

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

THREE-DIMENSIONAL MOVEMENT OF GRAVELS AND STONES
IN NUMERICAL CHANNELS WITH MOVABLE BED

福田朝生¹・福岡捷二²・内田龍彦³

Tomoo FUKUDA, Shoji FUKUOKA and Tatsuhiko UCHIDA

¹正会員 修 (工) 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (同上)

Sediment transport rate and bed variation in stony-bed rivers is strongly affected by stones sizes and shapes in streams. However, measurements of forces acting on sediment particles in active are difficult, especially for rapid stony-bed rivers. To investigate the dynamic mechanism of stones moving in streams, we have developed a numerical movable bed channel in which three-dimensional motion of each shaped-stone is calculated, respectively. The dynamic interaction between stones motions and hydrodynamic forces on movable bed surface in numerical experiment is investigated. It is demonstrated that large stones form static stone clusters. Stones clusters have an important mechanism to stabilize stony-bed surface against hydrodynamic forces of flows.

Key Words : *numerical movable bed channel, three-dimensional sediment transport, size and shape of stone, stone cluster*

1. 序論

洪水時の石礫河川における河床上では、水流に耐えきれない小さい粒径が流送され、大粒径の河床材料が露出し、露出した大粒径粒子が主に水流に抵抗することが明らかとなっている^{1,2)}。露出した大粒径粒子は大洪水時でも容易には動かず、長時間河床に静止し、間欠的に転動する移動形態となる。しかし、河床変動解析で重要な砂や小礫を対象に導かれた従来の流砂量式^{例えは3)}は、河床材料粒径の数倍程度の深さの土砂がほぼ一様に流下する移動形態を想定しており、石礫河川の河床変動とは現象が異なる場を想定していることになる。すなわち、従来の流砂量式を用いた河床変動解析では、洪水中に一時的に静止している大粒径粒子の小粒径粒子に対する遮蔽効果⁴⁾や、突出する大粒径粒子に加わる流体力などが適切に評価されておらず、石礫河川の河床変動に適用するには課題が多いことが現地観測やその解析から指摘されている^{1,2)}。

地形学分野では、石礫河川における大粒径粒子が間欠的に移動する場を対象に多くの研究がなされており、

clusterと呼ばれる表層の大礫集団が形成されることが河床の安定に寄与することが報告されている。例えば、Piedra⁵⁾は、混合粒径を対象とした移動床の実験を行い、掃流力の増加と大礫集団の大きさや表層の存在割合の変化について研究している。また、Hendrick⁶⁾による現地観測による研究では、大礫集団の大きさ、分布および洪水前後の大礫集団の形成状況などが詳細に報告されている。また、覆瓦構造に代表される、石礫河川特有の石の配置は、河床の安定に粒度分布の影響のみならず石礫粒子の形状が大きく寄与していることも明らかになっている。しかし、様々な形状の幅広い粒度分布を有する石礫粒子群が存在する河床に対し、水流による流体力が作用する際に、石礫粒子群がどのような配置となりながら流れに抵抗し、移動するかについての力学機構の詳細を現地観測や水理実験から解明することは容易ではなく、その実態解明が求められている。

近年、計算機能力の向上を背景に、個々の粒子をLagrange的に追う解析手法を用いて、数値解析により流砂現象の力学を解明する取り組みが行われている^{例えは7)}。しかし、このような研究の多くは、抗力係数を用いて流体力を評価しており、流体力の評価に曖昧さが残ること



図-1 石礫粒子のモデル化

が課題として挙げられる。一方、粒子より小さなスケールで粒子の周りの三次元的な流れ場を解析し、流体力を直接算出する固液混相流れ場の解析手法⁸⁾が開発されてきている。原田ら⁹⁾は、乱流モデルとして Smagorinsky モデルを用いた固液混相流れ場のLESを、漂砂を対象とした3粒径の球粒子による移動床場に適用し、振動流中の粒子の鉛直分級過程について検討している。著者ら¹⁰⁾は、牛島ら⁸⁾の固液混相流れ場の解析手法に倣って流体と固体の相互干渉を評価し、様々な形状有する石礫粒子のモデルとして球を連結させた球体連結モデル¹¹⁾を用い、水流中の異なる形状と大きさを有する石礫粒子群の移動を評価できる三次元解析モデルを構築し、実験¹²⁾により得られた石礫粒子群の不規則な挙動を説明するには、球とは異なる石礫形状を考慮して解析することが重要であることを示してきた。本稿では、このモデル¹⁰⁾を用い、石礫河川を対象とした異なる形状と大きさを有する石礫粒子群からなる混合粒径移動床数値実験水路を構築し、水流中の石礫粒子群の河床近傍における移動・停止機構および石礫粒子群が流体に与える力学的影響について明らかにすることを目的としている。

