

jh170016-NAH

固体粒子-流体の大規模連成およびマルチスケール解析手法の 防災・減災への応用

浅井光輝（九州大学）

本研究では、地盤の浸透破壊や洗掘を予測可能とする計算工学分野における枠組みの構築を目的とし、そのために必要な精緻なマクロ・マイクロモデルの構築を行うため、両スケールを連成した粒子・流体連成解析問題における新たなマルチスケールモデルの構築を行う。また、提案するマルチスケールモデルの信頼性確保のため、マイクロモデルのまま超大規模問題を単スケールで解くことまで実施する。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

京都大学

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

参加研究者

- ・統括とマクロモデル開発
浅井 光輝（九州大学：研究代表者）
- ・マイクロモデル開発
牛島 省（京都大学）
鳥生 大祐（京都大学）
- ・マルチスケールモデルの実践
寺田 賢二郎（東北大学）
森口 周二（東北大学）
高瀬 慎介（八戸工業大学）

2. 研究の目的と意義

豪雨災害は毎年のように発生しており、これまでは豪雨被害の少なかった地域での被害も目立つようになってきた。それに伴い流体现象が関与する地盤崩壊災害が各地で多発している。たとえば、河川堤防の決壊や斜面災害は、地盤の浸透破壊と密接に関係している。また、豪雨災害以外にも津波襲来時の防波堤周辺地盤の洗掘など、流体现象が関与する地盤災害は数多く存在する。そのため、

地盤の浸透破壊や洗掘の詳細なメカニズムを解明し、それらの予測を可能とするモデルを構築することは今後の防災や減災を考える上で極めて重要な意味を持つ。

近年の計算機能力の著しい発展により、粒子・流体連成解析による直接的な現象の表現が可能となりつつあり、その有用性は学術レベルで確認されている。しかし、先の防災・減災に重要な知見を提供する道具の域には達しているとは言い難い。浸透・洗掘現象の予測シミュレーションの難しさの主な原因としては、異なるスケールの現象が密接に関連していることが挙げられる。このため本研究では、まず地盤の浸透破壊や洗掘問題におけるマイクロ・マクロスケールを以下のように定義することにした。

マイクロモデル・・・各土粒子の形状までを忠実にモデル化し、各土粒子は粒子間の接触力に加えて周辺の流体から受ける力を受けて、個別に運動することを表現する素過程モデル。

マクロモデル・・・堤防全体の崩壊を再現するために、粒子の集合体をある代表粒子で置き換えてマクロ的な浸透・洗掘現象の表現に特化した疎視化モデル。(流体现象は透水係数を用いてマクロ的な表現し、また土粒子の運動は抗力モデルなどを用いてマクロ的な力を概算したモデルを採用することが多い。)

最終的な目標は、「地盤の浸透破壊や地盤

の浸透破壊や洗掘を予測可能とする解析の「枠組み構築」とする。このためにも、精緻なマクロモデルの構築が必要不可欠であり、①両スケールを連成した粒子・流体連成解析問題における新たなマルチスケールモデルを構築する。また、②提案するマルチスケールモデルの信頼性確保のため、ミクロモデルにより単スケールのまま超大規模問題として解くことで、①マルチスケールの数値参照解を創造することを目指す。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究により、河川堤防の決壊や斜面災害などの地盤崩壊現象を土粒子と流体の連成解析として定式化し、大規模な計算資源を活用することによって、従来不可能であった詳細かつ正確な災害予測を行うことができれば、被害規模を適切に把握し、災害対策を事前に提案することが可能となる。このような意味で、本研究の社会的な意義は極めて大きい。

また、土粒子と流体の連成解析を大規模スケールで実施することは、以下の理由からも計算機科学としても新規性があり、科学の発展に貢献できる。

まず、土粒子と流体といった異なる物理現象を強連成問題（双方向連成）として解析するため、各物理シミュレーションに相当する計算負荷バランスを考えながら動的負荷分散を実施しなければ、高い並列性能は出せない困難な問題である。これに対しては、京都大学・学術情報メディアセンター所属の牛島らが先行して研究しており、この成果を他の手法へと転用することで、粒子法、あるいは有限要素法による連成ソルバーにも反映させる。また固体粒子の解析はラグランジュ的に解くため、初期配置による領域分割ではなく、領域分割方法も更新しながら並列解析を実施する必要がある。以上のように並列解析としても未だに研究開発中の内容を含む研究課題であるため、計算機科学としても意義

は極めて大きい。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

当拠点公募型研究については、平成 21 年度後期の試行段階から、土木学会の分野横断的な複数の計算力学研究者と構成拠点の計算機科学研究者の協調的な体制のもとで、平成 28 年度まで継続的に共同研究を展開している。申請課題名等は研究の進展とともに変遷しているが、いずれも「計算力学」をキーワードとして、順調に発展的な成果が得られている。

近年では、防災・減災のための計算力学をキーワードに研究が行われており、様々な物理現象が複合的に連成し、時間・空間スケールも大規模になる自然災害予測シミュレーションを合理的に取り扱う解析手法の確立、災害被害の予測精度の向上のため、津波による複合災害現象、雪崩災害に焦点を絞り、広範囲の自由水面流れを取り扱える平面 2 次元の浅水長波方程式と、局所的に詳細な計算が行える 3 次元の粒子法との連成解析手法を提案し、その高速化を行ってきた。また、津波漂流物輸送に着目し、流体・固体間の力学連成を考慮できる並列解析手法を構築し、四面体要素で表現される多数の任意形状の物体運動を取り扱う連成手法の並列化を行った。

平成 28 年度においては、学術論文 3 編、国際会議 6 件、国内会議 9 件（招待講演 2 件含む）の研究成果を公開している。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 防波堤マウンド内の浸透流解析

防波堤を模擬した実験装置を用いた浸透流実験を再現解析することで、流体解析手法の妥当性の確認を行った。

実験モデルを図-1 に示す。釜石湾口の防波堤の 1/100 スケールの実験モデルとなっており、実験ではマウンド内に 17 の圧力センサーが配置されており、圧力の時刻変化を記録した。港内側の水位は一定に保たれており、港外側の水位を上昇させることで防波堤前

