

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  
 Numerical Predictions for Transportation of Multiple Gravel Particles  
 Considering Mechanical Interactions between Particles and Fluids

○柳 博文・牛島 省・鳥生 大祐

○Hirofumi YANAGI, Satoru USHIJIMA, Daisuke TORIU

Numerical predictions using a multi-phase model were conducted for two cases of experiments: the transportation of about 16,700 gravel particles due to a vertical jet in water and falling overflows through a weir. In both computations, gravel particle models have 26 different non-spherical shapes, each of which is represented by multiple tetrahedron elements. The fluid forces acting on the gravel particle models are estimated from the volume integral of pressure and viscous terms obtained in gas-liquid computations using finer fluid cells than a gravel particle model. It was confirmed that the heights of gravel beds in two cases of experiments are reasonably predicted with the present numerical method.

### 1. 緒言

局所洗掘現象は防災分野において重要な研究課題の1つであり、実験だけではなく、数値解析的検討も進められている<sup>1)</sup>。本研究では、局所洗掘の数値解析的検討として、抗力係数等が含まれる実験式を用いずに、任意形状の固体粒子と流体間の力学連成を考慮できる3次元固気液多相場解析手法(MICS)<sup>2)</sup>を、下記の2つの礫粒子輸送現象に適用し、それぞれの実験結果と比較する。

- ① 鉛直噴流による礫粒子輸送
- ② 堰を越流した落下水流による礫粒子輸送<sup>3)</sup>

さらに、鉛直噴流による礫粒子輸送計算(項目①)では、水中の渦度ベクトルの絶対値の等値線を可視化し、礫粒子の輸送過程に関する考察を加える。

### 2. 数値解析手法および礫粒子モデル

本手法<sup>2)</sup>では、気液相は非圧縮性流体解法に基づいて計算され、その基礎式は次の3式である。

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = g_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

$t$ は時間、 $x_i$ は直交座標成分、 $u_i$ は気液相の質量平均速度であり、 $p$ ,  $\rho_f$ ,  $\mu$ はそれぞれ気液相の体積平均圧力、密度および粘性係数である。また、 $g_i$ は重力加速度の $x_i$ 成分である。

計算で使用する礫粒子モデルは、既往研究<sup>3)</sup>で実際の礫粒子を測定して抽出されたものを使用する。礫粒子モデルは26種類の代表形状を有し、図-1のように、各形状は四面体要素の集合体として表現される。礫粒子モデルに作用する流体力は、各四面体要素に作用する流体力の総和をとることで得られる。一方、礫粒子モデルの接触は、図-1に示すように、モデル表面付近に配置された接触判定球を用い、個別要素法に基づき計算される。

### 3. 実験結果および計算結果の比較と考察

計算で使用した礫粒子モデルの平均粒径は約7mm、総粒子数はおよそ16,700であった。

#### (1) 鉛直噴流による礫粒子輸送

実験結果および計算結果を図-2に示す。実験は既往研究<sup>4)</sup>で使用した装置を改良して実施した。平均流量は $8.9 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$ 、流入口のレイノルズ

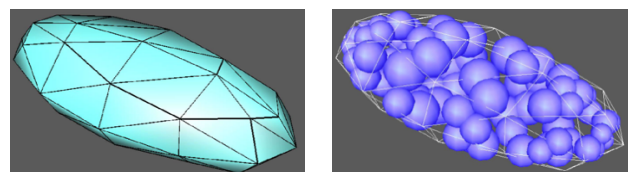


図-1 計算で使用する礫粒子モデル(左:礫粒子モデルを構成する四面体要素, 右:接触判定球)<sup>3)</sup>

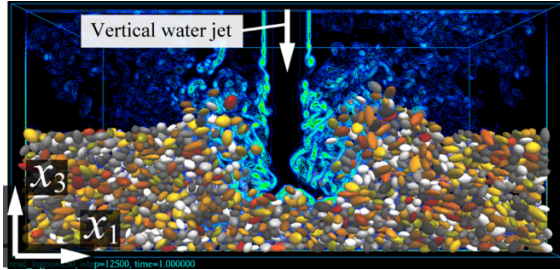
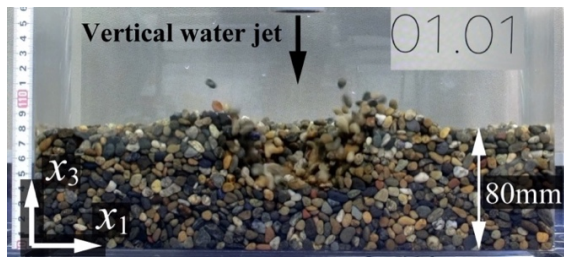


