

河床構造や粒子運動に及ぼす石礫粒子形状の役割

Roles of particle shape of gravel on river bed structure and particle motion

18N3100002L 熱海 孝寿 (河川工学研究室)
Takatoshi ATSUMI/ River Engineering Lab.

Key Words : gravel bed river, particle shapes, numerical movable-bed channel, bed structure

1. 序論

石礫河川の河床材料は幅の広い粒度分布と多様な粒子形状を有しており、洪水時の土粒子の間欠的な運動や分級現象、覆瓦構造等の砂礫河川に見られない特徴的な現象が生じる。石礫河川の流砂現象の解明の為、福岡¹⁾は常願寺川の高水敷に作られた大型礫床水路で現地規模の水理実験を実施し、洪水時に河床に露出した大粒径粒子が抵抗となり、周囲の小粒径粒子の流出を抑制する機構を明らかにし、これを石礫河道の流砂機構に取り込み定式化した。しかし、水理実験で扱える粒径や形状に制限あることに加え、流砂運動を観測することは容易ではなく、得られる成果に限界を伴うことは否めない。近年、数値解析法および計算機能力の向上を背景に、個別要素法を基に個々の粒子運動を数値シミュレーションする研究が行われている。福田ら²⁾は粒子の形と大きさを任意に取り込み、粒子群の運動と流れの相互作用を考慮した数値移動床水路を構築した。数値実験結果は、石礫粒子の移動軌跡や運動等を適切に説明している。河床面には反砂堆が形成され、表層で粗粒化した大礫集団が河床に作用する流体力の多くを受け持ち河床が安定になる機構を定量的に説明している。加えて、数値移動床水路を用いた田所ら³⁾の非球形の粒子群を用いた実験では、球群のみの実験と比較して、反砂堆の発達速度および遡上速度に違いが現れるなど、粒度分布だけでなく粒子の形についても、安定な河床構造に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。また、移動する石礫群の動摩擦角の違いが粒子群の運動形態に影響を与え、流砂量に大きな違いを生じさせることを示した。しかしながら、これらの研究は、形や大きさの異なる石礫群による数値移動床実験に基づくため、個々の形を有する粒子の運動に及ぼす形の影響を定量的に明らかにすることは困難であった。そこで、本研究では、異なる形状を持つ一様な粒径集団からなる石礫群を用いた数値移動床実験を行い、河床構造および粒子の運動に及ぼす粒子形状の影響を定量的に明確にする。

2. 数値解析法

数値移動床実験では、福田ら²⁾の方法を用い、流れをEuler的に、石礫粒子群はLagrange的に解析する。流れの

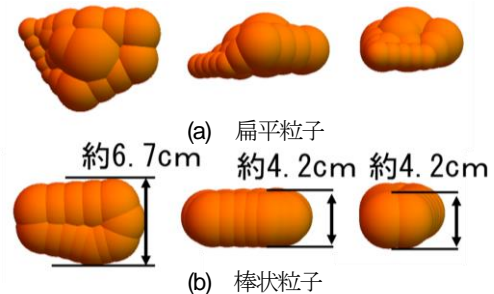


図-1 異なる視点から見た粒子形状

表-1 数値実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
流量 [m ³ /s]	0.5	0.5	0.5	0.5
水深 [m]	0.24	0.23	0.24	0.25
フルード数(t=100s) [-]	1.27	1.35	1.31	1.25
粒子形状	扁平	棒状	2種類 (扁平, 棒状)	球
名目直径 [mm]	70	70	70	70
堆積層厚さ [m]	0.23	0.21	0.22	0.22

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。LESにより流れの計算を行い乱流モデルとしてSmagorinskyモデルを用いた。また、石礫粒子群の運動解析では、小球を隙間がないように連結させた粒子のモデルを用いており、並進と回転の運動方程式を用いて剛体として解析する。個別要素法を用いて粒子の接触を考慮し、流れ場の解析から粒子に作用する流体力を評価している。流体計算格子サイズ $\Delta=0.01\text{m}$ である。解析法の詳細は文献²⁾を参照されたい。

3. 数値移動床実験の結果

(1) 実験条件

数値実験水路は、水路長 15m, 幅 1m, 勾配 1/20 の一様な直線水路で、通水前に粒子をランダムに投下し初期河床を作る。実験に用いる粒子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。浅川 2.3km 右岸の砂州上で線格子法により石礫 50 個を採取し、それぞれの長径 a , 中径 b , 短径 c を計測した。浅川の石礫は Shape Factor の値が 0.4~0.7 の範囲に多く見られ、図-1 は Shape Factor が 0.5~0.6 の範囲にある粒子の中から扁平、棒状の粒子を小球の連続で形をモデル化したものを視点を変えて示す。図-1(a)の扁平な粒子は不規則な凹凸を有しており図-1(b)の棒状の粒子は滑らかな形状であ

