

jh180065-NAH

## 豪雨災害の被害予測に向けた土粒子-流体-構造の大規模連成解析の国際基準 V&V 例題の確立

浅井光輝（九州大学）

河川堤防の決壊や斜面災害などの豪雨による災害の複雑な物理現象に対して、仮想シナリオを設定した被害予測が可能な数値解析への危害が高まっている。本研究では、各計算コードの V&V のうち、特に Validation のためのベンチマーク問題を意識した実験と比較検証を実施する。また、国際標準となり得る V&V 例題を本課題にて計画し、その実験データと解析データの両者を公開する。

### 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

・粒子法-DEM の開発

浅井光輝（九州大学：統括・研究代表者）

西浦 泰介（海洋研究開発機構）

・有限体積法-DEM の開発

牛島 省（京都大学）

鳥生 大祐（京都大学）

・有限要素法-DEM の開発

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）

山口 裕矢（東北大学）

### 2. 研究の目的と意義

平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害、平成 29 年 7 月九州北部豪雨など、豪雨に伴う甚大な災害は毎年のように発生しており、これまでは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。豪雨災害時には、たとえば、河川堤防の決壊、あるいは急峻な山地での斜面災害など、降雨に伴う流体だけでな

く、地盤の破壊が密接に絡んだ複雑な物理現象となり、その被害予測は困難を極める。また斜面崩壊時には、流木が被害を拡大させるなど、不確実性を含んだ自然現象であるため、災害外力だけでなく、初期値・境界値が確定的に決められないことが特に予測を困難としている。そこで複数の仮想シナリオを設定した被害予測が可能な数値解析への期待が高まっている。

一方で、近年の計算機能力の著しい発展により、粒子と流体の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。しかしながら、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。

本申請課題では、平成 29 年度の申請課題にて開発した土粒子-流体の連成解析技術をベースとし、流木等の影響を加味した構造物の被害予測に向けて、土粒子よりも大きく、かつ複雑な形状を有する構造物の被害予測を評価可能な土粒子-流体-構造の連成解析技術へと発展させる。また、各計算コードの V&V<精度検証 (Verification) および妥当性確認 (Validation)>のうち、特に Validation のためのベンチマーク問題を意識した実験との比較検討を実施した（詳細は次ページの研究計画にて説明）。こうした防災・減災に向けたマルチフィジックス解析とその大規

模シミュレーションは日本がリードしている分野であり、その地位をさらに強固に確立するためにも、国際標準となり得る V&V 例題を本課題にて計画し、その実験データと解析データの両者を公開する。

**(社会的な意義)** 本研究では、豪雨災害時に起こりうる河川堤防の決壊、橋の流失被害、土石流を伴う斜面崩壊の被害予測解析に向けて、土粒子と流体と構造物が複雑に絡んだマルチフィジックス解析ツールの確立を目指すものである。大規模な計算資源を活用することにより、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、被災規模を適切に把握しつつ合理的な災害対策を事前に提案することが可能となる。そのためにも精度検証・妥当性確認は必要不可欠なプロセスであり、その標準的な検証例題を提案しそれを Web にて (英語で) 公開することで、同分野の数値解析技術の発展に寄与するものであり、同分野での計算の世界のリーダーとしての地位の確立を目指す。

**(計算科学としての意義)** 土粒子-流体-構造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 DEM による土粒子および構造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、分割する領域を更新しながら並列解析を実施する必要がある。これは並列解析としても困難な課題であり、同分野での並列化手法について先行して研究をしている。なお、西浦 (JAMSTEC) が参画することで、これまでのボトルネックとなっていた DEM の並

