

## 38. 直線水路における分級現象の実験的検討

齋藤 和樹<sup>1\*</sup>・堀口 俊行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\*防衛大学校，理工学研究科前期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

<sup>2</sup>博（工），防衛大学校准教授，建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

\* E-mail: em61030@nda.ac.jp

大規模化傾向にある土石流の対策として透過型砂防堰堤が主として建設されている。その捕捉機構は、土石流の分級現象を利用して巨礫等により透過部を閉塞し、後続土砂を捕捉するものである。これは、先端部に巨礫等が集中することを前提で成り立っている。筆者らは、回転円筒装置を用いて水と礫を用いた実験を行い、礫の循環運動と底面粗度により分級が生起することを確認したが、礫の循環運動は直線水路実験では確認がされていない。そこで本研究は、直線水路実験装置を用いて、水と礫の混合流体の礫の動きを追跡し分級現象について検討するものである。その結果、直線水路においても礫の循環運動によって分級することが分かった。

**Key Words :** debris flow, segregation, straight channel

### 1. 緒言

近年の局地的豪雨や大型台風により土砂災害が頻発しており、中でも土石流災害は我々の生活基盤に甚大な被害をもたらしている。その対策構造物の一つである透過型砂防堰堤は、平時は水や砂を流下させ、土石流が発生した場合は、巨礫が土石流先端部に集中する分級現象を利用して、堰堤の透過部を巨礫で閉塞することで、後続流全体を捕捉するものである。しかし、現実には土石流のフロント部が分級せずに流下している事例もあることや、流下運動のどの時点で分級するのか等、土石流の分級現象に関して未解明な部分が多い。

土石流の先端における巨礫集中機構の研究は数々なされており<sup>1),2)</sup>、Bagnold<sup>3)</sup>は、河床から作用するせん断力等の影響を受けた礫の粒子における衝突によって発生する分散圧力を用いることで、逆グレーディング現象の基となる、大粒径の浮き上がりについて説明している。また、大同<sup>4)</sup>は、Bagnold<sup>5)</sup>の分散圧力を用いることで、急勾配で発生する粒子流中において、大粒子は上方に小粒子は下方に移動する、ふるい分け効果を示した。さらに、山野・大同<sup>6)</sup>は、平均的な粒子の挙動を Bagnold<sup>5)</sup>の流動モデルで表現し、大粒子に対して小粒子は下方に移動すること

を定量的に示した。橋本・椿<sup>7)</sup>は、大粒径が集中する機構の前段階として、大小2種の砂礫を混ぜた混合砂を底質とした土石流実験を行った。そこでは、各層における大小粒子の軌跡や速度を測定して逆グレーディングの生起条件を考察した。その結果、土石流の流動層では小粒径が多い場合には、大粒径の上昇により、逆に大粒径が多い場合には小粒径の下降により逆グレーディング現象が生ずることで、上層に浮かんだ巨礫は浅層の速い流速のために先頭部へ送り出されることを示した。

筆者ら<sup>8)-12)</sup>は、透過型砂防堰堤捕捉の性能評価に直線水路実験を行っている。そこでは、巨礫や流木が先端部に分級する条件を作為するために、底面粗度を人工的に与えている<sup>13)</sup>。しかし、直線水路の実験において、底面粗度の与え方によっては、流路長に制限があるため、分級がうまく発生せずに、巨礫や流木が先頭部に集中しないことがある。そのため、土石流の先端部で生じている分級現象を細かく観察することは困難であることがわかっている。そこで、円筒型の水路を回転させる回転円筒実験装置や直線水路にベルトコンベアを設置した底面走行式水路などを用いて、流路長を無限に確保し、水路内で生じる現象を定点で定常状態にして観測する研究が行なわれている。

