

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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630211

研究課題名(和文)任意形状粒子を用いた混合粒径移動床数値実験水路による河床近傍の力学機構

研究課題名(英文) Investigation of dynamic mechanisms near river beds employing a numerical mixed-size movable-bed channel with arbitrary shaped particles

研究代表者

福岡 捷二 (FUKUOKA, SHOJI)

中央大学・公私立大学の部局等・機構教授

研究者番号：30016472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、種々の形状と大きさの石礫と水の三次元運動を解析することが出来る数値移動床水路を構築した。構築した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、実験や現地観測では計測することが困難な水と石礫の運動や、これらに作用する力を数値実験から推定した。数値移動床実験結果の考察から、大きな粒子は河床上部を直線的に移動するのに対し、小さな粒子は河床底部のみず道を蛇行しながら移動すること、また、相対的に大きな粒子ほど移動や停止において自身の形状の影響を強く受けることが明かとなった。

研究成果の概要(英文)：We developed a numerical movable-bed channel capable of simulating three-dimensional motions of flows and gravel particles in different shapes. Flow and gravel motions and forces exerting them that have been difficult to measure were predicted by numerical movable-bed experiments. The result of the experiments showed that large particles were nearly in rectilinear motions in upper positions on the bed surface and small particles took detours in the lower positions. It was also showed that relatively large particles affected greatly by their shapes in motion and settlement.

研究分野：工学

キーワード：石礫河川 数値移動床水路 河床変動 混合粒径 粒子形状 流体力 流砂量 可視化

1. 研究開始当初の背景

これまでの河床変動解析は、砂粒子スケールの流れ、砂粒子の運動や小規模な河床形態は全て底面せん断応力と流砂量式の関係式に押し込み、力学機構はブラックボックス化された中で論じてきており、多くの課題が現れている。この問題は、河床変動解析に用いられてきた浅水流方程式では、鉛直方向の運動量輸送などが考慮できないなど、流れの解析モデルの不十分さのために、また工学的解釈のために、積極的に問題にされてこなかったように思われる。しかし、準三次元解析法や三次元解析法で底面近傍の流れを解析できるようになってきた現在においては、この問題を少しでも前進させることが必要である。

従来の流砂量式は混合粒径の取り扱いに問題があり、その中でも石礫河川への適用性が著しく低い。しかし、石礫群の運動と流体との相互作用の結果として起こる力学機構については直接計測することができず、未解明な点が残ったままである。このことは、水流中の石礫の挙動を現地や実験室での水理実験で明らかにすることには限界があることを示している。近年では大型の数値解析が可能となってきたため、乱流現象など、水理実験で明らかにすることが困難な課題に対して、数値解析が新たな現象解明のツールとして利用できるようになってきている。一方、水と土砂移動の相互干渉を、数値解析を用いて考察する研究は、緒についたばかりである

(以降では、水と土砂の運動を一体的に解析する数値解析法を数値移動床水路と呼ぶ)。従来の数値移動床水路では球で粒子をモデル化しているため、種々の形状の石礫の運動を正しく説明出来ない。また、粒子より大きな流体セルを用いて流れを解き、粒子に作用する流体力を、抗力係数を用いて算定する手法が広く用いられている。しかし水流中を移動する粒子群に対する抗力係数を適切に与えることは困難である。このように従来の数値移動床水路では、粒子と水の運動および相互干渉の取り扱いがあいまいであり、石礫河川の河床近傍の力学機構を考察する為の適切な数値移動床水路の開発が必要であった。

2. 研究の目的

(1) 数値移動床水路の構築

本研究では、石礫と水の相互作用や石礫形状の評価方法などにおいて厳密性・一般性を追求した新しい任意形状粒子を用いた混合粒径数値移動床水路を開発する。

(2) 数値移動床実験による石礫河川の河床近傍の力学機構の解明

構築した数値移動床水路を用い、石礫形状の粒子を用いた混合粒径の数値移動床実験を実施する。解析結果を基に 3D アニメーションを作成し、実験や現地観測からでは計測することが困難な河床近傍の水と粒子の運動を視覚的に明らかにする。また、粒径と粒