2. 数値解析の概要

本研究の数値解法では、形状を維持しながら移動する石礫粒子群を Lagrange 的に、周囲の流体流れを Euler 的に直接解析する。Lagrange 的に解かれた石礫粒子群の運動の流れの解析において考慮するため、石礫粒子が有る固相部分を密度が異なる流体として与え、全体を非圧縮性流れとして解いている。石礫粒子群の運動解析では、流れの解析から流体力を評価し、剛体の運動方程式により個々の石礫粒子の運動を解き、流れの解析の固相の位置と流速を修正する。解析手法の概要を以下に示す。詳細は文献¹⁰⁾を参照されたい。

(1) 流れ場の計算

流れ場の計算における基礎式は、固相部分を考慮するために、以下に示す粒子-流体混合系の一流体モデル⁸⁾を用いる。文献 8) では、乱流モデルは用いられていないが、本稿では高 Reynolds 数場を対象とするため乱流モデルとして Smagorinsky モデルを用いた。

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(\nu + \nu_t) S_{ij}\} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\nu = \mu / \rho \quad (4)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

ここに、 u_i は質量平均した流体計算セル内の i 方向平均流速、 P : 圧力とSGS応力の等方応力成分の和、 ρ : 密度、 μ : 粘性係数、 g_i : 重力加速度、 ν_t : SGS乱流粘性係数、 Δ : 計算格子幅、 C_s : Smagorinsky定数 (0.173) である。物性値 ϕ (密度 ρ , 粘性係数 μ) および流速 u_i は、それぞれ次のように体積平均および質量平均とした⁸⁾。

$$\phi = \alpha \phi_s + (1 - \alpha) \phi_f, \phi_f = f \phi_i + (1 - f) \phi_g \quad (6)$$

$$u_i = \{ \alpha \rho_s u_{s,i} + (1 - \alpha) \rho_f u_{f,i} \} / \rho \quad (7)$$

ここに f : コントロールボリューム内の液相の占める割合、 α : 流体計算セル内の気相以外の領域における固相の占める割合を示す。下付の l, s, g はそれぞれ液相, 固相, 気相を示す。 u_s : 固体の速度、 u_f は流体の流速である。

(2) 流体中の石礫粒子群の運動の計算

a) 石礫粒子運動の基礎式

石礫粒子の運動解析には、剛体の並進運動に対する方程式 (8) および回転運動に対する方程式⁸⁾ (9) を用いる。

$$M \ddot{\mathbf{r}}_G = M \mathbf{g} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_c \quad (8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_r = \mathbf{I}_r^{-1} (\mathbf{R}^{-1} \mathbf{N} - \boldsymbol{\omega}_r \times \mathbf{I}_r \boldsymbol{\omega}_r), \quad \mathbf{N} = \mathbf{N}_f + \mathbf{N}_c \quad (9)$$

ここに、ベクトルおよびテンソルは太字で示しており、 M : 石礫粒子の質量、 \mathbf{r}_G : 石礫粒子の重心位置、 \mathbf{g} : 重力加速度、 \mathbf{F} : 石礫表面に作用する力、 $\boldsymbol{\omega}$: 角速度、 \mathbf{N} : 石礫に作用するトルク、 \mathbf{R} : 空間座標系から剛体に固定された座標系への座標変換のテンソル、 \mathbf{I} : 慣性テンソルである。下付 f, c は、流体力および接触力による値を示し、下付 r は、剛体に固定された座標系の成分を示す。ドット記号は、時間に関する1階微分を示す。重心位置、慣性テンソルなどの物体の特性量は、粒子に対し十分細かい特性量算定用のセルを用い、球要素に含まれるセルの位置、体積を基に数値積分により算定した¹⁰⁾。

b) 石礫粒子のモデル化

異なる形状を有する石礫粒子の群としての接触判定を容易に行うため、石礫粒子のモデルは、図-1のように球を隙間が無いように重ね合わせた球体連結モデル¹¹⁾を用いた。石礫粒子の接触判定および接触力は、石礫粒子を構成する球それぞれで個別要素法¹³⁾を用いて評価した。

