

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11920

研究課題名（和文）多相連成災害の素過程を解明する計算力学手法の構築

研究課題名（英文）Numerical prediction method for multi-phase coupled disasters focused on elementary processes

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水流と土粒子の力学的な関係など、ミクロスケールの流体・固体連成現象の素過程を数値計算手法に組み込み、これを大規模並列計算することにより、複雑な現象を精度良く再現する評価方法を確立することを目的として行われ、以下の成果が得られた。(1)底面から流入する上昇水流による飽和粒子層の内部流動化と破壊に至る過程を粒子スケールの連成解法で大規模計算した結果、粒子運動に対する粒子形状の影響や、間隙水圧の時間変化を再現できることが確認された。(2)素過程を扱う流体・固体連成計算法は、負荷の大きい計算となるため、圧力ポアソン方程式の数値解法にマルチグリッド前処理法を導入し、計算高速化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土粒子層の浸透破壊や内部流動化現象などを対象とする計算手法では、これまで粒子スケールの現象、すなわち各粒子の運動や局所的な間隙水圧を正確に扱う手法はほとんどなく、対象領域全体を連続体などとして扱う手法が多かった。本研究では、流体固体連成現象の素過程に着目し、これを計算手法に組み込み、大規模並列計算を利用することにより、多相場が連成する災害現象の基本的な部分がある程度正確に評価できる計算手法を構築した。実験との比較により、粒子形状の影響や間隙水圧の変化が再現できることが示された。また、マルチグリッド前処理法を圧力計算に組み込むことにより、大規模並列計算をより効率的に行うことを可能にした。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a computational methods that can accurately calculate micro-scale fluid-solid interactions (MFSI), such as the mechanical interactions between water flow and soil particles, or liquid flows and superabsorbent polymer particles, by implementing the elementary physical processes in the methods. The following results were obtained in this study:

(1) The processes of internal fluidization and breakdown of a saturated particle layer due to an upward flow of water entering from the bottom were calculated with large-scale parallel computations using the MFSI computational method. As a result, it was confirmed that the effects of particle shapes on particle motions and the unsteady variation of pore water pressure are reasonably calculated.

(2) Since the MFSI computational method requires a large computational load, a multi-grid preprocessing method is introduced to solve the pressure Poisson equations.

研究分野：計算科学

キーワード：流体固体連成計算 マルチフェイズモデル 固気液多相場 粒子層内部流動化 間隙水圧 浸透流 並列計算 マルチグリッド法

1. 研究開始当初の背景

水流が関係する土砂災害のように、固気液相の連成現象と考えられる災害現象のメカニズムの解明を行う上で、計算力学は重要な役割を果たすと期待される。従来は、このような問題に対して、相間の微細な素過程ではなく、例えば土粒子層全体を連続体として扱い、経験則や多くの仮定を用いる大スケールの現象に対する評価手法（マクロモデル）が用いられてきた。マクロモデルは有用な手法であり、実スケールの現象評価に役立てられている。一方で、相間の微細な素過程を直接扱う連成計算法を開発して大規模計算を行うことが可能となれば、限られたスケールの現象ではあるが、実験では計測困難な物理量（例えば多数の固体粒子間の流体圧力の非定常かつ3次元分布等）を取得できるので、現象のメカニズムの解明に役立つと期待される。さらに、素過程を直接扱う計算により、マクロモデルに利用される仮定や不確定なパラメータの精度を改善できる可能性がある。

上記のように、相間の微細な素過程を直接扱う計算手法の背景は以下のように示される。計算領域に固体が含まれる場合の流体解析として、非構造格子や境界適合格子 (BFC)、解適合格子 (AMR) 等の格子処理により、複雑な固体形状を表現する手法が提案されている。しかし、複数の固体が衝突したり、気液相が複雑な界面を形成する場では利用が困難な場合がある。また、移動する固体を含む流体計算では、各種の埋め込み境界法 (IBM) がしばしば利用されているが、運動方程式に加える外力項の物理的根拠が明確でない場合や、固体表面近傍の流体セルにおける内外挿が複雑で実装が難しいことが少なくない。一方、粒子法を利用する固気液相の計算も検討されているが、計算の安定性や精度、また計算負荷の問題が残されている。格子ボルツマン法 (LBM) は、大規模並列計算に適した手法とされるが、実現象スケールの問題を解くためにはモデルの改良が必要とされている。

