

回転円筒実験における土石流中の流木偏析現象に対する個別要素解析

立石, 龍平
九州大学大学院工学府土木工学専攻 : 博士課程

堀口, 俊行
防衛大学校システム工学群建設環境工学科 : 准教授

園田, 佳巨
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

嶋川, 理
防衛大学校理工学研究科 : 前期課程

<https://hdl.handle.net/2324/4793211>

出版情報 : Journal of structural engineering. A. 65, pp.821-834, 2019-03. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 :



回転円筒実験における土石流中の流木偏析現象に対する個別要素解析

Analysis using DEM on segregation phenomena of woody debris in water by ball mill experimental device

立石龍平*, 堀口俊行**, 園田佳巨***, 嶋川理†

Ryuhei Tateishi, Toshiyuki Horiguchi, Yoshimi Sonoda, Osamu Shimakawa

*修(工), 九州大学大学院, 工学部土木工学科博士課程 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 1 丁目)

**博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

***博(工), 九州大学大学院教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

†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)

This paper presents an analytical approaches on segregation phenomena and its occurrence condition of woody debris using DEM. In advance, a ball mill experimental device is used to observe behavior of water, dry woody debris, and woody debris. The water in the experiment make similar shape of surge observed in debris flow in situ. The woody debris cause several type of moving phenomena including segregation of woody debris. DEM is used to simulate those results. The method suggests a new model to express water behavior. The element has a special shape like a sphere, and a constitutive law for water pressure translation mechanism and momentum following DEM. The simulation reproduces the experimental results and makes clear the segregation mechanism.

Key Words: woody debris, surge shape, DEM, water model, ball-mill device

キーワード: 流木混じり土石流, 個別要素法, 擬水滴, 回転円筒

1. 緒 言

近年, 気候の変動により, 短時間かつ集中的に降る雨によって多くの被害が出ている^{1),2)}. 例えば, 平成 30 年 7 月豪雨では, 広範囲な集中豪雨によって 200 名以上の犠牲者が出ており, そのための対策が急務である. 土砂災害の一つである土石流災害は, ひとたび発生すると災害が甚大になる. その対策の一つである透過型砂防堰堤は, 平時においては水や土砂を流下させ, 土石流発生時には, 土石流の先端に巨礫や流木等が集中する偏析現象を利用し, 透過部を閉鎖することで, 土石流の流下を阻止するものである³⁾.

これまでに観測された透過型砂防堰堤における土砂捕捉事例によると土砂の捕捉形態は, ①礫のみの捕捉, ②礫+土砂の捕捉, ③礫+流木+土砂の捕捉, ④流木+土砂の捕捉の 4 つに分類されることがわかっている⁴⁾. 特に, 流木+土砂の捕捉形態となった事例は, 近年増加している. 平成 25 年の伊豆大島における土砂災害では, 広



写真-1 伊豆大島の土砂災害

範囲の斜面が流木を巻き込んで崩壊し, 大量の流木を含む土石流が発生した. その下流域では, 流木によって暗渠や橋梁が閉塞され氾濫被害が拡大した. ただし, 写真-1 に示す透過型砂防堰堤があったため, 大量の流木と土砂を捕捉した⁵⁾. このように, 透過型砂防堰堤は土石流中の流木を捕捉する効果が高いことから, 平成 28 年に改定された土石流・流木対策設計技術指針⁶⁾において, 流木対策として透過型砂防堰堤を用いることが示された.

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: em57045@nda.ac.jp

流木を含む土石流の流下機構を解明する研究として、尾崎ら⁷⁾は、流木混じり土石流が透過型砂防堰堤において捕捉された事例を基に、堆積土砂を堀削調査し、土石流中の流木が土石流先端に偏析していることを明らかにした。また、石川ら⁸⁾は、流木の捕捉機構を実験的に整理し、流木長と捕捉工間隔における関係を導くことで、今後の設計基準についても言及している。しかし、流下距離が制限された水路に加えて、均一に加工された流木モデルを使用しているため、本来の運動形態について多くの課題が残されている。さらに瀬尾ら⁹⁾は、流木の捕捉工付近における流木の個々の挙動や運動形態について検討されているが、土石流中の流木の偏析現象の生起条件について十分な知見が得られているとは言い難い。

筆者ら¹⁰⁾も、流木混じり土石流の研究のために直線水路の実験を行っている。実験では、流木は流下しながら土石流先端に偏析し、堰堤に捕捉されることで、土砂の捕捉率を向上させる。しかし、直線水路の実験では、流路長に制限があるため偏析を定常化し、土石流先端部で生じている現象を連続して観測することは困難である。

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、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する研究が行なわれている。例えば、底面走行式水路を用いた研究として藤間ら¹¹⁾は、先端部の詳細な波形、流速分布やレイノルズ応力分布を測定し、先端部の抵抗則を導き、波先端部の構造を検討した。また、原田ら¹²⁾は、逆グレーディング現象を発生させ、2粒径内の大粒径が先頭部に集中するまでの流下距離との関係を考察した。回転円筒水路を用いた研究として、三好ら¹³⁾は固液混相流の特性および固液混相流の流動に伴う散逸エネルギーに関する実験や、堀田ら¹⁴⁾による間隙水圧の分布の測定を行い、直線水路と比較し、回転円筒型の実験装置の特性を整理した。著者ら¹⁵⁾も、回転円筒型の水路内で生じた礫の偏析現象を定点で観測する研究を行った。そこでは、2粒径混合状態からの偏析実験とDEMによる再現解析を行い、偏析時に生起する力学的な考察について整理した。

一方、土石流中の流木や礫の運動に関する解析的な研究も行われている。福岡ら¹⁶⁾は、2次元個別要素法を用いて、粒状体の流れである石礫型土石流の特性と内部の構造との関連性について検討し、流下過程中的の偏析現象のメカニズムを考察した。また、前田ら¹⁷⁾は、個別要素法を用いた粒子の流れの構造と、大粒径の浮き上がり現象を応力鎖の形成メカニズムを用いて考察している。中川ら¹⁸⁾は、平面2次元場において流木の流動過程について整理し、流木における回転特性について検討している。さらに、流木と流水同士の接触を考慮し、清水ら¹⁹⁾は個別要素法と流体解析手法を組み合わせることで解析を行っており、流木の運動形態を追跡して流下時の流木の動きを解析的にとらえている。筆者ら²⁰⁾も、個別要素法により流

表-1 先行研究と本研究の関係

アプローチ	実験	DEM 解析
現象		
礫の偏析	著者らの既往の研究 ¹⁵⁾	
流木の偏析	本研究	

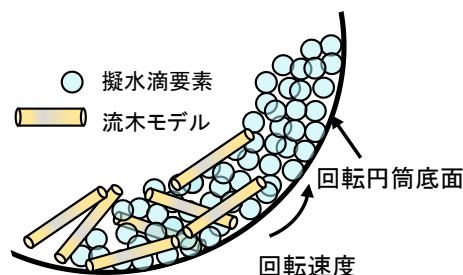


図-1 流木と水の混合状態

木を円柱形要素で表現し、流木群周辺の流速をモデル化した流木捕捉工のシミュレーション解析を試み、事前実験を概ね再現できていることを示した。その上で、実スケールでの土石流中の流木群により小橋梁が閉塞した流木災害事例の再現解析を試みている²¹⁾。さらに、流木や礫が堆積した後、これらの間隙を流れる水の動きを再現するため、擬水滴要素を用いた個別要素法を提案している²²⁾。さらに、礫と水との連成解析を可能とすることで底面水抜きスクリーン実験を再現解析し、水と礫の分離による土石流の停止機構について検討した²³⁾。

これらの先行研究を踏まえて、参考までに、著者らの研究背景は表-1 のようになり、流木混じりの偏析については検討されていない。

そこで、本研究は事前に回転円筒実験装置を用いて水と流木のみおよび流木と流木の混合状態における偏析現象の生起条件に関する実験を行い、これらの運動を擬水滴要素および円柱形要素による個別要素法を用いて再現解析し、流木混じりにおける偏析現象に関する水や流木の運動や偏析に必要な条件を整理し、偏析現象の基本メカニズムを明らかにするものである。

2. 提案手法の概要

ここからは、個別要素法を応用した擬水滴要素の基本式について示す。固体要素と流体を表現する擬水滴要素の相互作用を、一つの手法で扱えるように工夫している。

2.1 混相流のモデル化

流木混じり土石流は、図-1に示すような固体の流木または土砂と水との混合流である。そのため、多くの個別要素法は、この固体部分のみをCundall²⁴⁾の提案した剛体要素にモデル化して解いている。本研究では、水の領域も水滴を模した球形の擬水滴要素の集まりとする。以下に、個別要素法に組み込むための擬水滴要素の解法について述べる。