る。2種類の粒子は、同一の体積を有するようにつくられており、同一体積の球の直径で表される名目直径は $d=70\text{mm}$ である。数値移動床実験は、4ケース実施しており、実験条件を表-1に示す。投入した粒子群の総量はいずれも等しく、Case3の粒子群は2種の粒子を同じ量混合したものである。境界条件は、上流端で一定流量 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ を与え、下流端の自由落水脈内はほぼ大気圧となることから、下流端は圧力を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 $x=1\sim 3\text{ m}$ の範囲でランダムに投下させている。

(2) 通過礫量

図-2は $x=11\text{m}$ の断面を通過した粒子の体積量を示す。河床が平坦を維持していた $t=0\sim 100\text{s}$ で計測を行った。Case4(球)の球形粒子の輸送量は他のケースと比較して極端に多い。非球形粒子と異なり球形状粒子は、点接触しか生じない。そのため、球は一般的に最も移動しやすい形状と考えられる。また、Case3(2種類)の通過礫量は、総量は、Case1とCase2の通過礫量のほぼ中間の量であるが、扁平、棒状粒子群の輸送量にあまり差が現れておらず、それぞれ単独な形状の粒子群の輸送量に対してCase3では、扁平粒子群と棒状粒子群が互いの運動に影響を及ぼし合っているためである。4ケースの検討から粒子形状の違いが、流砂量に大きな影響を与えることが確認された。通過礫量に生じた差異の原因を明らかにするため、以下では、流砂の素過程について分析を行う。

(3) 跳躍運動に及ぼす粒子形状の影響

跳躍運動中の粒子を分析する為、 x 方向の速度が 0.05 m/s 以上の粒子を移動粒子と定義した。また、他の粒子との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、移動粒子として評価した。 $t=0\sim 100\text{s}$ および $x=10\sim 11\text{m}$ で、移動粒子を 0.1 秒間隔でサンプリングし、移動速度と x 方向の射影面積を分析した。図-3は、Case1~4の摩擦速度で除した無次元粒子速度を示している。各実験ケースで、粒子の移動速度の平均値及びバラツキがほぼ同じ値を示していることが分かる。また、図-4は、Case1~4のstep lengthの頻度分布を示しており、いずれのケースでも、概ね指数分布に従っていることが確認でき、平均step lengthは、 $2.07, 2.20, 1.95, 1.76\text{ m}$ と粒子形状の差異が小さいことが分かった。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-5は、Case1(Thin)、Case2(Rod)の移動粒子の x 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-5より、Case1(扁平)、Case2(棒状)どちらも、平均値付近でピー

