

第一種二次流を考慮した流木の挙動に関する研究

Analysis of movement of drift woods with secondary flow of the first kind

北海道大学工学部 環境社会工学科国土政策学コース

○学生員 北園和也 (Kazuya Kitazono)

北海道大学

工学研究院環境フィールド工学部門 准教授

正会員

木村一郎 (Ichiro Kimura)

北海道大学

工学研究院環境フィールド工学部門 教授

フェロー

清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. 背景

河川領域には多くの樹木が存在し、それらは大規模な出水によって土砂崩れや河岸の崩壊などにより流木化され、流下の際に様々な影響を及ぼす。例えば、橋脚の浸食、取水口への堆積による機能の低下、堆積による水位の増加とその影響を受けた洪水などが挙げられる。このような流木による影響への対策を行うためには、流木の挙動について理解することが不可欠である。

現在、流木挙動に関する三次元数値計算はあまりなされておらず、二次元、または第一種二次流を考慮した二次元計算である準三次元での計算が一般的である。流木挙動は水面の流速ベクトルによる影響が大きく、二次流の発生は、その向きや大きさによって水面の流速ベクトルに大きな影響を与える。第一種二次流には種類があり、遠心力のアンバランスにより生じるモーメントと同方向の二次流と、それに対して逆向きに巻く二次流とがある。ここでは、前者の二次流を順方向二次流、後者を逆方向二次流と定義する。通常準三次元と呼ばれる計算方法では順方向二次流が考慮されており、逆方向二次流の効果は考えられていない。そのため、三次元モデルで数値解析を行うことは重要である。

そこで今回、三次元及び二次元数値計算における流況結果の比較を行い、続いて、二次流の回転方向の違いによる影響を考慮し、流木の挙動の比較・考察を行うことを目的とする。

2. 数値解析法

2.1 数値解析法

本研究における数値解析モデルは iRIC, NaysCUBE ver3.00.6 を使用している。数値解析法の詳細については文献¹⁾を参照されたい。

2.2 流木モデル

数値計算で用いられている流木モデルについて説明する。流木モデルは複数個の球体に拘束条件をかけて形状を剛体として保持することで、流木の回転と並行移動を含んだ軌跡を計算している(図-1)。

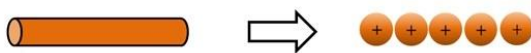


図-1 拘束条件モデルの概念図

球体1つ1つに対しては、以下の運動方程式を解くことで、慣性力を含んだ球体の挙動を得る。球体番号 i の

流下・鉛直方向成分をベクトル表記した運動方程式は

$$\sigma A_3 d_{pi}^3 \frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d_{pi}^3 |u - u_{pi}| (u - u_{pi}) + \rho A_3 d_{pi}^3 \frac{du}{dt} + C_M \rho A_3 d_{pi}^3 \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_{pi}}{dt} \right) + F_{Basset} + A_3 d_{pi}^3 (\sigma - \rho) g + F_{LM} + F_{LS} \quad (1)$$

と表記できる²⁾。 ρ : 流体密度, σ : 球体密度, C_M : 付加質量係数, C_D : 抗力係数, A_2 : 球体の2次元形状係数($=\pi/4$), A_3 : 球体の3次元形状係数($=\pi/6$), d : 球体径, u : 周囲流体流速, u_p : 球体速度, ν : 動粘性係数, t : 時間の次元量, g : 重力である。左辺は球体に作用する慣性力, 右辺第一項は球体に作用する流体抗力である。 A_2 は球体の水面下に存在する部分の投影面積であり, 右辺第二項は周囲流体の加速に伴う力である。 A_3 は球体の水面下に存在する部分の質量に関するものであり, A_2 と同様に水面上の球体としての補正を行い, 右辺第三項は付加質量の加速に必要な力である。右辺第四項(Basset 項)は球体と周囲流体の非定常な相対運動履歴に関する力, 右辺第五項は重力と浮力, 右辺第六・第七項は(Magnus 力, Saffman 力)は球体に作用する揚力である。この運動方程式において Basset 項, Magnus 力, Saffman 力は比較的小さいオーダーのため, 近似的にしばしば無視される。第五項に関しては本モデルでは水面での水平方向の移動に関する記述のみ必要となるため, 無視した。

