

流体中の石礫粒子の移動開始時と跳躍時の運動 に及ぼす形状の効果

熱海 孝寿¹・福岡 捷二²

¹ 学生会員 中央大学大学院理工学研究科・日本学術振興会特別研究員 DC

(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a14.c3y6@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² フェロー 中央大学 研究開発機構教授 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

石礫河川の河床材料は幅の広い粒度分布、多様な粒子形状を有している。洪水時に石礫粒子は個々の粒子が間欠的に非平衡的に運動する為、粒子形状と粒径が与える効果が大きい。本研究では、同一体積で異なる形状を持つ粒径集団からなる石礫群を用いた数値移動床実験を実施し、移動開始時と跳躍時の運動に及ぼす粒子形状の影響を調べた。その結果、跳躍運動に及ぼす粒子形状の影響は大きくなく、むしろ移動開始時に形の影響が現れる。河床表層の粒子の姿勢や配置が粒子の離脱に違いをもたらしており、粒子運動に及ぼす粒子形状の効果を明確にした。

Key Words: gravel bed river, particle shapes, numerical movable-bed channel, incipient movement, saltation

1. 序論

石礫河川の河床材料は幅の広い粒度分布、多様な粒子形状を有している¹⁾。洪水時に粒径の大きな礫群は、容易に動かず、その周囲に中小粒子を留まらせる効果など、石礫河川の流砂に及ぼす粒度の影響は大きい。関根らは粒度幅の広い河床材料を用いて系統的な移動床実験を実施し^{例えば2)}、平衡状態に至った河床の構造や遮蔽効果を詳細に検討している。

洪水時の礫群の運動を考えると、個々に間欠的な運動を示すため、粒子形状が流砂運動に及ぼす影響も大きいと考えられる。大きな粒径の移動を扱う移動床実験は実験設備の制約上難しく、粒子運動を観測することは困難であるため、Fukuokaら³⁾は粒子群の運動と流れの相互作用を考慮した三次元数値移動床水路を構築した。数値実験結果は、粒径による石礫粒子の運動の違いを説明している。一方、田所ら⁴⁾は、球形状と非球形粒子群それぞれで数値移動床実験を実施し、離脱時や停止時の運動の違いを明らかにしている。しかしながら、これらの検討では、形と大きさの両方が異なる石礫集団を使用していた為、形の影響を定量的に明らかにすることが困難であった。そこで、同一体積で異なる形状の粒子群を用いた

数値移動床実験を行い、非球形粒子が流れの中で覆瓦構造を形成し、河床の安定に寄与する機構を明らかにしてきた⁵⁾。覆瓦構造は球粒子で生じず、特に掃流砂の運動では、粒子形状によって表層でかみ合わせの程度が異なり、移動開始時の運動に形の影響が現れやすい。

本研究では、同一体積で異なる形状の粒子群を用いた数値移動床実験を実施し、流砂運動の基本に関係する粒子の移動開始時および跳躍時の運動に及ぼす粒子形状の影響を分析し粒子形状の効果を明確にする。

2. 数値解析法³⁾

本研究の数値解析法は、流れを Euler 的に、石礫粒子群は Lagrange 的に解析する。流れの解析では固液混相流の一流体モデルを用いて石礫粒子の固相部分を密度の異なる液体として与え、非圧縮性流れとして解析する。石礫粒子群の運動解析は、個別要素法に基づき粒子間接触を考慮し、並進と回転の運動方程式を用いて解析する。また、自由水面の変化は VOF 法に基づき各流体計算格子における液相の体積割合に関する移流方程式を用いて解析を行う。石礫粒子は、剛体として小球を隙間がない

ように連結させ任意形状をモデル化している。また、粒子に作用する流体力は、流れ場の解析から直接評価している。詳細は文献³⁾を参照されたい。

本解析で用いたパラメーターを表-1に示す。Fukuokaら³⁾の検討結果を参考に解析パラメーターを決定した。

3. 数値実験条件

数値移動床実験に用いた実験水路の諸元は、水路長15 m, 幅1 m, 勾配1/20の直線水路である。図-1は、数値解析に使用した2種類の非球形粒子を異なる方向から示している。2種の粒子は、直径70 mmの球の粒子と同一の体積を有するように作成し、形状は、多摩川支川の浅川で採取された石礫を参考に決めている⁵⁾。このとき、表面積は必ずしも同一とはならない。表-2は、扁平、棒状、球粒子の粒子形状特性を示す。表面積は、1 mmの直交格子を用いて表面セルの点群データを抽出し、三角形格子を作成し面積を求めた。扁平粒子の表面積は、3種の粒子の中で最大となりその値は球の表面積 πd^2 のおよそ1.3倍程度となった。以降のデータ整理では体積換算の名目直径 $d=70\text{ mm}$ を用いた。

