

急勾配ダクトのステップ前面に生ずる 混合粒径粒子の分級堆積過程に関する考察

SEGREGATION OF NON-UNIFORM BED-LOAD PARTICLES
ARISING ON A VERTICAL WALL IN A STEEP SLOPE DUCT

牛島 省¹・山田 修三²・竹村 雅樹³・瀬津 家久⁴

Satoru USHIJIMA, Syuzou YAMADA, Masaki TAKEMURA and Iehisa NEZU

¹ 正会員 工博 京都大学大学院助教授 環境地球工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 学生員 京都大学工学部 地球工学科

³ 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻 修士課程

⁴ フェロー 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻

It is important to understand the physical process on the segregation of the non-uniform bed-load particles, which collide with each other in the transportation and deposit around a hydraulics structure. In order to investigate this process, hydraulic experiments were conducted with non-uniform glass particles in a steep-slope duct including a step-shaped structure. In particular, the three-dimensional measurements with a visualization method were performed for the large-scale particles deposited in front of the step. The transportation and sedimentation of the non-uniform particles were numerically predicted with a distinct element method (DEM). The computational method is characterized by the employment of parallel computations and a two-way modeling for the liquid-solid interactions. As a result, it was shown that the segregation of the deposited particles is successfully simulated with the present computational method.

KeyWords : *segregation, sedimentation, visualization, distinct element method, parallel computation, two-way model*

1. はじめに

河床変動や河岸侵食, また海底砂面の洗掘などに関して, 数値解析による予測と評価が近年盛んに進められ, その適用性が検討されている^{1), 2), 3)}. これらの数値解析手法は, 実用的な問題に対して有効であることが示されている. 一方, 土砂の輸送メカニズムに関しては, この種の数値解法では, 非平衡性を考慮した掃流砂および浮遊砂のモデル等が用いられることが多く, ラグランジュ的な挙動を示す粒子の集合体としての土砂の扱いは通常なされていない. このため, 粒子間の接触作用が重要となる粒径が均一でない土砂の混合や分級など, より微細な現象を対象とする場合には, 異なるモデルが必要となる.

本研究では, 水理構造物の周辺に混合粒径土砂が堆積する過程において生ずる分級現象に着目し, 粒子間の接触作用に重点を置いた基礎的な水理実験を行うとともに, 個別要素法 (DEM) を用いた数値計算を行い, 粒子の分級堆積過程の再現性について検討を加える. 水理実験では, 自由水面を持たない急勾配のダク

ト流れに粒径の異なる粒子を投入し, 内部に設置されたステップ構造物の前面に堆積する粒子の分布を計測する. これまで漂砂に対して粒子計測が行われた例はあるが⁴⁾, 本報では可視化手法を用いて堆積した粒子の3次元座標を把握する. さらに, 計測した粒子の3次元的な分布を可視化ツールを用いて表示する.

DEMは, Cundall⁵⁾により提案された, 粒子間接触力として弾性力モデルを用いる計算手法で, 粉体工学や機械工学などの分野でその有効性が示されてきた. 同様の手法は水工学分野にも導入され, 2次元場における流砂現象⁶⁾や, 最近では3次元の移動床計算や分級現象にも適用が試みられている⁷⁾.

著者等の計算手法では, 開発の初期段階から3次元DEMが用いられているが⁸⁾, 計算領域を3次元境界適合座標系で表示するとともに, 領域分割に基づく並列計算法⁹⁾を導入し, さらに液相との相互作用を考慮する点に特徴がある¹⁰⁾. この計算手法を用いて, 水理実験と同様の流体と粒子の計算を行い, ステップ前面に堆積する粒子の分布状況等を実験結果と比較し, 計算手法の有効性に関して検討を加える.

