

# 石礫粒子形状の違いが 流れ場と河床形状に及ぼす影響の研究

熱海 孝寿<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻

(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a14.c3y6@g.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup> 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

石礫河川の流砂現象には粒子形状の影響が大きく、流れと流砂運動に対する影響を明らかにすることは重要である。本研究では、石礫河川の粒子形状に着目し、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によって主流部と堆積層内の流れ構造および相互作用、また、河床形状、粒子移動量に及ぼす粒子形状の影響について調べた。その結果、主流部の流れは河床表層から水深程度の深さの範囲で、堆積層内の流れに影響を与えること、そして、堆積層内の流れが主流の乱れ構造に影響を与えることを明らかにした。さらに、異なる粒子形状が河床変動の機構に違いをもたらす。過程を詳細に分析し、流砂量、河床の形状、河床変動に及ぼす影響を明らかにしている。

**Key Words:** gravel bed river, particle shapes, permeable gravel bed, numerical movable-bed channel, turbulence characteristics, bed geometry

## 1. 序論

石礫河川を構成する河床材料は様々な粒子形状の幅の広い粒度分布を有しており、洪水時には、土粒子の間欠的な運動や分級、覆瓦構造等の特徴的な現象が見られる。石礫河川の土砂移動現象を把握するため、福岡<sup>1)</sup>は常願寺川の高水敷を掘削して作られた大型礫床水路で実験を行い、石礫河道の土砂移動機構に関する多くの新しい結果を得た。主要な結果は、洪水時に露出した大粒径粒子が抵抗となり、大粒径粒子が核となって周囲の中小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ことである。関根ら<sup>2)</sup>は鉛直分級および河床の平衡状態の形成過程について一連の水理実験により興味ある結果を得てきた。しかし、水理実験で扱える粒径や形状に制限があり、得られる成果に限界を伴うことは否めない。福岡ら<sup>3)</sup>は粒子の形状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。数値移動床水路を用いた大型水路実験は、石礫粒子の移動軌跡や運動等を適切に説明し、また、固定床土流水路実験<sup>4)</sup>の粒子速度や水と土砂の輸送量を再現<sup>5)</sup>していることから、その解析法の有効性が確認されている。数値移動床水路

を用いた田所ら<sup>6)</sup>の検討では、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、これらの研究は、形や大きさの異なる粒径集団による数値移動床実験に基づくため、沢山の粒子が互いに影響し合い、粒子移動の結果に及ぼす形の影響が分かりにくい面があった。また、粒子運動の流れ場に与える影響が大きく、平均流れと乱れ構造の把握が必要であること、さらに、礫床のように透水性が高い河床上の流れは、主流部と堆積層内で水の出入りが生じ、これらが流れの抵抗特性<sup>7)</sup>や流砂運動に影響を及ぼす。

本研究では、異なる形状を持つ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、流れ構造と河床変動に及ぼす粒子形状の影響を明確化する。

## 2. 数値移動床実験<sup>3)</sup>

数値移動床実験では、福岡ら<sup>3)</sup>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 モデルを用いている. 以下に流れの連続式と運動方程式を示す.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(\nu + \nu_t) S_{ij}\} \quad (2)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{kl} S_{kl}} \quad (3)$$

ここに,  $u_i$  は流体計算格子内で質量平均した流速で, 添え字は各方向成分を示す.  $\rho$  は格子内で体積平均した密度,  $g_i$  は重力加速度,  $p$  は圧力と SGS 応力の等方成分の和,  $\nu$  は動粘性係数,  $S_{ij}$  はひずみ速度テンソル,  $C_s$  は Smagorinsky 定数である. 自由水面の変化は VOF 法に基づき, 次の流体計算格子内の液相の体積割合  $f$  の連続式を用いて評価した.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

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<sup>3)</sup>を参照されたい.