図-2 鉛直噴流による礫群輸送の実験結果(上図)と計算結果(下図, 手前側の礫粒子モデルのみ描画, 色の違いは形状の違い,  $x_2 = 21$  [mm] の渦度ベクトルの絶対値の等値線を可視化),  $t = 1.0$  [s]

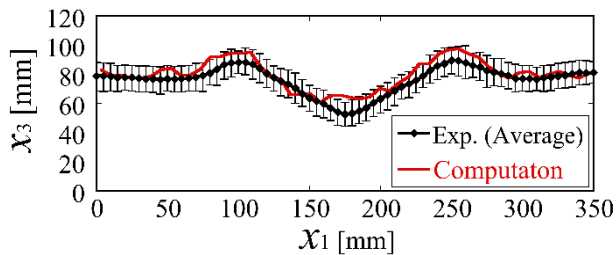


図-3 鉛直噴流による礫群輸送の最終礫面形状

数は  $3.5 \times 10^4$  であった. 図-2 より, 礫層表面に鉛直噴流が衝突し, 放射状に広がる渦を伴った流れによって礫粒子が巻き上げられて輸送される様子が確認できた. 図-3 に, 実験および計算における最終礫面形状の比較を示す. 実験結果では, 計5回行った実験結果のばらつきと, 平均粒径(7mm)を足した値をエラーバーとして表す. 図-3 より, 両者の最終礫面形状が礫粒子の平均粒径程度の誤差内に収まっていることが確認された.

## (2) 堰を越流した落下水流による礫粒子輸送<sup>3)</sup>

実験結果および計算結果を図-4 に示す. 平均流量は  $9.7 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s], 越流堰上のレイノルズ数は  $1.8 \times 10^4$  であった. 図-4 より, 堰を越流した落下水流が水面に衝突して生じる旋回流によって, 礫粒子が巻き上げられて下流側へ輸送される様子が確認された. 図-5 に, 実験および計算における最終礫面形状の比較を示す. なお, 実験結果のエラーバーは, 計5回行った実験結果のばらつきを表す. 計算では, 礫粒子モデルの初期配置を変えて

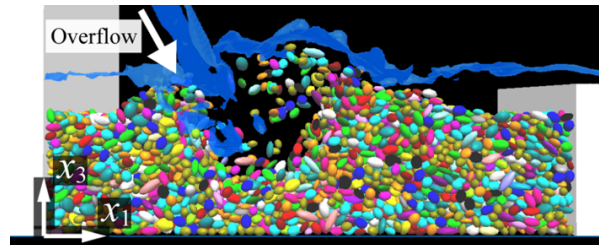


図-4 越流水による礫群輸送の実験結果(上図)と計算結果(下図, 手前側の礫粒子モデルのみ描画, 色の違いは形状の違いを表す),  $t = 2.6$  [s]<sup>3)</sup>

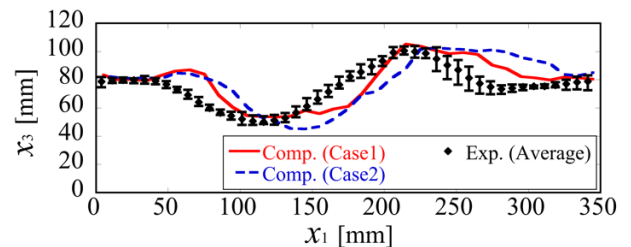


図-5 越流水による礫群輸送の最終礫面形状<sup>3)</sup>

行った2ケースの結果を示す. 図-5 より, 計算における洗掘位置が, 全体的に下流側へ若干ずれたものの, 最大洗掘深や洗掘孔幅, 洗掘孔の斜面勾配は実験と概ね一致することが確認された.

## 参考文献

- 1) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, Vol. 54, pp.805-810, 2010.
- 2) 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析, 土木学会論文集 B, Vol. 64, No. 2, pp. 128-138, 2008.
- 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), Vol. 73, No. 2, pp. I\_377-I\_386, 2017.
- 4) 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31回数値流体力学シンポジウム, C01-03, 2018.