2. 分級堆積過程の水理実験

(1) 実験装置

水理構造物前面に生ずる混合粒径土砂の堆砂過程に関する基礎的な性質を把握することを目的として、粒径の異なるガラス粒子を用いた水理実験を行い、堆積した粒子の分布状況等を計測した。ここでは、水中を浮遊移動する土砂ではなく、比較的大粒径の土砂粒子が壁面や他の粒子と接触しながら流下して、鉛直壁付近で堆積して行く過程を対象とする。

図1に実験装置全体の概略図を示す。断面が矩形のダクト内に水を満し、流量制御が可能なポンプを水を循環させる。その結果、自由水面を持たない流れがダクト内に発生する。ダクト上流部では、流速分布の均一化を図るために設けた整流板の下流側から、混合粒径のガラス粒子を投入する。粒子は、ダクトの勾配による重力の効果と、水流による掃流力により下流側へ移動を開始する。適当な流量条件を与えた場合には、急勾配の条件では前者、また緩勾配では後者の効果が卓越するものとなって、ダクトの下流域へ移動する。これらの粒子は、下流端付近に設けたステップの前面の死水域付近で他の粒子と接触し、堆積してゆく。

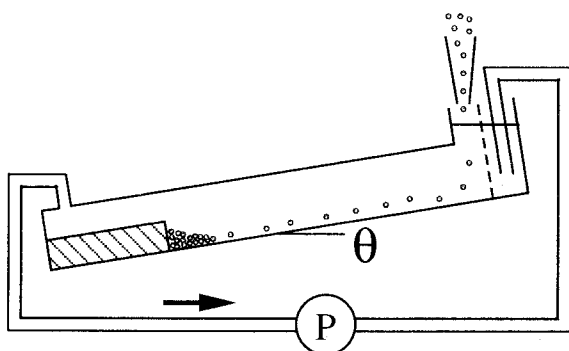


図-1 実験装置全体の概略図

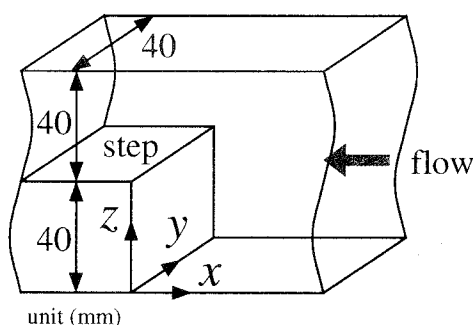


図-2 ステップ近傍の形状と座標系

図2にステップ近傍の形状と座標系を示す。ダクト上流部からステップまでの距離は、約0.6mである。ダクトの内寸は一様で、図2に示すように、高さ80mm、幅40mmであり、ステップの高さはダクト高さの半分の40mmである。また、座標系は図2に示すように、ステップの上流端から流れと逆方向に x 座標を取り、横断方向およびダクト底面から法線方向にそれぞれ y 座標と z 座標を取る。

(2) 3次元粒子分布の計測方法

ステップ前面に堆積した混合粒径粒子の分布特性を把握するため、大粒径粒子の3次元位置を計測した。粒子位置を計測する実験では、計測のターゲットとなる一部の粒径ガラス粒子のみを蛍光染料で着色した。この着色粒子を用いて水理実験を行い、最初にステップ前面に堆積した粒子の画像を鉛直上方から撮影した。水とガラスの屈折率の相違のため、無着色のガラス粒子の画像は完全には除去されないが、着色粒子の個数がある程度少なくすることにより、それらの $x-y$ 平面内の粒子位置を画像から把握することができる。上記のようにして取得した画像のサンプルを図3に示す。また、この画像から特定された粒子の $x-y$ 平面内の分布を図4に示す。



図-3 鉛直上方から取得した画像のサンプル
(濃いグレーが着色粒子)

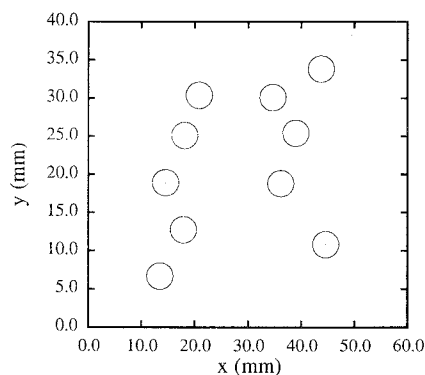


図-4 画像から得られた $x-y$ 平面内の粒子分布の例

次に、粒子位置の z 座標を求めるために、レーザーライトシートを利用する計測を行った。図5に、計測の概略を示す。ダクト底面と平行に入射するレーザーライトシートを z 軸方向に平行移動させて蛍光染料を着色した粒子を可視化する。レーザーライトシートが粒子の中心付近に入射した場合、レーザーライトシートの移動量から粒子位置の z 座標が求められる。

