

5. 二次流の影響を考慮した流木流動予測モデルの構築（担当：木村一郎）

(1) はじめに

a) 研究背景

河川領域には多くの樹木が存在する。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し、河道内を流下する。その流下の際に、橋脚の侵食、取水口への堆積、構造物等に堆積し堰上げが発生することによる氾濫や構造物の破壊など多大な影響を与える場合がある。また、破堤氾濫によって市街地に流木が流入し、家屋に被害を及ぼすことがあるほか、流木が海域まで流下した際に船の航行を妨げる事例も報告されている。

これまでに、流下中の流木の挙動や堆積・移動条件などに関する研究が行われてきた。これまでの現地観測や大規模実験を主体とした研究では、流木の流下・堆積に関する検討、流木の再移動条件に関する検討¹⁾、河道内における堆積状況やその水理的特性に関する検討²⁾³⁾や、橋脚などの構造物への集積過程の解明⁴⁾などに主眼をおいたものが多く、数値計算や室内実験を主体とした研究では、Lagrange的視点に基づく個々の流木の輸送過程を対象としたアプローチなどを中心に研究が進められてきた⁵⁾⁶⁾。このように、既往研究では大規模な空間スケールに基づいて現象を把握することを目指す手法や、逆に個々の流木といった微小なスケールでの運動を記述する方法などが検討されてきたが、数値計算については単純化された流れ場における定性的再現性に着目した例が多く、現地観測と数値計算に差異が存在している。このような理由により、流木挙動に関する数値計算は、精度を高くし差異を小さくすることで、より高度な対策へとつなげられる可能性を秘めている。

現在、三次元数値計算による流木の研究はあまりされておらず、二次元や第一種二次流を考慮した二次元数値計算である準三次元といわれる数値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。さらに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。準三次元での数値計算では前者の二次流のみを考慮しているため完全ではない。このような第一種二次流の種類を考慮し、精度の高い流木挙動を得る数値計算を行うためには、三次元での数値計算が不可欠である。

b) 研究目的

本研究では、予備検討としてiRIC, NaysCUBE ver3.00.6⁷⁾を使用した三次元およ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た流木の挙動の比較・考察を実験および数値計算によって行う。その比較をすることで数値計算の精度についての考察する。これらにより、第一種二次流と流木挙動の関係性を解明することを目的とする。

c) 二次流の種類と定義

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らせん流のように発生する。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5.1）。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⁸⁾。

第一種二次流にはさらに前述した二次流とそれとは反対向きに巻く二次流がある。この流れに正式な名称がつけられていないため、ここでは、前者を順方向二次流（図5.2）、後者を逆方向二次流（図5.3）

と定義する。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遅れ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。

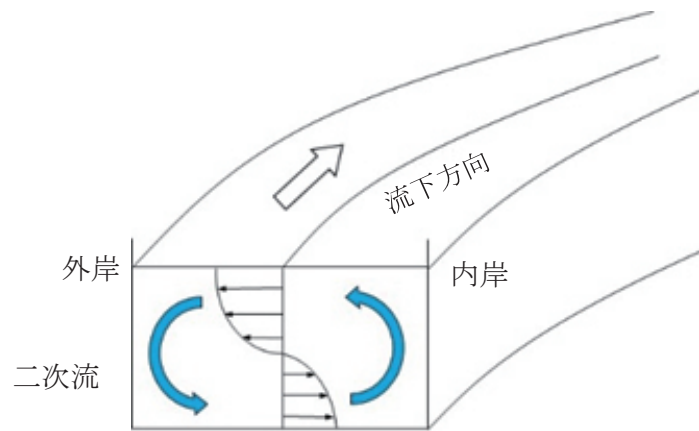


図5.1 二次流概略図

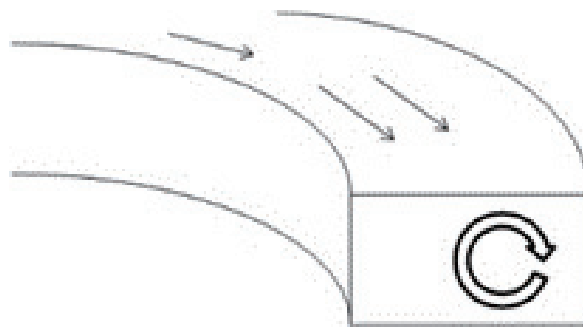


図5.2 順方向二次流

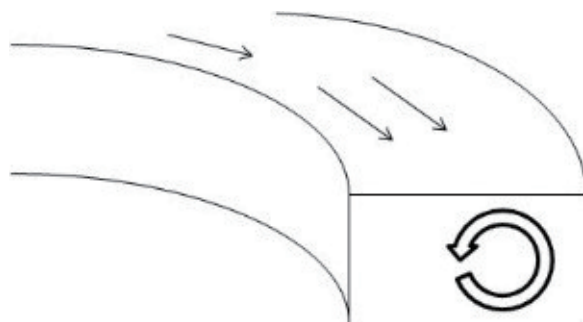


図5.3 逆方向二次流

(2) 二次元および三次元数値計算

(1) にも記したように、流木に関する研究は二次元や第一種二次流を考慮した準三次元計算ではされているが、三次元での数値計算はあまりされていない。そこで今回、二次元および三次元の両方で計算を行うことで、次元の違いによって流木に与える影響がどのように変わるか検討する。

a) 計算諸元

まず、比較するための基となる計算格子を作成する。水路幅40cm，蛇行角 30° のsine-generated curveで格子を作成した（図5.4）。格子作成時に1つ1つのグリッドのサイズが1.25cm四方となるように分割数を設定した。その他格子に関わる数値については表5.1を参照されたい。

続いて、流量や流木等その他計算条件の設定を行う。流量は、水深を5cm，フルード数が0.5前後となることを想定し， $0.006\text{m}^3/\text{s}$ とした。主流方向は周期境界条件，横断方向は非周期境界条件とする。流木は長さ5cm，直径3mm，密度を $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ とする。流木の計算概念については，後述する。粗度係数は実験水路を想定し0.01とした。計算条件を表5.2にまとめた。

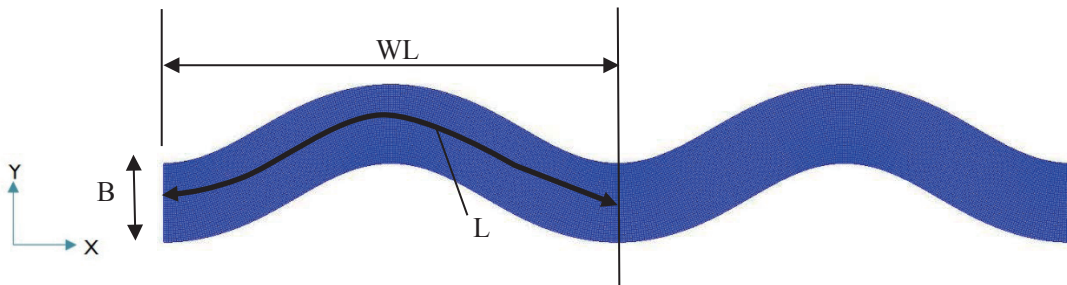


図5.4 計算格子

表5.1 計算格子諸元

水路幅B(m)	0.4
蛇行長L(m)	2.48
蛇行波長WL(m)	2.31
蛇行角($^\circ$)	30
水路勾配	1/2000

表5.2 計算条件諸元

流量(m^3/s)		0.006
境界条件	主流方向	周期
	横断方向	非周期
流木設定	長さ(mm)	50
	直径(mm)	3
	密度(g/cm^3)	0.9
粗度係数		0.01

b) 二次元および三次元の再現

同一のソルバーを用いて二次元および三次元の両方を再現するために、鉛直方向の格子分割数を変化させる。ここで、二次元数値計算をCase1とし、三次元数値計算をCase2とする。

a)の条件設定を統一し、計算条件設定の際に、鉛直方向の分割数をCase1では1 (図5.5)、Case2では10 (図5.6) とすることで二次元および三次元とした。三次元では水深を10分割し、鉛直方向に対しても詳細な流れを計算することができるが、二次元では1分割とすることで水面と河床のみの流れしか計算されないため、鉛直成分の影響がほとんど発生しない。よって、従来三次元計算を行うソルバーであるNays CUBEで二次元・三次元の両ケースの再現をすることができる。

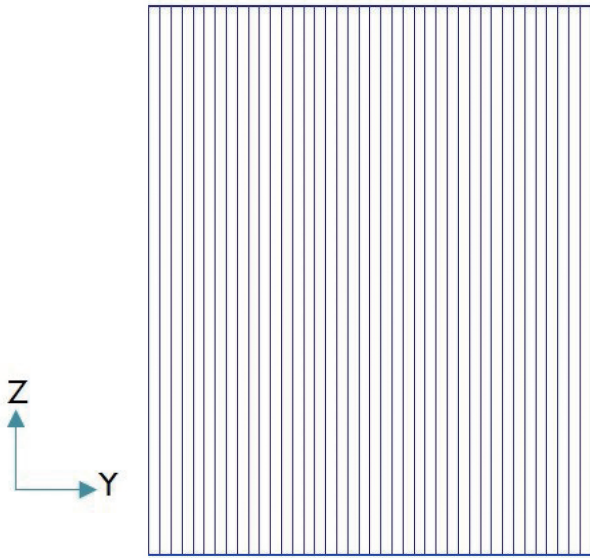


図5.5 Case1 鉛直格子

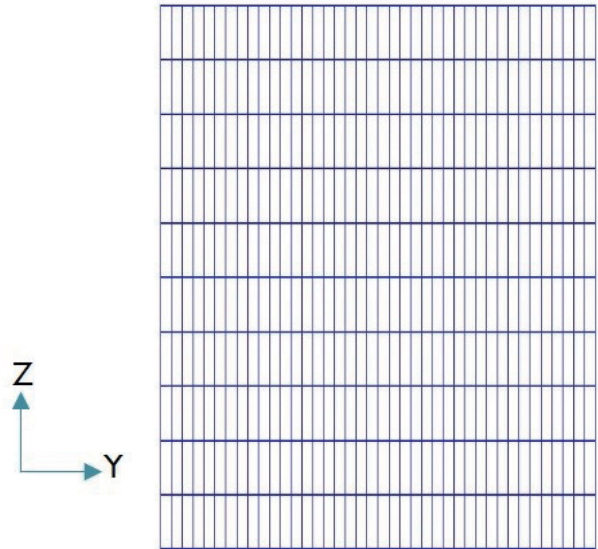


図5.6 Case2 鉛直格子

c) 数値計算結果および考察

図5.7はCase1、図5.8はCase2における流木の挙動の数値計算結果を示している。図5.9(a)は図5.9(b)に示す地点におけるCase2の流速分布を主流方向下流側から見た横断面図である。図5.7と図5.8を比較するとCase1では流木がまばらに散乱し、図からは読み取ることができないが水路の形状に沿って流木が流れているのに対して、Case2では中心に流木が集まって流れていることがわかる。

図5.9(a)に着目すると、流れが渦を巻いており、二次流が発生していることがわかる。この二次流の影響で水面の流速に影響を及ぼし、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。これは三次元数値計算をしたからこそ発生した流れである。図5.10は図5.9(b)に示す地点におけるCase1の流速ベクトルを示している。この図より、水面と河床のみで流速が現れていることがわかり、三次元数値計算で見られたような二次流は、二次元数値計算では再現できないことがわかる。したがって、水面から河床までの間を分割し、鉛直方向の流れを考慮することの重要性は大きいと考えられる。

