

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889050

研究課題名(和文)石礫河川における水と河床粒子の運動および河床構造に及ぼす粒度分布と粒子形状の効果

研究課題名(英文)Effects of sizes and shapes of particles on water and particle motions and bed structures in gravel-bed rivers

研究代表者

福田 朝生 (FUKUDA, TOMOO)

中央大学・公私立大学の部局等・機構助教

研究者番号：00709694

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：石礫群と水の三次元運動を詳細に解析することが出来る数値移動床水路を用い、混合粒径の石礫による数値移動床実験を実施した。混合粒径中の粒径毎の相互干渉機構を考察するため、移動中の粒子が河床と衝突する際に受ける力を粒径毎に計測した。その結果、大きな粒子ほど鉛直上向きの力を受けて移動していることが明らかとなった。球群を用いた数値移動床実験を実施し、球と石礫の両数値移動床実験結果の比較から、粒子運動に及ぼす粒子形状の効果を検討した。球と石礫の粒径別流砂量の比較より、石礫形状の粒子の方が、球と比較し、粒径別流砂量の差が小さくなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We conducted numerical mixed-size gravel movable-bed experiments using a numerical movable-bed channel capable of simulating motions of flow and gravel. To investigate effects of particle sizes on their motions, contact forces of moving particles exerted in collision with movable bed were measured for each particle size in the experiment. The result showed that relatively large particles received more upward contact forces than those of small particles. We also conducted numerical movable-bed experiments with spheres. Effects of particle shapes on gravel motions were investigated by the comparison between gravel and sphere motions. The result showed that a difference of fractional sediment transport rates of gravel was smaller than that of spheres.

研究分野：工学

キーワード：石礫河川 数値移動床水路 河床波 分級 粒度分布 粒子形状 流体力 粒子衝突

1. 研究開始当初の背景

河川における土砂移動機構に関する研究では、砂や小礫を河床材料とする砂礫河川を対象とした研究が先行して進められてきた。砂礫河川では、洪水時にある厚さの層内の全ての粒径の土砂が連続的に移動する傾向が強いため、粒度分布が土砂移動に与える影響は小さい。一方、石礫河川では大きな石から砂まで存在し、粒度分布は広く、また、粒子は様々な形状をしている。石礫河川で実施された現地の移動床実験から、石礫河川では、河床に露出した大きな石が流れに抵抗し、小さな石の離脱を抑制することが報告されている。また、石礫河床では、大きな粒子が集団化し、河床表層では分級が見られ、さらに、粒子は平らな面を上に向け、瓦で覆った様な覆瓦構造を呈している。このような特徴的な河床構造から、石礫粒子の移動に粒子の大きさや形が強く影響していると考えられる。砂礫河川を対象に導かれた流砂量式を用いた従来の河床変動解析法では、粒度分布や、粒子形状の効果が十分説明できず、この解析法を石礫河川に適用した場合、河床変化を適切に説明出来ないことが指摘されている。しかし、現地観測や実験では、大きな石が移動し、激しい水流の中で、河床近傍に計測機器を設置することは困難であるため、水と石礫の運動を計測することが出来ず、河床材料の粒度分布や粒子形状が土砂移動に及ぼす力学現象は十分明らかにされていないのが現状である。

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、数値解析により土砂移動機構を解明する取り組みが行われている(以降では、Lagrange 的に個々の粒子の運動を解析し、水と土砂の相互干渉機構を考察する為の解析法を数値移動床水路と呼ぶ)。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が課題となっていた。一方、物体より小さなスケールで物体の周りの三次元的な流れ場を解析し、粒子に作用する流体力を直接算出する固液混相流場の直接計算法が開発されてきている。この手法を用いた数値移動床水路も開発されているものの、用いている粒子は依然として球形状であり、粒子運動に及ぼす粒子形状の効果が考察できない課題が残っていた。このような背景から、研究代表者らは、固液混相流場の直接計算法により水と石礫の相互干渉を評価し、小球を適切に連結させて種々の大きさと形の石礫をつくり(図-1 参照)、剛体の運動方程式を用いて石礫の運動を解析することで、水と種々の形状の石礫の三次元運動を解析可能な数値移動床水路を構築した(図-2 参照)。石礫河川の土砂移動機構を明らかにするためには、実験や現地観測では計測することが難しい、激しい水流中の水と粒子の運動およびこれらに作用する力を、構築した数値移動床水路を用いて推定し、土砂移動機構を考察することが必要である。