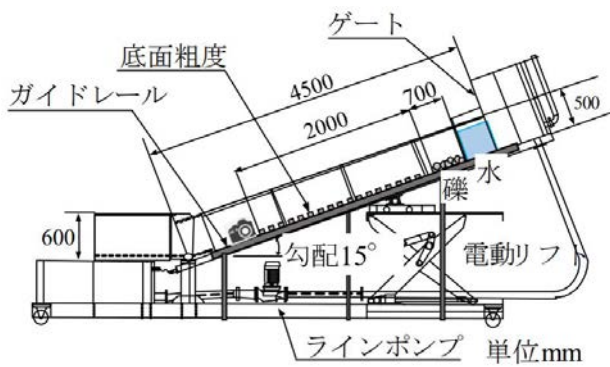


図-1 直線水路実験装置

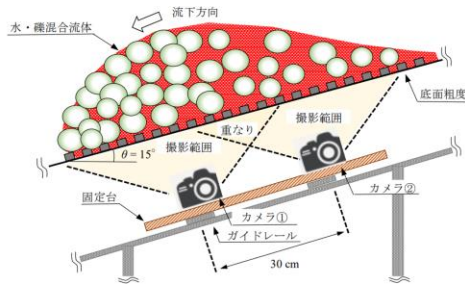


図-2 撮影要領

著者ら<sup>14)-19)</sup>も、水路内で生じる現象を定点で観測する回転円筒実験装置を用いた研究を行っている。そこでは、2粒径混合状態の分級現象の生起に関する実験を行い、混合球形における大粒径の集中機構を整理した。次に、水のみを入れた回転円筒内において、土石流の特徴である、先端部が段波状に切り立つ現象<sup>20)</sup>が生じることを確認した後に、水と流木の混合状態における流木の運動形態について整理し、段波が生起している状態において、水が循環することで、流木の分級現象が生起するものと考察した。また、水と3種の混合礫を混ぜた混合流体を用いた実験を行い、そこでは底面粗度の有無、底面速度等のパラメータを変化させることで生起する段波形成条件、運動形態および分級生起条件を整理するとともに、直線水路実験の結果と回転円筒実験の対応関係について整理した。しかし、礫塊内の循環運動は回転円筒実験装置では確認できたものの、直線水路実験装置では確認できていない。

そこで本研究は、直線水路を用いて水と礫の混合流体の流体内の礫の動きを追跡し、土石流流下時に生起する分級現象について解明するために検討するものである。

## 2. 実験の概要

### (1) 直線水路実験装置

図-1に示す直線水路実験装置は、水路長 4.35 m、

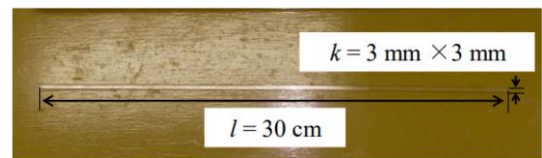


写真-1 底面粗度

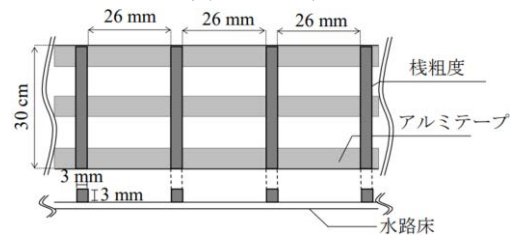


図-3 底面粗度の間隔

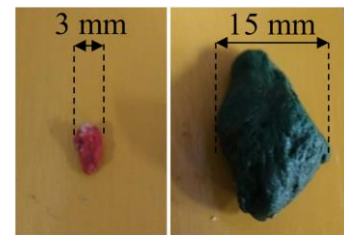


写真-2 礫供試体

水路幅 30 cm、水路深 50 cm であり、水路勾配 ( $\theta = 0^\circ \sim 20^\circ$ ) は、可変勾配である。本実験では、水路勾配を土石流の発生条件と言われている  $\theta = 15^\circ$  とした。さらに、図-2に示すように、水路内の流体の運動を定点で観察できるように実験装置と平行にガイドレールを設置し、土石流モデルの流下方向に合わせてビデオカメラ2台 (撮影フレームレート 960 fps、記録フォーマット 24 p) を 30 cm 間隔で連結し、移動 (以後、ラグランジアン系と称する。) することで土石流先端が画面内で停止しているように観察できるようにした。これに対して、カメラを固定し、画面内を土石流が移動する撮影をオイラリアン系と称する。また、この2台のカメラの撮影範囲は重なっており、重複部分については実験後の画像処理で一体のものとして観察できるようにしている。

