

混合粒径数値移動床水路実験による粒子群の跳躍と鉛直分級に関する研究

熱海 孝寿¹・福田 朝生²・福岡 捷二³

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正会員 琉球大学工学部准教授 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地)

E-mail: sfuku@t-fukuda@tec.u-ryukyuu.ac.jp

³フェロー 中央大学 研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

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

本研究では、粒径幅の広い石礫河川の移動床現象の理解を深めるため、1 オーダー異なる粒径幅を有する粒子群を用いて数値移動床実験を実施し、河床付近で跳躍運動する粒子群について分析を行い河床構造の変化を調べた。その結果、河床表層の全粒径が移動する場合、最大粒径程度の厚さの交換層で強い鉛直分級が生じ、粒径が大きいほど河床の鉛直上方に連続して位置すること、また、跳躍時の粒子運動の軌跡から、小粒径粒子が堆積層内に落下する様子や流体力によって上昇する様子が見られた。最後に本研究から明らかになった課題を示している。

Key Words: gravel bed river, bed load, numerical movable-bed channel, vertical sorting, saltation

1. 序論

石礫河川の河床材料は、幅の広い粒径分布と多様な粒子形状を有しており、河床表層粒子の粗粒化や大粒径粒子の遮蔽効果により表層に中小粒子を留まらせるなど、石礫河川の流砂機構に及ぼす粒径分布の影響は大きいことが知られている¹⁾。福島ら²⁾は、河床表層の大粒径粒子の存在割合を変化させた条件で移動床実験を実施し、実験結果は大粒径粒子が多くなることで、掃流砂量の減少や粒子の移動速度が低減する傾向にあることを示した。

石礫河川の河床変動は、河床表層の粒子配置や空隙率、粒子衝突の影響など様々な要因が複雑に作用する。これらの石礫動態を観測することの難しさを考えると、掃流砂の力学的機構の理解を深めるには計算力学的なアプローチが有効である。

Harada ら³⁾は、step pool が形成される水面変動の激しい山間地の流れ場に DEM-MPS 法を適用し数値移動床実験を実施し、粒子運動に及ぼす水面変動の重要性を指摘している。また、Fukuoka ら⁴⁾は、固液相の相互作用を直接解析可能な CFD-DEM モデルを構築し、固定床上を流下

する礫群の軌跡や速度、粒子の存在割合を実験値と比較し、CFD-DEM モデルの妥当性を検証している。さらに、三次元数値移動床実験を実施し、石礫粒子の粒径毎の運動の違いや粒子形状が土砂の輸送量に及ぼす影響が大きいことを示した。また、田所ら⁵⁾は、混合粒径・非球形の数値移動床実験を実施し、流砂の素過程に及ぼす粒子形状の影響について明らかにして来た。

著者らは、Fukuoka ら⁴⁾と同様の解析モデルを用いて、同一体積で異なる粒子形状の粒子を用いて数値移動床実験を実施し、移動開始時や跳躍運動時に及ぼす粒子形状の効果を明確にした⁶⁾。論文では、粒子形状の効果は、粒径や粒度分布に大きく依存するため、粒度分布の影響についても理解を深めることが重要であることを強調している。

本研究では、粒子の大きさ分布の影響に着目し、粒子形状は球を用いた混合粒径での数値移動床実験を実施した。Fukuoka ら⁴⁾や田所ら⁵⁾の検討では、解析に用いられた最小粒径と最大粒径の比が3程度と狭かったため、混合粒径の効果は比較的小さかったと思われる。このため、粒径分布を1オーダーの幅を有する粒径集団を用いて数

値移動床実験を実施し、河床構造の鉛直分級機構や河床を跳躍運動する粒子群の挙動の分析を行い、混合粒径の流砂の力学の基本的検討を行うとともに課題を明らかにしている。

2. 数値解析法⁴⁾

本研究の数値解析法は、流れを Euler 的に、石礫粒子は Lagrange 的に解析する。流れの解析は石礫粒子の固相部分を密度の異なる液体として、非圧縮性流れとして解析する。石礫粒子の解析は、個別要素法に基づき粒子間接触を考慮して解析し、接触力の評価には、Voigt モデルを用いた。また、自由水面の変化は VOF 法に基づき解析を行う。石礫粒子は、剛体として小球を隙間のないように連結させ任意形状をモデル化した。また、粒子に作用する流体力 F_f は下記の式(1)から直接算出する。

$$F_{f,i} = \int_{V_s} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu/\rho + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \right\} dV \quad (1)$$