c) 流体力の評価方法

石礫粒子に加わる流体力は、牛島ら⁸⁾の手法を参考に圧力項、拡散項を用いて評価し、これを石礫粒子に含まれる範囲で体積積分し、式 (10)、式 (11) で評価する。

$$\mathbf{F}_{f,i} = \int_{\Omega_s} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(\nu + \nu_t) S_{ij}\} \right\} d\Omega \quad (10)$$

$$\mathbf{N}_{f,i} = \int_{\Omega_s} \boldsymbol{\varepsilon}_{ijk} r_{f,j} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial}{\partial x_l} \{2(\nu + \nu_t) S_{kl}\} \right\} d\Omega \quad (11)$$

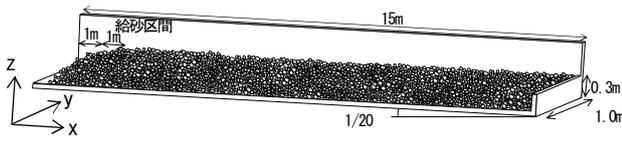


図-2 計算水路諸元および座標軸の定義

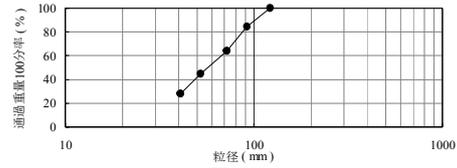


図-3 粒度分布

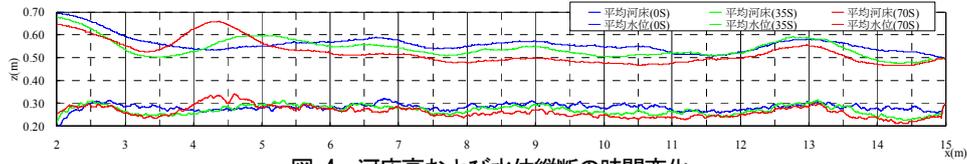


図-4 河床高および水位縦断の時間変化

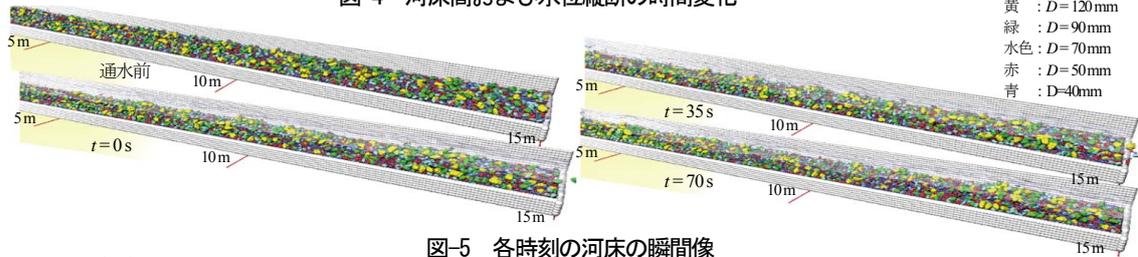


図-5 各時刻の河床の瞬間像

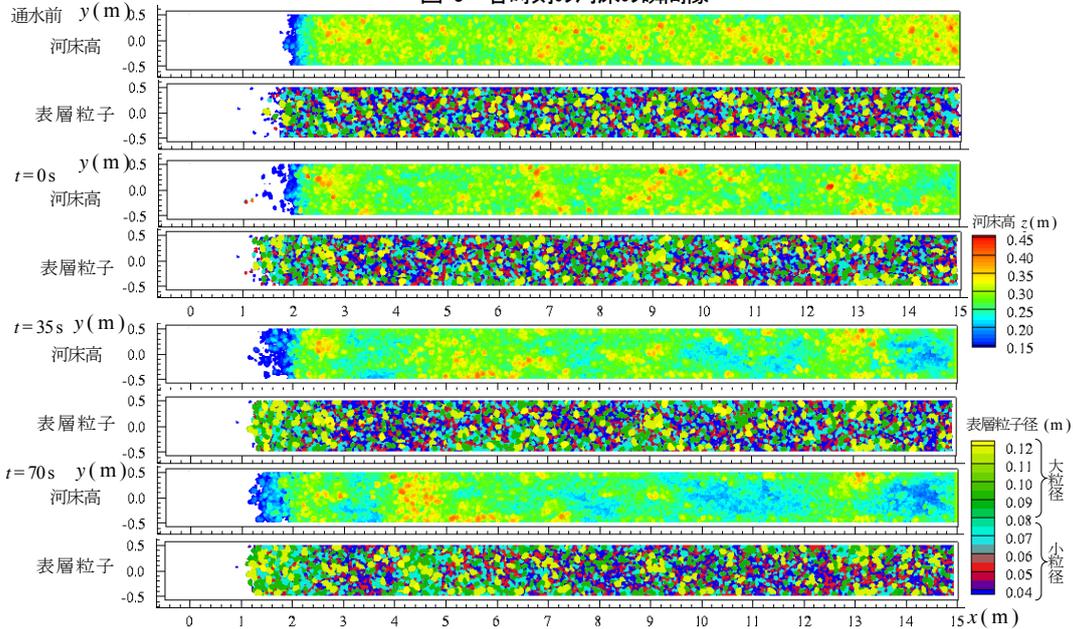


図-6 河床高カウンターおよび表層粒子群の粒子径毎の存在状況

ここに $F_{f,i}$ は i 方向の流体力, $N_{f,i}$ は流体力によるトルクの i 方向成分, $r_{f,i}$: 石礫粒子重心から力の作用点に向かう位置ベクトル, Ω_s : 石礫粒子に含まれる領域, ε_{ijk} : エディントンのイプシロンである.

