28.大型回転円筒装置による水と流木の分級現象に 関する実験

渡邉 大貴1・堀口 俊行2

1学生会員 防衛大学校研究科前期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail: em60020@nda.ac.jp ²正会員 防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail: htoshi@nda.ac.jp

土石流対策の一つである透過型砂防堰堤は、平常時は水や中小砂礫を下流に通過させる一方で、 土石流発生時において巨礫や流木により透過部分を閉塞して後続土砂を捕捉するものである.これ は、土石流先端部に巨礫や流木が集中する分級現象で成り立っている.しかし、力学的な根拠とし て、ブラジルナッツ効果によって分級が生起することが示されているが、実験における現象論から このメカニズムに関する研究はあまり進んでいない.これは、土石流の流下距離や流速は水路の長 さによるため、直線水路を用いて実験的に観察することは難しいことと関係する.そこで本研究は、 新たに大型の回転円筒装置を用いて、水と流木の混合流体における分級現象生起のための条件およ び分級時に生起する運動形態について整理して、水は水深と底面速度の影響を受けて段波を形成し、 流木は水の循環によって徐々に分級することを確認したものである.

Key Words : segregation, woody debris, surge, ball mill device

1.諸 言

近年の異常気象や山間部における風倒木をそのま ま放置していることから、土石流災害は流木を含ん だものが多く、透過型砂防堰堤(以下、透過型と呼 ぶ.)による捕捉事例が報告されるようになってき た¹⁾⁻³⁾.これまでの堰堤による土石流の捕捉を分類す ると、①礫のみの捕捉、②礫+土砂の捕捉、③礫+流 木+土砂の捕捉,そして④流木+土砂の捕捉の4つの捕 おおしている⁴⁾、 尾崎ら⁵は、 堰堤における流 木混じり土石流の捕捉例について掘削調査を行い. 巨礫および流木が堰堤の透過部に捕捉され、土石流 中の流木が土石流の先端に分級していることを明ら かにしているの. さらに、土石流の運動形態として、 Savage⁷⁾らや木藤ら⁸は、水路勾配、流量、礫径およ び底面粗度によって流下形態は、①準静タイプの流 れ、②層状タイプの流れ、③分散タイプの流れの3 つに区分している.このような流下形態のもと、土 石流の流れについての研究がなされてきた.しかし、 大量に流木が土石流の材料として含まれる現象は, 最近のことであり、流木における運動形態はあまり 多く研究がなされていない.

ところで,著者ら%は流木混じり土石流の直線水路 を用いた実験を行っている. その際, 直線水路の実 験では、分級を生起させるために適当な底面粗度¹⁰ を与える必要がある.これは、流下区間が直接的に 流れることによって土石流内の材料が配置変換しな いことで分級しないためである.透過型は、流下す る土石流の先端部に巨礫や流木が集中する分級現象 を利用して、透過部を閉塞することで後続流の土砂 を捕捉するが、直線水路では、距離も制限されてお り、分級の有無を考察するのは難しい 11). さらに、 生起する分級は静止状態から始まる遷移現象となる ため、分級メカニズムを観察し難い、そのため回転 円筒実験装置を用いて、2粒径混合状態の分級生起実 験を行い、球径において大粒径の分級機構のメカニ ズムの検討をした 12,13). 次に,水のみを入れた回転 円筒内において、土石流の先端部が盛り上がる段波 を形成することを確認し、同条件下で水と流木の混 合状態における流木の運動形態について整理した. しかし、1.0 m 径における実験の検討は行っているが、 円筒の直径を大きくしたときにおける水と流木が混 合時の分級については不十分である.

そこで本研究は、大型の回転円筒実験装置を用い て、水と流木の混合流体に生ずる分級現象の生起条



写真-1 大型回転円筒実験装置 Photo.1 Ball mill device 表-1 実験ケース

l able 1 Experiment case						
シリーズ	水深	流木本数	底面速度	ケース数		
	h (mm)	n	v (m/s)			
水のみ	50 (7 ℓ)		0	24		
	75 (13ℓ)		0.2			
	100 (20 ℓ)		1.0	24		
	125 (30 ℓ)		2.0			
水・流木 混交	50 (7 l)	200	3.0			
	75 (13ℓ)	300	4.0	54		
	100 (20 ℓ)	500	5.0			

件や分級時に生起する運動形態について検討するも のである.その際,実際の直線水路における対応性 についても考察する.