### 3. 数値移動床実験の結果

#### (1) 実験条件

流下方向, 水路に平行な横方向および水路に垂直な上向きをそれぞれ  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸にとり  $u, v, w$  を各方向の速度としている. 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. 結果を図-1 の緑色の点で示している. 実線は Shape Factor ( $c/\sqrt{ab}$ ) を示す. 浅川の石礫は Shape Factor の値が 0.4~0.7 の範囲に多く見られる. 図-2 は Shape Factor が 0.5~0.6 の範囲にある粒子の中で代表的であった扁平, 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-2(a) の扁平な粒子は不規則な凹凸を有しており 図-2(b) の棒状の粒子は滑らかな形状である. 浅川の粒子群との関係を 図-1 から見ることが出来る. 図-3(a), 3(b) に 2 種類の粒子の離脱の瞬間の連続写真を示す. 扁平な形状の粒子は, 離脱の瞬間に平らの面を流下

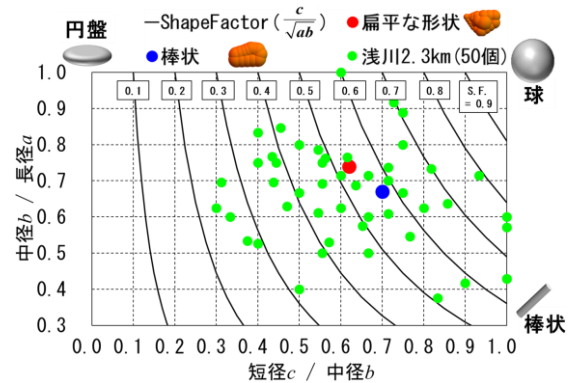


図-1 粒子形状特性

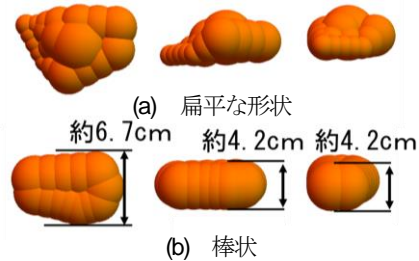
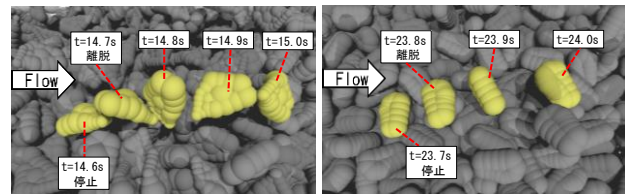


図-2 異なる視点から見た粒子形状



(a) 扁平な形状(Case1\_x=10m) (b) 棒状(Case2\_x=7.7m)

図-3 粒子の離脱

表-1 実験条件

	流量 [m <sup>3</sup> /s]	粒子形状	粒径 d [mm]	堆積層厚さ H [m] (通水前)
Case1	0.5	扁平な形状	70	0.23
Case2	0.5	棒状	70	0.21
Case3	0.5	2種類 (扁平な形状, 棒状)	70	0.22
Case4	0.5	棒状	70	0.64

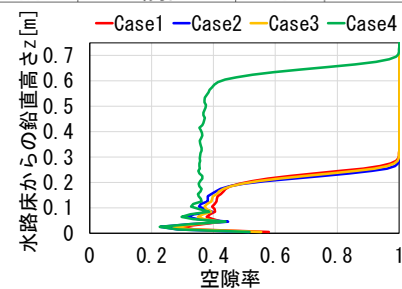


図-4 初期河床の空隙率

方向に向け, めくれ上がるように離脱をし, 一方, 棒状の粒子は長軸を横断方向に向け, 転がるように離脱する.