3. 異なる形状と大きさを有する石礫粒子群からなる混合粒径移動床の数値実験

(1) 移動床数値実験水路と実験条件

異なる形状と大きさを有する石礫粒子群からなる混合粒径移動床数値実験水路における諸元, および解析における座標軸の定義を図-2に示す. 水路諸元は, 石礫粒子が移動する水量, 河床波の波長および計算負荷等を考慮し, 水路長 15 m, 水路幅 1 m および水路勾配を

1/20 とした. 水路床を構成する石礫粒子の形状には, 図-1に示す 8~9 個の小球からなる実河川の石礫粒子の形状に近似させた4種類を用いた. 石礫粒子の径は5粒径 (40 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm, 120 mm) とし, 石礫粒子を構成する小球の径を変化させて作成した. ここで礫径は同一体積の球の直径で換算した値である. 図-3の粒度分布に一致するように5粒径の石礫粒子の投入割合を調整し水路にランダムに敷き詰めた. 本稿では, D_{80} 以上となる 90 mm 以上の石礫粒子を大粒径とし, 70 mm 以下の粒子を小粒径と定義する. 上流端には流量は $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え, 下流端条件は圧力ゼロを与えた. 給砂は, 下流から抜け出した粒子を同時刻に上流の $x = 1\text{--}2 \text{ m}$ の範囲のランダムな位置で落下させて行った. 通水とともに移動床の解析を実施し, 20 s 後の下流端流量が安定した時刻を実験開始とし, その後70 s 間実験を実施

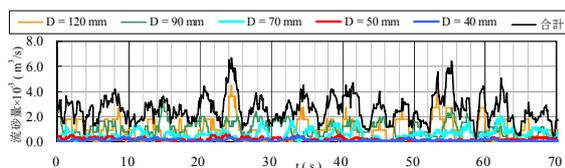


図-7 流砂量の時間変化

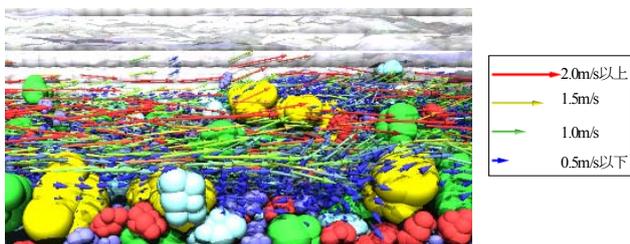


図-9 底面付近の流速ベクトルの瞬間像 (t = 45 s, 右岸付近)

