

## 越流波による底質分級特性に関する基礎実験

Characteristics of sediment sorting due to wave overflow

横浜国立大学 准教授 鈴木崇之

### (研究計画ないし研究手法の概略)

混合砂礫に関する研究は、特に流砂過程に関してこれまでも数多く実施されている。混合効果に関する検討では、細礫に中砂が含まれると細礫と底面との摩擦が減少（減摩効果）し、さらに、より大きな運動量を持つ細礫に中砂が衝突することで運動量が受け渡され（衝突効果）、細礫単一のケースよりも混合砂礫の方がより運ばれやすくなることが報告されている<sup>1)</sup>。一方で、遡上波を考慮した混合砂礫の移動動態に関する検討もなされており、これらは津波堆積物にからめた内容が主に行われている。特に津波の場合は、通常波浪よりも大きい底質輸送力により粒径の大きな礫や岩まで輸送される。津波堆積物の分布形状や層厚などの情報は津波の水理量との相関が高いことから、津波外力の想定にも用いられている<sup>2)</sup>。

このように、混合砂礫に関する検討はこれまでもなされてきているが、遡上波による混合砂礫の輸送過程において、砂礫の混合比によりそれぞれの底質がどの程度影響し合っているのかについては、未だ検討の余地がある。そこで本研究では、混合砂礫における各粒径の混合比に着目し、各粒径の輸送距離への影響（分布形状特性）を検討する。さらに、単一砂礫での分布形状を用いて、混合砂礫の分布形状推定も試みた。

本実験は、オレゴン州立大学が所有する小型アクリル水槽（長さ 7m，幅 15.5cm）を用いて実施した（図-1）。実験水槽には 1/16 勾配の一樣斜面を作成し、汀線よりも陸側に関しては水平とする地形形状を作成した。使用する底質は 3 種類とし、それぞれの粒径は水槽の規模も考慮し、中砂（ $d_{50} = 0.64 \text{ mm}$ ）、粗砂（ $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$ ）、細礫（ $d_{50} = 4.05 \text{ mm}$ ）とした。著者は同様の実験を実施済みではあったが、中砂と粗砂の分離ができないことが問題であった<sup>3)</sup>。そこで、本実験では粗砂と中砂の分離を容易にするため、粗砂に青色カラーサンドを使用した（図-2）。混合率については、1 種類のみ、2 種類混合、3 種類混合に分けて実施した（表-1）。

