

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月23日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760386

研究課題名（和文）高解像度固液混相流モデルによる混合粒径砂の鉛直分級機構の計算力学的研究

研究課題名（英文）Study on vertical sorting of mixed grain by solid-liquid multiphase flow model

研究代表者

原田 英治 (EIJI HARADA)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00362450

研究成果の概要（和文）：河川および海岸構造物建設後の河床変形および海浜変形の事前評価は、環境を議論する上で重要である。砂粒子を多く含む粒子流の内部構造を実験より計測することは非常に困難である。そこで本研究では、河床および海底土砂輸送機構を数値シミュレーションから検討し、高濃度粒子流の構造を計算力学的な観点から明らかにした。得られた知見は、河床変形や海浜変形過程の詳細な機構の理解に資するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：A prior assessment of bed deformation due to river or coastal development provides helpful information to discuss environmental hydraulics. Investigation of inner structure of a dense particulate flow by using a sophisticated numerical tool is fully expected to contribute to scientific knowledge about bed deformation. Thus, in the present study, large eddy simulation for particulate flow has been performed, and inner structure of particulate flow has been addressed from the viewpoint of computational sediment transport dynamics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：DEM, LES, Euler-Lagrange, 鉛直分級, 固液混相乱流

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. 研究開始当初の背景
鉛直分級による粒度分布の変化は移動抵 | 抗に直接影響するので、河床または海底地形
の変化など水理環境予測に対して重要な現 |
|------------------------------------|---|

象である。鉛直分級は、高い底面せん断力によって、粒子間および流体・粒子間相互作用力による運動量交換が活潑なシートフローの流送形態で顕在化する。また、シートフローでは高速で高濃度の砂粒子群が頻繁に周囲の粒子と衝突しつつ流送される。そのため、実験計測でその内部構造を詳細に明らかにすることは困難であり、その流送機構は十分に理解されていない。一方、計算機性能の進歩の恩恵から、今日では限定された計算条件（狭領域、低レイノルズ数）であれば粒子流の直接数値シミュレーション（direct numerical simulation : DNS）が可能な状況にある。シートフロー流砂・漂砂の鉛直分級機構を数値流砂・漂砂水理学的な観点から詳細に検討するには、粒度分布や粒子配列、流体・粒子間および粒子・粒子間相互作用の物理過程を砂粒子スケールレベルから検討することが不可欠である。このような背景より、流体計算に粒子径よりも細かい計算格子を用いて粒子周りの流れ場を高い解像度で捉えることに配慮しつつ、個々の粒子運動は個別要素法（discrete element method : DEM）を用いて Lagrange 追跡する Euler-Lagrange カップリングによる固液混相流モデルの開発に取り組む計画とした。また、シートフロー流砂・漂砂現象は、河床および海底面での高い掃流力による高いレイノルズ数の現象であるため、粒子周りの乱流構造を十分に解像するだけの流体計算格子を配置することは計算機性能の制約から非現実的である（DNS の実施は困難）。そのため、流体計算格子スケール以下の渦については、サブグリッドスケールモデル（SGS model）によって評価し、計算負荷を低減した、ラージ・エディ・シミュレーション（large eddy simulation : LES）の実施を考えることにした。以上のように、研究当初の計画では、これまで十分に理解されていないシートフロー流砂・漂砂といった高濃度粒子流動層の内部構造を砂粒子スケールレベルから詳細に検討するため、固液混相流を対象とした LES によるシートフロー層の数値計測を推進する計画とした。

2. 研究の目的

高速・高濃度の土砂輸送形態であるシートフロー流砂・漂砂の流動機構を砂粒子スケールレベルの観点から検討する。特に、混合粒径流砂および漂砂の鉛直分級の発達過程における粒子流動層（固液混相流動層）の内部構造について注目する。本研究が目的とするシートフロー層の内部構造に対する実験的なアプローチは困難であることから、固液混相流の数値シミュレーションによる計算力学的な計測から検討する。