表-3は、数値移動床実験の実験条件を示している。数値移動床実験は図-1に示す扁平、棒状粒子に加え球粒子を用いて、計4ケース実施した。初期河床の作成の為に投入した粒子群の総土砂量は4ケースとも同量で、Case3では、扁平と棒状粒子の投入量は同じである。上流端で一定流量 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ を与え、下流端は圧力をゲージ圧0としている。給砂は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 $x=1\sim 3\text{ m}$ の範囲にランダムに投下させている。表-3の水深およびフルード数は、通水開始から100秒時の $x=5\sim 11\text{ m}$ で空間平均した値を示している。摩擦速度は $t=100\text{ s}$ の、 $(gRI)^{0.5}$ から算出した値である。ここに、 g は重力加速度、 R は径深であり、エネルギー勾配 I は、 $x=5, 11\text{ m}$ の全水頭の差から算出した。また、流下方向速度が 0.05 m/s 以下である粒子を河床粒子として河床高を算出し水理量を整理した。

これまでの検討から、移動開始時の流砂運動に粒子形状の違いが与える影響が大きい。その為、三種の粒子(扁平、棒状、球粒子)について、掃流力を変化させ、pick up rateの変化量を調べる数値実験を行った。数値実験水路は、長さ10 m, 幅1 m, 水路勾配は1/20である。粒子をパッキングした後、非球形粒子については20秒間通水を行い表層の粒子を自然の状態にセットした。その後、計算時間の短縮の為、図-2に示すように河床表層一層目の粒子と $x=6\sim 8\text{ m}$ 区間に位置する粒子群についてのみ粒子運動の解析を行った。図中の粒子は視認しやすくする為、粒子運動を解析する粒子は色を付けており、

表-1 解析に用いたパラメーター

流体計算格子サイズ	0.01	m	粘性係数	8.9×10^{-4}	Pa · s
流体運動解析の刻み時間	5×10^{-4}	s	Smagorinsky 定数	0.173	
粒子運動解析の刻み時間 (Case1, Case3, CaseA~CaseC)	2.5×10^{-6}	s	弾性係数	5×10^{10}	Pa
粒子運動解析の刻み時間 (Case2, Case4)	3.3×10^{-6}	s	ボアソン比	0.33	
水の密度	1,000	kg/m^3	反発係数	0.7	
粒子の密度	2,650	kg/m^3			

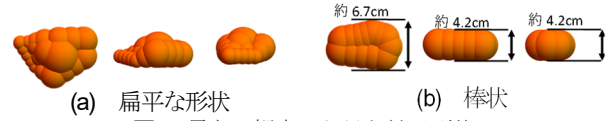


図-1 異なる視点から見た粒子形状

表-2 粒子形状特性

粒子形状	長軸 a [mm]	中軸 b [mm]	短軸 c [mm]	表面積 S [mm ²]	名目直径(表面積) [mm]	名目直径(体積) [mm]
扁平	109.9	81.2	50.4	205	80.8	70
棒状	100.8	67.9	47.6	187	77.2	70
球	70	70	70	167. (154)	70.0	70

※()は πd^2 。表面積の算定誤差は、球形状で8.7%程度生じた。

表-3 数値移動床実験の実験条件

実験ケース	流量 Q [m ³ /s]	水深 h [m]	フルード数 Fr	摩擦速度 u_* [m/s]	パッキング厚 [m]	粒子形状	名目直径 d [mm]
Case1	0.50	0.24	1.27	0.288	0.23	扁平	70
Case2	0.50	0.23	1.35	0.290	0.21	棒状	
Case3	0.50	0.24	1.31	0.285	0.22	扁平・棒状	
Case4	0.50	0.25	1.25	0.301	0.22	球	

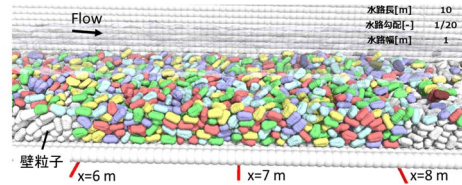


図-2 pick up rate の計測の為の数値実験(CaseB)