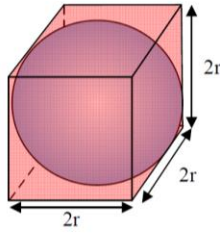


図-2 等価面積

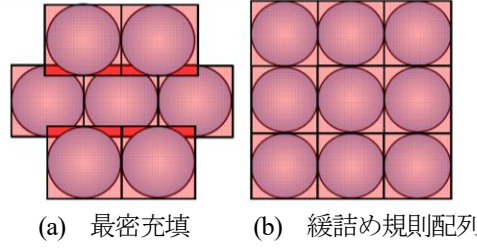


図-3 配列と等価領域の重なり

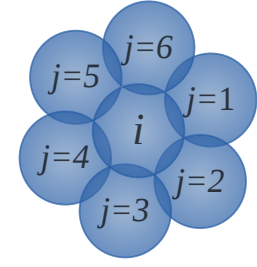


図-4 隣接周辺の要素

2.2 質量と体積

擬水滴要素 i の体積および質量は、球形を仮定しているので次式によって与える。

$$V_{wi} = \frac{4}{3}\pi r_{wi}^3 \quad (1)$$

$$m_{wi} = \frac{4}{3}\rho_{wei}\pi r_{wi}^3 \quad (2)$$

ここで、 V_{wi} ：擬水滴要素 i の体積、 r_{wi} ：擬水滴要素 i の半径、 m_{wi} ：擬水滴要素 i の質量、 ρ_{wei} ：擬水滴要素 i の比重である。

ただし、水の密度 ρ_w については球形要素の表現すべき領域を図-2に示すような立方体と捉え、質量が等価になるように与えている。

$$\rho_{wei} = \frac{8r_{wi}^3}{4/3\pi r_{wi}^3} \rho_w = \frac{6}{\pi} \rho_w \quad (3)$$

ここで、 ρ_w ：水の密度 (10^3 kg/m^3)。

なお、後述する等価領域の重なりが全領域の質量において現実の水の質量と矛盾する場合には、初期配列時に整合するように決定する。

また、流体解析における質量保存則については、個々の要素の質量が無変化であることによって成立していることになる。しかし、個々の要素は等価体積としているため、体積収縮と圧力増大の関係については厳密に制御することはできない。

図-3には、2次元における2種類の配列を示している。なお、図-3(a)は最密充填、図-3(b)は緩詰め規則配列と呼ばれるものである。緩詰め規則配列は、最密充填に比して間隙部分が大きくなっている。これらに、図-3で示した等価領域を描くと、明らかに最密充填の方が、多くの重複領域が生じている。後述する処理法では、この二つの配列において、いずれも球形要素に重なりがないと仮定して解析を行うが、このように等価領域の体積には相違が生じる。

個別要素法解析では、個々の要素は時々刻々に移動し、相互の位置関係は多様に変化するので、図-3(a),(b)でもない中間的な重なり状態を形成することになるが球形部分の重なり以外は体積変化として評価することができない。後程、検証例を示すが簡単な矩形枠に擬水滴要素を詰めて静水圧荷重を求めると、間隙が生じてしまい個々の要素における水圧では厳密解の静水圧荷重とは、やや異なる要素も現れる。これは、側壁面との間に間隙が生

じて壁面からの反力に滑らかさを欠くことで生じるものである。

以上のように、いくつかの難点はあるものの巨視的に水の振舞いを表現できるものである。

2.3 運動量保存則

流体解析においてNavier-Stokesの式は、次のように表される。

$$\frac{D\mathbf{w}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{w} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{w}$ ：流水の速度ベクトルを表し、右辺の第1項は外力、第2項は圧力、第3項は粘性力を表している。

擬水滴要素はその内部の密度が一定であると仮定しているため、個々の要素 i において運動量保存則を要素の運動方程式として表すと次式となる。

$$\mathbf{M}_{wi}\mathbf{u}_{wi}(t) + \sum \mathbf{f}_{Dij}(\mathbf{u}_{wi}(t)) + \sum \mathbf{f}_{Kij}(\mathbf{u}_{wi}(t)) = \mathbf{f}_{exi}(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_{exi}(t) = \mathbf{M}_{wi}\mathbf{g} + \mathbf{f}_w(t) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{wi}$ ：擬水滴要素の質量マトリクス、 $\mathbf{f}_{exi}$ ：擬水滴要素における外力ベクトル、 $\mathbf{f}_{Dij}$ ：要素 i と隣接する要素 j に働く人工減衰力ベクトル、 $\mathbf{f}_{Kij}$ ：要素 i と隣接する要素 j とに働く圧力勾配力ベクトル、 $\mathbf{f}_w$ ：流体力ベクトル、 $\mathbf{u}_{wi}$ ：擬水滴要素 i の変位ベクトルである。

また、円柱要素の運動方程式は次式のように表される。

$$\mathbf{M}_{cyl}\ddot{\mathbf{u}}_{cyl}(t) + \mathbf{D}_{cyl}\dot{\mathbf{u}}_{cyl}(t) + \sum \mathbf{f}_{Kcyl}(\mathbf{u}_{cyl}(t)) = \mathbf{f}_{cyl}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_{cyl}(t) = \mathbf{M}_{cyl}\mathbf{g} + \mathbf{f}_{wcyl}(t) \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{cyl}$ ：円柱形要素の質量マトリクス、 $\mathbf{D}_{cyl}$ ：減衰マトリクス、 $\mathbf{f}_{Kcyl}$ ：ばね力の重心点等価力ベクトル、 $\mathbf{u}$ ：変位ベクトル、 $\mathbf{f}_{cyl}$ ：外力の総和、 $\mathbf{g}$ ：重力加速度ベクトル、 $\mathbf{f}_{wcyl}$ ：円柱形要素に作用する流体力ベクトルである。

さらに、流体力ベクトルにおいては、円柱形要素と擬水滴要素の接触している体積の影響によって自動的に浮力が発生するようになっており、以下の式に従う。

$$V_{cyl} \leq V_{water} \quad (9)$$

ここで、 V_{cyl} ：円柱形要素の面積、 V_{water} ：擬水滴要素の面積である。

また、 $\mathbf{M}_{wi}$ は質量マトリクスであり、並進方向成分だけを扱うので、要素の回転自由度によって生じる角運動量は生じない。なお、外力ベクトルは後述する重力、粘性力および抗力ベクトルによって構成されている。

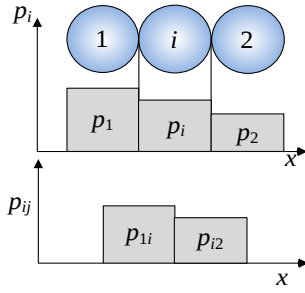
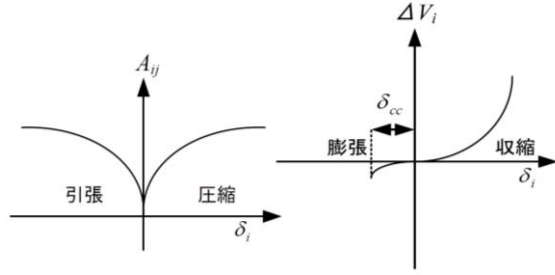


図-5 圧力勾配モデル



(a) 接触面積～重なり量 (b) 接触体積～重なり量

図-7 内圧のための接触点処理モデル

次に、要素の位置と変位は、次のように表す。

$$\mathbf{L}_{wi} = \mathbf{L}_{wi}^0 + \mathbf{u}_{wi} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{L}_{wi}$ ：擬水滴要素 i における重心の全体座標系に対する位置ベクトル、 $\mathbf{L}_{wi}^0$ ：擬水滴要素 i における初期の位置ベクトルである。

また、運動方程式は剛体と同様の差分法を用いている。

$$\ddot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}_{wi}(t) + \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t) - \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (12)$$

2.4 圧力勾配力

水中にある擬水滴要素 i は、図-4のように幾つかの要素 j によって囲まれている。さらに、法線方向ばねの接触力に相当する圧力勾配力ベクトル $\mathbf{f}_{pij}$ を設ける。この圧力勾配力については、圧力と接触面積を乗じて求めるものとする。

$$\mathbf{f}_{pij} = A_{cij} \mathbf{p}_{ij} \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{f}_{pij}$ ：要素 i, j 間の圧力勾配による水圧勾配力ベクトル、 $\mathbf{p}_{ij}$ ：要素 i, j 間の圧力ベクトル、 A_{cij} ：要素 i, j 間の接触面積である。

なお、 A_{cij} は次式によって与える。

$$A_{cij} = \frac{A_{ci} + A_{cj}}{2} \quad (14)$$

また、 p_{ij} は要素 i と j の内圧 p_i, p_j の平均値を用いるものとする。

$$p_{ij} = \frac{p_i + p_j}{2} \quad (15)$$

よって、図-5に示すような連続する擬水滴要素において、各擬水滴要素内の圧力は平均化されているが、隣接

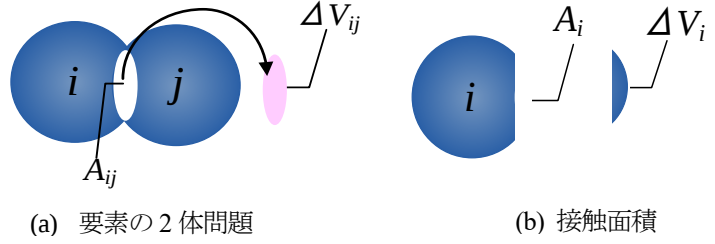
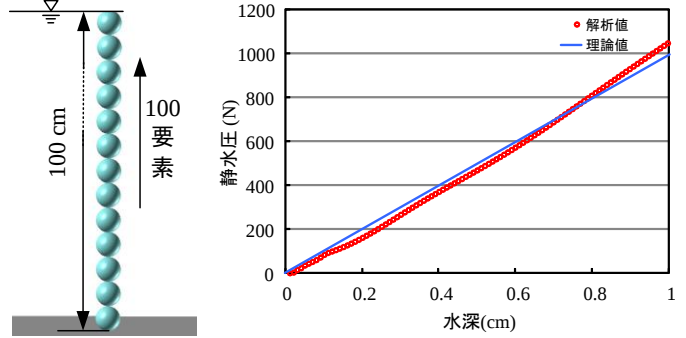