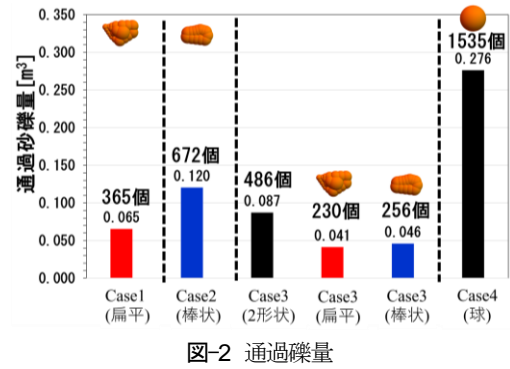


図-2 通過礫量

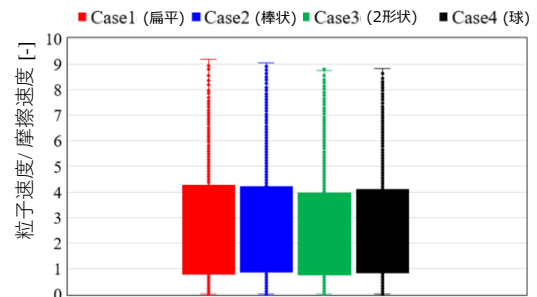


図-3 無次元粒子速度

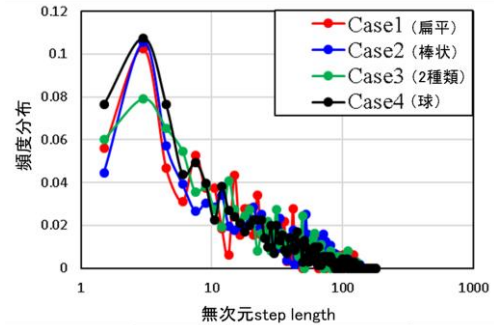


図-4 無次元 step length の頻度分布

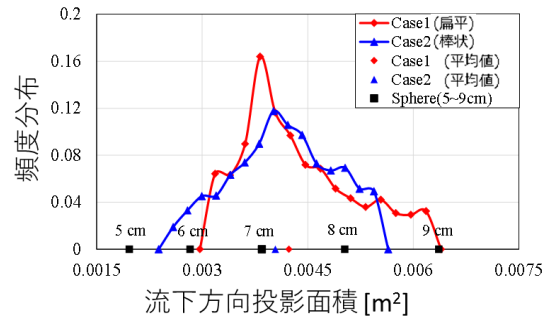


図-5 跳躍運動中の流下方向投影面積の頻度分布

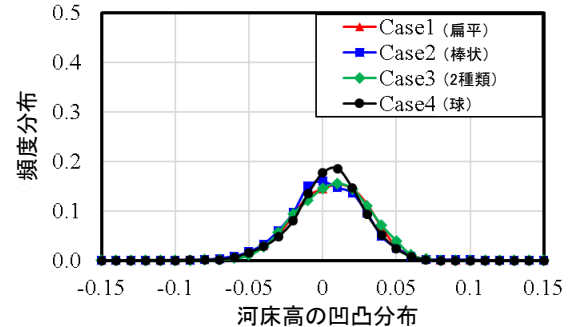


図-6 河床の凹凸分布

クを示しており、概ね対照的な分布している。
 Case1(Thin), Case2(Rod)のどちらとも、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。また、図-6は、Case1~4の河床の凹凸分布を示している。正規分布に近い分布形を示しており、粒子形状による差異は小さい。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) に一致した。本研究では、凹凸の大きさは移動粒子の粒径とほぼ同じスケールであるため、凹凸の影響が大きく、平均的にみれば流下方向の投影面積は、体積に規定されており、移動粒子自身の形状が跳躍運動に及ぼす影響が明確に現れなかった。

(4) 離脱に及ぼす粒子形状の影響

図-7は、Case1~4の $t=0 \sim 100\text{ s}$, $x=10 \sim 11\text{ m}$ 区間での河床からの離脱量を示している。各ケースの離脱量の比は、図-2に示した通過礫量とほぼ同じであり、粒子形状の効果は離脱過程や河床構造に顕著に現れる。非球形粒子に見られる特徴的な現象として、覆瓦構造が挙げられる。図-8は、通水前後の河床の表層粒子を示している。覆瓦構造は、長軸を流下方向かつやや鉛直上向きに向けた姿勢を取ることで形成される。Case1~3では、明確に覆瓦構造が形成された。この姿勢は、図-9に示すように接触力を上流側に向ける安定な姿勢である。また、図-10は、縦軸に表層粒子に作用する接触力の流下方向成分、横軸に長軸の鉛直方向の傾き θ_z を示す。 $t=100, 200\text{ s}$ 時の表層粒子の値をplotしている。実線は θ_z を 20° ごと ($\theta_z=0 \sim 19^\circ, 20 \sim 39^\circ, \dots, 160 \sim 180^\circ$) に区画した粒子群の、 $\mu-2\sigma$ (平均値 μ , 標準偏差 σ) の値であり、姿勢によって場合分けされた表層粒子が、周囲の粒子から受ける支持力の最大値を表現している。図-9から表層粒子は、 $\theta_z=40 \sim 60^\circ$ に支持力の最大値が大きく、 $\theta_z=100 \sim 120^\circ$ で最小値を取り、それぞれ $-2.88, -1.66\text{ N}$ である。すなわち、 $\theta_z=40 \sim 60^\circ$ の粒子群は、最大 -2.88 N の大きさまで周囲の粒子から支持力を受け流れに抵抗出来るのに対し、 $\theta_z=100 \sim 120^\circ$ の粒子群は、 1.66 N 以上の流体力や衝突力が作用すると離脱が生じ易いことを示している。加えて、Case1~3の実験では、河床に複数の粒子で構成されるクラスターが形成された。図-11はCase1で形成されたクラスターを示している。クラスターは、流れの作用に対して安定な構造であり、容易に破壊されない。以上から、非球形の粒子群は、球形粒子群の河床構造とは大きく異なり、河床表層で姿勢と配置の変化が生じ、表層粒子は周囲の粒子と力の伝達が容易になり、安定な河床を形成する。

