

画像解析と数値解析による開水路粗面乱流中を流下する非球形石礫の運動機構に関する研究

高 敏 裕也¹・福岡 捷二²

¹ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: ytakakuwa099@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² フェロー 中央大学 研究開発機構 (同上)

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

本研究では、開水路粗面乱流中を流下する非球形石礫の運動機構を解明することを目的に、第一に、開水路粗面乱流中の非球形石礫の流下挙動を撮影した単一石礫流送実験の映像を画像解析し、石礫の移動形態に及ぼす形の効果を示した。第二に、単一石礫流送実験に Euler-Lagrange 型の Arbitrary Particle Multiphase method (APM 法) を適用し、本解析法が粗面と接触しながら流下する非球形石礫の移動形態と移動速度を説明し得ることを示した。

Key Words: non-spherical particle, transport manner, image analysis, Arbitrary Particle Multiphase (APM) method

1. 序論

開水路粗面乱流中の粒子運動は、水理量と粒子特性(体積、形状、物性値)や底面凹凸、移動粒子間の相互作用、移動粒子と流れとの相互作用により決まると考えられる。Sekine ら¹⁾は、球粒子の運動を Lagrange 的に解き、底面との接触角度のバラツキを考慮することで saltation 運動を決定論的に評価している。Sekine らの研究¹⁾を含む掃流砂や saltation 運動に関する多くの研究では、粒子形状を球と仮定し、水深 h に対して河床材料(粒径 d)が小さい場を対象としている。しかし、粒子体積が大きくなるほど粒子運動に及ぼす形の効果が重要となることから、流体中の大粒径粒子の運動を明らかにすることが求められている。

その様な中で、広島大学福岡研究室と国土交通省中国地方整備局²⁾は、2003~2004年に排砂水路の磨耗の機構を明らかにすることを目的に、コンクリート製大型開水路に江の川水系上下川で採取した石礫の跳躍運動や供給土砂による水路底面の磨耗の進展機構(水路磨耗実験と呼ぶ)を詳細に調べ貴重なデータを得ている。しかし、前者については、石礫の跳躍機構と石礫の体積や形状、土砂濃度、水理量との関係の考察が不十分であった。一方、後者については、土砂供給の初期段階で水路表面のモルタルが削られ水路の磨耗が急激に進むこと、骨材が露出し始めると磨耗進行速度が一定程度に収束すること等の成果が得られて

いる。

五十里ら³⁾は、福岡らの実験結果²⁾を説明するため、固液混相流型粒子法を構築した。しかし、礫形状を球と仮定しているため球群は水路中央を直進することになり、水路磨耗実験の結果²⁾と比べ、側壁付近の磨耗量は小さく評価されている。近年、水流と任意形状物体の三次元運動を解くことが可能とする解析法(例えば MICS⁴⁾や APM 法⁷⁾)が提案され、Fukuda ら⁵⁾は、力学的エネルギーに基づくコンクリートの磨耗モデルを APM 法⁷⁾に導入した APM-CDEMA 法を提案し、水路磨耗実験²⁾に適用している。非球形粒子を用いた Fukuda らの解析⁵⁾では、実験結果²⁾と比べて解析の磨耗進行速度は大きい⁶⁾が、粒子形状が重要であることを示している。

粒子群の水流中の運動を実験的に計測することは容易でなく、粗面との接触を考慮した非球形粒子の流体中の運動を数値解析的に説明する必要性が高いことなどの理由から、著者ら⁹⁾は、非球形石礫の水流中の運動を撮影した重村の単一石礫流送実験³⁾を対象に APM 法⁷⁾の適用性を検討して来た。しかし、扁平な形状の石礫の移動形態を十分説明することはできず、水路底面凹凸と石礫との衝突が重要であり、これを考慮した開水路粗面乱流中の非球形石礫の運動の解析が課題となっていた。

本研究では、第一に、単一石礫流送実験の映像³⁾を画像解析し、石礫の流下挙動と形状の関係を示す。第二に、APM 法⁷⁾を用いて、既往研究⁹⁾よりも水路底面凹凸を解析に