本来の二次流である順方向二次流は、表面では内岸側から外岸側に流れ、河床では外岸側から内岸側へと流れる。図5.9(a)に着目すると内岸側に発生している二次流は順方向二次流であるが、外岸側に発生している二次流はその逆向きであることがわかる。これは、内岸側で発生しようとしている二次流が完成する前に次の湾曲部に到達したため、前の湾曲部で発生した二次流が逆方向二次流として現れたと考えられる。これが二次流の発達遅れによって生じる逆方向二次流である。

第一種二次流を考慮した二次元計算として準三次元計算と呼ばれる計算があるが、準三次元計算は順方向二次流のみが考慮されている。したがって、今回発生したような発達遅れを想定した逆方向二次流

での結果を得ることはできない。そのため、今回の数値計算結果は三次元数値計算だからこそ出た結果であるといえる。

以上の結果より、精度の高い流木の挙動を得るためには、従来行われてきた二次元や準三次元での数値計算ではなく、三次元での数値計算を行い、詳細な二次流の考慮が必要であると考えられる。

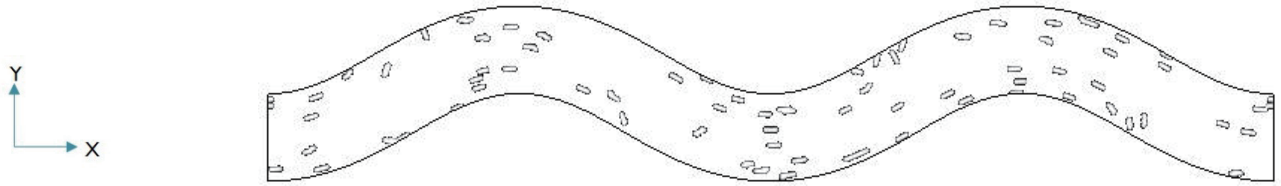


図5.7 Case1 流木分布

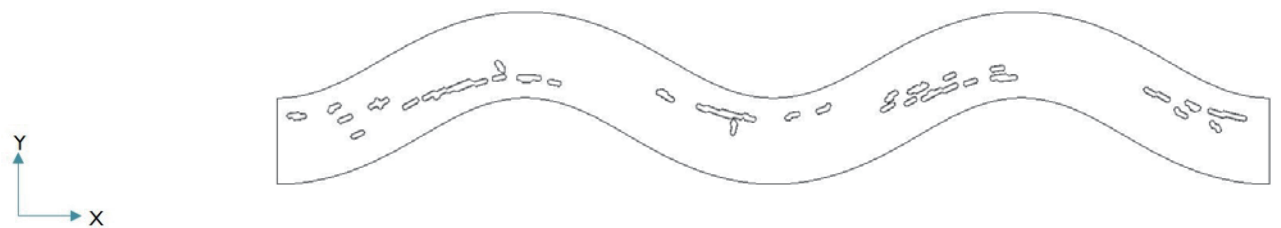


図5.8 Case2 流木分布

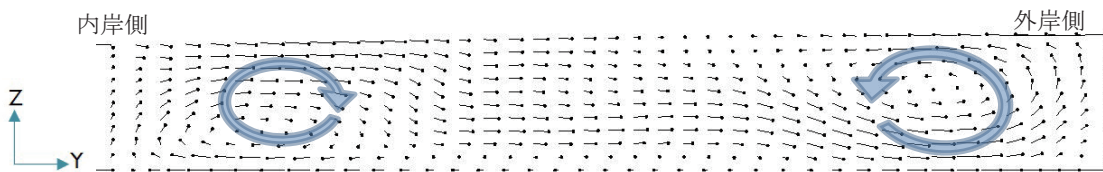


図5.9(a) Case2 流速分布（横断方向YZ平面）

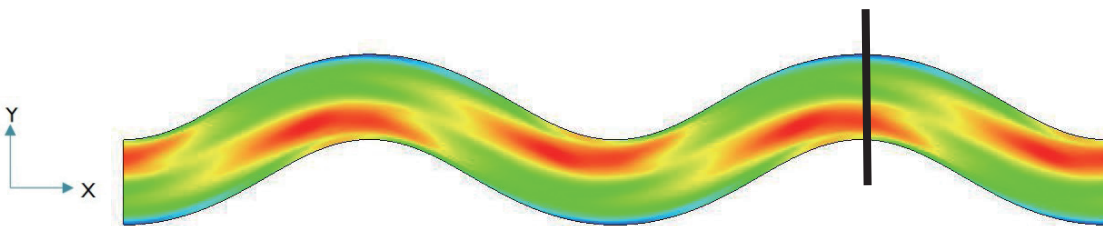


図5.9(b) 流速分布表示地点

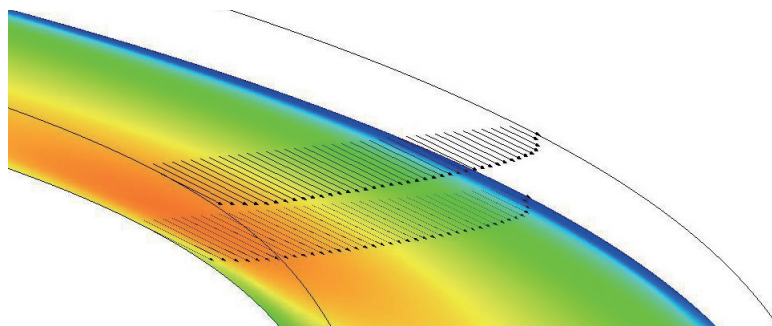


図5.10 Case1 流速ベクトル

(3) 流木モデル

iRIC, NaysCUBE ver3.00.6の流木設定では、水粒子として計算する中立浮体、流木と同じ体積・質量・密度の球形粒子として計算する等価球体、複数の球形粒子を拘束することで流木を再現する球体群モデルの3種類の設定が可能である。それぞれのモデルの違い、流木としてみた時の有効性に着目する。

a) 中立浮体

数値計算で求めた各格子点上の流速から粒子位置の流速を線形補完し、各粒子はこの流速に追従し輸送されるものとして次時刻での粒子位置を計算する。この時、流木としての質量・密度・形状は考慮されないため、水粒子の動きと等価である。

b) 等価球体

流木の設定を行い、その設定した流木に対して同じ質量・密度・体積として考えた球形の粒子を等価球体という（図5.11）。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、

$$\sigma A_3 d_{pi}^3 \frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d_{pi}^3 |u - u_{pi}| (u - u_{pi}) + \rho A_3 d_{pi}^3 \frac{du}{dt} + C_M \rho A_2 d_{pi}^3 \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_{pi}}{dt} \right) + F_{Basset} \quad (5.1)$$

$$+ A_3 d_{pi}^3 (\sigma - \rho) g + F_{LM} + F_{LS}$$

と表記できる⁹⁾。 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, t : 時間の次元量, g : 重力である。

運動方程式の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。水面に浮上した粒子を取り扱うため A_2 の補正が必要であり、 A_2 は球体の水面下に存在する部分の投影面積を表し、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 (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力は他の項と比較してオーダーが小さく、液相中の固体運動に関して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、これも無視した。流れ場に対する数値計算で流速を求めた後、それぞれの等価流体において上記の運動方程式を解くことで、流木を代表した球体の運動を得る。

c) 球体群モデル

複数個の球形粒子に拘束条件をかけて形状を剛体として保持することで、流木の回転と平行運動を含んだモデルを球体群モデルという。図5.12は球体群モデルの概略図である。1本の流木を5個の球形粒子で構成するものとし、1個あたりの球形粒子は質量を1/5、密度を同一とする。これを設定した流木の長さと同じ長さになるように直線状に並べて、以降の動きを数値モデルによって示す。手順として、それぞれの球形粒子に対して運動方程式を解き、それらを速度ベクトル全体について平均化し、流木としての剛体粒子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¹⁰⁾。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (5.2)$$

$$R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n u_i \times q_i \quad (5.3)$$

ここで,

$$r_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (5.4)$$

$$q_i = r_i - r_g \quad (5.5)$$

$$I = \sum_{i=1}^n |q_i|^2 \quad (5.6)$$

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.

$$u_i = T + q_i \times R \quad (5.7)$$

再計算された速度ベクトルを用いて剛体粒子の位置を再計算する. こうすることで, 剛体の重心の並進運動量と角運動量を保ちながら計算を行うことができる. この手法は1つの球体をそれぞれ解く手法と違って, 回転モーメントを考慮することが可能である. これらの手順を可視化したものが図5.13である.

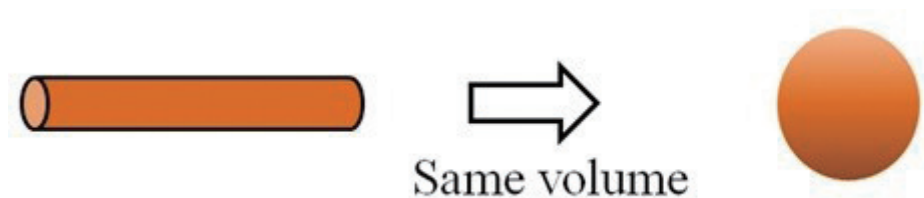
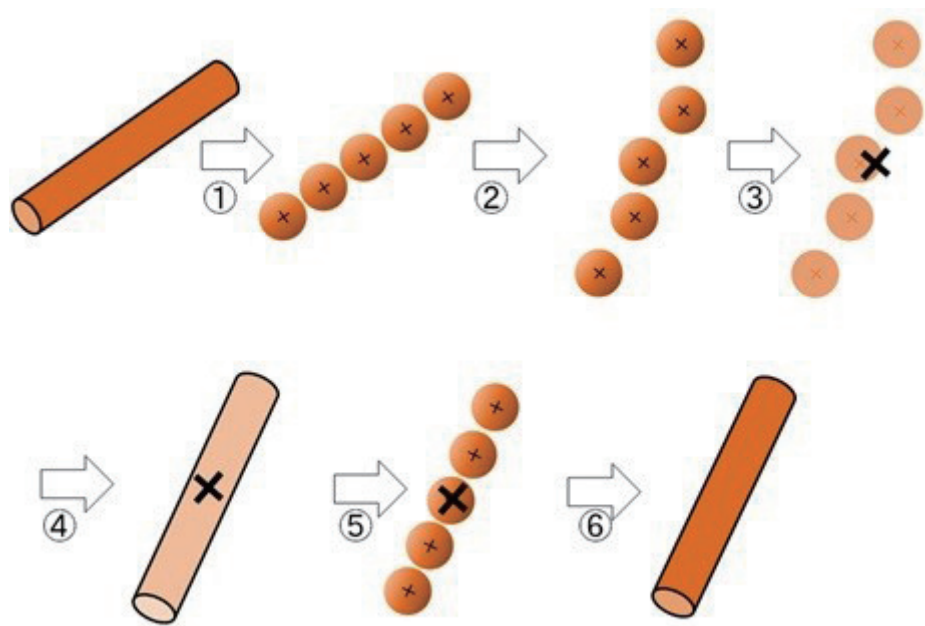