続いて, 各球体に対して運動方程式を解き, それらの速度ベクトル全体について平均化し, 流木としての連結球体の重心の並進速度ベクトルと角速度ベクトルを計算する³⁾。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (2) \quad R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n u_i \times q_i \quad (3)$$

ここで

$$r_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (4)$$

$$q_i = r_i - r_g \quad (5)$$

$$I = \sum_{i=1}^n |q_i|^2 \quad (6)$$

である。 T : 流木モデルの重心の並進速度ベクトル, R : 角速度ベクトル, n : 剛体球体の個数, u_i : 剛体球体の速度ベクトル, r_g : 流木モデルの重心の座標, r_i : 剛体球体の重心座標, I : 慣性モーメントである。こうして求めた剛体の重心の運動に従って, 各剛体球体の速度

ベクトルを再計算する.

$$u_t = T + q_i \times R \quad (7)$$

再計算された速度ベクトルを用いて剛体球体の位置を再計算する.

以下, 計算手順の概略である(図-2).

- ① 流木をいくつかの球体に分割
- ② 各球体に運動方程式を適用し, 次ステップの仮移動位置を算出
- ③ 球体それぞれの仮の速度を平均化し, その剛体の重心, 平均での速度ベクトル, 平均での回転モーメント等を算出
- ④ 算出した平均の重心, 回転モーメントから剛体を構成する要素の移動先を決定
- ⑤ 粒子を剛体の形状を保持するよう再配置
- ⑥ 一回のステップを終了し, 繰り返し

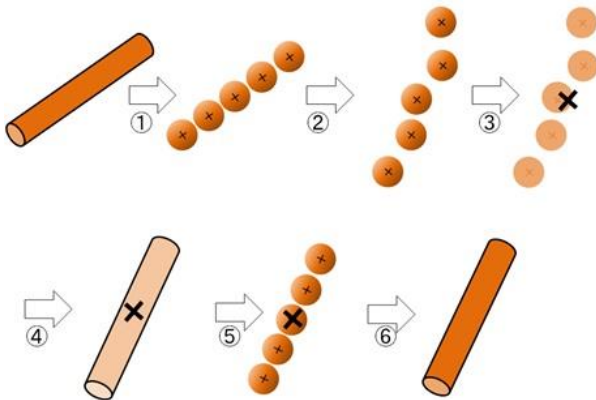


図-2 拘束条件モデルの計算手順

3. 二次元, 三次元数値計算

第三章では, 二次元及び三次元数値計算を行い, 二次流の有無による流木挙動の変化を, 両数値解析モデルを比較することによって検討をする.

3.1 条件設定

格子生成条件として, 水路幅 0.4m, 蛇行波長 2.31m, 蛇行角 30°, 波数 2, 勾配は 1/2000 のサインジェネレーテッドカーブとした. 格子は横断方向に 40 個, 縦断方向に 462 個に分割した(図-3). 二次元と三次元の変化をつけるために, 鉛直方向の格子分割数を Case1 では 1, Case2 では 10 とした(図-5,6).

水深は 5cm を想定し流量は 0.006m³/s, 流木は長さ 5cm, 直径 3mm, 密度は 0.9kg/m³ とする(図-4). 主流方向において周期境界条件を適用した.

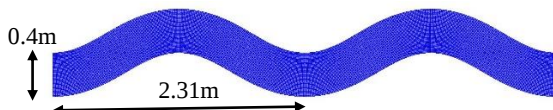


図-3 格子形状

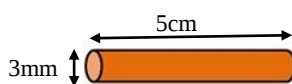


図 4-流木設定

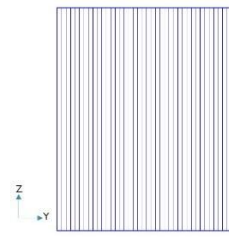


図-5 Case1 鉛直格子

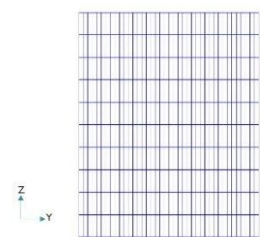


図-6 Case2 鉛直格子

3.2 計算結果と考察

図-7 に Case1 の二次元計算の流木挙動, 図-8 に Case2 の三次元計算の流木挙動を示す. 図-9(a)は, Case2 の図-9(b)示す地点における流速分布を主流方向下流側から見た横断面図である. 図-7 及び図-8 を比較すると, Case1 は流木の位置にばらつきがあるのに対して, Case2 はまとまって流木が流れていることがわかる.