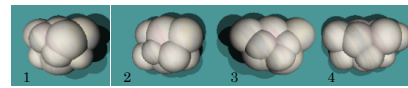


図-1 石礫に近似させた粒子モデル

2. 研究の目的

研究代表者らが構築した水と種々の形状の石礫の運動を解析できる数値移動床水路を用い、混合粒径の数値移動床実験を実施し、これまで計測が困難であった河床近傍の水と石礫の運動のデータを数値解析により推定する。解析結果を三次元的に描画し動画を作成することで、運動を視覚的に理解できるようにする。これらのデータを用い、分級により微地形が形成される機構、微地形が生じる前後の粒径別流砂量や粒子の移動形態の変化、水流の構造について明らかにし、水と土砂の運動と河床構造に及ぼす粒度分布と粒子形状の効果を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 数値解析法

数値移動床水路の数値解法では、移動する石礫群を Lagrange 的に、石礫に対し十分小さい流体計算セルを用い周囲の流れを Euler 的に直接解析する。Lagrange 的に解かれた石礫粒子群の運動を流れの解析において考慮するため、石礫粒子が存在す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。この手順を繰り返し、水と粒子の運動を解析した。

(2) 数値移動床実験

①数値移動床水路を用い、まず、石礫形状を模した粒子モデルを用いて石礫群の混合粒径の数値移動床実験(実験1)を実施した。この数値移動床実験では、河床表層では分級が見られ河床波が生じた。数値実験結果の粒子運動や粒子に作用する力を分析し、粒子運動と河床構造に及ぼす粒度分布の効果を考察した。

数値移動床水路の諸元および実験結果の説明に用いる座標の定義を図-2に示す。河床には5粒径(40 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm, 120 mm)について、それぞれ4種類の形状の異なる粒子(図-1参照)を用い、計20種類の粒子を図-3(初期)に示す粒度分布に一致するように水路にランダムに敷き詰めた。ここで粒径は同一体積の球の直径で換算した値である。本稿では、D80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。水路には、0.5 m³/sの一定流量を400 s間通水した。給砂は、下流端を通過した粒子を同時刻に上流のx = 1-2 mの範囲のランダムな位置に落下させて行った。

②球のみを用いた混合粒径の数値移動床実験(実験2)を実施し、石礫のみを用いた数値移動床実験の結果との比較から、粒子運動及

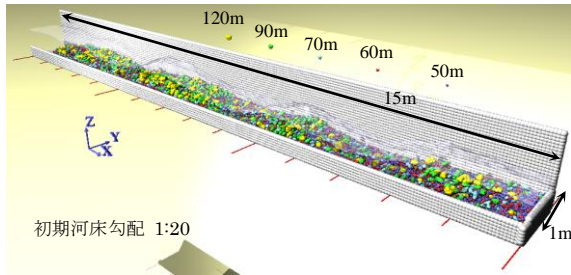


図-2 河床の状況 (t=400s)