図5.11 等価球体の概念図



図5.12 球体群モデルの概念図



- 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

図5.13 球体群モデルの計算手順

d) 数値計算条件

順方向二次流が発生する条件で、流木の設定を3種類変更させその挙動の違いに着目する。

まず、格子の設定を行う。水路幅0.2m、蛇行長3.4m、蛇行波長2.53m、蛇行角60°で設定した（図5.14、表5.3）。

続いて、計算条件の設定として、流量は水深を3cm、フルード数が0.5前後となることを想定し、0.002m³/sとした。主流方向は周期境界条件とすることで無限につながる波を想定し、横断方向は非周期境界条件とする。粗度係数は実験水路を想定し0.01とした。流木は長さ4cm、直径2mm、密度を0.9kg/m³（図5.15）とする。条件のまとめを表5.4に記載する。なお、この流木設定は球体群モデルの設定である。中立浮体には流木設定が必要なく、等価球体はこの条件の下で同一の質量と密度を持った球形粒子として扱っていることに注意する。この流木設定の違いによる挙動の違いに着目していく。



図5.14 計算格子

表5.3 計算格子諸元

水路幅B(m)	0.2
蛇行長L(m)	3.4
蛇行波長WL(m)	2.53
蛇行角(°)	60
水路勾配	1/1000

表5.4 計算条件諸元

	流量(m ³ /s)	0.002
境界条件	主流方向	周期
	横断方向	非周期
流木設定	長さ(mm)	40
	直径(mm)	2
	密度(g/cm ³)	0.9
	粗度係数	0.01

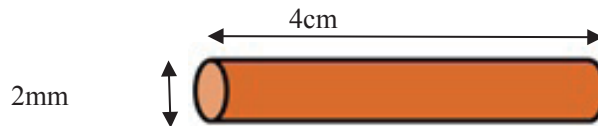


図5.15 流木設定

e) 数値計算結果の比較

まず、流木挙動を考察する前に、数値計算の結果発生した流れについて考察する。図5.16(a)は図5.16(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、水面において内岸側から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。

続いて、流木挙動に関する考察を行う。図5.17、図5.18、図5.19はそれぞれ中立浮体、等価球体、球体群モデルにおける流木の挙動である。流木のばらつきという点に着目すると、中立浮体と球体群モデルでは全部の流木が湾曲部を抜けると遠心力の影響を受け、まとまって投げ出されるような挙動を示しているのに対して、等価球体では他のモデルと同じような軌跡を描いているものの、全体的にばらつきがあることがわかる。図5.20は流速コンターを示している。この図と流木挙動を比較すると、中立浮体と球体群モデルの集まっている場所は、流れの速い場所であることがわかる。つまり、中立浮体と球体群モデルは等価球体に比べ、流速の影響を受けやすいといえる。また、等価球体ではばらつきがあるが、球体群モデルではばらつきが少ないことより、剛体粒子を複数個拘束することで流れの影響を受けやすくなると考えられる。

さらに詳細に流木の挙動を追うために、流れが安定してからの10秒間に通った流木の軌跡の平均を図5.21に示した。この図からも等価球体にばらつきがあることがわかる。また、軌跡全体に着目すると、等価球体は湾曲部における遠心力の影響をあまり受けておらず、他のモデルと比べると中心を流れていることがわかった。

中立浮体と球体群モデルを比較すると、少し軌跡がずれている場所もあるが、ほとんどの箇所では軌跡が一致していることがわかる。よって、流木の最終的な行方を追いたい時や流木の軌跡のみを知りたい場合は、中立浮体で代用しても問題ないことが考えられる。しかし、球体群モデルの場合は、流木の向きや回転の要素も考慮される。さらに、点ではなく点が固まり線となって結果が見られるため、現実に近い形の結果が得られているといえる。このことより、数値計算によって得たい内容やその計算速度等によって、使い分けることが可能であると考えられる。次節以降の計算については、実験と数値計算の比較が対象になるため、球体群モデルを採用する。

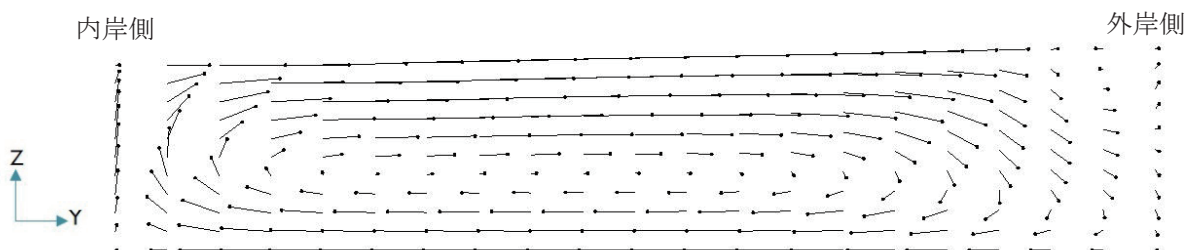


図5.16(a) 流速分布（横断方向YZ平面）図

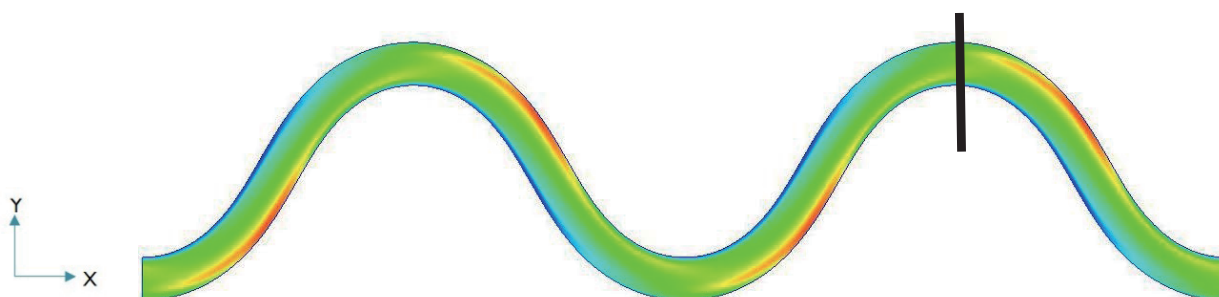


図5.16(b) 流速分布表示地点

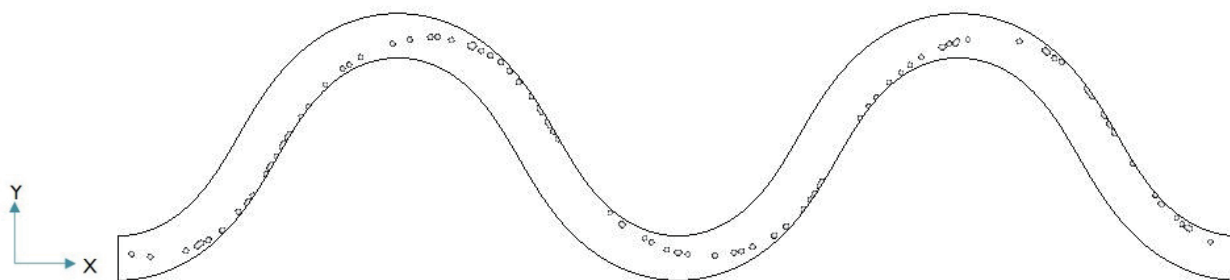


図5.17 中立浮体 流木分布

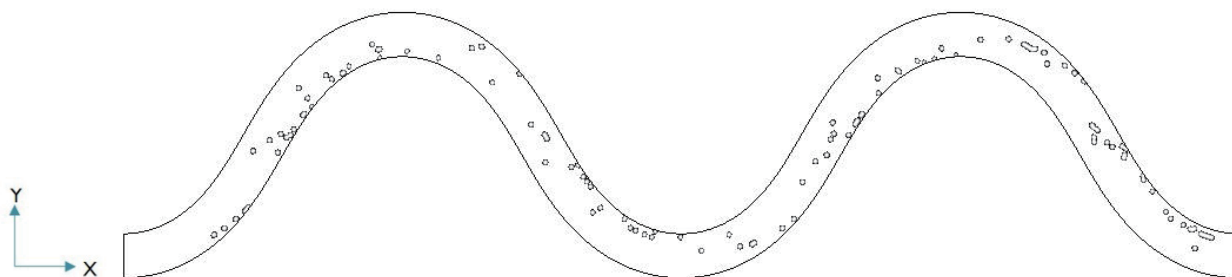


図5.18 等価球体 流木分布

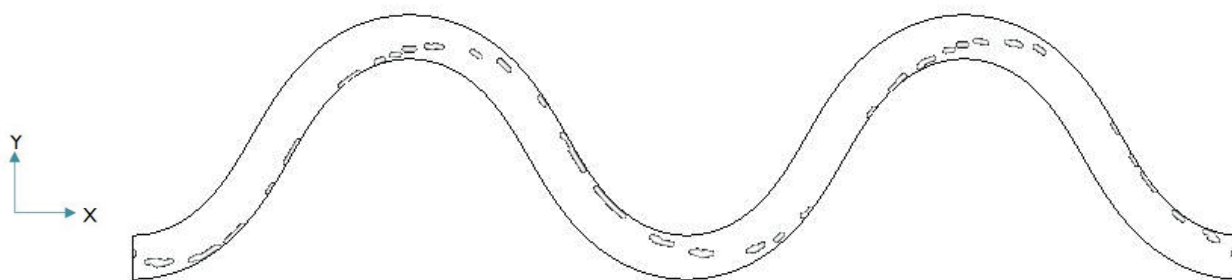


図5.19 球体群モデル 流木分布

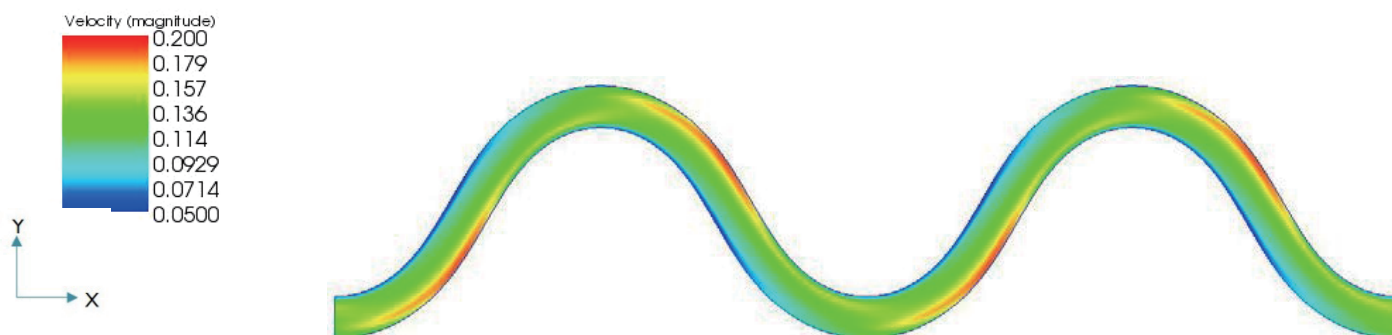


図5.20 流速コンター

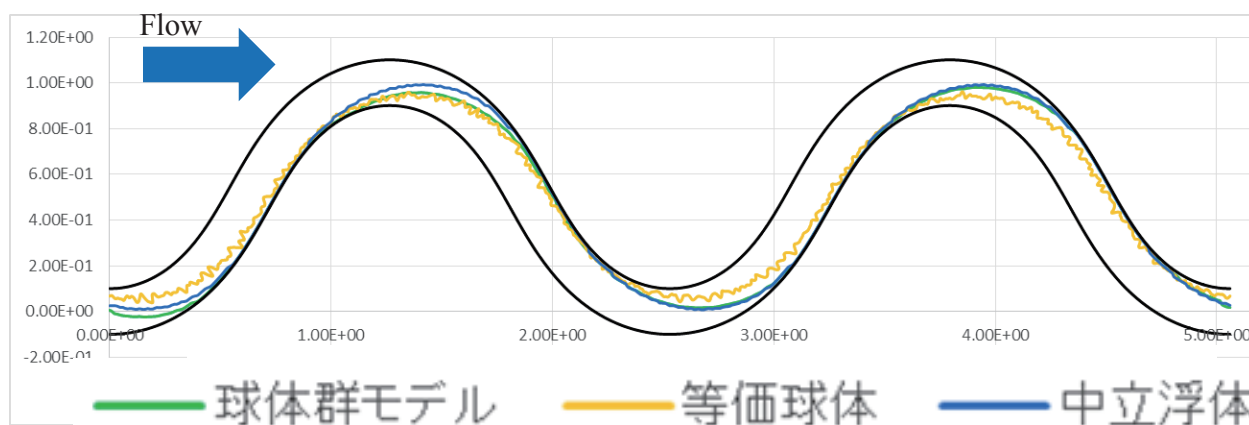


図5.21 流木軌跡の平均

(4) 水理実験の目的

蛇行湾曲部における流木の挙動を解明するに当たり蛇行模型を作成し、実験を行った。発生する二次流の違いによる挙動、また蛇行角度の違いによる挙動に着目し、複数のケースで実験を行った。