後に水位差 Δh を発生させ、マウンド内に浸透流を発生させている。流体に水道水、マウンドは平均粒径 3.1mm の砂を用いて形成しており、その間隙率は 0.498 である。本実験は圧力センサーの観測誤差を考慮して 2 回行い、水位差 $\Delta h = 10\text{cm}$ とした。また実験と解析との比較には式(1)で示されるピエゾ水頭 H と用いて行っており、基準面高さ z は45cmとした。

$$H = \frac{P}{\rho_f g} + z \quad (1)$$

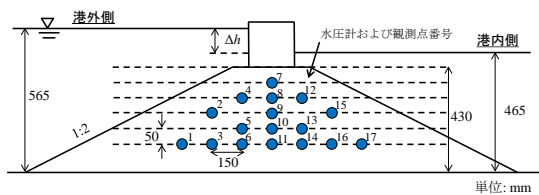


図-1 実験モデル

解析は実験と同じ規模かつ3次元問題として設定し、図-2 に示す解析モデルを用いた。なお、解析モデルでは港外側および港内側の両者の水位を一定に保つため、側方に流出させるように側壁の高さを変化させており、実験とは条件が多少異なるが、この流出量は全体の流入量から比較してわずかなものであり、ピエゾ水頭の比較においては影響が小さいものとする。溢れた水粒子はタンクに戻すことで水粒子循環を行っている。またタンク流出部においてマウンド同様の多孔質体を模擬した領域を設定することで、タンクからの流入水を整流させた。本解析ではパイピング破壊判定に着目しているため、マウンドを形成する DEM 粒子配置に関しては簡易的に規則配置とした。各解析パラメータは表-1 に示す。

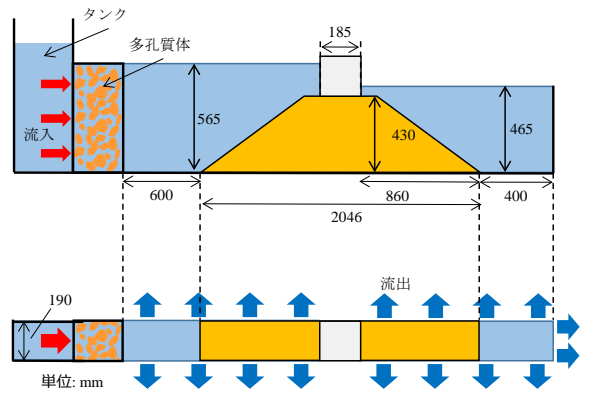


図-2 解析モデル 上：側面図 下：平面図

表-1 浸透流解析パラメータ

水粒子数	初期粒子間距離 (cm)	密度 (g/cm ³)	時間増分 (s)
382,000	1	1	0.0005

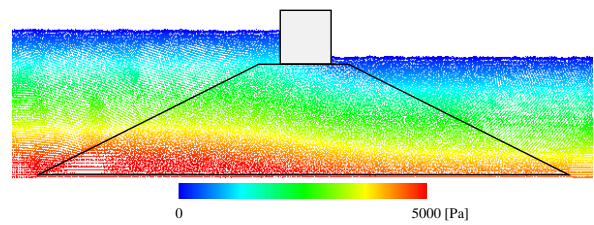


図-3 解析圧力分布

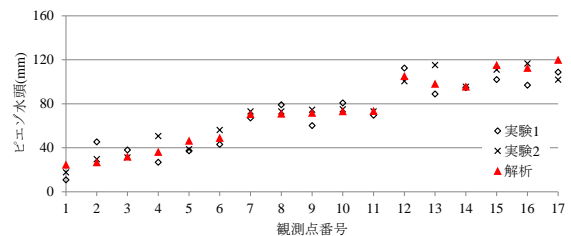


図-4 実験と解析でのピエゾ水頭分布グラフ

図-3 に解析での圧力分布、図-4 に実験と解析でのピエゾ水頭分布グラフを示す。図-3 より、防波堤前後で水位差があることによるマウンド内での圧力の変化が確認でき、安定的な圧力分布が解析より得られていることが確認できる。また図-4 のピエゾ水頭の比較グラフでは、実験において港外側から港内側に向かってピエゾ水頭が増加していることが確認できる。解析においても同様の傾向が確認でき、またその値も実験値と良好に一致

していることが確認できる。

以上より、流体解析の妥当性が確認できたと考える。

(2) パイピング破壊実験の再現解析

防波堤の浸透流実験では、水位差 $\Delta h = 10\text{cm}$ を与えることでパイピング破壊が発生し、最終的にはケーソンが転倒した。パイピング破壊解析フローに従い、パイピングが発生したと判断された DEM 粒子のみを DEM による運動解析を実施した。なお、実験では平均粒径 3.1mm の土粒子を用いているが、同様の粒径で解析を行うと DEM 粒子数が非常に多くなり、解析時間の問題で行うことが出来なかったため、DEM 粒子径は実験よりも大きく(約 3 倍)することで解析コストを削減した。この際、実際の土粒子とは粒径が異なるために DEM 粒子が移動しないことが予想されたため、パイピング判定された土粒子密度はマウンド内初期間隙率 $\varepsilon_0 = 0.498$ を用いて $\bar{\rho}_s = (1 - \varepsilon_0)\rho_s$ とした。パイピング発生後の間隙率に関しては、固定 DEM 粒子が存在する領域では前節同様に実験値とし、動き出した DEM 粒子が存在する場合は実際の DEM 粒子配置より得られる間隙率を用いて解析を行う。解析パラメータを表-2 に示す。

本解析ではマウンドがパイピング破壊後に流されていく過程を追う解析であり、接触問題が支配的ではないことを考慮して、ISPH 法による流体計算が安定して解析でき、また単体 DEM 粒子の解析を通して、設定した時間増分において反発係数に沿った挙動を示すようにバネ定数を設定した。摩擦係数に関しては同実験中に形成された水中斜面角を考慮して設定した。今回は土粒子のパイピング後の堆積状態には着目していないため間接的に摩擦係数を設定したが、堆積状態まで解析する際は適切な粒度分布を持つ DEM 粒子を用いた安息角実験等の再現解析を事前に行い、係数を設定することも必要であると考え、パイピングが生じた際の実験結果と解析結果

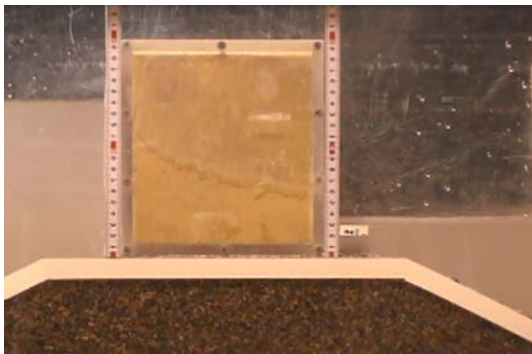
を 図-5、 図-6、 図-7 に示す。

表-2 解析パラメータ

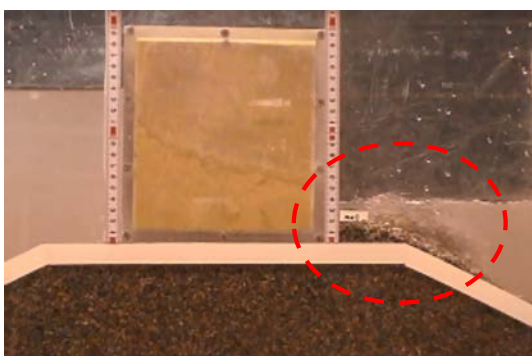
SPH		
水粒子数	初期粒子間距離 (cm)	密度(g/cm ³)
382,000	1	1
DEM		
土粒子数	土粒子径(cm)	初期密度 (g/cm ³)
117439	1	2.6
反発係数	バネ定数(N/m)	摩擦係数
0.5	1000	1
		転がり摩擦
		0.1