数値シミュレーションでは、個々の砂粒子

運動と粒径以下の渦との相互作用を考慮するため、Euler-Lagrange カップリングによる高解像度型の固液混相流モデルを開発し、個々の砂粒子周りの流れ場を砂粒子径以下のスケールから求解する。また、粒子運動追跡には DEM を採用し、粒子間衝突による応力についても考察できる数値モデルの枠組みとする。

数値シミュレーションによって得られたシートフロー層の運動量に関する情報から、混合粒径シートフロー流砂および漂砂過程における流動層の特徴と鉛直分級発達過程との関連について調査する。

また、シートフロー流動層では粒子間衝突が支配的な現象であるとの研究報告がこれまでに多くあるが、本研究で実施するような個々の粒子運動を扱い、また、粒子スケール以下の渦構造を考慮した Euler-Lagrange カップリングによる固液混相流の LES からそれを確認した研究例は存在しないと思われる。本研究では、粒子間衝突応力とシア率の関係を固液混相流 LES より検討し、既往の構成則と比較する。

3. 研究の方法

本研究では、高濃度粒子流であるシートフロー層の内部構造を検討するための数値モデルの開発が研究の鍵となる。また、粒子スケールレベルの観点からシートフロー現象を検討するため、粒子間相互作用力のモデル化や流体・粒子間の相互作用力のモデル化とその妥当性の検証が不可欠である。さらに LES のための SGS モデル導入効果の検討も重要となると考えられる。

粒子系の運動は DEM より追跡し、粒子間相互作用力はスプリング-ダッシュポット系から評価する。DEM におけるバネ定数やダッシュポット定数は、流砂量や漂砂量が既往の実験結果を良好に再現するようにチューニングする。

流体・粒子間の相互作用力は、運動量保存の観点から評価し、その評価式の妥当性については、一様流れ中に固定配置した単一球粒子に作用する流体力を、抗力係数とレイノルズ数の関係に整理し、既往の実験結果に対する再現性から確認する。また、一様流れ場に固定配置した円柱背後に形成される非定常渦構造について、ストローハル数とレイノルズ数の関係を示し、既往の実験結果と比較する。さらに、粒子周りの渦構造を PIV 解析より示し、シミュレーション結果との比較から開発した固液混相モデルの再現性を明らかにする。

また本研究では、非定常乱流場を解析するために LES を実施するが、SGS モデルの導入効果について、上述した流体・粒子間の相互作用力に関するベンチマークテストの中

で実施し確認する。その後、多数粒子群に対するモデルの再現性を確認した後、シートフロー層の鉛直分級過程を対象とした数値シミュレーションを実施する。

4. 研究成果

(1) 固相粒子運動に DEM を採用して、粒子間相互作用力を考慮しつつ個々の粒子運動を追跡し、粒子周りの流れ場は粒子径スケール以下の解像度から求める高解像度型の流れ場モデルを組み合わせた Euler-Lagrange カップリングによる固液混相流モデルの LES のフレームワークを作成した。また、開発したモデルの妥当性について、ベンチマークテストを通じて確認した。

一様流れ場に固定設置した球粒子に作用する流体力を計算し、抗力係数と粒子レイノルズ数の関係に整理したのが図-1 である。既往の実験結果と比較して良好な再現性が得られた。また、同じく一様流中に固定配置した円柱背後のウェイク構造について、ストローハル数とレイノルズ数の関係に整理したのが図-2 である。既往の実験で確認されてい