### (2) 底面粗度

写真-1に示す底面粗度は、粗度高さ  $k = 3 \times 3$  mm のアクリル製角柱の棧粗度を用いた。これを、図-3に示すように純間隔  $b = 13$  mm 間隔で両実験装置の水路床に取り付けた。この際、底面粗度としての材質を活かすためアクリル製角柱の両端と中央の3か所を縞模様でアルミテープで固定した。なお、粗度高さ  $k$  は、最小粒径の直径の半分以下で設定し、純間隔  $b$  を礫と粗度の衝突回数を増やし、また、礫塊内での配置変換を促進するため、文献19)での純間隔よりも狭めた。



(a)  $l = 50$  cm 到達時



(b)  $l = 100$  cm 到達時

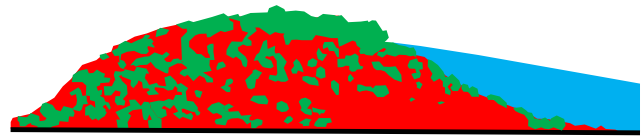


(c)  $l = 150$  cm 到達時

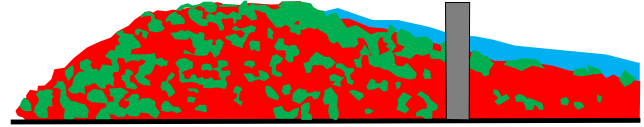


(d)  $l = 200$  cm 到達時

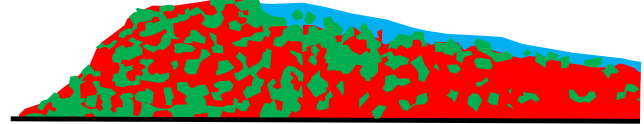
写真-3 分級状況



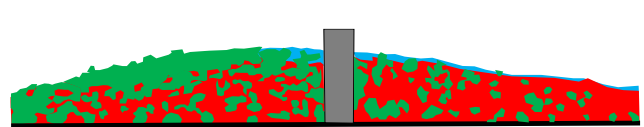
(a)  $l = 50$  cm 到達時



(b)  $l = 100$  cm 到達時



(c)  $l = 150$  cm 到達時



(d)  $l = 200$  cm 到達時

図-4 占有域トレース

### (3) 礫供試体

写真-2 に、2種類の礫モデル（以下、モデル A、B と呼称する。）を示す。これらは、表面に凹凸のある軽石である。また、礫モデルA（小）、B（大）の平均粒径 $\phi$ は、3、15 mm であり、識別を容易にするために赤、緑に着色した。なお、比重は1.3であり、文献19)での礫モデルより比重を小さくしている。

### (4) 実験要領

実験ケースは、体積30 lの水と体積20 lの A、B の2種類の礫モデルを1:1で組み合わせた計50 lを混ぜた1ケースである。流下に際して、礫は底面粗度の手前で均一に混ぜた状態で堆積させ、その後方に所要の水を溜めた状態を初期状態として流下させるダムブレイク方式を用いた。この時、ゲートの開閉は人力で行っている。