これは図-9(a)の流速分布からもわかるように, 三次元計算である Case2 には二次流が発生しているため, この二次流が影響し, Case2 では流木が中心に集められこのような結果につながったと考えられる. 二次元計算の場合, 水面と河床でしか流速が考慮されていないため, 流速分布も水面のみの流速が影響してしまう. しかし, 三次元計算をすることで, 水面と河床の間の流速も水面の流速に影響を及ぼし, このような二次流による現象を考慮することができたといえる.

ここで, 発生している二次流に着目してみると, 逆方向二次流が発生していることがわかる. 次章において, このような二次流の種類の違いが流木に及ぼす影響について計算, 考察する.

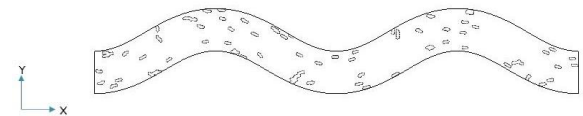


図-7 二次元計算 流木分布

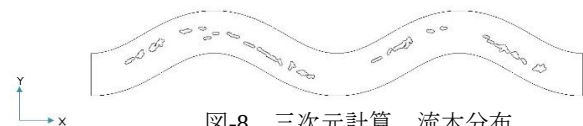


図-8 三次元計算 流木分布

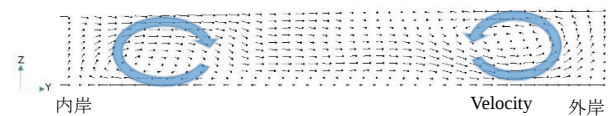


図-9(a) 流速分布(横断面図)

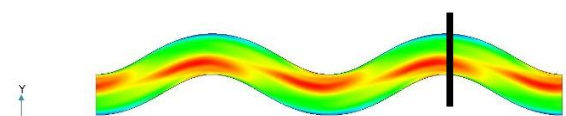


図-9(b) 流速分布表示地点

4. 二次流の種類

4.1 二次流の種類について

二次流には第一種二次流と第二種二次流があり、本研究では第一種二次流による影響を考える。第一種二次流とは、表面付近で内岸から外岸へ向かい、河床付近で外岸から内岸に向かう流れのことである。これは主流方向の流れと、湾曲部において遠心力によって強制的に曲げられる流れの合成によって発生すると考えられている。等流状態における鉛直方向の流れは表面で速く、河床付近は河床抵抗によって遅くなる。これによって遠心力のアンバランスが生じ、表面では内岸から外岸に向かい、河床では外岸から内岸に向かう流れになる(図-10)。この流れによって、水深平均流速が最大となる点が外岸に移動する⁴⁾。

第一種二次流にはさらに前述の順方向二次流(図-11)とそれとは反対向きに発生する逆方向二次流(図-12)がある。逆方向二次流の発生する要因については、蛇行線形に対する二次流の発達の違いによるものとされているが、その支配パラメータについては、水深・川幅比、川幅・曲率半径比などが挙げられ、蛇行長や蛇行波長、川幅の条件がその発生と大きく関係している。次の計算では、蛇行長や蛇行角を変えることによって、二次流がどのような変化を及ぼすか、また、それによって流木挙動がどのように変化するかを考察する。

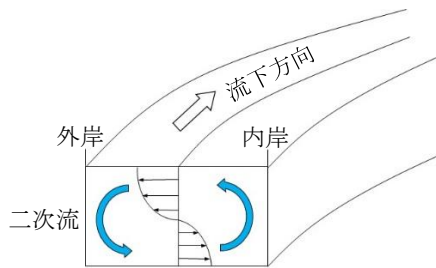


図-10 二次流概略図

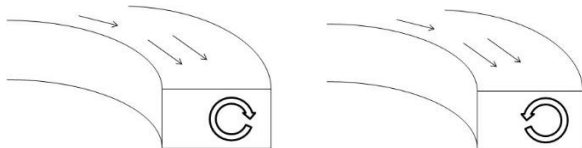


図-11 順方向二次流

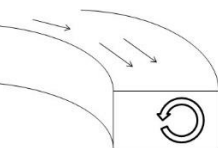


図-12 逆方向二次流

4.2 条件設定

順方向二次流と逆方向二次流に加え、二次流の種類が同じで蛇行角が異なる場合を考え、3種類の数値計算を行う。

まず、すべてのケースで共通の条件として、水深 3cm を想定して流量を $0.002\text{m}^3/\text{s}$ 、勾配を $1/1000$ 、流木は長さ 4cm、直径 2mm、密度は $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ (図-13)とする。主流方向に周期境界条件を適用した。