この 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, 換算粒径は同一体積の球の直径で  $d=70\text{mm}$  と定義した. 実験条件を表-1 に示す. Case1~Case3 は粒子形状の影響を明らかにすることを目的としている. 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. Case4 は堆積層内の流れの影響範囲を明らかにする目的で河床の厚さを Case1~3 に比して 3 倍にしている. 境界条件は,

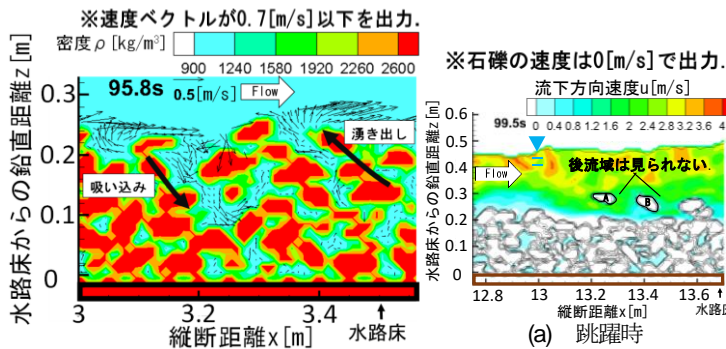


図-5 河床近傍の流れ場(Case1)

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。図-4は初期の堆積層内の空隙率の鉛直分布を示している。いずれの実験ケースも平らな水路底面に接して存在する礫層の空隙率は大きくなる。河床堆積層の大きい Case4 では、換算粒径より大きい水路床から  $0.1 \text{ m}$  以上の礫の空隙率は約  $0.36$  と一定に近い。

(2) 主流と堆積層内の流れ

a) 礫床河川の流れ場

図-5はCase1の実験水路中心線上縦断面の流れの瞬間値を示している。式(1)~(3)で示す固液混相一流体モデルの密度コンター図に、流下方向速度  $u$  と鉛直方向速度  $w$  から成る2次元速度ベクトルを示す。図より主流部から堆積層内への吸い込みと湧き出しが確認できる。用いた石礫層に連続した空隙が存在することで、堆積層内で  $0.2 \text{ m/s}$  に近い流速が見られる。図-6は実験水路中心線上縦断面における流下方向流速コンター図に、移動粒子と流れ場の関係を示している。図の白色の領域は固相を示している。本解析では各計算メッシュにおける密度を液相と固相の体積割合を用いて評価しているため、液相と固相の境界部では、密度の空間的な勾配が生じ密度コンター線の間隔が狭く多数描かれる。図-6(a)は跳躍中の粒子周りの流下方向速度  $u$  を示しており、粒子跳躍中は粒子の移動速度と流れの速度差が小さいため粒子背後の後流域はあまり見られない。一方、図-6(b)に見られる停止していた粒子が離脱する瞬間には、粒子がめくれ上がると粒子の背後に粒径ほどの高さの後流域が見られ、その後遅い流体が輸送されていることが確認できる。河床表層上の粒子の運動は、転動や跳躍、回転運動等を伴った三次元的な運動のため、粒子運動の流れ場へ与える影響は大きい。

礫床河川の流れ場をさらに詳細に明らかにするため主流部および堆積層内について流速分布、レイノルズ応力、乱れ強度について調べる。

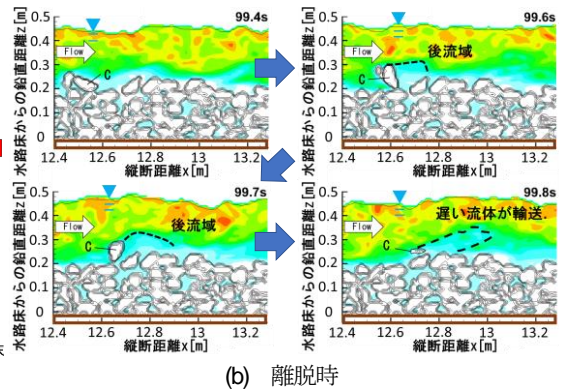


図-6 粒子運動と流れ場(Case1)

