

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420520

研究課題名(和文)高解像度4ウェイカップリングモデルによるシートフロー粒子流の内部構造の検討

研究課題名(英文) Numerical investigation for particulate flows in sheet flow regime using 4way coupling model

研究代表者

原田 英治 (Harada, Eiji)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00362450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：粒子流を対象にしたLarge Eddy Simulationの枠組みを構築し、数値漂砂水理学的観点から、シートフロー漂砂の内部構造を検討することを試みた。粒子運動は、粒子スケール以下の解像度で求解した乱流場による流体力と個別要素法より模擬した粒子間相互作用力を駆動力として追跡した。数値シミュレーションの妥当性を水理実験結果との比較から確認した後、シートフロー層の応力構造について計算力学的観点から示した。

研究成果の概要(英文)：Understanding of an inner structure of sheet flow layer is indispensable to investigate a coastal process. Inner structure of sheet flow layer is numerically examined using the 4-way coupling model. The reproducibility of the 4-way coupling model based on the LES-DEM is validated, from comparison with the experimental particle velocity data derived from PIV method. The component of the shear stress in the sheet flow layer is numerically shown.

研究分野：海岸工学

キーワード：シートフロー 粒子流 個別要素法

1. 研究開始当初の背景

大量の土砂輸送をもたらすシートフロー状の流砂・漂砂は、河川・海岸の環境に大きなインパクトを与えるため、河川・海岸環境を評価する上で土砂輸送機構の理解は不可欠である。しかしながら、高濃度に土砂粒子を含んだ固液混相層がシート状に高速流動するため、実験によるシートフロー層のデータ収集は非常に困難である。Bagnold(1954)の実験以来、固液混相の流動について多くの実験や数理的考察が実施されてきているが、シートフロー層の内部構造については十分に分かっていない。一方で、近年の数値計算技術の向上や計算機性能の飛躍的な進歩の恩恵によって、数値シミュレーションによるアプローチも活発に実施されてきた。これまでの研究を概観すると、混合体モデルあるいは二流体モデルを用いてシートフローの流動特性について検討しているが、これらのモデルでは粒子/粒子間の相互作用について陽に取り扱うことができない。また、流体/粒子間相互作用についても詳細に定式化することができず、何らかのモデル化が必要であった。1990年代後半からは、シートフローが高濃度土砂輸送現象であり、粒子/粒子間相互作用力が支配的な現象であることから、粒子運動に注目したシミュレーションが個別要素法に代表される粒状体モデルを用いて活発に実施された。ラグランジュ追跡される個々の粒子運動の集積から移動床の内部構造について一定の説明がなされたが、計算機性能の制約から Euler 型の計算によって評価される流体運動と粒子運動の相互作用力については簡便な取扱いとされ、抗力を移動床粒子の主たる駆動力とする実験式が使用されることが多かった。そのため、流体計算格子スケール以下(もちろん粒子径以下)の流れ場は考慮できず、流体/粒子相互作用について検討の余地が残された。

粒子スケール以下からシートフロー層の内部構造について理解するには、個々の粒子に作用する流体力の算定には、流れ場を粒子スケール以下の解像度から明らかにする必要がある。また、シートフローでは、乱流応力の役割が重要であると実験観測結果からの報告がある。このような背景から、本研究では、粒子スケール以下の計算格子を用いた高解像度型の固液混相乱流モデルを用いた数値シミュレーションより、シートフロー漂砂の内部構造を数値計測する着想に至った。実際の現象を単純化した水理実験においても、シートフロー層の内部計測が極めて困難であるため、実験水路の側壁から観測される粒子流動が良好に再現できることが、シートフローを対象とした固液混相流の数値モデルの妥当性を示す根拠とされてきた。これまでの申請者の検討では、ある位相の空間平均された粒子速度分布や粒子数密度分布による比較は実施してきたが、シートフロー層の