ここに、 u_i ：流体計算格子内で固相を踏まえて質量平均した i 方向流速、 P ：圧力と SGS 応力の等方応力成分の和、 ρ, μ ：流体計算格子内で体積平均した密度および粘性係数、 ν_t ：SGS 渦粘性係数、 V_s ：各粒子の体積である。SGS 応力成分は、標準スマゴリンスキーモデルを用いた。数値解析法の詳細は文献⁴⁾を参照されたい。

本解析で用いたパラメータを表-1 に示す。Fukuoka⁴⁾の検討結果を参考に解析パラメータを決定した。格子幅は、最小粒径 $d=1.5\text{cm}$ を 4 分割する値に設定した。

3. 数値実験の条件

数値移動床実験に用いた実験水路の諸元は、水路長 4.01 m、幅 1.02 m、勾配 1/30 の直線水路である。図-1 は粒子投入直後の解析領域と座標軸を示す。図-2 は、数値解析に使用した粒径分布を示している。Talbot 型の粒径分布を参考に設定し、粒径 $d=1.5\sim 15\text{cm}$ の 1 オーダーの広がりのある粒径分布を設定した。図-3 は、数値解析に使用した粒子形状を示す。粒径 $d=1.5\sim 5\text{cm}$ は、図-2(a)に示す単一の球形状とし、粒径 $d=6\sim 15\text{cm}$ は、図-2(b)に示す複数の球を連結して、球形状を模した形状に設定した。本解析では、粒子間接触の効率化のために、直交格子に粒子を格納するリンクリスト構造⁷⁾を用いている。粒子を格納する格子幅は、石礫を構成する球の直径の最大値に基づき設定している。粒子群の粒径比が大きくなると、各格子に多くの粒子が格納され計算速度が大幅に増加したため、粒径 $d=6\sim 15\text{cm}$ の粒径の大きい粒子は、複数の

表-1 解析に用いたパラメーター

流体計算格子サイズ	0.00375 m	Smagorinsky 定数	0.173
流体運動解析の刻み時間	5×10^{-5} s	縦弾性係数	5×10^{10} Pa
粒子運動解析の刻み時間	2.0×10^{-6} s	ポアソン比	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	摩擦係数	0.5
粘性係数	8.9×10^{-4} $\text{Pa} \cdot \text{s}$		