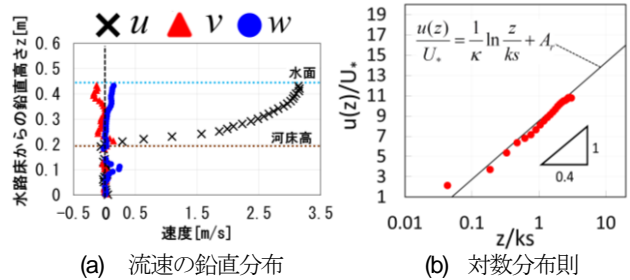


図-7 流速分布(Case1\_x=12m)

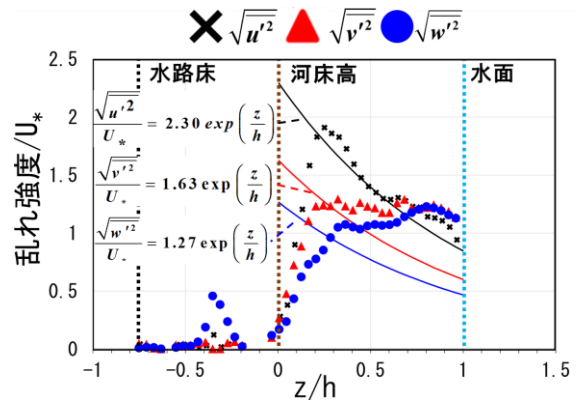


図-8 乱れ強度分布(Case1\_x=12m)

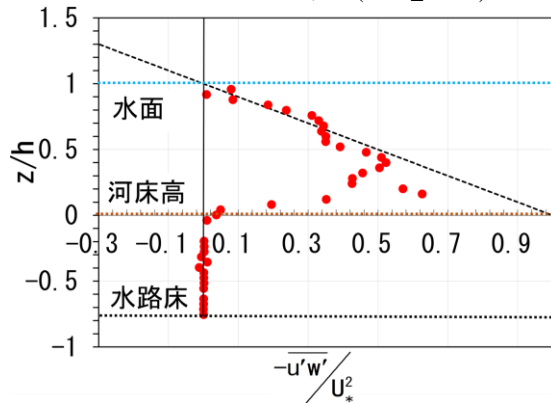


図-9 レイノルズ応力分布(Case1\_x=12m)

b) 主流部の流れ場

Case1で計算時間  $t = 90 \sim 100 \text{ s}$ ,  $x = 12 \text{ m}$  を対象に主流部の流れ場を分析した。各格子点の流速を  $0.1$  秒ごとに液相のみ抽出し気相および固相は母数に含めない。また、各格子点でサンプル数が  $50$  個以上得られた場合のみ平均流速を求め、これよりレイノルズ応力および乱れ強度を算出した。また、各値の鉛直分布を調べる際は、水路

中心線上から横断方向に粒径 0.07m 分空間平均している。図-7(a)は速度の3成分の鉛直分布を示している。t=100s 時の x=12 m 水路中央地点の水位と河床高は、それぞれ z=0.45 m, 0.19 m である。図-7(b)では、粗面の対数則と解析で求めた流下方向速度 u(z)を比較している。摩擦速度 U\*は重力加速度 g, 径深 R, エネルギー勾配 I を用いて (gR)^{1/2} で算出し、値は U\* = 0.29 m/s であった。エネルギー勾配 I は、x=5 m, 11 m 地点の平均水位に断面平均流速から速度水頭を求め全エネルギーの差をとり評価した。また、κ=0.4, A\_r=8.5 として、k\_s は換算粒径 d と等しい 70 mm を用いた。流速分布の原点位置は河床高さから 0.4d = 0.028 m 上方に補正すると (b) の結果が得られ、対数則と概ね一致している。

図-8 は x=12m 水路中央地点の t=100s 時の河床高を基準に測られた乱れ強度の鉛直分布を示す。柵津<sup>8)</sup>は、固定床の開水路乱流場の乱れ強度の鉛直分布を図-8 の実線で示している。図から z/h = 0.0~0.3 (z = 0.0~0.075 m) の河床面近傍では乱れ強度の三成分  $\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{v'^2}$ ,  $\sqrt{w'^2}$  は、ほぼ水面方向に直線的に発達し、固定床の乱れ構造と大きく異なる。また、z/h = 0.3 以上で  $\sqrt{u'^2}$  は減衰していくが、 $\sqrt{v'^2}$ ,  $\sqrt{w'^2}$  はほぼ一定の値を示している。これらの原因として河床堆積層内の流れや河床の凹凸が考えられるが、乱れ構造に関して更なる検討が必要である。