2. 実験の概要

(1) 回転円筒実験装置と供試体モデル

写真-1に実験装置を示す.実験装置は、外径235 cm、 水路深 30 cm、水路幅 30 cmの回転型水路を鉛直に立 て、電動機で回転させるものである.流路底面はス テンレス、側面は一方が銅版、他方がガラスで構成 されており、ガラス面を通して外から内部の混合物 の運動を観察することができる.回転円筒実験装置 は、流路長に制限がなく、内容物の位置をほぼ固定 して定点観測できる.なお、底面に凹凸の粗度は設 けていない.回転円筒実験装置の最大底面速度は 5.0 m/sである.フルードの相似則を1/2.2とすると、水実 験の 1.0-5.0 m/s は実物の 5.0-25 m/s に相当する.

流木モデルは,直径 6.0mm,全長 60mmの円柱を用い, 幹のみを模したモデルである.乾燥時の比重は 0.7,湿 潤時の比重が 0.98 である.

(3) 生起現象と代表角度

本実験の現象を分類すると図-1のようになる.まず, 塊の重力と底面との動摩擦がつり合うと、図-1(a)に示す ように塊が一定位置にとどまり続ける平衡状態になる. この状態では、塊内における各断面において流量は零と なるため、断面内では下流に向かう流れと上流に向かう 流れが生起しており、その流れは、図にあるように巨視



的に円筒内の回転方向と同じ方向の回転流れとなる.つ まり、上層部と下層部には流速差が生じる.

本研究では、この状態の各諸元を図-2のように定義した. 以後、水の先端角を θ_{NL} 、後端角を θ_{NU} 、礫の先端角を θ_{GL} 、後端角を θ_{GL} 、後端角を θ_{GL} 、後端角を θ_{HL} 、後端角を θ_{HL} と表す. また、水、砂および流木の円筒底面上の中心となる角度をそれぞれ θ_{NC} 、 θ_{SC} および θ_{DC} とする. なお、角度の正負は、実験装置中央から鉛直下方に伸ばした線を基準として、円筒の回転方向を正とした.

一方,適度に平衡しないと図-1(b)に示すように,底面 の摩擦力(静止摩擦係数)が重力に上回るため,全体が 上方に底面と同じ速さで逆登る運動となる.さらに,重 力が底面摩擦力(動摩擦係数)を上回るため,下流にか け下る運動となり,この状態を繰り返すようになる.こ れより,スティックスリップと呼ばれる往復運動を行う 場合がある.この時,塊の内部では,相対的に動きを生 じず固体化していることが多いが,ゆっくりと平衡状態 と同じ方向の内部回転運動をすることもある.なお,こ れらはビデオカメラによって撮影した写真をもとに判定 した.

(4) 実験要領

本実験は、水のみ、水と流木混合状態の2種類でそれ ぞれ底面速度を02m/s, 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s, 50m/s として、代表角度を計測するとともに段波の有無 の判定および運動形態の観測を行った.表-1に、全実験 ケースを示す.

水のみの実験は、静止状態における円筒水路内に静止



(d) v=5.0m/s 写真3 水のみの水面形状 (h=50mm) Photo.3 The surface shape of the water (h=50mm)



(b) v=1.0 m/s





(d) v=5.0m/s 写真-4 水のみの水面の形状 (h=100mm) Photo.4 The surface shape of the water (h=100mm)



(a) v=0.0 m/s



(b) v=1.0 m/s

(c) v = 3.0 m/s



(d) v=5.0m/s 写真-5 水のみの水面の形状 (h=125mm) Photo.5 The surface shape of the water (h=125mm)