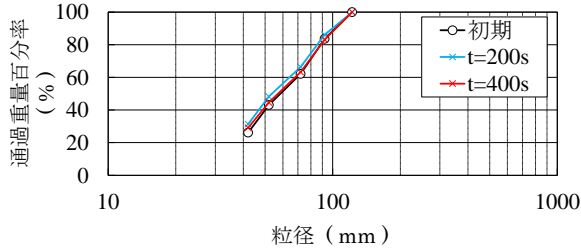


図-3 河床表層の粒度分布の時間変化

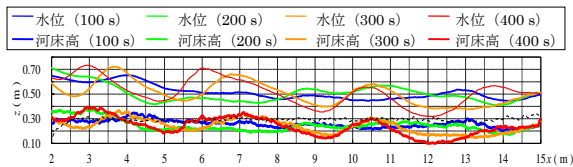


図-4 河床高・水位縦断の時間変化

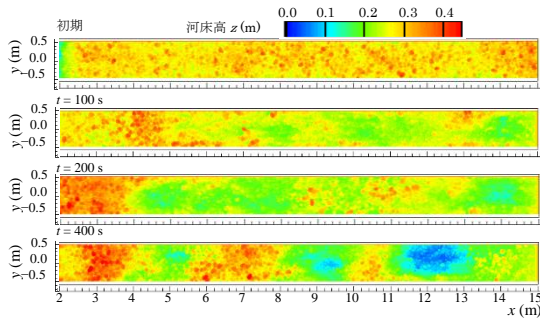


図-5 河床高の時間変化

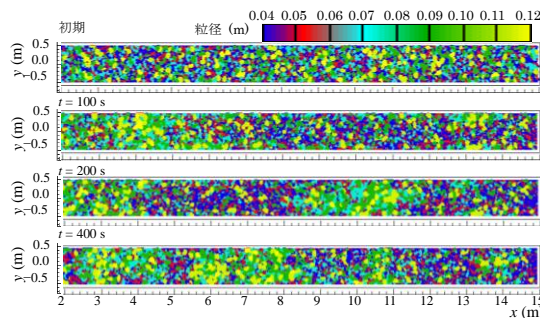


図-6 河床表層粒子の粒径分布の時間変化

び河床構造に及ぼす粒子形状の効果を考察した。

4. 研究成果

(1) 石礫のみを用いた数値移動床実験 1

①流れ, 河床高, 流砂量の時間変化

数値移動床水路における流れ, 河床の変化として図-4に横断平均の水位および河床高の

表-1 水理量の時間変化

時間	平均水深 (m)			平均流速 (m/s)			Fr		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
100 s	0.208	0.236	0.259	1.93	2.12	2.41	1.22	1.40	1.69
200 s	0.219	0.258	0.307	1.63	1.95	2.29	0.94	1.24	1.56
300 s	0.212	0.258	0.370	1.35	1.97	2.36	0.71	1.26	1.64
400 s	0.200	0.268	0.414	1.21	1.93	2.50	0.60	1.22	1.78

