

# 形の異なる石礫粒子の水流中の移動機構に関する研究

## Study on movement mechanism of single gravel particles

### with different shapes in the flow

11D3101025C 河川工学研究室 高嶽 裕也

Yuya TAKAKUWA

## 1. 序論

急勾配河川の河床材料は石礫から構成されており、洪水時に石礫の移動が起こる。しかし洪水時の観測には危険を伴い、とりわけ流砂量、河床変動を観測することは困難である。また石礫を扱った水理実験を行うには極端に大きな水路が必要になることから、ほとんど行われていない。このため、水流中を運動する石礫の移動機構の理解は不十分である。また近年、計算機の性能の向上により土砂移動に関する解析が行われるようになって来たが、一般的に土粒子は球と仮定し検討している。しかし、河床材料は様々な形状をもつため、水流中の石礫の移動機構に及ぼす形の与える影響を明らかにする必要がある。

重村<sup>1)</sup>、福岡ら<sup>2)</sup>は、異なる粒径や形の着色した石礫をコンクリート製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、水流中の石礫群の移動機構を理解するために、任意形状石礫群の個々の運動に着目し、流れを Euler 的に、粒子を Lagrange 的に解析する数値移動床水路を構築した。この解析より、石礫の移動を適切に把握するためには、石礫形状が重要であることを指摘した。

本研究では、最初に重村らによる大型水路実験において単一粒子を流下させた場合の映像を分析する。しかし、実験施設の制約から、粒子の鉛直方向の運動の評価が困難であったことから、石礫の運動を詳細には捉えることは出来なかった。そこで、福田らの数値解法<sup>3)</sup>を用い、実大の石礫形状を模擬した粒子を用いて、粒子運動のシミュレーションを行い、数値シミュレーションによる粒子の運動と大型水路実験<sup>1)</sup>で得られた粒子の運動を比較する。本研究は、大型水路実験と数値実験の比較から、石礫の水流中の移動に及ぼす形の影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 大型水路実験の概要と画像解析方法

大型水路実験<sup>1)</sup>では、写真-1に示すように流下する石礫とほぼ同じ速度でデジタルビデオカメラを取り付けた台車を動かし、石礫を追跡し撮影した。表-1に実験の諸元を示す。流量 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ のもと上流より石礫を投入した。図-1に水路横断面図を示す。水路の横断面形状は、排砂水路の横断面形状で用いられるため馬蹄型断面としている。図-2に大型水路実験で用いられた石礫の粒径および形状の特徴を示す。石礫の形状は様々な角や平面をもち球とは大きく異なっている。石礫①は、対称性が強く楕円体に近い形状である。石礫②は、円盤型である。石礫③は、非対称性の強い形状である。

画像解析では、水路に記した目盛から実際の長さや画素数の関係性を求め、これよりカメラの移動速度および石礫の座標、移動速度を0.1秒ごとに算出し、これらを用いて石礫の運動を分析した。