実験において、港内側の防波堤マウンド下端右端よりパイピング破壊が生じており、そこから土粒子が噴き出している現象が確認できる。実験では最終的に水の筋道がケーソン下に進行することでケーソンが傾き、崩壊した。現時点での解析モデルでは、ケーソンは固定した固体壁粒子として SPH 法の解析を実施しているとの制約から、ケーソンの倒壊までは再現できていない。しかし、パイピングが実験と同様の箇所で見られ、土粒子が噴き出す現象を定性的に再現できていることが確認できる。またパイピングは水の流れと逆に進行していくことが一般的に知られているが、解析においてもパイピングがマウンド下に進行しており、パイピング特有の現象との一致が確認できる。図-7(b)は DEM 粒子の間隙率分布を示している。図中の青色以外の粒子が DEM 解析を実施している粒子と対応しており、赤色の粒子は間隙率が 0.8 を越えていると判定され、高間隙率状態での抗力モデルを採用した粒子であることを示している。土粒子の噴き出す量の比較やパイピング破壊開始時間といった定量的な評価にはまだ議論の余地が残

されているが、パイピング現象が本解析手法を用いることで定性的に再現可能であることが確認できた。



(a) パイピング初期段階



(b) パイピング進行段階

図-5 実験結果

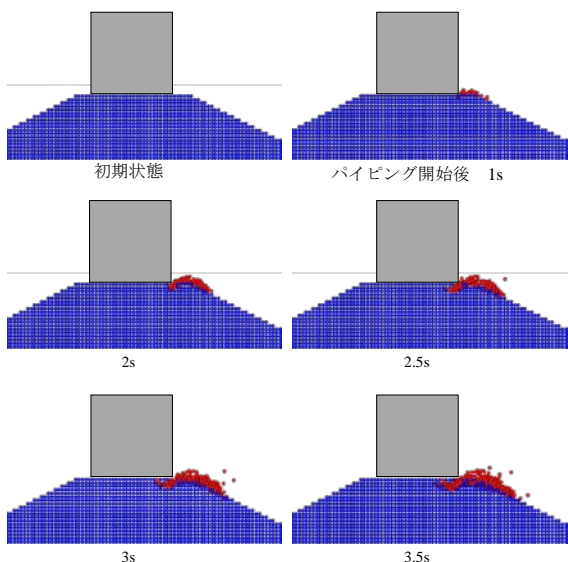
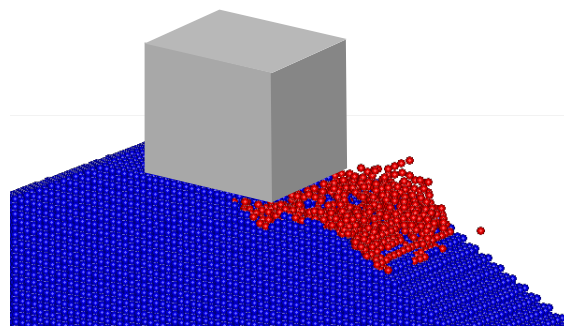
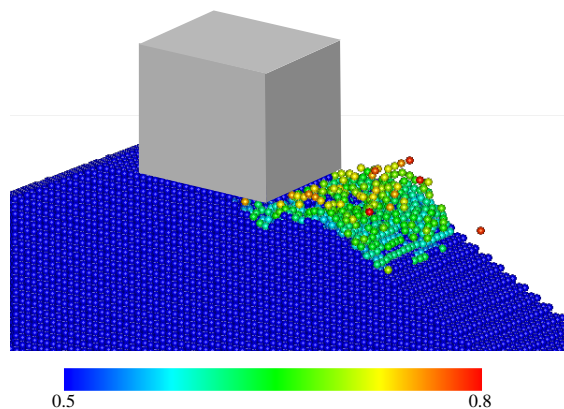


図-6 解析結果 横断面図
赤：パイピング判定粒子



(a) パイピング判定粒子分布



(b) 間隙率分布

図-7 解析結果 俯瞰図

(3) 水柱崩壊による礫群輸送解析

3次元固気液多相場の並列計算手法 MICS¹⁾を用いて、水柱崩壊流れによる礫群輸送の大規模数値実験を行った。本研究の数値解法では、礫は四面体要素の集合体として表される。この四面体要素は、例えば礫の慣性テンソルや流体力の計算に利用される。また、礫同士の衝突を考慮するために、複数の接触判定球を礫の表面近傍に配置した。この接触判定球を利用して個別要素法による礫同士の衝突計算を行う。

計算領域を図-8に示す。図-8の L_1 , L_3 , L_u , H_b , H_d , D はそれぞれ、2.200, 0.585, 0.600, 0.460, 0.085, 0.080 mとした。また、計算領域の奥行き (x_2) 方向長さは 0.16 [m]とした。以上の計算領域に対し、流体計算セル数は $1,428 \times 104 \times 376 (= 55,840,512)$ とした。