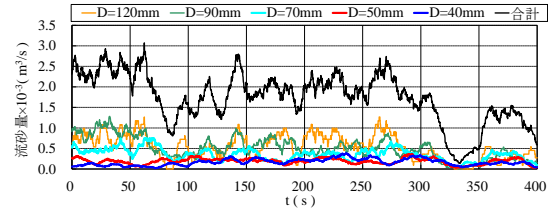


図-7 流砂量の時間変化

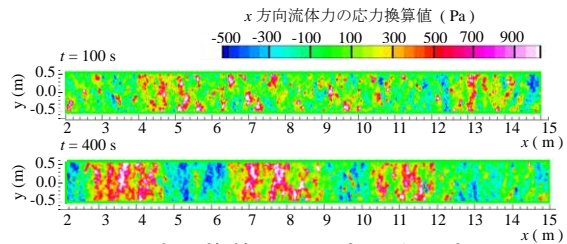


図-8 応力換算した河床に作用する x 方向流体力の平面分布

縦断形状の時間変化を示す。データは、2秒間の平均値を示している。流れは射流であり、水面は河床面と同位相となっている。また、図-5には各時刻の河床高コンター図を、図-6には表層粒子の粒径の分布の時間変化を示す。水の流し始めは平坦であった河床が t = 300 s 以降から周期的な反砂堆が見られる。また図-4より t = 300 s と t = 400 s の河床高を比較すると反砂堆は上流側に移動していることが確認できる。表-1には水理量の時間変化を示す。x = 6 m から x = 15 m の断面平均水深, 断面平均流速, および Fr を縦断的に求め, 最小値, 平均値, 最大値を示した。時間が経過し, 反砂堆が発達するにつれ, 平均流速は減じ, 平均水深は大きくなっている。また, 水深, 流速および Fr の各水理量で最大値と最小値の幅は時間の経過とともに大きくなっている。図-7には, 水路下流端で計測した各粒径の流砂量とその合計を示す。この図より, 全流砂量は, 時間の経過とともに減少している様子がわかる。また, 周期的な反砂堆が発達する t = 300 s 以前の時刻では, 大粒径粒子の流砂量が流砂量の半分程度を占めていたが, 周期的な反砂堆が形成された後は, 大粒径粒子の流砂量が減少し, 小粒径粒子と同程度の流砂量となっている。

②河床の表面構造が流れと粒子運動に及ぼす効果

周期的な反砂堆の形成に伴う流れ, 河床構造および粒子運動の変化について, 空間的な視点から詳細に調べた。図-8は水路底面の 0.01 m 四方の上部に位置する粒子に作用する流下方向の流体力を鉛直 z 方向に積分し

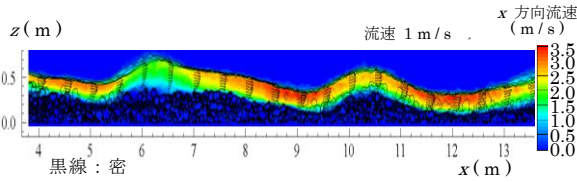


図-9 水路中央部の流れの状況
($t = 390\text{s} - 400\text{s}$ の平均値)