列化効率の問題を早期に解消する。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

九州大学グループは粒子法-個別要素法 (DEM)、京都大学グループは有限体積法-DEM、そして東北大学グループは有限要素法-DEM をそれぞれ開発し、土粒子と流体の連成解析を実施してきた。土粒子の運動に関しては 3 グループとも DEM をベースとした解析手法であり、流体解析手法のみが異なる。各グループともに、流体解析には領域分割法等により大規模並列解析を実施しているが、固体粒子の解析のための DEM はラグランジュ的に記述するため大規模シミュレーションには課題を残している。同問題の大規模化に関しては、京都大学の学術情報メディアセンター所属の牛島グループがフラットプロセス並列による実績を多く有しており、他 2 機関が開発してきた粒子法、有限要素法と DEM との連成方法にもその成果を取りこむことで研究が加速する。また特にボトルネックとなっていた DEM の並列化手法として、スライスグリッド法と擬ニュートン法による動的負荷分散による先進的な研究を実施している西浦 (JAMSTEC) が本課題に参画することで、各組織での計算技術の並列化効率のさらなる向上を図るものであり、計算科学(情報)と土木工学(工学)が協力し、また複数組織が連携することで実施可能な研究課題である。

### 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 29 年度においては、学術論文 6 編、国際会議 11 件、国内会議 9 件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) 礫を用いた鉛直噴流巻き上げ実験と 3 次元多相場の並列計算手法による再現計算

#### ・有限体積法-DEM を用いた計算例

礫を用いた鉛直噴流巻き上げ実験を行い、3 次元固気液多相場の並列計算手法 MICS<sup>1)</sup>による再現計算を行った<sup>2)</sup>。本手法では、相平均された多相場の基礎方程式を用いて、流体計算を空間に固定されたオイラー格子で行う。礫粒子モデルは、図-1 に示されるように複数の四面体要素の集合体として表され、この四面体要素を含む流体計算セル上で多相場の運動方程式右辺の体積力、圧力および粘性力の体積積分を計算し、その総和をとることで各礫粒子モデルに作用する流体力を得る。なお、礫粒子モデルの形状については、既報<sup>3)</sup>と同様に、実験で使用した礫粒子（平均粒径は約 7 mm）から抽出した 26 種類の代表形状を用いた。礫粒子モデル間の接触力については、モデルの表面近傍に配置された接触判定球（図-1）を用い、個別要素法で計算する。なお、1 つの礫モデルを構成する四面体要素数や表面近傍に配置された接触判定球数は形

状により異なるが、いずれも概ね 100 前後である。

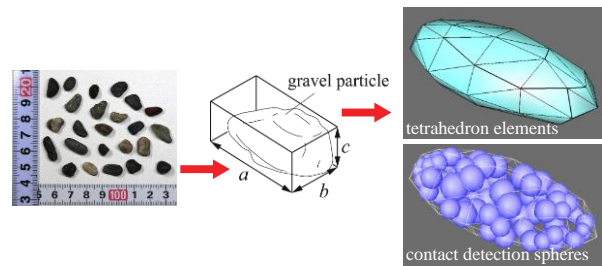


図-1 再現計算で使用した礫粒子モデル<sup>2)</sup>  
(図中の  $a$ ,  $b$ ,  $c$  はそれぞれ実験で使用した礫の長径, 中径, 短径を表す)

実験装置と計算領域の概略を図-2 に示す。実験では、2 つの堰の間に礫粒子をおよそ 80 mm の層厚になるように敷き詰め、上方から鉛直噴流を衝突させて洗掘過程を高速カメラで撮影した。また、流入停止後の  $x_2 = 0.0$  m 付近における最終礫面高さを計測した。実験は礫群の初期配置を変えて合計 5 回行った。流入条件としては、流入開始時刻を  $t = 0.0$  s とし、およそ  $t = 3.0$  s まで一定流入量  $8.9 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s、断面平均流速は約 1.2 m/s で水を流入させた。なお、本研究では非定常過程における洗掘孔の形状を明瞭に観察するために、水中に染料を混ぜて実験を行った。