図-9 は流下方向に作用するレイノルズ応力の鉛直分布を示す。z/h = 0.4 以下で等流のレイノルズ応力分布からずれている。この高さは乱れ強度の鉛直分布が直線的に発達していた領域とほぼ一致する。

### c) 堆積層内の流れ場

次に堆積層を厚くした Case4 の堆積層内の流れ場について調べる。図-10 は x=10m の t=25~35s の 10 秒間での堆積層内での平均流速の鉛直分布を示す。v, w に着目すると正負、様々に分布しており、堆積層内の流れ場が複雑であることが分かる。図-11 に堆積層内の乱れ強度分布を示す。図中の①~④は図-10 の番号と対応している。領域①では他の②~④に比べ乱れ強度が大きく主流の影響によるものと考えられる。主流部の流れが直接堆積層の流れに与える影響は z/h = -1 までの水深程度の範囲である。今回得られた結果は主流部の大きさ、堆積層の空隙率や粒径など河床材料特性によっても異なり、実験条件を変化させて堆積層内の流れについて、さらに検討が必要である。

## (3) 河床変動

### a) 河床高と水位の時間変化

図-12 は Case1~3 の t=100s 時の水路床からの縦断水位と河床高を示す。水位および河床高は、水路中央から横断方向に 1 m を空間平均して求めている。初期河床は平坦に作られている。通水により振幅が 0.1 m 以下の緩

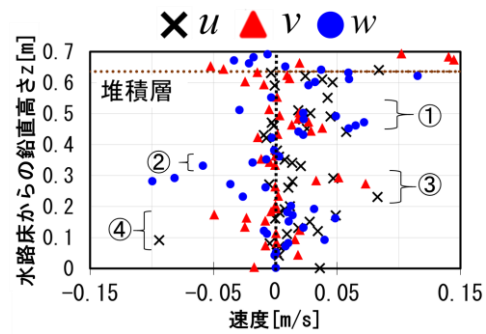


図-10 堆積層内の流速分布(Case4\_x=10m)

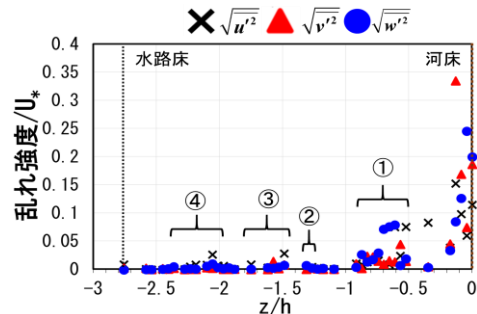


図-11 堆積層内の乱れ強度分布(Case4\_x=10m)

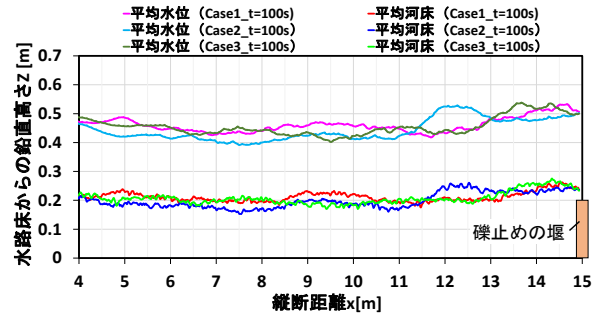
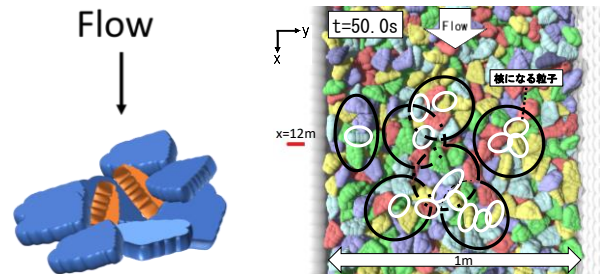


