

数値移動床水路を用いた水流中の粒子群の三次元運動と 粒子群内の流れ構造に関する研究

Three-dimensional motions of flows and a cloud of particles in the numerical movable-bed channel

15N3100014E 高 鋸 裕也
Yuya TAKAKUWA

Key Word : gravel bed rivers, particle shape, maximum projection area, interaction between particles

1. 序論

石礫河川の河床は、多様な形状・大きさの土粒子で構成されている。石礫河川では、河床粒子が主に形の影響を受け、間欠的に運動し、また大粒子の運動は流れ場に大きく影響する。このため河床表層の粒子群の運動と流れ構造を把握する必要がある。しかし石礫河川では洪水時の水流が激しく河床近傍の流砂運動を観測することは困難である。このような問題の解決に向けて、重村¹⁾はコンクリート製大型開水路に石礫を流下させ、その挙動を撮影し分析している。福田ら²⁾は石礫河川の土砂移動現象を把握するため、任意形状粒子群の三次元運動と流れ場を解析する数値移動床水路を構築し、多くの新しい知見を得ている。田所ら³⁾は、数値移動床水路を用いて移動粒子の Step-length と Pick-up rate を用いた確率過程流砂量式の適用性を検討し、確率過程流砂量式の有用性を示している。しかし数値移動床水路で用いられている個別要素法は、多数の粒子が頻繁に接触する状況を想定しており、各個運搬される石礫河川の土砂移動現象への適用性については十分明らかにされていない。

本研究では、第一に図-1 に示すように、開水路石礫流送実験が石礫移動現象のベンチマークテストとなることから、数値移動床水路の石礫流送解析モデルへの適用性を検討する。第二に、単一粒子の数値流送実験を行い、粒子運動に及ぼす粒径・形状の影響を検討する。最後に粒子群の数値流送実験を行い、

粒子間干渉、流れ場に及ぼす粒子群運動の相互作用の効果を分析し、石礫河川の土砂移動現象を把握することを目的とする。

2. 数値移動床水路の開水路石礫流送実験への適用

表-1 に示す形と大きさの異なる3つの石礫粒子を用い、開水路石礫流送実験と同様の数値流送実験を行う(図-2)。粒子は楕円体型、円盤型、洋ナシ型と多様な形状を対象としている。代表粒径は同一体積の球の直径と定義する。

数値流送実験では、水路長 45m の水路上流端に 0.5m³/s の一定流量を、下流端に圧力ゼロの条件を与える。粒子は、x=2m 地点に初速度 0m/s で投入する。x=7.5~37.5m の 30m 区間を観測対象区間とする。数値解放は福田らの解析法を用い²⁾、流れは非圧縮性流体として Euler 的に、粒子は剛体として Lagrange 的に解析する。

数値実験は、粒子投入時の横断位置(y)と粒子の向きを変化させ複数回行い、開水路石礫流送実験の結果と比較する。

第一に、粒子の平均移動速度を考察する(図-3)。数値実験では、粒子①は全体的に平均移動速度が狭い範囲にあるが、粒子③はばらつく。これは粒子の移動形態つまり粒子形状に起因すると考えられる。塊状で対称性の大きい楕円体型の粒子①は、移動形態が安定し、平均移動速度がまとまる。一方、非対称な形状の洋ナシ型の粒子③は、移動形態が不安定で

