

流木挙動の三次元性と数値解析モデルの適用性に関する検討

Studies on driftwood motions in a curved channel with Obstacles using Hydraulic Experiments and CFD models

北海道大学工学院 環境フィールド工学専攻 ○学生員 北園和也 (Kazuya Kitazono)
 北海道大学 大学院工学研究院 准教授 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
 北海道大学 大学院工学研究院 教授 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

河川における流木挙動の予測は災害防止や環境問題の観点から非常に重要である。流木は集積や堆積による水位上昇や河床の浸食など様々な影響を及ぼす。流木は水面付近の現象と考えられるが、これには流れの三次元性が寄与する。また、流木が堆積することにより周辺の流れに変化を及ぼし、水位分布に影響を与える。

本研究では流木挙動予測に関する三次元性の影響の解明と、これを考慮した流木予測モデルの精度向上に向けての検討を、水路実験及び同条件の数値解析を通じて実施する。

2. 流木リチャードソン数の影響に関する実験

2.1 流木リチャードソン数の定義

流木は一般に浮力により表面付近を移動すると考えられているが、構造物周辺においては必ずしもそうではない。図-1は流木が浮力に逆らうことで構造物間に留まり、閉塞が発生した例である。このような堆積が起きると、構造物上流部において大規模な水深増加につながり、流木抵抗による流れへの影響を無視することができなくなる。このように浮力に対して慣性力が大きい場合、構造物に衝突した流木が浮力に逆らって水中に沈み、他の流木の下を抜けて構造物をすり抜けることや構造物に留まり流れを変えることがある。

この現象を検討するため、浮力と慣性力の比を表すリチャードソン数を流木運動の指標とすることを考える。式(1)は通常密度流のリチャードソン数である。

$$R_i = \frac{g \beta \Delta \theta h}{u^2} \quad (1)$$

ここで、 R_i はリチャードソン数、 β は体膨張係数、 $\Delta \theta$ は温度差、 h は水深、 u は流速である。体膨張係数と温度差は以下の式(2),(3)のように表現することができる。

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta \theta} \quad (2)$$

$$\Delta \theta = -\frac{1}{\rho \beta} \Delta \rho \quad (3)$$

ここで、 V は体積、 ρ は流体密度、 $\Delta \rho$ は流木と水の密度差である。この式(2),(3)を式(1)に代入することで式(4)のような流木リチャードソン数 R_{it} を定義する。

$$R_{it} = \frac{g \beta \left(-\frac{1}{\rho \beta} \Delta \rho \right) h}{u^2} = -\frac{g \Delta \rho h}{\rho u^2} \\ = -\frac{g \Delta \rho B^2 h^3}{\rho Q^2} \quad (4)$$

ここで、 B は水路幅、 Q は流量である。この値が大きいほど浮力が優位であり、小さいほど慣性力が優位となる。



図-1 流木の三次元堆積

2.2 実験概要

実験には図-2に示すようなサインジェネレーテッドカーブ1周期分用いた水路を使用する。水路幅20cm、蛇行長3.4m、蛇行角60度である。図-3のように、この水路の湾曲部において等間隔に1cm幅の構造物を配置した。流量は2.13ℓ/s、下流端水位を調節することにより流木リチャードソン数を変化させる。流木モデルには長さ4cm、直径5mm、密度0.6g/cm³の木材を用い、これを110本同時に水路幅全体に均等になるように供給した。

構造物上流側において堆積する流木数の比率を捕捉率、また堆積した流木のうち水面下に沈みこむものの比率を沈下率と定義した。流木の沈下判定については、図-4に示すように流木が少しでも水面に触れているものについては沈下していないと判断し、流木全体が水中にあるものについては沈下したと判断した。

