

粒子群の流下挙動に及ぼす粒子形状の影響

中央大学大学院 学生会員 ○高 鋏 裕也
 中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. はじめに

石礫河川には、様々な粒径・形状の粒子が存在している。しかし、既往の砂礫河川を対象とした流砂量式の導出等では、粒子形状の影響は、小さいものと仮定し考慮されていない。石礫河川の土砂輸送機構を適切に評価するためには、粒子形状を考慮した解析が行われるべきである。高鋏ら^{1,2)}は、石礫河川の土砂輸送機構の解明に向けた第一段階として、実際の単一石礫を流下させた石礫流送実験の映像^{3,4)}の画像解析および数値流送実験により、粒子運動に及ぼす粒径と形状の効果を検討した。粒子形状が球形から離れた非球形粒子ほど移動速度が速くなることが示された。しかし、石礫河川では、粒子群として流下しており粒子単体の運動とは異なると考えられる。

本稿では、石礫河川の土砂輸送機構の解明に向けた第二段階として、様々な形状の粒子群および粒子単体に関して固定床数値流送実験を行った。数値実験の結果より、まず粒子群と粒子単体の流下挙動、移動速度を比較し、その差異を検討する。次に粒子群の流下挙動と移動速度のバラツキを検討し、粒子間の相互作用の影響を評価する。

2. 数値流送実験の概要および数値解析法

図-1 に数値流送実験の概要を示す。表-1 に示す 3 種類の形状の粒子単体 (代表粒径 $d=105\text{mm}$) および 24 個の粒子からなる粒子群 (表-2) の数値流送実験を行った。粒子の代表粒径は、同体積の球の直径で換算している。粒子形状は、粒子の最大投影面積を同体積の球の投影面積で無次元化した*無次元最大投影面積で表す。無次元最大投影面積が 1 に近いほど球形となる。水路上流端には、定常流量 $3.0\text{m}^3/\text{s}$ を与え、下流端は、自由放流条件とした。粒子群は上流から 4~5m の区間にランダムに投入する。観測は、先頭の粒子が水路上流端から 8m 地点を通過し、19m 地点に到達するまでとした。観測区間の Fr 数は、1.4 である。

数値解析法は、福田ら⁵⁾の解析法を用い、流れは固液混相流の一流体モデルを用い Euler 的に、粒子運動は剛体の並進・回転の運動方程式より Lagrange 的に解く。計算法の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

3. 粒子群の運動と粒子単体の運動の比較

粒子群の運動と粒子単体の運動を比較する。図-2 に粒子群の流下挙動を示す。それぞれの粒子群において、粒子単体の場合と同様に、球 (a) は転動し、洋ナシ型粒子 (b) は長軸を回転軸とした転動・跳躍により移動する。円盤型粒子 (c) は、短軸を回転軸とした転動・跳躍または平らな面を上に向け滑空形態で移動する。なお粒子の運動形態と粒子形状の関係の詳細は文献^{1,2)}を参照されたい。図-3 に粒子単体および粒子群の鉛直方向存在確率密度分布を示す。粒子単体および粒子群は

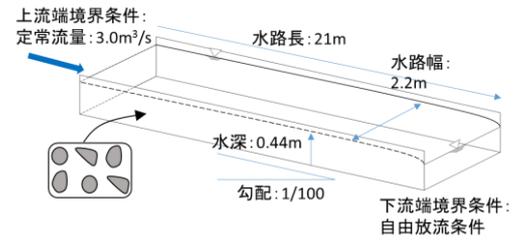


図-1 数値流送実験の諸元

表-1 粒子形状

石礫モデル	球	洋ナシ型	円盤型
無次元長径(a/d)	1.00	1.34	1.50
無次元中径(b/d)	1.00	0.90	1.00
無次元短径(c/d)	1.00	0.83	0.60
S. F. (c/\sqrt{ab})	1.00	0.76	0.49
*無次元最大投影面積	1.00	1.25	1.61