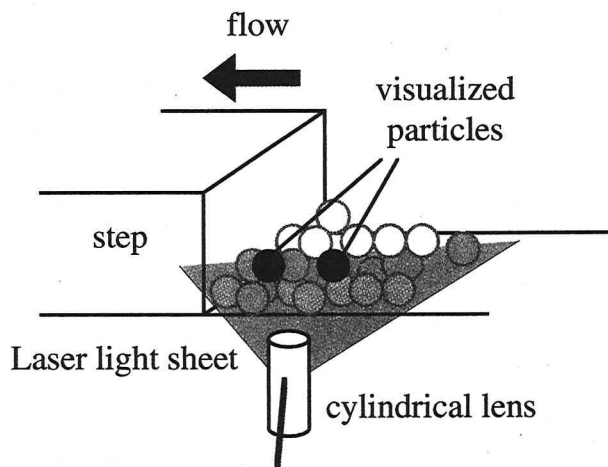


図-5 レーザライトシートを利用した粒子位置の z 座標の計測の概要

以上のようにして、着色粒子の3次元位置が求められる。得られた3次元座標から粒子の分布を把握し、その特性を理解しやすいものとするために、本研究では3次元粒子分布可視化ソフトウェアを作成した。図6に実験で得られた粒子分布のサンプルを示す。また、このサンプルから粒子の3次元座標を求め、その結果を上記ソフトウェアで可視化した例を図7に示す。この可視化ソフトウェアは、X Window System上でMesa (<http://www.mesa3d.org/>) およびLesstif (<http://www.lesstif.org/>) を利用して作成しており¹¹⁾、Linux上で動作する。マウスとキーボードからの入力に対応したイベント処理により、視点の回転、平行移動、画像の拡大と縮小などが可能である。このため、任意の方向から粒子の分布状況を確認でき、計測結果に関する検討を容易に行える。

今後、上記で示したような粒子位置の計測法の多くの部分を計算機による数値処理に置き換え、3次元流速計測に対して提案された画像解析手法¹²⁾と同様の手法へと発展させたいと考えている。その場合にも、計測結果の表示には、上記と同様の可視化ソフトウェアが有用であると思われる。

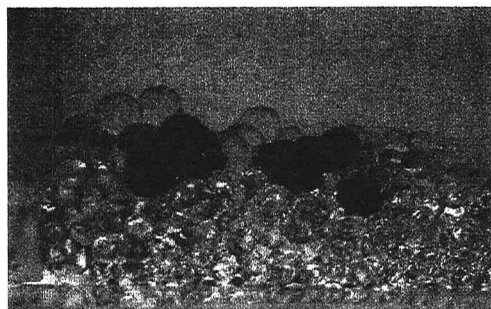


図-6 水理実験で得られた粒子分布の例 (濃いグレーの粒子が着色粒子)

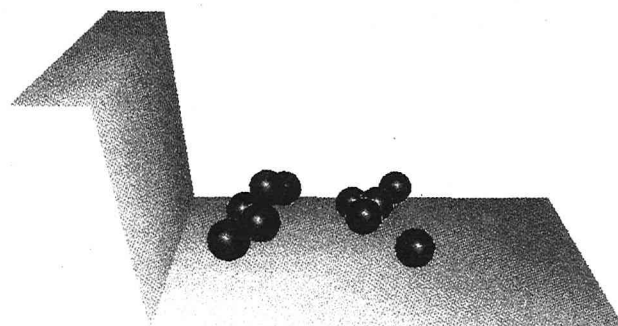


図-7 可視化ツールにより表示された粒子の3次元分布の例

(3) 実験条件と堆積過程の可視化

実験では、ステップ前面の下流域で粒子がある程度の運動量を有する条件とするため、ダクトの勾配は約30度とした。また、ダクト内の流れの断面平均流速は約17.4 cm/sである。