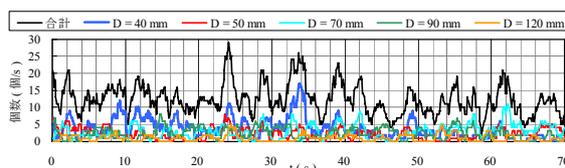


図-8 流下粒子数の時間変化

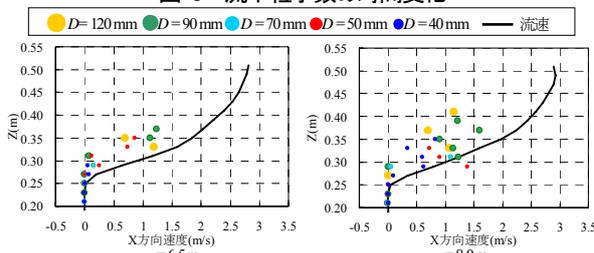


図-10 流速および粒子速度の鉛直分布

した。以降は実験開始からの時刻で説明する。解析では、流体計算の Δt を 5.0×10^4 s、石礫粒子群の運動の計算では Δt を 5.0×10^6 s、流体計算の格子幅を 0.01 m とし、物性値等は既報¹⁰⁾の値を用いた。

(2) 数値実験の結果

a) 水理量、河床の状況および流砂量の時間変化の概要

図-4に流量が安定した実験開始以降の河床高および水位の横断平均値の縦断図の時間変化を示す。データは、2秒間の平均値を示している。70 s 後における平均水深は、0.23 m、平均流速 2.17 m/s、フルード数は 1.45 である。射流場であり、水面は河床と同位相で波打っている。河床の瞬間像を図-5に、河床高コンターおよび表層粒子群の粒子径毎の存在状況を図-6に示す。図-5および図-6には参考に通水前の河床状態も示した。図-4に示す河床の凹凸に着目すると、下流端から河床が洗掘し始め、それが上流に伝わり、河床波が生じている。また、4 m、7 m、9 m、13 m 地点では、河床高が相対的に高くなっている。当該地点では、図-5、図-6に示すように表層に大粒径粒子が集団化しており、表層は平面的に分級が生じている様子がわかる。図-7および図-8にそれぞれ水路下流端での各粒径の流砂量および下流端から単位時間当たりには抜け出る粒子の数の時間変化を示す。図-7に示す流砂量は短時間では振動しているものの、全体的な傾向としてはほぼ安定している。図-7に示す流砂量の時間変化では、大粒径の流砂量が多いが、図-8に示す水路下流端から抜け出す粒子の数は、粒径 70 mm 以下の小粒径粒子が多く、小粒径粒子も活発に移動していることが確認される。本実験では、給砂地点の $x = 1 \sim 2$ m の区間や $x = 4 \sim 5$ m など水路上流で堆積が生じ $x = 5$ m 下流では洗掘傾向となり、平衡状態とはなっていない。しかし、流砂量は概ね安定している点や、 $x = 5$ m より下流では、水流により全ての粒径の粒子が移動しながらも河床が安定している箇所では長時間安定しており、石礫河川における水流に対して抵抗する石礫粒子群の配置やその中で石礫粒子群が流下する形態について十分考察が出来る移動床数値実験水路の結果であると考えられる。

b) 大粒径粒子の流砂量が大きくなる要因

流砂量について 90 mm 程度以上の大粒径粒子の流砂量が多くなる要因について考察する。図-9に河床底面付近の流速ベクトルを、図-10には水路中央部の時間平均の x 方向流速の鉛直分布を示す。図-10は、横断方向に最大粒径程度 0.15 m の幅で空間平均しており、その間を通る粒子の時間平均速度も合わせて示している。図-9および図-10に示すように、流れの流速分布は、大粒径粒子の鉛直スケール程度で上層から下層に向かって、大きく流速が低下しており、大粒径粒子上面の流速は、2.0 m/s 程度であるが、大粒径粒子底面付近の小粒径粒子が存在する地点では、流速は大きく減じ 0.5 m/s 以下となっている。また、表層の大粒径粒子は相対的に高い位置に存在し、大きな流速を受けるため、大粒径粒子の流砂量は大きくなったと考えられる。