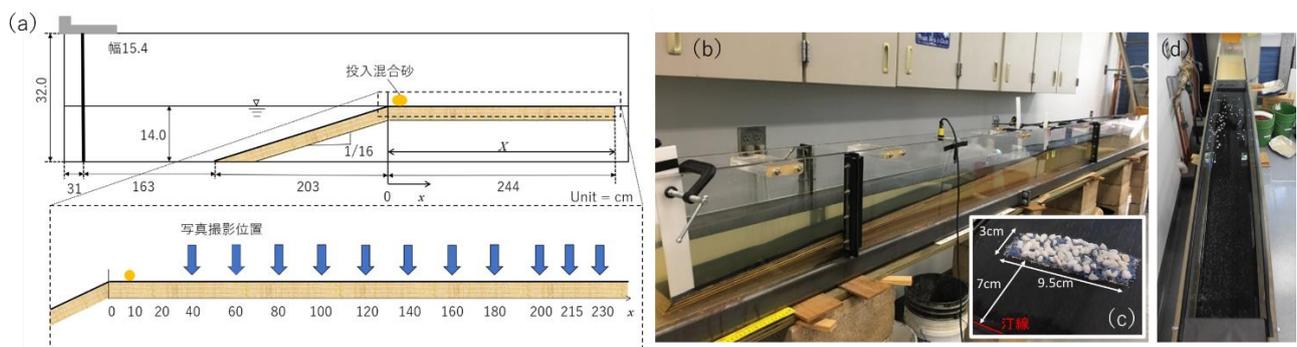


図-1 小型アクリル水槽の概要：(a) 水槽概略および写真撮影位置，(b) 水槽全景，(c) 混合砂礫マウンド，(d) 実験後の様子

実験では、一定量（15 ml）の混合底質を汀線位置から陸側 10 cm の地点にマウンド状に設置した。押し波（波高 4.1 cm）の造波後、陸側に輸送された混合砂礫をコンパクトカメラを用いて上方より岸沖方向約 20cm 毎に撮影を行った。各地点にて撮影された画像に対し処理を行い、粒径毎の占有ピクセルを算出した。その後、各地点での解析結果を統合し、解析範囲全体の空間分布を把握した。

始めに、撮影した原画像に対して解析範囲を設定後、境界線上に存在する砂礫を排除、白黒コントラストの鮮明化処理を行った（図-3）。その後、処理を行った画像に対し、各粒径が占めるピクセル数の算出を行った。図-4に底質比 1:1:1（Case 4）での各粒径（ピクセル）での占有ピクセル数を示す。中砂と粗砂の分離が困難となるケースに関しては、粗砂に青色カラーサンドを用いたことを利用し、クラスタリング手法（k-means法）を用いて粗砂のみを抽出し、両者の分離を行った。細礫の分布は、他粒径に比べて十分大きいため容易に分離が可能であった。

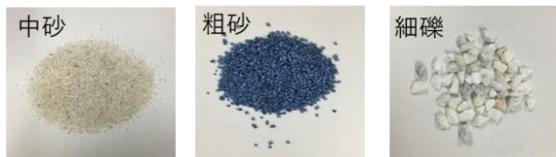


図-2 使用した3種類の砂礫

表-1 各実験ケースでの底質混合量

Case	中砂 [ml]	粗砂 [ml]	細礫 [ml]	底質比 中砂:粗砂:細礫
	(0.64 mm)	(1.60 mm)	(4.05 mm)	
1	15	0	0	1:0:0
2	0	15	0	0:1:0
3	0	0	15	0:0:1
4	5	5	5	1:1:1
5	7.5	7.5	0	1:1:0
6	7.5	0	7.5	1:0:1
7	0	7.5	7.5	0:1:1
8	3.75	3.75	7.5	1:1:2
9	3.75	7.5	3.75	1:2:1
10	7.5	3.75	3.75	2:1:1
11	10	5	0	2:1:0
12	10	0	5	2:0:1
13	5	10	0	1:2:0
14	0	10	5	0:2:1
15	5	0	10	1:0:2
16	0	5	10	0:1:2