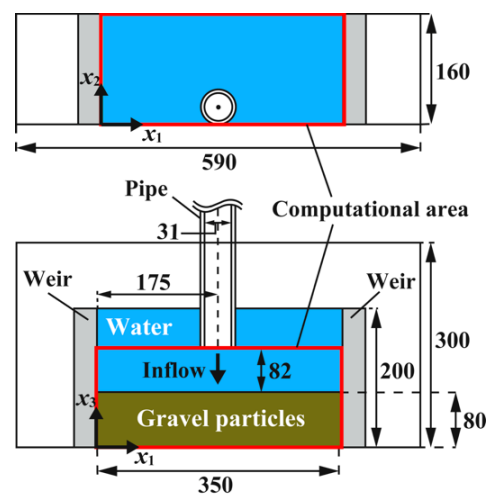


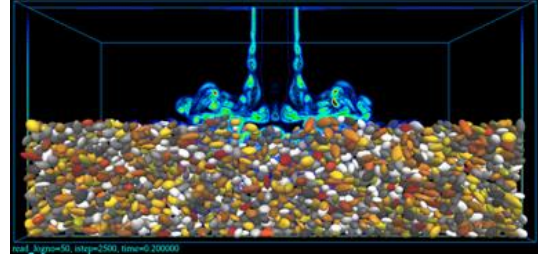
図-2 実験装置と計算領域の概略

計算領域は図-2 に示された赤線の領域とし、実験と同じ流量を領域上面から流入させた。

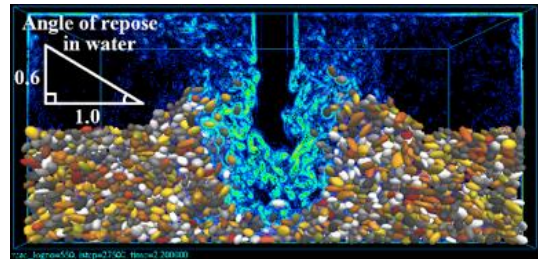
なお、計算で使用した礫粒子モデルの個数は約 16,700 であり、異なる初期配置を設定して 3 ケースの計算を行った。礫粒子モデルと流体計算セルの体積比は 374.4 であり、礫モデル周囲の流れを解析可能なセル分解能を設定した。

本研究では、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、非圧縮性流体計算における圧力の連立一次方程式を Bi-CGSTAB 法で計算する際に用いられる。計算には京都大学のスーパーコンピュータ CRAY XC40 (Intel Xeon Phi KNL, 68 cores/node, 1.4 GHz/node) を利用した。プロセス並列数は  $17 \times 8 \times 8 (= 1,088)$ 、スレッド並列数は 4 と設定し、総利用コア数は 4,352 である。

実験および計算で得られた非定常過程のスナップショットを図-3 に示す。計算結果は  $0 \leq x_2 \leq 32 \text{ mm}$  の範囲に含まれる礫粒子モデルと  $x_2 = 21 \text{ mm}$  の鉛直断面における渦度ベクトルの大きさの等値線である。図-3 (a) は噴流が礫層表面に衝突した直後の結果であり、ケース毎に若干の差異はあるものの、おおよそ  $t = 0.1 \sim 0.2 \text{ s}$  で礫粒子が動き始める傾向が計算で再現された。また、流入を停止させる直前では、図-3 (b) のように、実験と計算共に洗掘部における礫面の傾斜角度が水中安息角 (約  $31^\circ$ )<sup>2)</sup> よりも大きくなっている。また、図-3 (b) の計算結果からは洗掘部の礫面付近に大きな渦度が生じていることが分かり、渦による礫群の巻き上げと礫層の崩落が同時に進行することで、水中安息角よりも大きな傾斜角度を維持した状態となっていると推察される。その後、流入を停止させると礫層が崩落し、図-3 (c) のように、実験と計算共に洗掘部の礫面傾斜角度は水中安息角に近い状態となった。以上のように、本手法によって、鉛直噴流による洗掘の発達過程および流入停止後の埋め戻し過程の特徴を定性的によく再現できることを確認した。



(a)  $t = 0.20$



(b)  $t = 2.20 \text{ s}$



(c) 流入停止後の静止状態

図-3 実験および計算結果のスナップショット (上: 実験結果, 下: 計算結果 ( $0 \leq x_2 \leq 32 \text{ mm}$ ))

図-4 に、流入を止めて礫が概ね静止した状態での  $x_2 = 0.0 \text{ m}$  付近における礫面高さを示す。図-4 の実験結果は 5 回分の平均値であり、エラーバーは礫の平均粒径（約 7 mm）と 5 回分の実験結果のばらつきを考慮している。また、計算結果は初期配置を変えた 3 ケース分を示している。図-4 より、最終礫面形状の傾向を計算でよく再現できていること、初期配置を変えた計算結果の差異は平均粒径程度であることを確認した。

