

回転円筒実験における土石流の段波形成に関する実験的検討

Experimental study on surge shape of debris flow model utilizing rolling cylinder

立石龍平*, 堀口俊行**, 香月智***

Ryuhei Tateishi, Toshiyuki Horiguchi, Satoshi Katsuki

* 防衛大学校理工学研究科, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**修(工), 防衛大学校理工学研究科, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博, 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: (debris flow, surge, woody debris, grid shape check dam)

キーワード: 土石流, 段波, 流木, 透過型砂防堰堤

1. 緒言

日本は、国土の約7割を山地が占め、地震の発生や降水量の多い気候から厳しい国土条件であり、全国の9割の市町村が土砂災害の危険性と隣り合わせである。過去10年間の土砂災害発生件数は、年平均約1000件を上回るとともに、土砂災害の原因の一つである集中豪雨は、近年の短時間強雨に代表されるように、発生数が増加傾向にあり、土砂災害の発生の危険性は増している¹⁾²⁾。

中でも土石流は一旦発生すると被害が甚大になることから、対策が進められており、その一つとして透過型砂防堰堤が建設されている。通常、透過型砂防堰堤は、水や砂を流下できる透過部を有しており、土石流が発生すると、土石流の先端部に集中する流木や巨礫を捕捉し開口部を閉鎖することで後続流全体を捕捉するものである。その際、土石流は先頭部から流木、巨礫、土砂の順で流れる偏析現象が生じると言われており堰堤は、これを前提に設計している。

昨年の伊豆大島における土石流では大量の土砂とともに大量の流木が流出し、下流域の橋梁を閉塞させ被害を拡大させたが、透過型堰堤や堆積工が整備された箇所においては、大量の流木と土砂が捕捉され効果を発揮した³⁾。ただし、効果的に土石流を捕捉するためには、偏析現象がどのように生じるのかを解明する必要があるが、巨礫における偏析現象の生起条件や先端部に集中する機構の物理的検討は不明確なままである。さらに、流木の偏析現象の生起条件についての研究は少なく、充分な知見が得られているとは言い難い。

ところで、土石流の研究で用いられる直線水路は、流路長に制限を伴うため偏析を生起させるには、相当な工

夫が必要であり、棧粗度を用いる等、適切に行わないと偏析しない。また、偏析現象が生じない場合であっても、流路長を伸ばしてもなお偏析現象が生じないと判断することが困難であるとともに、発生させた土石流先端部は流下することから先端部で生じている現象を安定して捉えることは困難である。

これらの直線水路の弱点を補う実験装置として、水路床を動かすため流下速度の制御が容易であり、流路長を無限に確保し、水路内で生じる現象を定点で観測できる回転円筒装置がある。回転円筒装置を用いた実験として、三好ら⁴⁾による固液混相流の実験、堀田ら⁵⁾による間隙水圧の実験があり、それぞれ円筒内における運動状態の考察を行っている。また、筆者ら⁶⁾も2粒径混合状態からの偏析の生起条件における研究を行い、石礫における偏析の集中機構を整理している。しかし、清水や流木混じり土石流の場合における偏析やその運動形態について検討されたものはない。

そこで本研究では、回転円筒装置を用いて清水と流木の運動形態を考察するものである。すなわち、回転円筒内にて土石流先端部を模した段波形状を発生させ、清水のみの流体運動を底面速度ごとに整理したのち、流木が段波の形成過程に与える影響および、水と流木混じりに関する運動特性、特に偏析について考察する。