詳細に取り込み、また計算格子幅等を見直し流れの解析精度を向上した数値解析を実施し、開水路粗面乱流中の非球形石礫の運動を説明可能か検証する。

2. 単一石礫流送実験³⁾の概要と画像解析法

(1) 単一石礫流送実験³⁾の概要

水路磨耗実験^{2,4)}は、長さが45mで幅が約1.0mの馬蹄型の横断面形状(図-1)を有する勾配1/20の直線水路に、上下川で採取した土砂を供給し行っている。単一石礫流送実験³⁾は、水路磨耗実験^{2,4)}において2351m³の土砂を供給した段階で実施された。水路施工時の滑らかな底面形状(図-1)は磨耗により、骨材が露出し粗くなっている。

単一石礫流送実験³⁾では、定常流量0.5m³/sを供給し、水路上流端(x=0.0m)から2.0~3.0mの位置で石礫を投入し、カメラを取り付けた台車で石礫を追跡し、石礫の流下挙動に関する貴重な映像データを取得している^{2,4)}。

本研究では、表-1に示す3種類の石礫の流下挙動を分析した。石礫Aは扁平な形状である。石礫Bはラグビーボールのような形状をしており、長軸の両端に頂部を有し、また、長軸周りの輪郭は円形に近い。石礫Cは、長軸の片側は頂部を有するが、もう一方の片側は丸みを帯びており、非対称性が強い。この様に単一石礫流送実験³⁾で使用された石礫の形状は球と大きく異なる。

(2) 画像解析法(石礫の平面軌跡と移動速度の算定方法)

実験映像³⁾には、水路全体における石礫の座標(グローバル座標系:x=0.0~45m)を示す距離標は無く、0.1秒ごとのコマ送り画像に映る指標をもとに石礫の平面軌跡と移動速度を算出した。以下に算出過程を示す。

第一に、複数の画像に指標が連続的に映る時間帯については、画像内での指標の縦断位置の変化から、カメラが0.1秒間に移動した距離と移動速度 $V_{cx}(t)$ を算出した。画像内に指標が写っていない時間帯のカメラの移動速度は、前後の値から線形補間した。

第二に、式(1)に示すように、カメラの移動速度 $V_{cx}(t)$ を時間積分し、グローバル座標系における画像上流部のx座標を評価した。カメラの初期位置は概ねx=7.5mである。

$$x_{global}^{picture}(t) = \int_{t_0}^t V_{cx}(t) dt + 7.5 \quad (1)$$

第三に、画像の上流側の水路中央を原点として画像内での石礫の座標を算出した(ローカル座標系: $x_{local}^{particle}(t)$, $y_{local}^{particle}(t)$)。これより、グローバル座標系における石礫の平面位置を算定した(式(2),(3))。

$$x_{global}^{particle}(t) = x_{global}^{picture}(t) + x_{local}^{particle}(t) \quad (2)$$

$$y_{global}^{particle}(t) = y_{local}^{particle}(t) \quad (3)$$

最後に、式(2),(3)を時間微分することにより、石礫の移動速

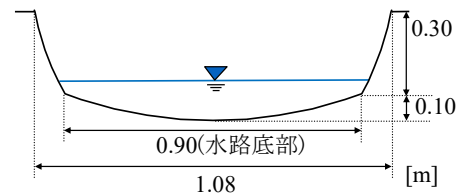


図-1 水路横断面図(施工時)^{2,4)}

表-1 単一石礫流送実験で使用された石礫³⁾

石礫A	石礫B	石礫C
粒径105 mm	粒径75 mm	粒径135 mm

度の流下方向成分 $V_{px}(t)$ と横断方向成分 $V_{py}(t)$ を算出した。

3. 数値解析法(APM法)⁷⁾の概要と計算条件

(1) 数値解析法 APM 法⁷⁾の概要

APM法⁷⁾は、流れは石礫より十分小さな計算格子を用いて Euler 的に解き、石礫の運動は Lagrange 的に解く解析法である。基礎方程式は文献^{7,10)}を参照されたい。以下、APM法⁷⁾の概要を示す。

流れの解析は LES であり、SGS 応力は Smagorinsky モデルにより評価する(Smagorinsky 定数: 0.173)。複雑な水路底面凹凸や非球形石礫の形状に適合するように計算格子を時々刻々と設定することは容易ではないことから、計算格子は立方体とし、格子内に含まれる固相については固液混相の一流体モデル⁶⁾を導入し、格子内の固相の体積割合は、サブセル法⁶⁾により算出する。これより、計算格子よりも大きな水路底面凹凸は、計算格子で直接取り込み、no-slip 条件を与え、計算格子よりも小さな凹凸や石礫の存在に伴う運動量交換は固液混相の一流体モデル⁶⁾により流れの解析に反映される。固定床粗面乱流の構造に及ぼす粗度要素の大きさと計算格子幅 Δ 、サブセル幅 $\Delta_{subcell}$ の効果については文献¹⁰⁾を参照されたい。