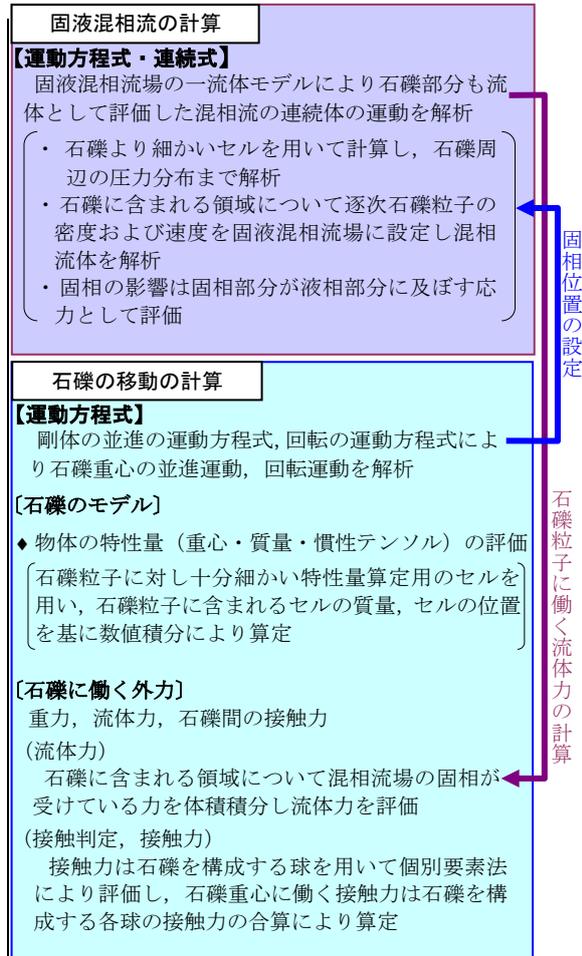


図-1 解析の流れ

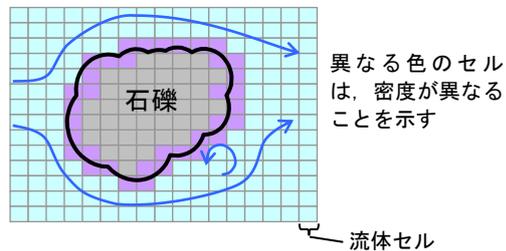


図-2 流れの解析法の概念図

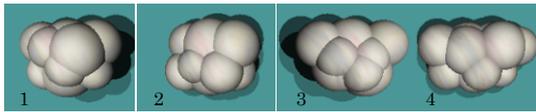
子形状が粒子運動に及ぼす効果、および石礫河床の構造と流速分布の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 数値解析手法

① 流れと粒子運動の相互干渉の解析法と解析の流れ

本研究で構築した数値移動床水路の解析の流れを図-1に示す。構築した数値移動床水路では、形状を維持しながら移動する石礫群を Lagrange 的に、周囲の水の流れを Euler 的に直接解析する。Lagrange 的に解かれた石礫群の運動を流れの解析において考慮するため、石礫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(図-2参照)。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



No.	1	2	3	4
長径 a/D	1.26	1.29	1.49	1.36
中径 b/D	0.98	1.06	0.89	0.99
短径 c/D	0.88	0.81	0.76	0.78
Shape Factor c/\sqrt{ab}	0.79	0.69	0.66	0.67

図-3 石礫に近似させた粒子

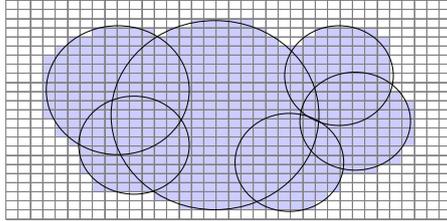


図-4 剛体特性算定用のセルのイメージ

運動を解き、流れの解析の固相の位置と流速を修正する。

②流体運動の解析法

水の運動は、固液混相場の一流体モデルを用い、連続式、運動方程式を用いて非圧縮性流れとして解析した。水面の変化は、流体セル中の水の占める割合を、密度関数を用いて表し、解析によって解かれた流れに応じて密度関数を輸送させ、水面変化を解析した。