図-6 擬水滴要素の接触処理



(a) 解析モデル

(b) 静水圧

図-8 1次元における静水圧

する要素間に圧力差があるので、要素 i の左右の要素との圧力勾配により、並進方向に動かす力が生ずる。

2.5 内圧

擬水滴要素 i の内圧は、図-6に示すように隣接する要素間の重複体積 ΔV_{ij} を用いて次式によって求める。

$$p_i = E_{wi} \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (16)$$

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^{n_j} V_{ij} \quad (17)$$

ここで、 n_j ： i 要素に隣接する要素数（配位数）。

なお、 E_{wi} は体積収縮に伴う圧力係数であり、基本値として音速伝播速度を与える。

$$E_i = \rho_{wi} C_w^2 \quad (18)$$

ここで、 C_w ：水の音速伝播速度。

ΔV_{ij} については、接触に伴う重複半径 δ_{ij} を用いて次のように求める。まず、接触面積 A_{ci} を厳密に求めると次式になる。

$$A_{ci} = \pi r_i^2 \times \sin^2 \left[\cos^{-1} \left(r_i - \frac{\delta_i}{2r_i} \right) \right] \quad (19)$$

これを、計算処理を効率化するため多項式で近似して次のようにした。

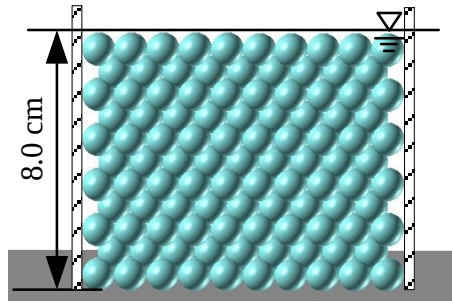
$$A_{ci} = \pi r_i^2 \left[-0.935 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right)^2 + 1.935 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right) \right] \quad (20)$$

$$\delta_i = \frac{r_i + r_j - l_{ij}}{2} \quad (21)$$

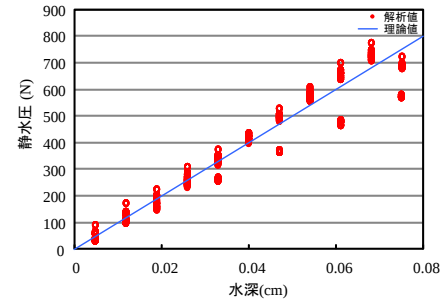
ここで、 l_{ij} ：2要素の中心点間距離である。

よって、 ΔV_{ij} は式(20)を積分して次式で与える。

$$\Delta V_{ij} = \pi r_i^3 \left[-0.312 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right)^3 + 0.968 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right)^2 \right] \quad (22)$$

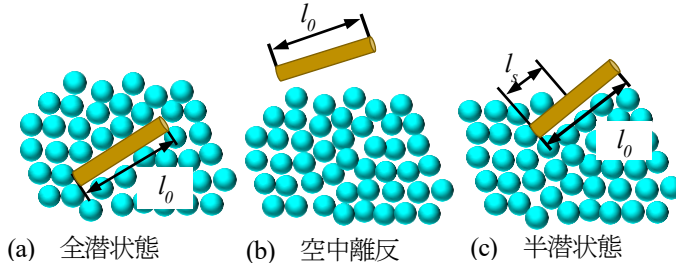


(a) 解析モデル



(b) 静水圧

図-9 3次元での静水圧比較



(a) 全潜状態 (b) 空中離反 (c) 半潜状態

図-10 流木に対する浮力の計算法

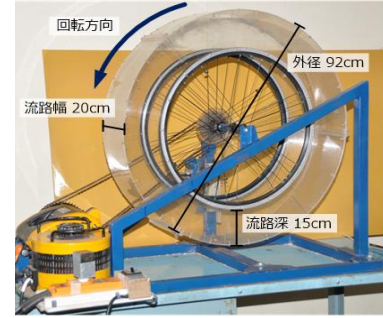


写真-2 回転円筒実験装置

なお、体積膨張にも対応するため、式(20)については、絶対値処理をするものとする。式(22)については、引張力に対応するため負値に対しても適用するものとした。よって、接触面積および重複体積の関数モデルは、図-7のようになる。なお、重複体積の膨張側を距距離反距離 δ_{cc} でカットオフするのは、自由水面からの離反をコントロールするためである。

2.6 静水圧解析における再現性の検証

図-8(a)に、一列に100要素配列したモデルで静水圧を検証した例を示す。これは、1次元モデルでの擬水滴要素を用いた静水圧評価を行っている。図-8(b)には、理論値における静水圧と解析で得られた静水圧を比較してみると、理論値と厳密解は最大で3 %程度の誤差は生じているが、ほぼ変わらないことがわかる。

図-9(a)は、擬水滴要素を六方最密構造で規則的に配列しているものである。要素数を約1000 個使用してモデル化している。そこでは、壁面接触や球形要素間にやや間隙が生じているためと思われるが、個々の要素が算出している値は、本来の理論値と少し離れていることがわかる。しかし、全体のマスで考えると、10 %程度の誤差である。つまり、最密な水圧による効果をシミュレーションするには難があるものの、本解析においては、流木の運動形態を整理するものであり、擬水滴要素と剛体要素における相互作用については、ドラッグフォースが卓越するので、流木の振舞いの予測に関しては概略信頼できるものと考えられる。

2.7 流木に働く流体力

ここで、流木と擬水滴要素の相互作用力について示す

こととする。式(9)における概念を以下のように検討している。

まず、流木に働く流体力は、①浮力と②動水圧である。浮力については、流木の状態を図-10 に示す3つの状態に分けた。図-10(a)に示すように、流木全体が水滴要素に囲まれている場合には、次式のように浮力を流木の重心位置を与えた。

$$F_f = V_s \cdot W_w \quad (23)$$

ここで、 F_f ：浮力、 V_s ：流木の体積、 W_w ：水の単位体積重量である。

次に、図-10(b)のように流木が全く水中に無い状態では、

$$F_f = 0 \quad (24)$$

とした。

さらに、図-10(c)に示すように半分ほど潜っている場合には、次式のようにした。

$$F_f = \frac{\ell_s}{\ell_0} \cdot V_s \cdot W_s \quad (25)$$

ここで、 ℓ_s ：水中にある流木長である。 ℓ_s の算定については、次のように求めた。

$$\ell_s = \frac{N_{cs}}{N_T} \ell_0 \quad (26)$$

ここで、 N_{cs} ：その時点で擬水滴要素と接触している箇所数、 N_T ：図-10(a)の全潜状態において流木と擬水滴要素が接触する箇所数（いくつかの状態の事前に生起させて平均値とした。）である。

また、浮力の作用位置は、水滴と接触している流木端から、 $\ell_s/2$ ほど中心に寄った位置とした。

続いて動水圧については、



写真-3 流木モデル

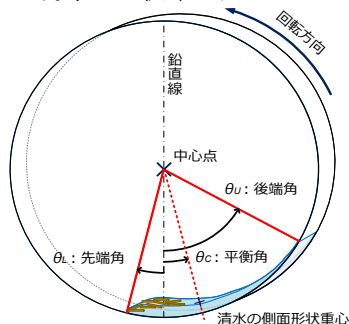


図-11 代表角度

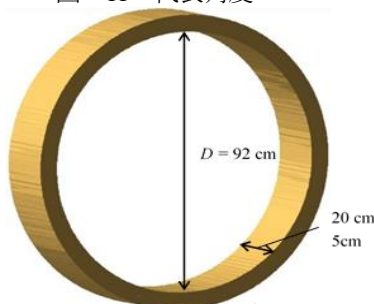


図-12 回転円筒モデル

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A (V_w - V_s)^2 \quad (27)$$

ここで、 F_D : 動水圧 (ドラッグフォース), C_D : 抗力係数 (1.0 とした.), A : 投影面積 (該当部分の流木の投影), V_w : 水の流速, V_s : 流木の流速である。

ただし、図-10(a) に示すように、流木流木全体が水滴要素に囲まれている場合には全潜状態となり、1 つの流木において代表点を 5 点のガウスポイントにおいて算定する、つまり、流木は回転すること、擬水滴要素の流速が場所によって異なることによる影響が生じる。図-10(c)の半潜状態では、 l_s 内に含まれるガウスポイントのみ計算した。

3. 回転円筒の実験要領²⁵⁾

3.1 回転円筒実験装置

写真-2 に実験装置を示す。装置は、幅 20 cm、外径 92 cm、流路深さ 15 cm の回転円筒型アクリル板流路に、電動機と減速機を連結したものであり、側面および底面からの流動状態の観察が可能である。この回転円筒実験装置の特徴は、流路長に制約がなく、対象の運動範囲をほぼ固定して流体運動を定点観測でき、条件を整えば、定常平衡状態を長時間維持することが期待でき、定点観測が可能となる。