表-2水のみにおける段波形成区分
Table 2 Occurence of surge shape of water

水 深 h (mm)	底面速度v(^m /s)					
	0.2	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
50	×	×	×	0	0	0
75	×	×	×	0	0	0
100	×	×	×	0	0	0
125	×	×	×	×	0	0

〇:段波形成(surge), ×:段波なし(Non-surge)

状態における最大水深 50 mm (7 ℓ), 75 mm (13 ℓ), 100 mm (20 ℓ), 125 mm (30 ℓ)の 4 種類の水量とし, 主として底面速 度に応じた段波の有無を観察した. 流木モデルを混合す る場合には, 200, 300, 500 本を投入し, 水・流木混合 状態の実験を行った. 組み合わせの総計は 174 ケースと なった. 各ケースについて, 3 回ずつ代表角度の再現性 が1°以内に収まるまで回転速度等を安定させて, 3 回の 平均値を代表角度とした.

3. 実験結果および考察

(1) 水のみの実験

写真-3~5に,水深 h=50,100 および 125mmにおける 段波の形成状況を示す.**写真-3(a)~5(a)**は,底面速度 v= 0.0 m/s であり,静水面であるので左右対称の水面の形状 となる.**写真-3(b)~5(b)**は,底面速度 v=1.0 m/s であり, 水面にやや波のようなものが発生しているが,速度のな い場合とあまり運動状態が変わらないことがわかる.**写**





真-3(c)~5(c)は、底面速度 v=3.0 m/s のものであり、水深 が深い h=125 mm 以外では、水面の先端が切立って段波 が形成されている. **写真-3(d)~5(d)**は、底面速度 v=5.0m/s であり、水深 h=125mm を含む全ての条件で段波が形 成されている. **表-2**に、全 24 ケースの段波の形成状況 を、図-3に、代表角度~底面速度関係を示す. これらよ り、段波に関して最大水深が浅く、底面速度が速いほど 段波が形成されやすく、底面速度の増加によって水塊の 拡がりが大きくなることがわかる.

(2)水・流木混合実験

a) 段波形成

才

水

オ

水+流木

水のみ

水+流木

写真-6は、水深h=100mm、流木本数n=500の条件下 において,底面速度を v=1.0m/s, 5.0m/s と底面速度を増 加させた場合の変化を示しているが、v=2.0m/sから段波 を形成している.この時,流体は前後に拡がり浅くなり、 流木塊が前方に集まっている.また、その塊は水路床に



(b) $h = 125 \,\mathrm{mm}$ (a) *h*=75 mm 写真-8 水+流木の水面形状(v=3.0m/s, n=500) Photo.8 Shape of the surface of mixture water and driftwood

Table 3 Formation situation of surege shape of mixture water and driftwood									
直類	水 深 h (mm)	流木数 <i>n</i>	底面速度v(^m / _s)						
			0.2	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
、のみ		-	×	×	×	0	0	С	
+流木 75	75	200	×	×	×	0	0	С	
	75	300	×	×	×	0	0	С	
		500	×	×	×	0	0	С	
、のみ	み 100	-	×	×	×	0	0	С	
		200	×	×	×	0	0	С	

×

×

×

×

×

X

×

×

×

×

×

表3 水・流木混合状態における 段波形成状況

接触している. この段波形成速度は水のみと同じであり、 流木が混合することは段波形成条件にあまり影響してい ない.

写真-7は、水深 h=100mm、v=3.0m/sにおいて、流木 本数を n=200,500 と変化させたものである. 流木本数 に関わらず段波を形成しており、その境界となる速度は 水のみの実験と段波形成条件と同じである.

写真-8 は、v=3.0 m/s, n=500 において、水深を h=75 mm, 125 mm と変化させた場合の比較を示したものであ る. 写真-8(b)に示す水深が深い場合は、段波を形成しな い.ただし、流木は、水の循環する流れにより、前方に 集中し, 配置変換しながら流体の水面を浮遊している. 表-3に水と流木の混合実験における段波形成条件を示す. 流木と水とを混合しても、全ケースにおいて段波形成状 況は、水のみの実験と一致している. 図4に水・流木混 合状態における底面速度~代表角度を示す. 各速度の水 の占有域は、図-3に示した水のみのものと同じであり、 この観点から流木の影響がないことがわかる.