(5) 実験の概要

a) 水路作成

二次流の種類による比較および蛇行角の違いによる比較を行うために、3種類の格子を作成する。水路幅を20cm、水路勾配を1/1000で統一した。基本形状はsine-generated curveである。

まず、順方向二次流を想定した水路をCase3,4の2種類で作成した。蛇行波長を約2.5mで統一し、蛇行角を変えることで、蛇行角の違いによる挙動への影響について着目していく。Case3の蛇行角を 60° (図5.22)、Case4の蛇行角を 30° (図5.23) とした。

次に、逆方向二次流を想定した水路をCase5 (図5.24) として作成した。順方向二次流の水路に対して、蛇行波長を大幅に短くし、蛇行角も小さい 30° にすることで逆方向二次流の発生を促した。

波長は実験水路の長さの関係で、Case3,4では1.5波長、Case5では2.5波長とした。それぞれの水路に流れの安定化を目的とし助走区間を取り付けてある。また、それぞれの水路のより詳細な値を示すために、設計時に用いた平面図を図5.25に示す。

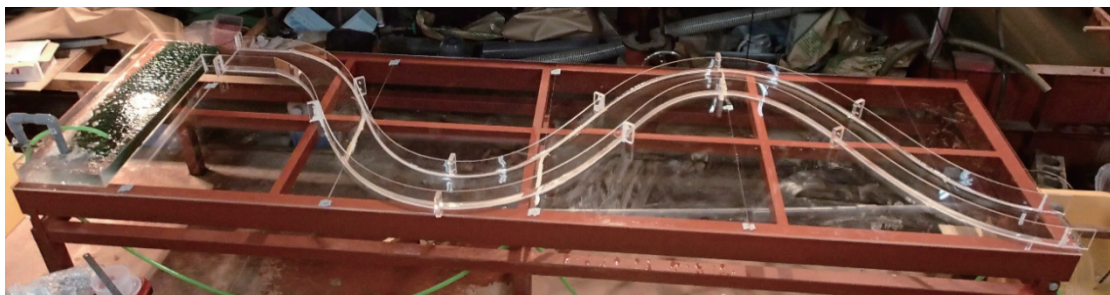


図5.22 Case3 実験水路



図5.23 Case4 実験水路



図5.24 Case5 実験水路

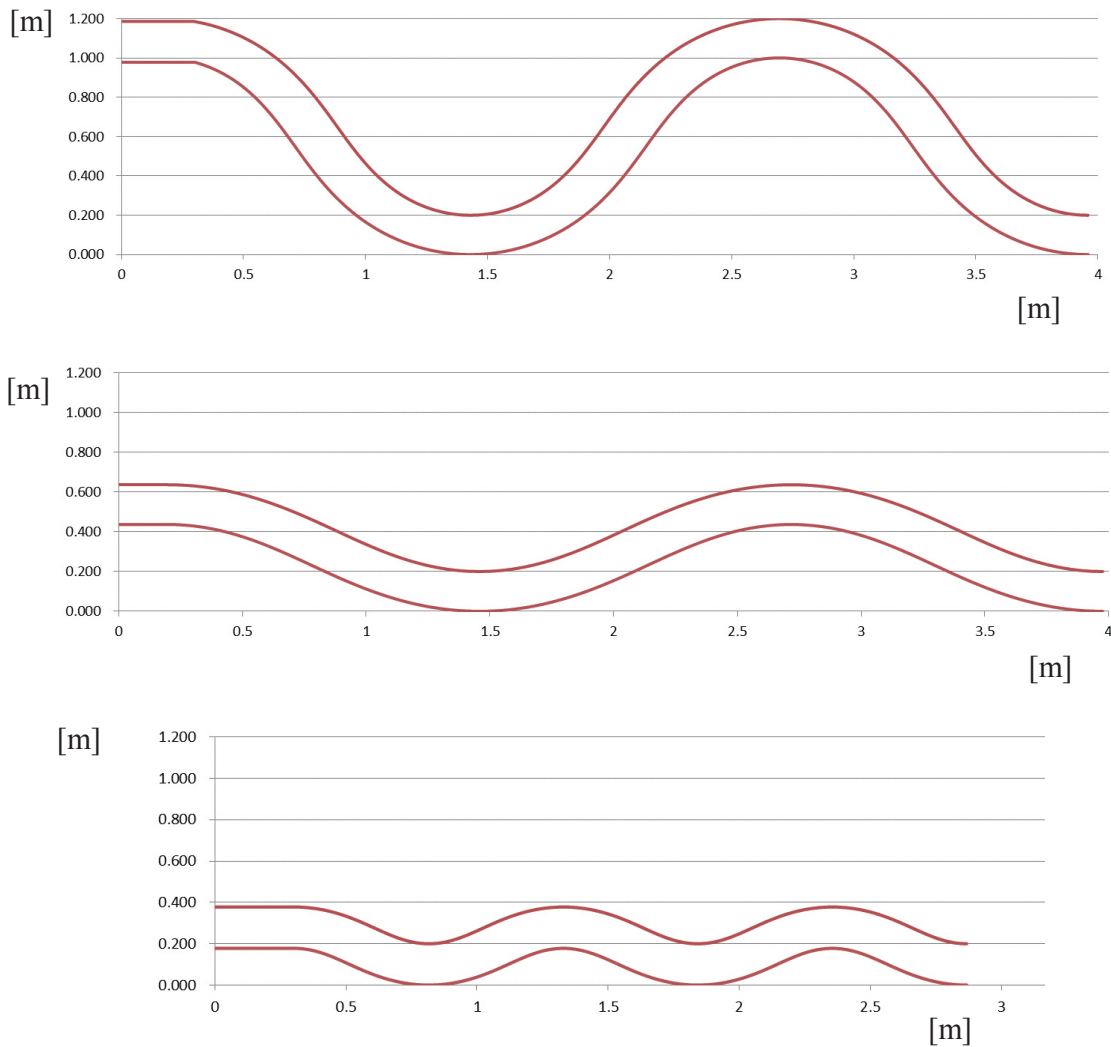


図5.25 水路形状平面図（上からCase3, Case4, Case5）

b) 実験条件

まず、流木の準備をした。流木は比重 0.95g/cm^3 、直径 2mm の竹ひごを長さ 4cm に切ることで作成した。また、視覚的に捕らえやすいよう、流木を黄色のペンキで着色した（図5.26）。流木の投下は水路に通水後一定時間たち流れが安定した後、一定間隔で5~10本程度ずつ供給した。

流量は水深 3cm 、フルード数約 0.5 となるように $0.002\text{m}^3/\text{s}$ で設定した。設定流量を流した後、水深が 3cm であることを確認した（図5.27）。

なお撮影は、ある程度流木挙動が安定することを想定し、それぞれの水路における最後の蛇行において行った。動画で撮影し、スナップショットに分割後、デジタイザーで流木を読み取り、一定区間において流木を平均化することで、流木の軌跡を追った。



図5.26 流木の模型

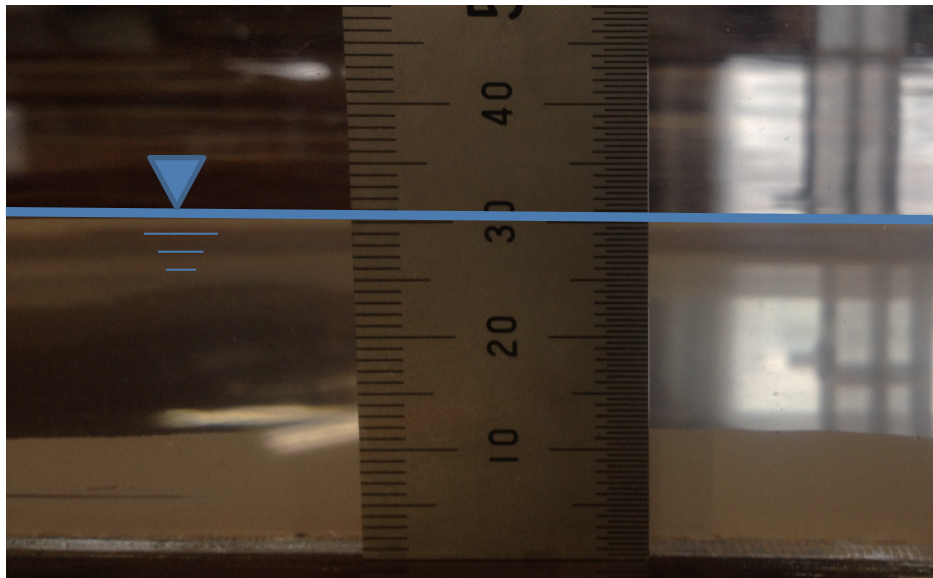


図5.27 実験時水深確認 (h=3cm)

(6) 実験結果および考察

図5.28はCase3の動画の一部を静止画としたものである。流木は湾曲部到達前で内岸側を、湾曲部を抜けた後では外岸側を流れていることがわかる。流木を軌跡として表現したグラフが図5.29である。静止画と同様に、内岸側を流れていた流木は、湾曲部を抜けた後に外岸側を流れていることがわかる。これは、表面付近で内岸側から外岸側に向かって流れる順方向二次流の影響を受けたことが要因であると考えられる。図における湾曲部の前には曲率が反対の湾曲部があるため、動画撮影部とは逆向きの順方向二次流が発生している。その影響で湾曲部前では内岸側を沿うように流れ、湾曲部で二次流の向きが入れ替わり、このような挙動を示したと考えられる。

図5.30はCase4の動画の一部を静止画としたものである。流木はCase3と比較するとはっきりと見られなかったが、湾曲部前で内岸側を流れ、湾曲部を抜けた後では外岸側に向かう挙動が見られた。図5.31に示した流木の軌跡に着目すると、湾曲部前後で多少の差は見られるものの、湾曲部を抜けた後も内岸側を流れていることがわかる。再度静止画に着目しても、外岸側まで順方向二次流の影響を受けておら

