

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01433

研究課題名(和文) SPS質量輸送モデルによる粒子法固液混相流モデルの新展開

研究課題名(英文) Innovation of particle method for solid-liquid multiphase flow model by introducing SPS mass transport model

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：混相流と粒状体の力学に基づく計算力学は、相似率の制約による移動床水理実験の限界を突破するための切り札であり、災害のメカニズムを深く理解するための鍵でもある。近年は連続相を粒子法で、分散相を個別要素法で扱う連成解析が行えるようになったが、実際の分散相は巨礫から微細土砂まで幅広いスケールに及ぶので、計算機の演算性能の制約から未だに微細土砂の影響を無視した解析を実施せざるを得ない。本研究では、現行の計算機の性能の制約下でも、微細土砂の影響を合理的に力学モデルに取り込めるSPS質量輸送モデルを軸として、激流による構造物の被災メカニズムに迫る高精度粒子法の開発を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

激甚災害の多くは土砂災害を伴うので、防災には土砂災害のメカニズムの解明が焦点である。土砂災害で問題となるのは土塊の移動開始や停止の過程であり、固相と液相を個別に扱える混相流解析が必須である。本研究で主軸とする粒子法は、土塊モデルとしての粒状体モデルとの馴染もよく、土砂災害のメカニズムに関する難題解決の切り札と言える手法で、本研究の学術的意義・社会的意義はともに大きい。

研究成果の概要(英文)：Computational mechanics based on multiphase flow and granular mechanics is the key to break through the limitations of movable-bed hydraulic experiments due to similarity constraints, and is also the key to a deeper understanding of the mechanisms of disasters. In recent years, it has become possible to perform coupled analyses in which the continuous phase is treated by the particle method and the dispersed phase by the distinct element method, but the actual dispersed phase covers a wide range of scales from large gravels to fine sediment, and the effect of fine sediment must still be neglected due to limitations in computer capability. In this study, accurate particle methods were developed to investigate the mechanism of damage to structures caused by violent flows, based on the SPS mass transport model, which can reasonably incorporate the effects of fine sediment into mechanical models even under the limitations of the current computer capability.

研究分野：海岸工学，数値流体力学

キーワード：固液混相流 粒子法 SPS質量輸送モデル 拡散方程式 激甚土砂災害

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の巨大津波の来襲以来、1000年確率の巨大津波(レベルIIの津波)に対して越流時に粘り強い耐力を有する海岸構造物が求められるようになり、特に津波越流時の耐洗掘性能が重要な検討項目の一つとなった。また、2014年の広島県の豪雨以降、線状降水帯がクローズアップされ、局所集中豪雨による激甚土砂災害が頻発するようになっているが、これらの災害が生じる場に共通する流れの特徴は、固液混相流、すなわち水と土砂の混合体としての流れにある。したがって、これらの災害のメカニズムを理解するためには、固液混相流の力学が鍵となる。

流砂・漂砂水理に関わる問題は相似率の制約から水理実験での現象解明が困難なため、数値解析を軸とした研究が続けられてきた。すなわち、混相流と粒状体の力学に基づく数値モデルの開発である。研究代表者は、この種の試みの黎明期から一貫してこの問題の取り組んでおり、現在では連続相(流体)を粒子法で、分散相(土砂)を個別要素法で扱う連成解析が行えるようになった。

この種のシミュレーションでは巨礫から微細土砂まで、幅広いスケールの分散相を扱う必要がある。大粒子(粒径が大きい粒子)は慣性が大きいから、大粒子のみを対象とした分散相モデルでこと足りると、従来から考えられてきた。しかし、現実の災害映像を見ると、流体は茶褐色に濁っており、高い濃度での微細土砂が混入している。個々の影響は小さい微細土砂でも、高濃度に流れ場に存在すると、影響は無視できない。その一方で、通常の粒子分散相・連続相(液相)間のカップリングでは、計算機の性能の制約から、微細土砂を粒子として扱うことはできない。この問題を解決するため、分散相として個別に追跡できない微細粒子の影響を記述する Sub-Particle-Scale(SPS)モデルが必要となる。本研究の核となる Sub-Particle-Scale(SPS)モデルは、研究代表者が粒子法のための LES 型乱流モデルを 2001 年に提案した際に初めて用いた呼称である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、固液混相流モデルにおいて微細粒子が高濃度で混入する状況での計算精度を確保するための「SPS(Sub-Particle-Scale)質量輸送モデル」とそれを支える高精度粒子法の計算技術開発である。巨大水害における堤体の越流洗掘破壊などのメカニズムの解明に数値流体力学的な面から顕著に貢献できる技術として、本研究の手法の開発が焦点である。