表-2 実験ケース

シリーズ	水深 h (mm)	底面速度 v (m/s)	流木長 l (mm)	流木本数 n	ケース数
水のみ	20	0			28
流木 混じり	30	0.5		25	144
	40	1.0	60	50	
		1.5	120	100	
	50				
流木のみ	なし	2.0	60	50	126
		2.5	120	100	
		3.0	180		

表-3 解析基本値

項目			値
円筒モデル	円柱形要素		360
	平面要素		2
擬水滴要素	直径 r_w		0.6
	比重 ρ_w (kg/m ³)		1910
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n (N/m)	1.0×10^6
		接線方向 K_s (N/m)	1.5×10^5
	要素間摩擦係数 $\tan \phi_e$		0.5774
	減衰定数 h		0.8
	粘着力 C (N)		0
擬水滴要素	法線方向 E_w (N/m ²)		2.25×10^9
計算条件	時間刻み Δt (s)		1.0×10^{-7}

3.2 流木モデル

写真-3 に、使用した流木モデルを示す。流木モデルは直径 6 mm の円柱形の木材であり、流木長が 60 mm, 120 mm, 180 mm の 3 種類を使用した。木材の比重は、乾燥時 0.70, 湿潤時 1.06, 実験時 0.8~0.95 程度である。

3.3 代表角度

実験装置の底面速度を一定に保つと、水や流木はほぼ同じ位置に留まる。この状態を平衡状態と呼ぶ。また、図-11 に、この平衡状態における各諸元の角度の定義を示す。水の先端を先端角 θ_L 、後尾を後端角 θ_U 、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。これらは、実験装置に直交して設置したカメラにより撮影した写真から判定した。なお、代表角度の識別を容易にするため水を赤色で着色した。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、円筒の回転方向 (反時計回り) を正としている。また、回転速度は、速度メーターを用いて計測した。

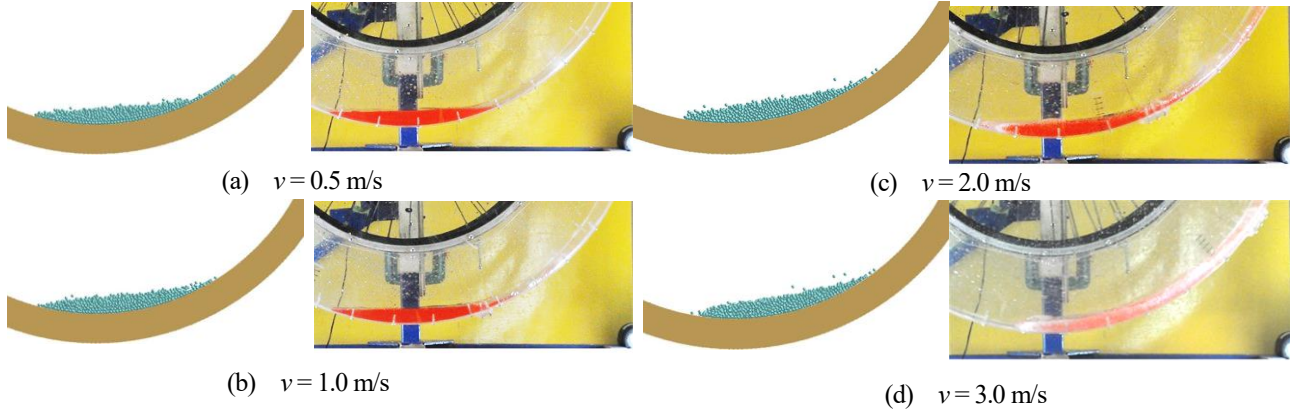
3.4 実験ケース

実験は、回転円筒内に水のみ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。表-2 に、実験ケースを示す。

まず、円筒内に水のみを入れ、静止状態における円筒内の最大水深を変化させた 4 種類の実験を行った。続い

表-4 解析対象条件

シリーズ	水深 h (mm) [擬水滴要素数($r_w=3.0$ mm)]	流木長 l (mm)	流木数 n (本)	底面速度 v (m/s)	ケース数
水	30 [6200] 40 [9800] 50 [13400]	-	-	0.5, 1.0 2.0, 3.0	12
流木	-	60 120, 180	50 100	2.0	6
流木混じり	40 [9800]	60, 120	50	3.0	

図-13 水のみの実験・解析 ($h = 30$ mm)

て、円筒内に流木モデルを混合し、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 (0.0 m/s) から 3.0 m/s までの 7 種類の速度条件で実験した。そのうえで、代表角度の段波生起条件およびその形状を測定した。これらのパラメータを組み合わせると 172 ケースと、流木だけの組み合わせを 126 ケースについて各ケース 3 回ずつ計測した。

4. 回転円筒内における再現解析とその考察

4.1 解析条件

図-12、表-3 に、本研究の解析における回転円筒モデルおよび基本解析値を示す。流木モデルは、円柱形要素を用いている。回転円筒モデルは、360 個の半径 30 mm の円柱形要素をその半径の 28.5% ずつずらして重ね合わせるように配列して形成している。要素の初期配列は、回転円筒内に要素の自重によって形成される落下法により配置した。水と流木が混じり合う状態については、擬水滴要素を配置した後、流木モデルを配置した。なお、擬水滴要素の半径 r_w は 3 mm とした。これは、回転円筒内において流水の運動形態を参考にして、水における振舞いの再現性が高いものを検証して粒径を決定した。また、表-4 に水のみ、流木のみ、流木混じりにおける再現解析の対象とした全ケースを示す。解析は、水のための 2 ケースと流木のための 8 ケースについて再現解析を行い、実験で観察された運動の再現性について確認した。なお、これらのケースは前述の実験において、段波が発生する

ときに流木の偏析現象が生じることがわかっている。従って、本研究においては、水のみ、流木のみおよび流木混じりの実験において、段波形状の再現解析を対象としている。

4.2 水のための再現解析

図-13 に、水深 $h = 30$ mm における底面速度に対応する解析で得られた水面形状および実験における水面形状を示す。図-13(a)に示す $v = 0.5$ m/s では、実験結果が先端角 $\theta_L = -19.0^\circ$ 、後端角 $\theta_U = 24.7^\circ$ 、重心角 $\theta_C = 2.5^\circ$ であるのに対して、解析では、 $\theta_L = -15.5^\circ$ 、 $\theta_U = 37.8^\circ$ 、 $\theta_C = 6.4^\circ$ となった。また、解析も実験における底面速度の影響により先端部がやや丸みを帯びる形状が再現できている。一方、後端部付近の極めて浅い領域の形状は、実験と解析において異なる形となるので、後端角は解析の方が大きい。図-13(b)に示す $v = 1.0$ m/s では、実験が先端角 $\theta_L = -19.5^\circ$ 、後端角 $\theta_U = 31.1^\circ$ 、重心角 $\theta_C = 2.5^\circ$ であるのに対して、解析では、 $\theta_L = -13.9^\circ$ 、 $\theta_U = 30.2^\circ$ 、 $\theta_C = 6.5^\circ$ となり、実験を再現できた。次に、図-13(c)に示す $v = 2.0$ m/s では、実験結果が先端角 $\theta_L = -12.5^\circ$ 、後端角 $\theta_U = 43.3^\circ$ 、重心角 $\theta_C = 7.3^\circ$ であるのに対して、解析では、 $\theta_L = -10.1^\circ$ 、 $\theta_U = 35.0^\circ$ 、 $\theta_C = 10.2^\circ$ となり、実験結果を概ね再現できている。解析における流体の先端部は、擬水滴要素が積み重なって、実験の切り立つような水面形状となる段波形状を再現している。さらに、図-13(d)に示す $v = 3.0$ m/s では、実験が先端角 $\theta_L = -7.0^\circ$ 、後端角 $\theta_U = 61.5^\circ$ 、重心角 $\theta_C = 16.1^\circ$ であるのに対して、解析では、 $\theta_L = -8.8^\circ$ 、 $\theta_U = 36.9^\circ$ 、 $\theta_C = 11.5^\circ$ となり、 $v = 2.0$ m/s と同様の再現性を得