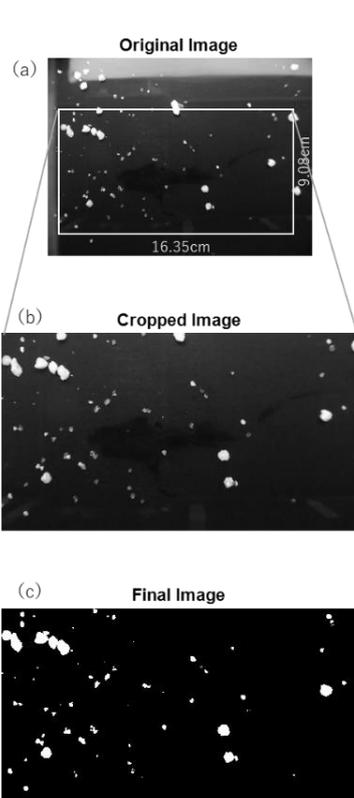


図-3 画像処理：(a) 撮影原画像，(b) 対象領域の切り取り，(c) 処理後の撮影画像

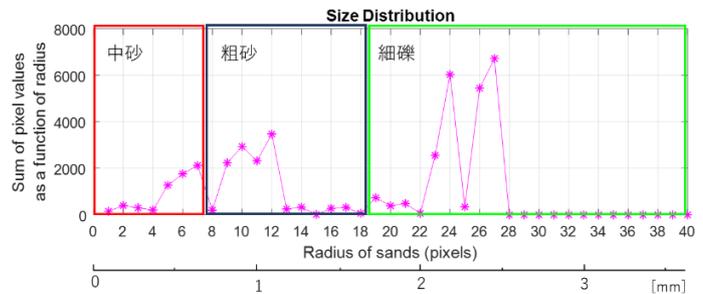


図-4 底質比 1:1:1(Case4)での各底質の空間分布実験ケース

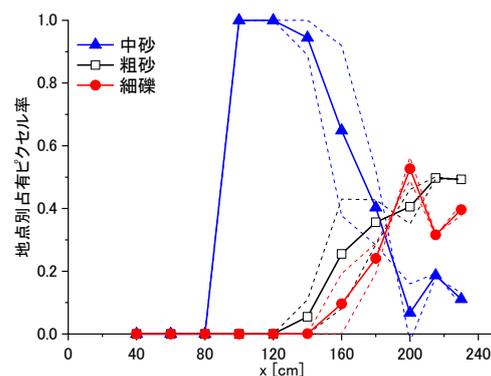


図-5 底質比 1:1:1(Case4)地点 x = 180 cm での粒径別占有ピクセル数

図-5に底質比 1:1:1 (Case 4) での各粒径の占有率の空間分布を示す。実験は各ケース 2 回実施し (図中の破線), 解析ではその平均値を用いることとした。検討を行った全ケースでの 1 回目と 2 回目の占有率の相関係数は平均 0.88 であり, 概ね良い再現性が得られていた。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

核実験ケースの解析結果を統合し, 各砂礫の空間分布特性の把握を行ったと共に, 単一砂礫の分布形状を用いた混合砂礫分布形状の推定を試みた。

#### (1) 各粒径砂礫の空間分布

##### (a) 中砂 ( $d_{50} = 0.64 \text{ mm}$ ) の分布形状

中砂を含む実験ケースの分布形状を図-6(a)に示す。ここで, 実線は中砂単一 (Case1) の形状であり, 破線は中砂を含む他のすべてのケースである。縦軸は各粒径ごとの占有ピクセル率であり, 中砂において考えると, 各地点での中砂ピクセル数を全地点での中砂の総ピクセル数で除した値である。中砂単一でのピーク位置は  $x = 100 \sim 140 \text{ cm}$  にあり, なだらかな凸型の分布形状を示している。一方, 混合砂礫のケースにおいては中砂単一に比べ両端部の占有率が減少し, 水路岸沖中央のピーク位置に集まる傾向がみられた。

##### (b) 粗砂 ( $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$ ) の分布形状

粗砂を含むケースの分布形状を図-6(b)に示す。ピーク位置は  $x = 160 \sim 200 \text{ cm}$  に位置し, 中砂, 細礫の有無に関わらず粗砂単一の形状とあまり変化は見られなかった。ただし, ピーク値に関しては, 混合砂礫となるとやや減少する傾向がみられた。ピーク分布位置は, 中砂のそれよりも陸側寄りであった。

##### (c) 細礫 ( $d_{50} = 4.05 \text{ mm}$ ) の分布形状

細礫を含むケースの分布形状を図-6(c)に示す。細礫のピーク位置は  $x = 180 \sim 215 \text{ cm}$  に分布しており, 混合比に関わらずピーク位置が一定であった既往の研究とは異なる結果となった。これは, 波高が前回よりもやや小さかったことにより波力が減少し, 特に細礫移動においてばらつきが大きくなったことが一因であると考えられる。細礫の分布範囲は  $x = 140 \sim 230 \text{ cm}$  であり, 他粒径に比べて最もピーク位置周囲に集まりやすく, かつ陸側に運ばれていた。混合砂礫のケースでは, 細礫単一と比べて陸側に移動するものの, 陸側端の形状の変化はほとんど見られなかった。

