

### 水流中における異なる形状と大きさを有する石礫の移動機構

中央大学大学院 学生会員 ○高 鋤 裕也  
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二  
中央大学研究開発機構 正会員 福田 朝生

#### 1. 序論

石礫河川は洪水時の流れが激しく、土砂移動を現地観測することは困難である。また粒径の大きな石礫を扱った水理実験は極端に大きな施設を必要とするため、ほとんど行われていない。そのため水流中の石礫の移動機構の理解は不十分である。重村<sup>1)</sup>、福岡ら<sup>2)</sup>は、異なる粒径や形の石礫を大型水路で流下させ、水流中を移動する石礫の運動について貴重な映像を得た(以下、大型水路実験と呼ぶ)。福田ら<sup>3)</sup>は、水流中の任意形状石礫群の三次元運動を評価する解析モデルを構築し、石礫の移動を適切に理解するためには、粒径と石礫形状が重要であることを指摘した。本稿では、石礫を単体で流下させた大型水路実験の映像<sup>1)</sup>の分析および福田らの解析手法<sup>3)</sup>を用いて大型水路実験を模擬した数値流下実験を行い、石礫の移動に及ぼす石礫の形状と大きさの影響について検討する。

#### 2. 石礫の流下実験

図-1 に流下実験で用いた石礫の形状および同体積の球の投影面積で無次元化した最大投影面積を示す。表-1 に流下実験における石礫の形状と大きさの組み合わせを示す。図-1 に示すように石礫の形状は、小球を隙間がないように重ね合わせることで表現している。石礫の代表粒径は、同体積の球の直径と定義する。図-2 に流下実験の諸元を示す。水路の縦断距離は約 38m、水路幅は 1.08m、勾配は 1/20 である。境界条件は、上流端には流量 0.5m<sup>3</sup>/s となるよう一様流速を、下流端には圧力ゼロを与えた。石礫は、初速度 3.0m/s を与え、流れの発達した水路上流より約 15m の地点に投入した。本稿の数値解法は、流れ場の解析において、石礫部分を密度の異なる液体として与え、全体を非圧縮性流れとして Euler 的に解き、流れ場の解析から石礫に作用する流体力を直接評価する。石礫の運動は、剛体の並進と回転の運動方程式により Lagrange 的に解析する。剛体間の衝突は個別要素法を用いて解析する。次に流れ場の解析における石礫の位置、流速を修正する。数値解法の詳細は文献<sup>3)</sup>を参照された。

#### 3. 実験結果

図-3 に石礫の運動の様子を示す。円盤型の石礫を除き、石礫は転動や跳躍する際、主に流れに対して大きな投影面積をとり、大きな流体力を受ける向きで移動した(図-3 矢印)。一方、円盤型の石礫は、流れに対して大きな投影面積をとらずに移動する(図-3(c))。これより石礫の投影面積と移動形態には関係があることが分かる。図-4 に石礫の平均移動速度を示す。図-4 の赤線より上の石礫は、水路を這うように移動した(図-3(a)(c))。赤線と黒線間の石礫は、転動と跳躍が混在した移動形態を示した(図-3(d)(e))。黒線より下の石礫は、終始、転動により移動した(図-3(b))。これより図-4 の 75mm の石礫は、最大投影面積が大きい場合、水路を這うような移動形態をとり、最大投影面積が小さい場合、終始、転動することが分かる。同一粒径の石礫を比較すると、平均移動速度の大きさは、「水路を這うような移動形態」>「転動と跳躍が混在する移動形態」>「終始、転動により移動する場合」となり、同粒径の石礫でも形状により、移動形態や平均移動

1: 楕円体型 2: 円盤型 3: 洋ナシ型 4: 球

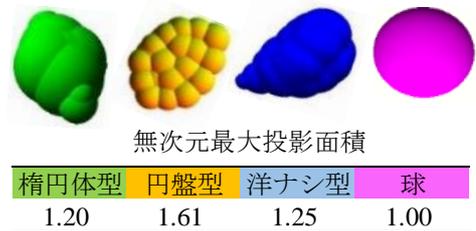


図-1 流下実験に用いた石礫の形状

表-1 流下実験ケース数 (形状と大きさの組み合わせ)

形状	代表粒径(d)		
	75mm	105mm	135mm
1 楕円体型	4	—	2
2 円盤型	5	4	—
3 洋ナシ型	5	—	4
4 球	3	—	—

(ケース数)

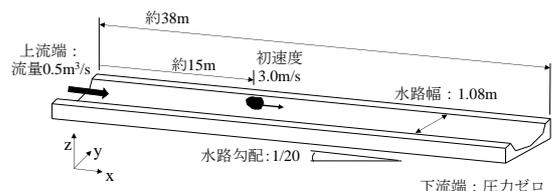


図-2 流下実験の諸元

キーワード 石礫の形状と大きさ、大型水路実験、数値流下実験、移動形態、平均移動速度、最大投影面積  
連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

