

## 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\*

## Effects of Particle Shapes and Sizes on Fundamental Movement Processes of Particles and Sediment Transport Rate in Streams

田所 弾\*\* 福田 朝生\*\*\* 福岡 捷二\*\*\*  
TADOKORO Hazumu FUKUDA Tomoo FUKUOKA Shoji

**Abstract** Gravel-bed rivers are composed of a large variety of particle sizes and shapes. Large particles on the bed resist against flows, but they are picked up and move intermittently. Particle motions are different from those in sandy rivers where most of particles move continually. To estimate sediment transport rate in gravel-bed rivers, fundamental movement processes of particles with different sizes and shapes have to be examined. In this paper, three-dimensional numerical movable-bed simulations were conducted, and sediment transport rate and fundamental movement processes of particles were measured under three conditions of spheres, gravel particles and mixed particles. We found that particle shapes affected significantly pick-up processes and this resulted in great differences of sediment transport rate among particles with different shapes.

**Keywords:** Particle shape, Particle size, Sediment transport rate, Fundamental movement process, Solid-liquid two-phase flow

## 1. 序 論

石礫河川の河床は、様々な大きさと形状の粒子から構成されている[1]。洪水時には河床の小粒径粒子は大量に移動し、河床にある大粒径粒子が露出することによって、大粒径粒子が核となって多様な粒径集団が存在出来る状況をもたらし、河床を安定させる[2]。これには粒度分布や河床粗度の影響だけでなく、洪水後の河道に見られる石礫河川特有の覆瓦構造等、石礫粒子の形状が河床安定に寄与していることが知られている。しかし石礫河川では洪水時の水流が激しいために、河床近傍の水流と石礫粒子の運動を現地で観測することは難しく、土砂の移動機構には不明確なことが多い。そのため、石礫河川での流砂量や河床変化の予測手法は十分確立されていない。そのような背景の中、石礫河川の土砂移動機構を明らかにするため、福田らは、種々の形状と大きさの粒子群運

動と流体運動を同時に解析できる数値移動床水路を構築した[3]。この数値シミュレーションにおいて粒子形状の影響を組み込んだ石礫粒子の運動が、球の運動とは異なる結果が得られている[4]。しかし、多くの移動床問題では現象の単純化のため、粒子形状を球と仮定し検討が進められてきたが、様々な形状の河床材料からなる石礫河川の土砂移動問題を理解するためには、粒子形状の影響を適切に取り込んだ解析が行われなければならない。これまで著者らは数値移動床水路 (Fig.1) を用いて粒度分布や粒子形状の効果を検討してきた[4]。この検討では、粒度分布を有する石礫の流砂量は同じ粒度分布を持つ球の流砂量の約0.57倍となり、球形から異なる度合いが大きくなるほど流砂量が減少することが明らかになった。また、球群と石礫群は同一の実験条件で行われたが、別々の実験から得られた結果である。実際の

\* 2016.11.5 受付

\*\* ㈱東京建設コンサルタント 〒530-0042 大阪市北区天満橋 1-8-63 トーケン大阪ビル  
TEL: 06-7636-1152 FAX: 06-7636-1153 E-mail: tadokoro-h@tokencon.co.jp

\*\*\* 中央大学研究開発機構

石礫河川の河床は様々な形状の粒子群で構成されており、周囲に形状の異なる粒子がある中で、粒子形状が粒子運動に及ぼす影響を考慮する必要がある。

石礫河川では、大きな粒子は容易には動かさず、間欠的な運動形態をとり、多くの粒径が移動する砂礫河川とは異なる。一般に流砂量式では、外力である掃流力に対し、抵抗する力は、移動粒子群の水中重量と動摩擦角の積で見積もられている。しかし、石礫河川では、粒子群は間欠的な運動形態をとり、大きな粒子による遮蔽など、表層の河床構造が重要である。様々な大きさと形状の粒子から構成される石礫河川において、粒子群の摩擦角が、流砂量にどの程度敏感に作用するかは不明である。石礫河川の流砂量を推定するためには、摩擦角とともに流砂運動の素過程を考察することが重要である。砂礫河川の素過程に基づく流砂量式は式(1)[5,6]で表わされる。

$$q_{Bij} = f(d_{ij}) \cdot (A_3 d_{ij}^3 / A_2 d_{ij}^2) \cdot \Lambda_{ij} \cdot p_{sij} \quad (1)$$