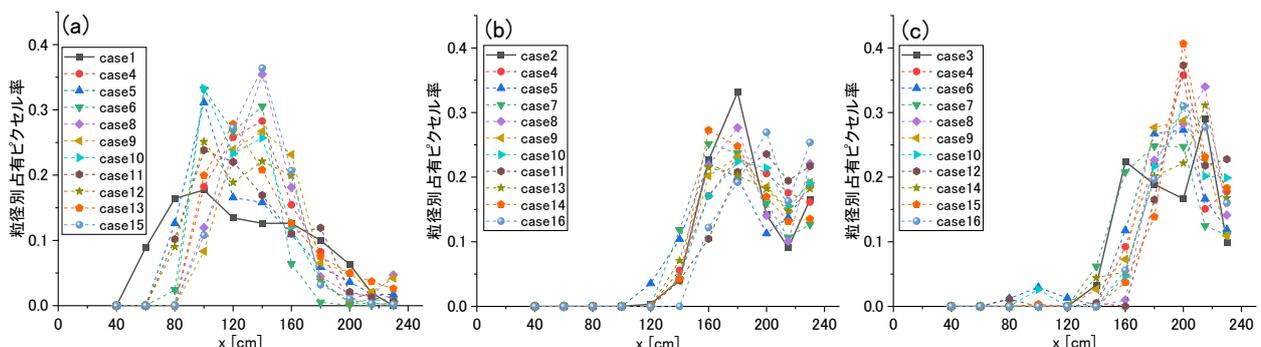


図-6 各粒径砂礫の空間分布: (a) 中砂を含むケース, (b) 粗砂を含むケース, (c) 細礫を含むケース。実線が砂礫単一, 破線が混合砂礫。

(2) 砂礫単一の分布形状を用いた混合砂礫分布形状の推定

各ケースでの砂礫の混合比を用いて、単一砂礫分布形状から各粒径の空間分布形状の推定を試みる。ここでは(1)において示した混合砂礫による砂礫単一分布形状への影響を考慮する。ただし、粗砂に関しては他の粒径による影響が小さかったことから、単一形状をそのまま使用することとした。

(a) 中砂分布形状の推定

中砂の分布形状は、両端部が岸沖中央部に集まる傾向を示した。また、この傾向は粗砂、細礫両方の影響を受けていた。そこで、図-6aの占有ピクセルが0.1における砂礫混合による距離の変化率を粗砂、細礫の混合率を用いて重回帰分析を行い、中砂移動への影響を表す関係式を導いた。この関係式から算出した変化率だけ中砂単一(Case 1)の分布形状の両端部を中央側に平行移動させた。この際、両者が重なった箇所についてはその位置において両者を加算することとした。図-7aに底質比1:1:1(Case 4)での結果を示す。ピーク値および汀線側移動が過小評価されているが、陸側分布など概ね形状の再現が可能となっている。

(b) 細礫分布形状の推定

中砂による減摩効果により、より運ばれやすくなることを考慮する。図-6bの占有ピクセルが0.15における距離の増加率とそれぞれの実験ケースでの中砂の混合割合との関係を見ると、中砂が増えるほど細礫は遠くに運ばれやすくなっていた。この関係を混合砂礫のケースに適用し、細礫単一(Case 3)の分布形状から混合砂礫での細礫分布形状の推定を試みた。細礫単一分布形状を陸側に平行移動し、陸側端を超える部分については、細礫分布範囲に等配分することとした。図-7bに底質比1:1:1(Case 4)での細礫の推定分布を示す。細礫単独分布の影響でピーク位置にやや差がみられるが、形状そのものは概ね一致している。

(c) 混合砂礫の分布形状の推定

上記(a), (b)に示した両結果を統合し、それぞれ砂礫単一の分布形状を用いて底質比1:1:1(Case 4)における混合砂礫全体の分布形状の推定を行った結果を図-7cに示す。ただし、粗砂については他の砂礫から影響を受けないとして解析を行った。単純に比率を掛け合わせた推定値とは異なり、それぞれ他粒径の影響を加味させることで、精度の向上がみられた。