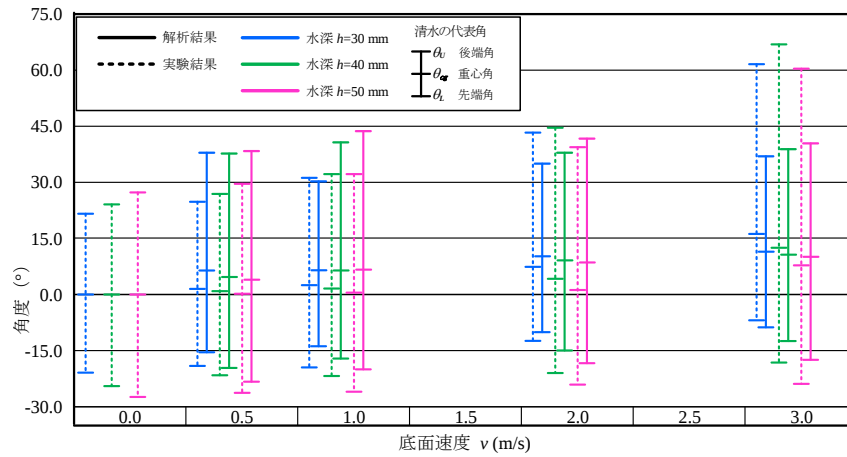


図-14 水のみにおける代表角度～速度関係

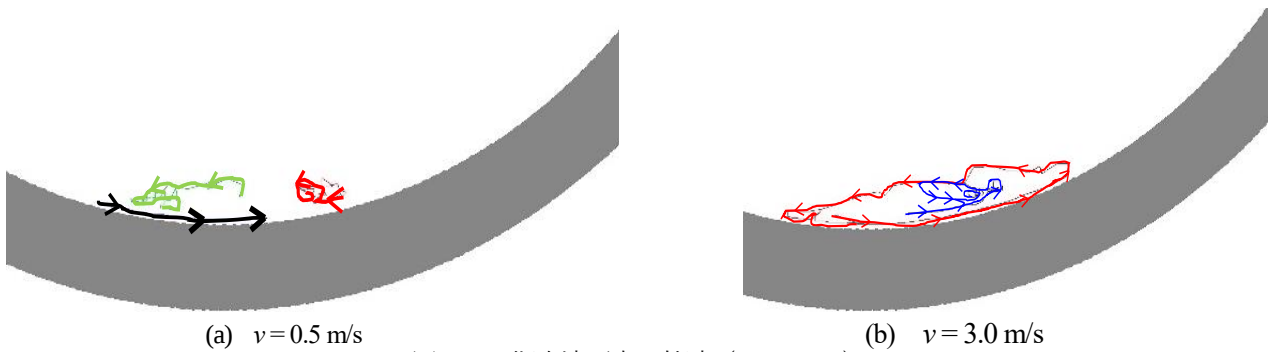


図-15 擬水滴要素の軌跡 ($h = 30 \text{ mm}$)

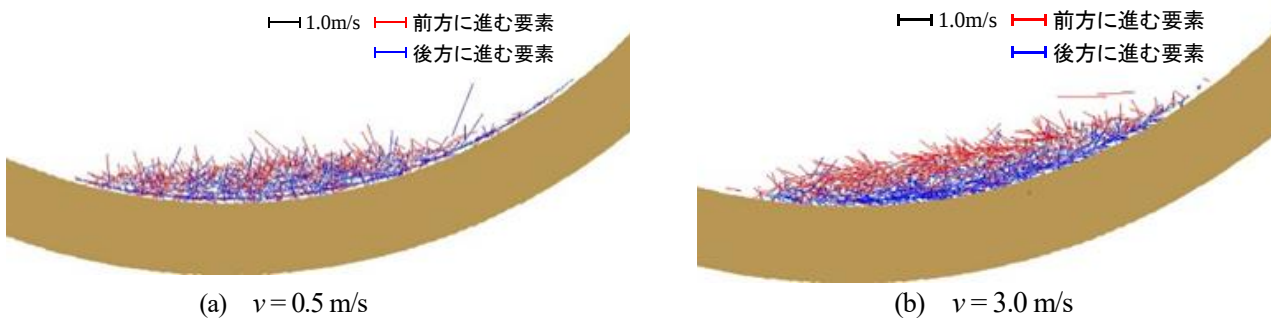


図-16 速度ベクトル ($h = 30 \text{ mm}$)

ている。

図-14に、解析結果の代表角度～速度関係を実験と比較して示す。実験は、底面速度が速くなると先端角および後端角は大きくなり流体全体が後退するが、解析においてもほぼ同じ現象を再現ができています。ただし、解析の後端部の形状の再現性が乏しいので、実験における底面速度が速くなると後端角が著しく後退する傾向を、解析では再現できていない。これは、擬水滴要素の大きさが、実験の水深に対して大きすぎると水と壁面における粘性効果について検討が不十分であるものと考えられるため、後端部付近の極めて浅い部分が表現できないためである。計算効率を向上させ、より細かい粒子を用いれば改善できると考える。しかし、流れの中での段波形成過程や生起条件におけるメカニズムについては概して捉えることができる。

4.3 擬水滴要素の運動

図-15に、水深 $h = 30 \text{ mm}$ 、底面速度 $v = 0.5 \text{ m/s}$ 、 $v = 3.0 \text{ m/s}$ の解析で得られた特徴的な1つの擬水滴要素の移動軌跡を示す。図-15(a)に示す $v = 0.5 \text{ m/s}$ では、底面速度が遅いため擬水滴要素の前後の移動距離は短く、浅層付近の擬水滴要素は、浮き沈みと前後への移動を繰り返しながら、先端部に移動している。図-15(b)に示す $v = 3.0 \text{ m/s}$ では、底面速度が速いため擬水滴要素の移動距離が長く、深部に位置している擬水滴要素は、後端部に遡り、その後は浅層を流れ下りながら先端部に移動し、流体内部を大きく循環している。一方、最深部に位置していない擬水滴要素は、後端部に移動すると、浅層に浮き上がることを交互に行う複雑な軌跡を描いている。

図-16に、図-13の実験に対応する各擬水滴要素の速度ベクトル図を示す。ここでは、回転円筒の回転方向と

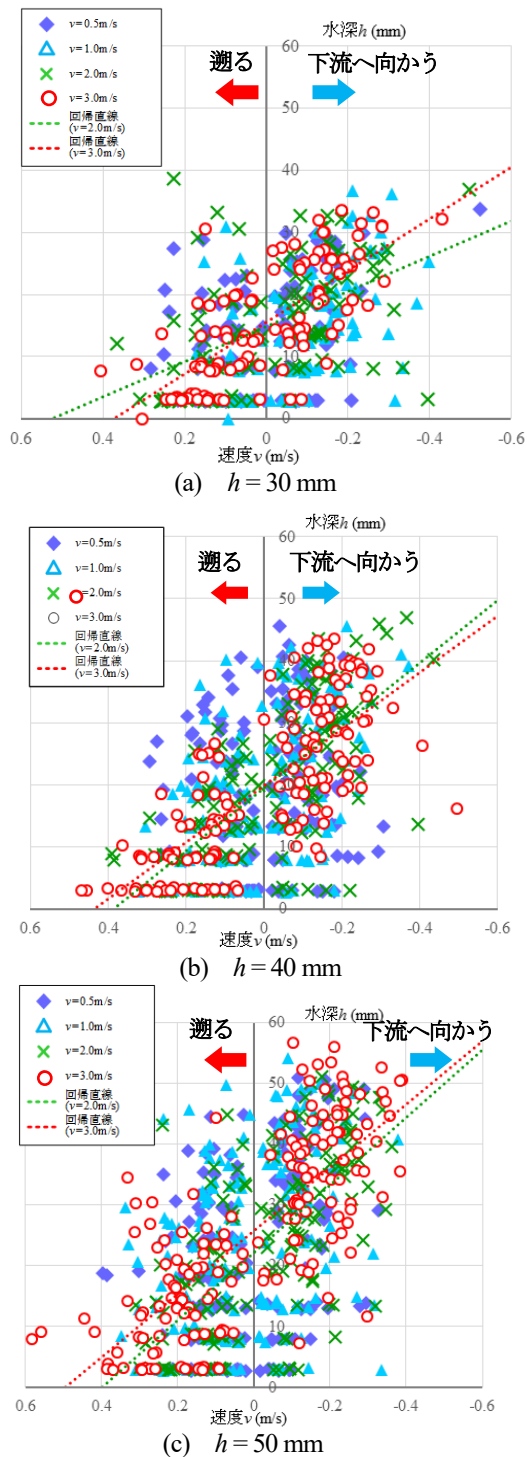


図-17 重心点付近における速度分布 ($h=30\text{mm}$)

同方向、すなわち先端から後端に移動する擬水滴要素の速度ベクトルを青線で、回転円筒の回転方向と反対方向、すなわち後端から先端に移動する擬水滴要素の速度ベクトルを赤線で示している。ここで、図-16(a)に示す $v = 0.5\text{ m/s}$ では、浅層付近に赤線、底面層付近に青線が多いことがわかる。ただし、中間層の部分におけるそれぞれの要素が混じり合っ、速度差によって混合していることがわかる。概して、浅層と底面層の間の中間層の領域は、ベクトルの方向がそれぞれ違う方向で入れ混じって

いる。一方、図-16(b)に示す $v = 3.0\text{ m/s}$ では、浅層付近では赤線が、底面層付近では青線が卓越している。中間層の乱れている領域は、 $v = 0.5\text{ m/s}$ と比較して狭いことがわかる。つまり、底面層付近では先端から後端への流れが、浅層付近では、後端から先端への明瞭な流れが生じている。