石礫の運動は、並進と回転の運動方程式を解くことにより評価する。石礫に作用する流体力は、石礫周りの詳細な流れ場から直接評価する。また、石礫と水路との衝突力は個別要素法により算出する。

(2) 単一石礫流送実験³⁾を対象とした数値解析の概要

数値解析では、上流端から定常流量 0.5 m³/s を供給し、下流端には圧力ゼロを与え、図-2 及び表-2 に示す石礫を x=2.5m の位置で高さ 0.4m から自然落下させ投入した。

各石礫は、小球を隙間なく重ね合わせて形造った。粒径 d は等価な体積の球の直径に換算した値である。比較のため、球形状の石礫 D($d=135\text{mm}$)も作成し、数値解析を実施した。同じ体積の球の投影面積で無次元化した石礫の最大投影面積(無次元最大投影面積 A^*_{max})の大きさは石礫 $A > C > B > D$ の順となり(表-2)、跳躍中の石礫に作用する流体力や石礫の移動速度と密接に関係すると考えられる。

著者らのさきの研究⁹⁾では、図-1に示す滑らかな水路底面形状を表現する数値解析水路(水路①)を用いて解析を行ったが、この水路条件では水路底面凹凸が小さく、石礫 A は、一度平らな面が水路底面に接すると、めくれ上がることは容易ではなく、そのまま底面を滑動し、後述する単一石礫流送実験³⁾で確認された移動形態を説明することはできなかった。このため、本研究では、水路磨耗実験²⁴⁾の底面凹凸が、石礫の運動に影響を及ぼすことを考慮した解析を行う。なお、座標系は水路①の流下方向に x 軸を、水路床の法線方向に z 軸を取り、 z 軸の原点は、水路中央の水路表面高さとした。

水路床の磨耗実験²⁴⁾では、 $2.0 \leq x < 43.0\text{m}$ にかけて、縦断方向に 25cm 、横断方向に $5 \sim 15\text{cm}$ の間隔で水路底面の磨耗量を計測している。本論文で用いた数値解析水路は、この状態を表現し、後述する水路中央の平均水深と平均水表面流速を説明するように、直径 8cm の球を隙間なく重ね合わせて作成した。なお、磨耗量が計測されていない区間 $0.0 \leq x < 2.0\text{m}$ の水路形状は、 $x = 2.0\text{m}$ の水路形状を外挿し作成した。また、水路磨耗実験²⁴⁾の水路下流端は自由放流条件であり、水路下流端の磨耗量が大きくなったことから、横断位置(y)ごとに $2.0 \leq x < 43.0\text{m}$ における最大磨耗量を $x > 43.0\text{m}$ の磨耗量と仮定して、 $x > 43.0\text{m}$ の数値解析水路の水路床高を決めた。また、磨耗量計測点間に配置する球の個数とその高さについては試行錯誤的に決めた(図-3)。水路②では、磨耗量計測点間に球を5個配置し、球の高さは縦断方向に線形補間している。水路③は、水路表面の骨材の露出状況を参考に、水路②を基準に球の高さに最大で $\pm 7.5\text{mm}$ のばらつき(正規分布)を与えた。図-4に、水路底面凹凸と石礫 A の大きさ、計算格子幅の関係を示す。水路②では、石礫と比べて水路底面凹凸が小さく、水路②の条件を用いた数値解析では石礫 A は既往研究⁹⁾と同様に水路底面を滑動することになった。一方、水路③の条件では、石礫が水路凸部に衝突し、衝突力に伴うトルクが作用するため、めくれ上がりやすくなることから、本研究では石礫 A の移動形態の再現性の高い水路③を用いた結果を示す。なお、石礫 B と C の移動形態は、水路②と③であまり変わらなかった。これは両者が塊状の形状であるためと考えている。

計算格子幅とサブセル幅を、既往研究⁹⁾の $\Delta = 0.010\text{m}$, $\Delta_{\text{sub-cell}} = \Delta/2$ から $\Delta = 0.008\text{m}$, $\Delta_{\text{sub-cell}} = \Delta/6$ に変更することにより、流れの解析精度が向上した。各パラメータは、流体密度 1000