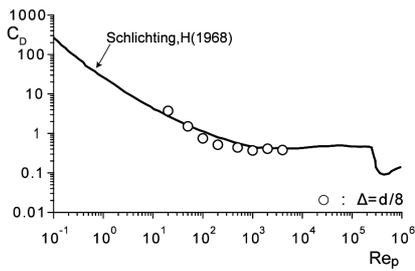


図-1 抗力係数

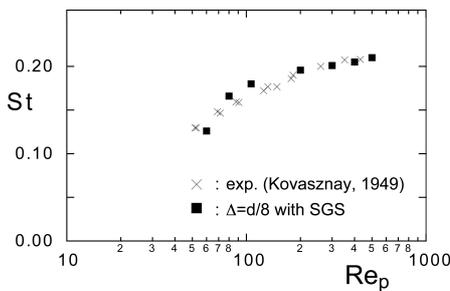


図-2 ストローハル数

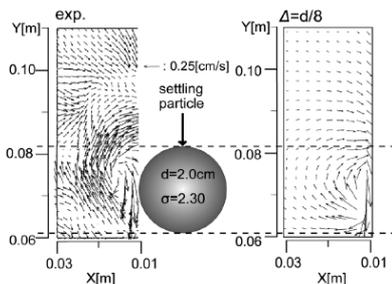


図-3 沈降粒子周りの渦構造

るレイノルズ数の増加にともなうストローハル数の増加傾向が本研究で開発したモデルを使用したシミュレーション結果からも確認される。また、図-3 に沈降球粒子周りの流れ場の PIV 計測した結果とシミュレーション結果を示すが、渦形成箇所やその規模についても概ね良好に再現した。

(2) シートフロー漂砂を対象とした粒子流動層の位相毎の流れ場を、流速ベクトル分布、レイノルズ応力分布、乱れエネルギー生成分布の情報に基づいて計算力学的に検討した。これらのデータから、加速位相の中期から減速位相の初期にかけて粒子流動層の表層で乱れエネルギーの顕著な生成領域が発達し、鉛直分級が促進されることが確認された。減速位相でも継続して乱れエネルギーの生成領域は存続するが、その領域は粒子流動層の表層から離脱し、鉛直分級の促進には寄与しない状況が確認された。

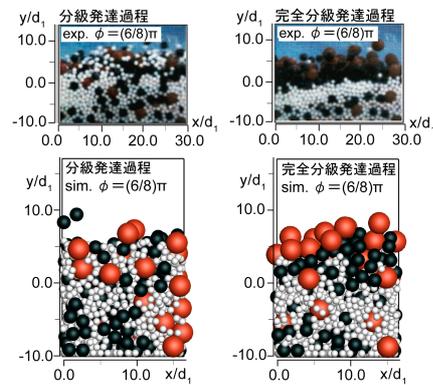


図-4 瞬間画像の比較

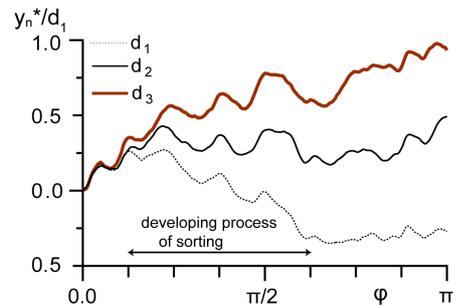


図-5 粒径別濃度重心の時系列

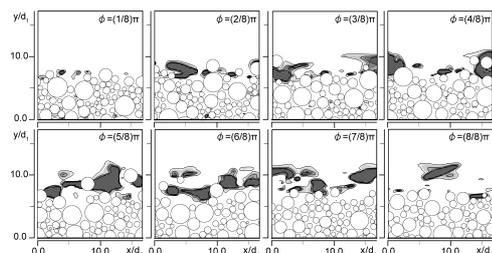


図-6 乱れエネルギーの生成分布

比重 $\sigma=1.318$ 、粒径 $d_1=0.515\text{cm}$ (小粒子 770 個)、 $d_2=0.988\text{cm}$ (中粒子 103 個)、 $d_3=1.56\text{cm}$ (大粒子 27 個) の総計 900 個の球粒子を十分に混合して作成した数値移動床に、振動周期 $T=5.0\text{s}$ 、最大流速振幅 $U_{\text{max}}=85.0\text{cm}$ (平均粒径 $d_m=1.02\text{cm}$ に対する Shields 数 $\Psi=0.27$) の正弦波型の振動流を作用させ、シートフロー漂砂の鉛直分級過程を対象とした数値シミュレーションを実施した。図-4 にスナップショットを示す。同図には同位相の実験結果も併せて示すが、良好な再現性がうかがえる。