図-17に、各解析結果における分布域の重心点前後 1° 以内に存在する擬水滴要素の流速分布を示す。図-17(a)の水深 $h = 30\text{ mm}$ において $v = 0.5, 1.0\text{ m/s}$ では、水深によらずランダムに流速が分布している。さらに、 $v = 2.0\text{ m/s}$ では、浅層付近において先端、底面層において後端の流速が卓越している。 $v = 3.0\text{ m/s}$ では、浅層と底面層の間の流速がランダムに分布する領域が小さくなり、浅層と底面層の流速差が顕著になっている。この傾向は、図-17(b), (c)に示す水深 $h = 40\text{ mm}, 50\text{ mm}$ でも同様である。しかし、同一底面速度における流速分布を各水深で比較すると、浅層と底面層間の流速がランダムに分布する領域が大きくなっており、水深が深くなると底面速度により生ずる摩擦力の影響が上層の流れに対して反映されていない。この結果、底面速度が速くなることで、水流に循環運動が生じている。なお、高さ方向の流速分布の変化は本来、底面付近で急速に変化すべきであるが、擬水滴要素の大きさに制約があるため、再現できていない。

4.4 流木の実験再現解析

図-18~21に、解析において観測された代表的な流木塊の運動形態を示す。流木塊のみの再現解析については、流木塊の実験と同様に、流木塊の形成の有無と配置変換の有無について流木の運動形態を区分し考察する。

(1) 平衡状態

図-18に、平衡状態にある流木群を示す。この平衡状態においては、個々の流木モデルが互いに絡まることなく、静止摩擦の限界近くまで持ち上げられ、平衡状態となる。図-18(d)に示す同条件の実験では、それぞれの要素が前後に移動するスティックスリップ現象を生じており、揺動を生じたこととすこし違う現象となった。これは、実験では底面の加工精度にばらつきがあるのに対し、解析は均質一様であるためであると考えられる。

(2) 気化状態 [配置変換あり] の再現性

図-19に、実験で気化状態 [配置変換あり] を示した $v = 2.0\text{ m/s}$, $l = 120\text{ mm}$ の解析結果を示す。気化状態 [配置変換あり] とは、図-19(d)に示す実験のように流木モデルが流木塊を形成せず、流木が後方移動の途中で持ち上げられ、その後前方に転倒する挙動を示し、配置変換が生じる。しかし、解析においてはその変化があまり見られず、後方に到達した流木モデルの一部が前方に張り出し、流木全体が大きく動く程度である。つまり、解析では円柱が前後して大きく乱れる現象を再現することが難しく、動摩擦と静止摩擦の変化や回転円筒との相互作用に若干のランダム性を与えるなどの工夫が必要である

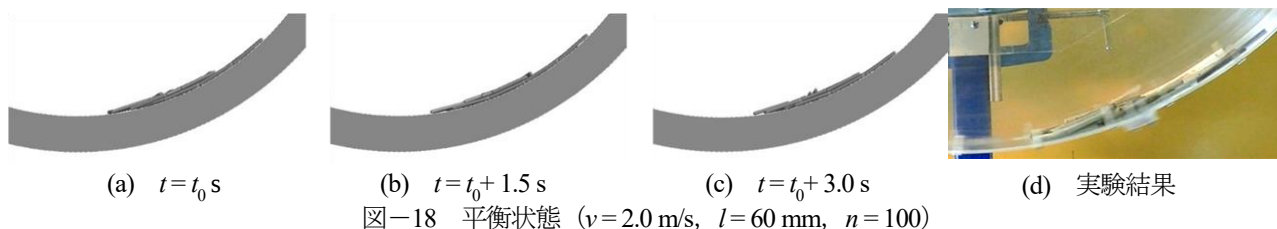


図-18 平衡状態 ($v=2.0$ m/s, $l=60$ mm, $n=100$)

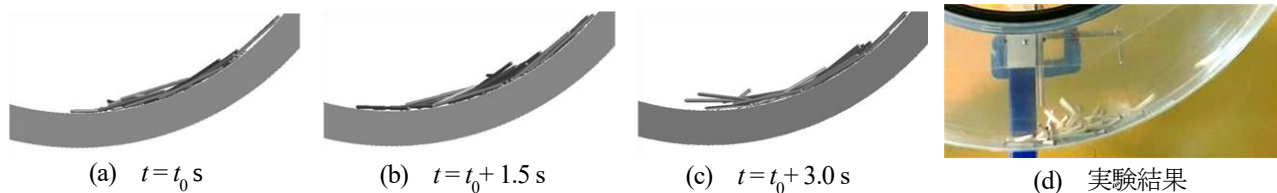


図-19 実験における気化状態 [配置変換あり] の解析 ($v=2.0$ m/s, $l=120$ mm, $n=50$)

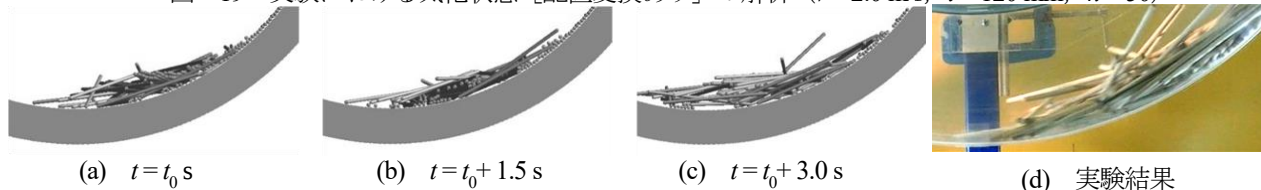


図-20 流木塊 [配置変換なし] ($v=2.0$ m/s, $l=180$ mm, $n=100$)

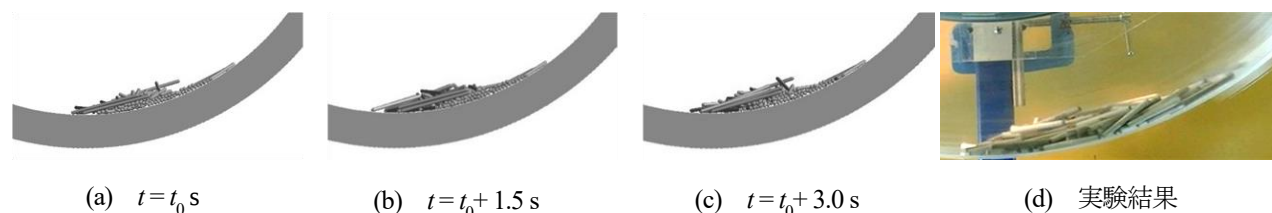


図-21 流木塊 [配置変換あり] ($v=2.0$ m/s, $l=120$ mm, $n=100$)

と考えられる。

(3) 流木塊 [配置変換なし]

図-20 に、実験の $v=2.0$ m/s, $l=180$ mm, $n=100$ で得られた流木塊 [配置変換なし] の解析結果を示す。流木モデルが流下の途中で互いに絡み合い流木塊を形成するとともに、流木塊は一定の位置にとどまっている。いずれの結果においても大量の流木が絡み合っており、流木内の運動において配置変換が起きていない。

(4) 流木塊 [配置変換あり]

図-21 に、 $v=2.0$ m/s, $l=120$ mm, $n=100$ の流木塊 [配置変換あり] が得られたものを示す。流木モデルが流下する途中で流木塊を形成するが、流木塊内後方の流木モデルは、流木塊を乗り越えて前方に出る。前方に出た流木モデルは底面と接触し、後方に移動することで、再び前方に移動する。

4.5 流木混じりの実験再現解析

図-22 に、水深 $h=40$ mm, 底面速度 $v=3.0$ m/s, 流木長 $l=60$ mm, 流木本数 $n=50$ とした解析結果を実験結果と比較して示す。解析においては、上面からの図も示している。実験では、流木は先頭に偏析し、流木塊を形成している。この流木塊は、時間が経過しても平衡状態を維持しているが、流木塊内の流木は、塊の内部で循環し、偏析状態 [配置変換あり] の運動形態を示す。一

方、解析において擬水滴要素が平衡状態となった時 ($t=t_0$) の状態は、流木がやや拡散して存在しているものの、 $t=t_0+3.0$ s では、流木が先頭に集まり偏析するとともに流木塊を形成している。その後、流木塊は平衡状態を維持し、流木塊内の各流木モデルは循環しながら移動している。また、この時の擬水滴要素の運動は、先端部が切り立つとともに盛り上がった段波が形成している。また、流木が偏析し、流木塊を形成する $t=t_0+2.0$ s 以降では、段波の形状がさらに明瞭になっている。以上の解析結果は実験結果における流木塊 [配置変換あり] の運動と良く一致している。

図-23 に、底面速度 $v=3.0$ m/s, 流木長 $l=60$ mm, 流木本数 $n=50$ と同一条件にして、水深を $h=20\sim50$ mm に変化させた場合における解析結果を示す。各条件の運動形態は、流木塊 [配置変換あり] における運動形態と同様の傾向を示している。水深 $h=50$ mm では、実験における運動形態が、流木が相互に配置変換せずに浮遊する状態であるのに対して、解析結果では流木塊 [配置変換あり] となっており、浮遊状態の運動形態は再現できなかった。ただし、水深を変化させたときの代表角度は、水深が浅くなるほど後退しており、流木混じりの実験における代表角度の変化と同様の傾向を示している。図-24 に、底面速度 $v=3.0$ m/s, 流木長 $l=60$ mm, 流木本数 $n=100$ として、水深 $h=20\sim50$ mm に変化させた場合