ず、中心付近までしか流木が流れていないことが見られる。これは、Case3と比べて蛇行角が 30° 小さいため、遠心力が小さくなり、それに伴って第一種二次流の大きさも小さくなったためであることが考えられる。また、今回の水路と流木のスケールの関係で、実河川では無視できる程度の大きさの表面張力が発生し、流木が塊となって動いていたことも可能性として考えられる。

Case3とCase4に共通して、水路壁面から少し離れた場所を流れていることがわかる。この要因としては、二次流の特徴でもある外岸セルが影響していると考えられる。外岸セルは、二次流に対して逆向きの小さな渦が外岸に発生して現れる流れのこと（図5.32）であり、この外岸セルが発生することで最大流速が壁面から少し内側にずれ、このような挙動につながった。

図5.33はCase5の動画の一部を静止画としたものである。流木は岸の近くよりも中心に近い位置を流れていることがわかる。図5.34は流木の軌跡を示したグラフである。こちらの結果を見ても、湾曲部で少し内岸側に寄っているものの、水路の中心を流木が流れていることが確認できた。この挙動の要因として、逆方向二次流が考えられる。二次流の発達遅れによって、前の湾曲部で発生した二次流が残り、さらに新しく発生したが完成しなかった二次流の2つの二次流の影響を受け、流木が中心に集められたと考えられる。また、静止画からは確認できないが、流木の挙動がCase3,4と比較するとまとまっておらず、乱れていることが確認できた。このことから、逆方向二次流は発達途中の二次流ということもあり、流れが不安定で、乱れが大きい流れであると考えた。

本実験で確認された現象について、次章で数値計算を用いて詳しく確認していくこととする。



図5.28 Case3 実験 静止画

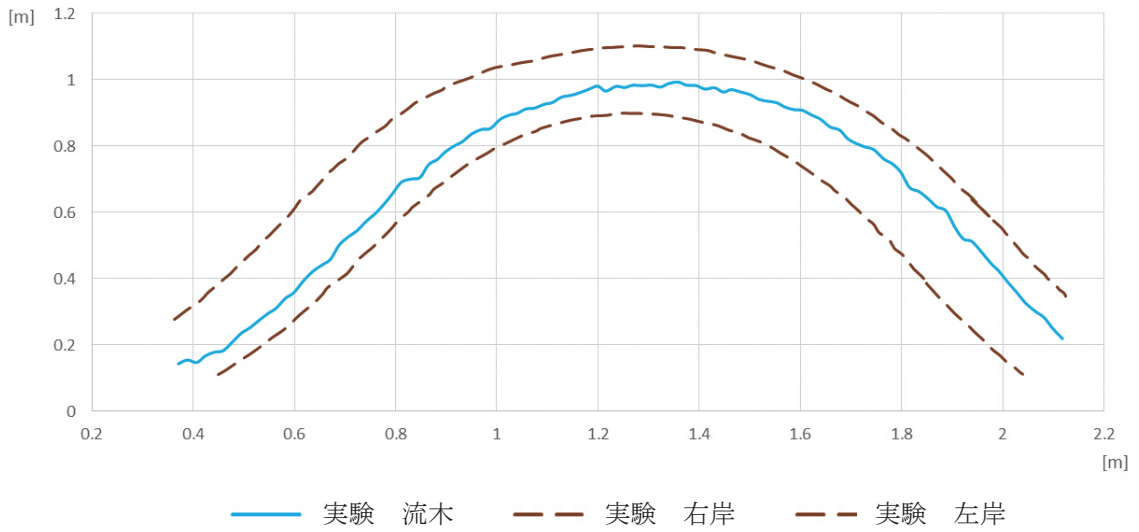


图5.29 Case3 实验 流木轨迹



图5.30 Case4 实验 静止面

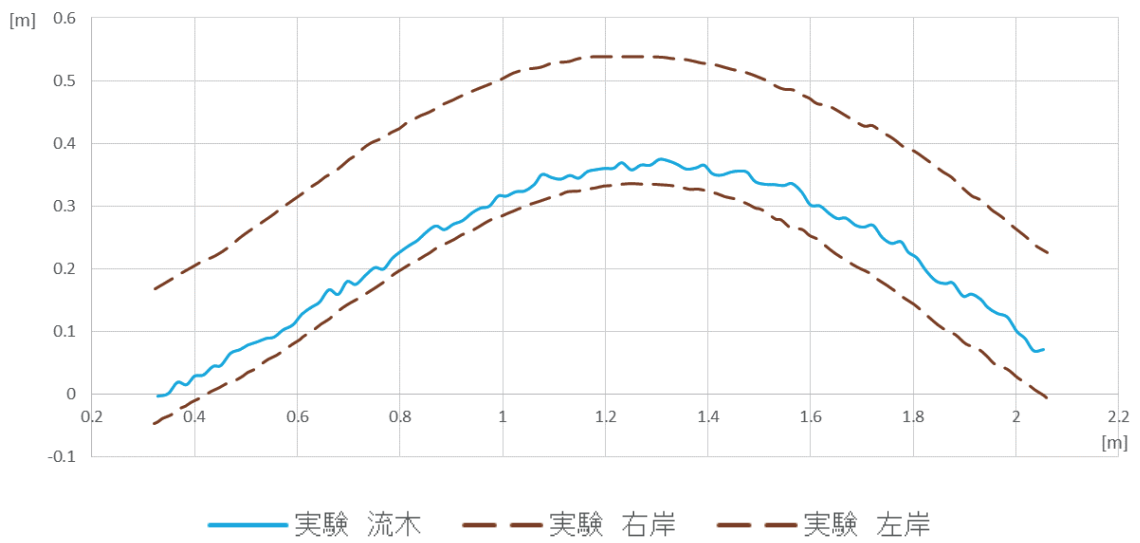


图5.31 Case4 实验 流木轨迹

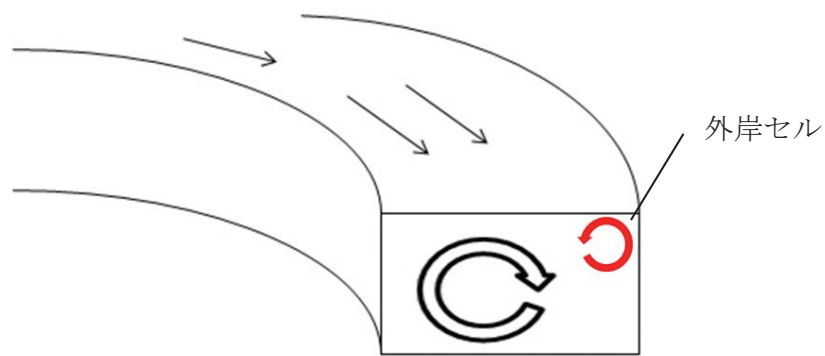


図5.32 外岸セル概略図

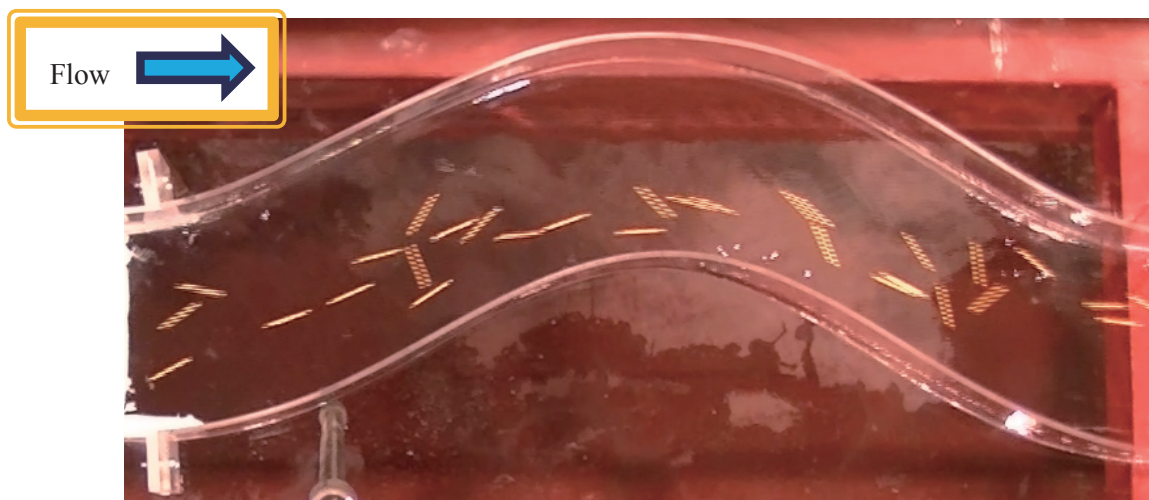


図5.33 Case5 実験 静止画

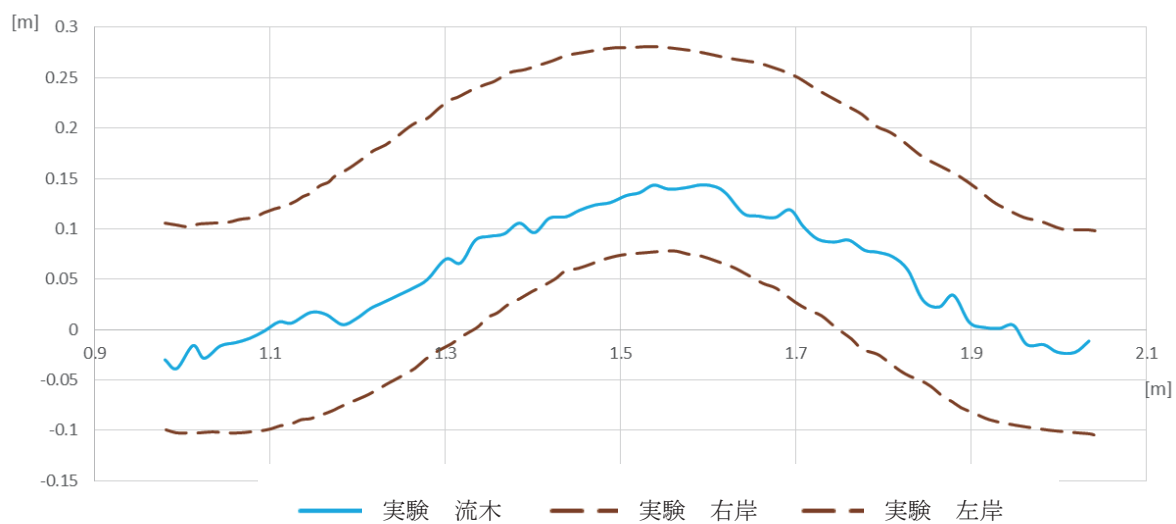


図5.34 Case5 実験 流木軌跡

(7) 数値計算

前節で行った実験の条件で数値計算を行い、実験で見られた現象について、詳しく考察する。また、iRIC, NaysCUBE ver3.00.6での数値計算結果と実験結果を比較し、その整合性や本ソルバーの課題に着目していく。

(8) 計算条件

a) 格子作成

実験で行ったCase3,4,5の水路形状と同じ計算格子を作成した。

共通の設定として、基本形状はsine-generated curveとし、水路幅は20cm、水路勾配は1/1000とした。

Case3,4は共に順方向二次流の発生を想定している。蛇行波長をCase3は2.53m、Case4は2.52mとほぼ統一し、蛇行角はCase3を60°、Case4を30°とすることで蛇行角の違いに着目していく。