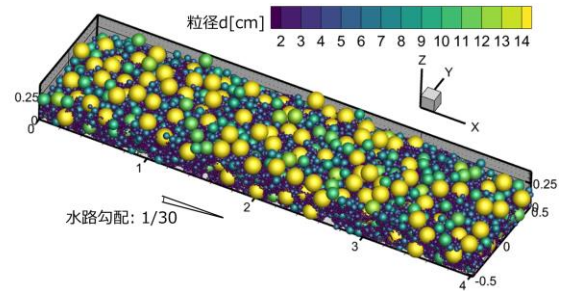


図-1 解析領域と座標軸の設定

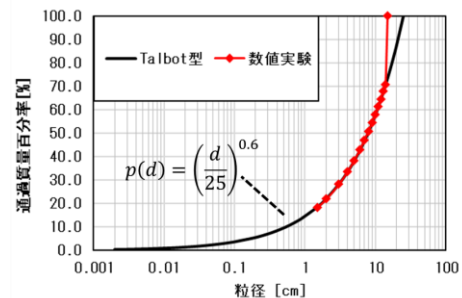


図-2 粒径分布

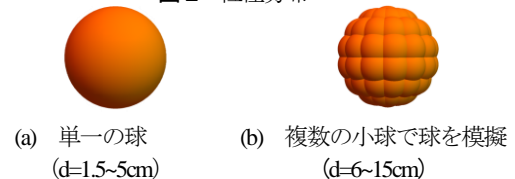


図-3 粒子形状

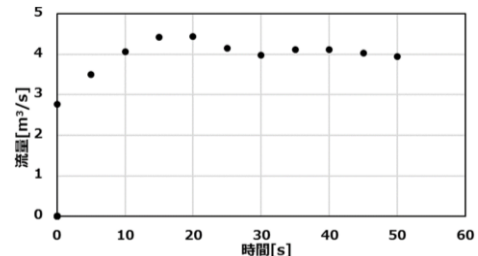


図-4 流量ハイドログラフ

表-2 数値移動床実験の実験条件

流量 Q	3.99 m^3/s	摩擦速度 $(gh)^{0.5}$	0.55	m/s
断面平均流速 U	4.22 m/s	無次元掃流力 τ_{*i}	1.26, 0.22, 0.13	※
水深 h	0.93 m	無次元流砂量 $q_{bi}/(\text{sgdi}^3)^{0.5}$	$2.87, 9.87, 237 \times 10^{-5}$	※
平均河床高 z_b	0.26 m	初期のパッキング厚	0.31	m
フルード数 $U/(gh)^{0.5}$	1.39	水路勾配 I	1/30	

※順に d_{\min} (1.5cm), d_{50} (8.0cm), d_{\max} (15cm) の値

球を連結し、解析上の粒径比を小さくした。

また、粒子投入位置を解析領域内でランダムに与えて、パッキングを実施し初期河床を作成した。初期水位は、1.2 m として与え、境界条件は、縦横断境界に周期境界条件を適用した。図-4 は、実験流量ハイドログラフを示しており、通水開始から 30 秒ほどで概ね定常状態の 4.0