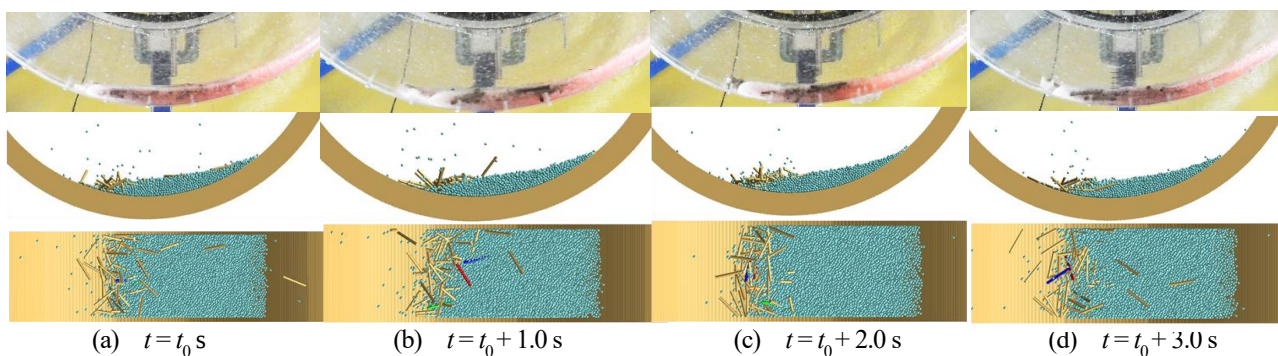


図-22 流木混じりの回転円筒実験結果と解析結果の比較
($h = 40 \text{ mm}$, $v = 3.0 \text{ m/s}$, $l = 60 \text{ mm}$, $n = 50$)

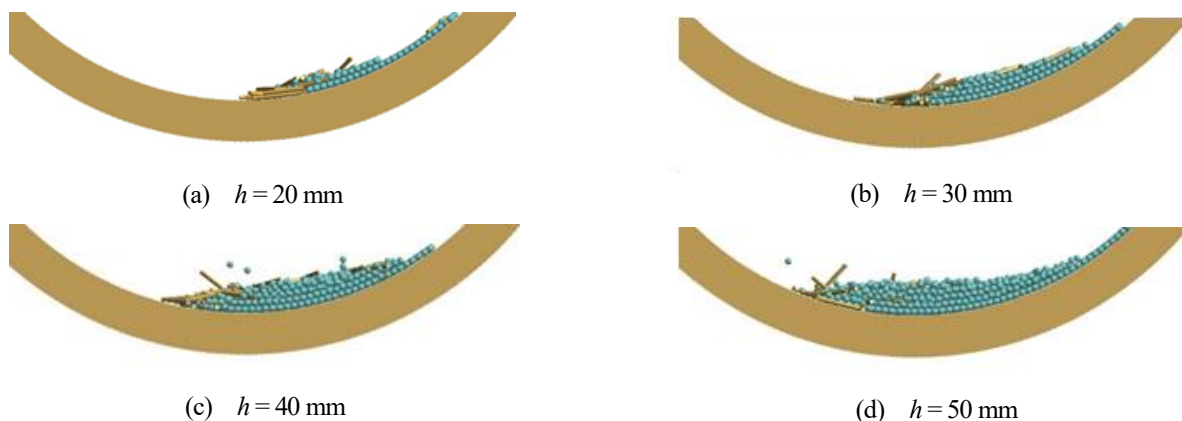


図-23 流木数 $n = 50$ の解析結果

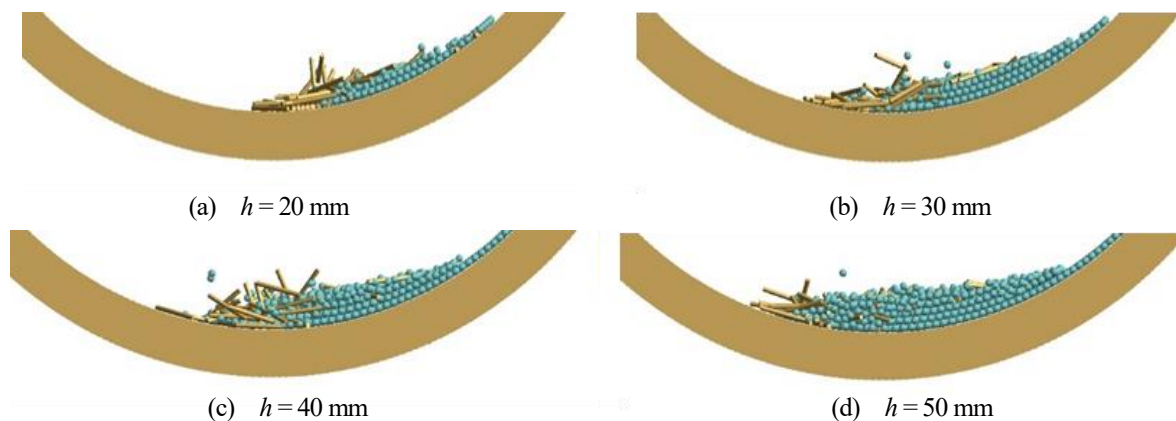


図-24 流木数 $n = 100$ の解析結果

の解析結果を示す。各条件における擬水滴要素内の流木モデルは、図-21 で示した流木塊〔配置変換あり〕の運動と同様の傾向を示している。実験で観測された流木の運動形態と一致しており、解析は、実験を概ね再現できている。また、各水深における水面形状を図-22 で示した流木数 $n = 50$ と比較すると、代表角度が若干後退しており、実験における流木数が多くなると流体全体の占有領域が後退する傾向があるが、解析においても同様の運動形態を再現できている。

図-25 には、図-23 と対応する擬水滴要素の速度ベクトル分布を示す。水のみ解析と同様に、底面層付近では青線が、浅層付近においては赤線が多く表れている。つまり、流木混じりにおいても水全体において、底面層付近では先端から後端への流れが、浅層付近では後端か

ら先端への流れが生じており、水が循環していることがわかる。また、先端付近の水深方向に対する速度ベクトルの分布は、相対的に浅層に分布している回転方向に対して反対方向の速度ベクトルが多くなっている。つまり、中層付近まで後端から先端へ流下する流れが卓越している。

図-26 に、図-15 の解析における擬水滴要素のサイズを $1/5$ に縮小して作画し、流木の動きを見やすくしたうえで、一つの流木モデルを赤色で表現した追跡図を示す。これより、 $t = t_0$ の初期状態において、流木モデルは浮力により浅層付近に浮上する。 $t = t_0 + 1.0 \text{ s}$ では、擬水滴要素の浅層付近の後端から先端への流れにより、流木モデルは先端に流出する。 $t = t_0 + 2.0 \text{ s}$ では、段波先端における擬水滴要素の浅層から底面層に流れにより、流木モデ

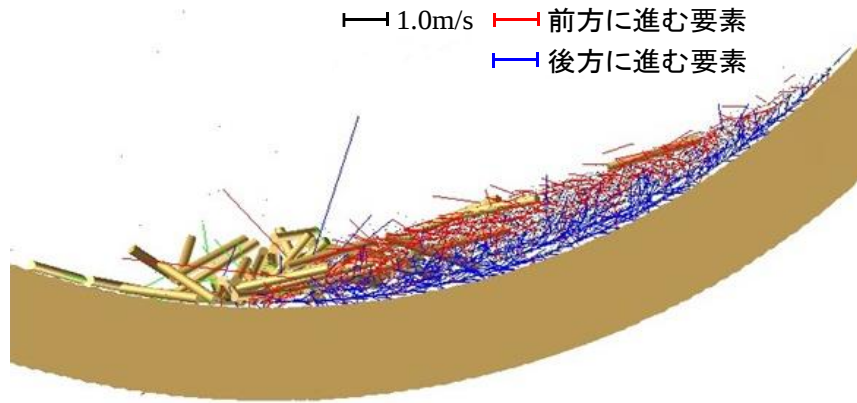


図-25 回転円筒解析の速度ベクトル ($h=40\text{ mm}$, $v=3.0\text{ m/s}$, $l=60\text{ mm}$, $n=50$)