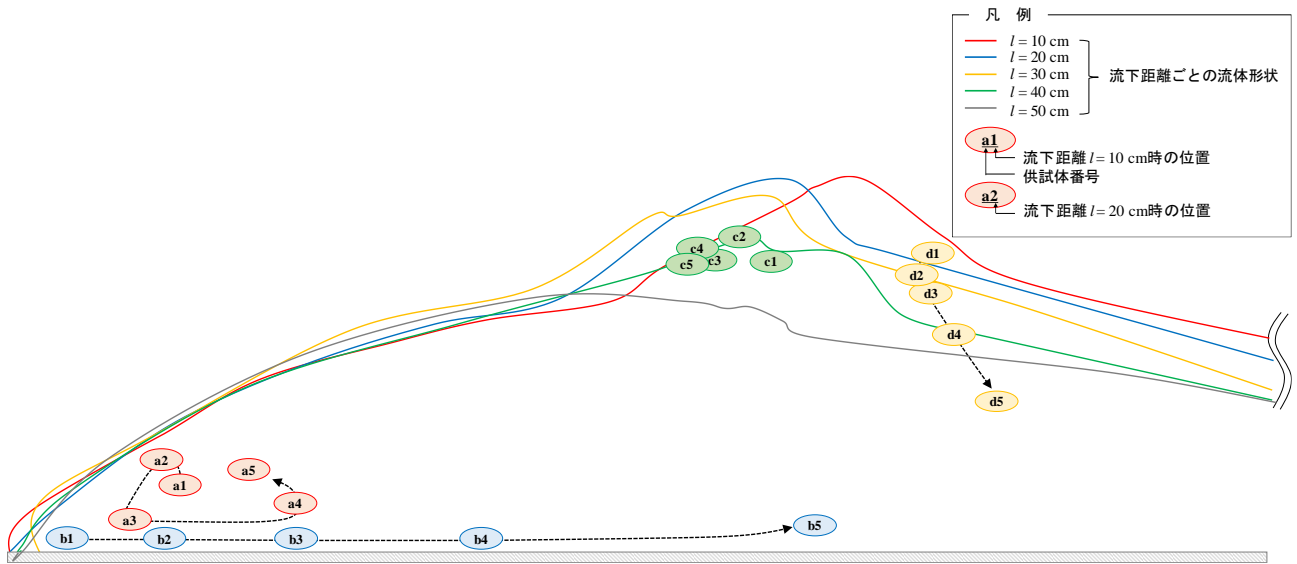
## 3. 実験結果

### (1) 運動形態および分級状況

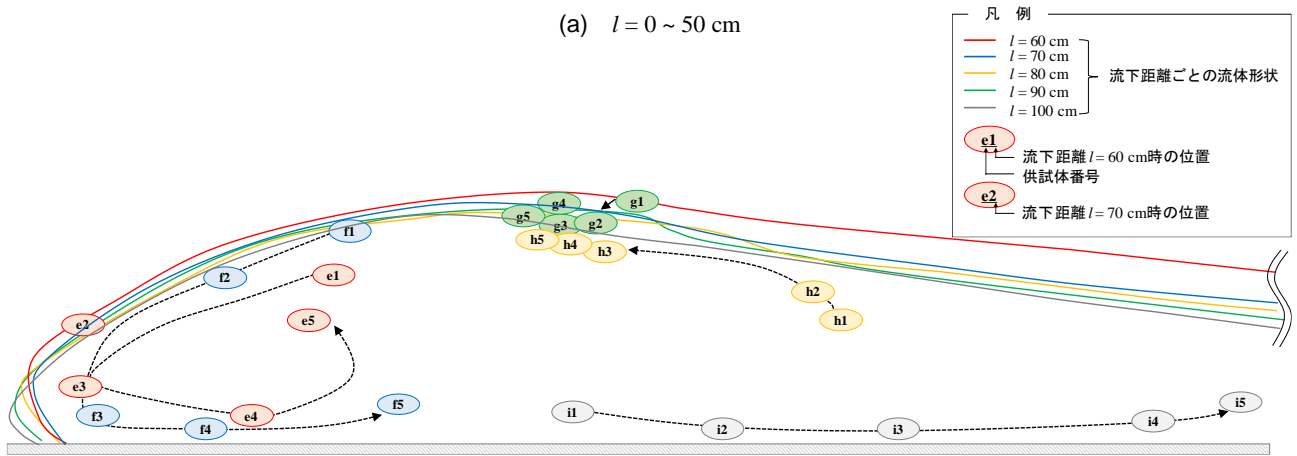
写真-3に流下距離ごとの運動形態および分級状況を示す。また、図-4に水と礫の占有域をトレースしたものを示す。なお、カメラ①②の撮影範囲の重なり部分の中央より下流側を先端部、上流側を後続