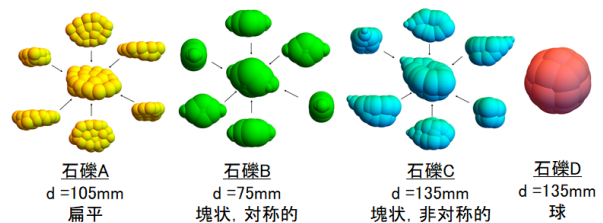


図-2 石礫の形状と大きさ

表-2 石礫の形状指標

形状名	石礫A	石礫B	石礫C	石礫D:球
無次元長径 (a/d)	1.50	1.39	1.34	1.00
無次元中径 (b/d)	1.00	1.01	0.90	1.00
無次元短径 (c/d)	0.60	0.79	0.83	1.00
Shape Factor $(=S.F.)$	0.49	0.67	0.76	1.00
無次元最大投影面積 $-(A^*_{max})$ (最大投影面積/球の投影面積)	1.61	1.21	1.25	1.00
無次元最小投影面積 $-(A^*_{min})$ (最小投影面積/球の投影面積)	0.74	0.83	0.79	1.00

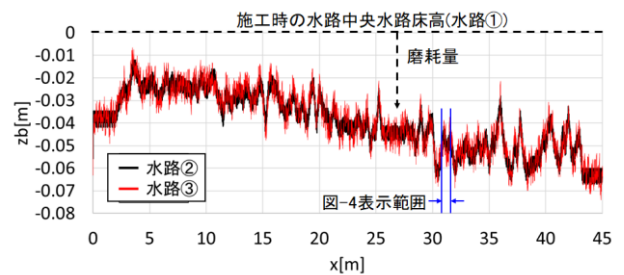


図-3 単一石礫流送実験時の水路中央の水路床高³⁾

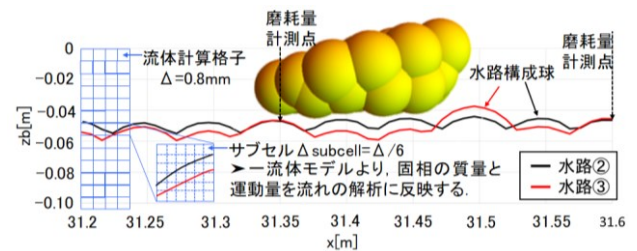


図-4 水路底面凹凸と石礫 A の大きさの関係

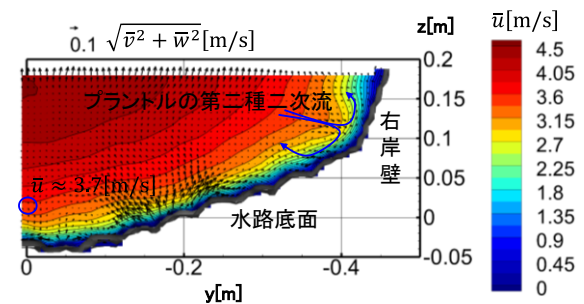
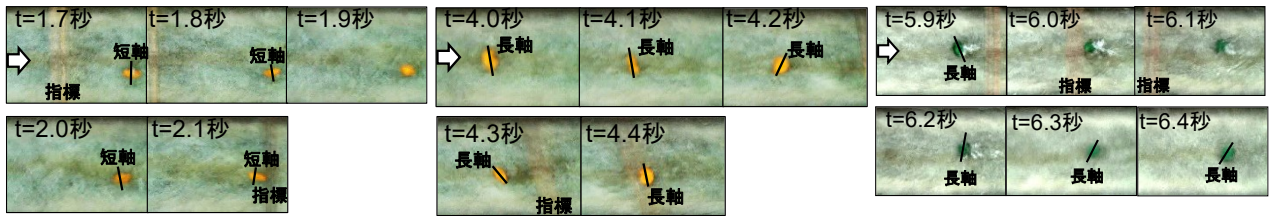