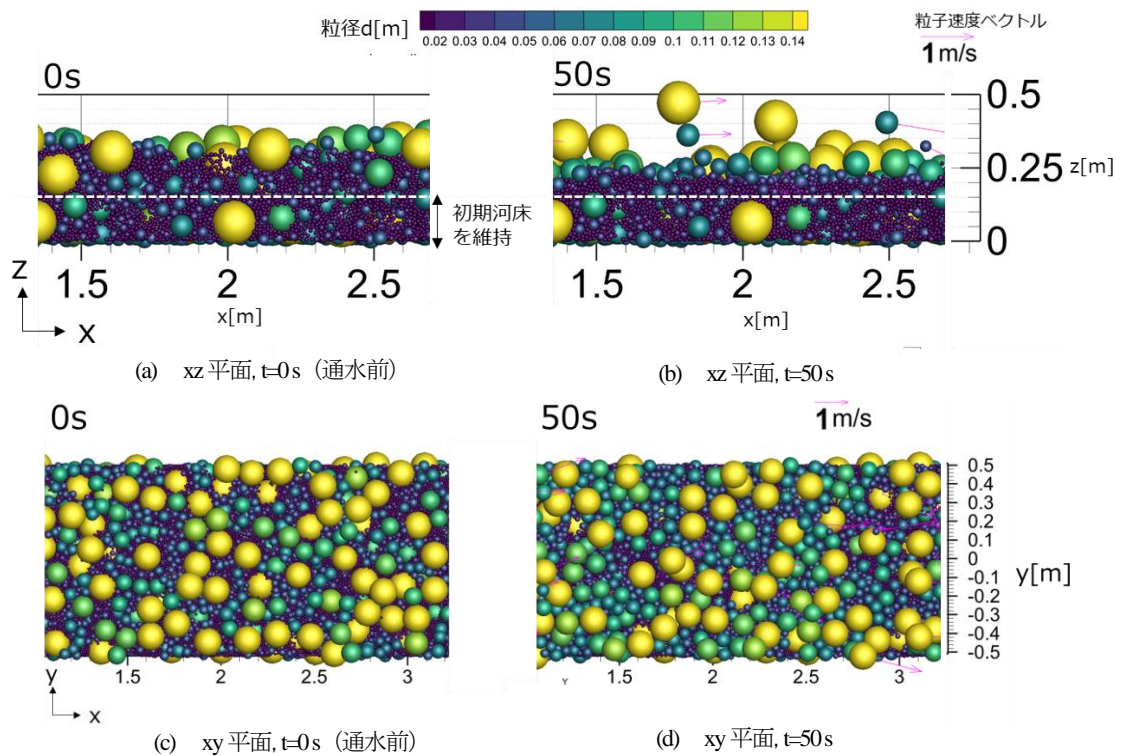


図-5 河床構造の時間変化

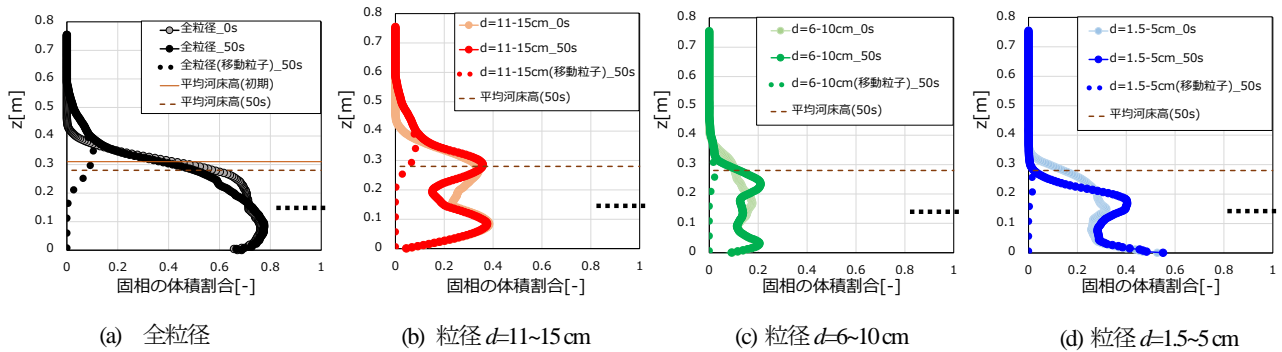


図-6 固相体積割合の鉛直分布の時間変化

m^3/s に至った。表-2は、数値移動床実験の実験条件を示す。通水開始 30 秒時点の水量を示しており、粒子速度ベクトルの絶対値が 0.05 m/s 以下の粒子を河床粒子として平均河床高を算出した。解析の全領域で空間平均を行い水深やフルード数を算出した。また、無次元流砂量は $x=2\text{m}$ 断面で流砂量 q_b を計測し、 $t=30\sim 50\text{s}$ で時間平均した値から算定した。

4. 数値実験結果

(1) 河床構造の変化

図-5 は、通水前と通水後 50s 経過時の河床表面層粒子の配置の時間変化を示す。図-5(a),(b)の比較から、河床表面層で鉛直分級が生じていること、 $z=0.15 \text{ m}$ 以下の粒子は配置が変化していないことが分かる。また、図-5(c),(d)から鉛直上方から見ると小粒径粒子は、大粒径粒子の間

に埋もれほとんど露出していないことが分かる。図-6は、解析領域全域で空間平均した各粒径粒子群の体積割合の鉛直分布の時間変化を示している。

$t=50\text{s}$ 時は、粒子速度が 0.05m/s 以上の移動粒子の体積割合を点線で合わせて表示している。図-6(a) は全粒径の体積割合を示しており、 $t=0\text{s}$ から 50s 間で $z=0.15 \text{ m}$ 以下での差異は小さく、初期の河床構造を維持している。初期平均河床高は $z=0.31 \text{ m}$ の位置にあり、本数値実験の交換層厚はおおよそ粒子の最大粒径 $d=15 \text{ cm}$ 程度であり、河床表面層にある全粒径の粒子に移動が生じていた。

図-6(b), (c), (d)はそれぞれ大粒径、中粒径、小粒径集団の体積割合を示している。図-6(b)では $z=0.20\text{m}$ 付近の体積割合が特に減少している。これは初期には表面層で埋没していた大粒径粒子が、鉛直上方に移動したためである。一方、図-6(d)に示す小粒径粒子は、大粒径や中粒径間の隙間に落ち込み鉛直下方に移動するため、 $z=0.20\text{m}$ より上層の体積割合が減少し、 $z=0.20\text{m}$ 以下の体積割合が増

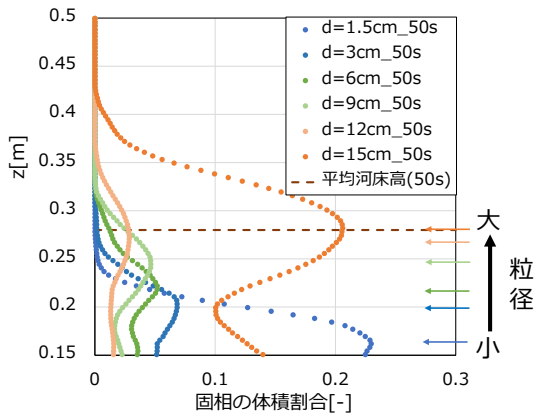


図-7 固相体積割合の鉛直分布

加している。また、図-6(c)の中粒径は、 $z=0.10\sim 0.20\text{m}$ および $z=0.30\text{m}$ 以上の体積割合は減少しており、交換層内の粒子の上昇と河床表層の間隙への落ち込みの両者が生じている。