塊と呼ぶものとする。

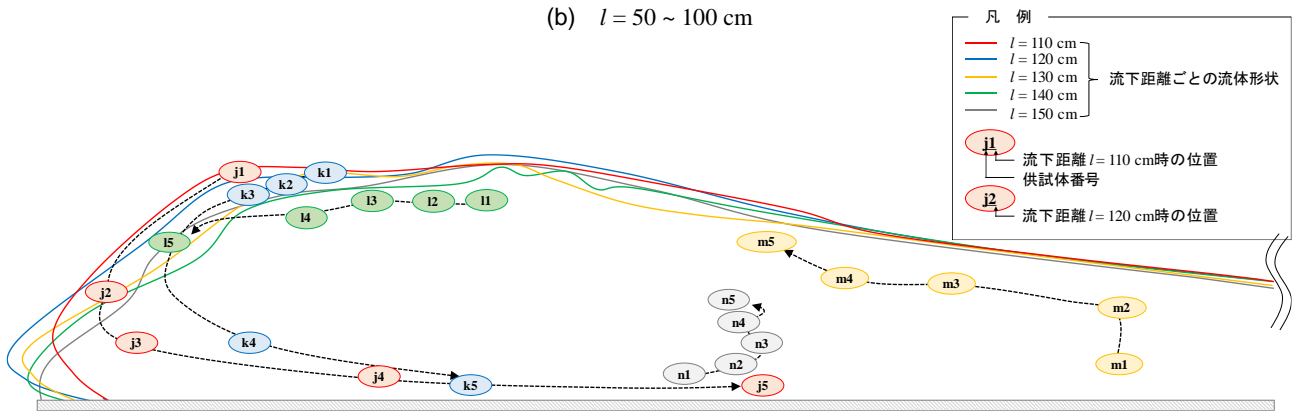
写真-3(a)の $l = 50$  cm到達時は、礫塊が先行し、後続塊に水が留まり、礫塊先行・水残置状態となっている。この時、図-4(a)に示すように礫のモデルAとモデルBは、礫塊内で様に混ざり合っており、分級はしていない。写真-3(b)の $l = 100$  cm到達時は、写真-3(a)よりも礫塊が上下流に拡がり、最大礫塊高が15 cmと低くなっている。水は礫塊の中に侵入するものの先端部まで浸透しておらず、礫塊先行・水残置状態のままである。図-4(b)に示す占有域トレースを見ると、未だにモデルAとモデルBは、礫塊内で様に混ざり合い分級はしていない。ただし、図-4(a)と比べると先端部と後続塊の中間の表面にモデルBの礫が多く集まっている。さらに、写真-3(c)の $l = 150$  cm到達時では、水と礫が混合し、水・礫混合状態となっている。また、先端部が盛り上がり切立つような段波形状となっている。この時、図-4(c)では、先端部にモデルA、後続塊にモデルBが多く集まりつつあることが判る。最後に、写真-3(d)の $l = 200$  cm到達時には、水が礫塊内部に浸透して一体となる。このため礫塊は、一気に流動化し、最大礫塊高は11 cmと、流下開始直後の約半分まで薄くなる。また、図-4(d)にも見られるが、先端上部および流体表面にモデルBが集中し、下流に向かって高速で流れ出している。つまり、先端部に巨礫が集中する分級現象が現れている。



