

# 橋脚周辺の流木の三次元挙動とそのシミュレーション

## Computations on driftwood motions around bridge piers

- 木村 一郎 1, 富山大学都市デザイン学部, 富山市五福 3910, E-mail: ichiro@sus.u-toyama.ac.jp
- 妹川 陽介 2, 北大院, 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目, E-mail: yt250@eis.hokudai.ac.jp
- 北園 和也 3, 中部電力, 名古屋市東区東新町 1 番地
- Ichiro Kimura<sup>1</sup>, Affiliation, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan
- Yosuke Imokawa<sup>2</sup>, Affiliation, N13, W8, Kita-ku, Sapporo 060-8528, Japana
- Kazuya Kitazono<sup>3</sup>, Chubu Electric Power, Co. Inc., 1 Higashi-shincho, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-8680, Japan

Prediction of driftwood behavior in rivers is an important task from the viewpoint of water disaster mitigation. Driftwood deposition near the bridge piers is an important phenomenon that causes bridge failures and flooding caused by clogging of river channels. The purpose of this research is to develop a numerical model to reproduce this phenomenon and to examine the behavior of stacking. The experimental and computational results showed that the Driftwood Richardson number is one of dominant parameter to classify 2D and 3D stacking patterns.

### 1. はじめに

近年、出水時の河川において流木が主体となる災害が頻発している。これには、構造物の破壊や機能低下、上流河川の水位上昇や周辺河床の浸食など様々なパターンが存在する。中でも、橋脚への流木の捕捉に伴う橋梁破壊や上流側の水位堰上げによる溢水は頻繁に発生しており、早急なる現象解明と対策立案が必要といえる。

河川流水中を移動している流木の挙動は浮力の作用を受けるため、主に水面付近に限定された二次元性の卓越した現象と考えられる。しかし、水面流動は二次流などの流れの三次元性が関与しているため、間接的に流木挙動も流れの三次元性の影響を受ける。また、流木が橋脚などの構造物に捕捉され停止する過程においては、水理条件によって流木の沈降などが生じ、流木挙動そのものが強い三次元性を呈することが知られている。このような現象について、その支配パラメータを解明すること、およびこれらの現象を精度良く再現するモデルを構築することは、流木災害の予測や減災対策の立案において極めて重要となる。

木村ら<sup>1)</sup>は、流木が障害物に衝突し、捕捉される現象について、水理模型実験と数値解析により検討を行った。この結果、流木の捕捉が三次元的に生じる場合と二次元的に生じる場合が存在することを述べるとともに、これらが次式で表される「流木リチャードソン数(Driftwood Richardson number, DRI)」によって区分されることを示した。

$$DRI = -\frac{g\Delta\rho h}{\rho u^2} = -\frac{g\Delta\rho B^2 h^3}{\rho Q^2} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ は流体密度、 $\Delta\rho$ は流木と水の密度差、 $h$ : 水深、 $u$ : 平均流速、 $Q$ : 流量、 $B$ : 川幅 (水路幅)、 $g$ : 重力加速度である。流木リチャードソン数は、密度流の安定性を支配するパラメータとして一般的に用いられる無次元数である。このパラメータの導入は、固・液二相流である流木混入河川流を巨視的に見て一相の密度流として近似して扱うことを意味する。流木リチャードソン数が大きいと、慣性力に対して浮力が卓越するため、流木挙動は水面付近の二次元性が強く現れるが、この値が小さいと、浮力に対する慣性力の割合が大きくなるため、流木挙動はより三次元的となる。木村ら<sup>1)</sup>は流れを三次元、流木挙動を水面付近の二次元運動と仮定した数値解析モデル (3D-2D モデル) を用いて実験結果のシミュレーションを実施し、流木リチャードソン数を変化させた実験結果による考察から、3D-2D 型モデルの適用範囲は流木リチャード

ソン数が概ね 10 程度以上の場合に限られることを示した。これは、流木リチャードソン数の値がこの値を下回ると、流木挙動も三次元的に扱うモデル (3D-3D モデル) を用いる必要があることを意味している。