ここに  $q_{Bij}$ : 計測断面を通過する単位幅あたりの流砂量(m<sup>2</sup>/s)、 $i$ : 粒径、 $j$ : 粒子形状、 $p_s$ : 離脱確率(Pick-up rate)、 $A$ : 移動距離(Step length)、 $A_3 d^3$ : 粒子体積、 $A_2 d^2$ : 上からの粒子投影面積、 $f(d_{ij})$ : 面積占有率である。

本研究では、福田らの構築した移動床数値実験水路 (Fig.1) を用いて、石礫群、球群及び球と石礫の混合粒子群の斜面崩落数値実験 (Fig.2) 及び移動床数値実験 (Fig.1) を行い、斜面崩落数値実験より粒子群の摩擦角を求め、移動床数値実験より流砂量やその素過程である Pick-up rate (粒子の離脱確率) と  $A_2 d^2$  (離脱粒子の河床停止時の上から見た際の露出投影面積)、Step length (粒子が離脱してから堆積するまでの移動距離)

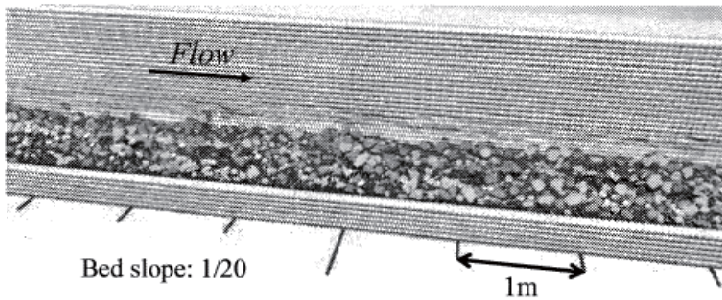


Fig.1 Numerical movable-bed experiment.

を求める。そして流砂量や素過程に対し、粒子形状や粒度分布がどのように効いているか、石礫粒子の運動を数値実験結果から把握し、評価することを目的としている。

## 2. 数値移動床水路の概要

数値移動床水路では、粒子は剛体として Lagrange 的に解析し、粒子を密度の異なる液体として扱い、流れ全体を非圧縮性流れとして Euler 的に解析する。粒子の接触は個別要素法[7]を用いて解析する。粒子に作用する流体力は粒子よりも小さな流体計算セルを用いることにより、粒子周りの流れ場を詳細に解き、直接評価する。個々の粒子の運動は剛体の並進と回転の運動方程式により解き、流れの解析の固相の位置と流速を修正する。詳細は文献[3]を参照されたい。この数値移動床水路の解析結果の妥当性は、伊藤ら[8]による土石流実験結果を用いた福田ら[9]の論文で検証されている。

### 2.1 流れ場の計算

流れの解析では以下の式(2)-(7)に示す粒子・流体混合の一流体モデルを用いる。流れ場の解析メッシュは  $\Delta x=1\text{cm}$ 、 $\Delta y=1\text{cm}$ 、 $\Delta z=1\text{cm}$  である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(\nu + \nu_i) S_{ij}\} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

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

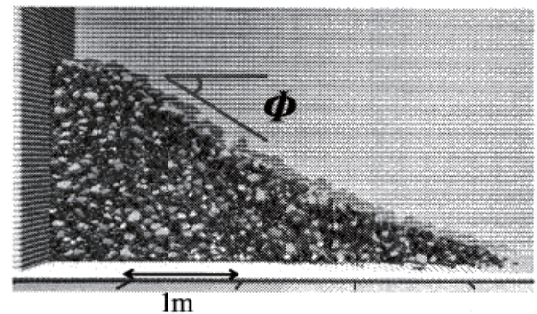


Fig.2 Numerical slope failure experiment.



ここに、 $u_i$  は流体計算セル内の  $i$  方向平均流速、 $P$  : 圧力とSGS応力の等方応力成分の和、 $\rho$  : 密度、 $\mu$  : 粘性係数、 $g_i$  : 重力加速度、 $\nu_i$  : SGS乱流粘性係数、 $\Delta$  : 計算格子幅、 $C_S$  : Smagorinsky定数(0.173)である。物性値 $\phi$  (密度 $\rho$ 、粘性係数 $\mu$ ) 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。

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

$$u_i = \{\alpha\rho_s u_{si} + (1-\alpha)\rho_f u_{fi}\} / \rho \quad (7)$$

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、 $\alpha$  : 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。