使用したガラス粒子は、粒径4mmの小粒径粒子と粒径7mmの大粒径粒子の2種類とした。粒子の比重は約2.6である。大粒径粒子約40個と小粒径粒子約500個から成る混合粒径粒子群をダクト上流部より投入した。ステップ前面における粒子の堆積過程と分布状況をデジタルビデオとデジタルカメラで撮影した。前述したように、大粒径粒子の3次元位置を計測するための実験では、10個程度の大粒径粒子を蛍光染料で着色し、堆積後の位置を計測した。この実験を繰り返して、十分な数の粒子の3次元座標データを得た。

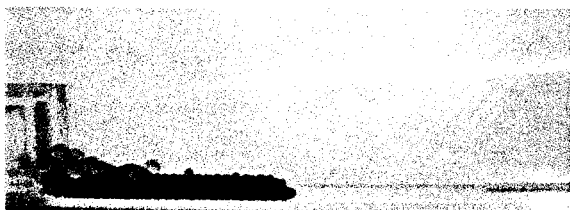
また、分級堆積過程を可視化する実験では、小粒径粒子を黒く着色し、すべての大粒径粒子を蛍光染料で着色した。図8に、このような条件で取得した堆積過程の可視化写真を示す。図中の q は、全体の粒子量に対する投入粒子量の比に相当する。



(a) $q \approx 0.2$



(b) $q \approx 0.4$



(b) $q \approx 0.6$



(c) $q = 1.0$

図-8 可視化された粒子の堆積状況 (黒が小粒径粒子, グレーが大粒径粒子, 左端がステップ)

図8に示されるように、上流から流下した粒子がすでに堆積して停止した粒子に接触する際、大粒径粒子は小粒径粒子の上部に移動し、その後さらに下流方向へ向かう。このため、大粒径粒子はステップ近傍、また堆積した粒子の表層付近に分布する傾向を示す。一方、小粒径粒子の多くは最初の衝突で停止し、そのまま上流方向へ堆積範囲が延長してゆく。一部の小粒径粒子は、堆積した小粒径粒子を越えて移動を続け、ステップ付近まで移動し、初期の段階で停止した大粒径粒子の下部に入り込んだり、これを埋没させる状況も見られる。

3. DEMによる数値シミュレーション

(1) 計算手法の概要

本研究で対象とするステップ前面の分級堆積過程では、粒径の異なる粒子の接触作用を適切に扱うことが重要となる。このため、各粒子を弾性体と仮定して、そのLagrange的な挙動を計算するDEMを利用した数値シミュレーションを行う。

図9は、DEMの接触力のモデルを示すもので、粒子間あるいは粒子と壁面の間の接触力として、バネ・ダッシュポットモデルを考慮し、接線方向には摩擦スライダを含める¹³⁾。支配方程式は、粒子の3次元並進運動と回転運動に関する運動方程式であり、上記の接触力はその外力あるいは外力モーメントとして作用する。また、粒子計算と並行して行われる流体計算から得られる流体力も外力として考慮される。

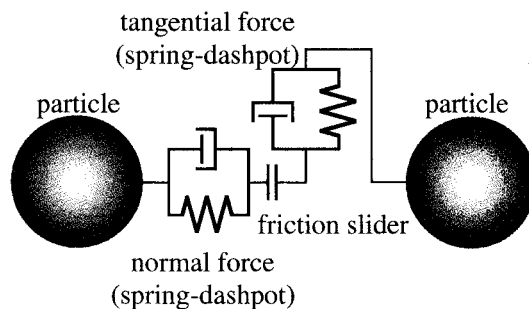


図-9 DEMにおける接触力のモデル

図10に示すように、液相と粒子相の相互作用を考慮して両相を同時に計算し、さらに領域分割により各相の計算が並列的に行われるという2段階の並列化がなされている¹⁰⁾。液相に対しては、二流体モデルに基づく液相の乱流モデルが一般座標系上で解析される。上記のような計算手法の改良により、粒子数が多い場合や、液相に対する3次元計算が必要となる条件下においても効率的な計算が可能となっている¹⁰⁾。