扁平、棒状粒子群の離脱割合を調べる目的で、追加で数値実験を実施した。数値実験の水路は、 10 m , 幅 1 m , 水路勾配は $1/20$ で、 $x=6 \sim 8\text{ m}$ 移動粒子を 20 cm 程度の深さ

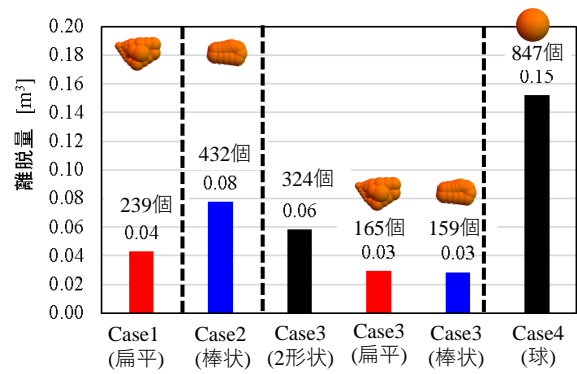


図-7 離脱量

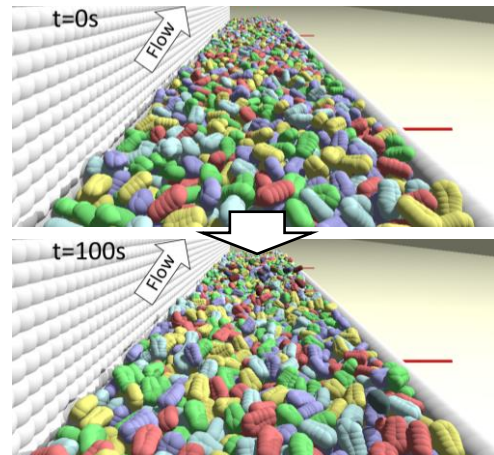


図-8 覆瓦構造の形成 (Case2_棒状)

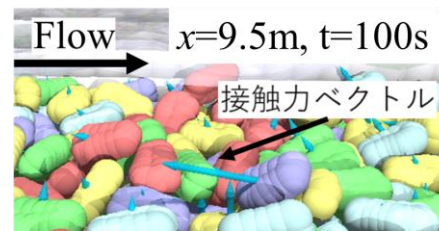


図-9 表層粒子に作用する接触力 (Case2_棒状)

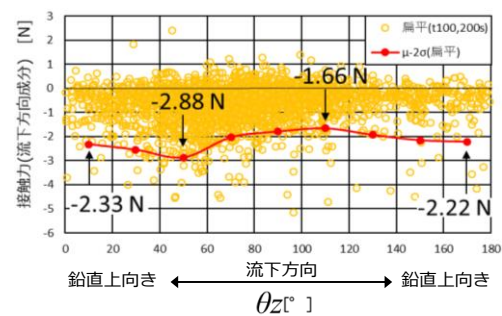


図-10 表層粒子の姿勢と接触力の関係

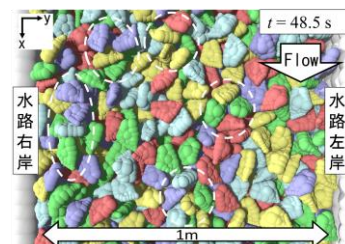


図-11 クラスターの形成 (Case1_棒状)

で敷き詰めている。水路の他の区間には、表層一層に移動粒子が敷き詰められている。流量を $0.1\sim 0.5\text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ ずつ変更し、pick up rateを計測した。表-2は、各ケースの摩擦速度を示している。pick up rateの計測方法は、中川ら⁴⁾と同様に、トレーサー粒子の残留率を調べ算出した。移動床区間 $x=6\sim 8\text{ m}$, $y=-0.4\sim 0.4\text{ m}$ で露出している粒子の内、鉛直方向に高い粒子をトレーサー粒子とした。移動床実験のCase1~4についても、同様に、 $t=20\text{ s}$ の、 $x=9\sim 11\text{ m}$, $y=-0.4\sim 0.4\text{ m}$ の範囲でトレーサー粒子を選定した。図-12は、明るい粒子がトレーサー粒子である。各実験のトレーサー粒子の個数は67~105個の範囲であった。図-13は、計測したpick up rateを示している。摩擦速度は、いずれも(gRI)⁵⁾から算出した。実線は、CaseA(扁平), CaseB(棒状)であり、プロットは、移動床実験のCase1~4で計測した値を示している。