*無次元最大投影面積 = $\frac{\text{対象とする粒子の最大投影面積}}{\text{同体積の球の投影面積}}$

表-2 投入した粒子群

粒子群	球	洋ナシ型	円盤型	合計
(a)球群	24(個)	0	0	24
(b)洋ナシ型群	0	24	0	24
(c)円盤型群	0	0	24	24
(d)混合形状	8	8	8	24

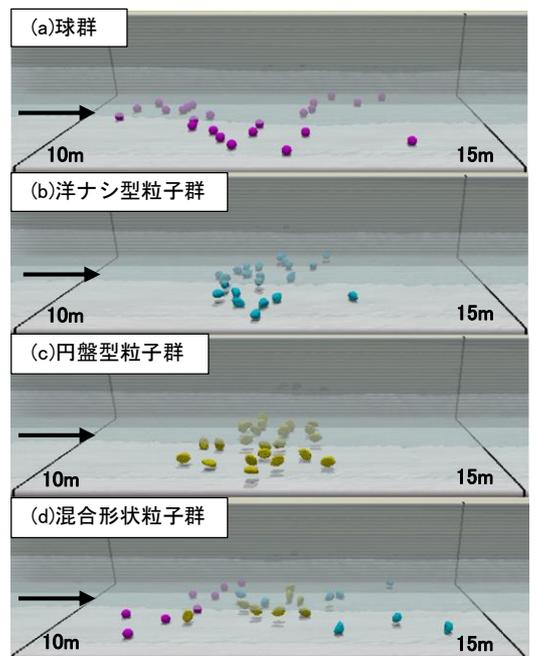


図-2 粒子群の流下挙動

キーワード 石礫河川, 数値流送実験, 流下挙動, 粒子間相互作用, 粒子形状, 無次元最大投影面積
 連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

両者共に、無次元最大投影面積の大きい非球形の粒子(群)ほど跳躍高が大きく、平均的に高い位置を移動する。図-4に粒子単体および粒子群の平均移動速度を示す。粒子単体および粒子群の平均移動速度の大小関係は共に、洋ナシ型粒子(群)が速く、次に円盤型粒子(群)、最後に球(群)となる。以上より、運動形態や鉛直高、平均移動速度の大小関係など粒子群の運動に及ぼす粒子形状の影響は、粒子単体の運動に及ぼす粒子形状の影響と同様であることが確認された。

4. 粒子群の流下挙動に及ぼす粒子形状の影響

粒子群の流下挙動を比較する。一様形状である洋ナシ型粒子群と円盤型粒子群(図-2(b),(c))は、集団で流下する。一方、球群(a)は、個々の粒子が縦断方向にばらついて移動することが分かる。また、図-4に示す粒子群の中の最も速い粒子と最も遅い粒子の移動速度を比較する。洋ナシ型粒子群と円盤型粒子群(b),(c)では、移動速度の差は小さく集団で移動する。球群(a)では、移動速度の差が大きく、個々の粒子がばらつく。

この要因を検討する。基本的に個々の粒子は、互いに衝突し縦断方向にばらつく。しかし、図-2(b),(c)および図-3に示すように、洋ナシ型粒子群および円盤型粒子群では、個々の粒子が跳躍し大きな流体力を受け加速するため、個々の粒子の運動が一様となり集団で流下する。一方、球群は、常に底面を移動するため、局所流の発生や粒子衝突により、個々の粒子の運動がばらつくと考えられる。また図-2(d)の混合形状粒子群は、粒子形状に応じた特徴的な運動形態により個々の粒子が分散する。

移動速度に及ぼす粒子形状の影響を検討する。式(1)に定義する速度低下率を表-3に示す。円盤型粒子群の移動速度は、円盤型粒子単体の移動速度と比べ8%程度小さくなる。球群の移動速度は、球単体の移動速度と比べ13%程度小さい。無次元最大投影面積の小さい球形粒子群ほど、粒子単体の移動速度と比べた速度低下率が大きくなる。この理由は、円盤型粒子群および洋ナシ型粒子群は、跳躍運動が支配的であり、粒子が鉛直方向にばらつくこと、跳躍時に大きな流体力を受けることにより、相対的に粒子間の相互作用の影響が小さくなるためである。一方、球群は、常に底面に存在し、互いの位置を入れ替え相互に干渉する。そのため、球群の移動速度は、球単体の移動速度と比べ大きく低下した。