本研究では流れと流木をともに三次元的に扱う 3D-3D 型モデルの構築を行い、実験結果の比較からその再現性を検証する。

### 2. 数値解析モデル

本研究では、液相の流動を三次元的に解くとともに、固相の流木挙動も三次元的に取り扱う。液相、固相のモデルの概要を次に述べる。

#### (1) 液相のモデル

流動計算には河川共通プラットフォーム iRIC 上の三次元ソルバー NaysCUBE を用いる<sup>2)5)</sup>。このモデルでは乱流モデルは二次非線形  $k-\epsilon$  モデル<sup>6)</sup>を使用しており、座標系は構造格子の境界適合移動一般曲線座標系 (シグマ座標系) としている。本研究ではこれをベースに、流木からの抗力項を運動方程式に付加し Two-way 化を図った。この Two-way 型モデルは iRIC, ver.3 より実装公開されている。

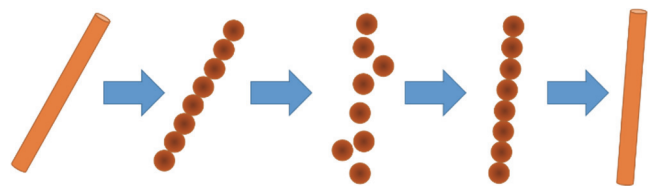


Fig.1 Model for moving driftwood piece

#### (2) 固相のモデル

流木の追跡計算には、初田ら<sup>6)</sup>や清水ら<sup>7)</sup>同様、越塚<sup>8)</sup>が MPS 型粒子法において示した計算方法を援用する。まず、流木は球体を複数個直列に並べることで表現する。これは、流木の回転や衝突のモデル化を容易にするためである。Fig.1 は流木計算のプロセスを示している。球体それぞれの動きを独立した球体運動として計算した後、球体中心座標の平均値を取ることで流木重心を求める。計算により流木角度、平均速度を求め、流木を再度一直線に並べ替える。このプロセスを計算ステップ毎に繰り返すことで流木の挙動を追跡する。本手法は計算時間間隔が十分小さい場合、剛体とみなした流木運動を近似していると考えられる。

流木の並べ替えにはクォータニオンを用い、流木同士の衝突には DEM (Discrete Element Method) 法を用いた。流木と障害物との衝突については、まず衝突判定をいかに行うかが問題となる。本研究ではモデルを簡単にするため、水平面内の衝突判定は凸型ポリゴンの内外判定を用い、鉛直面内の判定には近似的に計算格子境界面を水平と仮定して衝突判定を行った。これはシグマ座標系の格子を液相に用いており、上下メッシュ界面の傾き角が相対的に小さいという仮定のもとに用いた近似である。これらの妥当性についてはさらに検証を進める必要がある。また、境界面と流木の反発には完全反発を仮定したが、この点についてもさらに検討が必要である。

### 3. 検証実験

検証実験は、幅 20cm 長さ 10m の長方形断面直線回流水槽を用い行われた。また流木の模型としては、長さ 4cm、直径 5mm、比重 0.6 の円柱型木片を用いた。Fig.2 に実験装置の模式図と実験条件の概要を示した。流量を一定とし、下流端の水深を堰板により調節することにより、異なる流木リチャードソン数の流れを与えた。流木の挙動は通常のビデオカメラにより撮影し、考察した。

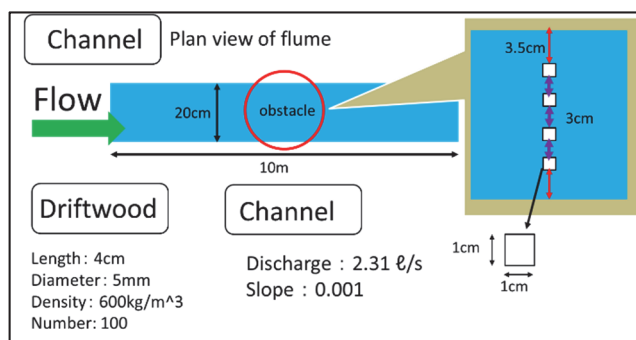


Fig.2 Experimental setup

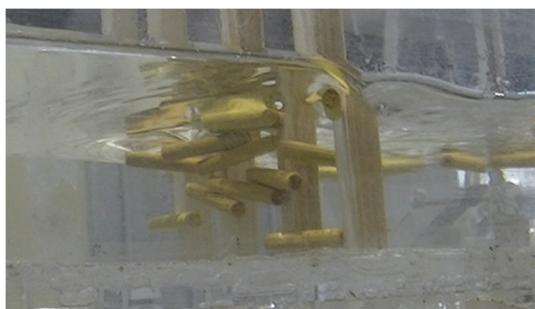


Fig.3 Snap shot of the laboratory test (DRI=3.67, flow direction is from the left to the right.)