図-7は個々の粒径階の体積割合を示しており、ここでは、粒子速度が 0.05m/s 以上の粒子を含めていない。 $z=0.15\text{m}$ 以上の交換層内での体積割合のピークに着目すると、粒径が大きいほど鉛直上方で体積割合のピークを示し、粒径に応じて鉛直方向に連続的に変化することが分かった。このような河床構造は、関根ら⁸⁾が示したように、移動しない大粒径の間隙を、粒径分布を有する掃流砂が入り込み静的平衡に至った河床の鉛直構造と同様であった。

(2) 各粒径の跳躍運動

図-8は1秒間の移動平均した縦断距離 $x=2\text{m}$ 断面の流砂量と通過した礫の粒子数の時間変化を示している。図-8(a)から、 $d=15\text{cm}$ の粒子群が全流砂量のほとんどを占めており、鉛直分級が発達した $t=50\text{s}$ 時にも活発に移動している。中小粒子の流砂量は大粒径粒子の流砂量と比べわずかであった。しかし、図-8(b)に示す掃流砂粒子数では、 $d=1.5\text{cm}$ の小粒径粒子がほとんどを占めており、移動粒子数の時間変化は大きい。また、時間とともに河床表層の分級が発達し、小粒径粒子は初期と比較して鉛直下方に存在比率を高めるため、 $t=30\text{s}$ 以降では、 $d=1.5\text{cm}$ の移動粒子数が減少傾向にある。小粒径の流砂量は全流砂量に比べわずかであるが、小粒径が河床表層下に存在することで、表層に存在する粒径の大きい粒子群の運動に影響を及ぼしている。解析動画の分析から、小粒径粒子がローラーのような役割をし、大粒径粒子が表層を滑動形式で流下する様子が確認できている。

図-9は鉛直分級が発達した $t=40\sim 50\text{s}$ 間に粒子速度が 0.05m/s 以上の粒子群について、時間間隔 0.05s ごとに各高さでサンプルを抽出した粒子速度の鉛直分布を示している。流速は、縦断距離 $x=1.95\text{m}$ の水路中央付近の平均流速を示している。また、サンプル数が10以下につい

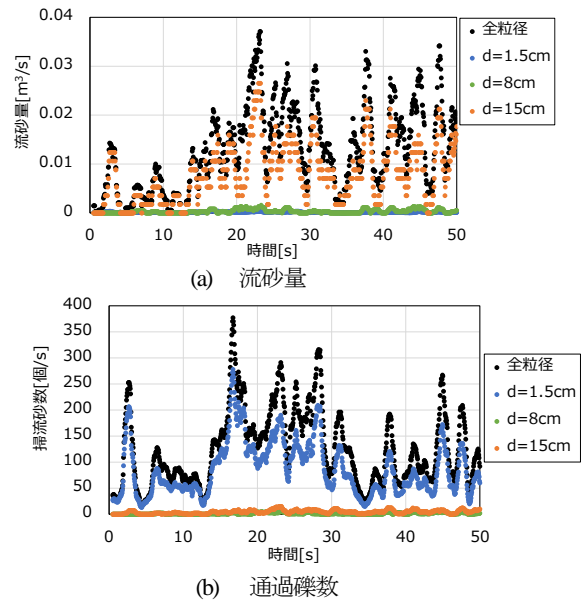


図-8 流砂量と通過した礫の粒子数の時間変化 ($x=2\text{m}$)