c) 大礫集団の形成過程と分級化

図-5および図-6に示すように河床表層の粒子群において大礫集団が形成される要因について考察する。図-11には $t = 42.5$ s から $t = 47.5$ s における粒径別の軌跡を示している。なお、 x - y 平面の軌跡については、背後に河床高コンターを示した。 x - y 平面の軌跡では、粒径 70 mm 以下の小粒径粒子は、河床高の凸部を避け、その脇を主に流下しているのに対し、粒径 90 mm 以上の大粒径粒子は 8.5 m 付近の中央部や、13 m 付近の左右側に形成されている凸部の上を転動している。これは、 x - z 平面の軌跡から分かるように、転動する大粒径粒子は、重心が高いためである。即ち、大粒径粒子は河床の凸部と重心より下の位置で衝突するため、上向きの力を受けるのに対し、小粒径粒子は、重心が低いため、凸部を乗り越えることができず迂回して進むようになる。このように大粒径粒子は、小粒径粒子と比較し、凸部を乗り越えやすく、高い位置の高流速を受けながら転動するため、動き出すと平坦な地点では容易には静止出来ない。大粒径粒子が静止する箇所になり得る地点は、転動する大粒径粒子と同等の高さの凸部が河床に形成されている地点であるため、大粒径粒子は集団化し、大礫集団を形

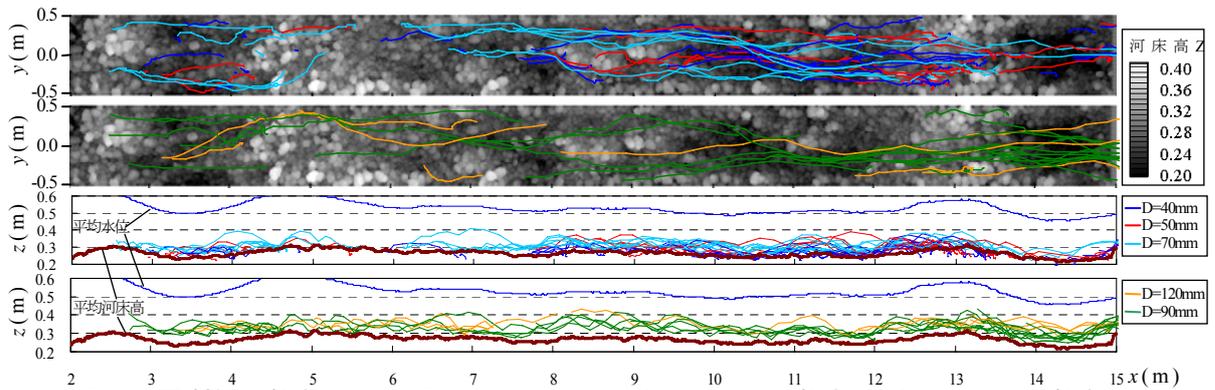


図-11 石礫粒子の軌跡 (t = 42.5 s - 47.5 s) (上2段: x-y 平面の軌跡, 下2段: x-z 平面の軌跡)

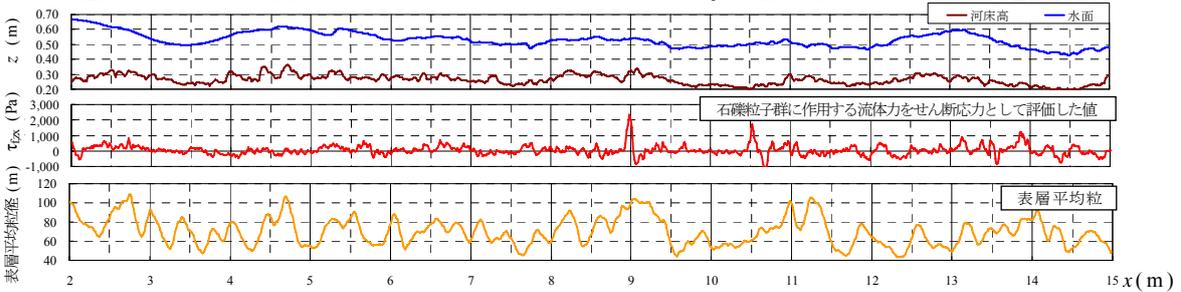


図-12 水位, 河床高, 石礫粒子群に作用する流体力および表層粒径に関する縦断 (t = 45 s)