構造を粒子スケールから適切に予測できているかについては十分な検討は実施していなかった。今回の研究では、シートフロー層の流動則を検討するため、実験水路の側壁から得られる粒子運動データの平均量だけでなく、粒子運動の変動成分との比較から数値モデルの妥当性を確認した後、実験水路側壁の影響が少ないシートフロー層の内部領域(移動床中央部)の数値データ(粒子間応力や流体応力)に基づいてシートフロー層の流動則の考察を目指した。高解像度計算の実施は、非常に計算負荷が高くなるが、この種の数値実験から得られるデータはシートフロー層の内部構造の詳細を理解する上で非常に価値があるため、これらの基礎情報から導かれた流動則を理解するための知見は、従前の底面せん断応力を関数とする漂砂量則の改良を図る際に有益な情報をもたらすと期待できる。上記の背景より研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、大量の流砂・漂砂フラックスをもたらすシートフロー層の流動則を検討するため、粒子スケール以下の微視的視点に立って、シートフロー層の内部構造を実験および数値シミュレーションの双方向から検討する。具体的には、計算負荷は高いが、流体/粒子間および粒子/粒子間の相互作用を考慮した 4 way カップリング型の数値シミュレーションによって、実験計測が極めて困難であるシートフロー層の内部構造(粒子間応力や乱流応力の空間構造など)を、粒子スケール以下の解像度から求解した結果を用いて数値漂砂水理学的観点から考察する。そして、計算負荷の低い数値シミュレーション(例えば1流体モデルや2流体モデル)への適用を念頭に、シートフロー層の流動則を導くことを目的とする。以下にシートフロー漂砂の流動則を求めるための各プロセスでの目的を示す。

【乱流モデルの改良】

申請者は、平成 21 年度の若手研究 B の研究で開発した高解像度型の固液混相乱流モデル(以後、21 年度モデルと記載する)に指摘された乱流モデルの不備、すなわち、サブグリッドスケール(SGS)の乱流応力の評価に用いた Smagorinsky モデルの Smagorinsky 定数を一定値としたことに起因した局所的な乱流構造の再現性に対する問題に対処するため、グリッドスケール(GS)での速度勾配だけでなく GS での乱れ特性を考慮した乱流モデル(ダイナミック Smagorinsky モデル)の導入を図る(以後、改良型モデルと記載する)。なお、改良型モデルの流体/粒子相互作用に関する再現性については、一様流中に配置した球に作用する流体力(抗力係数 vs. 粒子レイノルズ数)の比較と対数流速分布との比較から示す。

【改良型モデルによる粒子運動の再現性の確認】

21 年度モデルのシートフロー漂砂の実験に対する再現性についての検証は、実験データの不足からある位相の空間平均された平均粒子移動速度分布や粒子数密度の比較に限定されていた。今回の研究では、シートフロー状に流動する粒子流を、水路側方からハイスピードビデオカメラで撮影し、撮影画像を基に粒子の平均移動速度だけでなく粒子の変動移動速度成分を画像解析によって抽出し粒子間の変動応力を評価する。なお、改良型モデルの再現性については、数値シミュレーションと同様の条件で実施した実験結果との比較から行う。この段階では、改良型モデルの粒子移動速度の変動値の結果が実験結果を良好に再現するように、移動床の数値モデルである個別要素法のモデル定数のチューニングを実施する。良好な再現性が得られると、シートフロー層の内部構造について、申請者が平成 21 年度の若手研究 B で実施した研究成果よりも詳細に検討できることになる。

【粗大粒子群によるシートフローの流動則の検討】

本研究では、準備できる計算機性能の制約から、実行可能な数値シミュレーションの条件を考慮して、粒子径 1cm を設定した。粗大粒子群で構成した数値移動床を対象に、改良型モデルを用いた 4way カップリング型の数値シミュレーションを実施する。また、同時に同条件の水理実験を実施し、実験結果と数値シミュレーションの比較からシートフロー層の内部構造（粒子間応力や乱流応力の空間構造など）を詳細に検討し、シートフローの流動則を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

平成 21 年度の若手研究 B で開発したモデルで採用した乱流モデル (Smagorinsky モデル) からダイナミック Smagorinsky モデルへ変更し、改良型の固液混相乱流モデルを開発する。改良型モデルの再現性を既往の実験との比較から確認する。次に、シートフロー漂砂過程を対象とした水理実験を実施し、ハイスピードビデオカメラで撮影したシートフローのビデオ画像から個々の粒子移動速度を抽出する。その結果を改良型モデルによるシミュレーションによって上手く再現できるように個別要素法で用いる要素間力のモデル定数を設定する。改良型モデルで計算されるシートフロー状の粒子流動の内部構造について、乱流応力や粒子の変動強度の分布等から詳細に検討する。

・乱流モデルの変更

申請者が平成 21 年度の若手研究 B で開発し

たモデルでは SGS 乱流応力が Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数は一定) により算定されていた。Smagorinsky 定数は一定ではなく流れ場に応じて変化するべき値であることから、本研究では最初に SGS 乱流応力に対する数値モデルの改良を検討し、ダイナミック Smagorinsky モデル (DSM) を導入する。