2. 実験内容

2.1 実験装置

本実験で用いた実験装置は、写真-1に示す幅20cm、外径92cm、流路深さ15cmの回転円筒型アクリル板流路を、電動の動力装置に連結したものである。回転円筒

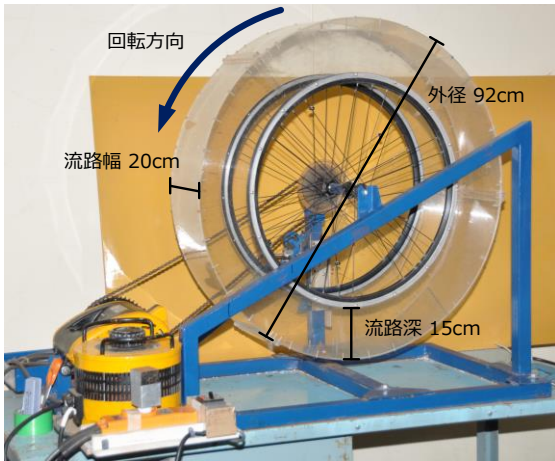


写真-1 回転円筒装置

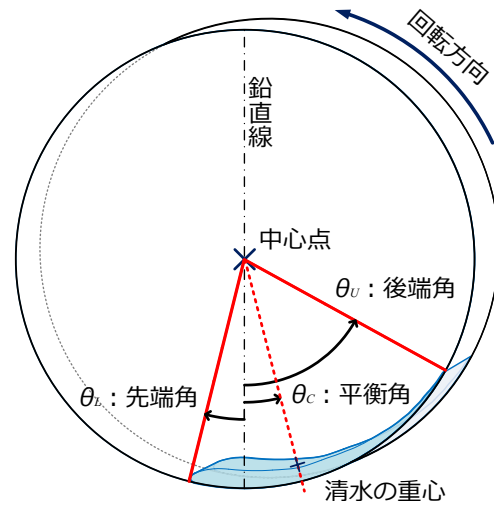


図-1 代表角度⁶⁾

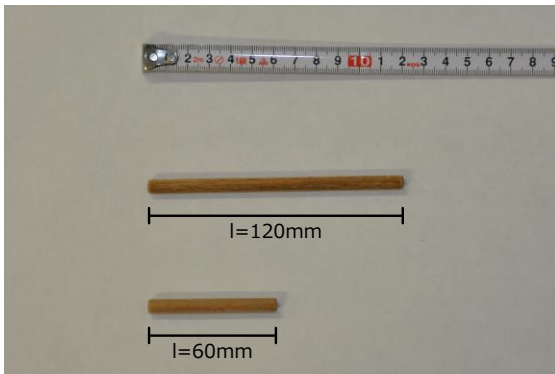


写真-2 流木モデル

表-1 実験ケース

シリーズ	水深 h (cm)	底面速度 v (m/s)	流木長 l (cm)	流木本数 n	ケース数
清水のみ	2	0, 0.5			28
流木混じり	3	1.0, 1.5	60 120	25	144
	4	2.0, 2.5		50	
	5	3.0		100	

の内側の路床および側面はアクリル板であり、底面粗度は設けておらず、側面および底面からの観察が可能である。この回転円筒装置の特徴は、流路長が無量大となり、流動位置をほぼ固定して流体運動を定点観測する。つまり定常状態を、長時間にわたり容易に作り出せることができることにある。また、流速の制御が容易であり、実験条件の設定が容易であるとともに、直線水路と比較し、実験装置が小型である。

2.2 流木モデル

写真-2 に、実験に用いた流木モデルを示す。流木モデルは、直径 6 mm、流木長が 6, 12 cm の 2 種類を使用した。流木モデルの材質は木材であり、乾燥時の比重が 0.7、湿潤時の比重が 1.06 である。一部の流木モデルには、流木モデルの回転の様子が観察できるように着色した。

2.3 代表角度

実験装置の底面速度を一定に保つと、清水はほぼ同じ位置に留まる。この状態を平衡状態と呼ぶ。この平衡状態における各諸元の角度の定義を図-1 に示す。清水の先端部の角度を先端角 θ_L 、後尾部を後端角 θ_U 、清水の横断面形状から算出した重心点の角度を平衡角 θ_C とし、全体の広がりや安定状態を示す代表値とした。角度は、実験装置中央から鉛直下方に伸ばした線を基準とし、回転

方向を正とした。計測は、実験装置に直交して設置したカメラ撮影による写真から測定する。この際、代表角度の区別を容易にするため清水を赤色で着色した。

2.4 実験ケース

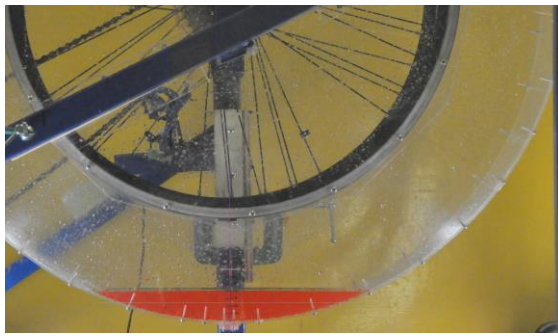
実験は、回転円筒装置に清水および流木モデルを入れ、装置を回転させることにより発生する段波の観測および代表角度の計測を行った。まず、円筒内に清水のみを入れ、表-1 に示している水深を変化させた 4 種類の実験を行った。続いて、円筒内に流木モデルを混合し、各水深ごとに流木モデルの全長と本数を変化させた実験を行った。各種類において、底面速度が 0.5 m/s ごとに静止状態から 3.0 m/s までの計 7 回、代表角度の測定および段波形状を測定した。

