t = 2.65$ [s])

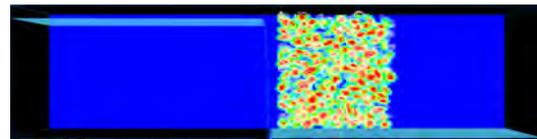
図7に、実験および計算で得られた落下水流と礫群分布のスナップショットを示す。両者は同様の傾向を示している。

(8) 高温粒子群を通過する低温気液相の数値実験：図8に示すように、ダムブレイク流れが高温粒子群の間隙を通過する数値実験を行った。計算領域は閉領域であり、気液相は非圧縮性流体としているため、図の左から右方向へ流れる液体と同じ体積の気体が逆方向へ流れる。

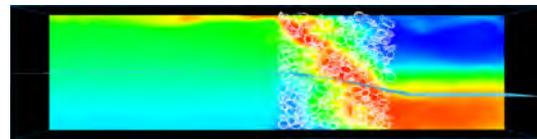


図8 数値実験の初期条件

計算結果を図9に示す。時間の経過とともに、高温粒子から気液相へ熱が移動する過程が再現されており、多相場の熱連成現象の計算が可能であることが示された。



(a) $t = 0.0$ (s)



(b) $t = 2.0$ (s)

図9 計算結果(色は温度分布を表す)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① 柳生 大輔, 牛島 省, 鳥生 大祐: 水滴衝突による砂粒子群侵食量の3次元並列計算: 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, I.369-I.378, 2015. (査読有)
- ② 青木 一真, 井唯 博史, 牛島 省, 鳥生 大祐, 柳生 大輔: 構造物および地表面との衝突を伴う多数の津波漂流物輸送の数値実験: 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, I.379-I.388, 2015. (査読有)
- ③ 柳生 大輔, 牛島 省, 鳥生 大祐: 越流水による礫群運動の3次元数値解析: 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.2, I.295-I.302, 2016. (査読有)
- ④ S. Ushijima and D. Toriu: Parallel computation method for momentum and heat interactions between fluids and complicated-shaped solids: ICHMT International Symposium on Advances in

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

Computational Heat Transfer (CHT-17), CHT-17-254, Napoli, Italy, 2017. (査読有)

- ⑤ 牛島省, 鳥生大祐, 柳博文, 柳生大輔: 礫間および礫・流体間の力学連成を考慮した越流水による礫群輸送の数値計算: 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, L143-L152, 2017. (査読有)
- ⑥ S. Ushijima and D. Toriu: Parallel computation method for momentum and heat interactions between fluids and complicated-shaped solids: Int. Symp. on Advances in Computational Heat Transfer (CHT-17), CHT-17-254, Italy, (2017) (査読有).
- ⑦ 柳生大輔, 牛島省, 鳥生大祐: 越流水による礫群運動の3次元数値解析: 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.2, L295-L302, (2016) (査読有).

[学会発表] (計17件)

- ① K. Aoki, S. Ushijima, H. Itada and D. Toriu: Parallel computations for many floating objects transported by tsunami flows: PANACM2015, pp.611-622, Buenos Aires, Argentina, 2015.
- ② 青木一真, 鳥生大祐, 牛島省, 井唯博吏: 多数の津波漂流物輸送と衝突防止工の効果に関する大規模並列計算: 土木学会第70回年次学術講演会, CS8-002, 2015.
- ③ 柳生大輔, 牛島省, 鳥生大祐, 青木一真: 水滴落下による砂粒子群運動の3次元計算: 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-55, 2015.
- ④ 柳生大輔, 牛島省, 鳥生大祐, 青木一真: 水滴衝突により発生する砂粒子群運動の3次元並列計算: 土木学会第18回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.161-162, 2015.
- ⑤ 青木一真, 牛島省, 柳生大輔, 鳥生大祐, 井唯博吏: 構造物および地表面との衝突を伴う多数の津波漂流物輸送の数値計算: 土木学会第18回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.271-272, 2015.
- ⑥ D. Toriu, S. Ushijima and D. Yagyu: Multiphase flow model to predict bed load transportations under complicated hydraulics conditions: THESIS2016, pp.149-152, Tokyo, Japan, 2016.
- ⑦ D. Yagyu, S. Ushijima, D. Toriu and H. Itada: Parallel computation method for many floating objects and static structures: IAHR-APD2016, B.02, Colombo, Sri Lanka, 2016.
- ⑧ 井唯博吏, 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: 土木学会第19回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.123-124, 2016.

- ⑨ 柳生大輔, 牛島省, 鳥生大祐: 砂粒子運動を考慮した越流水による局所洗掘の3次元数値解析: 土木学会第19回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.149-150, 2016.
- ⑩ 鳥生大祐, 牛島省, 井唯博吏, 柳生大輔, 森信人, Adi PRASETYO, 安田誠宏, 平石哲也, 間瀬肇: 構造物群との衝突を伴う多数の漂流物輸送の模型実験に対する多相場解析手法の適用性: 平成27年度防災研究所研究発表講演会, C35, 2016.
- ⑪ 鳥生大祐, 井唯博吏, 柳生大輔, 牛島省: 沿岸市街地における多数の津波漂流物輸送の並列計算手法: 京都大学第10回 ICT イノベーション, 2016.
- ⑫ S. Ushijima and D. Toriu: Multiphase Model to Predict Fluid-Solid Interactions in Environment and Disaster Problems with Parallel Computations: Comp-safe2017, S1689, Chengdu, China, 2017.
- ⑬ S. Ushijima, D. Toriu, K. Aoki, H. Itada and D. Yagyu: Numerical prediction for many floating debris transported in city model due to tsunami-induced flows: VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE2017), Nanto, France, 2017.
- ⑭ 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省: 水柱崩壊による礫群輸送の3次元並列計算: 第31回数値流体力学シンポジウム, B11-3, 2017.
- ⑮ 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省: 多相場モデルによる自由水面流中の礫群輸送の数値計算: 第64回理論応用力学講演会, OS8-01-03, 2017.
- ⑯ 柳生大輔, 牛島省, 鳥生大祐, 柳博文: 越流水による礫群輸送に対する3次元多相場解法の適用性: 土木学会第20回応用力学シンポジウム講演概要集, C000110, 2017.
- ⑰ 柳生大輔, 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省: 3次元多相場解法の適用性: 越流水の衝突による多数の礫(レキ)の輸送計算: 京都大学第11回 ICT イノベーション, 2017.

[図書] (計0件)

[産業財産権] 無し

[その他] 無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛島省 (USHIJIMA, Satoru)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号: 70324655

(2) 研究協力者

鳥生大祐 (TORIU, Daisuke)

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号: 60772572