表-3に、水と流木の混合実験における段波形成条件を 示す. 流木と水とを混合しても、全ケースにおいて段波 形成状況は、水のみの実験と一致している. 図4に、 水・流木混合状態における底面速度~代表角度を示す. 各速度の水の占有域は、水のみのものと同じであり、こ







0

X

×

×

X

0

0

0

 \bigcirc

0

 \bigcirc

(a) 浮游状態 (a) Floating

300

500

200

300

500

125

×

×

×

×

×

×

(b) 分級 (配置変換なし) (b) Segregation (no relocation) 写真-9 水・流木混合状態における運動形態 Photo.9 Movement condition of miture of water and driftwood

分級(配置変換あり) (c) (c) Segregation(relocation)



Fig5 Schematic diagram of classification of driftwood

の観点から流木の影響がないことがわかる.

b) 運動形態と分級

写真-9に水と流木の混合実験で生じた3種類の運動形 態を示す.写真-9(a)は、h=75 mm、v=02 m/s、n=500 の 時の運動形態のものであるが、水は段波形成せず、流木 は、水面全体に分散して水面を浮遊する.これは、底面 速度が遅く、水中において循環する流れが小さいためで ある.写真-9(b)は、h=100 mm、v=20 m/s、n=500 の時の 運動形態であり、水が循環して流木が流体の前方へ集中 していることがわかる.ただし、流木は互いに絡み合い 塊を形成するため、相互に配置変換することがない.写 真-9(c)は、h=100 mm、v=3.0 m/s、n=500 の時の運動形態 であり、先端は、切立つような段波を形成して流水は激 しく循環する.流木は、流体の前方に集中して、相互に 配置変換し、流木塊が回転するように運動する.

表4に、水と流木との混合実験における運動形態の生 起条件区分について示す.底面速度v=0.2m/sの時には、 全てのケースで浮遊状態となる.また、底面速度v=1.0m/sの時は、ほとんどのケースで前面集合(配置変換な し)となる.ただし、流木本数が200本は、水深に関わ らず、前面集合(配置変換あり)となっている.これは、 水の循環に対して流木塊の相互固化力の抗う力が小さい ためである.一方、底面速度v=2.0m/s以上の場合は、一 ケースを除き、流体の前方に流木が集中し、流木が相互 に絡み合うことなく循環する前面集合(配置変換あり) となっている.ただし、水深 h=125 mm、流木本数 n=500 は、流体の循環が十分でなく、流木塊の絡み合う力 を崩すことができず、前面集合(配置変換なし)となっ ている.

以上を総合すると、底面速度が十分に大きく水中に循 環する流れが生じる前面集合(配置変換なし)および前 面集合(配置変換あり)となり、分級が生起している. 図-5(a)に水・流木混合状態で段波を形成した場合におけ る流木の分級現象の模式図を示す.上層に浮かんだ流木 は、清水の循環によって先端に流れ出し、段波先端で下 層に沈み込み、水路床による摩擦を受けて速度が低下し て後端へ流れ出す.この際,後端に流れ出していく流木 と前端に流れ出していく流木が接触または絡み合うこと により流木が堆積する.実際の土石流では河床は動かな いため,図-5(b)に底面速度を 0.0 m/s とした場合の模式図 を示す.流木は、表層の早い流れに乗って先端に移動す るが、段波先端に達すると底面付近に沈み、摩擦を生ず る.これにより、表層付近と底面付近の流木の速度差が 発生して、流木同士が接触または絡み合うことにより流 木が堆積する.よって、流木と水の運動形態から流木が 分級する模式図は、図-5 に示すようになる.そこでの運 動形態を整理すると以下のようになる.

1)水路床付近の下層部では,底面速度より小さな速度で 後退する清水の流れが生じている.一方,水面付近の上 層部では,先端に向かう流れがある.

2)上層に浮かんだ流木は、上層の水流に乗って先端に流 出するが、段波先端に達すると清水の流れの影響により 下層に沈み、後端へ流れ出す.