3. 実験結果

3.1 清水のみの実験

(1) 段波の形成状況

写真-3 に、水深 $h=40$ mm の清水のみの実験において、静止状態とこれを底面速度 $v=3.0$ m/s で回転させた時の水面の形状を示す。静止状態においては、先端部と後端部は左右対称であり、横断面の平衡角 $\theta_C=0^\circ$ である。底面速度 $v=3.0$ m/s では、静止状態と比較し底面摩擦によ



(a) 静止状態



(b) $v=3.0 \text{ m/s}$

写真-3 清水のみ 水深 $h=40 \text{ mm}$ における水面の形状

り先端部下部は丸みを帯び、清水内の先端部と後続流との流速差により先端部において盛り上がりとともに、後端部は底面速度の影響により著しく後退しており、明瞭な段波を形成している。

図-2に、この水深 $h=40 \text{ mm}$ において底面速度を変化させた場合の水面形状を示す。底面速度を速くすると、底面速度 $v=1.0 \text{ m/s}$ までは静止状態とほぼ同じである。すなわち、底面速度の影響による粘性の働きで生じる先端部と後端部の変化のみである。一方、底面速度 $v=2.0 \text{ m/s}$ 以上においては、先端部はより切り立ち、先端部からの盛り上がりが見えなくなり段波が形成されているのがわかる。

図-3に、底面速度 $v=3.0 \text{ m/s}$ の清水のみの実験において水深を変化させた場合の水面形状を示す。深さが浅くなるほど段波の形状は明瞭なものになる。これは、底面速度が速くなる、あるいは水深が浅くなるほど、縦断面に対する、底面からの粘性が働く領域の相対比率が増えることで、先端部と後続流の流速差が大きくなる。そして、段波の形状の特徴である先端部の盛り上がりが見えなくなるものである。

(2) 代表角度

図-4に、清水のみににおける代表角度～速度関係を示す。底面速度が速くなると、水深にかかわらず、先端角

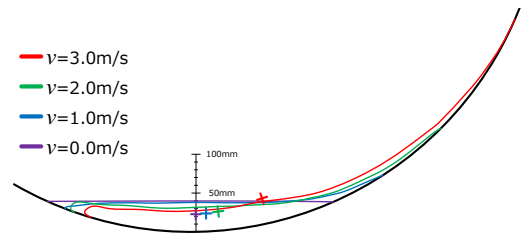


図-2 水深 $h=40 \text{ mm}$ における水面形状

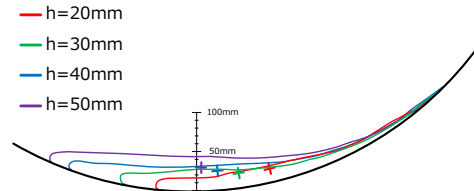


図-3 底面速度 $v=3.0 \text{ m/s}$ における水面形状

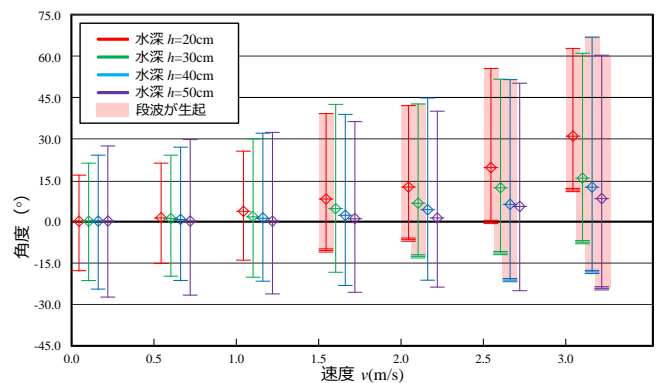


図-4 清水のみの実験における代表角度～速度関係

および後端角が後退している傾向が見られる。ところで、円筒内の清水は内部で循環していることから、清水が存在しているある断面においては、清水が先端部から後端部へ移動する量と後端部から先端部へ移動する量が等しい。つまり、先端角の後退は、底面速度が速くなり、底面の影響により生じる粘性が強く働くことで、後端部から先端部へ移動する清水の量が減少したためである。