本研究で扱う解法では、固体スケールより十分細かい流体セルを設定し、固体領域を一旦仮想流体とした場合に得られる圧力分布を利用して、固体に作用する流体力を求める。この解法は、取り扱いが容易であると同時に、並列処理も導入しやすいため、適切な離散化法を用いれば精度の高い有用な解法となると考えられる。本研究では、この解法に基づき、相間の微細な素過程を直接扱う計算手法の高速化を進めるとともに、実験結果を利用して計算精度の確認を行う。

2. 研究の目的

相間の微細な素過程を直接扱う連成計算法として、上記で述べた解法の有効性を確認するとともに、計算の高速化を図ることを目的とする。このために、以下の検討を行う。

(1) 飽和した固体粒子層の底面から鉛直上方に向かう水流を供給する実験を行い、粒子運動や間隙水圧の変化を計測する。この実験結果を対象として、本研究の解法を用いた大規模並列計算を行い、解法の適用性を確認する。

(2) 大規模な分散共有メモリシステムにおいて、本研究の解法の演算処理を高速化するため、圧力ポアソン方程式の数値解を求める手順にマルチグリッド法による前処理を導入し、その効果を確認する。

3. 研究の方法

基礎実験とスーパーコンピュータを利用する数値計算により、以下の研究を進める。

(1) 飽和した固体粒子層の底面から鉛直上方に向かう水流を供給する実験を行い、粒子運動や間隙水圧の変化を計測する。粒子の形状の影響を確認するため、礫粒子と球形のガラスビーズを使い、高速ビデオにより粒子のフローパターン等を把握する。また、超小型間隙水圧計を利用して、過剰間隙と粒子運動の関係を把握する。この実験結果を対象として、京都大学のスーパーコンピュータシステムを利用する大規模並列計算を行い、解法の適用性を確認する。

(2) 大規模な分散共有メモリシステムにおいて、本研究の解法の演算処理を高速化するため、圧力ポアソン方程式の数値解を求める手順にマルチグリッド法による前処理を導入し、京都大学のスーパーコンピュータシステムを利用する大規模並列計算を行い、その効果を確認する。

4. 研究成果

4.1 飽和粒子層の内部流動化と破壊

底面から局所的に流入する鉛直上昇水流 (平均流速約 0.77 m/s) により、粒子層で内部流動化が発生し、最終的に水流が粒子層を貫通して崩壊に至る過程を対象として、実験および粒子スケールの流体・固体連成計算を行った。実験では、粒径 4 mm の礫粒子と粒径 7 mm のガラスビーズを用いて、高速ビデオで粒子の動きを撮影し、超小型間隙水圧計による計測を行った。一方、計算では個々の粒子を四面体要素で表現する粒子モデルを利用し、最小粒径粒子の計算では、粒子モデル数を 21,936、流体計算セル数を 117,504,000 として、粒子周辺の流体計算に十分な分解能を設定し、京都大学のスーパーコンピュータシステムを利用する 2,176 プロセスの並列処理により演算を高速化した。実験および計算結果を用いて、粒子層内に生ずる過剰間隙水圧の時間的・空間的分布を比較するとともに、計算結果を利用した粒子移動パターンを示し、一連の過程が進行する力学的な要因や、粒子形状および粒径による現象の相違について考察を加えた [1]。

粒子の形状を精度良く扱うため、図 1 に概略を示すように、複数の四面体要素により表現される粒子モデルを利用する。この粒子モデルの内部表面付近には、粒子間の接触力を評価するために複数の接触判定球 (CDS) を設置する (球体モデルの場合は 1 個の CDS を利用する)。CDS を用いる個別要素法の計算以外の演算処理、たとえば粒子の慣性テンソルなどの特性量の計算や、四面体サブセル法を用いる流体力評価などには精度を向上させるため、四面体要素を使う。

計算では、図 2 に概要を示すように、領域分割法により、計算領域を同一の大きさの小領域に分割して並列計算を行った。小領域間で通信する変数と共有する変数を切り分けてメモリの負荷を軽減させる処理を利用している。