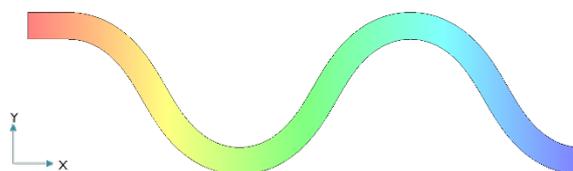


図-2 実験水路

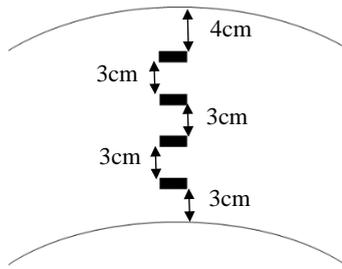


図-3 構造物配置

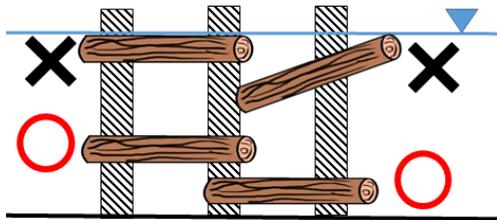


図-4 流木沈下判定基準概略

2.3 実験結果および考察

実験は現象再現性を確認するため各ケース3回ずつ行い、最大値、最小値、及びその平均値を求めた。図-5は沈下率と流木リチャードソン数の関係を示したものである。この図より、流木リチャードソン数が大きいほど沈下率が小さくなることが確認された。流木は水面流速により移動していると考えられている。しかし、今回の実験結果では流木リチャードソン数が小さい場合、構造物周辺の流木挙動にも三次元性が強く出現することが確認され、従来の予測結果と比較して誤差が大きくなることが予想される。図-5より流木リチャードソン数が10以下の場合、このような三次元性の影響は極めて小さいことがわかる。このため、流木を水面付近で平面的に移動させるタイプの数値解析モデルの適用範囲は $Rit > 10$ 程度と考えられる。

図-6は捕捉率と流木リチャードソン数の関係を示したものである。流木リチャードソン数が大きくなるほど捕捉率が上昇している。この原因としては、流木リチャードソン数が小さいと流木堆積が三次元的となり、流木の下をすり抜ける流木が増加するが、流木リチャードソン数が大きいと、この現象が生じにくく、流木が前の流木の上流側へ順に二次元的に堆積するためと考えられる。実験値にはばらつきがみられる。この理由として、流木堆積プロセスが関係していると考えられる。すなわち、構造物に対して最初に捕捉された流木をきっかけに流木が次々と堆積していく現象が確認されたが、最初の流木がいつどのような形でこの構造物にスタックするかという極めて不確定性の高い現象が、さらに上流から流れてくる流木の堆積に影響を与えている。このため値のばらつきが生じると考えられる。

同条件で数値解析したところ、捕捉率はリチャードソン数の大きさに関わらず0.9以上の値となった。前述の沈下率に関する考察では、流木を平面的に追跡する数値解析モデルの適用範囲をおよそ $Rit > 10$ と推測したが、捕捉率に関する本数値解析結果はこれを裏付けるものと