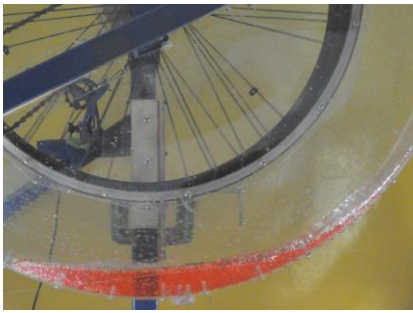
また、底面速度が速くなると、平衡角は後退するが先端部に偏る傾向が見られ、段波が形成されている条件であるほど顕著である。これは、先端部に清水が集中していることを示しており、先端部において段波の形状の特徴である、先端部と後続流の流速差による盛り上がりが見られることと関連している。

さらに、水深が浅い条件ほど底面速度の増加に伴い、代表角度が後退している。これは、水深が浅いほど、清水が底面に近づくため、粘性の影響が反映されやすいためであると考えられる。

3.2 流木混じりの実験

(1) 段波の形成状況

写真-4に、水深 $h=50 \text{ mm}$ 、底面速度 $v=2.5 \text{ m/s}$ の流木混じりの実験における水面形状を示す。写真-4(a)の清水のみににおいては、段波は生起していない。それに対し、



(a) 清水のみ



(a) 浮遊状態

($h=40\text{ mm}$, $v=0.5\text{ m/s}$, $l=60\text{ mm}$, $n=100$)



(b) 偏析状態 (配置変換あり)

($h=40\text{ mm}$, $v=2.0\text{ m/s}$, $l=60\text{ mm}$, $n=100$)



(b) 流木混じり ($l=120\text{ mm}$, $n=100$)

写真-4 水深 $h=50\text{ mm}$, 底面速度 $v=2.5\text{ m/s}$ における水面の形状



(c) 偏析状態 (配置変換なし)

($h=40\text{ mm}$, $v=3.0\text{ m/s}$, $l=120\text{ mm}$, $n=100$)



(d) 流水・流木塊分離状態

($h=20\text{ mm}$, $v=0.5\text{ m/s}$, $l=120\text{ mm}$, $n=100$)

写真-5 流木塊の運動形態

写真-4 (b)の流木長 $l=120\text{ mm}$, 流木本数 $n=100$ の流木混じりにおいては, 先端部の丸みはより大きく, 先端部からの盛り上がりが見え, 段波が形成されているのがわかる。

(2) 流木塊の運動

写真-5 に, 実験において観測された代表的な流木塊の運動形態を示す。各流木塊の運動形態の分類とその特徴を述べる。

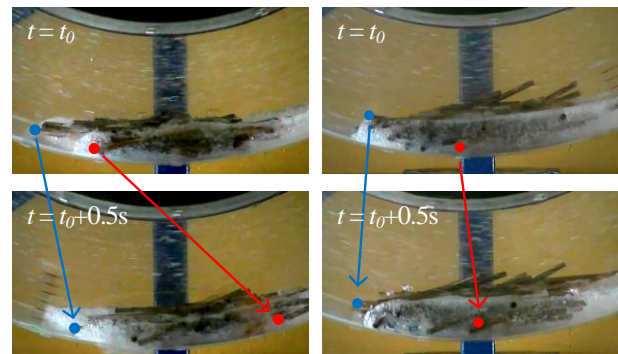
a) 浮遊状態

写真-5 (a) は, 水深 $h=40\text{ mm}$, 底面速度 $v=0.5\text{ m/s}$, 流木長 $l=60\text{ mm}$, 流木本数 $n=100$ における流木モデルの運動形態である。これは, 底面速度が遅い条件において観測される運動形態である。この時, 流木モデルは互いに重ならず水面に浮き, 水面全体に分散している。

回転円筒装置においては, 円筒内の水分量は変化しないことから, 底面速度による粘性の影響を受け清水は後方に流れるとともに逆方向の流れが生ずる。つまり, 円筒内の清水は内部で循環している。このため水面上にも清水の流れが生じる。この時, 流木モデルは清水の流れに抵抗せず清水内を循環し, 偏析を生じる傾向も示さない。

b) 偏析状態 (配置変換あり)