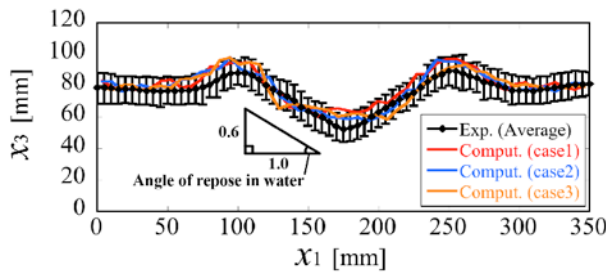


図-4 流入停止後の礫面高さの比較 ( $x_2 = 0.0 \text{ m}$  付近)

・粒子法-DEM を用いた計算例

礫を用いた鉛直噴流巻き上げ実験を粒子法 (SPH法) -DEM連成手法により解析を行った。計算条件は、有限体積法-DEMを同じ条件で行っている。礫を球体モデルでモデル化しているため、事前に転がり摩擦係数 $\beta$ を決定する必要があるため、水中安息角実験の再現解析により見積もった値 ( $\beta = 0.2$ ) を用いて鉛直噴流による洗掘の数値実験を行った。管路の流速分布を表現するため、流体解析用のSPHの粒子間隔は土粒子の平均粒径として設定したDEM要素の粒径の1/2と設定し、1/7乗則を流入流速として与えた。また、DEMの抗力計算の際に参照する流速の算出を、従来のSPH平均からDEM粒子最近傍のSPH粒子が持つ流速を参照するように変更を行った。さらに、 $\epsilon_d = 0.6$ とすることで礫表層において抗力モデルを切り替え、渦粘性により過小評価されている流速と微小な渦による局所的な流速の

影響を考慮した下式に示す渦モデルを導入することで適切な洗掘深さを得ることを試みた。

$$v_{df} = \left(1 + \frac{S}{30}\right)v_f \quad (1)$$

ここで $v_{df}$ は抗力を計算する際に用いられる流速、 $S$ はひずみ速度テンソルにより評価されたひずみ率である。

図-5、図-6は噴流開始から3.1秒後の渦モデルによる影響を比較したものである。また、図-7、図-8は噴流終了後の埋め戻しによる礫面形状を実験と比較したものである。また図-9は解析対象とする礫粒径を7.05mmから3mmに変更した際の計算結果である。