申請者の研究チームでは、粒子法の自由表面流解析への導入を先駆的に進めてきた。半陰解法型粒子法の開発初期から、固液混相流計算を実施し、先述の通り、粒子法に基づく LES のための SPS 乱流モデルを世界で初めて提唱した。さらに、粒子法の最大の弱点である圧力ノイズの画期的低減を可能とする高精度粒子法の開発に注力してきた。高精度粒子法の諸手法は相互補完的に機能するので、関連するスキームの一層の高度化は、本研究の学術(計算科学)上の目的でもある。

3. 研究の方法

はじめに、本研究のフレームワーク(微細土砂粒子を拡散モデルで表し、粒子分散相を構成する DEM 粒子を質量可変粒子として、個々の固相粒子を微細土砂粒子の生成源として扱うことにより、固相全体の質量保存を満足させる)に関しては Web of Science core collection に属する主要国際 journal・Computers and Fluids にて公表済みである。本研究では、計算モデルの構築に関して 3 つのフェイズを想定した。(1)第 1 フェイズはスカラー量の拡散係数を与える等方的拡散モデルの構築、(2)第 2 フェイズは粒子法による拡散テンソルの異方性を評価できる乱流モデルの開発である。(3)第 3 フェイズは幅広い粒径スケールに対応するための分散相モデルの高度化である。

第 1 フェイズ、第 2 フェイズに共通する基礎技術として高精度粒子法が必須であることから、高精度粒子法の技術開発に資する以下の課題：①流体・構造連成計算の高精度化のための各種ソルバーの開発、②混相流解析のための流体ソルバーの高精度化、に取り組んだ。また、第 3 フェイズの準備として、③粒状体モデルとしての個別要素法の高精度化、を実施した。これらの過程で開発された計算技術を融合し、第 3 フェイズの幅広い粒径スケールに対応するための分散相モデルの高度化とそれに基づく土砂沈降過程のシミュレーションを実施した。また、混相流モデルの高度化に必要なデータ取得のために、粒子流の PIV 計測を実施した。

4. 研究成果

本研究で開発した計算技術に関して、概要を述べる。①流体・構造連成計算の高精度化のための各種ソルバーの開発については、「流体・弾性体連成計算のための projection 法型ソルバーの開発」、「SPH 法に基づく半陰解法型流体・構造連成ソルバーの開発」、「異方性を有する構造体との流体・構造連成ソルバーの開発」、「hourglass モード抑制のための SPH 法型流体・構造連成ソルバーの開発」、「構造モデルのための updated Lagrangian SPH 法の改良」、「流体・弾性体連成計算のための Riemann SPH 法の提案」を実施した。混相流計算では、多数の固体(粒子)と液相の相

相互作用を高精度に扱う必要があり、とりわけ固相・液相界面における離散化による誤差を低減することが鍵となるが、流体・構造連成モデルはこの問題に対応する手法の開発に欠かせない。これらの研究成果は、8編の論文にまとめられ、Web of Science core collection に属する主要国際 journal (具体的には Journal of Fluids and Structures に 1 編, Engineering Analysis with Boundary Elements に 2 編, Applied Mathematical Modelling に 3 編, European Journal of Mechanics-B/Fluids に 1 編, Ocean Systems Engineering に 1 編) に掲載された。また、国際会議での複数の発表を行い、その内の 1 編が 2022 SPHERIC Xi'an International Workshop にて Best paper award を受賞した。

②混相流解析のための流体ソルバーの高精度化については、第 2 フェーズで鍵となる固定壁面近傍の計算点を高密度に配置するための粒子法の改良に相当する離散化後の質量保存性の改善に関する新しい手法として、VEM/VCS 法を提案した。さらに、飽和・不飽和透水層計算のための SPH 流体ソルバーの改良も行った。新たな計算安定化手法 VEM/VCS 法に関する提案が、主要国際誌 Applied Mathematical Modelling に掲載された。③粒状体モデルとしての個別要素法の高精度化については、個別要素法コードの陰解法化を行った。個別要素法コードの陰解法化は、固液相のカップリングにおいて、固相と液相の計算時間間隔を一致させるために必須の事項である。この成果は、主要国際誌 Computational Particle Mechanics に論文掲載された。PIV 計測に関しては、RIM-PIV(屈折率整合型 PIV)を用いた沈降粒子周囲の乱流構造の計測結果が、主要国際 journal・Journal of Hydro-environment Research に掲載された。