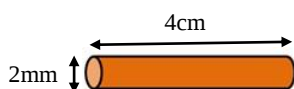


図-13 流木設定

Case3 は順方向二次流の発生を想定している。水路幅 0.2m、蛇行長 3.4m、蛇行波長 2.53m、蛇行角 60° で波

数は 2 である(図-14)。

Case4 は Case3 と同様に順方向二次流の発生を想定しているが、蛇行波長をおおよそ同じ長さにし、蛇行角を半分にする事で、曲率半径の違いによる挙動の変化に着目していく。水路幅 0.2m、蛇行長 2.7m、蛇行波長 2.52m、蛇行角は 30° で波数は 2 である(図-15)。

Case5 は逆方向二次流の発生を想定し、蛇行長を短く、蛇行角も小さく設定している。水路幅 0.2m、蛇行長 1.1m、蛇行波長 1.025m、蛇行角 30° で、波数は蛇行波長が短いので 3 で設定した(図-16)。

なお、格子は横断方向に 20 分割、縦断方向には 1cm 刻みで分割している。条件の一覧を表-1 にまとめた。



図-14 Case3 格子形状



図-15 Case4 格子形状



図-16 Case5 格子形状

表-1 対象とした開水路の諸元

	Case3	Case4	Case5
水路幅 [m]	0.2	0.2	0.2
蛇行長[m]	3.4	2.7	1.1
蛇行波長[m]	2.53	2.52	1.025
蛇行角 [degree]	60	30	30
波数	2	2	3

4.3 計算結果と考察

まず、Case3 の結果を示す。図-17(a)は、Case3 の図-17(b)に示す地点における流速分布を主流方向下流側から見た横断面図である。この2つの図より、水面において外岸側に向かって流れる順方向二次流が発生していることが確認できた。図-18 は Case3 における流木の挙動を示している。湾曲部を抜けた流木は第一種二次流の力を受け、流速の速い外岸側に投げ出されていることがわかる。また、流心が外岸側にあるため、一度外岸側まで流れた流木は二次流の力を継続して受け、次の湾曲部に向かい流心が移動するまでは外岸側を流れ続けることがわかった。

次に、Case4 の結果を示す。図-19(a)は Case4 の図-19(b)に示す地点における流速分布を主流方向下流側から見た横断面図である。この2つの図より、Case3 と同様に順方向二次流が発生していることが確認できた。図-20 は Case4 における流木の挙動を示して。こちらも

Case3 と同様に、湾曲部を抜けた流木が二次流の力を受け、外岸側に投げ出されていることが見て取れる。しかし、Case3 においては流木が完全に外岸側まで投げ出されているのに対し、Case4 は投げ出されてはいるが、外岸側まで到達する前に次の湾曲部を向かえていることがわかる。これは Case4 の蛇行角を Case3 よりも小さくしたことにより、湾曲部における遠心力の低減に伴い第一種二次流による影響も減少したため、このような結果につながったと考えられる。

最後に Case5 の結果を示す。図-21(a)は Case5 の図-21(b)に示す地点における流速分布を主流方向下流側から見た横断面図である。こちらでは、Case3,4 とは異なり逆方向二次流が発生していることが確認できた。図-22は Case5 における流木の挙動を示している。この図より、流木が水路の中心に集まっており、水路形状に沿った流木の挙動を示していることがわかった。これは、図-21(a)の流速分布より、順方向二次流が内岸側で発生しようとしているのに対して、外岸側で逆方向二次流が発生したことによって流れが中心に集まり、それに影響を受ける流木も同様に中心に集められたため、このような結果になったと考えられる。