写真-5 (b) は, 水深 $h=40\text{ mm}$, 底面速度 $v=2.0\text{ m/s}$, 流木長 $l=60\text{ mm}$, 流木本数 $n=100$ における流木モデルの運動形態である。これは, 底面速度を速くした条件において観測される運動形態である。浮遊状態と比較すると



(a) 配置変換あり

($l=120\text{ mm}$, $n=50$)

(b) 配置変換なし

($l=120\text{ mm}$, $n=100$)

写真-6 流木塊内の配置変換 ($h=30\text{ mm}$, $v=3.0\text{ m/s}$)

流木モデルが, 先端部に堆積し偏析している。この時流木モデルは, 相互に重なりあい, 塊を形成している。浮遊状態と比較して, 流木塊は円筒内を循環せずに, 先端部に留まり水面の流れに抵抗している。これは, 底面速度が速くなることにより, 円筒内における清水の循環が強くなる。また, 横断面の清水の循環は, 底面速度の影響を受ける水路床付近では先端部から後端部に流れ, 水路床から遠い水面上では, 後端部から先端部に流れる。流木モデルは, 浮力により水面付近の流れの影響を強く受けるため, 先端部に偏析するとともに堆積し流木塊を形成する。

写真-6 (a) に, 偏析状態 (配置変換あり) における流木塊内の配置変換の様子を示す。流木モデルに注目する

と、流木モデルが流木塊内を移動している。これは、円筒内における清水の循環により、流木塊内において流木モデルが循環している。

c) 偏析状態（配置変換なし）

写真-5 (c) は、水深 $h=40$ mm、底面速度 $v=3.0$ m/s、流木長 $l=120$ mm、流木本数 $n=100$ における流木モデルの運動形態である。これは、底面速度を速く、流木長が長い条件において観測される運動形態である。流木モデルは、偏析状態（配置変換あり）と同様、先端部に偏析し堆積している。この時、流木モデルは相互に重なり、絡み合うことで塊を形成している。

写真-6 (b) に、偏析状態（配置変換なし）における流木塊内の配置変換の様子を示す。流木モデルに注目すると、偏析状態（配置変換あり）と異なり流木モデルが相互に絡み合っ流木塊を形成しており、流木モデルは流木塊内を移動していない。これは、偏析状態（配置変換あり）と比較し流木長が長い為、清水の流れにより流木モデルが浮遊する時、他の流木モデルと接触しやすく、相互の運動を阻害する。その結果、流木塊内の流木モデルが相互に絡みあい、流木塊内の移動を拘束するためである。

d) 流水・流木塊分離状態

写真-5 (d) は、水深 $h=20$ mm、底面速度 $v=0.5$ m/s、流木長 $l=120$ mm、流木本数 $n=100$ における流木モデルの運動形態である。これは、水深が浅く、流量が多い条件において観測される運動形態である。投入される流木モデルの量と比較し、水分量が少ないため、円筒内の清水と流木モデルが独立して運動する。この時、大部分の流木モデルは、清水がない場所に存在することから、清水は流木モデルの影響を受けず清水のみと同様の状態となる。もしくは、水分量と比較し少ない流木モデルのみ清水内に存在するため、浮遊状態と同じ状態になる。清水から独立して運動をする流木モデルは、流木モデルの動摩擦係数および静止摩擦係数と均衡する角度にて、スティックスリップ現象を起こす。

(3) 代表角度

図-5 に、流木混じりの実験における代表角度～速度関係を示す。3.1 節で述べた清水のみと同様に、流木混じりにおいても底面速度が速くなると、水深にかかわらず、先端角および後端角が後退している傾向、および平衡角が先端部に偏りながら後退する傾向が見られる。

また、流木混じりの実験で段波が形成される条件では、清水のみと比較し先端角および平衡角が後退している。次に、同一流木モデルにおいては、流木量が増加するに伴い先端角および平衡角が後退している。さらに、同一流木量においては、流木長が長い時に先端角および平衡角が後退している。これらは、流木塊の形成と先端部への偏析による円筒内の清水の流れに対する抵抗、あるいは、流木塊の水路床への接触により、流木と清水との相対速度が大きくなることで生ずる粘性により、流木塊から先