成すると考えられる。また、大礫集団を避けるように河床底面では、水みちが形成され、小粒径粒子は大礫集団の脇を転動することになる。このような機構により河床表層では、大礫集団を形成する箇所とその他の地点で分級が生じることとなる。

d) 大礫集団の水流に抵抗する力

石礫粒子群が水流に対し、どのように抵抗しているかを考察するため、石礫粒子群に作用する力を、x-y 平面における単位面積当たりに換算し、応力として評価し、この応力と河床の凹凸、および河床の石礫粒子の大きさの関係について調べた。図-12に t = 45 s における水路中央部の河床高および水位縦断を上段、石礫粒子群に作用する応力の縦断図を中段、表層の平均粒径の縦断図を下段に示す。石礫粒子群に作用する応力は、式 (12) により水路床から表層を移動する石礫粒子の上面までの体積積分値として求めた x 方向の石礫粒子群に作用する力を x-y 平面の面積で除して単位面積当たりの力として表した。

$$\tau_{f,zx} = \frac{\iiint \alpha \left\{ -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \{ 2(v + v_i) S_{ij} \} \right\} dx_1 dx_2 dx_3}{\iint dx_1 dx_2} \quad (12)$$

横断方向の積分範囲は大粒径程度の幅として y = -0.15 m ~ 0.15 m とし、縦断方向の積分範囲は、流体計算セルと同様に 0.01 m とした。また、下段の表層粒径は、水路中央部の 0.15 m 四方の平面より求めた表層の平均粒径を示しており、平面上に見える粒子の面積で重み付け平均をした径として求めている。図-12より、水流に抵抗する力は、ほぼ河床の凸部で担われており、その凸部は、大粒径で構成されていることから、水流に抵抗する力は凸部を形成する大礫集団で担われていることがわかった。

e) 移動開始および停止時における石礫粒子の形の影響

移動開始および停止時に石礫粒子がどのような向きを

とり、どのような力を受けるのかについて考察する。石礫粒子の向きを調べるにあたり、長軸を石礫粒子の主慣性モーメントの最も小さい値に対する固有ベクトルと同一直線上の軸と定義し、短軸を主慣性モーメントの最も大きい値に対する軸と定義した。このように定義される長軸、短軸は直交する。長軸は慣性主軸の内、最も回転し易い軸である。短軸は回転しづらい軸であり、最も平らな面の面ベクトルに近い向きを示す。石礫粒子の長軸および短軸を図-13に示す。図-14には石礫粒子の移動開始および停止時における x 方向の速度、石礫粒子間の接触力および流体力を水中重量の x 方向成分で無次元化した値、長軸と x 軸の間の角の大きさ、および短軸と z 軸の間の角の大きさの各粒子の平均値の時間変化を示した。この図における移動開始時および停止時は、それぞれ上段の図の赤線で示す速度がゼロになる時刻およびゼロから離れる時刻である。大粒径粒子の移動開始時の図より、大粒径粒子が移動する際は、長軸と x 軸の間の角を大きくする。これより、静止している状態で長軸を流下方向に向けていた粒子が、移動時にはその向きを変え流下方向に転動しやすい向きをとることがわかる。短軸と z 軸の間の角も大きくなることから、静止時には最も平らな面を鉛直上向きに向けていた粒子が、その面の向きを変えていることがわかる。その結果、水流に対し投影面積を大きくするため、上段の青で示す流体力は、石礫粒子の向きの変化と共に増加している。このような移動時の特長は小粒径粒子にも見られるが、その変化は、大粒径粒子ほど顕著ではない。その理由として図-9に示すように小粒径粒子が停止する表層の低部では、周囲の大粒径粒子の配置により流向が大きく変化することや、小粒径粒子は、大粒径粒子の隙間に位置する

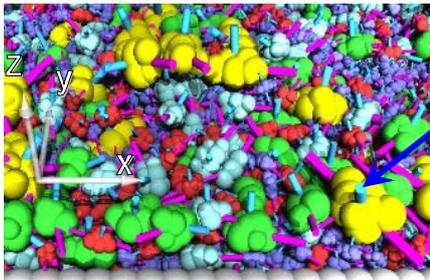


図-13 石礫粒子群の長軸および短軸の状況

ため、移動・停止時に周囲の大粒径粒子により形成される不規則な窪地の形状の影響を受けることが要因と考えられる。また、大粒径粒子の停止時に着目すると、長軸および短軸の変化は、移動時とは逆になり、長軸が x 軸方向を向き、かつ短軸を z 軸方向に向けるため、平らな面を上向きに向けながら停止する様子が見られる。特徴的な現象としては、大粒径粒子は停止時に x 方向に大きな負の接触力を受けて停止し、その後の流体力が移動時に対し増加しているのに対し、小粒径粒子は停止とともに流体力が減少している。この違いは、小粒径粒子は、大粒径粒子背後の流速が低下する地点で停止することが出来るのに対し、大粒径粒子は大きな流速を受ける表層の上部に位置するため、自らの向きを流体力が小さくなる方向に傾けるだけでは停止することが出来ず、周囲の大粒径粒子などに支えられて停止するためと考えられる。