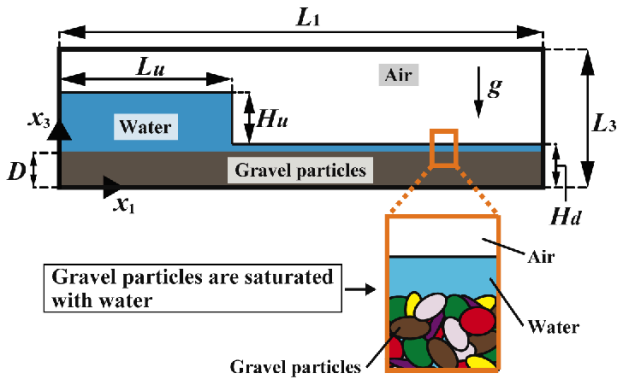


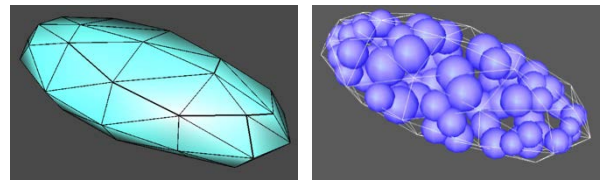
図-8 水柱崩壊による礫群輸送の計算

既報²⁾では、水理実験で使用した 500 個の礫形状を計測し、26 種類の礫モデルを作成しており、本研究でも同様の礫モデルを合計 107,716 個用いた。この礫モデルの寸法は、長径 a 、中径 b 、短径 c の 3 つで表現される。図-9 に示されるように、長径は各礫の最大長さであり、中径、短径は長径が計測された軸に垂直な断面における最大長さとして最小長さである。26 種類の礫モデルにおいて各径の範囲は、 $8.02 \leq a \leq 16.8$ 、 $6.16 \leq b \leq 8.70$ 、 $3.70 \leq c \leq 6.27$ (単位: [mm]) である。また、礫の物性値や個別要素法のパラメータについても既報²⁾と同様の値を設定した。



図-9 実験で使用した礫の写真と各径の設定方法

図-10 に 26 種類の礫モデルの内の 1 つを示す。先にも述べたように、本研究では礫の形状は四面体要素の集合体として表現され (図-10 (a))、礫同士の衝突を扱うために礫の表面近傍に多数の接触判定球が配置される (図-10 (b))。既報²⁾では、この礫モデルを用いて水中の礫群斜面崩壊計算を行い、球形の礫モデルを用いた場合よりも斜面勾配が実験値とよく一致することを確認している。

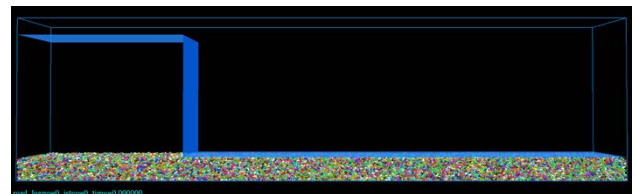


(a) 四面体要素 (b) 接触判定球

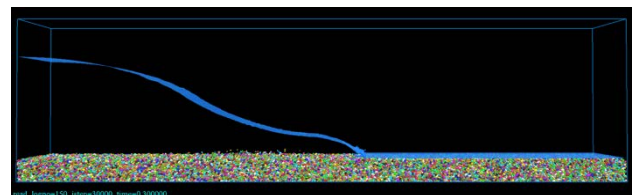
図-10 礫モデルを構成する四面体要素と接触判定

本研究の計算では、MPI と OpenMP によるハイブリッド並列処理を用いた。なお、OpenMP によるスレッド並列処理は、気液相の圧力の連立一次方程式を計算する際に用いられる。MPI による並列プロセス数 (領域分割数) は $51 \times 4 \times 8 (=1,632)$ 、OpenMP によるスレッド並列数は 1 プロセスあたり 3 とし、合計 4,896 コアを利用した。なお、5.8 秒までの現象を計算するために要した計算時間は約 315 時間であった。

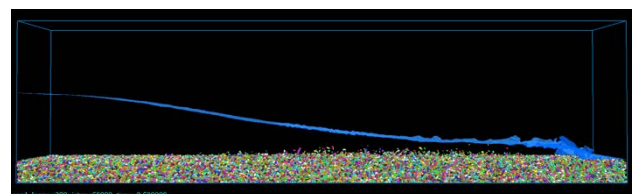
図-11 と図-12 に礫群輸送過程の計算結果を示す。図-11 は計算領域を側面 ($x_1 - x_3$ 平面) からの視点 (View-1)、図-12 は流下方向からの視点 (View-2) で可視化した結果である。また、図-11、図-12 において礫粒子の色は 26 種類の礫モデルに対応している。



(a) $t = 0.00$ s

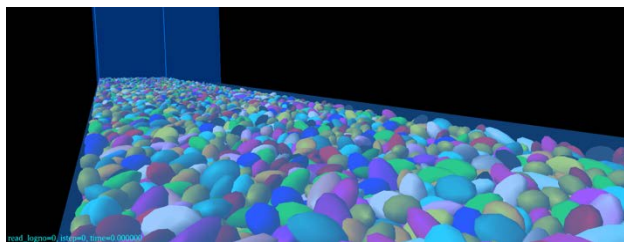


(b) $t = 0.30$ s

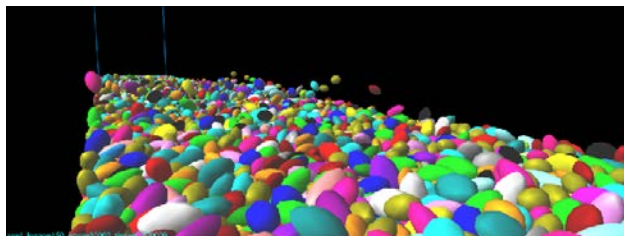


(c) $t = 0.58$ s

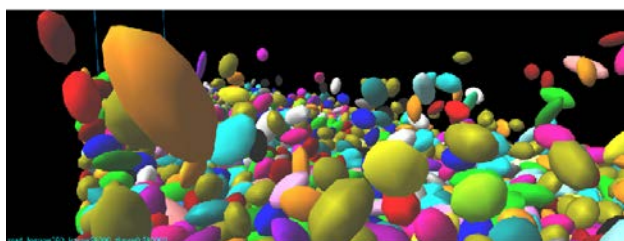
図-11 自由液面と礫群輸送の計算結果



(a) $t = 0.00$ s



(b) $t = 0.30$ s



(c) $t = 0.58$ s

図-12 自由液面と礫群輸送の計算結果

本研究では、計算により得られた礫群に作用する接触力、流体力を粗視化して表示し、礫群輸送との関係を考察した。この粗視化には、図-13 に示される「粗視化セル」を用いた。なお、粗視化セルの大きさは、 $l_1 = l_3 = 5.0 \times 10^{-3}$ m とした。複数の礫粒子や壁が接触する場合、1つの礫粒子に複数の接触力が作用する。そこで、接触力の粗視化では、まず各礫粒子それぞれについて作用する接触力ベクトルの絶対値の総和 $P_{c,k}$ を計算する。ここで、 k は礫粒子の番号を表す。次に粗視化セル内で $P_{c,k}$ について総和をとり、粗視化セル内に含まれる礫粒子の重心点の個数 N で除して平均化した値を粗視化された接触力 \bar{P}_c とする。一方、流体力は礫粒子の重心点でのみ定義されるため、粗視化セル内に含まれる礫粒子に作用する流体力ベクトルの絶対値の総和を N