写真-1 大型水路実験の様子

表-1 実験の諸元

水路長: 45m	水路幅: 1.08m
勾配: 1/20	流量: $0.5\text{m}^3/\text{s}$

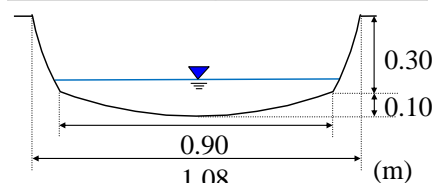


図-1 水路横断面図


石礫①	石礫②	石礫③
60~90mm	90~120mm	120~150mm
		
		
楕円体型	円盤型	非対称な形状

図 - 2 大型水路実験で用いられた石礫の粒径区分と形状の特徴

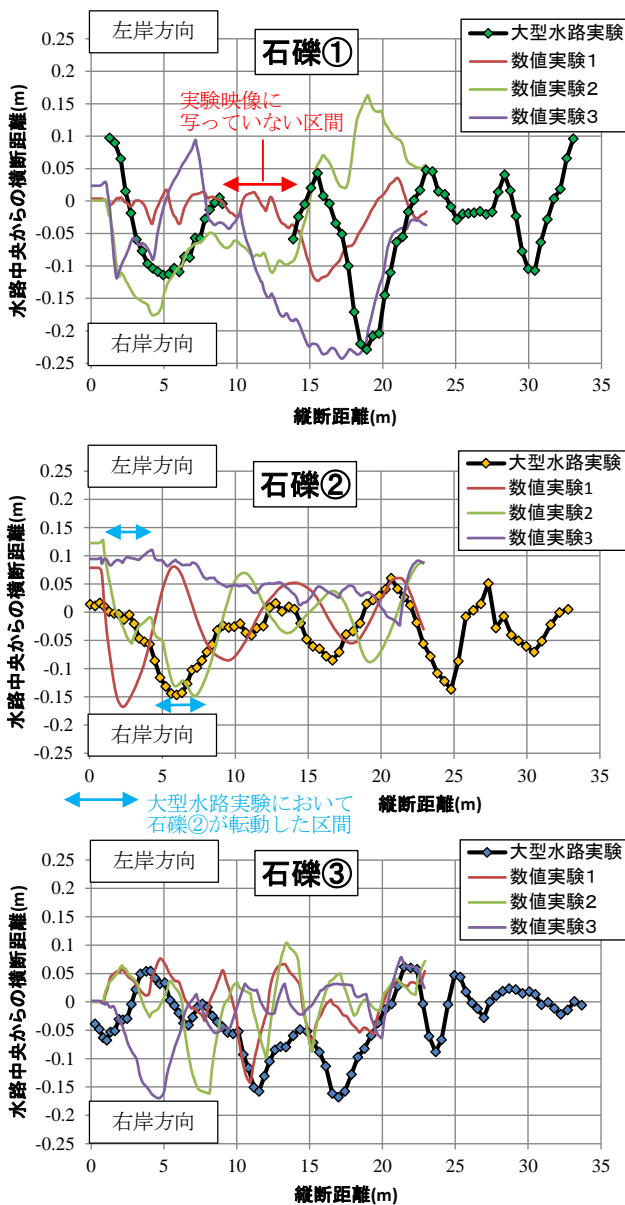


図 - 3 大型水路実験および数値実験における石礫の移動軌跡

### 3. 大型水路実験の画像解析の結果

図 - 3 に大型水路実験における石礫の移動軌跡を

示す。大型水路実験の映像から、一様な形状をもつ球とは異なり、どの石礫も跳躍と回転が混在する複雑な移動形態を示した。これは、様々な角や平面をもつ石礫の特徴的な移動形態と考えられる。具体的には、楕円体型の形状をもつ石礫①は、主に跳躍と長軸を回転軸とした回転により移動する。円盤型の形状をもつ石礫②は、映像の前半では回転するが、後半ではあまり回転せず水路中央を這うように移動する。これは、短軸回りの形状が円に近く短軸を回転軸とした回転をしやすいが、石礫が倒れると扁平な形状のため回転が生じづらいという特徴を表している。非対称な形状をもつ石礫③は、水路床と衝突することにより頻繁に方向を変えながら移動する。石礫①と③を比べると、石礫①は対称性の強い形状のため回転軸が定まり運動が安定するが、石礫③は非対称性が強く、回転軸が定まらず運動が安定しないため、横断方向への移動距離は小さく、水路床と衝突することにより頻繁に方向を変えながら移動したと考えられる。

### 4. 数値実験の概要

数値実験で用いたモデル<sup>3)</sup>は、移動する石礫を Lagrange 的に、周囲の液体の流れを Euler 的に直接解析するものである。解析では、石礫の存在する部分を密度の異なる流体として与え、全体を非圧縮性流れとして解く。石礫の運動解析では、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解き、流れの解析の固相の位置と流速を修正する。石礫の形状は、図 - 4 に示すように隙間がないように小球を重ね合わせた球体連結モデルで表現する。数値解法の詳細は文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