・ベンチマークテスト

乱流モデルを変更した改良型モデルの実現象に対する再現性を確認するため、ベンチマークテストを予定する。一様流中に固定配置した単一粒子に作用する流体力から見積もられる抗力係数とレイノルズ数の関係を対象に既往の実験結果と比較し、流体/粒子の相互作用について限定された条件ではあるが再現性が確認する。また清水条件でのシミュレーションを実施して、対数流速分布との比較から改良した流体モデルの妥当性を確認する。

・水理実験および画像解析

シートフロー漂砂を対象とした水理実験で使用する既設のプロペラ式の駆動システムを配置したアクリル製閉管路の駆動部およびアクリル版接合部を修理し、水理実験の実施体制を整備する。

続いて、動的乱流モデルを導入した改良型モデルのシートフロー流動過程に対する再現性を検討するための実験を実施する。申請者が平成 21 年度の若手研究 B で開発した 21 年度モデルの再現性は、移動床粒子を空間平均した平均移動速度分布および数密度分布による比較からの確認に留まっていたが、本研究では、シミュレーションモデルの再現性を高めるために、移動床粒子の平均移動速度からの変動値に関する諸量についても検討する。

水理実験では、シートフロー状に流動する個々の移動粒子速度はハイスピードカメラによって撮影される。個々の粒子の運動は画像解析によって抽出される。個々の粒子の平均移動速度および変動速度成分から、シートフロー層の内部構造を検討するため、画像解析では、多数の連続画像と多数の粒子運動の追跡データが必要である。さらに、統計的に信頼できる程度に同条件の実験を繰り返し実施する。

・モデル定数の設定と数値モデルの改良

最初の実験で観察された粒子の平均速度分布が概ね再現されるように、粒子/粒子間相互作用力の評価で用いるスプリング-ダッシュポットのモデル定数のチューニングを実施し、これをモデル定数の目安とする。変動特性としては、粒子移動速度の変動値から算定される乱れ強度の時間平均量を考慮するが、粒子移動速度の乱れ強度が実験結果を良好に再現するようにさらにモデル定数を微調整する。

・ シートフロー層の内部構造の検討

粒子運動に関して、実験結果を良好に再現するモデル定数の準備後、シートフロー層の内部構造の検討に着手する。実験計測が極めて困難であるシートフロー層の内部の粒子間力分布や、粒子に作用する流体力の分布の時間的な発達状況について示すとともに流動層のレオロジー特性について速度勾配と関連付けて考察する。

4. 研究成果

シートフロー漂砂は高速かつ高濃度の粒子流であり、また、粒子間の衝突が支配的な流体・粒子間の強い非線形相互作用を伴った固液混相乱流であるため、その内部構造の計測は、極めて困難である。このような背景から、粒子流を対象にした Large Eddy Simulation (粒子流 LES) の枠組みを構築し、数値漂砂水理学的観点から、シートフロー漂砂の内部構造を検討することを試みた。

粒子流 LES での粒子運動は、粒子スケール以下の解像度で求解した乱流場による流体力と個別要素法 (DEM) より模擬した粒子間相互作用力を駆動力として追跡した。

シートフロー漂砂を対象とした粒子流 LES の再現性については、既往の実験結果を参照し、振動流条件下での半周期漂砂量による位相平均的な観点からの検討に加えて、水理実験を実施して、粒子運動の位相特性についても検討した。具体的には、実験画像の PIV 解析によって得られる代表位相での移動床粒子の平均速度および変動速度を粒子流 LES の結果と比較して、シミュレーションの妥当性を確認した。その後、実験による計測が困難であるシートフロー層の内部の応力構造を計算力学的観点から考察を進めた。以下に得られた成果を示す。

半周期間の中で、流速の向きが変わる最大位相の加速および減速位相では粒子運動が僅かであり、移動床表層では動的応力と乱流応力が混在した応力状態であること、また、シートフロー層が発達する加速位相では、粒子運動による動的な応力が支配的となり、減速位相に入るとせん断応力によって粒子移動層は加速されず、準定常状態へと遷移することが考察された。

開発した粒子流 LES の枠組みを用いて、振動流下シートフロー漂砂の摩擦係数の検討も実施した。波動場における底面せん断応力は周期変化を示すが、漂砂量則は底面の最大せん断応力の関数として構成されている。最大せん断応力は摩擦係数を用いて見積もられるが、一般的に用いられる Jonsson の摩擦係数は、水粒子軌道直径と粗度に依存するので非定常性の強弱は考慮されているものの位相に依存しない一定値が用いられる。粒子流 LES から得られる底面せん断応力から、シートフロー漂砂における底面摩擦係数の