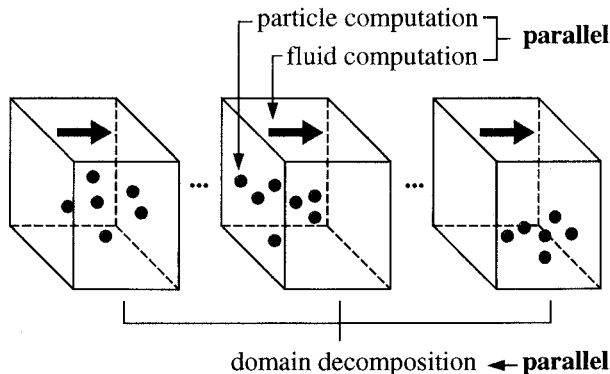


図-10 並列計算の概念図

(2) 計算条件

計算の対象となる領域は、図 11 に示すようなステップ前面のダクト部分である。幅 B と高さ H は実験と一致させ、それぞれ 40mm および 80mm である。また、流下方向長さ L は $4H$ とした。領域分割を行う際には、図 11 の破線で示すように、流下方向に均等な長さの区間で分離した。このため、ステップ前面に粒子が堆積した場合には、最下流端の subdomain の粒子計算の負荷がやや大きくなる。

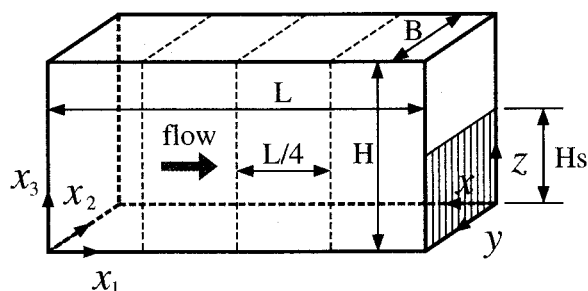


図- 11 計算領域 (右端がステップ)

計算では、水理実験と同様に、粒径 7mm の大粒径粒子と粒径 4mm の小粒径粒子をそれぞれ 40 個および 500 個、領域内に含めて計算を行った。これらの粒子を水平静止水中でランダムに計算領域内に分布させ、ダクト底面に落下させた後、図 11 の下流端のステップを取り除き、勾配を与えて粒子と流体の計算を行った。この計算は、水理実験では十分な長さのダクト部分を粒子が流下する状況に対応している。この状態で、流況がほぼ定常となるまで計算を行い、下流端にステップを設けた計算に切り替えた。したがって、粒子の投入条件は、前述の水理実験の条件とは若干異なっている。

(3) 分級堆積過程に関する考察

図 12 は、数値計算の結果を示すもので、ステップ前面に粒子が徐々に堆積してゆく状況を表している。計算領域下流端付近の粒子は、ステップ前面でせき止められて停止する。このとき、粒子に作用する接触モーメントの作用により、大粒径の粒子は、前方に停止した小粒径粒子があれば、これを乗り越えてさらに下流へ移動する。ステップ前面にある程度の数の粒子が堆積した後も、小粒径粒子が 1 層で堆積している場合には、大粒径粒子はこれを乗り越えて移動を続ける。その結果、図 12 (e) に示すように、最終的には大粒径粒子が鉛直方向には上層側、また流下方向には下流側に比較的多く存在する分布状況が形成される。このような分級堆積過程は、水理実験で観測された状況とよく一致する。