Fig.3 に実験結果の様子の一例を示す。この場合は流木リチャードソン数の値が 3.67 であり、木村ら<sup>(1)</sup>の区分では、三次元性が卓越する条件となる。この図における流木堆積も障害物前面で水面から底面にかけて三次元的な捕捉が見られる。流木リチャードソン数が大きい場合は捕捉が水面付近に限定され、二次元的となる点も既往研究<sup>(1)</sup>と同様であった。

### 4. 数値解析結果

数値解析においては、計算時間の短縮のため、水路の障害物付近の流れ方向 1m の範囲を計算領域とし、計算格子分割は 200 (水路方向) × 40 (横断方向) × 10 (鉛直方向) とした。乱流モデルは二次非線形  $k-\epsilon$  モデルとし、移流項の離散化には三次の TVD-MUSCL 法、時間積分には二次のアダムス・バッシュフォース法を用

いた。

Fig.4 に流木リチャードソン数が 3.67 の場合の計算結果の鳥瞰図を示す。障害物周辺で流木の捕捉が再現されており、またその形態は実験と同様三次元的 (鉛直方向にも分布) である。これより、本モデルは橋脚周辺の流木捕捉現象をある程度再現できることが確認された。しかしながら、実験結果と一致しない点もいくつか認められた。一つは流木の捕捉率が実験よりも小さいという点である。これは、流木と障害物との衝突判定を、流木を構成する粒子の中心と障害物の壁面の衝突で判定しており、流木の外周の接触を正確に判定できていないことが一因と考えられる。この点の改良としては、障害物ポリゴンの外側に流木の半径分大きくとった衝突判定ポリゴンを設定する方法、障害物を粒子で表し、流木同士の衝突と同様、個別要素法による衝突判定を用いる方法などが考えられる。もう一つの問題は、流木の堆積が実験では底面付近まで及んでいるのに対し、計算結果では水深の半分程度の深さまでしか達しない点もいくつかある。この原因は前述の捕捉率の過小評価に起因し、流木の障害物すりぬけが過大に再現されているためと考えられる。今後モデルの改良を進め、再現性を高めていきたい。

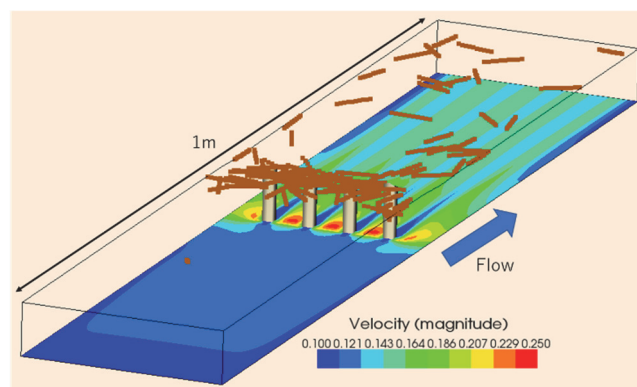


Fig.4 Snap shot of the computational result (DRI=3.67)

### 参考文献

- (1) 木村, 北園, ” 流木捕捉形態の流木リチャードソン数依存性と 3D-2D 型モデルの適用性”, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 73, No. 2(応用力学論文集 Vol. 20 (2017)), pp.I\_553-I\_562.
- (2) Homepage iRIC ”Changing River Science”, <http://i-ric.org> (2016).
- (3) 木村, 細田, 音田, “非線形  $k-\epsilon$  モデルによる斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析”, 土木学会応用力学論文集, Vol.5 (2002), pp.717-726.
- (4) Kimura, I., Ujittewaal, W., Hosoda, T and Ali, M.S., “RANS Computations of Shallow Grid Turbulence”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.135, No.2, pp.118-131, 2009.2.
- (5) Kimura, I. & Hosoda, T., “A non-linear  $k-\epsilon$  model with reliability for prediction of flows around bluff bodies”. International Journal for Numerical Methods in Fluids (2003), pp.813-837.
- (6) 初田, 赤堀, 清水, “蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析”, 土木学会応用力学論文集, Vol.15 (2012), pp.415-422.
- (7) 清水, 長田, “流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験”, 土木学会水工学論文集, 第 51 卷 (2007), pp.829-834.
- (8) 越塚誠一, “数値流体力学”, 培風館 (1997), pp178-181.