表-4 pick up rate の計測の為の数値実験条件

実験ケース	流量 Q [m ³ /s]	水深 h [m]	フルード数 Fr	摩擦速度 u_* [m/s]	粒子形状	名目直径 d [mm]
A1	0.1	0.097	0.82	0.194	扁平	70
A2	0.2	0.138	1.07	0.220		
A3	0.3	0.172	1.18	0.254		
A4	0.4	0.197	1.32	0.266		
A5	0.5	0.220	1.42	0.283		
A6	0.6	0.246	1.47	0.313		
B1	0.1	0.098	0.87	0.202	棒状	70
B2	0.2	0.135	1.10	0.228		
B3	0.3	0.168	1.24	0.252		
B4	0.4	0.192	1.39	0.273		
B5	0.5	0.212	1.53	0.298		
C1	0.1	0.096	0.80	0.196	球	70
C2	0.2	0.136	1.06	0.230		
C3	0.3	0.169	1.25	0.248		
C4	0.4	0.190	1.44	0.273		
C5	0.5	※0.203	※1.71	0.294		

※10cm程度洗堀が生じており、参考値として示す。

白色の粒子は壁粒子として動かない。表-4は、pick up rateの計測の為に実施した実験条件を示しており、いずれも給砂は行っていない。表-4の水深およびフルード数は、通水開始から70秒時の $x=6\sim 8\text{ m}$ で空間平均した値を示している。摩擦速度は、いずれも $(gRI)^{0.5}$ から算出した。対数則から評価した摩擦速度と $(gRI)^{0.5}$ の値は概ね一致することを確認した。

4. 実験結果

(1) 移動開始時の粒子運動に及ぼす形状の影響

表-4示す実験条件で、3種の粒子(扁平、棒状、球)についてpick up rateと掃流力の関係を調べた。pick up rateの計測は、中川ら⁹⁾と同様に、トレーサー粒子の残留率

を調べ算出した。通水開始から 10 秒後の移動床区間 $x=6\sim 8\text{ m}$, $y=-0.4\sim 0.4\text{ m}$ の範囲で、表層に露出している粒子の内、サンプル数を目安に、鉛直方向に高い順にトレーサー粒子を選定した。各実験のトレーサー粒子のサンプル数は 67~105 個の範囲である。離脱判定は、粒径を目安に、粒子の重心位置の変位が初期位置から 0.1 m 以上生じた場合とした。ここでの初期位置は、トレーサー粒子を設定した時刻の位置である。

図-3 は、計測した pick up rate を示している。実線は、CaseA(扁平), CaseB(棒状), CaseC(球)の離脱割合であり、プロットは、移動床実験の Case1~4 で同様の方法で計測した値を示している。土屋 η は一様粒径および混合粒径土砂の限界掃流力時の土砂の移動状態を pick up rate の値が 0.005 1/s としており、これを本実験結果に適用した。

図-3 より、pick up rate の値が 0.005 1/s を超えると摩擦速度の増加に伴い、急激に pick up rate が上昇していることが確認できる。線形補間をして得られた限界摩擦速度は、CaseA(扁平), CaseB(棒状), CaseC(球)それぞれで、 $u_{*c}=0.266, 0.262, 0.230\text{ m/s}$ であった。図中には、参考に岩垣の式による限界摩擦速度を示している。球と比較して実験に用いた非球形粒子(扁平と棒状)の限界摩擦速度は 15% 程度大きい値をとった。