表 - 2 に大型水路実験で用いた石礫①②③をモデル化したものの諸元を示す。モデル化した石礫の代表粒径は同一体積の球の直径と定義し、図 - 2 に示す粒径範囲の中央値となるように粒子の大きさを決めた。長径、中径、短径は代表粒径で無次元化した値である。長径( $a$ )、中径( $b$ )、短径( $c$ )を用いた形状評価の無次元量 Shape Factor( $= c/\sqrt{ab}$ )を指標にすると、3つの石礫の中では、Shape Factor の値の大きな石礫③が一番球に近い形状であり、Shape Factor の値の小さな石礫②が球と大きく異なる形状となる。

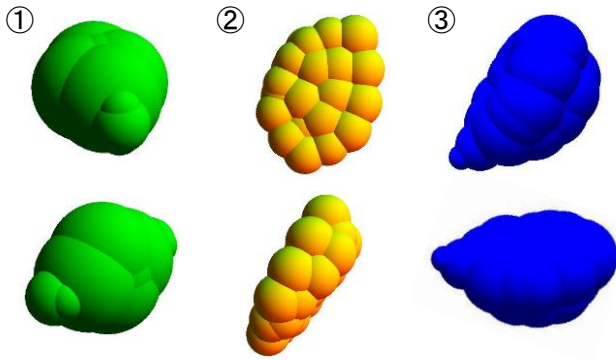


図 - 4 数値実験で用いた石礫モデル

表 - 2 石礫モデルの諸元

	石礫①	石礫②	石礫③
代表粒径( $d$ )	75mm	105mm	135mm
長径( $a/d$ )	1.39	1.50	1.34
中径( $b/d$ )	1.01	1.00	0.90
短径( $c/d$ )	0.79	0.60	0.83
Shape Factor ( $c/\sqrt{ab}$ )	0.68	0.49	0.75

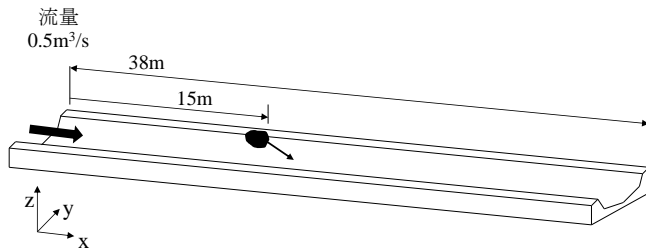


図 - 5 数値実験水路の諸元

図 - 5 に数値実験水路の諸元を示す。水路長 38m, 水路勾配 1/20 である。上流端は、大型水路実験と同様に流量  $0.5\text{m}^3/\text{s}$  に一致するように一様流速を与え、下流端には圧力ゼロを与えた。石礫は、流れが発達した水路上流端から 15m, 水路床から 0.40m の高さより、初速度  $3.0\text{m/s}$  を与え投入した。数値実験は、石礫モデルごとに投入時の横断位置と向きを変化させ、3 ケースずつ行った。

## 5. 数値実験の結果

図 - 3 に数値実験における石礫の移動軌跡、表 - 3 に大型水路実験および数値実験における粒子の平均移動速度、平均振幅、平均跳躍距離を示す。ただし、平均跳躍距離に関して、大型水路実験の平面映像から求めることは困難であったため、数値実験で求めた値のみを示す。大型水路実験の平均移動速度は、石礫が映像に映り始めた地点より 23m 移動する区間の平均値である。振幅は、石礫粒子が一連の運動で横断方向に移動した距離と定義した。数値実験の値は、3 回の試行で得られた移動速度、振幅、跳躍距離を平均したものである。大型水路実験と比べ数