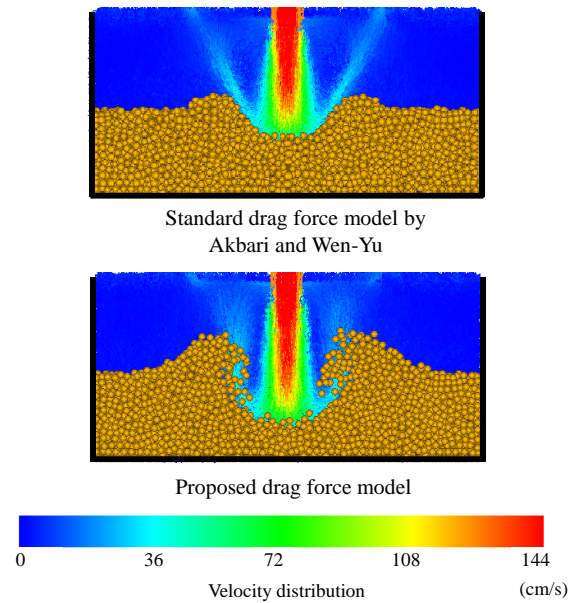


図-5 従来の抗力モデルと提案手法との洗掘形状の比較

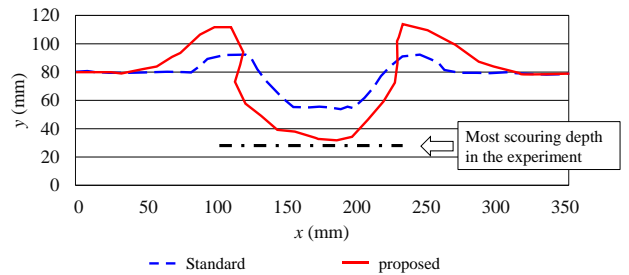


図-6 3.1 秒後における礫面高さの比較

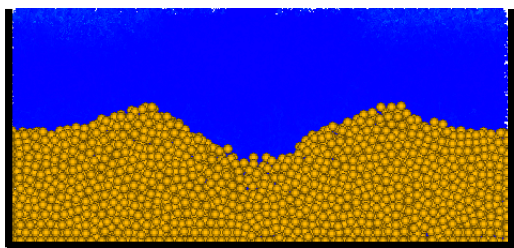


図-7 埋戻し後の礫面形状

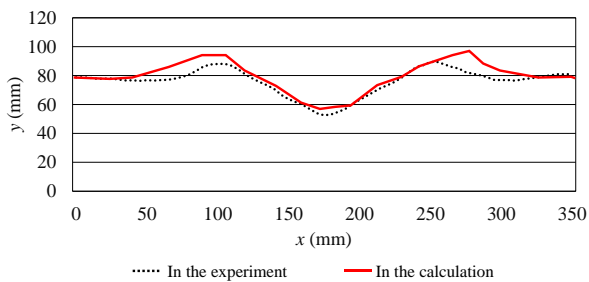


図-8 流入停止後の礫面高さの比較

SPH-DEM 連成解析手法の洗掘現象に対する妥当性確認を行うため、鉛直噴流による洗掘実験を取り上げ、その再現解析を実施した。管路内の流速分布を与え、適切な SPH 法の粒子間隔を設定することで、まずは実験と同等な流速分布を与えることができた。また、DEM における抗力計算の際に参照する流速を DEM 最近傍の SPH が持つ流速へと変更し、さらに局所的な渦の影響を考慮するために流体のひずみ率を用いて礫表面における流速に修正を行うことで、実験に近い礫の挙動を再現した。そして噴流終了後の埋め戻しによる礫面形状を概ね実験同様に再現することができた。現状では、乱流の影響を考慮した抗力の評価方法が確立しておらず、定性的に礫の移動を表現したモデルとなっている。今後は解析手法の汎用的な利用のために理論を整理し、他の例題も解くことでその有用性を確認していく。

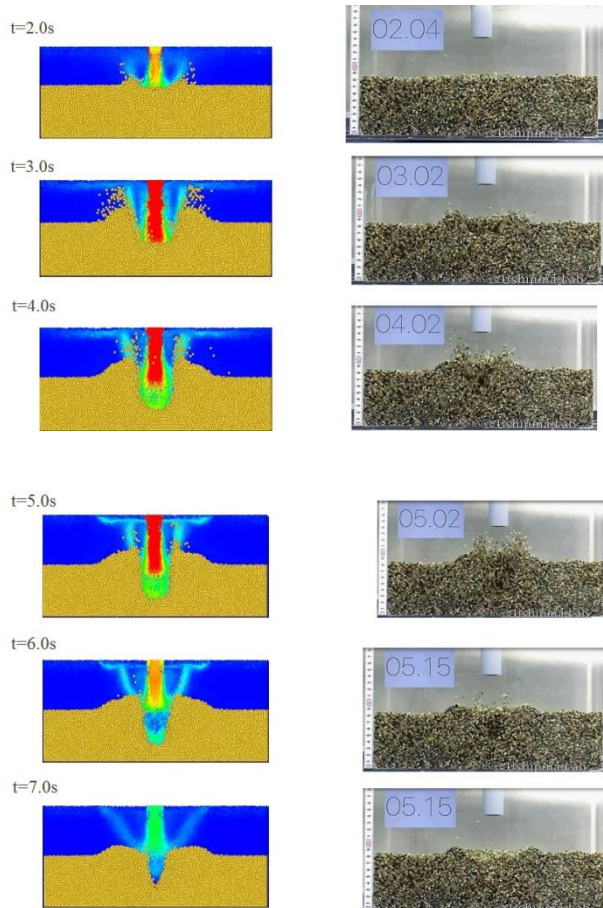


図-9 礫粒径変更後の計算結果

(2) 孤立波による砂山の洗掘・運搬実験についての再現解析

・MPM 法を用いた計算例

降雨に誘発される土砂崩れや堤防の決壊等の大規模な地盤災害の予測のためには、3 次的に複雑な土水混合体の挙動を適切に表現し得る連続体モデルによる大変形・流動のシミュレーション手法が有効であると考えられる。そこで本研究では土水混合体の大規模計算を目的とした、土と水を異なる粒子層で表現する 2 層系固液混合 MPM を提案する。