混合形状粒子群の移動速度は、粒子単体の移動速度と粒子群の速度低下率を用いた式(2)より推定できる。実際に数値実験で得られた値は1.74m/sであり、式(2)より推定した混合形状粒子群の移動速度は1.73m/sと近い値を示す。ただし、式(2)の適用性と限界を確認するため、特に以下の項目を検討する必要がある。第一に、粒子群の数と速度低下率の関係である。第二に、粒子群の形状・粒径の分布と粒子群の分散、つまり異なる運動形態をとる粒子同士との相互作用の関係である。これより、混合形状・混合粒径の粒子群の流下挙動を解明していく。

参考文献

1) 高 鉄ら, 第70回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-80, 2015. 2) 高 鉄ら, 日本混相流学会混相流シンポジウム A112, 2015. 3) 重村, 広島大学大学院工学研究科修士論文, 2004. 4) 福岡ら, 河川技術論文集, 第11巻, pp.291-296, 2005. 5) 福田ら, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No4, pp.I_1051-I_1056, 2013.

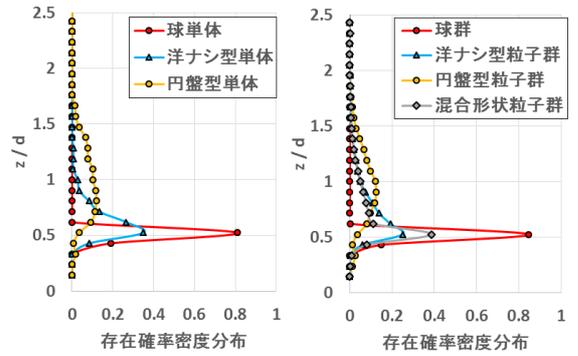


図-3 粒子単体(左)と粒子群(右)の鉛直方向存在確率密度分布

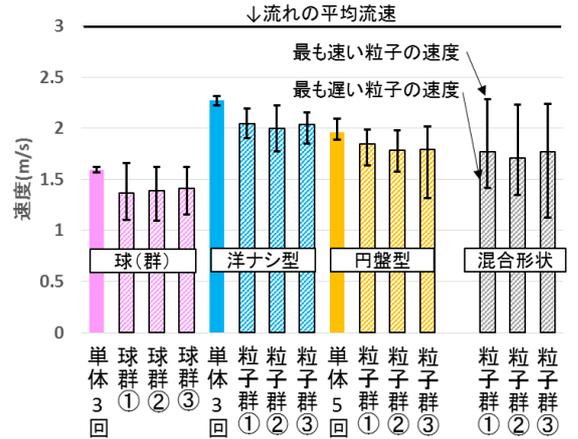


図-4 粒子単体と粒子群の平均移動速度

表-3 粒子群の速度低下率

平均速度	単体 (m/s)	粒子群 (m/s)	速度差 (m/s)	速度低下率 (%)
球	1.59	1.39	0.20	13
洋ナシ型	2.28	2.03	0.25	11
円盤型	1.96	1.81	0.15	8
混合形状	-	1.74	-	-

$$\text{速度低下率(\%)} = \frac{\text{粒子単体の平均移動速度} - \text{粒子群の平均移動速度}}{\text{粒子単体の平均移動速度}} \times 100 \quad \dots(1)$$

$$\text{混合形状粒子群の移動速度} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma_i V_{si} \quad \dots(2)$$

ここに、nは粒子形状の数、 α_i :i形状粒子の体積割合、 γ_i :i形状粒子群の速度低下率、 V_{si} :i形状粒子単体の移動速度である。