図-4 は表層粒子に作用する接触力の向きを示している。表層粒子は、流体力に対して周囲の粒子群から接触力を上流側に向け受ける。特に、非球形粒子は、周囲の粒子との配置による影響に加え、姿勢を変化させる為、より大きな接触力を上流側に向けやすくなり、限界摩擦速度が球に比べ大きくなる。一方 CaseA(扁平), CaseB(棒状)には、図-3 に見られるように両者の間に限界摩擦速度の違いがほとんど見られなかった。図-5 は、限界掃流力以下で、離脱したトレーサー粒子の配置を示している。図中の明るい粒子がトレーサー粒子であり、黄色の鎖線で囲う粒子は、初期位置の設定から 60 s 以内に離脱が生じた粒子である。トレーサ粒子は、鉛直方向に高い粒子に設定しているため、図中から離脱したトレーサ粒子はその周囲より高い位置に存在している。このように、河床表層には一定数離脱しやすい姿勢や配置の粒子が存在する為、CaseA(扁平), CaseB(棒状)の限界摩擦速度の違いが明確に見られなかったと考えられる。図-3 から、 $u_*=0.28\text{ m/s}$ 付近より掃流力の大きい場合では CaseA(扁平), CaseB(棒状)の pick up rate に差が生じている。図-6 は、流量 $Q=0.5\text{ m}^3/\text{s}$ 時の、CaseA(扁平), CaseB(棒状)のトレーサ粒子の配置を示している。図-6(a)の印をつけた粒子が初期位置の設定から 60 s 以内に離脱した粒子で、CaseB(棒状)は、全てのトレーサ粒子が流出した。図中の白の鎖線で囲う粒子群は、複数個の粒子がかみ合うクラスター状の配置を示している。クラスターは、同じ高さで粒子がかみ合うことで、より大きな流体力に抵抗し表層に

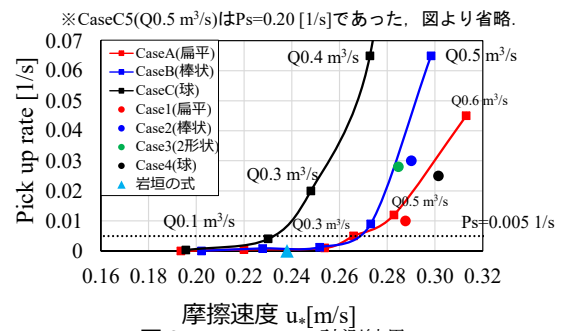


図-3 pick up rate の計測結果

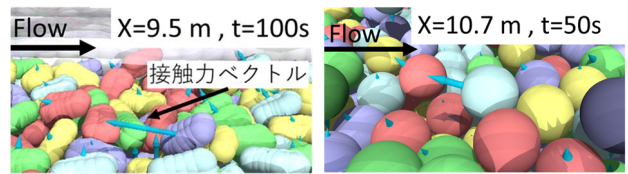


図-4 表層粒子に作用する接触力

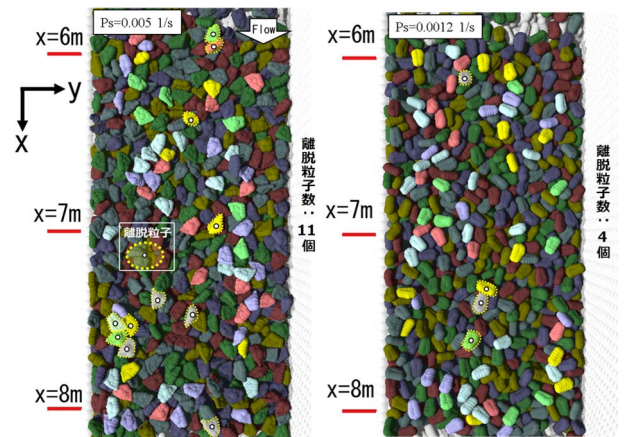


図-5 限界掃流力以下で離脱したトレーサー粒子の初期配置

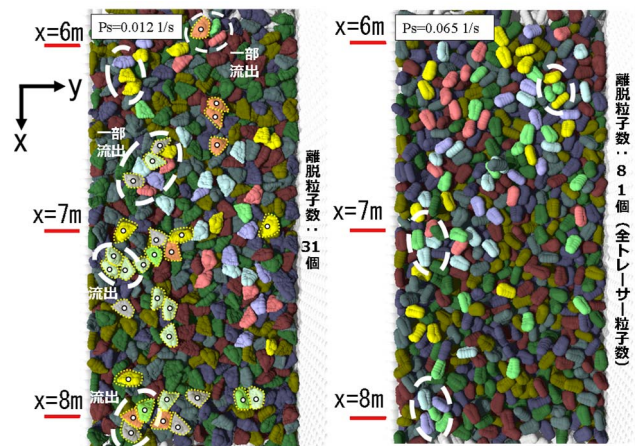


図-6 高い掃流力でのトレーサ粒子の初期配置

留まっていられると考えられる。図-6(a)より、離脱が生じなかった粒子には、クラスターを構成する粒子が含まれており、河床表層に占めるクラスターの存在割合や個々の大きさなどの違いが掃流力の大きい場合の pick up rate の差異を引き起こした可能性が高いと考えられる。