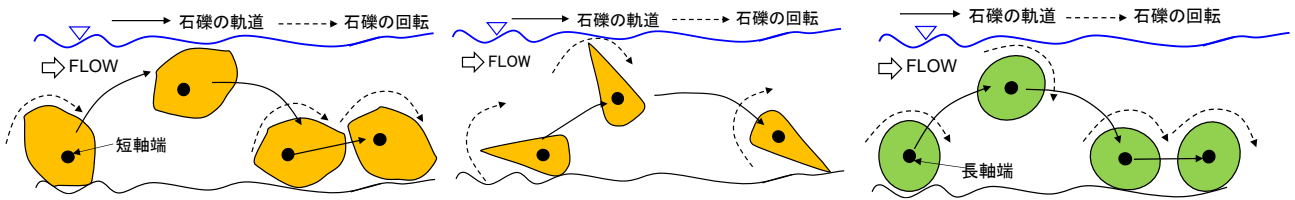
図-5 時間平均主流速と二次流の分布(水路③, clear flow, $x = 22.5\text{m}$)

kg/m^3 , 固体密度 2500kg/m^3 , 粘性係数 $0.001\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$, 石礫の弾性係数 $5.0 \times 10^{10}\text{Pa}$, 摩擦係数 0.2 , ポアソン比 0.23 とした。反発係数は、岩体をモルタル試験盤に落下させた表らの実験結果¹¹⁾を参考に 0.3 とした。流体及び石礫運動の刻み時間は、それぞれ $2.0 \times 10^{-4}\text{s}$, $2.0 \times 10^{-6}\text{s}$ である。

上記の結果得られた数値解析における流れ場を示す。水路中央で時空間平均した水深と水表面流速は $\bar{h} = 0.205\text{m}$, $\bar{u}_s = 4.61\text{m/s}$ であり、単一石礫流送実験時³⁾の水深 $\bar{h} =$



(a) 映像³⁾(平面図):短軸を回転軸とした転動と跳躍で流下 (c) 映像³⁾(平面図):長軸や中軸を回転軸とした跳躍で流下



(a) 映像³⁾(平面図)

(b) 模式図(側面図):短軸を回転軸とした転動と跳躍で流下 (d) 模式図(側面図):長軸や中軸を回転軸とした跳躍で流下

(b) 模式図(側面図)

図-6 石礫 A の特徴的な移動形態

図-7 石礫 B の特徴的な移動形態

0.193 mと水表面流速 $\bar{u}_s = 4.69 \text{ m/s}$ と概ね一致する。また、図-5は、石礫投入前(clear flow)における $x = 22.5 \text{ m}$ 地点の時間平均した主流速コンター \bar{u} と二次流速度ベクトル (\bar{v}, \bar{w}) の横断面図である。水路中央($y=0 \text{ m}$)の底面から0.05 m高い位置にて3.7 m/s程度的高速流が計算されている。また、粗度要素周りの上昇流や水路底面と側壁に挟まれた領域におけるプラントルの第二種二次流を確認することができる。なお、水路中央の水深を用いて算出した摩擦速度 u^* は0.32 m/sであり、粒径別($d=0.075, 0.105, 0.135 \text{ m}$)のシールズ数 θ は、それぞれ0.091, 0.065, 0.051である。

4. 画像解析及び数値解析の結果と考察

(1) 石礫の流下挙動に及ぼす形の効果

図-6及び図-7に、実験映像³⁾の詳細な観察から明らかになった各石礫の特徴的な移動形態を示す。石礫 A は、その形ゆえに図-6(a),(b)に示すような「短軸を回転軸とした転動と跳躍」と、図-6(c),(d)に示すような「長軸や中軸を回転軸とした跳躍」の2種類の移動形態を変えながら流下する。

石礫 B は(図-7)、主に「長軸を回転軸とした転動と跳躍」により移動する。対称性の強い形状のため、回転軸が定まり運動が安定しやすい。

石礫 C は、石礫 B と同様に、主に「長軸を回転軸とした転動と跳躍」により流下する。ただし、非対称性の強い形状のため、回転軸が安定しづらく水路底面と接触する時に高頻度で姿勢を変え、石礫頂部が水路底面と接触すると大きく跳躍し水面から飛び出すことがある。

なお、各石礫が大きく跳躍するときに水面で水しぶきが発生しており、跳躍高さは水深(19.3 cm)から判断して最大で20 cm程度と推定される。

(2) 単一石礫流送実験³⁾へのAPM法⁷⁾の妥当性の検証

図-8及び図-9に、石礫の移動形態と移動速度の流下方向成分 V_{px} を示す。なお、 $x > 20 \text{ m}$ における画像の解析精度が低かったため、本研究では、 $x < 20 \text{ m}$ の画像解析結果を用いる。