③石礫のモデル化および石礫の運動解析

本研究では、石礫のモデルとして、図-3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を用いた。石礫を構成する要素として球を用いることで、石礫間の接触の判定が容易となる。このため、多くの粒子の運動を解析する必要がある数値移動床水路において、球体連結モデルは計算負荷低減の面で有利なモデルといえる。本研究では石礫の運動を剛体の並進と回転の運動方程式により解く。石礫を剛体として解析する場合、物体の特性量である質量、重心位置、および慣性テンソルを算定する必要があるが、球を任意に重ね合わせて物体を構成する場合、重なり部分の形状を幾何学的に算出することが課題となる。本研究では、重なりを有する形状を適切に評価するため、図-4に示すように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、体積を基に物体の特性量を数値積分により算定した。物体の特性量は粒子の移動によって変化しないため、特性量の算定は、計算初期に一度だけ行えば良い。この数値積分操作の導入により物体の特性量が適切に評価されるため、任意に球を組み合わせたことが可能となった。粒子間の接触力の評価には、粒子を構成する球を用いて個別要素法により仮想のバネ、ダッシュポット、摩擦スライダを用いて算出した。

(2) 解析による流れと粒子運動の妥当性の確認

研究代表者らは、既往の研究において固定床上を流れる実寸大の石礫の軌跡を画像解

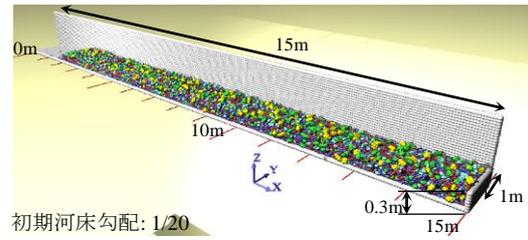


図-5 水路諸元

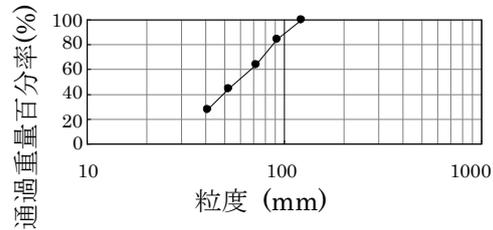


図-6 粒度分布

析により計測している。構築した数値移動床水路によって解析される粒子運動の妥当性を確認するため、当該実験を対象に解析を行った。実験と解析の粒子運動の比較から、構築した数値移動床水路は、形状によって異なる粒子の速度の変化や、揺動の振幅などについて説明できることを確認した。

(3) 数値移動床実験の条件

本研究では、構築した数値移動床水路を用い、石礫による混合粒径の数値移動床実験（実験1）を実施し、激しい水流中の石礫河床近傍の力学機構を考察した。その後、実験1で用いた粒子に対し、球粒子を加えた粒子群を用い、数値移動床実験（実験2）を実施し、球と石礫の運動の違いを考察し、粒子運動に及ぼす粒子形状の効果を明らかにした。実験1と実験2で用いた水路、上流端流量、給砂条件は同一である。

数値実験水路の諸元、および解析における座標軸の定義を図-5に示す。水路諸元は、石礫が移動する水理量、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。実験1では、図-3に示す 8~10 個の小球からなる石礫の形状に近似させた 4 種類を用いた。石礫の径は 5 粒径 (40 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm, 120 mm) とし、石礫を構成する小球の径を変化させて作成した (計 20 種類=4 形状×5 粒径)。ここで礫径は同一体積の球の直径で換算した値である。実験2では、実験1に対し球を加えた 5 形状とし計 25 種類 (=5 形状×5 粒径) の粒子を用いた。実験1および2ともに図-6の粒度分布に一致するように 5 粒径の石礫の投入割合を調整し、水路にランダムに敷き詰めた。上流端には流量 0.5 m³/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 $x = 1.2$ m の範囲のランダムな位置で落下させて行った。