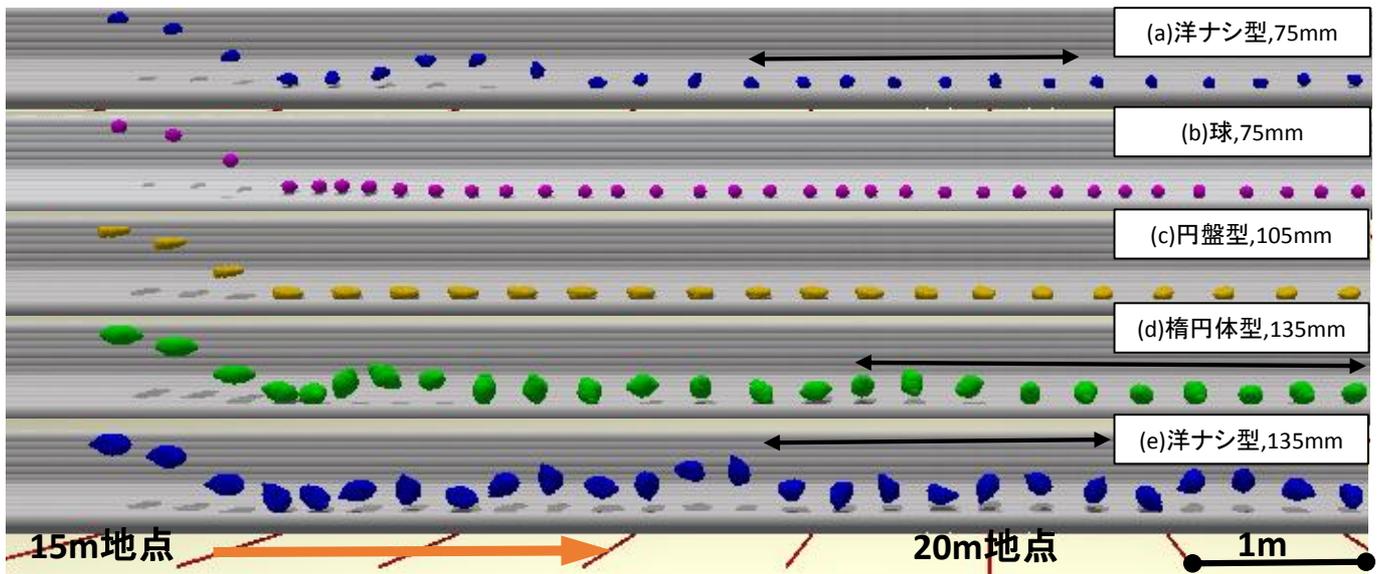


図-3 流下実験における石礫の運動の様子 (0.1秒ごとに石礫を表示, 水面は非表示)

速度が異なることが明らかとなった。次に形状ごとに粒径が異なる石礫について平均移動速度を比較する。円盤型および楕円体型の石礫は、最大投影面積が大きくなると平均移動速度も大きくなる（図-4 黄丸および黒枠）。これは、円盤型の石礫は、扁平な形状をしており、かつ突起もないため、運動が安定し一度倒れるとこのような移動形態を継続するためである。楕円体型の石礫は、長軸を回転軸とした断面が円形に近く、かつ対称性の強い形状により、運動が安定するためである。非対称性の強い洋ナシ型の石礫は、最大投影面積大きいと平均移動速度が若干小さくなる（図-4 青括弧）。これは、最大投影面積が大きい場合、形状の非対称性が卓越し、頻繁に跳躍することにより方向を変えながら移動する。一方、最大投影面積が小さい場合、最大投影面積と最小投影面積の差が小さく、安定な移動形態をとることが困難になり、転動や跳躍が混在する移動形態だけでなく、水路を這うような移動形態もとり、平均移動速度にバラツキが生じたためと考えられる。

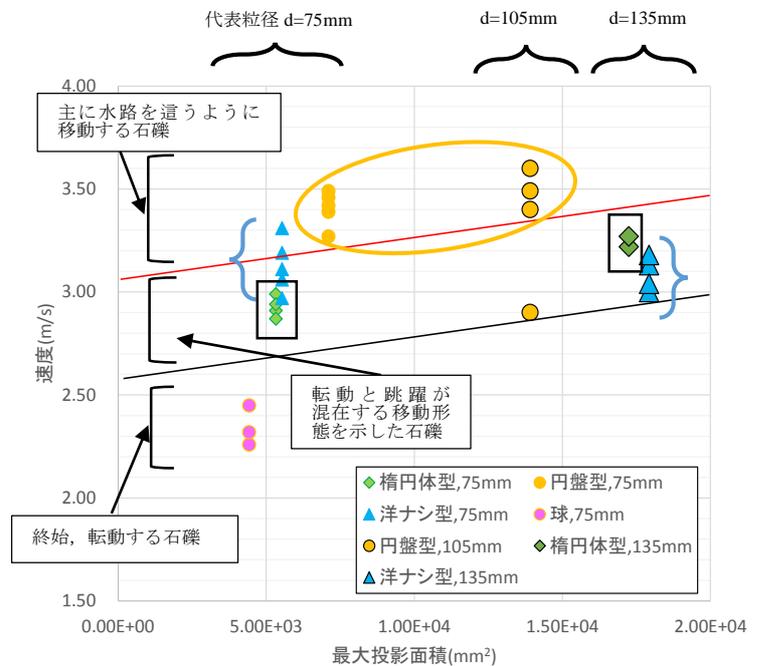


図-4 石礫の平均移動速度

#### 4. 結論

石礫の数値流下実験より、同粒径の石礫でも粒子形状が異なると移動形態が異なり、平均移動速度にバラツキが生じ、最大投影面積が大きくなるほど、平均移動速度が大きくなる傾向がある。また同様の移動形態を示す石礫を比較すると、対称性が強く安定した移動形態を持つ石礫は、最大投影面積と平均移動速度に正の相関がみられた。一方、非対称性の強い石礫は、最大投影面積と最小投影面積との相対的な大きさにより、移動形態が変化し、運動にバラツキが生じる。これより、石礫の速度に及ぼす形状と大きさの影響は、最大投影面積と最小投影面積との関係が重要になると考えられる。

#### 参考文献

- 1)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.
- 2)福岡捷二, 渡邊明英, 篠原康寛, 山下翔, 斎藤一正:高速で多量に流下する礫群の運動機構と底面磨耗量の推算, 河川技術論文集, 第11巻, 2005.
- 3)福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: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, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.69, No.4, pp.L1051-L1056, 2013.
- 4)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.