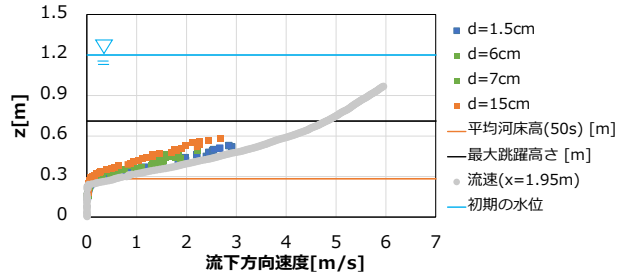


図-9 流速・粒子速度の鉛直分布

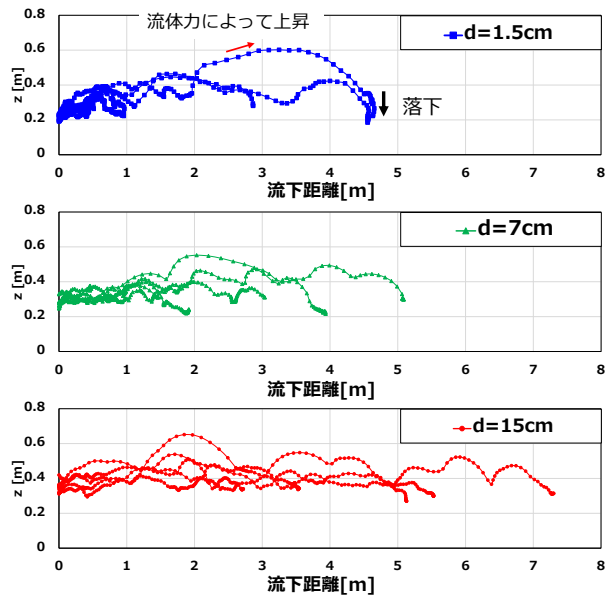


図-10 各粒径ごとの粒子運動の軌跡

ては表示していない。図-9から跳躍運動する粒子の移動速度は、粒径が小さいほど移動速度が速く、平均流速に近い粒子速度で流下していることが分かる。

図-10は粒径 $d=1.5, 7, 15\text{cm}$ の粒子運動の軌跡の一例を示している。縦軸は、 z 軸であり、横軸は、各粒子の移動開始地点からの縦断方向の流下距離である。用いた水理条件のもとでは、 $d=1.0\sim 3.0\text{cm}$ の粒子群は、浮遊状態で