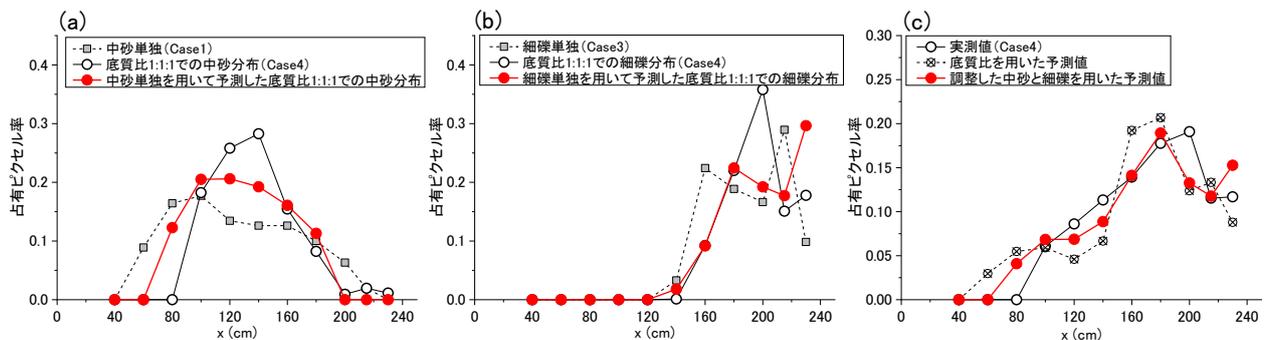


図-7 底質比1:1:1(ケース4)における各粒径の実測分布形状と単一砂礫から推定した推定分布形状:

(a) 中砂, (b) 細礫, (c) 混合砂礫

## まとめ

小型アクリル水槽（長さ 7 m, 幅 15.5 cm）を用いて、波高 4.1 cm の押し波を作用させ、陸上遡上波による中砂、粗砂、細礫の混合比を変化させた混合砂礫の移動特性の把握を目的とした実験を行った。また、実験は砂礫単一でも実施しており、これら砂礫単一の分布形状を用いた、混合砂礫中の砂礫分布形状の推定も併せて試みた。以下に主要な結論を示す。

(1) 粗砂に青色カラーサンドを用いたことにより、画像解析時に色によるクラスタリングができ、中砂と粗砂の分離が可能となった。

(2) 混合砂礫に含まれる中砂と細礫の分布形状は、単一粒径での分布形状とは異なっていた。中砂については粗砂、細礫による衝突効果で移動が促進されるものの移動先端部は抑制され、中央部に集まる形状となった。また、細礫は中砂による減摩効果により移動が促進されていた。

(3) 混合砂礫中の中砂、細礫の分布形状は、それぞれの砂礫単一の分布形状を粗砂、細礫の混合率、中砂の混合率を用いて簡易的にその形状を推定することができた。また、混合砂礫の分布についても、用いた 3 種類の単一分布形状から推定することができた。

本研究では、混合砂礫の移動特性に着目したことから、波浪場は押し波の 1 ケースのみとした。よって、上述した結論は本論にて示した実施条件での内容となる。今後は、他の波浪場での実施、また、相似則の問題についても検討していく必要がある。

## （参考文献）

- 1) 池田宏, 伊勢屋ふじこ : 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響, 筑波大学水理実験センター報告, 9, 43-47, 1985.
- 2) Imamura, F., Goto, K. and Ohkubo, S : A numerical model for the transport of a boulder by tsunami, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C1), 2008.
- 3) 鈴木崇之, Cox, D. T. : 陸上遡上波による混合砂の移動特性に関する基礎的実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 75(2), I\_337-I\_342, 2019.

## （発表論文）

鈴木崇之, 金子綾, 比嘉紘士, 中村由行 : 陸上遡上波による混合砂礫の移動特性および細礫分布形状の推定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2020, 投稿中.