4. 研究成果

(1) 石礫形状の粒子を用いた移動床実験 1

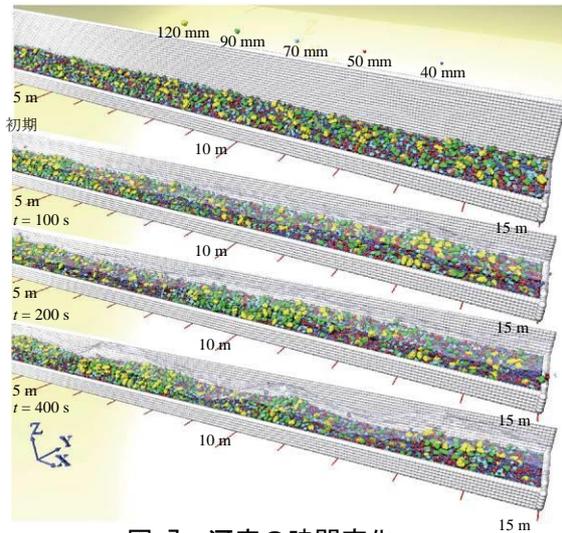


図-7 河床の時間変化

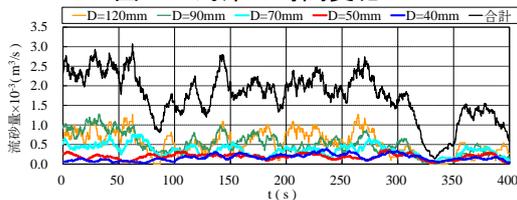
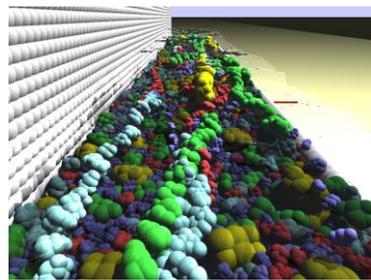
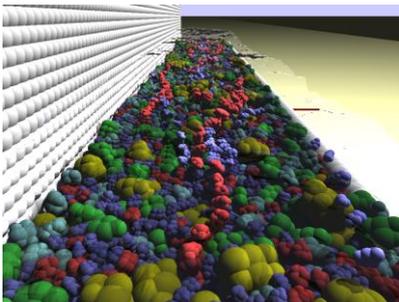


図-8 流砂量の時間変化



(a) 全粒径の軌跡

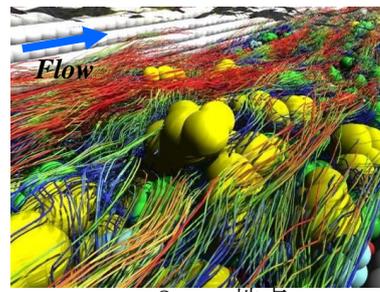


(b) 小粒径粒子の軌跡
($D = 40\text{mm}, 50\text{mm}$)

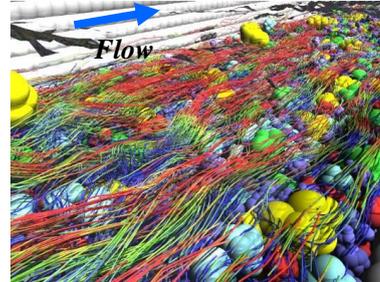
図-9 移動粒子の軌跡

①河床変化と流砂量の変化

本研究で実施した数値移動床実験では、流れは射流であり、実験最終段階 ($t=400\text{s}$) の水理諸元は、水路全体の平均水深が 0.274m 、平均流速 1.83m/s 、フルード数は、 1.12 であった。本研究で構築した数値移動床水路は、激しい射流の流れにおける水と粒子の相互干渉場を安定して解析することが出来た。図-7に実験における河床の変化を示す。初期に平坦であった河床は、 150s 付近から、明確な河床波が形成された。実験の最終段階 ($t=400\text{s}$) では、水路全体は周期的に波打ち、