Case5は逆方向二次流の発生を想定している。Case3,4と比べ、蛇行長、蛇行波長を短くし、二次流の発達遅れを促す格子を作成している。

それぞれの格子の諸元を表5.5にまとめた。Case3,4,5の格子を図5.35, 5.36, 5.37に示す。

表5.5 計算格子条件

	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
水路勾配	1/1000	1/1000	1/1000



図5.35 Case3 計算格子



図5.36 Case4 計算格子



図5.37 Case5 計算格子

b) 計算条件

計算条件も格子作成時と同様に，実験で行った設定で計算条件を設定した．

共通の設定として，下流端における水深を3cm，フルード数は0.5程度を想定し流量を0.002m³/sとした．粗度係数は実験水路の平坦な状態を想定し0.01とした．流木の長さは4cm，直径2mm，密度を0.95g/cm³とした．なお，流れの安定化と計算の効率を考慮し，主流方向に周期境界条件を適用し，無限に続く蛇行水路を表現している．鉛直方向の格子分割数を20分割とした．

計算条件の諸元を表5.6にまとめた．

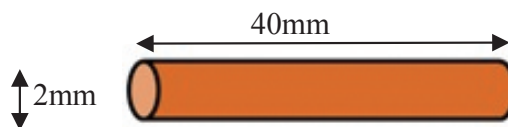


図5.38 流木設定

表5.6 計算条件諸元

流量(m ³ /s)		0.002
下流端水位(cm)		3
境界条件	主流方向	周期
	横断方向	非周期
流木設定	長さ(mm)	40
	直径(mm)	2
	密度(g/cm ³)	0.95
粗度係数		0.01

(9) 数値計算結果および考察

数値計算の結果とその結果から得られた考察をしていく。考察は以下より、現象ごとに分けて行っていくことにする。

a) 流木軌跡の比較

まずは流木の軌跡に着目する。図5.39はCase3における流木挙動の数値計算結果を示した図である。また、図5.40はその軌跡を示し、実験流木の軌跡との比較を示したグラフである。両図より、流木は湾曲部前では内岸側を沿うように流れ、湾曲部を抜けた後、外岸側に投げ出されているような挙動であることが確認された。図5.41(a)は、図5.41(b)に示す地点における鉛直方向の流速分布を下流側から見た図である。この図より、水面で内岸から外岸に向かって流れ、河床では外岸から内岸に向かって流れる順方向二次流が確認できた。この順方向二次流の影響を受け、実験と同様に内岸側を流れていた流木は湾曲部を抜けた後、外岸側に投げ出されたとわかる。

図5.42はCase4における流木挙動の数値計算結果を示した図である。また、図5.43はその軌跡を示し、実験流木の軌跡との比較を示したグラフである。図5.44(a)は、図5.44(b)に示す地点における鉛直方向の流速分布を下流側から見た図である。この図より、Case3と同様に、水面で内岸から外岸に向かって流れ、河床では外岸から内岸に向かって流れる順方向二次流が確認できた。

数値計算では、この順方向二次流の影響を受け、湾曲部を抜けた流木は外岸側に投げ出されたとわかるが、その挙動の大きさはCase3と比較すると小さいことがわかる。図5.41と図5.44を比較すると、ベクトルの基準値を揃えているが、Case3の図5.41のほうが、密度が大きいことがわかる。これは、二次流の強さがCase3のほうが大きいことを示し、蛇行角が大きいほうが二次流の強さも大きくなることが確認できた。また、図5.43より数値計算の流木挙動と実験の挙動で、挙動が異なっていることがわかる。これは、実験において二次流の強さが小さいことで、1.5波長の間に流れが平衡状態まで達しなかったため、二次流発生過程により現れる乱れの影響、流木の投入方法、下流端における影響など、理想形として考える数値計算では発生しない不確定な要素の影響を強く受けたことで、流木にばらつきが出たことが考えられる。数値計算は流れが安定した後の軌跡に着目しているため、最大流速に沿った流木挙動を示したといえる。

図5.45はCase5における流木挙動の数値計算結果を示した図である。また、図5.46はその軌跡を示し、実験流木の軌跡との比較を示したグラフである。この両図より、流木は水路の中心に集まるように流れていることがわかる。図5.47(a)は、図5.47(b)に示す地点における鉛直方向の流速分布を下流側から見た図である。この図より、外岸側に発生している二次流は、水面で外岸から内岸に向かい、河床ではその逆向きの逆方向二次流であることが確認できた。この逆方向二次流が影響し、流木が中心に集まっていることがわかる。

図5.46に着目すると、数値計算では水路のほぼ中心を流れているのに対し、実験では湾曲部において少し内岸側を流れていることがわかる。ここで、水面の横断方向において最大流速を示す点を結んだグラフ(図5.48)に着目する。この図より、湾曲部において最大流速が内岸側に急激に移動していることがわかる。この内岸側に移動する力が流れの乱れにつながり、流木も内岸側に乱れ、全体としてこのようなズレにつながったと考えられる。

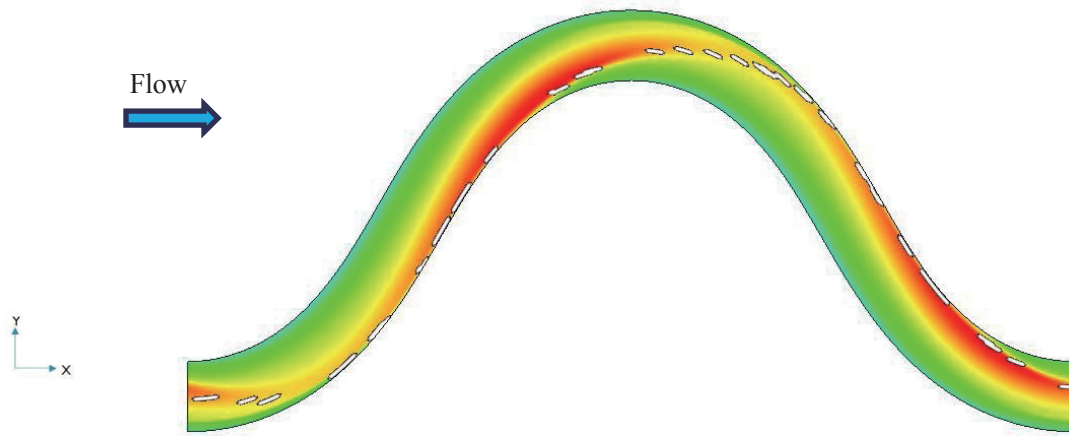


図5.39 Case3 数値計算 流木挙動

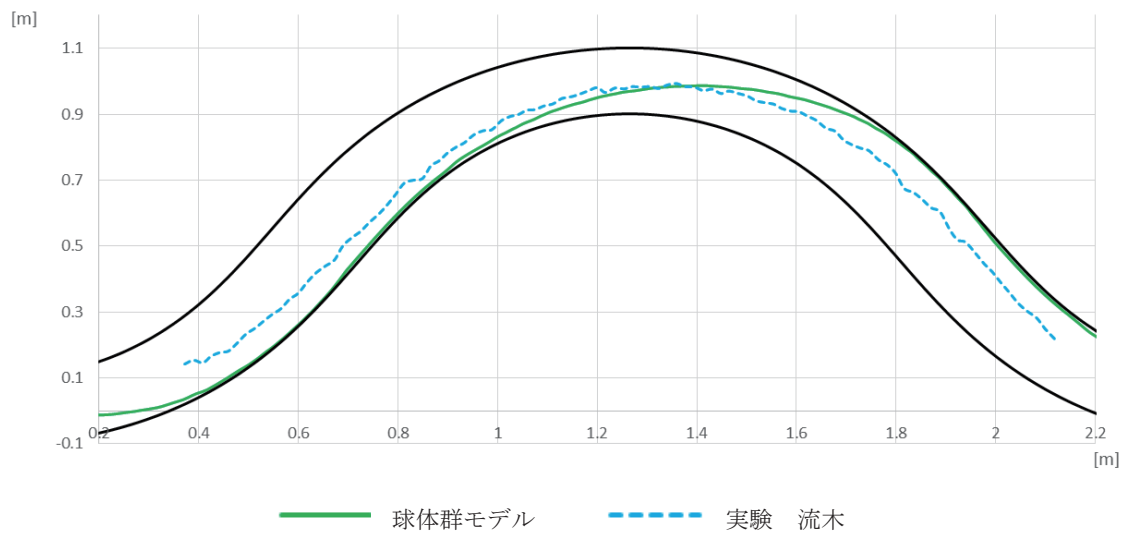


図5.40 Case3 流木軌跡

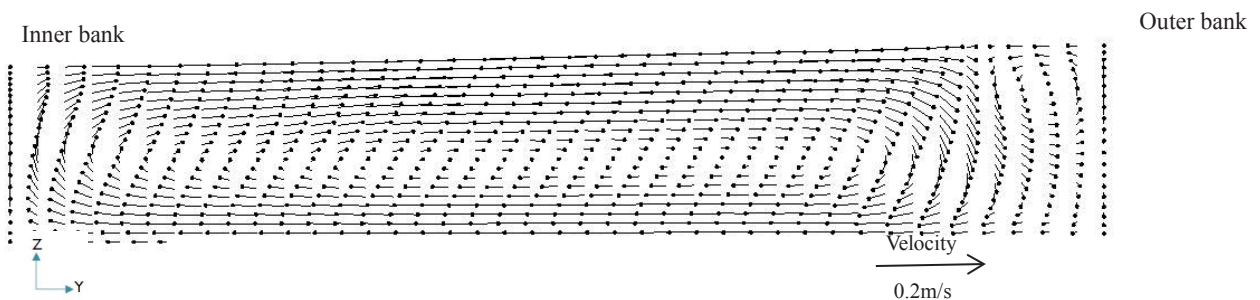


図5.41(a) Case3 湾曲部流速分布 (YZ平面)

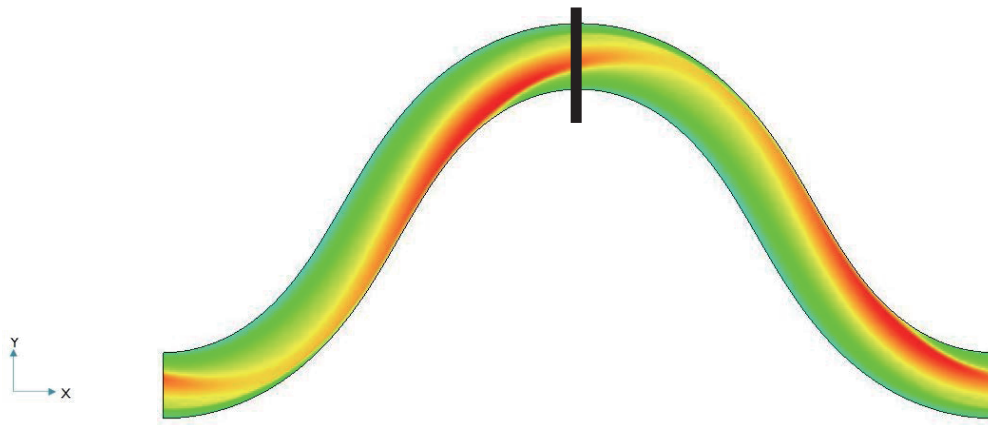


図5.41(b) Case3 流速分布表示地点 (XY平面)