図-12 水位と河床高の縦断形



(a) 亀甲構造をなす粒子群 (b) 河床の平面状況(Case1\_x=12m)  
図-13 粒子の配置 (Case1\_t=50s)

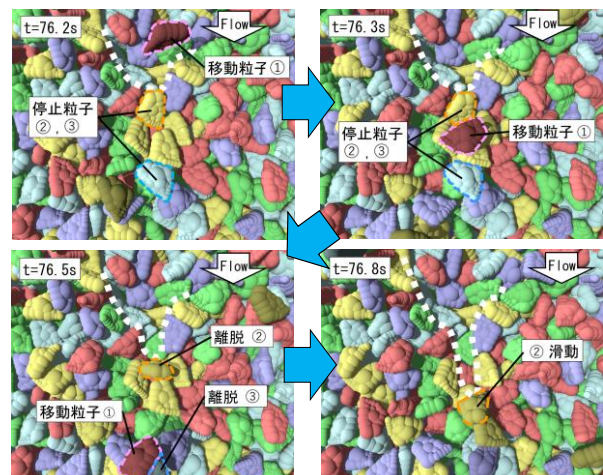


図-14 粒子衝突による礫の離脱(Case1\_x=11.6m)

やかな波が河床面に形成され、水面と同位相となっている。  $x = 5 \sim 11\text{m}$  ,  $t = 100\text{s}$  時での平均フルード数  $Fr$  は、 Case1~3それぞれ  $Fr = 1.27, 1.35, 1.31$  である。水路下流端  $x = 15\text{m}$  には水路床から高さ  $0.2\text{m}$  の礫止め堰が設置されている。このため、3 ケースとも下流端付近では堆積傾向にある。

### b) 粒子形状の効果と河床変動

河床表層粒子は流れの作用により姿勢や配置を変化させる。図-13(a)は実験で見られた河床表層面での粒子群が形作る特徴的な構造を示している。オレンジ色の粒子は、長軸を鉛直方向に向け礫床に長軸の半分程度埋没しており、容易には動かない。この粒子を核にして、周囲に粒子が堆積し6個程度の粒子集団を形成する。周囲に堆積する粒子は長軸を流下方向に向け、高さを増大させ、かつ平らな面を上に向けた覆瓦構造を取る。集団を構成する粒子群の粒子間の距離は近く、粒子同士、力を伝達し合っている。これは亀甲積みと呼ばれる安定な石の積み方と類似の構造である。図-13(b)は Case1 の通水開始から50秒後の河床表面の状況を示す。白線で囲まれた粒子は核となる粒子で、黒線で囲う粒子が粒子集団を示す。核になる石礫が多数存在するところでは、河床は安定している。粒子の形の効果は、粒子自身の姿勢だけでなく周囲の粒子と色々な配置を取りながら粒子群の移動に抵抗することが分かる。