## 2.2 石礫粒子群の計算

### 2.2.1 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 (9) [10]を用いる。

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

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

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、 $\mathbf{R}$  : 剛体に固定された座標系から空間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、時間に関する微分を示す。

### 2.2.2 石礫粒子のモデル化

様々な形状を有する石礫粒子群の接触判定を容易に行うため、石礫粒子は、Fig.3 のように小球を隙間が無いように重ね合わせた球体連結モデル[11]を用いて表現した。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[7]を用いて評価した。

### 2.2.3 流体力の評価方法

石礫粒子に作用する流体力は、抗力係数を用い

ず、流れ場の解析から直接粒子に働く流体力を評価する。石礫粒子に働く流体力は、牛島ら[10]の手法を参考に圧力項、拡散項を用いて評価し、これを石礫粒子が含まれる範囲で体積積分し、式 (10)、(11) で評価する。

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

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

ここに  $\mathbf{F}_{f,i}$  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、 $\mathbf{r}_{f,j}$  : 石礫粒子重心から力の作用点に向かう位置ベクトル、 $\Omega_s$  : 石礫粒子が含まれる領域、 $\varepsilon_{ijk}$  : エディントンのイプシロンである。

## 3. 数値実験

### 3.1 実験条件

本研究ではFig.3に示す5種類の粒子形状を用い、球群のみを用いた場合、形状1-4の石礫群のみを用いた場合、および球と石礫1-4形状が同じ数からなる混合材料を用いた場合の3ケースについて、水中での斜面崩落数値実験および数値移動床実験を行い考察する。Fig.4に示す粒度分布 (40mm 青色、50mm 赤色、70mm 水色、90mm 緑色、120mm 黄色 (Fig.1、Fig.2参照) ) となるように各粒子形状を均等な数に設定し、数値実験を行った。Fig.4に示す粒度分布の粒子を1セットとしてまずランダムに投入し、投入し終わったらまた次のセットを投入するという操作を所定の量にな



Fig.3 Particle shape.

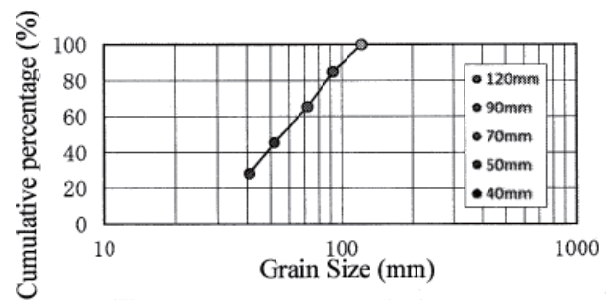


Fig.4 Particle size distribution.

るまで繰り返す。数値水路に投入する際は、空間的にもランダムな位置で粒子を自然落下させて投入する。石礫の粒子径は、同一体積の球の直径で定義した。粒子径で無次元化した短径、中径、長径をTable 1に示す。長径は粒子の主慣性モーメントの最小値に対する固有ベクトルと同一直線上の長さ、短径は主慣性モーメントの最大値に対する固有ベクトル方向での長さ、中径は長径と短径の2軸両方に直交する向きでの長さとして定義する。粒子形状を評価する方法は幾つかあるが、本文では式(12)で示される粒子の三軸（短径・中径・長径）によるShape Factor[12]を用いる。

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (12)$$

ここに、 $a$ :長径、 $b$ :中径、 $c$ :短径であり、S.F.が1に近いほど球形に近いことを示す。5形状のS.F.を評価するとTable 1のようになり、石礫の中では形状1が球形に一番近く、その他は似かよったS.F.の値である。Fig.5に数値実験に用いる粒子形状と多摩川35.4k、浅川2.4kで採取された粒子形状の比較を示す。現地には様々な形状の粒子が存在しており、河床粒子の平均的なS.F.は0.7程度との調査結果が示されており[13]、今回使用する粒子形状は、代表的な粒子形状と考えてよい。しかし現在未考慮の扁平な粒子や棒状の粒子等が粒子群運動に及ぼす影響については、今後更なる検討が必要である。また、現在用いているS.F.は粒子の三軸で粒子形状を評価しているが、他の粒子形状評価法を用いた際に、三軸でのS.F.と、どの程度の差異が表れるのか検討することも必要である。

Table 1 Length of a, b and c axes of gravel particles.