なっている。

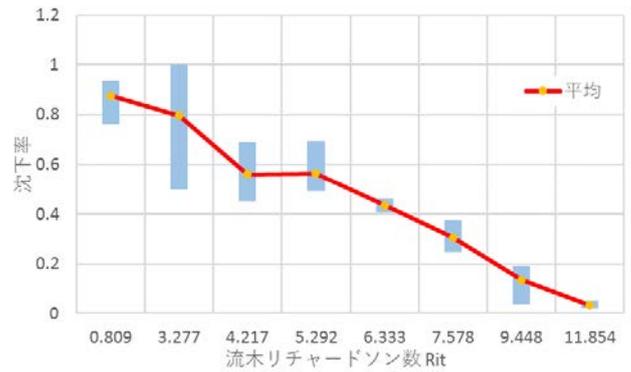


図-5 沈下率と流木リチャードソン数の関係

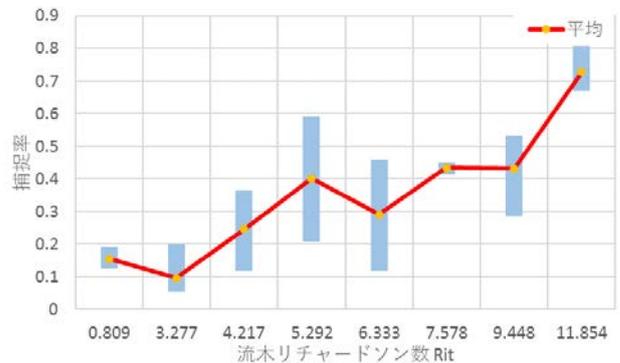


図-6 捕捉率と流木リチャードソン数の関係

3. 流木が流れに及ぼす抵抗に関する評価

流木が堆積することにより、流木が流れに対しての抵抗となり、流速低下や水深上昇につながると予想されている。本章ではこの流木が流れに与える影響について、実験を用いて評価する。また、実験によって確認された影響について数値解析モデル上において再現する。

3.1 実験概要

構造物に堆積した流木が水流に及ぼす抵抗の影響について実験により検討する。

実験水路は章2.で用いたものと同様である。流量は1.31ℓ/s、下流端水位は4.5cmとした。これは、上述したように流木リチャードソン数が数値解析モデルの適用範囲である $Rit > 10$ を満たす条件である。流木も章2.と同条件で投入する。水深および流速は流木投入前と流木を投入し構造物に堆積した後にそれぞれ測定する。流木の流れへの影響は堆積した上流側で影響が顕著なため、水深は構造物上流側約50cmの地点において、右岸側、左岸側、水路中央の3点で測定した。流速はPIV測定を行い、表面流速分布を求めた。

3.2 実験結果

まず、流木捕捉量については110本流木を投入したうち75本が構造物上流側に残留し、捕捉率は0.68であった。

表-1 は流木投入前の水深と流木投入後の水深およびその変化量を示している。この結果より流木堆積による抵抗によって水深が 0.5mm 上昇していることが確認された。

表-1 流木投入前後の水深変化

単位(mm)	投入前	投入後	変化量
左岸側	44.9	45.4	+0.5
中央	45	45.5	+0.5
右岸側	45.7	46.2	+0.5

続いて流速の結果について考察する。図-7 は流木投入前の流速分布、図-8 は投入後の流速分布を示している。データ欠損域は流速が極端に小さく PIV 粒子到達しなかった箇所を表している。

図-7 より流木投入前は内岸側で表面流速が大きく、外岸側で表面流速が小さい結果となっている。ところが、図-8 より流木が構造物に堆積した後、流況が一変し、構造物直前の表面流速が極端に減少している。また、流木堆積の影響で流れが内岸側に集中し、外岸側の流速が内岸側よりも極端に減少している。このような結果から、流木堆積は流況の変化に大きく影響することが示された。

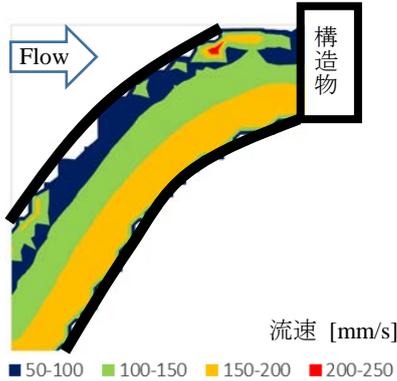


図-7 実験流速 (流木投入前)

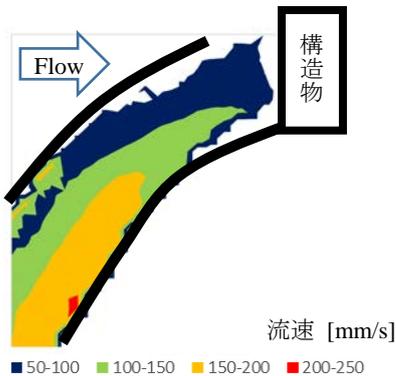


図-8 実験流速 (流木投入後)