粒径別の濃度重心の時系列を図-5 に示す。小粒子の時系列から顕著な濃度重心の現象は位相 $\phi=(2/8)\pi$ から位相 $\phi=(5/8)\pi$ に確認され、この位相付近で活発な鉛直分級が発達していることが分かる。また、この後の減速位相では、横這い状態の濃度重心を呈することから、目立った鉛直分級の進行は示さないことが理解できる。

代表的な乱れエネルギーの生成分布を図-6 に示すが、減速位相では顕著な乱れエネルギーの生成分布を示す領域がシートフロー層の表層から清水領域に向けて離脱しており、粒子層運動が不活発化することが計算力学的に考察された。

(3) シートフロー漂砂における粒子流動層での歪み速度と粒子間衝突に起因した平均せん断応力の位相変化の特性について検討し、Bagnold 則が成立するシートフロー層の領域を明らかにした。比重 $\sigma=1.318$ 、粒径

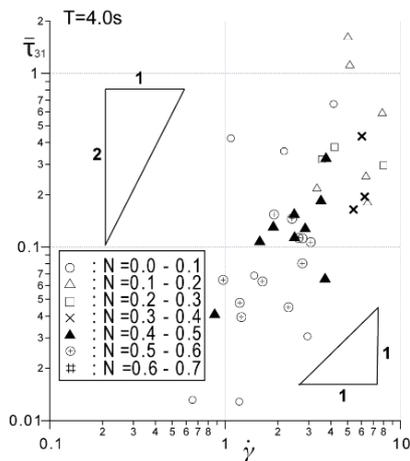


図-7 せん断応力と歪み速度の関係

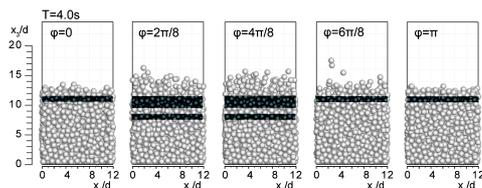


図-8 Bagnold 則成立領域

$d=1.0\text{cm}$ の球要素 1,350 個を敷き詰めた数値移動床に振動周期 $T=4.0\text{s}$ 、最大流速振幅 $U_{\text{max}}=80.0\text{cm}$ (粒径に対する Shields 数 $\Psi=0.27$) の正弦波型の振動流を作用させ、シートフロー漂砂のシミュレーションを実施した。貯留層を除く粒子流動が活発な領域に対して、粒子衝突によるアンサンブル平均したせん断応力と歪み速度の位相別の関係を検討した後、要素の体積濃度に応じて表示すると図-7 が得られ、体積濃度 $N=0.3\sim 0.5$ の領域で概ね Bagnold 則が成立することが確認できた。位相別に Bagnold 則が成立する領域を図示すると、図-8 のように振動流下シートフロー層において粒子間衝突が支配的な領域の位相変化を得ることができた。

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 8 件)

- ① 原田英治・鶴田修己・後藤仁志、混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の固液混相 LES、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、Vol. 67, No. 2、2011、pp. I_736-I_740
- ② 原田英治・後藤仁志・鶴田修己、3次元固液混相乱流モデルによるシートフロー漂砂の鉛直分級過程、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、Vol. 66, No. 2、2010、pp. 411-415
- ③ 原田英治・後藤仁志、シートフロー漂砂における鉛直分級過程の高解像度計算、海岸工学論文集、査読有、第 56 巻、2009、pp. 516-520

[学会発表] (計 7 件)

- ① 原田英治、粒状体モデルによる粒子流の数値シミュレーション、日本混相流学会年会講演会 2010、2010 年 7 月 17 日、静岡大学浜松キャンパス
- ② Harada, E., Gotoh, H. and Tsuruta, N., Highly precise simulation of sedimentation process of rubble mound by multi-phase flow model with LES, The 5th Asian and Pacific Coastal Engineering Conference, 2009 年 10 月 15 日, Nanyang Technological University

6. 研究組織

(1) 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