次に河床の洗掘過程を説明する。図-14 は粒子衝突により河床粒子群が移動し、滞筋が形成されていく過程を示す。  $t = 76.2\text{s}$  の白色の破線は周囲より低い場所を示す。着目している粒子に①~③の番号を付している。  $t = 76.3\text{s}$  では移動粒子①が流下し  $t = 76.5\text{s}$  では移動粒子①と停止粒子③が衝突する。また、停止粒子②は移動粒子の通過により姿勢を崩し離脱している。このように河床の洗掘は、河床高が周囲よりも低くなるとその場所に移動して来る粒子との衝突により河床粒子の移動が起こりやすく、流下方向に滞筋が形成されるようになる。平坦に近い河床を粒子が流下する場合、堆積している粒子の上を流下するため、河床は洗掘されにくい。図-15 は Case1 で洗掘が見られた  $x = 11 \sim 13\text{m}$  の河床高コンターの時間変化を示す。流下方向速度が  $0.05\text{ m/s}$  以下の粒子を河床に堆積している粒子と定義している。  $t = 75\text{s}$  および  $t = 100\text{s}$  から流下方向に滞筋が発達していく様子が見られる。図-16 は Case1~Case3 の  $t = 100\text{s}$  の河床コンター図を示す。 Case1 では、  $x = 6 \sim 8\text{m}$  地点の洗掘箇所でも黒の鎖線に示すように滞筋の発達が見られる。 Case2 の棒状の粒子群では、滞筋は横断方向にも広がったため兩岸の水路壁まで一様に洗掘しており、より動き易い河床であることが分かる。 Case3 では図-16(c)の黒の鎖線に示すように水路中央が一様に洗掘している。このように粒子形状によって粒子群の動き易さや河床の変動に違いが見られる。

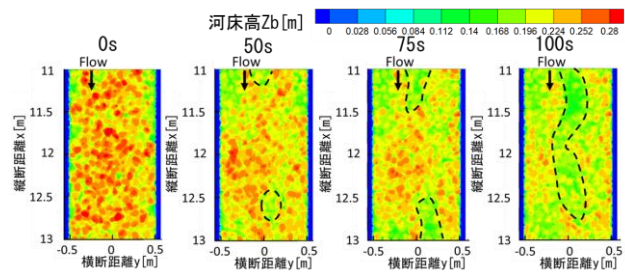


図-15 河床高の時間変化(Case1, 粒子形状:扁平)

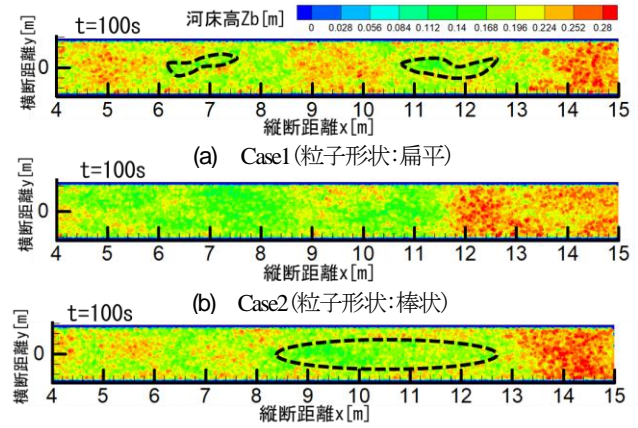


図-16 河床コンター(Case1~Case3)