4. 結論

本稿では、異なる形状と大きさを有する石礫粒子群からなる混合粒径移動床数値実験水路を構築し、計測が困難な水流中の石礫粒子群の三次元運動および石礫粒子群が水流に及ぼす力を明らかにした。解析結果の考察から以下の結論を得た。

- 構築した移動床数値実験水路における石礫粒子群の詳細なデータより、水流中の石礫河床における粒径別の石礫粒子の移動形態、および異なる形状と大きさを有する石礫粒子群が水流に対して抵抗する機構について明らかにした。
- 大粒径粒子が移動する際は、平らな面の方向が鉛直方向からずれることで流体力が増加するとともに、長軸を流下方向からずらし、転動しやすい向きをとり、移動し始める。小粒径粒子が移動する際も同様の傾向を示すが、小粒径粒子は、大粒径粒子により形成される不規則な窪地の形状の影響を受けたり、周囲の大粒径粒子の影響により流向が定まらないことから、移動や停止時における特徴的な向きの変化は、大粒径粒子ほど顕著には示さない。
- 転動する大粒径粒子は、高い位置を移動するため、

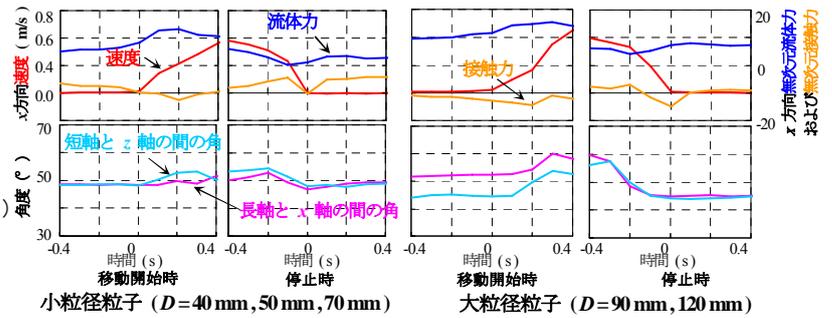


図-14 移動・停止時の石礫粒子の向き・接触力・流体力の変化

高速流を受け平坦箇所では容易には止まらず、河床に静止している大粒径粒子との衝突によって静止し、大礫集団を形成する。小粒径粒子は、大礫集団の脇の水みちを主に流下し、河床は空間的に分級が生じる。水流に抵抗する力は主に大礫集団により担われる。

参考文献

- 福岡捷二, 寺沢直樹, 山崎憲人, 塚本洋祐: 巨石を有する礫床河川の水力, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.339-344, 2007.
- 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 鈴木幸一, 栗原崇, 山本裕規: 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.627-632, 1994.
- Piedra, M. M., Haynes, H. and Hoey, T. B.: The spatial distribution of coarse surface grains and the stability of gravel river beds, *Sedimentology*, Vol.59, pp1014-1029, 2012.
- Hendrick, R. R., Ely, L. L. and Papanicolaou, A. N.: The role of hydrologic processes and geomorphology on the morphology and evolution of sediment clusters in gravel-bed rivers, *Geomorphology*, Vol.114, pp483-496, 2010.
- 後藤仁志, Abbas Yeganeh-Bakhtlary, 酒井哲郎: 混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析, 土木学会論文集 No.649/II-51, pp.17-26, 2000.
- 牛島省, 福谷彰, 藤岡奨, 禰津家久: 3次元流体中を移動する任意形状物体の数値解法, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.847-852, 2007.
- 原田英治, 鶴田修己, 後藤仁志: 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の固液混相流型 LES, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1471-1475, 2011.
- 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 水流による石礫粒子群の移動機構とそのモデル化, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.1937-1942, 2012.
- Matsushima, T., Saomoto, H.: Discrete element modeling for irregularly-shaped sand grains, *Proc. Numerical Method in Geotechnical Engineering*, Mestat (ed.), pp.239-246, 2002.
- 福岡捷二, 渡邊明英, 篠原康寛, 山下翔, 齊藤一正: 高速で多量に流下する礫群の運動機構と床面摩耗量の推算, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp.291-296, 2005.
- Cundall, P. A., Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.

(2012. 9. 30受付)