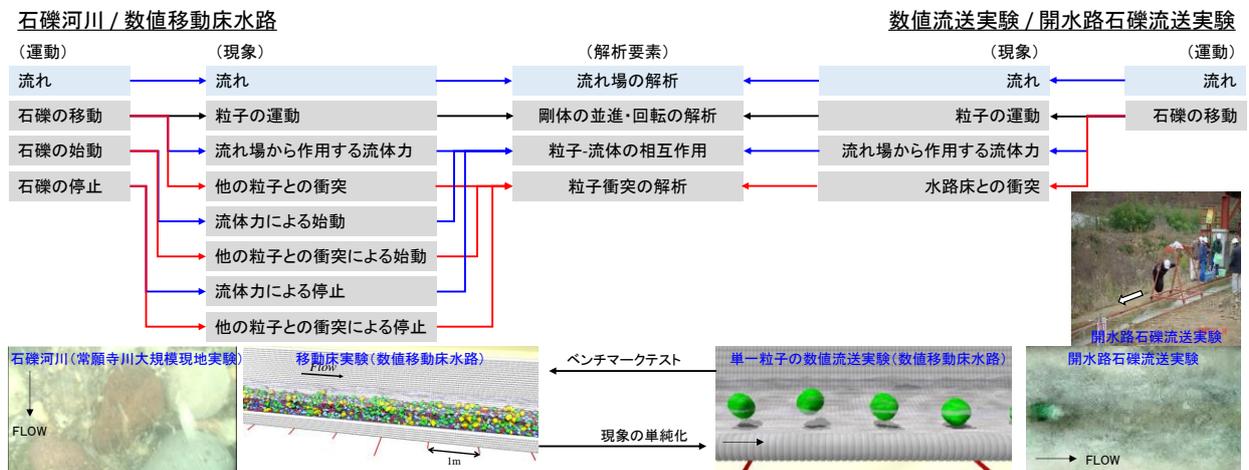


図-1 石礫河川と開水路石礫流送実験、数値移動床水路の関係

移動速度がばらつく。このことから円盤型の粒子②は、洋ナシ型の粒子③よりさらに移動速度がばらつくと考えられる。

粒子①では Case4, 粒子③では Case3 の数値実験が開水路石礫流送実験の結果と近い値をとる。しかし円盤型の粒子②は開水路石礫流送実験の結果と大きく異なり、実験回数を増やす必要がある。

第二に、粒子の横断方向存在確率分布を比較する(図-4)。粒子①は、どのケースも似通った分布形状を取り、移動形態が安定していることが分かる。Case4の横断分布は、開水路石礫流送実験と同様の分布形状をとる(図-4 a)。粒子②は、開水路石礫流送実験では比較的水路中央を移動しているが、数値実験では横断方向に移動しており、その分、移動速度が遅くなったと考えられる(図-4 b)。粒子③は、比較的水路中央を移動する場合(Case1,3)と水路幅全体を移

表-1 開水路石礫流送実験の石礫および数値流送実験の粒子モデル

石礫or粒子	①	②	③
形状	楕円体型	円盤型	洋ナシ型
粒径(mm)	75	105	135
石礫			
粒子モデル			

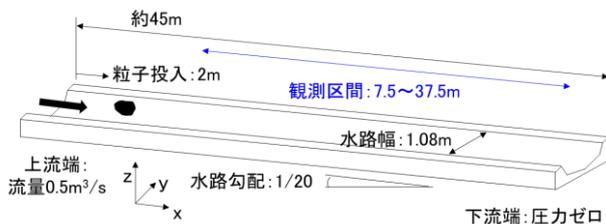


図-2 単一粒子の数値流送実験の条件

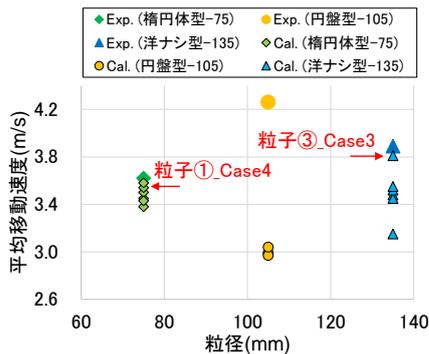
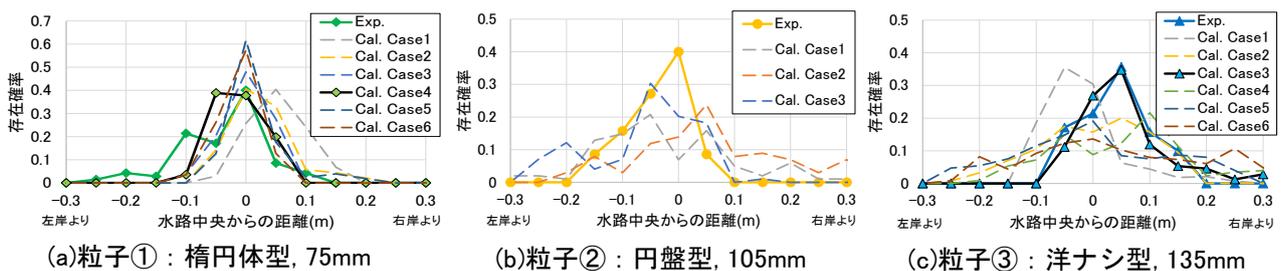