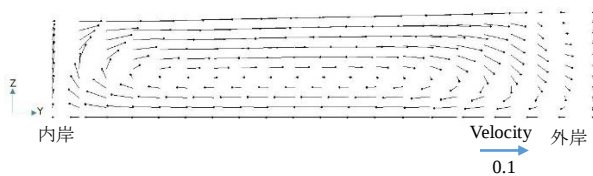


図-17(a) Case3 流速分布(横断面図)

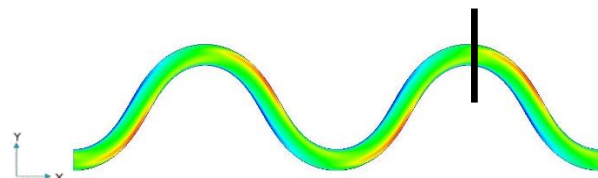


図-17(b) Case3 流速分布表示地点

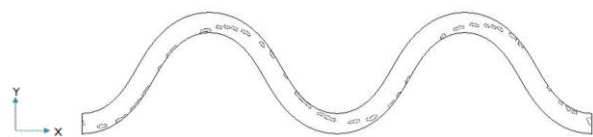


図-18 Case3 流木分布

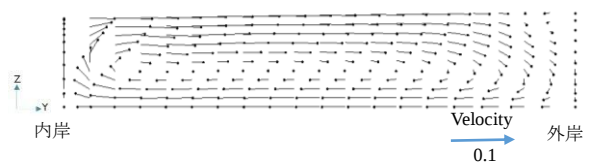


図-19(a) Case4 流速分布(横断面図)

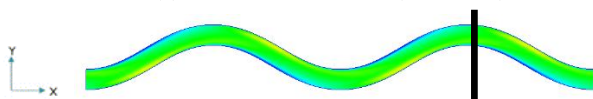


図-19(b) Case4 流速分布表示地点



図-20 Case4 流木分布

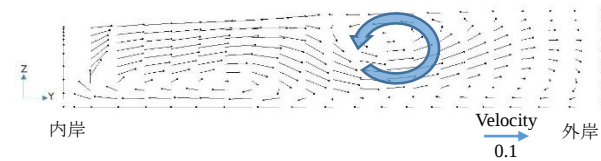


図-21(a) Case5 流速分布(YZ 平面)

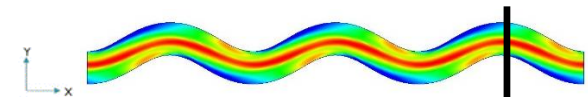


図-21(b) Case5 流速分布表示地点



図-22 Case5 流木分布

5. 結論

本研究では、第一種二次流と流木の挙動について、第一種二次流の発生しない二次元計算と二次流を再現する三次元計算の比較、および発生する第一種二次流の種類による流木挙動の相違比較を行うことで考察した。その結論と課題を以下にまとめる。

- 1) 二次元計算と三次元計算では横断方向の流速分布が異なるため、その影響を受け流木の挙動にも変化が生じる。二次元計算では水面平均流のみを考慮しているため、水路形状に沿った流木挙動を示した。
- 2) 第一種二次流は蛇行角に依存し、蛇行角が小さくなると第一種二次流の影響も減少し、それに伴い流木挙動に対する影響も小さくなる。今回は蛇行角の違いによる影響のみを検討したが、蛇行長や蛇行波長、川幅や水深の違いも第一種二次流の大きさに影響を及ぼすと考えられているため、これらについても今後検討していく必要がある。
- 3) 第一種二次流には、順方向二次流と逆方向二次流があることが確認され、その流れの違いが流木に及ぼす影響は大きいことが指摘された。準三次元計算では、第一種二次流を考慮していたものの逆方向二次流は考慮されていないため、流木挙動の計算の精度は三次元計算と比べて低下するものと推測された。

参考文献

- 1) 木村一郎：NaysCUBE Solver Manual, iRIC Project.
- 2) 後藤仁志：数値流砂水理学—粒子法による混相流と粒状体の計算力学—, 森北出版株式会社, pp.41-45, 2004
- 3) 越塚誠一：粒子法, 丸善株式会社, pp.63-66, 2005
- 4) 崇田徳彦：2 次流とはどんな流れですか?, 寒地土木研究所河川研究室, 開発土木研究所月報第 486 号, pp.72-73, 1993