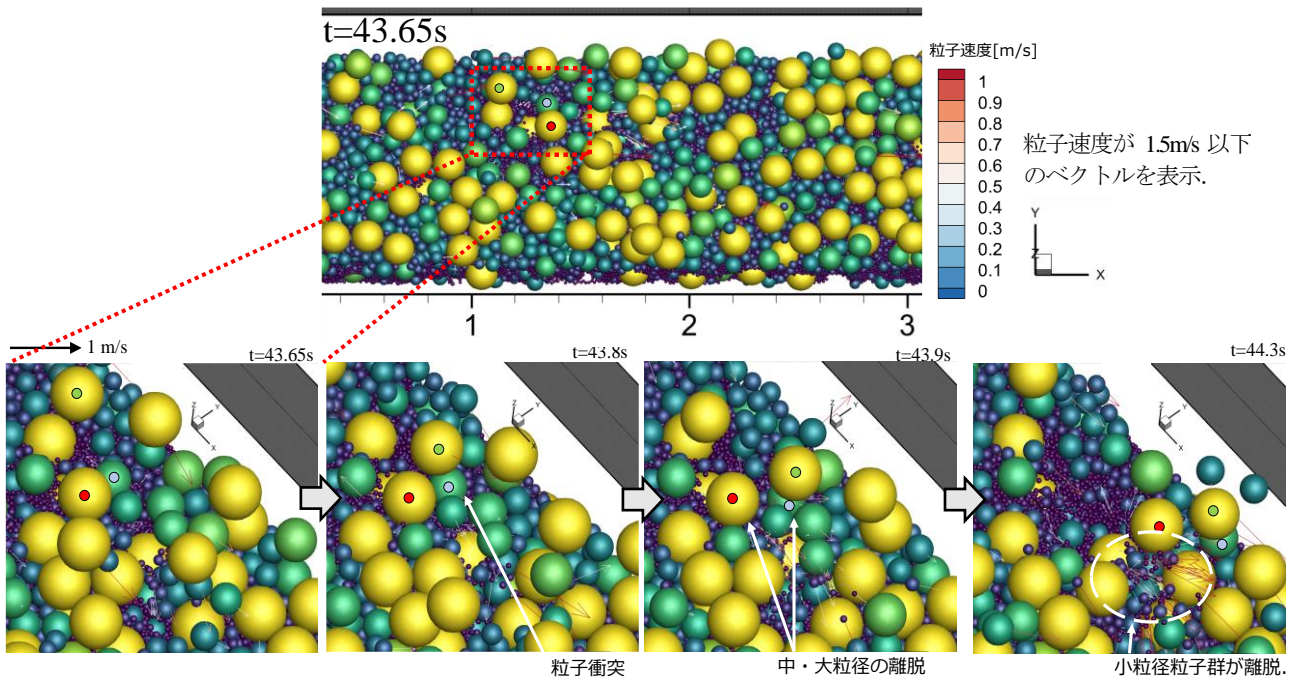


図-11 河床表層の粒子運動のスナップショット

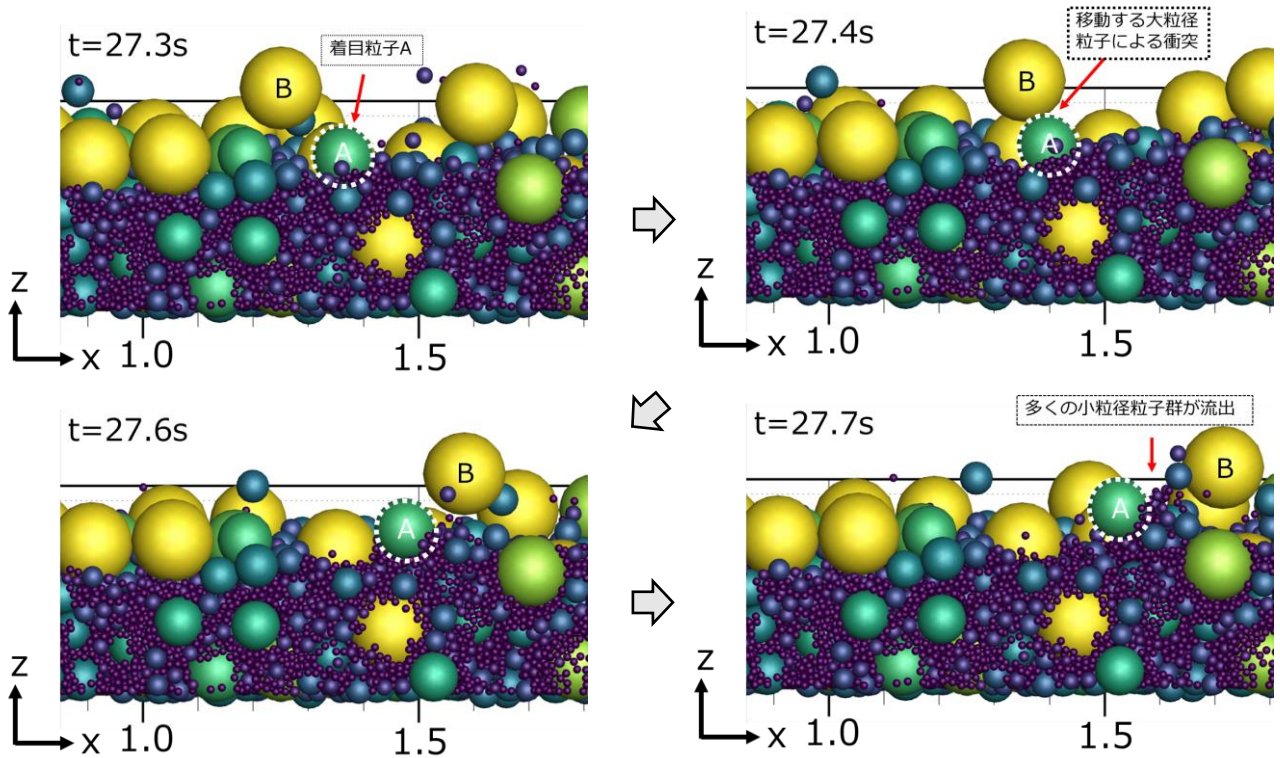


図-12 河床表層の粒子運動のスナップショット (x-z断面)

移動することも考えられることから、粒子の移動軌跡を調べた。小粒径粒子の軌跡に着目すると、停止する際に鉛直方向に落下している粒子が存在し大粒径粒子群の間隙に落ち込んでいる。一方、大粒径粒子は、比較的高い位置で停止している。また、多くの小粒径粒子は掃流形態で流下するが、中には、跳躍中に流体力によって上昇し、浮遊状態に近い流下形態をとる粒子が確認できる。