図-3 粒子の移動速度の比較



(a)粒子①：楕円体型, 75mm

(b)粒子②：円盤型, 105mm

(c)粒子③：洋ナシ型, 135mm

図-4 粒子の横断方向存在確率分布の比較

動する場合(Case2,4,5,6)があり、移動形態が不安定で移動速度がばらつくことと一致する。また、平均移動速度が開水路石礫流送実験の結果と近い値を示した Case3 の横断分布は、開水路石礫流送実験の横断分布と極めて近い分布形状をとる(図-4 c)。

以上より、円盤型粒子の運動についてさらに検討する必要があるが、開水路石礫流送実験の楕円体型粒子・洋ナシ型粒子の運動(平均移動速度、横断方向存在確率分布)を数値実験で再現できることを示した。これより、移動粒子数が少なく衝突頻度の少ない平坦な河床状況の土砂移動に対する数値移動床水路の適用性を確認した。

3. 水流中の粒子運動に及ぼす粒径・形状の影響

表-2に示す5形状の粒子を、粒径75, 105, 135mmの組み合わせの粒子を用いて数値流送実験を行った。粒子形状を評価する方法は幾つかあるが、本文では式(1)で示される三軸(長径 a ・中径 b ・短径 c)による Shape Factor と式(2)で示される粒子の最大投影面積を同体積の球で除した無次元最大投影面積(nMPA)を用いる。

$$S.F. = c/\sqrt{ab} \quad (1)$$

$$nMPA = \text{粒子の最大投影面積} / \text{同体積の球の投影面積} \quad (2)$$

どちらも値が1.0に近いほど球に近く、S.F.では1より小さくなるほど、無次元最大投影面積では1より大きくなるほど非球形となる。S.F.では立方体は球に近い形状であるが、nMPAでは立方体は球と大きく異なる形状となることが分かる。

数値実験では、前節の実験から水路長を38mに短縮し境界条件等は同じである。粒子は、 $x=15m$ 地点に初速度3.0m/sを与え投入し、 $x=20\sim 38m$ 区間を観測対象区間とする。

図-5に粒子の平均移動速度を整理する。(a)より、どの粒径の粒子も2~4m/s程度の移動速度にばらついており、粒径の違いによる移動速度への効果は小さい。次に粒子形状の効果を検討する。河川工学でよく用いられるS.F.で評価すると(b)、S.F.の最も大きい球の移動速度が他の形状の粒子と比べ遅いことは明らかであるが、他の4形状の粒子の移動速度とS.F.の関係は明確でない。