3)流木が底面に接すると摩擦が生ずるため、流木が後端 へ流れ出す.しかし、上層の先端へ流れる流木と方向が 異なるため、お互いに摩擦や制動が働くことになるとと もに、時として絡み合う.つまり、容易に後退できない. よって、流木が堆積され分級状態となる.このとき、流 木同士が堅固に絡み合い、流木塊内での流木の運動が制 限された状態が分級状態っであっても、流木同士におけ る配置の変換がなされない.

4. 結 言

本研究は、回転円筒実験装置を用いて、水のみ、水と 流木との混合状態における主として流木の分級現象の生 起条件および運動形態について検討したものである.得 られた成果は以下のようになる.

- (1) 水のみの実験において、水深が浅く、底面速度が速い条件では段波が形成される.
- (2) 水・流木混合実験において流木は、水に生じた循環 の流れに乗って先端に分級して集まる.

- (3) 水・流木混合実験では、浮遊状態、集合運搬(配置 変換なし)および集合運搬(配置変換あり)の3つの 分級現象に分かれる.
- (4) 本実験を実河川における河床が動かないことと対応 させると、下流部においても流木が先行して流下する こととなる.

今後の課題として、実河川における現象と回転円筒実 験では、曲率の影響から勾配変化や流速変化など異なる 条件があるので、今後、直線水路実験やモデル解析など と比較検討する必要がある.

参考文献

- 1) 田坂侑夫:日本における短時間強雨の発現について,社会文化論集,第9号,2013.3.
- 2) 内閣府:平成26年度版防災白書, pp.112-113, 2014.
- 3)気象庁:気候変動監視レポート, pp.32, 2014.6.
- 4) 吉田一雄、山口聖勝、水山高久:鋼製透過型砂防 堰堤による土石流の捕捉事例について、砂防学会
 誌, Vol63, No.5, p.43-46, 2011.1.
- 5) 尾崎幸忠,鴨川義宣,水山高久,葛西俊一郎,嶋 丈示:流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムに よる捕捉形態の調査,砂防学会誌砂防学会誌, Vol51, No.2, p.39-44, 1998.7.
- 6)瀬尾克美,水山高久,大場章,上原信司:土石流 と共に流出する流木の運動と捕捉工に関する実験

的研究, 土木技術資料, Vol.26, No.2, pp.9-13, 1984.

- 7)木藤賢一,平野宗夫,橋本晴行:急こう配水路に おける巻子粉粒体の特性,水工学論文集,第37巻, pp.617-622,1993.2
- Savage, S.B. and Jeffly, D.J.: The stress tensor in a granular flow at high shear rates, Journal of Fluid Mechanics, pp.617-622, 1981.9
- 9) 堀口俊行,嶋丈示,松原智生,舘澤寛,香月智, 石川信隆,水山高久:礫の凹凸を考慮した個別要 素法による鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉解析, 砂防学会誌, Vol.69, No.1, pp.30-37, 2016.
- 10) 足立昭平:人工粗度の実験的研究―桟型粗度と溝 型粗度―,京大防災研究所年報,Vol.4, pp185-193, 1961.3.
- (一財)砂防・地すべり技術センター:平成21年 版鋼製砂防構造物設計便覧,ニッセイエブロ, 2010.
- 12) 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, 2013.4.
- 13) 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, 2016.4

Experimental study on segregation phenomenon of water and driftwood using ball mill device

Daiki WATANABE, Toshiyuki HORIGUCHI

An open Sabo dam has been constructed as a countermeasure against debris flow. In the event of a debris flow, boulder and driftwood block the permable part of the dam, trapping the following sediment. This is because the boulder and driftwood are concentrated at the front part of debris flow. However, the mechanism of this occurrence is still unclear in many respects, and there is still little research on driftwood, which has been a trend in recent disasters. This study investigates the conditions for the occurrence of classification phenomena in mixture of water and wood using a ball mill device with no restriction on the flow distance. The results is shown that water forms surges under the influence of water depth and bedload velocity, and driftwood generates classification phenomena by water circulation.