次に、離脱が生じたトレーサ粒子について、移動開

始時に作用する外力を調べた。図-7には、離脱したトレーサー粒子の離脱直前の変位と流下方向速度の時間変化を示している。CaseA5, CaseB5でサンプル数はそれぞれ、29, 78個であり、図中の値はサンプルの平均値である。粒子の重心位置の変位が初期位置から 0.1 m 以上となり離脱判定を行った時刻を 0 s として示している。図より、粒子の変位が初期から、4 cm 程度生じる-0.25 sの時間から急に速度が上昇し離脱することが分かる。図-8には、離脱直前の粒子の移動軌跡を2例示しており、図-7(b)にはそれぞれの粒子の変位を示している。粒子Aは、離脱直前まで停止しており、転動形態で急に離脱が生じるのに対して、粒子Bは、徐々に動きながら離脱が生じている。図-7に示す、変位の時間変化はサンプルの平均値である為、多くの粒子が短い時間で加速し離脱が生じていたことになる。

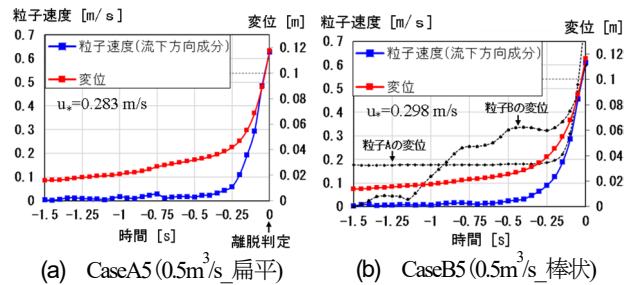


図-7 離脱直前の粒子の速度と変位

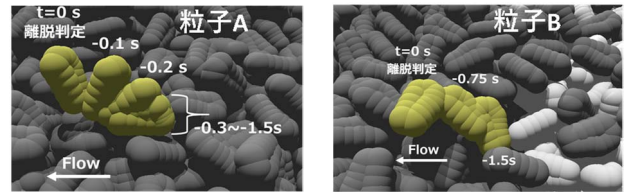


図-8 粒子の移動開始時の運動の軌跡の例

図-9は、CaseA5, CaseB5の離脱直前のトレーサー粒子に作用する流体力、接触力および重力の流下方向成分を示している。いずれの力も、水中重量で無次元化されている。接触力は、流下方向に正と負の場合に分けて示している。どちらのケースも、-0.25秒から0秒に掛けて、離脱が生じる際は、周囲の粒子との接触が減り接触力の正負が共に0に近づき、一方で、鉛直方向に変位が生じるので底面付近より速い流れの影響を受けて流体力は増加する。水色の実線の負の接触力に着目すると、扁平粒子の方が棒状粒子に比べ負の接触力が大きい。扁平粒子は、かみ合わせの程度が大きく、周囲の粒子に力を伝達し離脱しにくかったと考えられる。

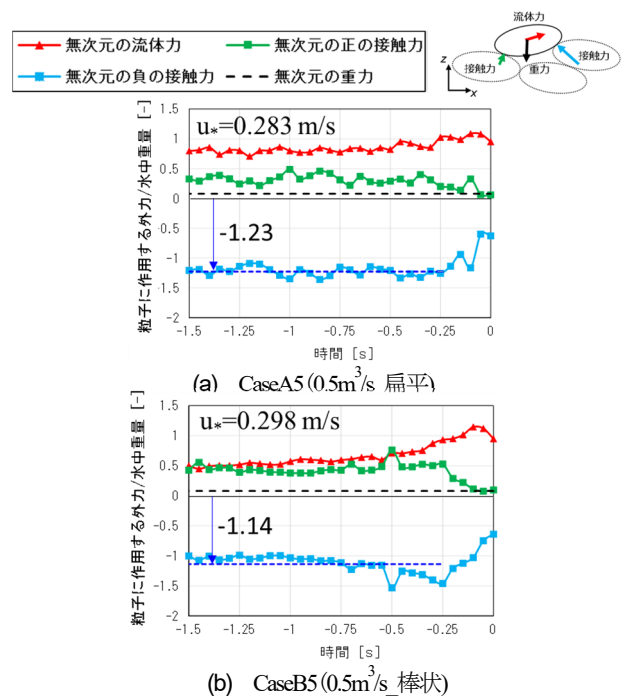


図-9 離脱直前の粒子に作用する外力 (流下方向成分)