表 - 3 大型水路実験および数値実験における平均移動速度、平均振幅、平均跳躍距離

	石礫①	石礫②	石礫③
平均移動速度[m/s]	3.59	3.94	3.68
平均振幅[m]	0.15	0.12	0.11
平均跳躍距離[m]	-	-	-
	大型水路実験	数値実験	数値実験
	2.95	3.26	3.11
	0.13	0.14	0.11
	1.31	1.00	1.00

値実験では、全体的に速度が小さいが、石礫の平均移動速度は、石礫②>石礫③>石礫①であり、大型水路実験と数値実験で同様の傾向を示した。また平均振幅に関しては、両者は全体的に近い値を示した。

図 - 6 に示す数値実験における石礫の運動の様子と図 - 3 の大型水路実験および数値実験における石礫の移動軌跡を比較する。石礫①は、前述のように大型水路実験では主に長軸を回転軸とした転動と跳躍により移動しており、図 - 6 の(a)に示すように数値実験でも同様の移動形態を示している。長軸を回転軸とした転動および跳躍がそれぞれ連続して生じる。この理由は、対称性の強い形状のため回転軸が安定し、運動が安定するためと考えられる。図 - 3 の移動軌跡も同様の傾向を示している。石礫③は、大型水路実験では水路床と衝突することにより、頻りに方向を変えながら移動しており、図 - 6 の(d)に示すように、数値実験でも同様に跳躍し水路床と衝突することにより、頻りに方向を変えながら移動している。また図 - 3 の移動軌跡も同様の傾向を示している。石礫②は、大型水路実験では前半に短軸を回転軸とした転動をするが、その後は水路中央を這うように移動した。数値実験 1 および 2 は、大型水路実験と同様に水路中央を這うように移動した。また図 - 3 の移動軌跡も同様の傾向を示している。しかし数値実験 3 では、図 - 6 の(c)に示すように大型水路実験の前半で見られた転動が継続し、石礫は直線的に移動している。図 - 7 に数値実験における粒子の平均移動速度を示す。石礫①および③は、実験ケースごとに大きな差はないが、石礫②では、水路中央を這うように移動する場合と転動しながら移動する場合を比較すると平均粒子速度に大きな差異が現われる。(b)と(c)の比較から両者の違いの原因は