特に、VEM/VCS 法による質量保存性の改善は、乱流構造の異方性が顕在化する固定壁境界付近と自由水面付近において、粒子法の数値解の信頼性を大幅に向上させるので、第 2 フェーズで課題としている浮遊砂拡散の異方性の記述には極めて有効である。そこで、本研究で開発されたモデルの第 3 フェーズ(幅広い粒径スケールに対応するための分散相モデルの高度化)への適用例として、土運船から海中への土砂投入に伴う浮遊砂の発生と拡散・沈降・堆積過程のシミュレーションを実施した。土運船から海中への土砂投入に伴う浮遊砂の拡散過程は、本研究で構想した SPS 質量輸送モデルのコンセプトを journal 掲載した際 (Web of Science core collection に属する主要国際 journal・Computers and Fluids にて公表済み) にも計算例として取り上げたが、新たに VEM/VCS 法による質量保存性の改善法を導入したときの計算結果が図-1 である。

図-1 の上段の図は、土砂の沈降とそれに伴う浮遊砂の拡散を示している。濃い白色で示されているのが、粒子法で粒子として解像されている計算点である。その周囲に見える白濁域は個々の粒子法粒子を拡散源として周囲に輸送される微細土砂であり、微細土砂の拡散を扱うのが SPS 質量輸送モデルである。沈降

する土砂粒子は蛇行を伴う下降流を生じ、着底した土砂粒子は下降流に押しつぶされつつ側方に流動する。この流動過程によって駆動された側方流速により底面壁近傍には強いせん断層が形成され水深の 1/3 程度の径を持つ渦が発生する。一方、図-1 の下段の図は、上段の図と同じ瞬間の流速ベクトルと渦の存在を確認する指標として代表的な Q 値の分布を示したものである。赤色で表示されている部分が顕著な渦運動の存在域であるが、沈降する土砂粒子により支えられる蛇行を伴う下降流に沿って赤色域が存在している。つまり、下降流の蛇行は、左右交互に発生する渦の存在に対応している。底面を運動する土砂粒子(濃い白色の点)を見ると、部分的に盛り上がった形状が見られるが、凸部のピーク近傍には Q 値の赤色域が存在し、底面に沿って流動する粒子の運動が、局在する渦運動に影響されていることが分かる。このように詳細な流れと土砂輸送の構造を計算できる手法は、埋め立てによる海洋の濁りなどの環境影響を適切に予測するためにも有効である。

なお、シミュレーションは実験と比較すると側方への流動が過大に評価される傾向がある。この問題の改善には底面壁付近の混相乱流構造の再現性のさらなる向上が課題であり、計算負荷を抑制しつつ、固定壁近傍の解像度を増加させるための高精度粒子法の進歩が必要である。