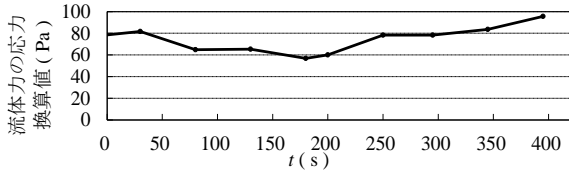


図-10 河床に作用する流体力の
応力換算値の時間変化

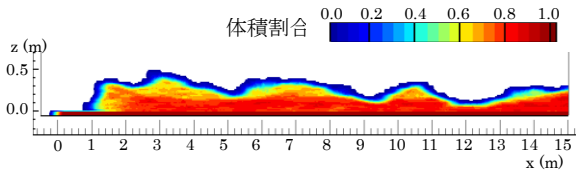


図-11 水路中央部の体積割合

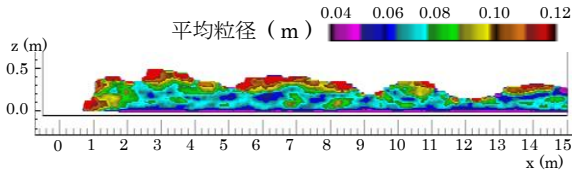


図-12 水路中央部の平均粒径

0.01 m × 0.01 m で除し、流体力を応力換算した値の平面分布を $t = 100\text{s}$ および $t = 400\text{s}$ について示している。この図より、砂堆が発達する以前の $t = 100\text{s}$ の河床では、大きな流体力が作用する地点はまばらに分布している。図-6 に示す河床表層の構造と合わせて図-8 を見ると大きな流体力が作用している地点には大きな粒子があることがわかる。一方、 $t = 400\text{s}$ の大きな流体力の分布は、 $x = 3 - 4\text{m}$ 付近、 $x = 7 - 8\text{m}$ 付近および $x = 11 - 12\text{m}$ 付近に集中している。これらの地点には、反砂堆が形成されており、流体力が反砂堆に集中して作用するようになったことがわかる。図-9 には $t = 390\text{s}$ から $t = 400\text{s}$ の水路中央部の時間平均の流れを示す。河床近傍で高速流が発生しているのは、反砂堆下流の谷部に近い個所である。一方、反砂堆の谷部から下流方向に砂堆の頂部に向かって流速は減じていることがわかる。図-8 に示す河床で流体力が集中する地点は、反砂堆の下流部で河床近傍の流れが加速する地点である。図-10 には、図-8 に示す流体力の応力換算値を $x = 6 - 15\text{m}$ の範囲で平均化した値の時間変化を示している。この図より、反砂堆が形成され、周期的に発達するにつれ河床に作用する流体力は増加していることがわかる。図-7 に示す流砂量と図-10 の河床に作用する流体力の関係を見ると、実験最終段階では、河床に作用する流体力は初期と比較し増加しているが、最終段階の流砂量は、初期と比較し減少している。このことは、流砂量の評価

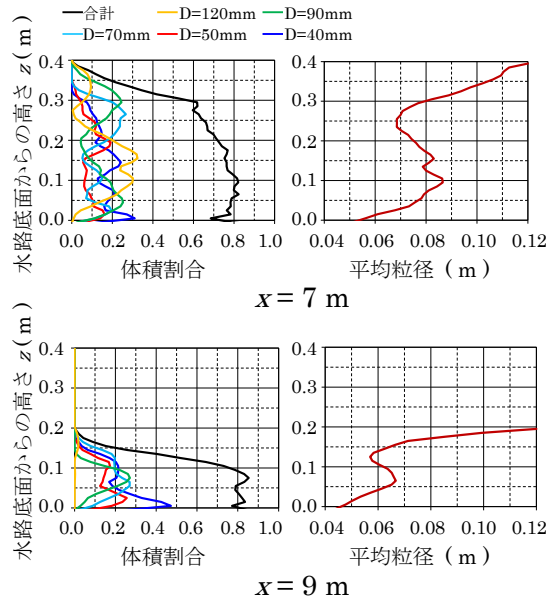


図-13 体積割合の鉛直分布と
表層の粒度分布と平均粒径

において河床に作用する流体力だけでなく、河床構造を適切に評価することが重要であることを示している。図-3 には河床表層の粒度分布の時間変化を示す。図-10 に示す流体力が最も小さくなる時刻の $t = 200\text{s}$ では初期と比較し、表層の粒径は若干小さくなっているもののほぼ同程度の大きさである。また、反砂堆が発達した後の $t = 400\text{s}$ では、初期と比較し、必ずしも表層で大きな粒子の占める割合が増加しているわけではないことが確認できる。このことから、鉛直方向の分級により、大きな粒子の割合が河床表面で顕著に増加したため、流体力が増加したのではなく、同じ粒径の粒子が河床表層で平面的に集団化していることが流れに対する抵抗力を高め、流砂量を減じている要因であると推定される。

③河床の鉛直構造

河床の鉛直構造の詳細について考察する。図-11 は $t = 400\text{s}$ について $x - y$ 方向に 0.4 m 四方、鉛直方向に 0.01 m の範囲の中の粒子の体積割合を求め、水路中央部の $x - z$ 平面について体積割合の分布を示したものである。また、図-12 には図-11 と同様の調査範囲に入る粒子の平均粒径を示したものである。図-13 には河床内部の構造をより詳細に示すため、表層に大粒径粒子が集団化している $x = 7\text{m}$ 地点および大粒径粒子が集団化していない反砂堆の谷部の $x = 9\text{m}$ 地点の体積割合、平均粒径の鉛直分布を示す。図-11、図-12 および図-13 より河床の底部では、粒子の体積割合はいずれの地点も概ね 0.8 程度となっていることがわかる。また、図-13 を見ると反砂堆上部の大粒径粒子が集団化している $x = 7\text{m}$ では、河床底面から上方に向かい 0.15 m 程度の範囲で緩やかに体積割合が減少している。これらの地点の河床表層では、空隙が非常に大きいことがわかる。一方、反砂堆