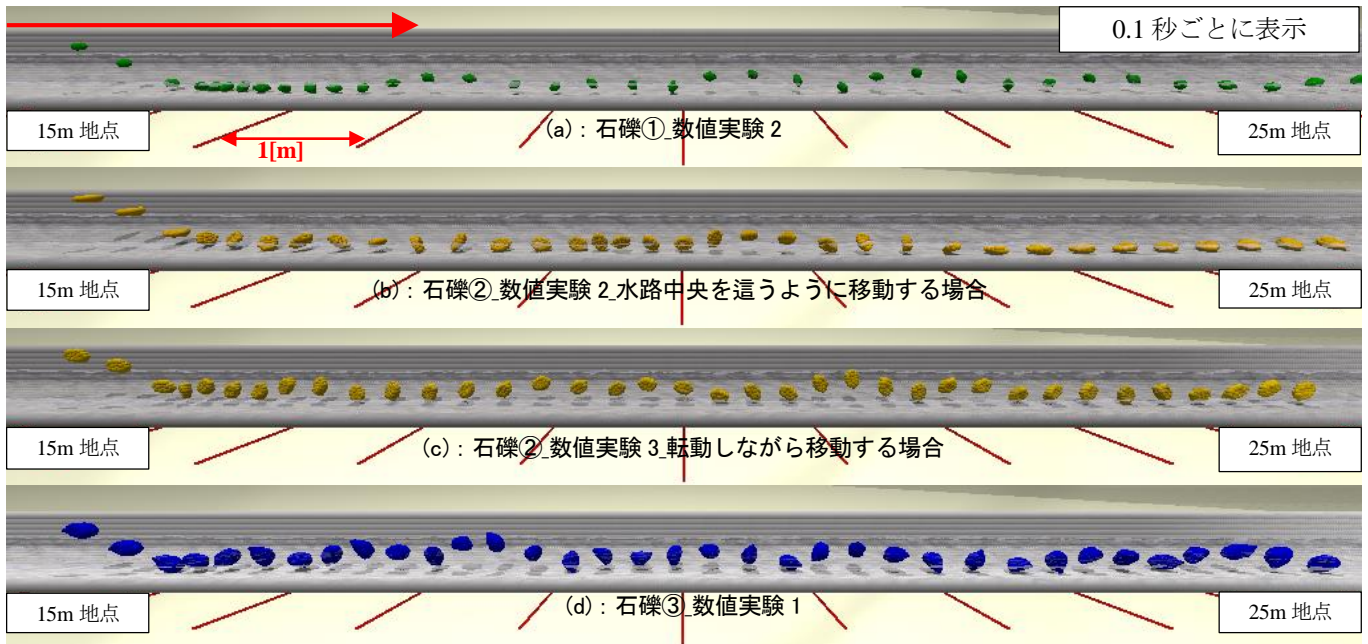


図 - 6 数値実験における石礫の運動の様子

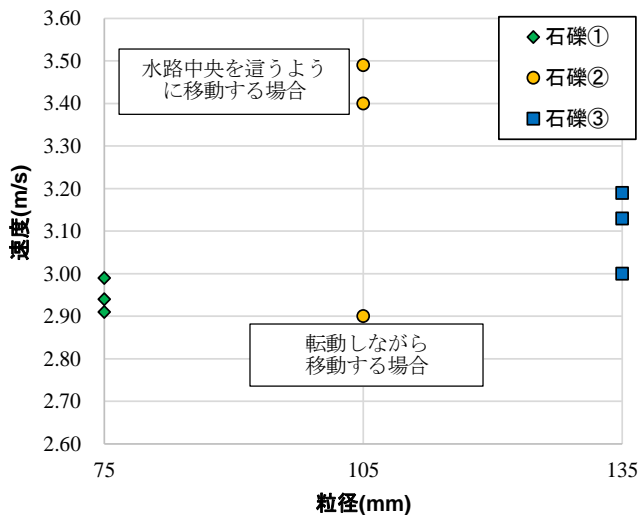


図 - 7 数値実験における平均移動速度の比較

2 つ考えられる。第一は、水中に投入した時の粒子の初期姿勢の違い(図 - 6 (b), (c))に関係している。第二の要因は、大型水路実験では、単一粒子実験の前に大量の土砂流下実験が行われており、これにより水路には磨耗が生じており、一方、数値実験ではこのような磨耗による水路の凹凸を十分に再現できていないため、転動し続けたと考えられる。このように、石礫②はその形状が境界条件の影響を受けやすいことが分かる。しかし長い距離移動すると、安定な移動形態、すなわち水路を這うように移動するものと考えられる。

## 6. 結論と今後の課題

大型水路実験映像の画像解析および数値実験より得られた結論を示す。

(1) 石礫は、形状に応じた移動形態をとり、水流中を移動することが明らかとなった。

具体的には、楕円体型の石礫は、主に跳躍と長軸を回転軸とした転動で移動する。円盤型の石礫は、短軸を回転軸とした転動をするが、倒れると扁平な形状のため、水路底面を這うように移動する。非対称な形状の石礫は、水路床と衝突することにより、頻繁に方向を変えながら移動する。

(2) 形状の異なる石礫の数値移動解析の結果は、大型水路実験の粒子運動の移動機構を説明することができた。

今後は、これら3粒子が同時に投入されたときの個々の石礫の動きについて、単一の場合と比較し、水流中の移動に及ぼす粒子形状と相互の干渉の影響について検討する。

## 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，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，2005.
- 3)福田朝生，福岡捷二，内田龍彦：水流による石礫粒子群の移動機構とそのモデル化，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.68, No.4, pp.I\_937-I\_942, 2012.