(2) 跳躍時の粒子運動に及ぼす形状の影響

粒子の跳躍運動の分析は、Case1~Case4の実験結果から分析をする。跳躍時の粒子の速度を分析するため移動粒子を流下方向の速度が 0.05 m/s 以上の粒子と定義した。また、衝突により一時的に速度が 0.05 m/s 未満の値を取る粒子であっても更に移動を続ける場合については、一連の跳躍運動とみなして移動粒子と見なしている。t=20~100sおよびx=10~11m区間に存在する移動粒子を0.1秒間隔でサンプリングし、粒子速度を抽出した。

図-10および図-11は、それぞれ単位面積当たりの流砂体積と粒子速度の計測結果を示している。図-10, 11より、流砂体積には各ケースで差異が見られるのに対し、粒子速度は、各ケースで平均値及びバラツキがほぼ同じ値を示し、粒子形状による差異がほとんど見られない。

図-12は流速分布と移動粒子の鉛直分布を示している。流速分布は、水路中央の流速をt=90~100s間で0.1秒間隔に、またx=10~11mで0.1m間隔に平均化した値である。移動粒子のデータはt=90~100s間の重心位置の高さと流下方向速度を示している。平均河床高は、t=100sでx=10~11mで平均した値である。黒の実線は、Ar=8.5,

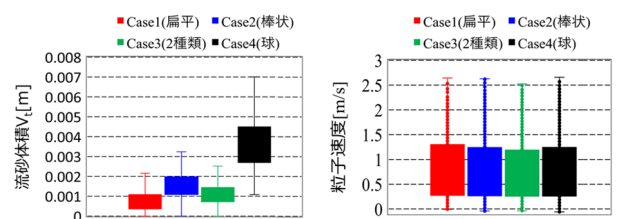


図-10 流砂体積

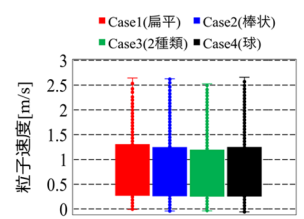
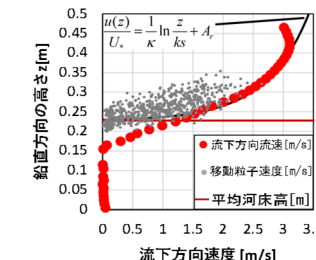
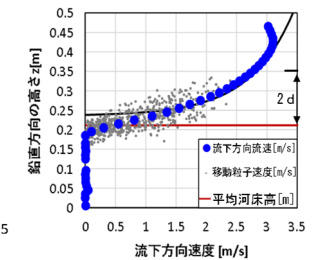


図-11 粒子速度



(a) Case1 (扁平)



(b) Case2 (棒状)

図-12 粒子速度と流速分布

$\kappa=0.4$, $\kappa_s=0.07\text{ m}$ を適用した対数則分布を示しており、Case2 は流速分布の原点位置を平均河床高から $0.4d$ 上昇させた補正を行うことで、河床近傍および水面近傍を除き流速分布は対数分布則に一致した。扁平、棒状粒子群はどちらも、最大で平均河床高から粒径の2倍程度の範囲で跳躍しており、概ね粒子が移動する層の厚さは一致していることから、主に土砂濃度が異なることで流砂体積に差異が生じていたと考えられる。また、鉛直方向に高く跳躍している粒子ほど、速い流速の影響を受け、粒子速度が大きくなる事が分かる。

図-13 は、Case1(扁平)、Case2(棒状)の移動粒子の流下方向投影面積の頻度分布を示している。投影面積の算出では、他の移動粒子の遮蔽は考慮されていない。図-13より、Case1(扁平)、Case2(棒状)どちらも、平均値付近でピークを示し、概ね対照的な分布している。またCase1(扁平)、Case2(棒状)のどちらも、流下方向投影面積の平均値は名目直径である $d=0.07\text{ m}$ の球の投影面積とほぼ等しい。これは、本検討の跳躍運動中の粒子は、不規則な回転運動が卓越したため平均的に見れば投影面積の変化が見られなかったと考えられる。