Shape No.	Sphere	Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4
a: Longest	1	1.26	1.29	1.36	1.49
b: Intermediate	1	0.98	1.06	0.99	0.89
c: Shortest	1	0.88	0.81	0.78	0.76
Shape Factor	1	0.79	0.69	0.67	0.66

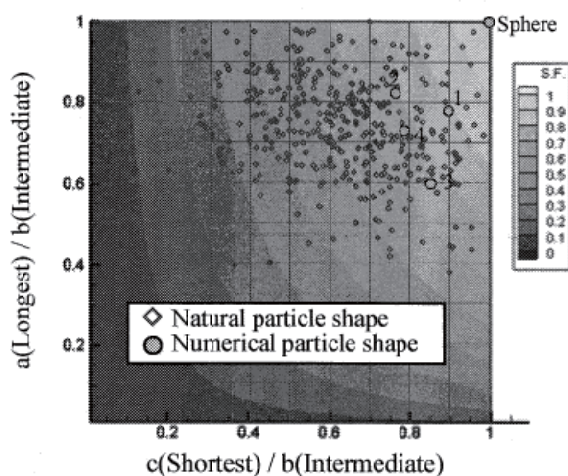


Fig. 5 Relationship between numerical particle shape and natural particle shape.

Table 2 Slope failure experiment cases and results.

Slope failure exp.	Condition	$\tan\phi$
Case 1-1	Spheres	0.40
Case 1-2	Gravel particles	0.63
Case 1-3	Mixed particles	0.60

Table 3 Movable-bed experiment cases and results.

Movable-bed exp.	Condition	Sediment transport rate (five particle sizes)[m <sup>3</sup> /s]
Case 2-1	Spheres	$2.7 \times 10^{-3}$
Case 2-2	Gravel particles	$1.5 \times 10^{-3}$
Case 2-3	Mixed particles	$2.0 \times 10^{-3}$

斜面崩落数値実験は粒子群間の摩擦角 $\phi$ を求めるもので、水路の端から2mの範囲に壁を立て、その間に高さ2mとなるように粒子群を敷き詰め、水深3mの条件の下、瞬時に壁を取り除き粒子群

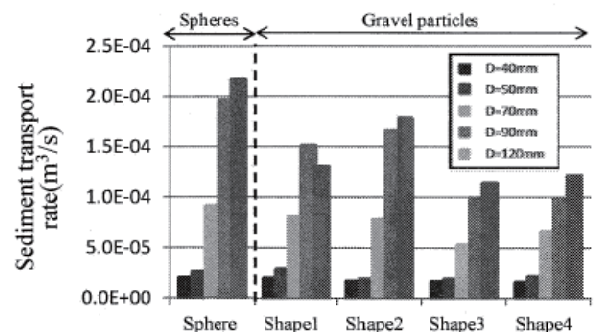


Fig.6-1 Sediment transport rate in spheres and gravel particles.

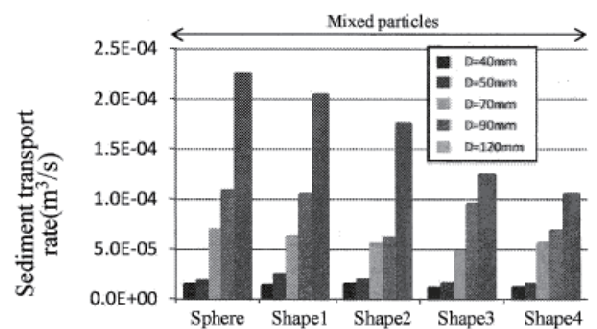


Fig.6-2 Sediment transport rate in mixed particles conditions.



を崩落させ、安定な斜面を形成させる。

移動床数値実験では、長さ15m、幅1mの水路に粒子群を敷き詰め、水路上流端で0.5m<sup>3</sup>/sの一定流量を与える。水路全体の平均水深は約0.27mであり、Frは1.2程度である。給砂は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 x=1-2mの範囲にランダムに投下させる。通水から河床変動解析を実施し、20 s後の各断面での流量が安定した時を実験開始時刻とした。

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 斜面崩落数値実験

斜面崩落数値実験では、崩落後の最急勾配を計測し、摩擦角 $\phi$ ( $\tan\phi$ )を求めた。同一粒子群の実験では、水路底面を移動床、固定床、さらに崩落粒子群の敷き詰め高さを変えても $\tan\phi$ の値がほとんど変化しない。実験結果をTable 2に示す。 $\tan\phi$ の値は、球形では0.40、石礫では0.63、球形と石礫の混合では0.60であり、球粒子が多く含まれているほど、 $\tan\phi$ の値が小さくなることが分かる。