一方、どの形状の移動粒子も流れに対し投影面積

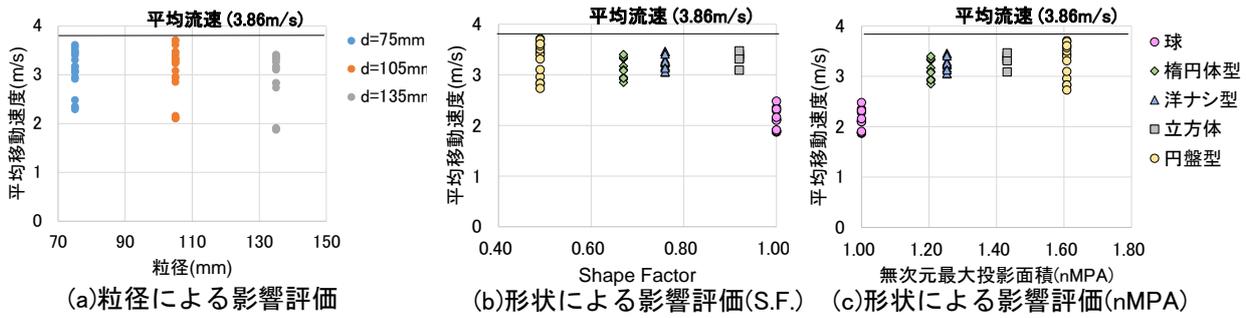


図-5 粒子の平均移動速度

表-2 粒子モデルの特徴

粒子モデル	球	楕円体型	洋ナシ型	立方体	円盤型
形状	球	楕円体型	洋ナシ型	立方体	円盤型
長径	1.00	1.39	1.34	1.00	1.50
中径	1.00	1.01	0.90	0.85	1.00
短径	1.00	0.79	0.83	0.85	0.60
Shape Factor	1.00	0.67	0.76	0.92	0.49
無次元最大投影面積	1.00	1.21	1.25	1.43	1.61

の大きな向きで移動するため、無次元最大投影面積が大きくなるほど粒子の移動速度が大きくなる。これより、粒子の移動速度に及ぼす粒子形状の効果は、粒径の効果より大きいことが明らかとなった。また粒子形状を粒子運動の力学に取り入れる場合、その運動形態に合わせて形状指標を選択することが重要となる。

4. 粒子群の水流中の三次元運動と粒子群内の流れ構造

4.1 粒子群の水流中の三次元運動

表-4に示す24個の粒子からなる単一形状粒子群・混合形状粒子群の数値流送実験を行った(図-6)。粒子群は、水路上流から4~5m、水路中央から左右に0.7mずつ、水路底面から0.35mの領域に瞬時に与えた。粒子の初速度は流れの速度に等しい2.5m/sとし、粒子発生が流れ場に与える影響を小さくした。観測区間は、先頭の粒子が8m地点を通過し、19m地点を超えるまでとした。粒子群投入前の観測区間のフルード数は1.4、水深は0.44mである。

図-7に粒子群の流下挙動の一例を示す。粒子群中の個々の粒子の運動は、単一粒子の粒子運動と同様の移動形態をとる。また粒子群の鉛直方向存在確率分布は、単一粒子の鉛直方向存在確率分布と同様の分布形状をとる(図-8)。次に、粒子間干渉、粒子群の鉛直高、移動速度の関係を示す。球群は、球単体の移動速度に比べ13%、洋ナシ型粒子群は11%、円盤型粒子群は8%小さくなる。本文では、この粒子単体の移動速度から粒子群の移動速度の低下量を粒子間干渉の効果と考える。

$$\text{速度低下率 } r_i = \frac{\text{粒子単体の平均移動速度: } V_s - \text{粒子群の平均移動速度: } V_m}{\text{粒子単体の平均移動速度: } V_s} \quad (3)$$

表-5に、式(3)に定義する速度低下率を示す。これは、無次元最大投影面積の大きい非球形粒子群は、平均的に高い位置を移動し(図-8)、個々の粒子の後流域

表-4 粒子群を構成する粒子割合

Case	粒子数			合計
	球	洋ナシ型	円盤型	
A: 球群	24	0	0	24
B: 洋ナシ型粒子群	0	24	0	24
C: 円盤型粒子群	0	0	24	24
D: 3形状混合粒子群	8	8	8	24