また、step length についても分析を行った。離脱判定は、流下方向速度 0.05 m/s 以下を 0.4 秒間続けた粒子が、流下方向速度 0.20 m/s 以上の値を取った時とし、停止判定は、流下方向速度 0.20 m/s 以上の粒子が、 0.4 秒間流下方向速度 0.05 m/s 以下を維持した時として、離脱時から停止時までに移動した縦断距離を step length として計測した。また、縦断距離が名目直径以下の場合にはサンプルに入っていない。図-14のプロットは、Case1~4の名目直径 d を用いた無次元 step length の超過確率 $G(\xi)$ を示しており step length の計測でのサンプル数は Case1~4 それぞれで、322,560,367,707 個である。図より、各ケースの差異は小さいことから step length に及ぼす粒子形状の差異はほぼみられない。図中の直線は、step length の分布が指数分布に従う時の超過確率 $G(\xi)$ を示し、Case4(球)のみを参考に示している。これより本実験から得られた step length が、概ね指数分布型に従っている⁹⁾ ことが確認できる。また、step length が指数型と仮定して求められた平均無次元 step length λ は、Case1~4 それぞれで、32,30,31,29であった。これまで平均 step length は、粒径の50-250倍程度であると言われており⁹⁾、これに比して数値実験結果は比較的小さい値であった。実験で決定した step length の測定法や本解析における粒子の停止状態の定義の違いが影響したものと考えており、今後の検討課題とする。

図-15 は、Case1~4 の河床の凹凸分布を示している。Case1~4 それぞれで、 $t=100\text{ s}$, $x=9\sim 11\text{ m}$ 区間で河床高を抽出し、平均河床高を引いて頻度分布を求めた。図からいずれのケースも正規分布に近い分布形を示していることが確認でき、粒子形状による差異は殆んど見られない。

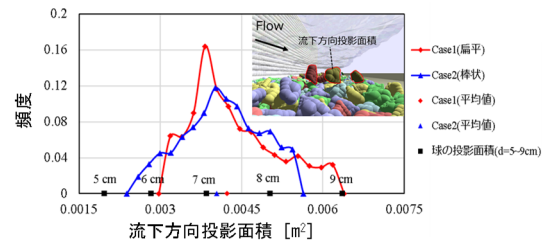


図-13 移動粒子の流下方向投影面積の分布

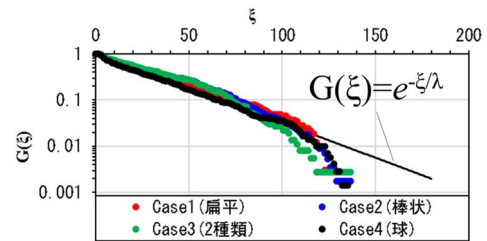


図-14 step length の超過確率

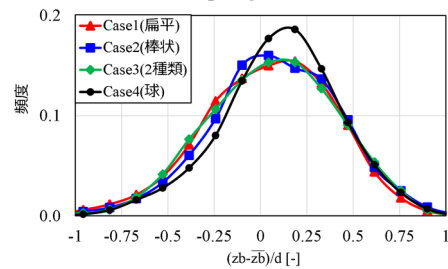


図-15 河床の凹凸分布

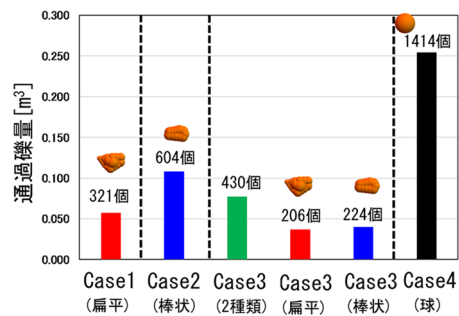


図-16 通過礫量の比較

凹凸の分布の標準偏差の値は、Case1~4 それぞれで、 $2.50, 2.49, 2.47, 2.28 \times 10^{-2}$ を取り、概ね $d/3$ (2.33×10^{-2}) に一致し、これは関根ら⁹⁾の研究と一致する実験結果であった。

以上から、跳躍運動は不規則な河床との接触によることの影響が大きく、粒子形状が粒子速度や step length にほとんど影響を及ぼさなかった。

(3) 通過礫量の比較

図-16は $x=11\text{ m}$ の断面を通過した粒子の体積量を示す。河床が概ね平坦を維持していた $t=20\sim 100\text{ s}$ で計測を行った。図-16より本実験で使用した粒子形状の差異が粒子の輸送量に最大で4.4倍程度の違いをもたらしていることが分かった。上述の検討を踏まえると特に球形状は、限界掃流力が非球形と比較して小さくなるため、通過礫量が多くなると考えられる。