図-11 上図は通水後 $t=43.65s$ 時の粒子運動を上面から見

て示しており、粒子群の跳躍運動が活発に生じている。赤印のついた大粒径粒子の移動に伴い周囲に堆積していた小粒径粒子群が離脱している様子が確認できる。大粒径粒子が存在するとその周囲に小粒径粒子が存在できることを示している。また、図-12は河床近傍の粒子運動の xz 断面で示している。粒子 A に着目すると、 $t=27.4s$ に跳躍運動する粒子 B と衝突が発生している。その後、 $t=27.7s$ に粒子 A に離脱が生じている。粒

子Aの離脱に伴い、周囲に存在していた小粒径粒子群を巻き込んで移動していることが分かる。これは、図-8(b)の小粒径の通過粒子数に鋭いピークが生じている要因である。

各粒径集団の河床高の相対的な位置関係や流下する砂と礫の混合比率によって礫群の移動しやすさが変化することが知られており、混合粒径の各粒径集団の移動開始や跳躍時の運動に及ぼす各粒径間の相互作用やそれに及ぼす粒子形状の影響などを力学的に明らかにしていくことが、混合粒径河床の流砂機構や河床変動機構のさらなる理解に必要である。

5. 結論と今後の課題

1 オーダー異なる粒径幅を持つ連続した粒径分布を有する混合粒径河床について数値移動床実験を行い、河床構造の変化や粒子群の跳躍運動の時間変化について分析を行った。以下に主要な結果を示す。

1. 河床表層の全粒径が移動する条件で鉛直分級を調べた。移動に伴う交換層厚は最大粒径程度であった。各粒径の体積割合の分布から、粒径が大きいほど交換層内の鉛直上方で体積割合のピークを示し、鉛直方向に粒径が連続した河床構造を形成することが分かった。
2. 粒子運動の跳躍軌跡から、小粒径粒子が堆積層内に落下する様子や流体力によって上昇する様子が確認できた。

本研究は、定常流で平衡状態での混合粒径数値移動床実験であり、これより石礫河川の河床変動の基本的理解が深まった。しかし、実際の現象は、非定常、非平衡な状況での河床変動である、この時の混合粒径河床の分級現象、跳躍運動など本研究で得られた結果がどのように変化するかを明らかにし、定量的に評価できるようにす

ることが次の重要な課題である。

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。また、本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムの一般利用を利用した。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) 福島雅紀，櫻井寿之，箱石憲昭：大きな石による河床再生技術に関する実験的検討，水工学論文集，第54巻，pp.763-768，2010.
- 3) Harada, E., Ikari, H., Shimizu, Y., Khayyer, A. and Gotoh, H. : Numerical Investigation of the Morphological Dynamics of a Step-and-Pool Riverbed Using DEM-MPS, J. Hydraul. Eng., Vol.144, Issue 1,2018.
- 4) Fukuoka, S., Fukuda, T. and 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.
- 5) 田所 弾，福田朝生，福岡捷二：流砂運動の素過程と流砂量に及ぼす粒子形状・粒度分布の影響，混相流，30巻5号 pp.491-498，2017.
- 6) 熱海孝寿，福岡捷二：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，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.76，No.2，pp.I_1135-I_1140，2020.
- 7) 酒井幹夫：粉体の数値シミュレーション，pp.35-37，丸善，2012.
- 8) 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.
- 9) 池田 宏，伊勢屋ふじこ；混合砂礫の流送に伴う縦断分級，第30回水理講演会論文集，pp.217-222，1986.

(Received June 30, 2021)
(Accepted September 3, 2021)

SALTATION MOTIONS AND VERTICAL SORTING MECHANISM OF GRAVEL PARTICLES BY NUMERICAL MOVABLE-BED EXPERIMENT

Takatoshi ATSUMI, Tomoo FUKUDA and Shoji FUKUOKA

The numerical movable-bed experiment was conducted to understand sediment transport mechanism in gravel bed rivers. The riverbed material used in the numerical experiment was spherical particles and followed Talbot grain size distribution. The whole grain size particles of the riverbed surface moved and vertical sorting occurred. And, it was found that the larger the particle size, the more they were at the above location in the river bed. In addition, it was confirmed from the trajectory of the particle motion that the small particles fall between larger particles of the river bed.