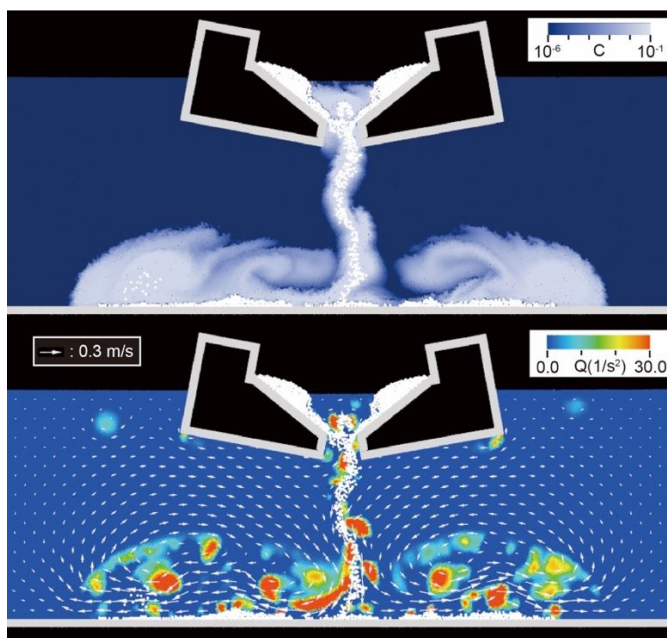


図-1 土運船から海中への土砂投入のシミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Khayyer Abbas, Shimizu Yuma, Gotoh Takafumi, Gotoh Hitoshi	4. 巻 116
2. 論文標題 Enhanced resolution of the continuity equation in explicit weakly compressible SPH simulations of incompressible free surface fluid flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Mathematical Modelling	6. 最初と最後の頁 84 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apm.2022.10.037	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 Khayyer Abbas, Shimizu Yuma, Gotoh Hitoshi, Hattori Shunsuke	4. 巻 112
2. 論文標題 A 3D SPH-based entirely Lagrangian meshfree hydroelastic FSI solver for anisotropic composite structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Mathematical Modelling	6. 最初と最後の頁 560 ~ 613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apm.2022.07.031	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 Shimizu Yuma, Khayyer Abbas, Gotoh Hitoshi	4. 巻 96
2. 論文標題 An implicit SPH-based structure model for accurate Fluid-Structure Interaction simulations with hourglass control scheme	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - B/Fluids	6. 最初と最後の頁 122 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.euromechflu.2022.07.007	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 IKARI Hiroyuki, GOTOH Hitoshi, WAKISHIMA Kanari	4. 巻 78
2. 論文標題 IMPROVED MPS METHOD FOR ENERGY CONSERVATION AND ITS APPLICATION TO IRREGULAR WAVE SIMULATION	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_43 ~ I_48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_I_43	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 Ikari Hiroyuki, Gotoh Hitoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Fully implicit discrete element method for granular column collapse	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 261 ~ 271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40571-022-00485-7	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 Tazaki Takumi, Harada Eiji, Gotoh Hitoshi	4. 巻 175
2. 論文標題 Numerical investigation of sediment transport mechanism under breaking waves by DEM-MPS coupling scheme	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coastal Engineering	6. 最初と最後の頁 104146 ~ 104146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coastaleng.2022.104146	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 TAZAKI Takumi, HARADA Eiji, GOTOH Hitosh	4. 巻 78
2. 論文標題 COMPUTATIONAL MECHANICS OF SWASH ZONE SEDIMENT TRANSPORT USING VOLUME-CONSERVED DEM-MPS COUPLED SCHEME	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_433 ~ I_438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_i_433	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 Shimizu Yuma, Gotoh Hitoshi, Khayyer Abbas, Kita Kazuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Fundamental Investigation on the Applicability of a Higher-Order Consistent ISPH Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 275 ~ 284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.17736/ijope.2022.jc868	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 Khayyer Abbas, Gotoh Hitoshi, Shimizu Yuma, Nishijima Yusuke	4. 巻 105
2. 論文標題 A 3D Lagrangian meshfree projection-based solver for hydroelastic Fluid?Structure? Interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 103342 ~ 103342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103342	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 Shimizu Yuma, Khayyer Abbas, Gotoh Hitoshi	4. 巻 137
2. 論文標題 An SPH-based fully-Lagrangian meshfree implicit FSI solver with high-order discretization terms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Analysis with Boundary Elements	6. 最初と最後の頁 160 ~ 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enganabound.2021.10.023	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 Shimizu Yuma, Khayyer Abbas, Gotoh Hitoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 An enhanced incompressible SPH method for simulation of fluid flow interactions with saturated/unsaturated porous media of variable porosity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Systems Engineering	6. 最初と最後の頁 63 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/ose.2022.12.1.063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Harada Eiji, Ikari Hiroyuki, Tazaki Takumi, Gotoh Hitoshi	4. 巻 117
2. 論文標題 Numerical simulation for coastal morphodynamics using DEM-MPS method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 102905 ~ 102905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apor.2021.102905	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Abbas Khayyer, Hitoshi Gotoh, Yuma Shimizu
2. 発表標題 Development of an accurate updated Lagrangian SPH structure model for simulation of laminated composite structures
3. 学会等名 2022 SPHERIC Xi'an International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Abbas Khayyer, Yuma Shimizu, Hitoshi Gotoh, Shunsuke Hattori
2. 発表標題 A novel 3D entirely Lagrangian meshfree hydroelastic FSI solver for anisotropic composite structures
3. 学会等名 15th International SPHERIC Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Shimizu, Hitoshi Gotoh, Abbas Khayyer
2. 発表標題 An implicit fully Lagrangian meshfree structure model for consistent/accurate FSI simulations
3. 学会等名 15th International SPHERIC Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	原田 英治 (Harada Eiji) (00362450)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	Khayyer Abbas (Khayyer Abbas) (80534263)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	五十里 洋行 (Ikari Hiroyuki) (80554196)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	清水 裕真 (Shimizu Yuma) (20869705)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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