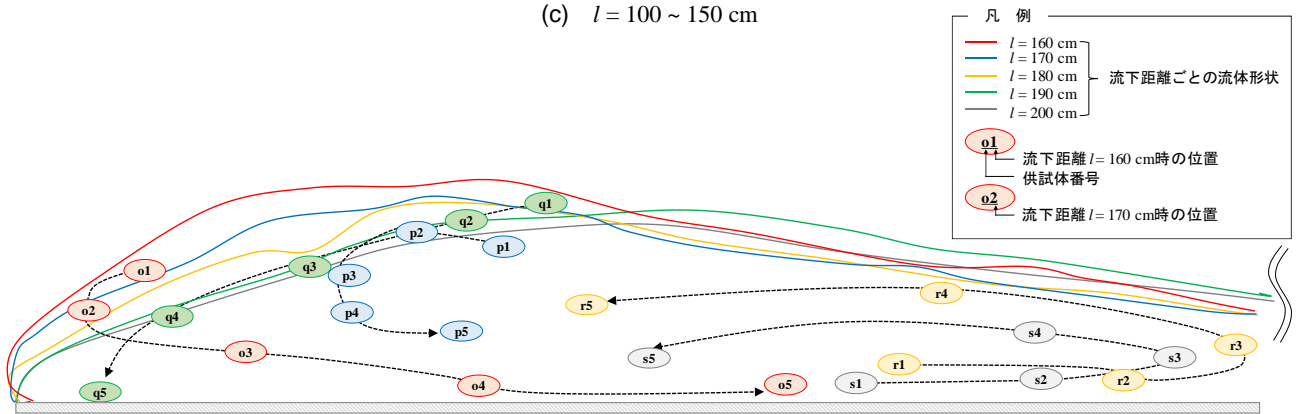
(a)  $l = 0 \sim 50$  cm



(b)  $l = 50 \sim 100$  cm



(c)  $l = 100 \sim 150$  cm



(d)  $l = 150 \sim 200$  cm

図-5 礫塊内の運動

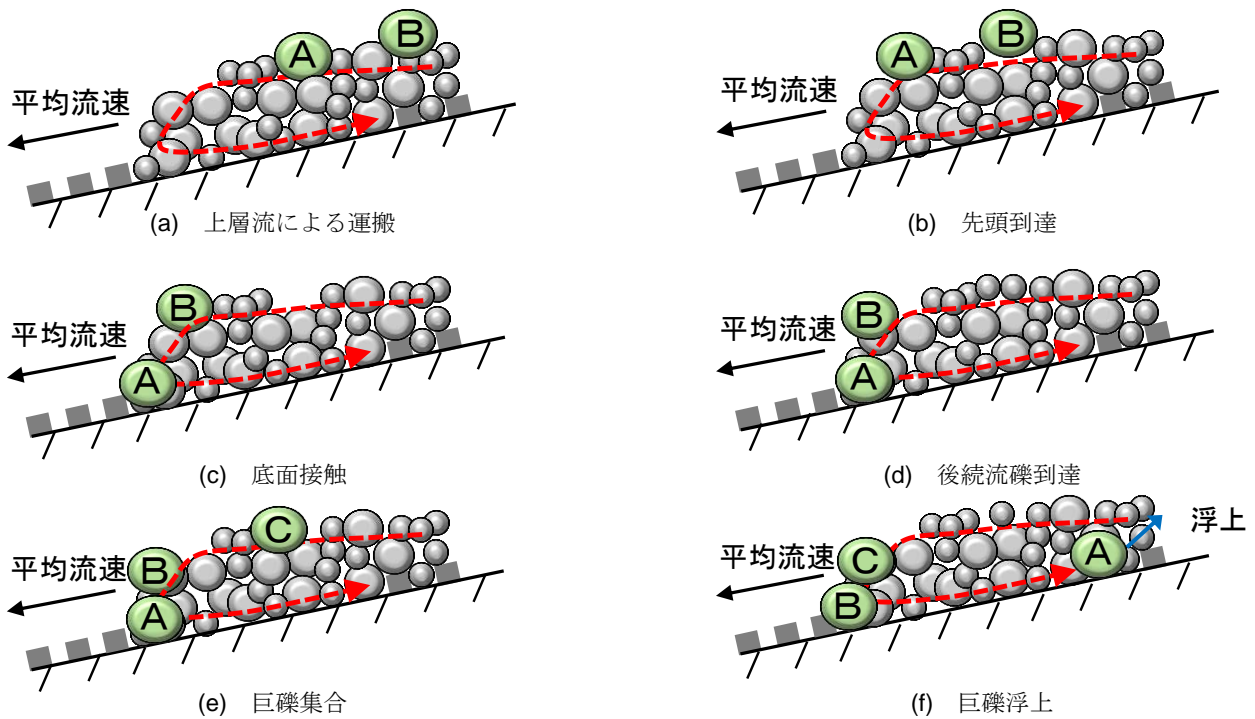


図-6 礫塊内循環運動と分級メカニズム

## (2) 循環運動

図-5に流体内の個別の礫（モデルB）の運動のトレースを示す。図-5(a)は、流下距離 $l = 0 \sim 50$  cmにおける礫の運動軌跡を示している、先端部に存在する供試体番号aは、狭い範囲で循環している。一方、先端部に存在する供試体番号bは、底面粗度との衝突により後方へ後退している。礫塊上部の供試体番号cは、配置変換は微小であり、固化している状態である。また、先端に達した供試体番号dは、流体の流下に伴い支持する礫塊がないため水路底面へと沈降している。

図-5(b)は、流下距離 $l = 50 \sim 100$  cmの運動を示している。先端部表面にある供試体番号e, fは、図-5(a)と同様に循環運動を示しているが、その循環範囲が広がっている。一方で、礫塊上部の供試体番号gは、図-5(a)と同様に、配置変換していない。後続流の中間層に位置する供試体番号hは、 $h1 \sim h2$ と浮き上がりを見せながら、多少であるが前進し、 $h2 \sim h3$ にかけて大きく前方へ進出している。ただし、礫塊上部に固化している礫塊に進出を妨げられる。後続流の水路底面の供試体番号iは、底面粗度の影響を受けて後退し、 $i4 \sim i5$ の間に礫塊高さの約1/3ほどまで浮き上がる。

図-5(c)は、流下距離 $l = 100 \sim 150$  cmのものを示している。先端部表面の供試体番号j, kは、図-5(b)とは異なり、底面粗度によってブレーキをかけられて、後方へ後退している。一方、図-5(a)～(b)において