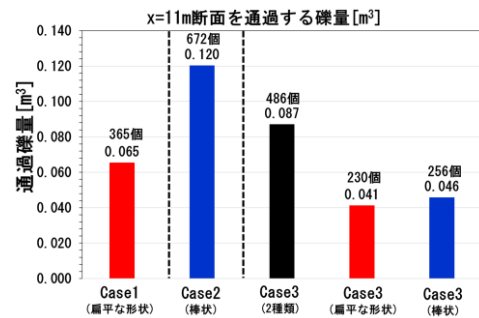


図-17 通過礫量

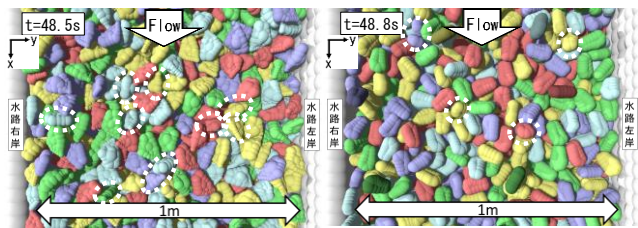


図-18 河床表層の礫の状況

### c) 通過礫量

図-17 は Case1~3 について通水開始から 100 秒間に  $x = 11\text{m}$  の断面を通過した礫量を示す。 Case1 と Case2 の通過礫量を比較すると、 Case2 は Case1 の約 1.85 倍となり棒状の粒子は移動しやすい形状といえる。一方、 Case3 (2種類) の通過礫量は、 Case1 と Case2 の通過礫量のほぼ中間の量であるが、扁平な粒子と棒状の粒子の通過礫量の内訳を見ると、両者にあまり差が現れていない。これは、それぞれ単独な形状の粒子に対して Case3 では、扁平な粒子と棒状の粒子が互いの運動に影響を及ぼし合っているためである。図-18 で河床表層の礫の状況を比較する。図-18(a), (b)の白色の鎖線は図-13(a)で示した粒

子集団の核になる粒子を示している。Case1の方が核になる粒子が多く、より安定した河床となっている。扁平な粒子は平らな面が大きいので起立し、核になる粒子になりやすい。一方、棒状の粒子が核になるためには、周囲の複数の方向から支持される必要があり、核粒子にはなりづらい。さらに、扁平な粒子は不規則な凹凸を有しており、かみ合わせ効果が働くため周囲の粒子に力を伝え、より離脱しにくい状況にある。これらのことから通過礫量に大きな差異が生まれたと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、粒子形状と粒子の混合割合が異なる数値移動床実験を3ケース行い、河床形状や石礫移動量に及ぼす形の効果を検討した。また、主流部と堆積層内の流れについて検討した。以下に主要な結論を示す。

- (1) 本研究条件では、堆積層内の流れの流速が0.2m/sであった。この値は、砂などの小粒径の運動に影響を与える量となる。また、乱れ構造については固定床で検討された礫津の結果と異なっている。さらに、主流部と堆積層内の流れの相互作用の及ぶ範囲は、河床表層から鉛直下向きに水深程度である。
- (2) 粒子形状の違いによって河床変動の発達速度に差が見られた。複雑な形状(Case1の実験)の粒子の方が粒子群が塊となって、安定な河床構造を取る。また、河床の洗堀は、移動粒子が河床の静止粒子と衝突・移動をもたらす滲筋を形成していくことが主因と考えられる。
- (3) 粒子形状は自身の運動だけでなく周囲の粒子の運動にも影響を与える。粒子形状の違いによって河床表層の堆積構造が異なり、輸送される石礫量が大きく異なる。

本検討では、グリッドスケール以下の渦を、スマゴリンスキーモデルでモデル化することで河床の凹凸や移動粒子による乱れ構造を概ね解析できているとの立場で分析を行った。今後石礫河道の粒子運動と乱れの構造についてさらに調査・検討する予定である。

#### 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, 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) 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆: 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.635-640, 1999.
- 5) Fukuda, T., Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, *Advances in Water Resources*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.037>
- 6) 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.
- 7) 中川博次, 礫津家久: 透水性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用, 土木学会論文報告集, No.244, pp.81-90, 1975.
- 8) 礫津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No.261, pp.67-76, 1977.

(2018.5.31 受付)

## EFFECTS OF PARTICLE SHAPES OF GRAVELS ON THE FLOW STRUCTURES AND THE BED GEOMETRY IN GRAVEL-BED STREAMS

Takatoshi ATSUMI and Shoji FUKUOKA

It has been recognized that particle shapes of gravels have essential roles for hydraulics in the gravel-bed rivers. The numerical movable-bed channel experiments are conducted using two different kinds of gravels with uniform particle shapes. Flow structures as well as mutual flow interactions between the main flow region and permeable gravel bed region are investigated by the numerical movable-bed channel experiment.

It is demonstrated by the numerical channel experiment that the lateral turbulent mixing near the gravel-bed surface is intense due to changes in the bed geometry and the main flow affects over the range of flow depth on the structure of flow in the permeable gravel-bed region and also the developing process of bed configurations is different markedly by the particle shapes of gravels and how big blocks of gravels and subsequent sand waves are formed on the bed.