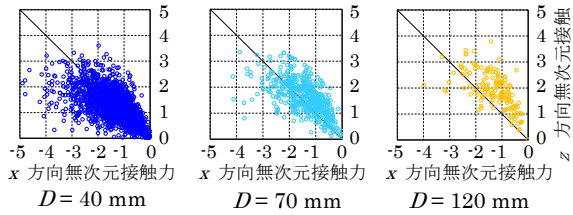


図-14 衝突により作用する接触力の値と向き

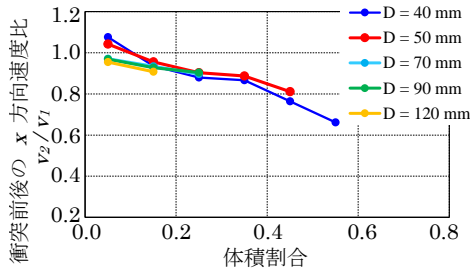


図-15 体積割合と衝突前後の速度比

の谷部となっている $x = 9 \text{ m}$ などでは河床底部から上方に向かい 0.1 m 弱の範囲で体積割合が急激に減少しており、空隙の少ない河床表層となっていることがわかる。すなわち大粒径粒子が集団化していない反砂堆の谷部では、河床の体積割合が高くなっており、この谷部の表層の粒子が移動する際は、体積割合が高い空間を移動することとなる。粒子運動における体積割合の効果について次節で考察する。

④粒径毎の粒子衝突の特性が河床構造に及ぼす効果

広い粒径集団からなる石礫河床が、表層で分級が生じることで河床が安定し易くなる。この要因について、粒径毎の粒子の衝突の特性から検討する。各粒径の衝突時に作用する粒子間の接触力の向きを確認するため、図-14に衝突時の x 方向および z 方向の接触力の関係を示す。標本は衝突前の速度が 0.1 m/s 以上の粒子としており、接触力は粒子の水中重量で無次元化して示している。これより、大きな粒子と小さな粒子の接触力の向きを比較すると、大きな粒子ほど鉛直上向きの力の割合が高くなっている。これは、次の様に説明される。移動する粒子群の中の大きい粒子と小さい粒子の間に隙間が生じた場合、大きい粒子は多くの地点で他の粒子に支持される傾向が強いため、小さい粒子の方が重力の影響で隙間に落ちやすくなる。結果として大きい粒子の下には小さい粒子が溜まりやすく、大きい粒子は小さい粒子を乗り越えざるを得なくなる。このため、大きい粒子ほど接触力において上向き成分の割合が大きくなると考えられる。この力の向きの差により移動する粒子は、大きな粒子ほど河床表層の高い位置に移動しやすくなる。これが河床表層の鉛直方向の分級の主要因であると考えられる。

運動する粒子の周囲の体積割合が粒子の衝突および粒子の運動に及ぼす効果を確認するため、衝突前後の粒子速度の比 v_2/v_1 (v_1 :

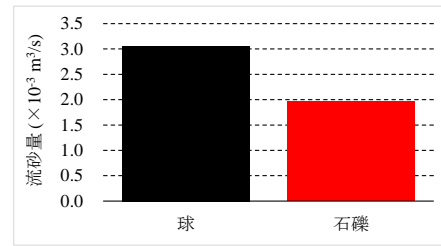


図-16 石礫と球の全流砂量

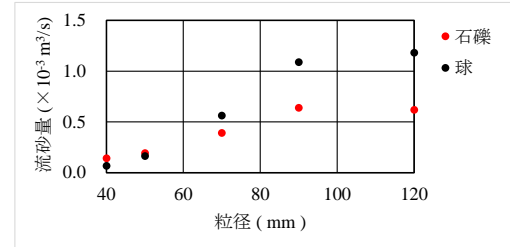


図-17 石礫と球の粒径別流砂量

x 方向の衝突直前の速度、 v_2 : x 方向の衝突直後の速度) を求め、体積割合毎に図-15に示す。これより、体積割合が増加するにつれて衝突前後の速度比は大きく減少していく様子がわかる。このことは、体積割合の高い地点では、多少移動しても衝突によりすぐに減速してしまうことを示している。これは、体積割合が高い空間では、衝突を受けた粒子は周囲の粒子から支持され易く、衝突した粒子に強い反力を返すことができるためである。