で除し、これを粗視化された流体力 \bar{F}_f とする。

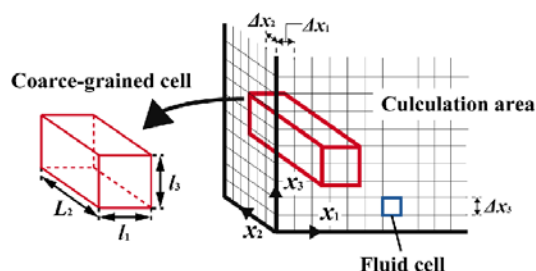


図-13 接触力と流体力を粗視化するためのセル

まず、粗視化された接触力 \bar{P}_c の分布を図-14 に示す。図-14 より、水の前縁位置が流下方向に移動するのに伴い、礫層内部で \bar{P}_c が大きな領域も流下方向に移動していく様子が確認できる。これは水の前縁付近の水位差によって圧力勾配が生じ、これによって礫層が流下方向に押し固められていることが原因であると考えられる。次に、図-15 に渦度ベクトルの大きさ V_r の分布、図-16 に粗視化された流体力 \bar{F}_f の分布を示す。なお、図-15 において V_r は $x_2 = 0.080$ m 断面における分布であり、礫モデルは $0.072 \leq x_2 \leq 0.088$ m に含まれるもののみ描画している。図-15 では、礫層上面付近や輸送されている礫モデルの下流側で V_r が高い領域が確認できる。 V_r が高い領域では圧力が低くなるため、上記の結果から礫モデルの周囲には圧力差が生じていると考えられる。また、図-16 から同領域で \bar{F}_f も大きな値を示していることがわかる。以上の結果から、先に述べた礫モデル周囲の圧力差が礫モデルに作用する流体力となり、流下方向へ礫群が輸送されると考えられる。

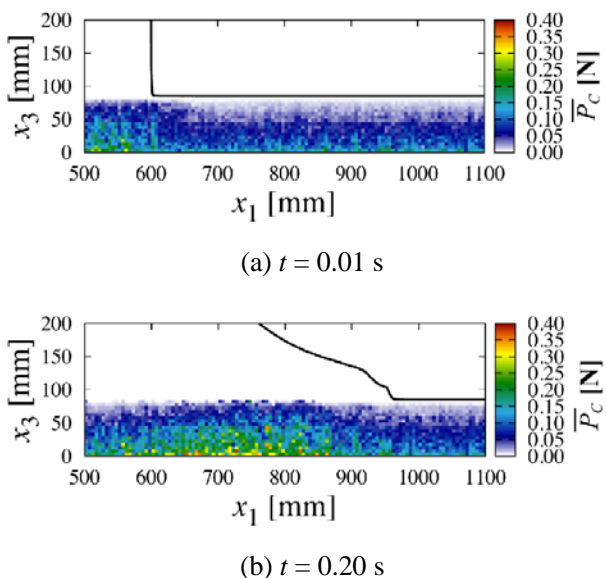


図-14 \bar{P}_c の分布と水面形状

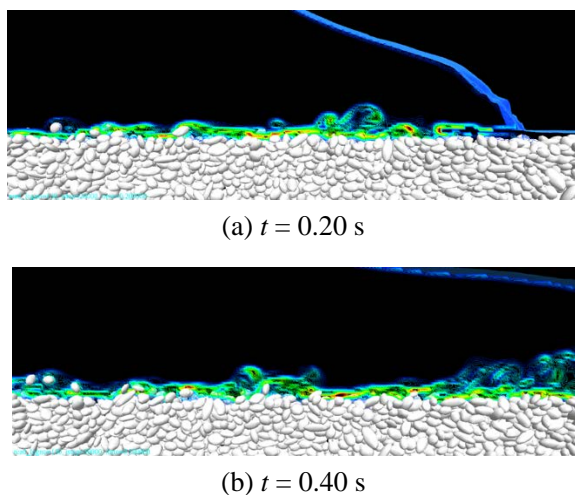


図-15 $x_2 = 0.080$ m 断面における渦度ベクトルの大きさの分布 ($0.072 \leq x_2 \leq 0.088$ m に含まれる礫モデルのみ描画)

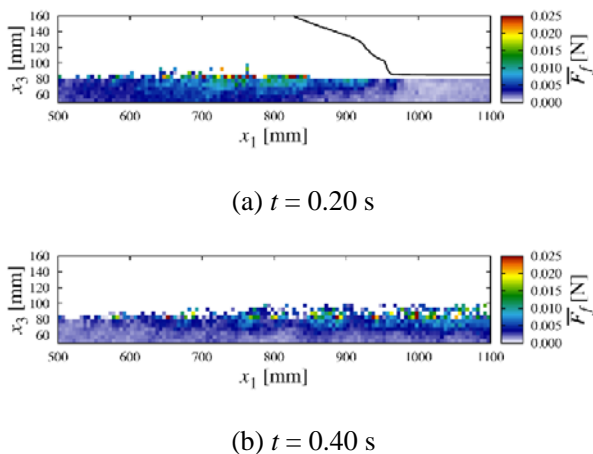


図-16 \bar{F}_f の分布と水面形状

(4) 粒子群中の浸透解析

境界埋め込み法 (IBM: Immersed Boundary Method)³⁾⁴⁾を用いた粒子と流体の相互作用を表現する数値解析の枠組みにより、粒子群中の浸透解析を実施するとともに、その結果を分析した。IBM は構造メッシュの中で、メッシュを任意の方向に横切る物体表面を扱うことができる。図-17 は IBM のイメージ図を示したものであり、図中の Lagrangian point と呼ばれる物体表面に配置された計算点で固体と流体の相互作用を表現する。この解析は、粒子表面の流れを詳細に表現可能な微視的レベルの直接計算であり、計算解像度が非常に高い。特に、地盤材料の透水係数が流れによってどのように変化するかを確認することを目的として実施しており、これにより、レイノルズ数の高い地盤材料の洗掘などの状況下での透水係数のモデル化に対する知見の蓄積を目的として研究を進めた。

図-18 は本解析で用いた解析モデルのイメージ図である。解析領域内部に均等粒径の粒子をランダムに配置し、一定の動水勾配を表現するために流入面と流出面の圧力を固定し、側面は周期境界としている。