3.3 Two-way モデル

前述のように流木は流れに対して影響を及ぼす。特に、流木が複数本集積すると、その影響は大きくなることが確認された。そこで、数値解析モデルにおいて、流木が

ら水流への影響を考慮した Two-way モデル¹⁾を構築し、この効果の再現を試みる。

流木の抗力は本来流木の形状 (今回は円柱型) を考慮してモデル化すべきであるが、非常に煩雑となる。そこで、本モデルでは簡易的に流木を構成する球体それぞれが個別に抗力を発揮して水流に影響を与えるとしてモデル化を行う。これより、流体運動方程式の抗力項 F_{dr} は以下の式(5)で表される。

$$F_{dr} = -\frac{1}{2}\rho C_D \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{n=1}^{N_{cell}} A_n |U| (V^i - V_p^i) \quad (5)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 ρ は水の密度、 \sqrt{g} はヤコビアン、 A_n は粒子の投影面積、 $|U|$ は重力場相対速度、 V^i は流速の反変成分、 V_p^i は粒子速度の反変成分、 N_{cell} は1つの計算グリッドセル内の粒子数である。

3.4 計算結果および考察

用いる流木挙動予測モデルでは、流動は三次元モデルにより計算し、流木は表面流速により水面上を二次元的に移動する。流動計算には iRIC ソルバー NaysCUBE を用いる^{2),3)}。このモデルでは乱流モデルは二次非線形 k-ε モデルを使用している。流れの三次元性を考慮するために鉛直層は水深を 10 分割する設定とした。Two-way モデルの効果の評価するために実験と同条件で数値解析を行った。Two-way モデルを適用したケースを Case1、既往の One-way モデルによるケースを Case2 とする。Case1 の Two-way モデルに用いる抗力係数 C_D は 1.0 とする。

以下、計算結果を示し考察を進める。まずは実験水路上流端の河床高を基準とした時の水位変化について考察する。水位変化は水路長に対して非常に小さいため、図-9 の赤丸で示した箇所に絞って変化を検討する。図-10 は水路中心軸上の時間平均水位を比較した図である。これより、Two-way モデルを適用した Case1 の水位は Case2 と比較して大きく、流木抵抗による水深増加が確認できた。しかし、その変化量に着目すると約 0.02~0.04mm と、実験値の 0.5mm と比較して非常に小さい。

次に流速分布について考察する。図-11,12 はそれぞれ構造物周辺における Case1 の流速分布、Case2 の流速分布である。それぞれの凡例の単位は m/s である。Case2 は Two-way モデルを適用していないため、流木の影響を受けていない。両図を比較すると、Case1 において内岸側で流速の低下が確認できる。図-13 は Case1 における流木堆積場所を示している。この図より流木が水路の中心および内岸側に堆積していることが確認された。この流木の抵抗が影響し、内岸側での流速低下が発生したと考えられる。

流速の大きさは最大約 0.026m/s 低減しており、流速変化の大きい場所は構造物上流側に集中している。一方、構造物外岸側では流速が One-way モデルに比べて逆に若干大きくなっていることが確認された。これは、内岸側に堆積した流木の影響で流れが外岸側に遷移し、流速増

大箇所が生まれたと考えられる。

ここで、流速低下量を実験と比較すると、実験において構造物周辺では約0.1m/sの表面流速低下を観測している。この点から水深変化、流速変化ともに計算結果の変化量が小さいことがわかり、流木集積による流水抵抗が十分に再現されていないといえる。この要因として、今回用いた Two-way モデルは流木を構成する粒子1つ1つに対して抗力を個別に計算するモデルであるため、流木1本としての抵抗が適切に再現できないことが考えられる。この件に関してはシーディング効果を考慮することや流木を粒子で表現することによる体積や質量の変化などを考えていく必要があると考えている。