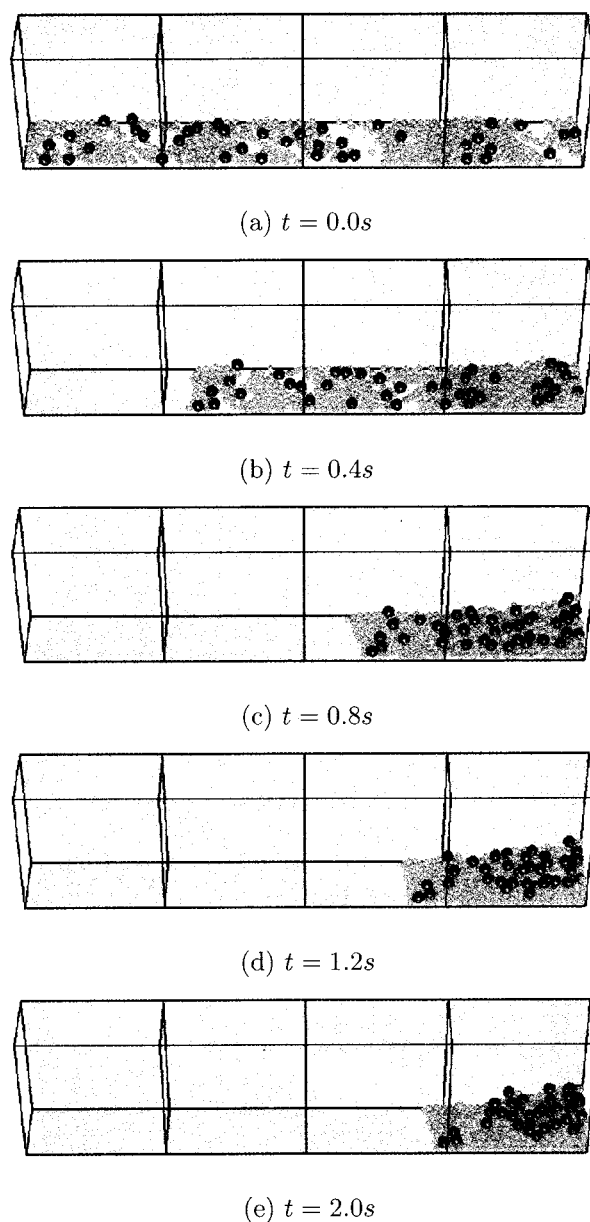


図- 12 数値計算により得られた粒子の堆積過程 (右端がステップ)

図 13 に実験で得られた $x-z$ 平面内の粒子の分布を示す。図中のプロットが大粒径粒子の分布を表し、破線は小粒径粒子のおおよその分布形状を示す。また、数値計算で得られた同様の結果を図 14 に示す。ステップ前面、また堆積粒子の表層部に大粒径粒子が比較的多く分布する状況は、実験と計算でほぼ一致するが、実験結果では内部に埋没した大粒径粒子がやや多いようにも見られる。これは、数値計算における粒子の投入条件が実験と異なることに起因すると思われる。一方、小粒径粒子の分布に関しては、実験結果の方が一層に分布した領域が上流側へ長く広がる分布となり、細部には若干の相違が見られた。

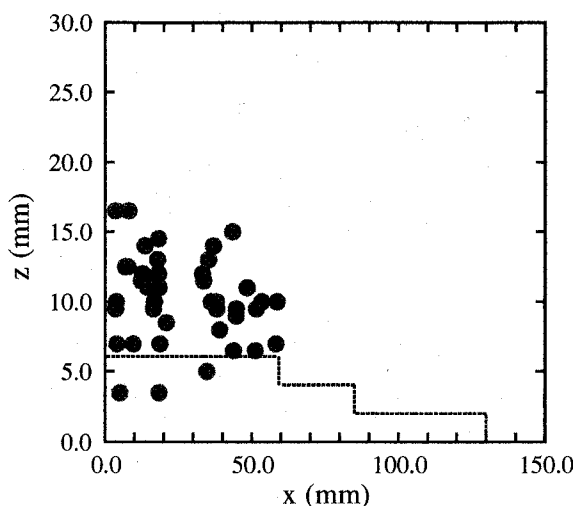


図-13 実験により得られた粒子の分布 (破線は小粒径粒子のおおよその堆積形状)