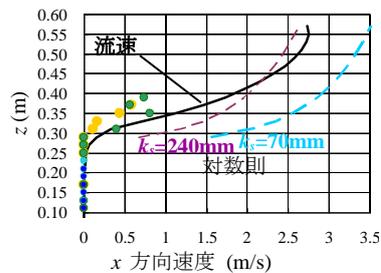
$x = 8\text{ m}$ 地点



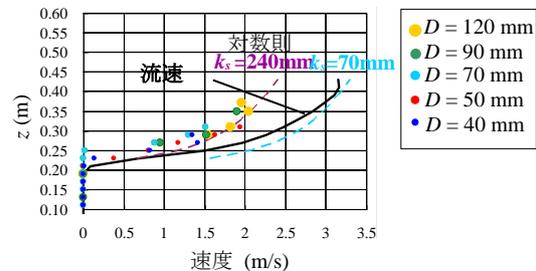
$x = 12\text{ m}$ 地点



図-10 河床近傍の流線



表層に大礫が集団化している地点 $x = 8\text{ m}$



表層に大礫が集団化していない地点 $x = 12\text{ m}$

図-11 流速と粒子速度の鉛直分布

上流側へ移動する反砂堆が形成された。反砂堆が形成された最終段階の河床表層では、大きな粒子は、砂堆の頂部に集中し、小さな粒子は砂堆の谷部に集中しており、明確な分級が確認された。図-8に流砂量の時間変化を示す。流砂量は、実験初期と比較して最終段階では約半分程度となっており、砂堆の形成が粒子の移動を抑制していることが明確に示された。

②粒径毎の粒子の軌跡

解析結果の各粒径の粒子の軌跡を可視化し、粒径毎の粒子運動の違いを明らかにした。図-9は移動している粒子について $1/10\text{s}$ 毎に光らせて示した粒子の軌跡である。上段が全粒径の軌跡、下段は小さな粒子 ($40\text{mm}, 50\text{mm}$)

のみの軌跡である。この図より、大きな粒子は、河床の上部を直線的に移動しているのに対し、小さな粒子は、表層で静止する大きな粒子の脇のみず道を蛇行しながら移動していることがわかった。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、大礫集団を形成すると考えられる。

③粒子速度と流速の鉛直分布

表層に大礫が集団化している地点 ($x=8m$) と大礫集団が形成されていない地点 ($x=12m$) について河床近傍の流線を図-10 に示す。当該地点について流速と粒子速度の鉛直分布を計測した結果を図-11 に示す。図-11 には、相当粗度を平均粒径の 70mm および最大粒径の 2 倍の 120mm とした場合の対数則の結果も合わせて示している。表層で大礫が集団化している地点では、流速が河床から上部に向かい緩やかに上昇し、対数則から大きくずれている。これに対し、大礫が集団化していない地点では、流速の鉛直勾配は大きく、流速がほぼゼロの地点から、鉛直上向きに約 0.1m の地点で、流速が 2m/s 近くとなっている。また、概ね相当粗度が 70mm の流速分布に近い分布形となっている。これらの結果より、表層で大礫が集団化している地点では、流速は鉛直方向に緩やかに上昇し、空隙を持つ大きな粒子の集団が流れに大きく抵抗していることが明かとなった。

④移動開始および停止時における石礫の形の影響

石礫の運動に及ぼす粒子形状の影響を調べるため、移動開始および停止時に石礫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した。石礫の向きを調べるにあたり、長軸を石礫の慣性主軸のうち、最も回転させやすい軸とし、短軸を慣性主軸のうち、最も回転させづらい軸と定義した。このように定義される長軸と短軸は、直交しており、短軸は最も平らな面の面ベクトルに近い向きを示す。石礫の長軸および短軸を図-13 に示す。図-14 には石礫の移動開始および停止時における x 方向の速度、石礫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と停止時は、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傾けていた粒子が、移動時にはその向きを変え流下方向に転動しやすい