#### 3.2.2 移動床数値実験

球、石礫及び混合粒子実験において計測した流砂量を Fig.6-1、6-2 に示す。流砂量は  $x = 2-12$  m 区間で 2m 毎に 60 秒間計測し、これを平均し、時空間平均値として求めている。Table 3 には全流砂量の時空間平均の値を示す。Fig.6-1 で示した球と石礫の数値実験での結果を混合粒子実験の結果と比較するため、それぞれの総流砂量を球は 1/5 倍し、石礫はそれぞれ 4/5 倍した値で示している。どの実験においても大きい粒子ほど流砂量が多いことが確認できる。球と石礫を別々に行った数値実験では、球の総流砂量は石礫の約 2 倍の値を示す(球の総流砂量は Fig.6-1 の球の 5 倍、石礫はそれぞれ 5/4 倍で示される)。しかし混合粒子実験では相対的に球の流砂量の割合が減少し、石礫の流砂量の割合が増加している。これは河床にある石礫粒子のかみ合わせ効果[4]により、球粒子は動きにくくなり、反対に石礫粒子は球粒子が加わったことによりかみ合わせ効果が弱まり、動きやすくなったためと考えられる。このように粒子の運動は自身の形状だけでなく、周りにある粒子群の影響も大きく受けている。

#### 3.2.3 摩擦角と流砂量の比較

Fig.7 は球粒子、石礫、混合粒子を用いた斜面崩落数値実験での摩擦角  $\tan\phi$  と移動床数値実験

での各粒径毎の無次元流砂量の関係を示す。粒度分布が同じであっても、球形粒子群が多いほど、粒子群間での接触点数が減少することで、粒子間のかみ合わせ効果が減少し、斜面崩落数値実験では  $\tan\phi$  が小さくなり、移動床数値実験では無次元流砂量が大きくなる。Fig.7 を粒径ごとに見てみると、球と異なる形状の粒子が多く含まれる実験ほど、各粒径流砂量が小さくなるが、その変化の仕方は粒径ごとに異なる。流砂量を詳細に推定するため、以下に流砂運動の素過程を検討する。

#### 3.2.4 流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状・粒度分布の影響

本節では各粒径毎の粒子形状が Pick-up rate、Step length、 $A_2d^2$  に対し、どのように影響を与えるかを検討する。検討の流れは、まず球と石礫の混合実験を行い、流砂量や Pick-up rate、 $A_2d^2$ 、Step length を計測する。 $A_2d^2$  は離脱粒子が河床表層から抜け出す際の水路上から見た粒子投影面積と定義する。そして計測した流砂量の素過程の観測値を用いて式(1)から算定する流砂量と数値移動床水路で計測した区間平均流砂量を比較する。本研究では石礫の粒子径は、同一体積の球の直径として定義しているため、異なる 5 形状粒子の  $A_3d^3$  の値は各粒径で同一である。

$$q_B = \frac{A_3d^3}{A_2d^2} \cdot \Lambda \cdot p_s \quad (13)$$

ここに  $p_s$  : Pick-up rate、 $\Lambda$  : 平均 Step length、 $A_3d^3$  : 粒子体積、 $A_2d^2$  : 離脱粒子の露出投影面積である。この式では、ある流砂量計測断面を通過する石礫はその上流側で pick up された石礫粒子

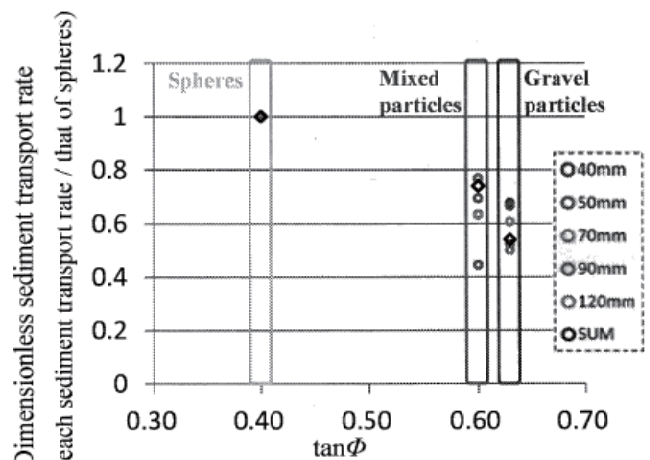


Fig.7 Relationship between sediment transport rate and  $\tan\phi$ .