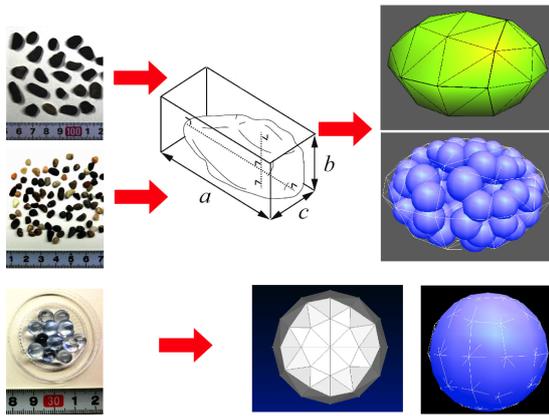


図1 粒子モデルの設定手順の概略

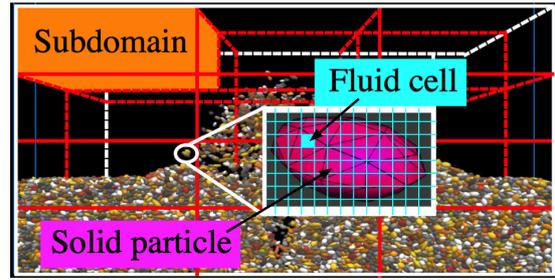
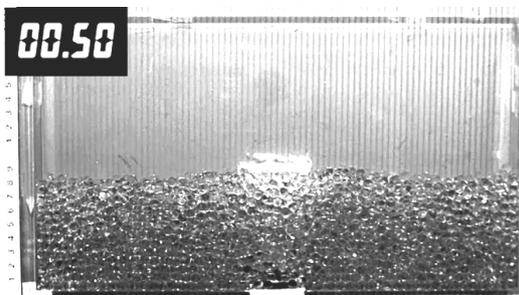


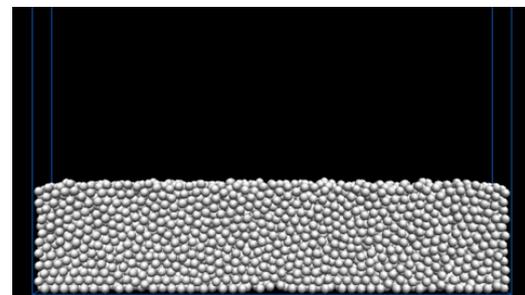
図2 領域分割法による並列計算の概略

図3と図4に、内部流動化と破壊過程にある粒径7mmのガラスビーズを用いた実験結果と計算結果のスナップショットをそれぞれ示す。 $t = 3.00$ [s]の結果を比較すると、底面から流入した上昇水流により底面付近の粒子群が流動化し、底面の流入口付近に空洞 (cavity) が形成されて、それが鉛直方向に拡大する状態が見られる。

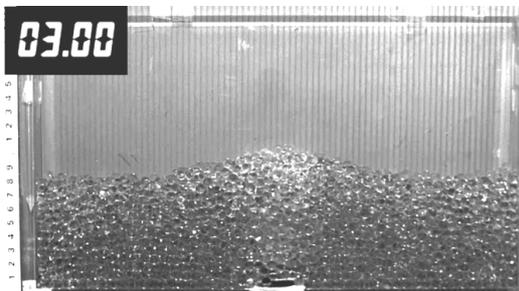
一方、粒径4mmの礫粒子を用いた実験結果と計算結果をそれぞれ図5と図6に示す。図5に示された実験結果では、ガラスビーズで見られた傾向が、礫粒子ではより顕著となり、 $t = 3.00$ [s]では上昇水流が粒子層を貫通して、噴出口上部付近にある粒子が高く噴き上げられている。これらの粒子の挙動は、図6に示される計算結果と比較すると、良好に再現されていると考えられる。



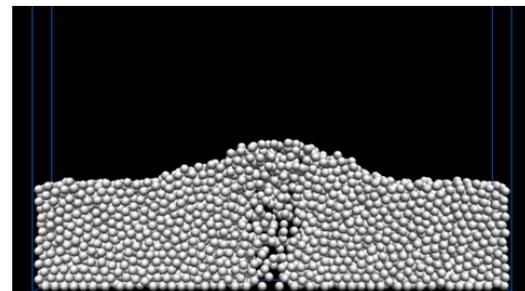
(a) $t = 0.50$ [s]



(a) $t = 0.50$ [s]



(b) $t = 3.00$ [s]



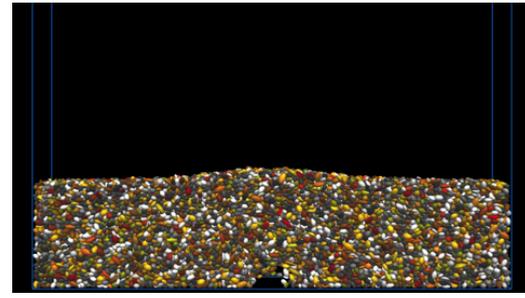
(b) $t = 3.00$ [s]

図3 実験結果 (ガラスビーズ, 粒径7mm)