礫塊上部で固化状態であったものが、液状化して、速い流れを作り出し先端部へ速度を増して進出している。一方、水路底面にあった供試体番号m, nは、底面粗度の影響を受けて浮き上るように移動している。この時、供試体番号mは浮き上って表層に達し、その後、上層部で前進している。

図-5(d)は、流下距離 $l = 150 \sim 200$  cmのものを示している。礫の全体的な動きは図-5(c)とほとんど同じである。供試体番号r, sの後続流の礫は、後退～浮き上がり～前進の範囲が上流部へと拡大している。

以上の結果、直線水路の礫塊内の相対運動において、当初、小さな循環運動が生じ、その後、流下するにつれて、循環運動が全域に拡大している。

## (3) 礫塊内循環運動と分級のメカニズム

このようにラグランジアン系において循環運動が生じている場合、オイリアン系に速度場を戻すと、底面の礫は決して逆登るわけではなく、下流に向かって移動する速度を有している。ただし、上流部の流れは、相対的に速く流れていることとなる。この「土石流内は上層部に速い流れが生じる」ことは、文献7)において指摘されているものである。

以上の直線水路実験観察に基づき、図-6の模式図によって分級生起と礫塊内循環運動との関係を説明する。図-6(a)に示すように上層部にある巨礫AとBは、ある間隔で速い流れによって土石流先端部に運搬される。そして、図-6(b)に示すように、

やがてAは土石流先端に達する。Aは、これ以上前に進むと支えるものがないので、図-6(c)のように下降し、底面と接触する。底面に粗度があるとAの動きは、底面摩擦によって拘束されるので、動きが鈍くなる。その間に、図-6(d), (e)に示すように、後続のBが近づいてAとBによる先端部の巨礫集合塊が形成される。図-6(f)のように、Aはやがて、底面粗度の影響で、巨礫集中塊から離れて、相対的に上流方向に向かうが、何らかの上昇速度（循環運動の一部）によって、上層に浮上し、図-6(a)の状態となり、巨礫塊形成メカニズムに復帰することになる。これは、文献19)において回転円筒実験で指摘されているものである。