次に石礫河床では分級が生じることで河床が安定する機構について考察する。河床表層で移動する大粒径粒子は、衝突時に小粒径粒子より鉛直上向きに力を受けやすく河床表層の上部を移動する。上部に移動した大粒径粒子は少なく、その体積割合が小さいため、単独では流れに耐えられず流送され、河床に静止する大粒径粒子との衝突等によって静止し、周囲の体積割合を高める。このような現象により、表層に位置するいずれの大きさの粒子も比較的体積割合が高い状況となる。体積割合が高くなると水流や粒子衝突による衝撃に耐えやすい構造となるため、群として安定化し易くなると考えられる。

(2) 球と石礫の2つの数値移動床実験における流砂量の比較

実験1の石礫の移動床実験の粒子群を球に変更し、実験2を実施した。粒度分布、流量条件は実験1と同一である。図-16に実験開始から200s間の平均の球(実験2)と石礫(実験1)の流砂量の比較を示す。流砂量は、球の方が約1.5倍大きく、土砂移動に及ぼす粒子形状の効果は大きいといえる。図-17には球と石礫の粒径別流砂量を示す。これより、流砂量は各粒径について必ずしも球の方が大きくなっておらず、小さな粒径については、石礫の方が大きかった。この結果より、球とは異なる石礫形状の粒子の方が、粒径別流砂量の差が小さくなると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 福田朝生, 福岡捷二: 石礫粒子群の運動および河床構造に及ぼす粒子衝突の効果, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 70, No. 4, I_967-I_972, 2014. 2. http://doi.org/10.2208/jscejhe.70.I_967 査読有
- ② 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, I_961-I_966, 2014. 2. http://doi.org/10.2208/jscejhe.70.I_961 査読有
- ③ 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. 10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.05.013> 査読有
- ④ Fukuda, T. and Fukuoka, S.: Effects of Particle Collisions on Motions of Mixed-size Particles and Bed Structures, Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, Lausanne, Switzerland, pp. 799-807, 2014. 9. 査読有
- ⑤ Fukuda, T. and Fukuoka, S.: Numerical movable bed channels required for investigation of various sizes and shapes particle motions in gravel bed rivers, The 1st international conference on computational engineering and science for safety and environmental problems, Sendai, Japan, pp. 223-226, 2014. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Fukuda, T., Fukuoka, S. and Uchida, T.: Three-Dimensional Gravel Motions in Numerical Movable Bed Channel with Particles of Various Shapes and Sizes, Advances in River Sediment Research, Proceedings of 12th International Symposium on River Sedimentation, ISRS, Kyoto, Japan, 2013. 9.
- ② 福田朝生, 福岡捷二: 石礫河川の土砂移動を研究するための数値移動床水路の要件, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 2014 年 9 月, 大阪大学
- ③ 田所弾, 福田朝生, 福岡捷二: 水中における斜面崩落数値実験による粒子群の鉛直

分級機構の研究, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 2014 年 9 月, 大阪大学

- ④ 田所 弾, 福田朝生, 福岡捷二: 流砂量に及ぼす粒子形状の影響, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2015 年 3 月, 東海大学
- ⑤ 高鉾裕也, 福田朝生, 福岡捷二: 水流中における異なる形状の石礫粒子の移動機構に関する研究, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2015 年 3 月, 東海大学

[その他]

ホームページ URL:

<http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 朝生 (FUKUDA TOMOO)

中央大学・研究開発機構・機構助教

研究者番号: 00709694