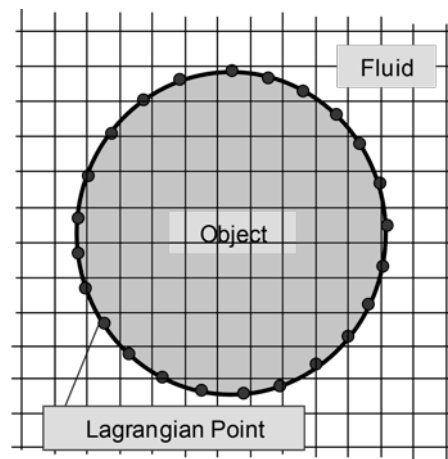


図-17 IBM のイメージ図

流体計算には矩形メッシュを採用しており、メッシュの1辺の長さが粒子直径の1/15となるように設定している。つまり、1粒子の大きさの3次元空間を約3000のメッシュで分

解していることを意味しており、本研究では最大 500 個の粒子を配置した計算を行っているため、最大で 150 万メッシュ以上の計算を行っていることになる。このような高解像度の計算により、粒子周りの流体挙動の詳細な表現を可能としている。なお、先述のように、ランダム配置の条件では、側面において周期境界を適用する必要があるが、粒子配置についても側面付近は周期境界となるように設定する必要がある。これを達成するために、粒子の配置は個別要素法 (DEM) を用いたランダムパッキングの計算結果から生成した。この際、側面を周期境界条件として自由落下により粒子をパッキングしている。

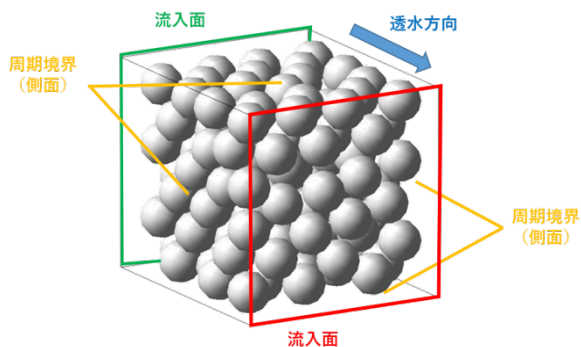


図-18 透水解析モデルのイメージ図

図-19 は、実際に解析に用いたモデルであり、粒子数がそれぞれ 125, 250, 375, 500 の異なる 4 種類とした。DEM による自由落下解析で得られた粒子配置であるため、間隙比や透水距離 (解析モデルの長さ) を完全にコントロールできていないわけではないが、粒子数が 125 のモデルを 1 倍モデルと定義し、250, 375, 500 の粒子数のモデルを、それぞれ 2 倍モデル、3 倍モデル、4 倍モデルと呼ぶことにする。これらのモデルについて、流入面と流出面の圧力差を様々に変化させて透水シミュレーションを実施し、レイノルズ数の変化に伴う透水係数の変化を確認する。なお、透水係数は、透水シミュレーションの流入面と流出面の圧力差と透水距離から求められる動水

勾配および流出面の平均流速から算出されるものであり、解析モデルを均質な材料として考えた場合の透水係数を意味する。

図-20 は、実際に用いた解析モデルであり、粒子数がそれぞれ 125, 250, 375, 500 の異なる 4 種類とした。DEM による自由落下解析で得られた粒子配置であるため、間隙比や透水距離 (解析モデルの長さ) を完全にコントロールできていないわけではないが、粒子数が 125 のモデルを 1 倍モデルと定義し、250, 375, 500 の粒子数のモデルを、それぞれ 2 倍モデル、3 倍モデル、4 倍モデルと呼ぶことにする。これらのモデルについて、流入面と流出面の圧力差を様々に変化させて透水シミュレーションを実施し、レイノルズ数の変化に伴う透水係数の変化を確認した。なお、透水係数は、透水シミュレーションの流入面と流出面の圧力差と透水距離から求められる動水勾配および流出面の平均流速から算出されるものであり、解析モデルを均質な材料として考えた場合の透水係数を意味する。

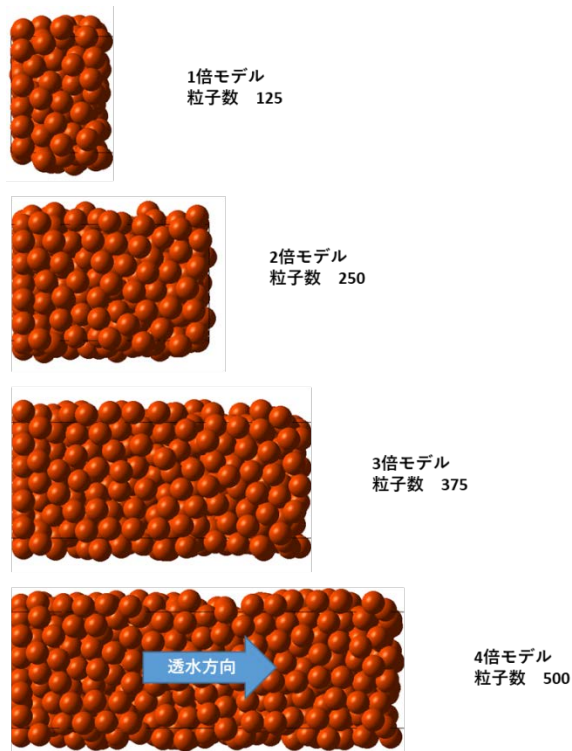


図-19 解析モデル

先述の 4 種類の解析モデルを用いた結果か

ら得られる流速場を可視化したものを図-20 に示す。それぞれのケースにおいて、粒子がある状態および粒子がない状態で流速場を可視化した図を示している。透水方向の速度成分の空間分布を表現することで流速場の可視化を行っており、透水距離が長くなるにつれて透水経路も複雑になっていることが確認できる。

図-21 は、動水勾配の値を様々に変化させて、各レイノルズ数の条件で各解析モデルから出力される透水係数を算出し、レイノルズ数と透水係数の関係を整理したものである。なお、レイノルズ数を変化させている幅が大きいため、横軸のレイノルズ数は対数軸としている。また、先述のように、透水係数は流出面における平均流速から算出しており、レイノルズ数は流出面における平均流速、粒子径、流体の動粘性係数から算出されたものである。