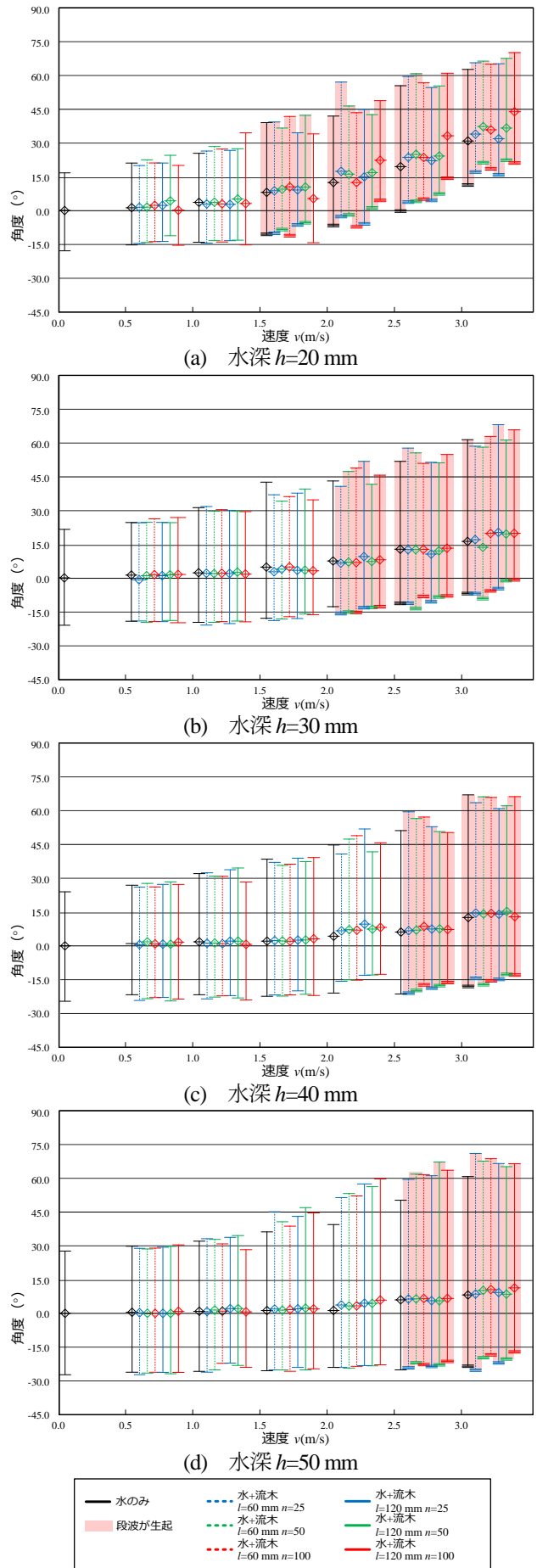


図-5 流木混じりの実験における代表角度～速度関係

端への清水の流入が少なくなるためであると考えられる。なお、図-5 (a) 水深 $h=20$ mm, 底面速度 $v=0.5$ m/s, 流木長 $l=120$ mm, 流木本数 $n=100$ に代表される条件のように、底面速度が遅く、水深が浅くかつ流木量が多い場合、清水内に存在する流木モデルが多いため、流木モデルに浮力が働かず、堆積状態となることで水深を上昇させた。その結果、底面速度が増加しても代表角度が変化しない現象を起こすものと考えられる。

4. 結 言

本研究は、回転円筒内で段波を発生させ、清水と流木モデルの運動特性および流木モデルが段波の形成過程に与える影響、偏析現象の生起条件について考察したものである。本研究で、得られた成果を以下に示す。

- 1) 回転円筒装置を用いて段波を発生させ、固定した運動形態を示すことができた。
- 2) 底面速度が速く、水深が浅いほど段波の先端角は後退する。
- 3) 流木塊が生じることで、段波が生起しやすくなる。

- 4) 流木混じりにおける流木塊の動きは4つの状態に区分することができた。
- 5) 流木が水中に存在する場合、流木塊の動き、段波の先端角および流木の偏析に影響を与える。

参考文献

- 1) 内閣府：平成26年度版防災白書，pp.112-113，2014.
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート，pp.32，2014.6.
- 3) 伊豆大島土砂災害対策検討委員会：伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書，pp.34-35，2014.3.
- 4) 三好岩生，小橋澄治，鈴木雅一：回転流動装置による混相流実験，第38回砂防学会研究発表会概要集，pp.295-268，1989.5.
- 5) 堀田紀文，宮本邦明，鈴木雅一，太田猛彦：回転円筒水路を用いた高濃度固液混相流における間隙水圧分布の測定，砂防学会誌，Vol.50，No.6，pp.11-16，1998.6.
- 6) 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.