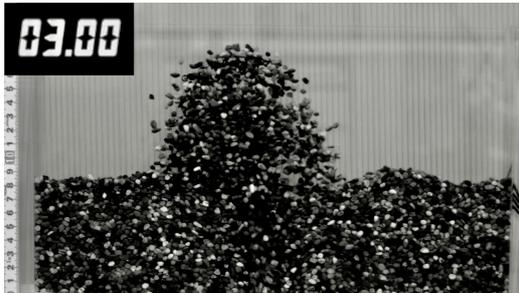
図4 計算結果 (ガラスビーズ, 粒径7mm)



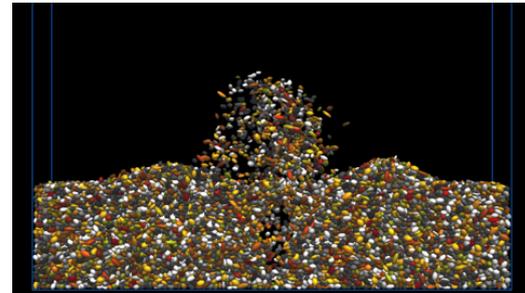
(a) $t = 0.50$ [s]



(a) $t = 0.50$ [s]



(b) $t = 3.00$ [s]



(b) $t = 3.00$ [s]

図5 実験結果 (礫粒子, 粒径 4 mm)

図6 計算結果 (礫粒子, 粒径 4 mm)

4.2 マルチグリッド前処理による非圧縮性多相場の高速計算

気液多相場や密度流に対する非圧縮性流体解析では、離散化された圧力ポアソン方程式の求解が全体の計算時間の大部分を占め、計算負荷が大きくなる。この演算に適切な前処理を利用することにより、計算負荷を軽減することができる [2]。

3次元キャビティ流れ、ダムブレイク問題、自然対流を対象として、それらの圧力ポアソン方程式の求解を行う Bi-CGSTAB 法にマルチグリッド法前処理を実装し、並列計算を行う場合の計算速度を検討した。流体計算においては、移流項の計算に TVD スキームあるいは高精度だが計算時間を要する QSI スキームを適用する。また圧力計算に C-HSMAC 法を用いて非圧縮条件を十分に満足する解を求める計算手法を利用する。

マルチグリッド法前処理を実装した計算手法により、スレッド並列においては流体計算セル数が 128 の 3 乗の場合に、16 スレッド並列計算により、圧力計算が最大で 15 倍高速化されることが示された。また、スレッド並列とプロセス並列の両者を用いるハイブリッド並列計算においては、流体セル数が 96 の 3 乗、8 プロセスおよび 16 スレッド並列計算時に、圧力計算が最大で 3 倍高速化されることが示された。