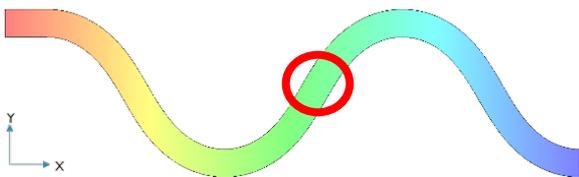


図-9 水位評価場所

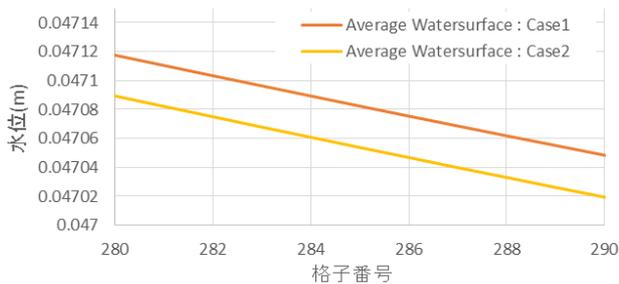


図-10 水路中心軸上の縦断方向の時間平均水位

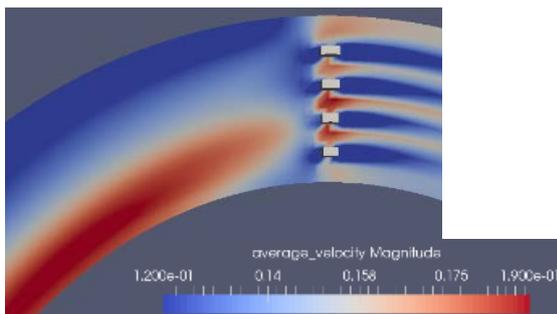


図-11 Case1 流速分布

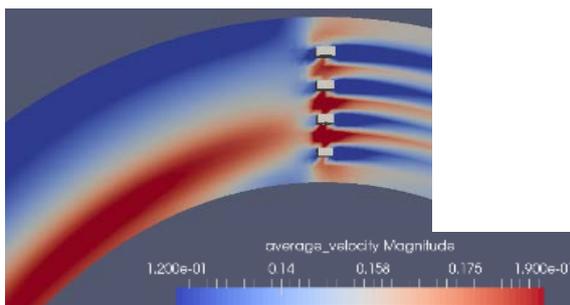


図-12 Case2 流速分布

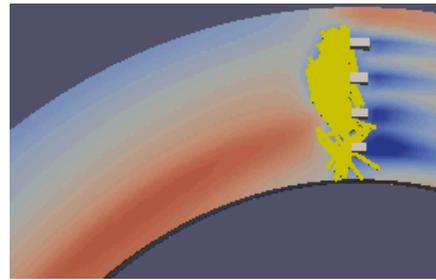


図-13 流木堆積場所 (Case1)

4. 結論

構造物周辺の流木沈下に伴う流木挙動の三次元性の必要性について、新たに流木リチャードソン数を定義し検討した。さらに、流木から水流への抵抗の影響について Two-way モデル化を実施した。水理模型実験結果と数値計算結果の比較を行うことで、現象の解明と数値解析モデルの適用性を検討した。以下、本研究で得られた主な結論を示す。

- 流木リチャードソン数と構造物周辺の流木沈下率の関係性を実験導出した。流木リチャードソン数が約 10 以下では流木挙動の三次元性が顕著となることを確認した。
- 流木抵抗に関する実験により、流木集積が流況に影響を与えることが確認できた。また、本研究で提案した Two-way モデルはこれらの現象を定性的には再現できたが、定量的には水位上昇、流速低減ともに過小評価となった。

以上の結果から、流木挙動に関する特性や本研究で開発した流木挙動モデルは流木挙動予測の検討に重要であることが示唆されたといえるが、それとともに、次のようなモデルの改良の必要性も指摘された。

- 流木リチャードソン数が 10 以下の場合において流木挙動そのものの三次元性が顕著となる。このため、液相だけでなく固相の三次元モデル化が必要である。
- 流木による抗力が正確に再現されていないため、シーディング効果や流木形状の取り扱い方法などを検討する必要性が示唆された。

参考文献

- 1) 清水義彦・長田健吾：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，水工学論文集，第 51 巻，pp.829-834，2007
- 2) Homepage of iRIC Project Changing River Science, <http://i-ric.org/ja/> 2016.
- 3) Kimura, I. and Hosoda, T. 2003. A non-linear k-ε model with reliability for prediction of flows around bluff bodies. International Journal for Numerical Methods in Fluids, (DOI:10.1002/flid.540), pp.813-837.