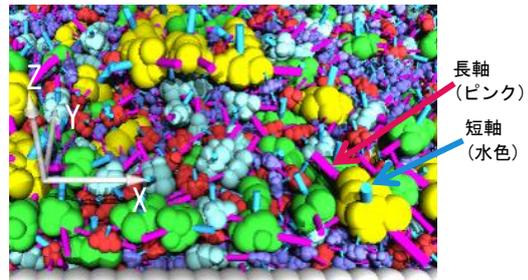
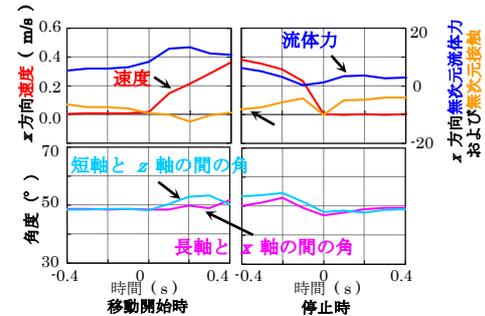
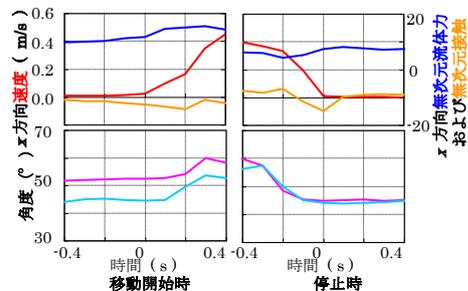


図-12 河床粒子の長軸と短軸



小粒径粒子 ($D=40\text{ mm}, 50\text{ mm}, 70\text{ mm}$)



大粒径粒子 ($D=90\text{ mm}, 120\text{ mm}$)

図-13 移動・停止時の石礫の向き
・接触力・流体力の変化

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 軸方向に傾き、かつ短軸を z 軸方向に向けるため、平らな面を上向きに傾けながら停止する様子がわかる。

(2) 石礫と球を用いた移動床実験 2

実験 1 の石礫に球を加え、数値移動床実験を実施した。河床波が発達する前の時刻において計測した粒径と粒子形状別の流砂量を図-14 に示す。この図より、最も大きな

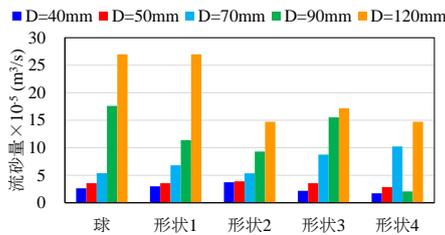


図-14 粒径と粒子形状別の流砂量

D=120mm に着目すると、Shape Factor が小さく、形状が球とは大きく異なる形状3や形状4 (図-3 参照) の流砂量は、球の半分程度となっている。一方、D=40mm や 50mm の小さな粒子の流砂量は、形状の違いによる流砂量の明確な傾向は見られない。図-13 において、大きな粒子ほど移動や停止において粒子自身の形の影響を受けていると考えられることから、流砂量においても、大きな粒子ほど形の変化に対する流砂量の差が大きくなったと考えられる。これらの結果から、粒子自身の形が、粒子運動に及ぼす効果は、河床材料における当該粒子の相対的な大きさと関係することがわかった。

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, 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 6 件)

- ① S. Fukuoka: Prediction of three-dimensional movement of gravel particles in a movable-bed numerical channel, THESIS 2013, Chatou France 2013. 6.
- ② 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.
- ③ 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
- ④ 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
- ⑤ 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
- ⑥ 高 敏 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

福岡 捷二 (FUKUOKA SHOJI)

中央大学・研究開発機構・機構教授

研究者番号: 30016472

(2) 研究分担者

内田 龍彦 (UCHIDA TATSUHIKO)

中央大学・研究開発機構・機構准教授

研究者番号: 00379900

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