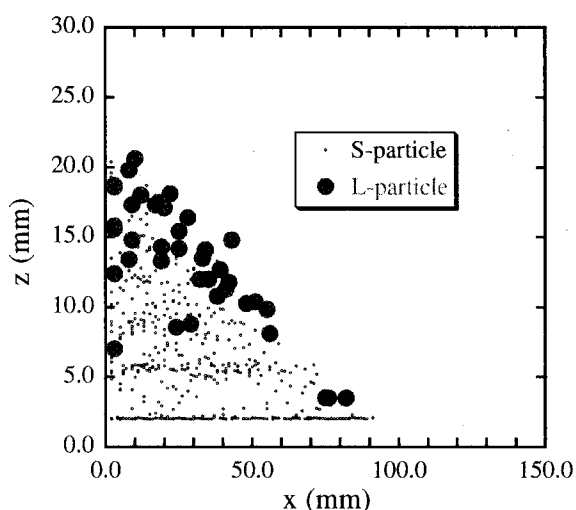


図-14 数値計算により得られた粒子の分布 (t=2.0 s, SおよびL-particleはそれぞれ小粒径, 大粒径粒子に相当)

4. おわりに

水理構造物前面に生ずる混合粒径土砂の堆砂過程に関する基礎的な特性を把握するため、急勾配ダクト内のステップ前面に堆積する粒径の異なるガラス粒子の分布状況等を計測した。特に、可視化手法を用いて大粒径粒子の3次元分布を求めた。さらに、DEMに基づく数値計算を行い、著者等の計算手法により粒子の分布特性が再現できることを示した。今後、計測手法の高度化と多様な条件の分級堆積過程のデータ取得を行うとともに、予測手法の高精度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 富田邦裕, 堀田哲夫, 宮川朝浩. 橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発. 土木学会論文集, No. 497/II-28, pp. 71-79, 1994.
- 2) S. Ushijima. Arbitrary Lagrangian-Eulerian numerical prediction for local scour caused by turbulent flows. *Journal of Computational Physics*, Vol. 125, pp. 71-82, 1996.
- 3) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭. 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析. 土木学会論文集, No. 684/II-56, pp. 21-34, 2001.
- 4) 酒井哲郎, 後藤仁志, 沖和哉, 高橋智洋. 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の可視化実験. 海岸工学論文集, pp. 516-520, 1999.
- 5) P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 6) 後藤 仁志・原田 英治・酒井哲郎. 数値移動床による混合粒径流砂の流送過程のシミュレーション. 水工学論文集, 第44巻, pp. 665-670, 2000年.
- 7) 原田英治, 後藤仁志, 酒井哲郎. 分級過程の三次元性に関する計算力学的アプローチ. 水工学論文集, 第46巻, pp. 619-624, 2002.
- 8) 牛島省. 離散粒子法による3次元固液混相流の数値解析手法 — 3次元複雑形状境界内の固体粒子の扱い —. 日本原子力学会 秋の大会予稿集 (第2分冊), Vol. G37, p. 550, 1997.
- 9) 牛島省, 棚津家久. 不均一粒子流の混合・分級現象に関する3次元並列数値解析法の提案. 水工学論文集, Vol. 45, pp. 715-720, 2001.
- 10) S. Ushijima and I. Nezu. Parallel computation of oscillating flows including granular mixture. *Proceedings of 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements (FMTM2001)*, 2001.
- 11) M. J. Kilgard. OpenGL Programming Guide for the X Window System (日本語版). Addison-Wesley Publishing Company, 1997.
- 12) S. Ushijima and N. Tanaka. Three-dimensional particle tracking velocimetry with Laser-light sheet scannings. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 352-357, 1996.
- 13) 牛島省, 田中伸和, 米山望. 3次元複雑形状領域内における固気混相流中の固体粒子のラグランジュ的解析法. 水工学論文集, 第43巻, pp. 515-520, 1999年.

(2002. 9. 30受付)