位相変化を計算力学的に検討したところ、底面せん断応力の位相変化に対応した摩擦係数の推移から、シートフロー層の下層に存在する immobile bed 表層の摩擦係数には、境界層外縁流速に対する位相の進みが示され、また固定床表層と比較して immobile bed 表層の摩擦係数は、粒子混入による流速の低下により増加する傾向が示された。さらに、振動流下の乱流境界層での乱流応力を水平流速の鉛直方向の速度勾配と関連付ける Boussinesq の渦粘性モデルの類推から渦粘性係数を求め、半周期平均の鉛直分布を求めると、シートフロー層での平均渦粘性係数の値はゼロに近く、鉛直分布での変曲点の位置は固定床のそれと比較して高くなる傾向を得た。なお、シートフロー層内部の速度勾配は、固定床と比較して小さく、鉛直方向への運動量輸送は半周期平均的には抑えられる結果が得られた。

振動流下シートフロー層の水理実験では、平均粒子移動速度と変動速度だけでなく、粒子応力の位相変化の特性を検討した。なお、水理実験では、直径 1cm の人工粒子で構成された移動床の流動過程を、ハイスピードカメラを用いて撮影した画像に基づいて、粒子流の PIV 解析より追跡した。シートフロー流動層での粒子運動に伴う粒子運動応力の位相変化からシートフロー層の構造を検討するために、平均および変動粒子速度に関する Stokes 数を用いて粒子のせん断歪み速度に基づいた粒子間衝突応力の分布を考察した。その結果、加速位相初期には、圧力勾配力によって Pick-up された粒子の活発な運動による粒子運動量輸送と衝突応力の発現が確認され、加速位相後期には、粒子運動による鉛直方向に対する運動量輸送の低下と粒子のせん断歪み速度の低下に伴った粒子間衝突応力の減少傾向が見られた。減速位相に入ると、水流の非定常性が徐々に増すため粒子の鉛直方向の運動量交換が活発化し、また、流速低下による粒子の沈降・堆積作用によって粒子間衝突応力の増加する傾向が示された。

本研究の成果は、特定の粒子材料を対象とした実験とシミュレーションに限定してはいるものの、シートフロー層の内部構造の理解や流動則の評価に対して、高解像度数値シミュレーションの一定の役割を示せたと考えられる。粒子衝突による分散応力は粒子の直径や比重等に依存するため、今後、粒子径を変えた実験およびシミュレーションの実施の必要がある。なお、同一条件の実験試行回数を増やし実験データの精度を高めることも必要であり、統計的に信頼できる実験データの蓄積を進めるとともに、シートフロー漂砂機構の理解を深めたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計 5 件）

① 原田 英治、後藤 仁志、鶴田 修己、粒子流 LES による振動流下シートフロー層の応力構造の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、69 巻、2013、I_556-I_560
10. 2208/kaigan/69. I_556

② 原田 英治、後藤 仁志、振動流下シートフロー状粒子流の内部構造の画像解析、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、70 巻、2014、I_746-I_750
10. 2208/kaigan/70. I_746

③ 原田 英治、鶴田 修己、後藤 仁志、粒子流 LES による振動流下シートフロー漂砂の摩擦係数の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、71 巻、2015、I_493-I_498
10. 2208/kaigan. 71. I_493

④ Harada, E., Gotoh, H. and Tsuruta, N., Vertical sorting process under oscillatory sheet flow condition by resolved discrete particle model, Journal of hydraulic research, 査読有, Vol. 53, 2015, 332-350
10. 1080/00221686. 2014. 994139

⑤ 原田 英治、鶴田 修己、後藤 仁志、水理実験および粒子流 LES によるシートフロー漂砂の内部構造の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、72 巻、2016、I_589-I_594
10. 2208/kaigan. 72. I_589

〔学会発表〕（計 2 件）

① 原田 英治、流砂水理学の発展と数値移動床の役割、河川・海岸の土砂水理に関するワークショップ、2015 年 10 月 19 日、土木学会講堂

② 原田 英治、DEM による流砂研究の現状、平成 27 年度基礎水理シンポジウム、2015 年 12 月 7 日、土木学会講堂

〔図書〕（計 0 件）

なし

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 英治 (HARADA, Eiji)

京都大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号： 00362450

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

研究代表者が所属する研究室の大学院生