図5.42 Case4 数值計算 流木挙動

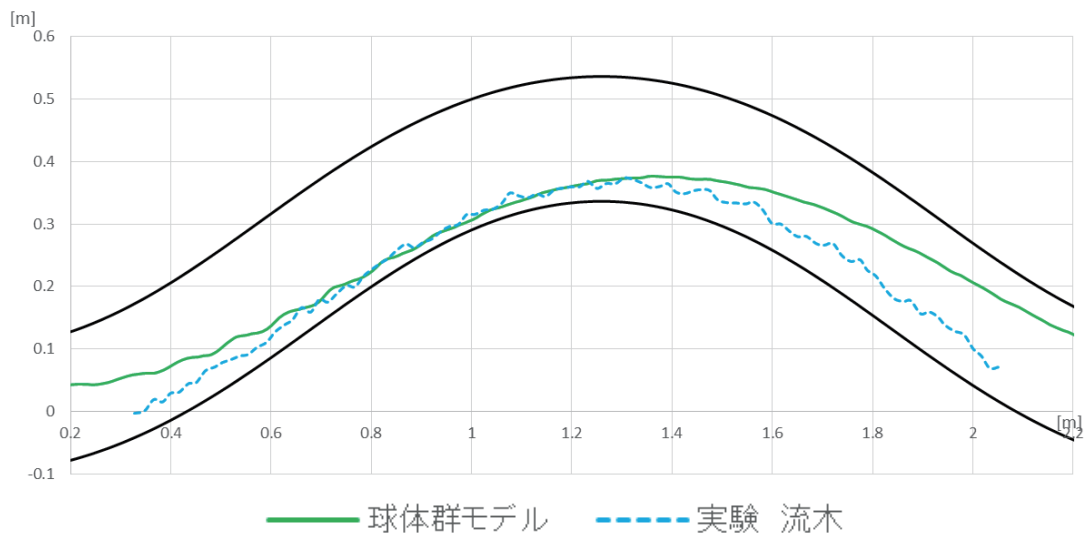


図5.43 Case4 流木軌跡

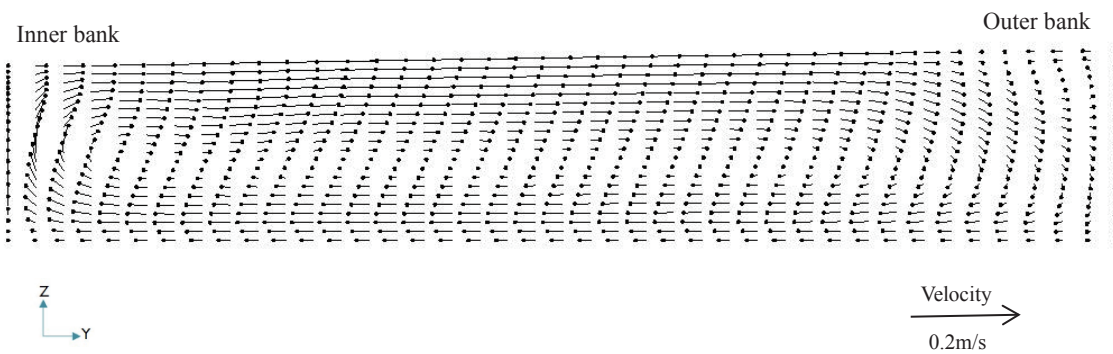


図5.44(a) Case4 湾曲部流速分布 (YZ平面)

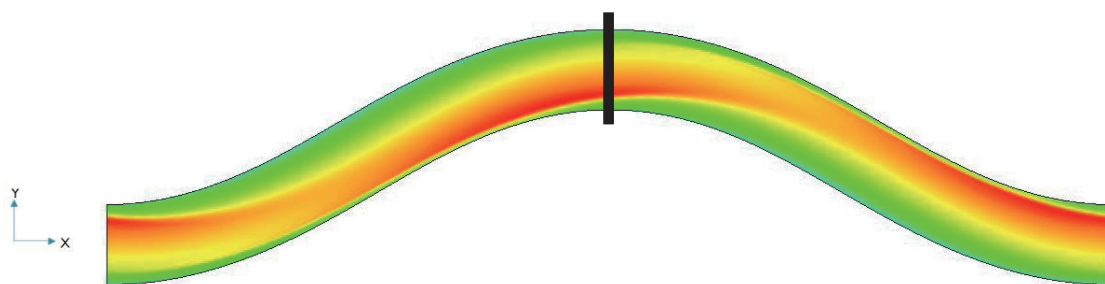


図5.44(b) Case4 流速分布表示地点 (XY平面)

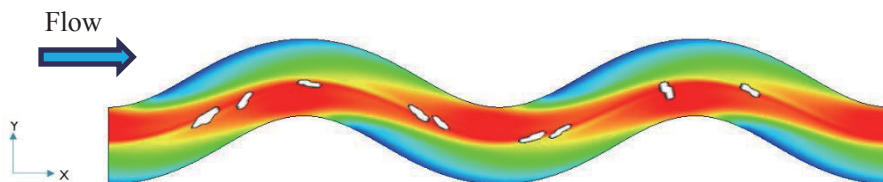


図5.45 Case5 数值計算 流木挙動

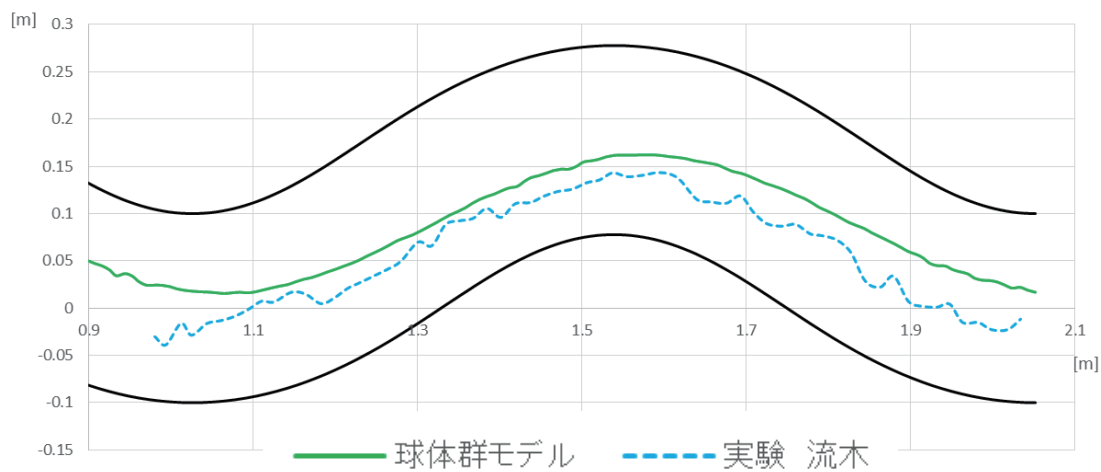


図5.46 Case5 流木軌跡

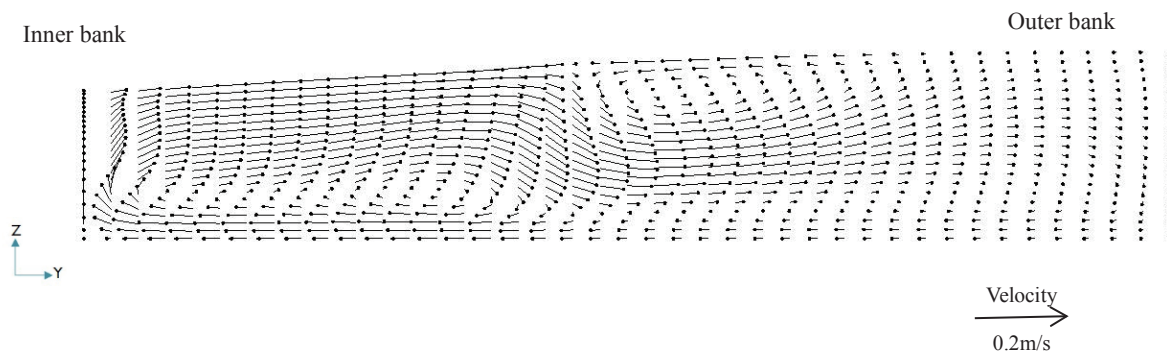


図5.47(a) Case5 湾曲部流速分布 (YZ平面)

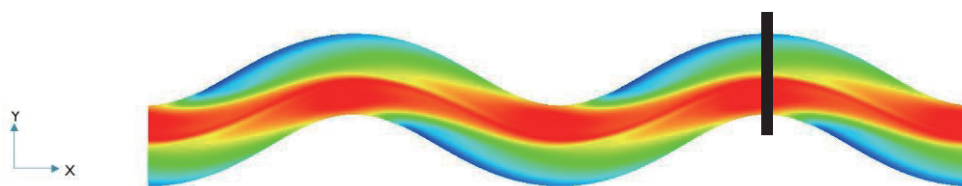


図5.47(b) Case5 流速分布表示地点 (XY平面)

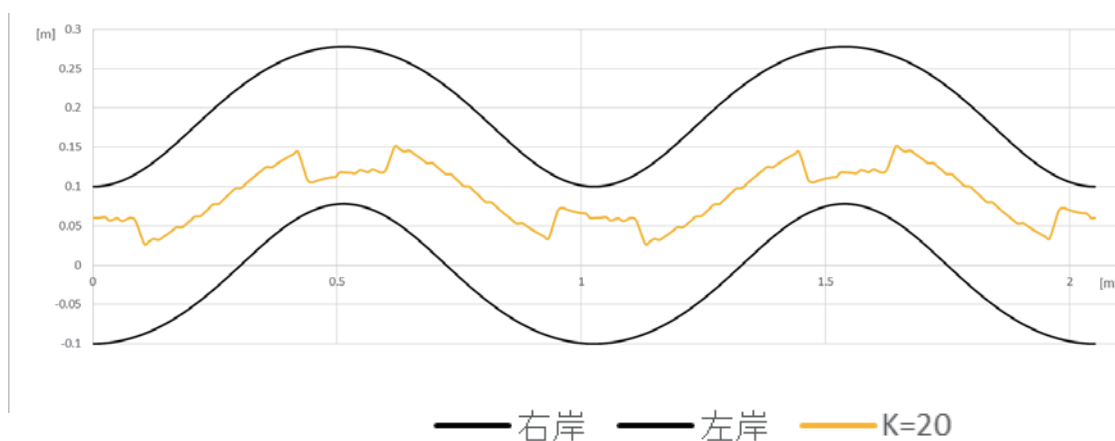


図5.48 Case5 最大流速点軌跡

b) 二次流の影響

ここでは、前節で少し触れているが、二次流と流木の挙動の関係について深く考察していく。

まず、前述の外岸セルの影響について着目する。図5.49はCase3における湾曲部の鉛直方向の流速分布を示している。図より外岸側の水面近くに外岸セルが発生していることが確認できた。また、図5.50はCase4における湾曲部の鉛直方向の流速分布を示しており、Case3同様に外岸セルが確認できた。実験において流木が壁面まで到達せず、少し内側を流れた要因として、この外岸セルの可能性が考えられる。

図5.40と図5.43の実験流木に着目すると、Case4のほうが壁面近くを流れていることがわかる。ここで、再び図5.49及び図5.50に着目すると、外岸セルの大きさがCase3のほうが大きいことがわかる。つまり、