であり、単位幅流砂量を考えた時に、pick up の対象領域を面積  $A$  (平均 Step length  $\times$  単位幅) とし、その対象領域内には  $(A/A_2d^2)$  個の粒子が河床に存在する。 $A_2d^2$  とは河床粒子が停止している際に河床表面に露出している投影面積である。その粒子 1 つの単位時間当たりの離脱確率が Pick-up rate であり、対象領域から単位時間に Pick up される粒子数は  $p_s (A/A_2d^2)$  個となる。これに粒子の 1 個当たりの体積  $A_3d^3$  を乗じることで計測断面での流砂量を表現したものが、流砂量式 (13) である。

### (1) 離脱粒子の停止姿勢に及ぼす粒子形状の影響

Fig.8 は離脱粒子が河床表面から抜け出す際の水路から見た粒子投影面積 ( $A_2d^2$ ) の同粒径の球に対する投影面積 ( $\pi d^2/4$ ) の割合 ( $A_2d^2/(\pi d^2/4)$ ) を示す。粒子の始動判定に関しては、河床に停止していた粒子が水流の流体力や粒子衝突力により動きだし、流下方向速度が 0.05m/s を一定時間超えた場合を移動開始時として定義する。Fig.8 より粒径が大きい粒子ほど河床表面に大きく露出していないと動き出せないことがわかる。これは小さい粒子は周りの粒子の始動に伴って動き出すことができるためと考えられる[4]。また石礫河川では砂礫河川に比べ粒度分布の幅が広く、小さい粒子ほど相対的に大きな粒子と衝突することにより始動しやすく[14]、これも原因の一つと考えられる。粒子形状に関しては、Fig.9 に示すように、球から異なる形状の粒子ほど平らな面(短径)を上に向けて流体力を受けにくい形で、流れに対して安定した向きをとって停止するため、同粒径の球に対する投影面積の割合が大きくなり、動きだしにくい状態にあることが考えられる。さらに大きい粒子ほど粒子形状による  $A_2d^2$

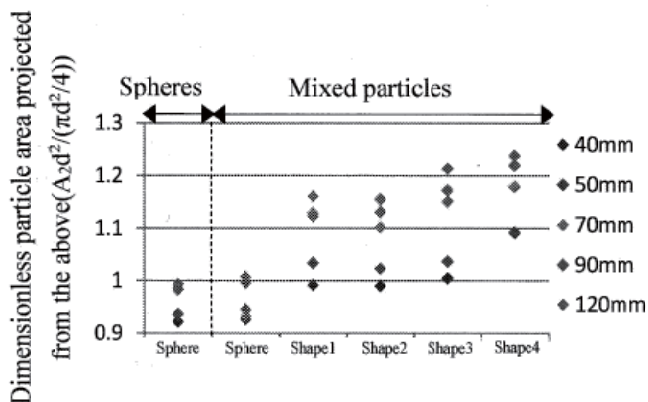


Fig.8 Comparison between  $A_2d^2$  (projected area from the above at the time of before pick up) and particle shape.

の差が顕著に出ている。これは小さい粒子は大きい粒子に比べて相対的に周りの粒子配置の影響を大きく受け、安定な向きをとりにくいためと考えられる。

### (2) Pick-up rate の評価

離脱確率 (Pick-up rate) の見積り方法を説明する。水路(2-12)m 区間において、河床表面に停止して存在する各粒径・形状毎の粒子について、上から見た際に占有する面積の中で、単位時間当りに始動した各粒径・形状粒子の上から見た面積の比で、Pick-up rate を評価した。Fig.10 に Pick-up rate の計測結果を示す。これより粒径が小さいほど、Pick-up rate が大きくなる。河床表面の粒子や移動する粒子は小さい粒子の方が多いため、これは自明と考えられる。小さい粒子は球からの形状が異なる粒子ほど Pick-up rate が小さくなる傾向を示すが、大きい粒子はほとんど一般的な Pick-up rate の値をとる。形状によっては球よりも Pick-up rate が大きい値を示している。これは河床粒子停止の向きは、周りの粒子配置によりほとんど決ま

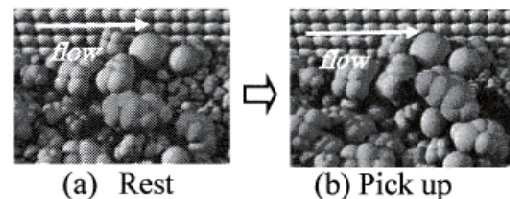


Fig.9 An example of picked up particle.