#### 4. 結 言

本研究は、土石流流下時に生起する分級現象について解明するために、直線水路実験装置を用いて、水と礫の混合流体の礫の動きを追跡し、循環運動について検討したものである。得られた成果を要約すると以下のようになる。

- 1)最大礫高と最大水深は流下距離が大きくなるにつれて、流体形状が伸びるため、礫塊高と水深は減少する。
- 2)本実験の運動形態は礫塊先行・水残地状態と水礫混合状態の2種類に区分される。
- 3)文献15)の回転円筒実験における礫塊の循環運動と同様の現象を直線水路実験においても生起することを確認した。このことによって、先端部に巨礫が集中することで分級することが分かった。

今後は、実河川との関係性を論ずる指標となる相似率等について検討を深める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 諏訪浩：土石流先端への大岩塊の集中機構，京大防災研究所年報，Vol.31,B-1,pp.1-13,1988.
- 2) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研究所年報，Vol.20,B-2,pp.1-31,1977.
- 3) Bagnold, R.A.:Deposition in the process of hydraulictransport, *Sedimentology*, 10, pp.45-56, 1968.
- 4) 大同淳之：急勾配上の多量の砂れきを含む流れの流動特性，第18回水理講演会論文集，Vol.18,pp.199-203,1974.
- 5) Bagnold, R. A. : Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear,

- Proc. Roy.A,Vol.225,pp.49-63,1954.
- 6) 山野邦明，大同淳之：二粒径からなる混合粒径粒子流の流動機構，土木学会論文集，第357/II-3,pp.25-34,1985.
  - 7) 橋本晴行，椿東一郎：土石流における逆グレイディング機構，土木学会論文報告集，No.336,pp.75-84,1983.
  - 8) 渋谷一，原木大輔，香月智：透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.62,No.1,pp.66-73,2009.
  - 9) 渋谷一，香月智，大隈久，石川信隆，水山高久：流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.63,No.3,pp.34-41,2010.
  - 10)渋谷一，香月智，大隈久，石川信隆：根付流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.54A,pp.1087-1094,2011.
  - 11)渋谷一，香月智，國領ひろし，大隈久，石川信隆：透過型砂防えん堤に作用する流木混じり土石流荷重に関する実験，砂防学会誌，Vol.65,No.1,pp.54-61,2012.
  - 12)小松喜治，堀口俊行，香月智，石川信隆，水山高久：透過型礫防堰堤の前面傾斜角が土石流衝撃荷重に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.64A,pp.779-788, 2018.
  - 13)足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集第104号，pp.33-44,1964.
  - 14)堀口俊行，香月智，長池広樹：回転円筒による混合球形粒子の偏析実験と個別要素法解析，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.69,No.1,pp.41-56,2013.
  - 15)堀口俊行，香月智，小川あずさ：回転円筒による2粒径混合粗粒材の偏析実験と個別要素法解析，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.72,No.1,pp.1-20,2016.
  - 16)立石龍平，香月智，石川信隆：回転円筒実験による水・砂・流木の混合土石流の偏析に関する基礎検討，構造工学論文集，Vol.62A,pp.1097-1110,2016.
  - 17)松村健太郎，齋藤和樹，堀口俊行，香月智：回転円筒実験における水と礫の分級現象に及ぼす底面粗度の影響，構造工学論文集，Vol.65A,pp.835-848,2019.
  - 18)奥田節夫，諏訪浩，奥西一夫，仲野公章，横山康二：土石流の総合的観測 その3. 1976年焼岳上々堀沢，京都大学防災研究所年報，Vol.20,No.20,B-2,pp.237-263,1977.
  - 19)松村健太郎，堀口俊行，香月智：直線水路実験と回転円筒実験における礫分級現象の比較，構造工学論文集，Vol.66A,2020.
  - 20)片出亮，渋谷一，香月智，嶋丈示：鋼製透過型砂防堰堤の礫捕捉性能に関する確率的推定法，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.67,No.3,pp.477-492,2011.