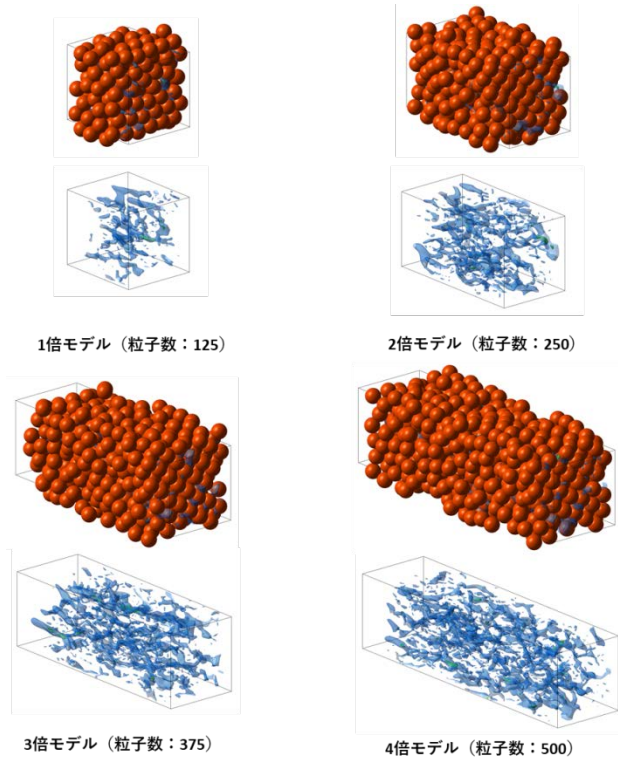


図-20 解析結果 (上: 粒子+流れ場, 下: 流れ場のみ)

図中の 1 つの点が 1 つの解析ケースの結果

を意味しており、この結果を得るために多数の解析ケースを実施している。粒子配置は DEM によるパッキング解析の結果から得られたものであるため、間隙比や透水長さは完全にコントロールできず、特に透水長さが短い 1 倍モデルや 2 倍モデルでは透水長さの評価に誤差が発生しやすい。そのため、すべてのモデルで透水係数は一致しないが、ダルシー流れから非ダルシー流れへの遷移、および非ダルシー流れの領域における透水係数の低下はすべての解析モデルについて同様の傾向が確認できる。すなわち、ある一定のレイノルズ数以下では一定の透水係数となるのに対して、それ以上のレイノルズ数の条件下でダルシー則から透水係数を算出した場合、理論的に得られる透水係数よりも低い値となる。この傾向は、ダルシー流れから非ダルシー流れへの遷移に関する研究^{例え、5) 6) 7)}の知見ともよく整合しており、結果の信頼性は高いと判断される。

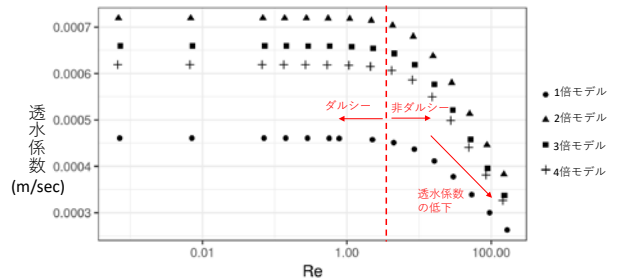


図-21 レイノルズ数と透水係数の関係

ここで、図-21 の結果に基づいて、透水係数の非線形性をモデル化することを念頭に置き、分析を進める。地盤の洗掘解析などの際に透水係数を含む相互作用項を考える場合 (Darcy-Brinkman モデルなど) があるが、透水係数の非線形性は考慮されていないのが現実である。しかし、高レイノルズ数領域では、非線形性が卓越し、結果として透水係数が低下する。先述のように、このことは実験的にも証明されている事実であり、今後の土と水の相互作用を表現する数値解析の中では、

この効果を見逃すことができない場合も多々あると推察する。そのため、透水係数の非線形性のモデル化が必要となるが、ダルシー流れにおける透水係数の推定式ですら数多くのもが提案されており、統一的なモデルはないのが現状である。そこで、本研究では、ダルシー流れの透水係数については、既知のものとして、その値を基準として非線形挙動を考える方針とした。これが可能であれば、現状の数値解析で用いられる透水係数の情報を活用しつつ、非線形性を表現できる可能性がある。この方針に従い、図-21 の透水係数とレイノルズ数のデータについて、各モデルから得られる透水係数の値をダルシー流れの透水係数（概ねレイノルズ数が 1.0 よりも小さい領域の透水係数）で除して正規化した。この結果を図-22 に示している。すなわち、ダルシー流れの領域では透水係数は 1 となり、非ダルシー域の透水係数の低下は、ダルシー流れの透水係数に対する割合として表現される。この結果より、すべての解析モデルの結果がほぼ同一直線上にあることが確認できる。つまり、ダルシー流れの透水係数（通常、地盤の数値解析などで使われる透水係数）とレイノルズ数の情報から、どの程度透水係数が低下するかを評価できる可能性が示唆される。現段階では、限られた条件の中での議論であるため、今後更なる検証が必要ではあるものの、レイノルズ数と正規化した透水係数の空間でのモデル化が有益であるという可能性が高い。

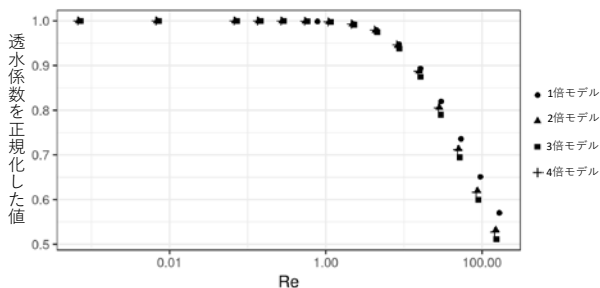


図-22 レイノルズ数と透水係数の関係
(ダルシー流れの透水係数で正規化)

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

まずマクロモデルの妥当性確認を実施するため、粒子法によるパイピング破壊実験との比較検討を実施した。信頼性のあるマクロモデルと粒子サイズを実際の粒子サイズより大きく設定した粗粒子モデルを設定できれば、水-土連成挙動の解析を精度よく実施できることを示した（主に九州大学の成果）。次にミクロモデルの開発においては水柱崩壊による礫群輸送解析において、3次元固気液多相場の並列計算手法 MICS¹⁾を用いて水柱崩壊流れによる礫群輸送の大規模数値実験を行い、礫粒子群に作用する接触力や流体力を可視化して粒子運動のメカニズムを考察した。今後は本研究で得られた知見を基にして、新たな土砂輸送量の算定式を提案すべく検討を進める（主に京都大学の成果）。最後にマルチスケール解析へ向けた数値実験によるマクロ特性評価法の開発として、IBMを用いて、粒子群中の浸透解析を実施し、その結果を分析することで粒状体の透水係数の非線形性のモデル化について議論を進めた。マルチスケールモデル化の方針がある程度定まったが、地盤材料の透水係数をモデル化する上では、粒度分布や間隙比などの影響についても調べる必要がある。今後はそれらに関する検証を進める予定である（主に東北大学・八戸工業大学の成果）。