提案手法の表現性能の検証のため、流水による洗掘や運搬を伴う模型実験の再現解析を実施する。図-10 に水路実験の模式図を示す。川砂を充填したモールドを垂直に引き上げることによって水路中央に作成した砂山に対し、造波装置により発生させた孤立波を衝突させ、

その様子を記録している。また、実験の前後では砂山の形状をレーザ距離計によって計測している。数値計算モデルの砂山は、測定したデータを基に初期形状を作成し、予め 10 秒間の自重積荷を行うことによって初期条件を与える。孤立波については造波装置を粒子によって表現し、あらかじめ実験と同様に 0.6m/s で 0.4 秒間移動させることにより作成した初期条件をインプットとして与える。土は Hencky 超弾性モデルと Drucker – Prager の降伏基準による弾塑性モデル、水はニュートン流体としてモデル化する。また、非線形項を含む Darcy-Forchheime 則を採用することで、高レイノルズ数領域に対応する固液間の相互作用を表現する。格子の境界条件には、下流側は流出境界、水路の底面はノンスリップ境界、その他の面はスリップ境界を与える。

解析結果の一部を図-11 に示す。波の衝突直後に砂が下流側に大きく広がるように流動していることが分かるが、最終的には流線型に分布が変化して行くことが見て取れる。これらの傾向は実際の実験結果と概ね同様であり、土水混合体の特徴的な挙動が捉えられていると考えられる。