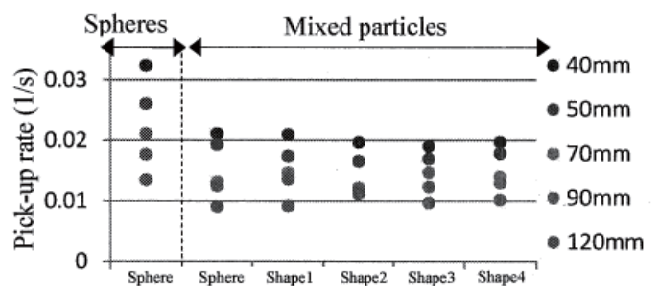


Fig.10 Pick-up rate with respect to particle shape.

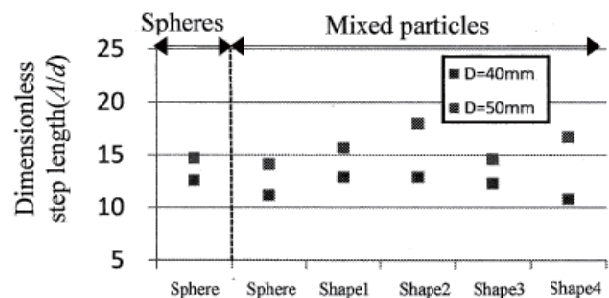


Fig.11 Step length with respect to particle shape.



ってしまうため、粒子自身の形状が始動に及ぼす効果が顕著には出にくいと考えられる。

### (3) Step length の評価

Step length は粒子が動き出してから停止するまでの  $x$  方向移動距離と定義され、大きい粒子の Step length は長いため、数値移動床水路が十分長くないと計測出来ない。したがって、ここでは数値移動床水路で十分な標本数を計測することができる相対的に小さい粒子 ( $d=40,50\text{mm}$ ) の Step length を Fig.11 に示す。Step length は粒径で無次元化されている。小さい粒子の Step length には粒子形状による違いは顕著にはあらわれていず、ほぼ Step length =  $15d$  で表現できる。

### (4) 流砂量と流砂運動の素過程の比較

これまで計測した流砂運動の素過程を用い、式 (1) から算定した流砂量と、数値移動床水路で直接計測した粒径・形状別流砂量の比較を Fig.12 に示す。十分な数の粒子が計測できた 40、50mm 粒子に関しては、両者は概ね近い値を示すことから、流砂運動の素過程を適切に計測できれば、流砂量の算定が可能であることを示す。最後に、流砂量とその素過程を構成する Pick-up rate ( $p_s$ ) と  $A_2d^2$ 、Step length の関係について考察する。大きい粒子も小さい粒子も、球とは異なる形状ほど  $A_2d^2$  は大きくなり、Pick-up rate はそれに比べると大きくは変化しない。よって単位面積単位時間当たりの離脱粒子数  $p_s / A_2d^2$  は、球とは異なる形状ほど少なくなる。一方、Step length は粒子形状毎にそれほど異なる値をとらない。離脱粒子数  $p_s / A_2d^2$  と Step length の積では、離脱粒子数に粒子形状の効果が大きく表れるため、流砂量は球とは異なる形状ほど小さくなる傾向を示した。

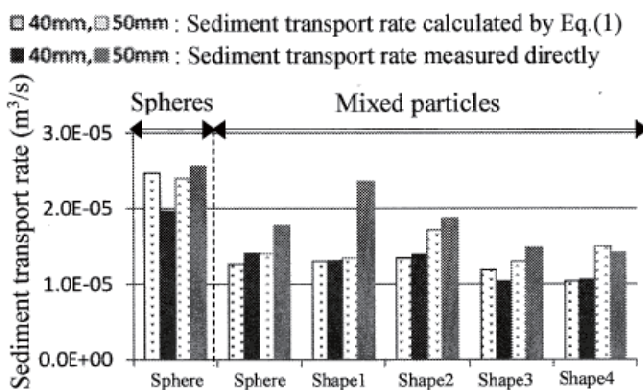


Fig.12 Comparison between Eq. (1) and sediment transport rate.