粒径: d=105 mm

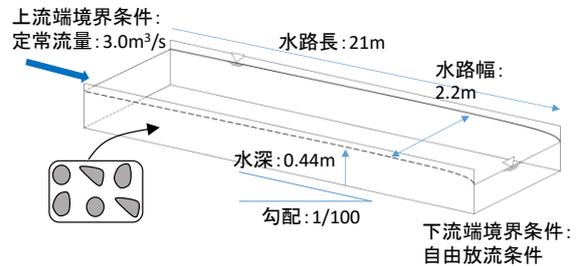


図-6 粒子群の数値流送実験の条件

に入ることが少なく、大きな流体力を受けるためである。

以上の検討より、混合形状粒子群の移動速度は、単一粒子の移動速度、粒子数と粒子形状に起因する粒子間干渉の効果である速度低下率を用いて簡易的に推定できると考えられる。式(4)に混合形状粒子群の移動速度の推定式を示す。

$$V_{m\Sigma i} = \sum_{i=1}^n (1 - r_i) \alpha_i V_{si} \quad (4)$$

ここで、 $V_{m\Sigma i}$ は混合形状粒子群の平均移動速度、 V_{si} は*i*形状粒子の平均移動速度、 α_i は粒子群に含まれる*i*形状粒子の体積割合、*n*は粒子形状の数である。式(4)で推定した混合形状粒子群の移動速度(D)は、実際に数値実験で得られた混合形状粒子群の移動速度と近い値を示す。

4.2 形の異なる粒子群の運動が流れ場に及ぼす効果

固定床上で粒子群が水流中を移動する際の流れに及ぼす粒子形状の効果を検討する。定常状態での粒子群の運動が流れに及ぼす効果を考察するため、図-9に示すように長さ5m幅1mの固定床で縦断及び横断方向に周期境界条件を与えた水路を用いて考察した。水深0.45m、勾配1/30の条件のもと、球のみ、洋ナシ型のみ、円盤型のみ、3形状混合、および水のみ4ケースについて検討を行った。各ケースの粒子の投入個数は表-4に示すとおりである。粒子群を

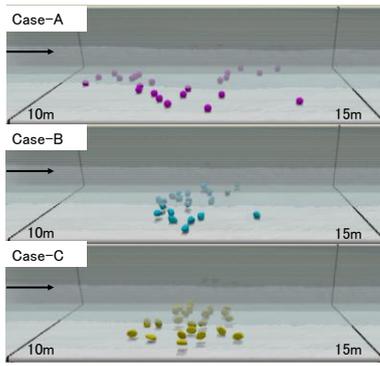


図-7 粒子群の流下挙動の一例

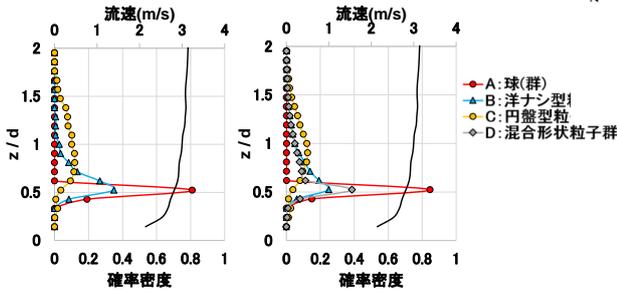


図-8 単一粒子と粒子群の鉛直方向存在確率分布

表-5 粒子群の平均移動速度

平均移動速度	単一粒子 V_s (m/s)	粒子群 V_m (m/s)	速度低下率: τ_i	V_m 式(4) (m/s)
A: 球(群)	1.59	1.39	0.13	
B: 洋ナシ型粒子(群)	2.28	2.03	0.11	
C: 円盤型粒子(群)	1.96	1.81	0.08	
D: 3形状混合粒子群	-	1.74	$\tau_i = \frac{V_s - V_m}{V_s}$	1.74