土屋⁹⁾らは限界掃流力時の土砂の移動状態をpick up rateの値が 0.005 l/s としており、これを本実験結果に適用して限界摩擦速度を求めると、扁平と棒状粒子群のそれぞれで、 $u_{*c}=0.266, 0.262\text{ m/s}$ であった。粒径の小さい砂粒に対して適用される岩垣式では、 $u_{*c}=0.238\text{ m/s}$ 、また水路勾配の影響を考慮した経験式であるGraf-Suszkaの式では、 $u_{*c}=0.247\text{ m/s}$ と数値実験の限界摩擦速度の値は既往の予測式で求めた値より大きい値を取ることが分かった。これは、従来の式が粒子形状の影響が十分に取込めていないことが原因であり、特に非球形粒子のかみ合わせの違いによる、接触力の変化を考慮する必要がある。また、CaseA(扁平), CaseB(棒状)を比較すると限界掃流力付近の低い掃流力では、粒子形状の差異は、明確に現れておらず、これは一定数離脱しやすい姿勢や配置の不安定な粒子が存在したためであると考えられる。一方、高掃流力状態ではCaseA(Thin), CaseB(Rod)の離脱割合に明確に差異が生じている。扁平な粒子形状は、平らな面積が大きく不規則な形状の為、クラスターを形成しやすく、棒状粒子と比較して周囲の粒子に力を伝達し移動しにくいと考えられる。クラスターの崩壊に伴い、クラスターの下流側の粒子が流出することが観察されており、離脱量の評価に向け、クラスターの河床表層での存在割合や河床での役割を明らかにする必要がある。

4. 結論

本研究では、同一体積で粒子形状と粒子の混合比が異なる4ケースの数値移動床実験を行い、粒子の形が粒子運動および河床構造に与える影響について検討した。以下に主要な結論を示す。

- 1) 粒子形状の違いにより、土砂の輸送量に有意な差があった。球形状粒子群は、流砂量の値が最も大きく、

表-2 実験条件(摩擦速度 m/s)

流量 [m^3/s]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
CaseA(扁平)	0.194	0.22	0.254	0.266	0.283
CaseB(棒状)	0.202	0.228	0.252	0.273	0.298

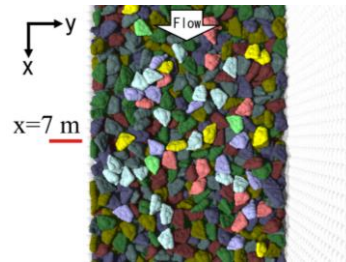


図-12 トレーサー粒子 (CaseA)

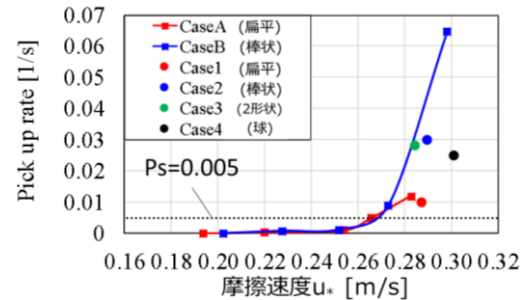


図-13 pick-up rateの計測結果

一般的に最も移動しやすい粒子形状と言える。

- 2) 粒子の跳躍運動を分析した結果、粒子の移動速度およびstep lengthは、粒子形状による差異が小さく、ほぼ同じ分布形、平均値を取った。跳躍運動に粒子形状の影響が明確に現れなかった要因は、本実験では跳躍運動に及ぼす河床凹凸の影響が大きく、跳躍運動中の流下方向の投影面積の平均値が、扁平と棒状粒子群共に、同一体積の球の投影面積とあまり変化しないことと考えられる。
- 3) 粒子形状の影響は、離脱過程に明確に現れることが明らかになった。石礫河道の非球形粒子群は、覆瓦構造とクラスターを形成し、安定な河床を形成する。扁平と棒状粒子群の離脱割合を分析した結果、特に、高掃流力時の離脱量に粒子形状の差異が顕著に現れた。離脱量の評価に向け、限界掃流力およびクラスターの河床での役割を今後詳細に明らかにし、石礫河道の土砂移動機構を明らかにする必要がある。

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, Vol44, pp.A-1-A25, 2008.
- 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), Vol.69, No.4, pp.1051-1056, 2013.
- 3) 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.1961-1966, 2014.
- 4) 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, p.71-80, 1975.
- 5) 土屋義人: 混合砂礫の限界掃流力に関する研究, 京大防災研究年報, Vol.6, p.228-253, 1963