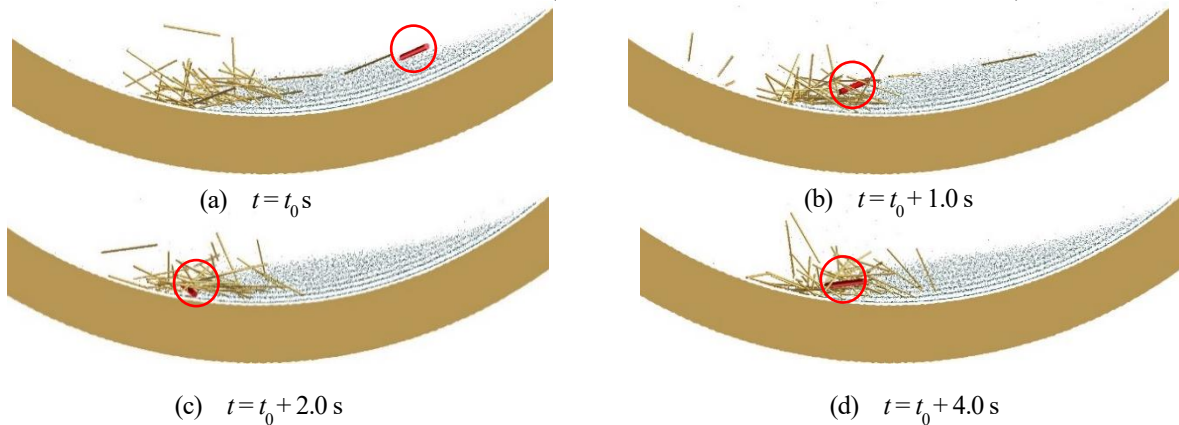
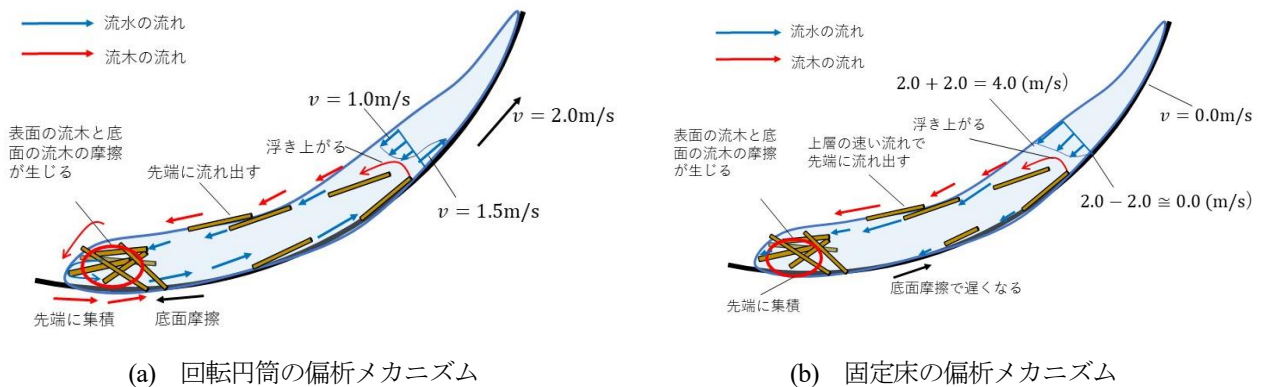


図-26 流木モデル追跡図 ($h=40\text{ mm}$, $v=3.0\text{ m/s}$, $l=60\text{ mm}$, $n=50$)



(a) 回転円筒の偏析メカニズム

(b) 固定床の偏析メカニズム

図-27 流木偏析の模式図²⁵⁾

ルは底面に押し付けられ、摩擦が生じるとともに、他の流木モデルと接触しながら後端へ流出する。 $t = t_0 + 4.0\text{ s}$ では、流木モデルの浮力により浅層へ浮かび上がる。その際、先端から後端への擬水滴要素の流れは底面層のみに分布するため、流木モデルが少しでも浮上すると、浅層から中層に分布する底面層の流れと逆方向となり、後端から先端への流れに乗って前方に流れる。つまり、浅層に浮遊する流木モデルは、擬水滴要素の循環によって先端に流れ出し、段波先端で底面に押し付けられるように底面層に沈み、後端へ流れ出すことになる。このとき、他の流木や底面と接触するとともに、浮力により浮かび上がりながら浅層の擬水滴要素の流れの影響を受け、流水全体の前方で浅層に浮かび上がることがわかる。これ

は、実験で観測された流木の偏析機構と概ね一致している。

ここで、図-25、26の結果を固定床に置き換えて考察すると、図-27に示すような動きとなる。つまり、①水路床付近の底面層では、底面速度より小さな速度で後退する水の流れが生じている。一方、水面付近の上層部では、先端に向かう速い流れがある。②次に、その流れ中の浅層に浮かんだ流木は、浅層の速い流れに乗って先端に移動するが、段波先端に達すると進めなくなり底面層に沈む。③流木が底面に接すると摩擦が生ずるため、流木は段波内の後方へ遅れるようになる。④しかし、浅層の流木と速度差が生ずるため、お互いに摩擦や制動が働くとともに、時として絡み合う。⑤形成された流木塊は

容易に後退できなくなり、益々流木が集積される。⑥流木が多量に集積されると流木相互の配置変換が困難になり、流木塊が一つの固体のように集合運搬される。このような現象を通して、流木における偏析現象によって土石流の先端に流木が集まる現象が生起することになる。

5. 結 言

本研究は、回転円筒実験装置を用いて、水のみ、流木のみおよび水と流木の混合状態における偏析現象の実験を行い、個別要素法を適用した擬水滴要素および円柱形要素を用いて再現解析を試みたものである。その際、個々の運動形態、偏析現象のメカニズムについて分析した。

- 1) 水のみ回転円筒解析において、擬水滴要素を用いて回転円筒内に生起する段波形状を再現できた。
- 2) 擬水滴要素の軌跡図および速度ベクトル図を分析し、水のみ回転円筒実験において、段波形成された水の内部に生起する水流は循環していることを示した。
- 3) 流木の実験に対する解析は、流木塊の運動形態について、実験で気化状態〔配置変換あり〕となる場合を除いて、概ね実験結果を再現できた。
- 4) 流木混じりの実験において、流木塊内部で個々の流木が配置変換する偏析状態を解析すると、段波形成や流木の偏析および流木塊内における流木の循環現象を再現できた。
- 5) 上述の再現解析を通して、擬水滴要素が循環しており、流木モデルは円筒内を循環する擬水滴要素の中で浮力により浮かぶため、流水の先端に流されて集まることで偏析するメカニズムを示した。

その上で段波状態にある水の流れは、上流が下流に向かう時の流速は速くなり、相対的に循環しているような動きが生ずる。よって、流れの中での流木は、浮力によって浅層に移動するため、常に段波先端へ運搬されることになる。この現象が、流木の偏析を作り出す原因であることを示した。

- 6) 本研究は、回転円筒実験において段波が生じた条件や流木が偏析した特徴的なものについて解析したものである。直線水路内の偏析等にシミュレーション範囲を拡張して、偏析現象の一般性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 内閣府：平成26年度版防災白書, pp.112-113, 2014.7.
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート, pp.32, 2014.6.
- 3) 財団法人 砂防・地すべり技術センター：平成25年 土砂災害の実態, 財団法人 砂防・地すべり技術センター, pp.3-22, 2014.5.
- 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, vol.63, No.5, pp.43-46, 2011.1.

- 5) 石川芳治, 池田暁彦, 柏原佳明, 牛山素行, 林真一郎, 森田耕司, 飛岡啓之, 小野寺智久, 宮田直樹, 西尾陽介, 小川洋, 鈴木崇, 岩佐直人, 青木規, 池田武穂：2011年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.5, pp.61-72, 2014.1.
- 6) 国土交通省砂防部, 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説, 2018.4.
- 7) 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, vol.51, No.2, pp.39-44, 1998.7.
- 8) 石川芳治, 水山高久, 福澤誠：砂防ダムおよび流木止めスクリーンにおける流木捕捉効果, 土木技術資料, Vol.31, No.11, pp.41-47, 1989.9.
- 9) 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. 26-2, pp.9-13, 1984.2.
- 10) 足立昭平, 大同淳之：流木に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 1, pp.41-48, 1957.
- 11) 藤間功司, 首藤伸夫：ドライベッドを遡上する長波の抵抗則, 土木学会論文集, Vol.1988, No.399, pp.203-212, 1988.11.
- 12) 原田紹臣, 和田孝志, 古谷智彦, 中谷加奈, 水山高久, 里深好文：土石流先頭部における大粒子の集積過程に関する基礎的な実験, 砂防学会誌, Vol.68, No.1, p.39-43, 2015.5.
- 13) 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.295-298, 1989.5.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 福間雅敏, 前田健一, 湯浅知英：石礫流の中の分級と跳ね返りのメカニズムに関する考察, 実務利用を目指すマイクロジオメカニクスに関するシンポジウム, pp.1-6, 2008.11.
- 17) 前田健一, 館井恵, 福間雅俊：個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.11.
- 18) 中川 一, 高橋 保, 池田正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集, Vol.37, pp.379-384, 1993.2.
- 19) 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子：個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析, 水工学論文集, Vol.50, pp.787-792, 2006.
- 20) 澁谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆, 水山高久：円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学

- 会論文集A2(応用力学), Vol.67, No.1, pp.113-132, 2011.10.
- 21)香月智, 渋谷一, 大隅久, 國領ひろし, 石川信隆: 個別要素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.1, pp.16-29, 2013.2.
- 22)堀口俊行, 香月智: 擬水滴要素個別要素法による堰堤に対する衝撃荷重評価への試み, 構造工学論文集, Vol.61A, pp912-925, 2015.3
- 23)堀口俊行, 香月智: 底面水抜きスクリーン実験の水と礫の分離挙動メカニズム, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2 (応用力学論文集 Vol. 17) ,I_429-I_440, 2015.2
- 24)Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, Proc.Symp. ISRM,Nancy France, Vol.2, pp.129-136, 1971
- 25)立石龍平, 堀口俊行, 香月智: 回転円筒実験における流木混じり土石流の段波形成に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.61A, pp926-934, 2015.2.
- (2018年9月21日受付)
(2019年2月1日受理)