以上、防災・減災といった社会的重要性の高い問題に対する固体粒子-流体の大規模連成およびマルチスケール解析手法の開発を4組織で連携しながら研究を進め、共通の事項についての議論を交わしながら、各担当部分について十分な研究成果が得られた。今後は特に信頼性・妥当性確認を実施し、マルチフィジックス問題に対する信頼性を確保し、実際の防災・減災に資する解析ツールへと発展させていく予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. 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) 特集号, Vol. 73, No. 2, pp. I_377-I_386, 2017.
2. Ikkoh Tachibana, Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takayuki Aoki, Kohji Kamiya, and Takeshi Kodaka, Characterization of transition from Darcy to non-Darcy flow with 3D pore-level simulations, Soils and Foundations. Vol. 57, Issue 5, October 2017, pp.707-719, 2017.
3. 小笠原圭太, 浅井光輝, 古市幹人, 西浦泰介, 大規模津波遡上解析に向けた安定化 ISPH 法の陽的時間積分スキーム, 土木学会論文集 A2(応用力学) 特集号, Vol. 73, No. 2, pp. I_397-I_404, 2017.
4. 原崎健輔, 浅井光輝, 合田哲朗, 笠間清伸, 西浦泰介, SPH-DEM カップリング解析による防波堤マウンドのパイピング破壊解析, 土木学会論文集 A2(応用力学) 特集号, Vol. 73, No. 2, pp. I_295-I_304, 2017.
5. 原崎健輔, 浅井光輝, SPH-DEM による固液混相流解析の妥当性確認と粗視化粒子モデルによる洗掘現象解析, 日本計算工学論文集, 2018 巻, p. 20182001, 2018.
6. Yi Li, Mitsuteru Asai, Fluid-rigid body interaction simulation based on a stabilized ISPH method incorporated with the impulse-based rigid body dynamics, 日本計算工学論文集, 2018 巻, p. 20182010, 2018.
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
1. Satoru Ushijima, Daisuke Toriu, Multiphase model to predict fluid-solid interactions in environment and disaster problems with parallel computations, The 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), October 2017, Chengdu, China.
2. Ikkoh Tachibana, Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takayuki Aoki, and Takeshi Kodaka, Pore-Scale Direct Numerical Simulation on Seepage Flow through Granular Structure, The 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), October 2017, Chengdu, China.
3. Ikkoh Tachibana, Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takayuki Aoki, Kohji Kamiya, and Takeshi Kodaka, Numerical investigation on the characteristics of flow in granular materials, 1st Porous Media: Experiments and Simulation (PMES2017), September 2017, Queensland, Australia.
4. Ikkoh Tachibana, Shuji Moriguchi, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takayuki Aoki, Kohji Kamiya, and Takeshi Kodaka, AOS-Fall 2017, November 2017, Seattle, USA.
5. Kensuke Harasaki, Mitsuteru Asai, Development of a fluid-solid multiphase flow simulator by a SPH-DEM coupled method for simulating a seawall destruction due to soil foundation scour, Particle 2017, September 2017, Hannover, Germany.
6. Keita Ogasawara, Mitsuteru Asai, Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Effective and fast large scaled Tsunami run-up analysis using explicit ISPH method, Particle 2017, September 2017, Hannover, Germany.
7. Mitsuteru Asai, I. Nur Ain, Multi-scale and -physics tsunami disaster simulation for disaster prevention and mitigation, Particle 2017, September 2017, Hannover, Germany.
8. Mitsuteru Asai, Multi-scale and physics tsunami disaster simulation for disaster prevention and mitigation, The 2nd International Conference on

- Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), October 2017, Chengdu, China, (Semi-Plenary Lecture).
9. Masao Ogino, Mitsuteru Asai, Takuya Iwama, A study on parallel fluid-structure interaction simulations using a SPH code and the Adventure through REVOCAP Coupler, The 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), October 2017, Chengdu, China.
 10. Yi Li, Mitsuteru Asai, A bridge wash-out simulation using a stabilized ISPH incorporated with a multi-body dynamics based on the impulse-based contact force method, The 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), October 2017, Chengdu, China.
 11. Reika Nomura, Kenjiro Terada, Shinsuke Takase, Shuji Moriguchi, Numerical Viscosity Measurement Method for Solid-Liquid Mixture, 5th International Conference on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications, September 2017, Hannover, Germany.

(4) 国内会議発表

1. 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 年 5 月, 京都.
2. 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 年 8 月, 東京.
3. 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 年 12 月, 京都.
4. 柳博文, 榊原幸星, 鳥生大祐, 牛島省, 固気液多相連成現象のマルチフェイズ並列解法: 熱連成・柔軟物体・礫群輸送の計算, 京都大学第 12 回 ICT イノベーション (ポスター), 2018 年 2 月, 京都.
5. 橘一光, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 小高猛司, 粒子流体連成解析による地盤材料の透水係数の非線形特性分析, 第 22 回計算工学講演会, 2017 年 6 月, 埼玉.
6. 野村怜佳, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 森口周二, 流体土砂連成解析のための固液混合流体モデルの構築, 第 22 回計算工学講演会, 2017 年 6 月, 埼玉.
7. 原崎健輔, 浅井光輝, 津波による防波堤崩壊解析に向けた水-土粒子連成解析, 第 30 回計算力学講演会, 2017 年 9 月, 大阪.
8. Yi Li, 浅井光輝, 安定化 ISPH 法と撃力法による漂流物運動の解析, 第 30 回計算力学講演会, 2017 年 9 月, 大阪.
9. 原崎健輔, 浅井光輝, SPH-DEM 連成解析による水-土粒子混相流解析手法の開発第 22 回計算工学講演会, 2017 年 6 月, 埼玉.

(4) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

参考文献:

- 1) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師, 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集B, Vol. 64/II, pp.128-138, 2008.
- 2) 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.
- 3) Uhlmann, M. "An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows." Journal of Computational Physics, 209(2), 448-476, 2005.
- 4) Wang, Z., Fan, J., and Luo, K. "Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving

- particles.” *International Journal of Multiphase Flow*, 34(3), 283–302, 2008.
- 5) Fancher, G. H., and Lewis, J. A. “Flow of simple fluids through porous materials.” *Industrial & Engineering Chemistry*, 25(10), 1139–1147, 1933.
 - 6) G. J. Houben, “Review: Hydraulics of water wells—flow laws and influence of geometry,” *Hydrogeol. J.*, vol. 23, no. 8, pp. 1633–1657, Dec. 2015.
 - 7) M. Agnaou, D. Lasseux, and A. Ahmadi, “Origin of the inertial deviation from Darcy’s law: An investigation from a microscopic flow analysis on two-dimensional model structures,” *Phys. Rev. E*, vol. 96, no. 4, p. 43105, Oct. 2017.