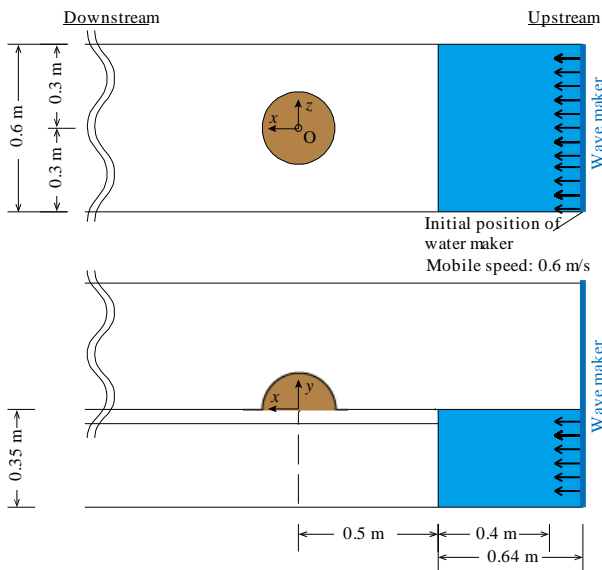


図-10 模型実験の概要

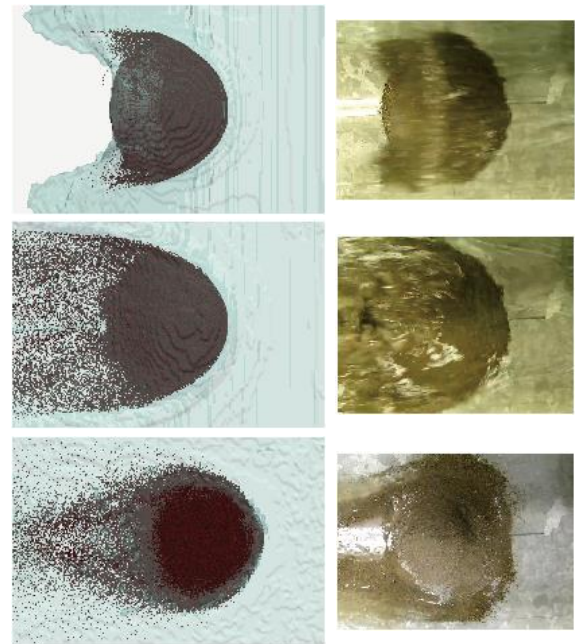


図-11 計算結果(左)実験結果(右)との比較

・ 粒子法-DEM を用いた計算例

SPH-DEM 連成解析手法に新たに含水に伴う見かけの粘着力の効果を導入することで、不飽和地盤に適応した DEM の開発を行い、地盤陥没現象の定性的な再現し、砂山への孤立波衝突実験の再現解析を行った。計算条件は図-10 に示す。また、本研究で用いる球形 DEM 粒子では、実際の粒子形状から発揮される急傾斜（安息角）を再現できない。そのため、人工的に回転を抑制する転がり摩擦を導入した。その影響の大きさを示すパラメータは事前解析で決定する。解析結果を図-12 に示す。この結果より概ね実験結果と同様の結果が得られていることから、土水混合体の特徴的な挙動が SPH-DEM でも捉えられていると考えられる。

	Experiment	Analysis
Before		
After		

図-12 計算結果(右)実験結果(左)

### (3) 立方体ブロックの再現解析

多体問題としての接触・摩擦解析の精度検証に特化した例題として、立方体ブロックの構造-流体連成解析を行った。1 辺 5cm の立方体のブロックを 6 つ使い、図-13 (右) に示すようにピラミッド状に配置し、ブロックに流体力を与えてその移動を再現する検証である。水槽実験は、図-13 に示す平面 2 次元の水槽を用い実験を行った。流体計算には、安定化有限被覆法を用いて流体と固体の相互連成解析を行っている。また、ブロックは、DEM を用いて剛体要素としモデル化し、摩擦角を 16 度で計算を行っている。流体計算には、安定化有限被覆法を用いて流体と固体の相互連成解析を行っている。

計算結果をして、図-14 に同時刻における実験結果と解析結果の比較図を示す。この図より、解析においても、ピラミッド底部両端が先に流れ、中央部を残したまま、滑りながら流れていく様子が再現できていることから、実験と概ね同様の挙動が再現できていることがわかる。

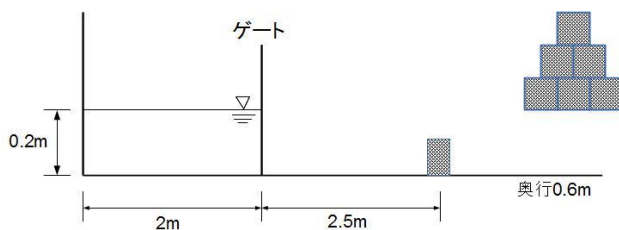


図-13 解析モデルの概要

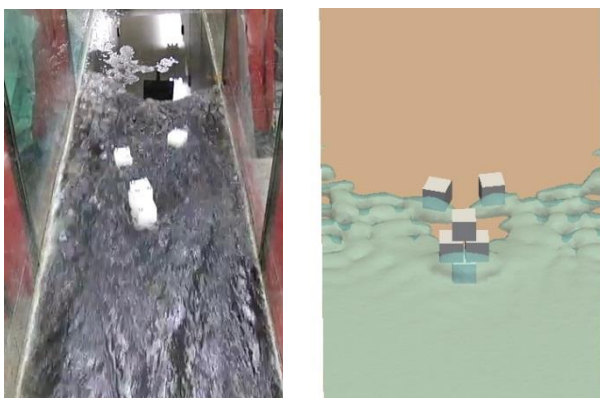


図-14 同時刻における実験結果 (左) と解析結果 (右) の比較

### 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) 牛島省, 鳥生大祐, 柳博文, 田中寛樹, 鉛直噴流による礫粒子群輸送と saltation-collapse 平衡の数値解析, 第22回応用力学シンポジウム, 2019年6月(投稿中).
- 3) 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, I\_377-I\_386, 2017.