石礫 A は(図-8(a))、 $5 \leq x \leq 10 \text{ m}$ や $x = 40 \text{ m}$ 付近において「長軸や中軸を回転軸とした跳躍」、 $35 \leq x \leq 38 \text{ m}$ において「短軸を回転軸とした転動と跳躍」で流下しており、実験映像³⁾で確認された移動形態(図-6)を示している。

石礫の平均移動速度に着目すると(図-9(a))、画像解析における石礫の平均移動速度 \bar{V}_{px} が数値解析の \bar{V}_{px} と比べて大きくなる。この差が生じた主な要因は画像解析の精度にあると考えている。画像解析は0.1秒ごとのコマ送り画像をもとに行い、また、指標の映っていない画像(時間帯)では前後の諸量から補間して求めており、画像解析において石礫の移動速度の流下方向成分と累積移動距離を過大に評価したと推察される。一方、移動速度の流下方向成分の瞬間値 V_{px} に着目すると、数値解析の全条件の中で唯一、 V_{px} が4.0 m/sを超え($x = 10 \text{ m}$ 付近)、扁平な形状を有する石礫 A が高速で流下し得ることを示した。このとき、石礫は流下方向に対して大きな投影面積を取る姿勢をしており、跳躍時の石礫の姿勢と移動速度は密接に関係すると考えられる。

石礫 B(図-8(b))は、基本的に「長軸を回転軸とした転動と跳躍」により流下しており、実験映像³⁾で確認された移動形態(図-7)を示している。また図-9(b)に示すように、移動速度の瞬間値は、石礫が水路床と接触する際には約2.0 m/s、大きく跳躍し高い位置の高速流を受けるときには最大で3.5 m/s程度となり、画像解析における石礫の移動速度の瞬間値を捉えられている。

石礫 C(図-8(C))は、基本的に「長軸を回転軸とした転動と跳躍」により流下するものの、例えば $x = 28 \text{ m}$ 付近にて、石礫頂部が水路底面と接触し、その後大きく跳躍しており、実験映像³⁾で確認された移動形態を示している。また、大きく跳躍する $x = 29 \text{ m}$ 付近では、体積の半分程度が水面から飛び出ており、実験映像³⁾から推定される跳躍高さ(20 cm程度)と対応している。

平均移動速度 \bar{V}_{px} の大小関係に着目する。単一石礫流送実験映像³⁾の画像解析結果及び数値解析結果で同じ「長軸を回転軸とした転動と跳躍」で移動する石礫 Cと石礫 Bでは、石礫 Cの \bar{V}_{px} が大きくなった(図-9(b),(c))。この理由は、非対称性の強い石礫 Cは高い位置まで跳躍しやすいこと、また無次元最大投影面積 A_{max}^* が石礫 Bと比べて大きく流体力の流下方向成分も大きくなるためと考えられる。なお、石礫 B, C に作用する流体力の流下方向成分

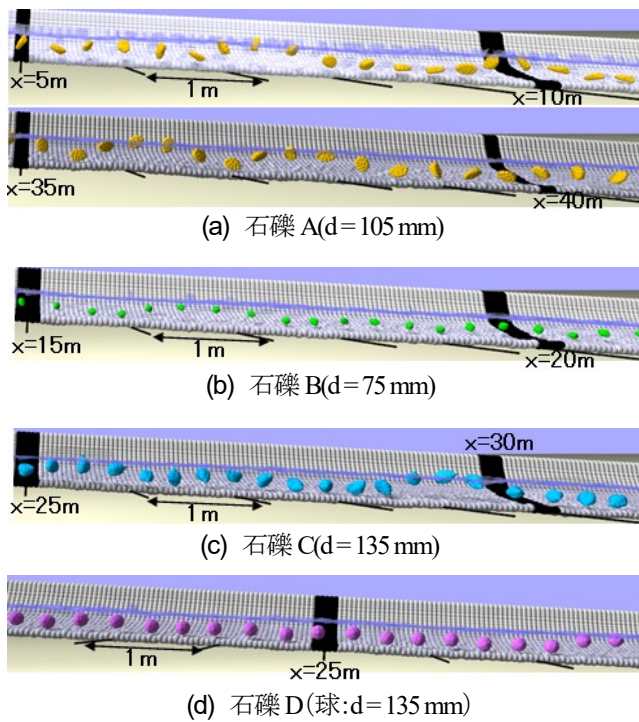


図-8 数値解析における石礫の移動形態(0.1 秒ごとの石礫の軌跡をプロット)