通過礫量の差異は、移動粒子間や移動粒子および河床粒子との衝突の影響が含まれた結果であるが、本検討で

はこの点の考察は十分ではない。表層粒子の移動開始には移動粒子との粒子衝突による影響も大きく¹⁰⁾、本数値実験の観察から、離脱しづらいくラスター状の配置の粒子群が、移動粒子との衝突により離脱が生じていた。比較的粒径の大きな礫群が移動する場合、粒子濃度が低くても、個々に運動する粒子の持つ運動量が大きいため、粒子衝突の影響は重要であると考えられ、今後明らかにしていきたい。

5. 結論

同一体積の形状の異なる粒子を用いた種々の数値実験を行い、粒子の移動開始時と跳躍時の運動に及ぼす粒子形状の影響を調べた。以下に主要な結果を示す。

1. 粒子の初期移動について、球粒子は、非球形粒子と比較して、限界掃流力が低い値を取る。また、非球形の扁平、棒状粒子群を比較すると、掃流力の高い条件下で pick up rate の値に違いが見られた。これらは、表層粒子の姿勢や配置の違いによるかみ合わせの程度が異なるためである。
2. 跳躍運動に及ぼす粒子形状の影響を整理したところ、跳躍運動は、不規則な河床との接触による影響が大きく、粒子速度や step length などに差異は見られなかった。また、step length は、指数分布に従い、名目直径で無次元化した平均 step length は約 30 であった。
3. 通過礫量の比較から、本実験の粒子形状の違いにより最大で 4.4 倍異なった。特に球形粒子は、非球形粒子と比較して限界掃流力が小さくなるため、通過礫量が多くなるが粒子間衝突の効果もその中に含まれている。

数値数値移動床を用いた解析技術の進展により、従来観測することが困難であった洪水時の砂礫の移動に関し、定量的なデータが得られるようになった。今後は、粒子衝突の影響とともに、粒径の違いによって形の影響がど

の様に変化し、流砂運動形態を変化させるのかを明らかにしていきたい。

謝辞：本研究の一部に、科学研究費補助金特別研究員奨励費 (JSPS KAKENHI Grant Number JP20J22413) を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、水工学に関する夏期研修会、Aコース、Vol.44, pp.A-1-A25, 2008.
- 2) 関根正人, 平松裕基, 中川裕貴：骨格が大礫により構成される河床上で生じる鉛直分級のメカニズム, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1069-I_1074, 2018.
- 3) Fukuoka, S., Fukuda, T., Uchida, T. : Effects of sizes and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, *Advances in Water Resources*, Vol.72, pp.84-96, 2014.
- 4) 田所 弾, 福田朝生, 福岡捷二：等価な粒度分布を有する球と石礫で構成される二つの数値移動床上の粒子運動の比較検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_961-I_966, 2014.
- 5) 熱海孝寿, 福岡捷二：複雑な形を有する石礫河道の粒度分布と代表粒径の決め方およびその決定法が有する移動床水理上の意義, 河川技術論文集, 第25巻, pp.747-752, 2019.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎：水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.244, pp.71-80, 1975.
- 7) 土屋義人：滑面水路床の下流端における洗掘限界, 土木学会論文集, No.80, pp.18-26, 1962.
- 8) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. : Sand bed instability due to bed load motion, *J.Hydr.Div., ASCE*, Vol.106, HY12, pp.2029-2051, 1980.
- 9) 関根正人, 吉川秀夫：掃流砂の停止機構に関する研究, 土木学会論文集, No.399, II-10, pp.105-112, 1988.
- 10) 福田朝生, 福岡捷二：石礫粒子群の運動および河床構造に及ぼす粒子衝突の効果, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_967-I_972, 2014.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

EFFECTS OF PARTICLE SHAPES ON THE INCIPIENT AND SALTATION MOTIONS OF GRAVEL IN THE FLOW

Takatoshi ATSUMI and Shoji FUKUOKA

The numerical movable-bed experiments were conducted to investigate the effect of particle shapes on the bed load motion. The river-bed materials used in the numerical experiments were three kinds of particles with the same volume and different shapes (Thin, Rod, Sphere). As a result, while the effect of particle shape on the saltating motion was small, the effect of shape on the bed load incipient movement was large. It is considered that the posture and arrangement of the particles on bed surface caused the difference in the incipient movement. It is also formed that the numerical movable bed experiment is an essential technique for understanding the motion of gravel bed particles.