### 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

当初の予定通り、多数の礫・砂(土粒子)と流体の連成解析の検証実験として礫を用いた鉛直噴流巻き上げ実験、砂山の洗掘・運搬実験、立方体ブロックの再現解析を行い、各手法により実験値と比較を行った。同じ実験について、違う計算手法で解析を行った例題もあり、それぞれの手法による違いや課題を見つけることができた。今後は本実験結果を検証用のベンチマーク問題として公開するべく、実験条件や実験結果を整理するとともに、さらなる検討を行っていく予定である。

### 7. 研究成果リスト

#### (1) 学術論文

1. D. Morikawa, M. Asai, N. A. Idris, Y. Imoto, M. Isshiki. Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation Using a fully implicit SPH Method (投稿中)

#### (2) 国際会議プロシーディングス

#### (3) 国際会議発表

1. S. Ushijima, D. Toriu, H. Yanagi, Multiphase model to predict many gravel particles transported by free-surface flows, Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'18) The 17th



- International Conference on Fluid Flow Technologies, September, 2018, Budapest, Hungary.
2. H. Yanagi, D. Toriu, S. Ushijima, 3D parallel computation for transportation of gravel particles due to downward water jets, The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2018), September, 2018, Hokkaido, Japan.
  3. S. Takase, R. Ogasawara, K. Mori, K. Kaneko, S. Tanaka, K. Nojima, M. Sakuraba, Tsunami debris simulation considering Impact loading based on Finite Cover Method, WCCM2018, July, 2018, New York, USA.
  4. D. Morikawa and M. Asai, Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation using a Particle Method, CODE2018, April, 2018, Changwon, Korea.
  5. M. Asai, Natural disaster simulation by a multi-physics particle simulation, CODE2018, April, 2018, Changwon, Korea. (Plenary 講演)
  6. M. Asai, N. Nakaya, R. Agata, T. Hori and T. Baba, A physical simulation based earthquake scenario and a multi-scale tsunami simulation, WCCM2018, July, 2018, New York, USA.
  7. D. Morikawa and M. Asai, Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation using a Particle Method and its Application to Landslide Problems, WCCM2018, July, 2018, New York, USA.
  8. Li Yi, M. Asai, Fluid-rigid body interaction simulation based on ISPH incorporated with the impulse-based method, WCCM2018, July, 2018, New York, USA.
  9. Y. Yamaguchi, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, Solid-liquid coupled material point method for 3-D Simulations of soil deformation and flow, WCCM2018, July, 2018, New York, USA.
  10. Y. Yamaguchi, S. Takase, S. Moriguchi, K. Terada, Coupled material point method for large scale analysis of soil-water mixture, IS Atlanta 2018, September, 2018, Atlanta, USA.
- (4) 国内会議発表
1. 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省, 多相場モデルを用いた礫群輸送の 3 次元並列計算, 第 23 回計算工学講演会, 2018 年 6 月, 名古屋.
  2. 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省, 相平均モデルを用いた鉛直噴流による礫群輸送の数値解析, 第 32 回数値流体力学シンポジウム, 2018 年 12 月, 東京.
  3. 柳博文, 牛島省, 鳥生大祐, 粒子・流体間の力学連成を考慮した多数の礫粒子輸送の数値計算, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2019 年 2 月, 京都.
  4. 辻勲平, 浅井光輝, 水土連成現象が関与する道路陥没現象解明に向けた③次元 SPH-DEM 連成解析, 第 21 回応用力学シンポジウム, 2018 年 5 月, 名古屋.
  5. D. Morikawa, M. Asai, M. Isshiki, Improvements on Highly Viscous Fluid Simulation Using a Particle Method, 第 23 回計算工学講演会, 2018 年 6 月, 名古屋. (グラフィクスアワード最優秀賞、動画賞の 2 件を同時受賞)
  6. 辻勲平, 浅井光輝, 水-土混相流が関与する地盤陥没現象の解明に向けた SPH-DEM 連成解析手法の開発, 第 53 回粉体工学会技術討論会, 2018 年 9 月, 東京.
  7. 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 飽和地盤の大規模流動解析を目的とした固液混合 MPM の提案, 第 21 回応用力学シンポジウム, 2018 年 5 月, 名古屋.
  8. 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 固・液混合 MPM の開発とその地盤の変形・流動解析への応用, 第 23 回計算工学講演会, 2018 年 6 月, 名古屋.
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)