の大きさの時間平均値 $\overline{F_{fx}}$ を水中重量 W で無次元化した値 $\overline{F_{fx}}/W$ は、それぞれ 0.24, 0.36 であった。一方、石礫に作用する衝突力に着目すると、流下方向成分 F_{cx} (0.02 秒ごとの出力値)を衝突回数 n で平均し水中重量で無次元した値 $(1/n) \sum_1^n F_{cx}/W$ は、それぞれ3.94, 4.47である。これより、石礫 Cの方が、底面との衝突時に、上流向きに大きな力を受けていることが分かる。今後、個別の跳躍運動に着目し、石礫

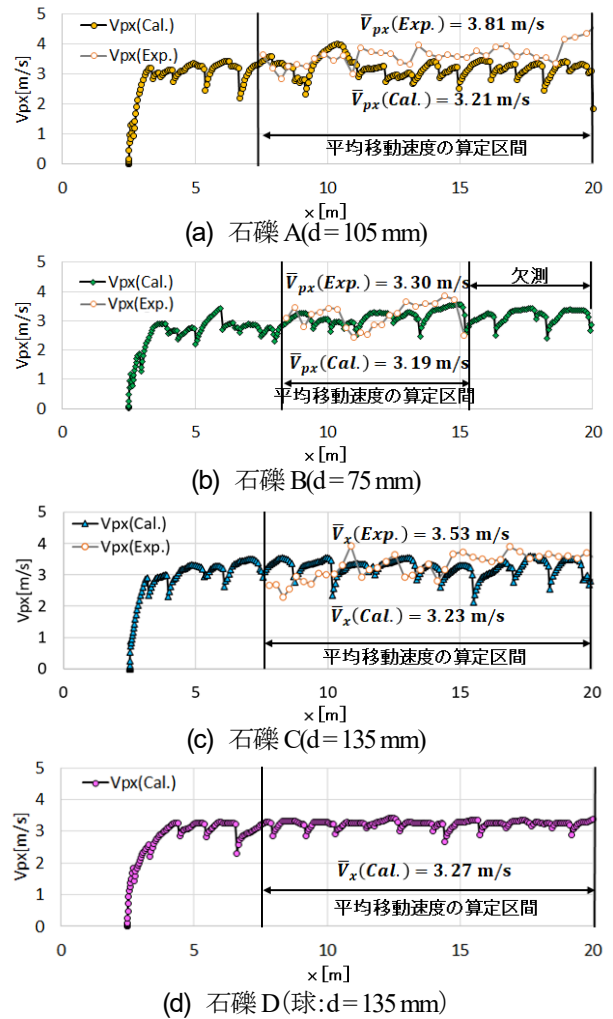


図-9 単一石礫流送実験と数値解析での石礫の移動速度の流下方向成分の比較

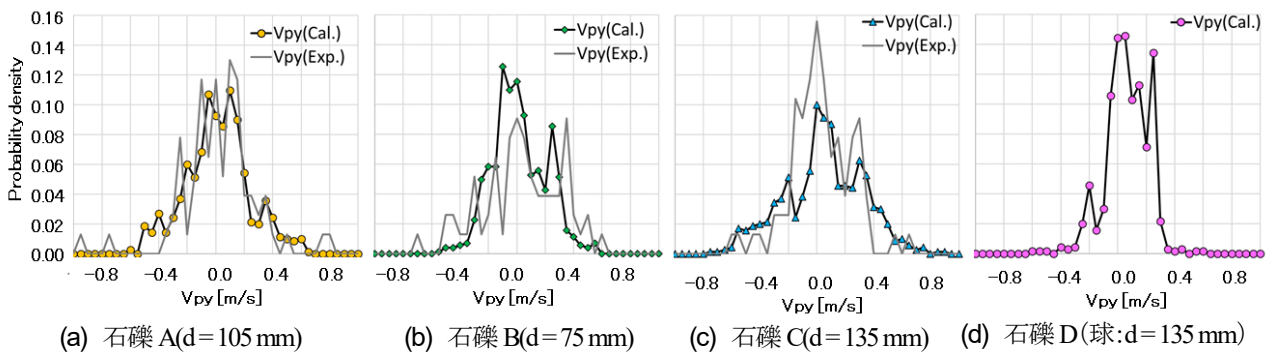


図-10 単一石礫流送実験と数値解析での石礫の移動速度の横断方向成分 V_{py} の確率密度分布

の加速度と姿勢や作用する流体力・衝突力に及ぼす石礫形状や体積の効果を分析する。

次に、各石礫の横断方向運動を比較する。石礫 A~C の重心位置は、いずれも(-0.15 ≤ y ≤ 0.15 m)の範囲を移動しており、画像解析結果と同程度であった。また、数値解析における石礫の移動速度の横断方向成分 V_{py} の確率密度分布に着目すると(図-10)、石礫 A~C のいずれにおいても分布幅は(-0.8 ≤ V_{py} ≤ 0.8 m/s)程度になるなど、画像解析結果を良く説明している。