参考文献

- [1] 牛島 省, 鳥生 大祐, 牧 志峰: 鉛直上昇流による飽和粒子層の内部流動化に対する流体・固体連成計算: 土木学会論文集特集号 (応用力学), 79 巻, 15 号, 論文 ID: 22-15032, 2023.
- [2] 本西 亮太, 牛島 省: 3次元 Multigrid 前処理を用いたコロケート格子上的非圧縮性密度流の圧力計算: 土木学会論文集特集号 (応用力学), 80 巻, 15 号, 論文 ID: 23-15020, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 MOTONISHI Ryota, USHIJIMA Satoru	4. 巻 80
2. 論文標題 3次元 Multigrid 前処理を用いたコロケート格子上の非圧縮性密度流の圧力計算	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-15020	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 西本 和貴、鳥生 大祐、牛島 省	4. 巻 15
2. 論文標題 密度逆転領域を含む自然対流と水-氷相変化の数値計算	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 27 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.15.27	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 USHIJIMA Satoru, TORIU Daisuke, MAKI Shiho	4. 巻 79
2. 論文標題 FLUID-SOLID INTERACTION COMPUTATIONS FOR INTERNAL FLUIDIZATION IN SATURATED GRANULAR BED	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15032	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 GUINEA Niku, TORIU Daisuke, USHIJIMA Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 EULERIAN-LAGRANGIAN APPROACH FOR INTERACTIONS BETWEEN FLUIDS AND MULTIPLE DEFORMABLE SWELLING OBJECTS USING MASS-SPRING MODEL	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.22-15025	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 MOTONISHI Ryota, USHIJIMA Satoru	4. 巻 79
2. 論文標題 PRECONDITIONING FOR PRESSURE COMPUTATIONS IN NUMERICAL PREDICTIONS OF DENSITY CURRENTS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15029	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 NISHIMOTO Kazuki, MOTONISHI Ryota, TORIU Daisuke, USHIJIMA Satoru	4. 巻 79
2. 論文標題 MULTIPHASE COMPUTATION METHOD FOR FREEZING AND MELTING OF WATER WITH NATURAL CONVECTION INCLUDING DENSITY INVERSION REGION	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15022	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 廣岡 信行、牛島 省	4. 巻 14
2. 論文標題 ろ過プロセスにおける帯電微粒子群と流れの計算	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 96 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.14.96	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 グイネア ニク、鳥生 大祐、牛島 省	4. 巻 14
2. 論文標題 Computational Method for Interactions between Deformable Objects and Fluid Flows Using Immersed Boundary Method and Mass Spring Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 78 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.14.78	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 Kazuki Nishimoto, Daisuke Toriu and Satoru Ushijima	4. 巻 JSST 2022
2. 論文標題 Numerical prediction of water-ice phase-change with natural convection including density inversion region	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JSST 2022 Student Session Proceedings	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Niku Guinea, Daisuke Toriu and Satoru Ushijima	4. 巻 JSST 2022
2. 論文標題 Numerical experiments of swelling objects interacting with Newtonian fluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JSST 2022 Student Session Proceedings	6. 最初と最後の頁 57-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 KUKI Atomu, TORIU Daisuke, USHIJIMA Satoru	4. 巻 77
2. 論文標題 COMPUTATIONS OF VISCOELASTIC FLUIDS WITH FREE SURFACE BASED ON FINITE VOLUME METHOD IN THE COLLOCATED GRID SYSTEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_129 ~ I_136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_129	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 牛島 省, グイネア ニク, 芝 隆宏, 鈴木 一充, 松原 佑介
2. 発表標題 水中に投下された高吸水性ポリマー粒子の膨潤過程の3次元数値計算
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本西 亮太, 牛島 省
2. 発表標題 QSIスキームとMultigrid前処理圧力解法を用いた3次元非圧縮性流体のスレッド並列計算
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 牛島 省, 牧 志峰, 鳥生 大祐
2. 発表標題 粒子層内部流動化に伴う粒子運動と流体物理量に関する粒子スケール流体・固体連成数値計算
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Niku Guinea, Satoru Ushijima, Takahiro Shiba, Kazumitsu Suzuki and Yusuke Matsubara
2. 発表標題 Particle-Scale and Macro-Scale Computations on the Swelling Process of Superabsorbent Polymer Particles
3. 学会等名 JSST 2023 Student Session Proceedings (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西本 和貴, 本西 亮太, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 相平均モデルによる密度逆転領域を含む水の自然対流と凍結・融解現象の数値解析
3. 学会等名 京都大学第17回ICTイノベーション, 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 グイネア ニク, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 バネ質点モデルで表される変形・膨張する複数固体と流体の連成現象に対する オイラー・ラグランジュ解法
3. 学会等名 第25回土木学会応用力学シンポジウム概要集, 2B07-12-02
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西本 和貴, 本西 亮太, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 水の密度逆転領域を含む自然対流と凍結・融解の多相場数値解法
3. 学会等名 第25回土木学会応用力学シンポジウム概要集, 2B07-12-02
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牧 志峰, 大野 絢平, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 底面から流入する鉛直上昇水流による礫層破壊の流体・固体連成計算
3. 学会等名 第25回土木学会応用力学シンポジウム概要集, 2B19-24-05
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本西 亮太, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 密度流の数値解析における圧力計算の前処理法
3. 学会等名 第25回土木学会応用力学シンポジウム概要集, 2B25-30-02
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牛島 省, 上野 友登, 鳥生 大祐, 大野 絢平
2. 発表標題 鉛直上昇流による礫層内部流動化と破壊の流体・固体連成計算
3. 学会等名 第24回土木学会応用力学シンポジウム概要集, S02E-01
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 九鬼 愛夢, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 コロケート格子有限体積法に基づく粘弾性流体の数値計算
3. 学会等名 第24回土木学会応用力学シンポジウム概要集, S02E-04
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Hirooka and Satoru Ushijima
2. 発表標題 Computation of micro-particle dynamics in a filtration process with the coulomb interaction
3. 学会等名 JSST 2021 Student Session Proceedings, pp. 32-35 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Niku Guinea, Daisuke Toriu and Satoru Ushijima
2. 発表標題 Computational method for interactions between deformable objects and fluid flows using immersed boundary method and mass spring model
3. 学会等名 JSST 2021 Student Session Proceedings, pp. 73-76 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoru Ushijima, Junpei Ohno, Daisuke Toriu and Yuto Ueno
2. 発表標題 Particle-scale FSI computation for internal fluidization in gravel-particle bed by upward water jet
3. 学会等名 JSST 2021 Student Session Proceedings, pp. 42-45 (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

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