## 4. 結論

本文では、数値移動床水路を用いて数値実験を実施し、様々な形状、広い粒度分布を有する石礫河川での摩擦角や流砂量、流砂量の素過程である  $A_2d^2$ 、Pick-up rate、Step length に対し、粒子形状、粒度分布がどのように影響するかについて議論した。

- 1) 球と石礫別々に行った数値実験の流砂量に比べて、両者の混合した粒度での数値実験では球の流砂量の割合は減少し、石礫の流砂量の割合は増大する。各数値実験において粒子形状が球形に近い粒子ほど流れやすい傾向があるが、粒子運動は粒子自身の形状だけでなく、周りにある粒子群にも影響されるため、粒子群として粒子運動を評価することが必要であることを示した。
- 2) 崩落実験での  $\tan\phi$  の値は、球形では 0.40、石礫では 0.63、球形と石礫の混合粒子実験では 0.60 であり、球形粒子が多く含まれているほど、 $\tan\phi$  の値が小さくなる。
- 3) 流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状の影響は、球とは異なる形状ほど、河床からの離脱粒子数 ((Pick-up rate) / ( $A_2d^2$ )) が減少することにより、流砂量が小さくなることを示した。
- 4) これらの検討結果より、崩落実験での  $\tan\phi$  と移動床実験での流砂量の関係から、粒子形状が流砂量に及ぼす影響をおおよそ推定できるが、より適切な推定のためには、素過程ごとに粒子形状の効果が顕著に異なるため、これらを正しく考慮することが重要であることを示した。

## 参考文献

- [1] Milan, D. J., Heritage, G. L., Large, A. R. G. and Brunson, C. F., Influence of Particle Shape and Sorting upon Sample Size Estimates for a Coarse-Grained Upland Stream, Sedimentary Geology, Vol. 129, 85-100 (1999).
- [2] Fukuoka, S., Issues on Fluvial Hydraulics of Stony Rivers and Key towards a Solution to a Problem, Vol.44, A-1-A25 (2008).
- [3] Fukuda, T., Fukuoka, S. and Uchida, T., Three-Dimensional Movement of Gravels and Stones in Numerical Channels with Movable Bed, Journal of JSCE B1, Vol.69, I\_1051-I\_1056 (2013).
- [4] Tadokoro, H., Fukuda, T. and Fukuoka, S., Comparison of the Particle Motions in Two Numerical Movable-Bed Channels Composed of Spheres and Gravels, Journal of JSCE B1,

- Vol.70, I\_961-I\_966 (2014).
- [5] Tsujimoto, T. and Gotoh, H. and Nakagawa, H., Non-Equilibrium Sediment Transport along a Temporal Axis, *Journal of JSCE*, Vol.443, 37-46 (1992).
- [6] Gotoh, H., *Computational Mechanics of Sediment Transport* (in Japanese), 24-26, Morikita Publishing (2004).
- [7] Cundall, P. A., Strack, O. D. L., A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, 47-65(1979).
- [8] Itoh, T., Egashira, S., Miyamoto, K. and Takeuchi, H., Transition of Debris Flows over Rigid Beds to over Erodible Beds, *Journal of JSCE*, Vol.43, 635- 640 (1999).
- [9] Fukuda, T. and Fukuoka, S., Investigation of Dynamic Interaction of Highly Concentrated Particles and Flow with a Numerical Movable-Bed Channel Using Results of a Flume Experiment on Debris Flow, *Journal of JSCE B1*, Vol.72, I\_859- I\_864 (2016).
- [10] Ushijima, S., Fukutani, S., Fujioka, S. and Nezu, I., Numerical Prediction Method for Arbitrarily-Shaped Bodies Moving in Three-Dimensional Fluids, *Journal of JSCE B*, Vol.64, 128-138 (2008).
- [11] Matsushima, T. and Saomoto, H., Discrete Element Modeling for Irregularly-Shaped Sand Grains Proc. Numerical Method in Geotechnical Engineering, 239-246 (2002).
- [12] McNown, J.S. and Malaika, J., Effect of Particle Shape of Settling Velocity at Low Reynolds Number, *Trans. AGU*, Vol.31, 74-82 (1950).
- [13] Some Fundamentals of Particle-Size Analysis, U.S. Inter-Agency Committee on Water Resources, Vol.12, 55 (1957).
- [14] Fukuda, T. and Fukuoka, S., Effect of Colisions on Gravel Movement and Bed Structure, *Journal of JSCE B1*, Vol.70, 967- 972 (2014).
-