投入したケースの粒子群の体積割合は 0.27%である。

図-10 に水路全体の時空間平均で示された解析結果の各ケースの水及び粒子群の速度の鉛直分布を示す。粒子群の体積割合は 0.27%であるにもかかわらず、水のみケースと比較し、粒子群を投入したケースは、水の速度が大きく低下している。球のケースでは、水の速度は底面付近で小さいが上部では最も大きくなっている。また、円盤型の粒子速度は鉛直方向に最も変化が小さな分布形となっているが、このような特徴は、水の速度の鉛直分布にも表れており、円盤型の水の速度は、最も鉛直方向の変化が小さくなっている。これらから、水の速度の分布形状は、形ごとに異なる粒子の運動と密接に関係していることが確認された。

5. 結論

本研究では、粒子の形が水流と粒子運動に及ぼす効果を考察するため、固定床上の水流中に粒子が単一または数個流送される条件を対象として、開水路石礫流送実験結果の分析および、数値移動床水路を用いた検討を行い、以下の主要な結論を得た。

1) 開水路石礫流送実験と数値流送実験について、粒子の平均速度と横断方向の粒子の存在確率分布を比較した結果、数値流送実験の粒子運動が平坦床の開水路石礫流送実験の石礫運動を良く説明できた。こ

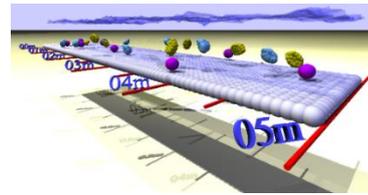


図-9 周期境界条件を用いた場合の水面と粒子運動の状況 (3形状混合の例)

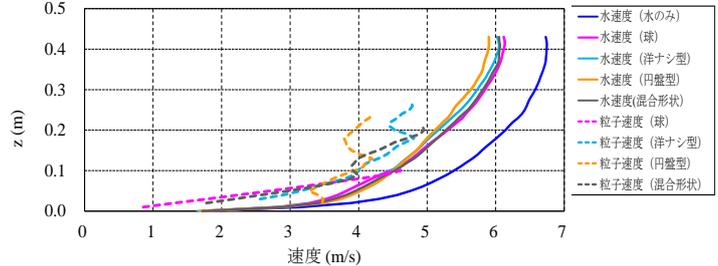


図-10 水と粒子群の速度の鉛直分布

れより、水流と粒子運動に及ぼす粒子形状の効果を考察する上で、数値流送実験の有効性が確認された。2) 数値流送実験結果より、粒子の無次元最大投影面積が大きいほど水流中の粒子速度は大きくなっており、水流中の粒子の形の効果を特徴づける重要な指標であることが明らかとなった。

3) 単一粒子の速度と比較して複数粒子群の平均速度は小さくなる。この速度の低下率は、跳躍しづらく底面付近を転動して移動する球ほど低下率は大きく、大きく跳躍する非球形の粒子群は速度の低下率が小さくなった。これは、球の場合、粒子群はほぼ同じ高さを移動しており、上流粒子の後流域に下流粒子が位置しやすく、粒子群に平均的に作用する流体力が減少したためと考えられる。このように形によって異なる粒子の運動形態が、流れを介して生じる粒子間の相互作用に大きく影響している。さらに、粒子群が移動する際の水の速度の鉛直分布は、球群の場合、底面付近で小さく上部で大きく、跳躍が主体の粒子では、粒子と水の速度の鉛直分布はともに鉛直方向に一様になる傾向を持ち、水の速度の鉛直分布にも、形によって異なる粒子群の運動の効果が大きく表れることを示した。

本研究では、粒子の形が粒子運動と水流に及ぼす効果について、基礎的知見を得ることが出来た。今後は、これらを踏まえ、多量に粒子が存在する石礫河床上の移動する粒子群と流れの相互作用について検討する。

参考文献

- 1) 重村一馬: 排砂水路を流下する礫群の運動と水路底面の磨耗進展機構, 広島大学大学院修士論文, 2004.
- 2) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動, 土木学会論文集 B1(水工学), 2013.
- 3) Tadokoro H., Fukuoka S., Fukuda S.: Effects of particle shapes and sizes on fundamental movement processes of particles and sediment transport rates in gravel streams, THESIS-2016 Tokyo, pp.93-96, 2016.