一方、球形の石礫Dは転動と跳躍を繰り返しながら主に水路中央(-0.05 ≤ y ≤ 0.05 m)を流下し(図-8(d))、移動速度の流下方向成分及び横断方向成分のばらつきは小さい(図-9(d)及び図-10(d))。この様に、石礫の移動形態や移動速度に及ぼす形の効果は大きい。

以上より、APM法⁷⁾を用いて「粗面水路との接触を考慮した非球形石礫の流体中の移動形態と移動速度」を説明可能であることを示した。

5. 結論

本研究では、第一に、開水路粗面乱流中の非球形石礫の流下挙動を撮影した単一石礫流送実験映像³⁾の画像解析を実施し、開水路粗面乱流中を流下する非球形石礫の移動形態に及ぼす形の効果を示した。

第二に、単一石礫流送実験³⁾を対象にAPM法⁷⁾を用いて数値解析を行い、石礫よりも小さな平面スケールの水路底面凹凸を解析に的確に考慮することにより、粗面との接触を考慮した非球形石礫の流体中の移動形態と移動速度を説明し得ることを示した。

今後、石礫の跳躍運動のバラツキに及ぼす体積(粒径)、形状、底面凹凸、水理量の効果や運動中の石礫の姿勢(投影面積)等を体系的に分析する。

参考文献

- 1) Sekine, M. and Kikkawa, H.: Mechanics of saltating grains. II. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.118(4), pp.536-558, 1992.
- 2) 福岡捷二, 篠原康寛, 正木文也, 重村一馬, 藤堂正樹, 岡田将治, 斉藤一正: 排砂水路底面の磨耗進展機構の実験的検討, 水工学論文集, 第48巻, pp.1135-1140, 2004.
- 3) 重村一馬: 排砂水路を流下する礫群の運動と水路底面の磨耗進展機構, 広島大学大学院工学研究科修士論文, 2004.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 篠原康寛, 山下翔, 斉藤一正: 高速で多量に流下する礫群の運動機構と床面磨耗量の推算, 河川技術論文集, 第11巻, pp.291-296, 2005.
- 5) 五十里洋行, 後藤仁志, 酒井哲郎, 固液混相流型粒子法による排砂水路底面の磨耗過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第51巻, pp.853-858, 2007.
- 6) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集 B, Vol.64(2), pp.128-138, 2008.
- 7) 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.
- 8) Fukuda, T. and Fukuoka, S.: Euler-Lagrange simulation of invert concrete abrasion. *2nd International Workshop on Second Bypass Tunnel*, FP14, Kyoto, Japan, 2017.
- 9) Takakuwa, Y. and Fukuoka, S.: Motions of single and a group of particles with different shapes flowing down in fixed bed channels. *THESIS-2016*, Tokyo, Japan, pp.89-92, 2016.
- 10) 高鉦裕也, 福岡捷二: 浸透性固定床粗面上の乱流構造と移動粒子群による主流の構造変化, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75(2), pp.I_589-I_594, 2019.
- 11) 表真也, 岡田慎哉, 石川広唯, 日下部祐基, 伊藤佳彦: 3次元DEMを用いた落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第65号, C-6, 2008.

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

MOVEMENT MECHANISM OF NON-SPHERICAL PARTICLES FLOWING DOWN IN A TURBULENT FLOW OVER A ROUGH-BED CHANNEL BY THE IMAGE ANALYSIS AND THE NUMERICAL SIMULATION

Yuya TAKAKUWA and Shoji FUKUOKA

Video image analyses and numerical simulations were conducted about motions of non-spherical particles in a turbulent flow over a rough-bed channel, to reveal the effect of the particle shape on saltation motions.

First, video image analyses revealed the effect of the shape on the transport manner of non-spherical particles. Secondarily, it was shown that numerical simulations using the APM method explain the transport manner and the movement velocity of non-spherical particles in a turbulent flow over a rough-bed channel.