流木はこの外岸セルの大きさによって壁面との距離が決まってくる可能性が考えられる。また、外岸セルは蛇行角が大きいほど大きくなることがわかった。

数値計算で得られた流木の挙動に着目すると、上記したことが必ずしも正しいとは言えない。図5.40の数値計算によって得られた挙動では、壁面に沿って移動する結果となっている。これは外岸セルが効いていないことが考えられる。図5.51は、XY平面において湾曲部付近の流速ベクトルを密に表示することで、流速分布をわかりやすく表示した図である。この図より、湾曲部頂点付近では外岸セルの影響で、最大流速が壁面から少し離れた場所となっているが、壁面との距離は主流方向に移動するごとに小さくなっている。その後、図の円で記した場所で、最大流速点がほぼ外岸壁面となっていることが確認された。つまり、数値計算では外岸セルが途中で消滅していることがわかる。しかし、外岸セルは本来消滅しない。実験においては、この外岸セルの影響を受け、このような数値計算と実験の差が生まれたと考えられる。図5.52はCase4において図5.51と同様にベクトル表記した図であり、こちらに着目すると、外岸セルが常に確認された。そのため、数値計算における流木挙動で壁面にぶつかることの無い挙動を示したと考えられる。

ここで一つ考えられることとして、外岸セルは消滅したのではなく、格子の大きさの関係で表現できないほど小さくなってしまった可能性がある。Case3,4共に、湾曲部頂点において外岸セルが最大の大きさを示し、着目点を移動するに従って小さくなっていった。Case4はCase3と比べて、蛇行波長に対して蛇行長が短い。そしてCase3は、曲率の小さい場所の長さが長い。そのため、Case4では外岸セルが消える前に次の湾曲部に到達したが、Case3では次の湾曲部に到達する前に外岸セルが数値計算では表現されないくらい小さくなってしまったと考えられる。実験に近づけるためには、さらに細かく格子を設定し、計算する必要があるのではないかと推測される。しかし、計算に莫大な時間がかかってしまうため、効率性を考えると、どの程度の精度が必要かを考える必要がある。

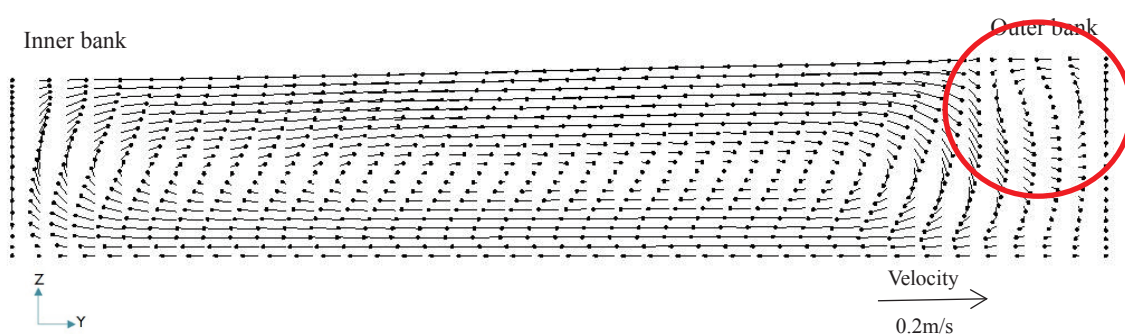


図5.49 Case3 湾曲部流速分布 (YZ平面)

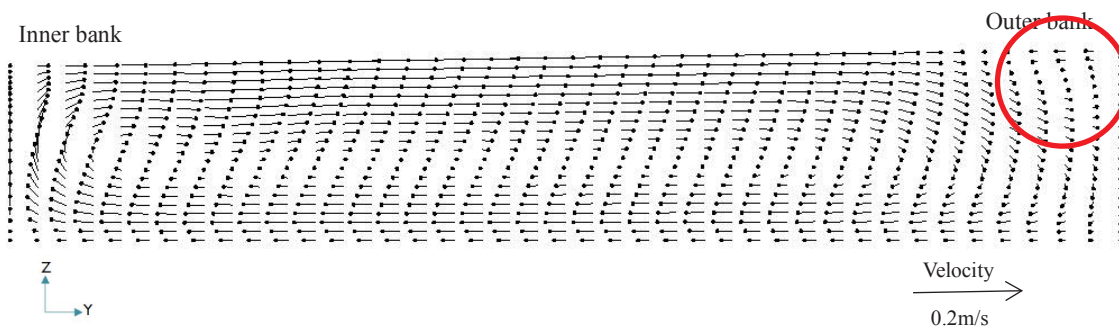


図5.50 Case4 湾曲部流速分布 (YZ平面)

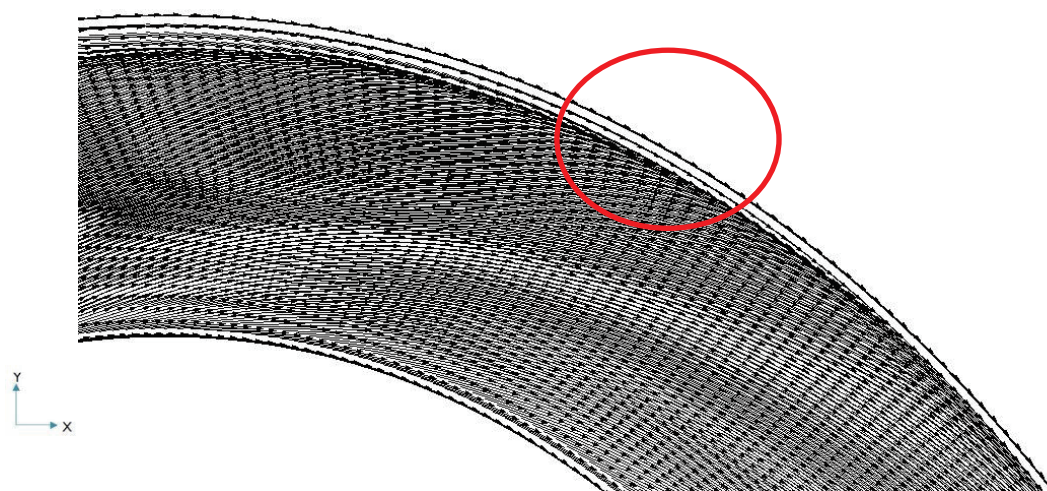


図5.51 Case3 流速ベクトル

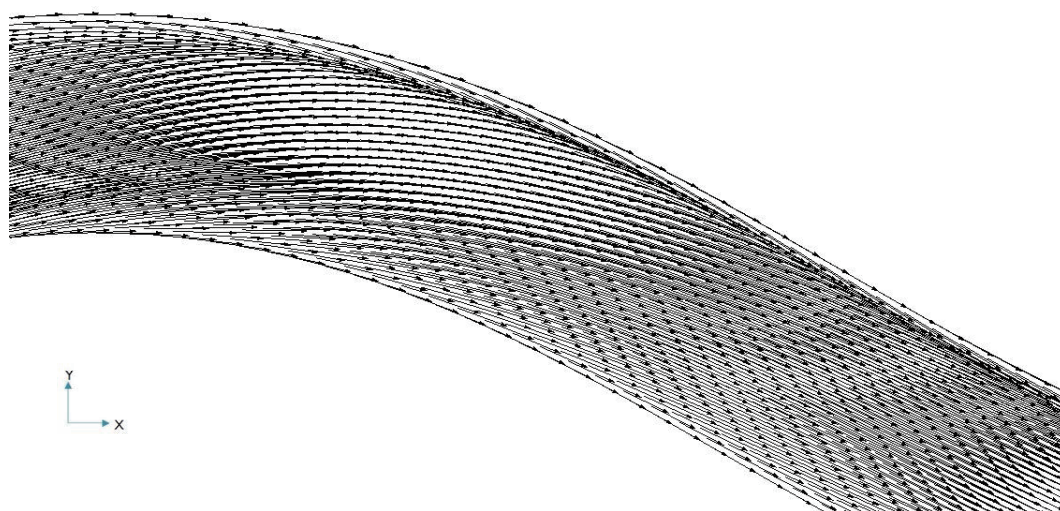


図5.52 Case4 流速ベクトル

c) 数値計算の課題

前節で格子を細かくする必要性を示したように、実現象に近づけるためには、いくつかの数値計算の課題点が挙げられる。その課題点についてまとめる。

まずは、前節で記した格子の精度である。今回は外岸セルにおいてその指摘がされたが、例えば河床が一様でない場合に、鉛直方向の分割数が20では足りない可能性も出てくる。三次元といってもその分割数で現象が異なってはいけない。そこで、分割数を複数パターン試し、その計算効率と照らし合わせ最適な格子の大きさを設定するべきである。

次の課題点として流木の衝突が無視されていることが挙げられる。図5.53はその例である。本来であれば衝突し、ばらけるような挙動の場面でも、図のように1つのままとってしまうような表現がされ、この後はすり抜けてしまう。同じような挙動を示しても、流木同士が衝突することで生まれるばらつきが計算では表現できないため、今回の結果のような整列した流木挙動となったと考えられる。

最後に、数値計算では実験と比べて回転運動が少なかったことが挙げられる。数値計算において回転運動を確認できた場所に着目した図が、図5.54である。全ケースにおいて流木は、流速の速い地点に集まる傾向が見られた。この図の場合でも、流木は中心に集められた。さらに、この流木が集まる地点において流速ベクトルが急激に変わっていることがわかる。この変曲点に来た流木は、1本の流木の中でも、違う流速の影響を受け回転運動につながったと考えられる。今回、回転運動が確認された場所は、どこも同じような状態だった。しかし、実験ではその他にも回転している場所が多くあったため、回転運動に関わる要素は、この変曲点以外にもあることが推測される。その一つとして、上記した衝突も考えられる。また、本ソルバーではレイノルズ平均モデル (RANS) を用いているため、非定常な渦などは評価されにくい。レイノルズ応力の大きさに合わせたランダムウォークの導入後、レイノルズ数を再構築するなど、モデルの修正を行い、実験との整合性を高める必要がある。

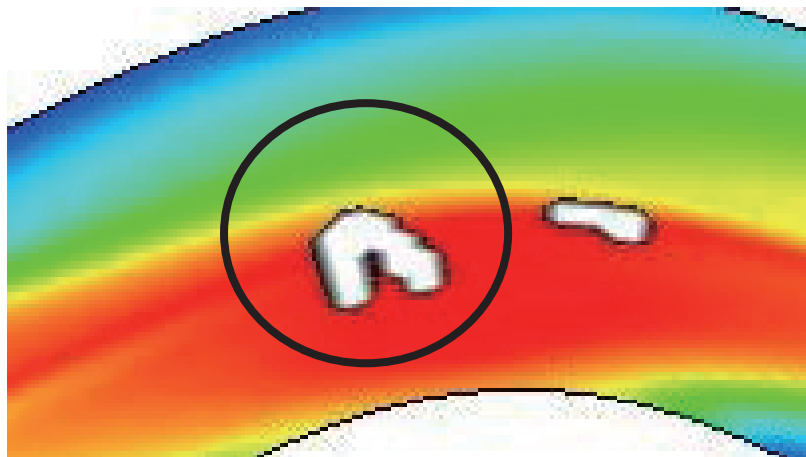


図5.53 衝突の無視 (Case5)

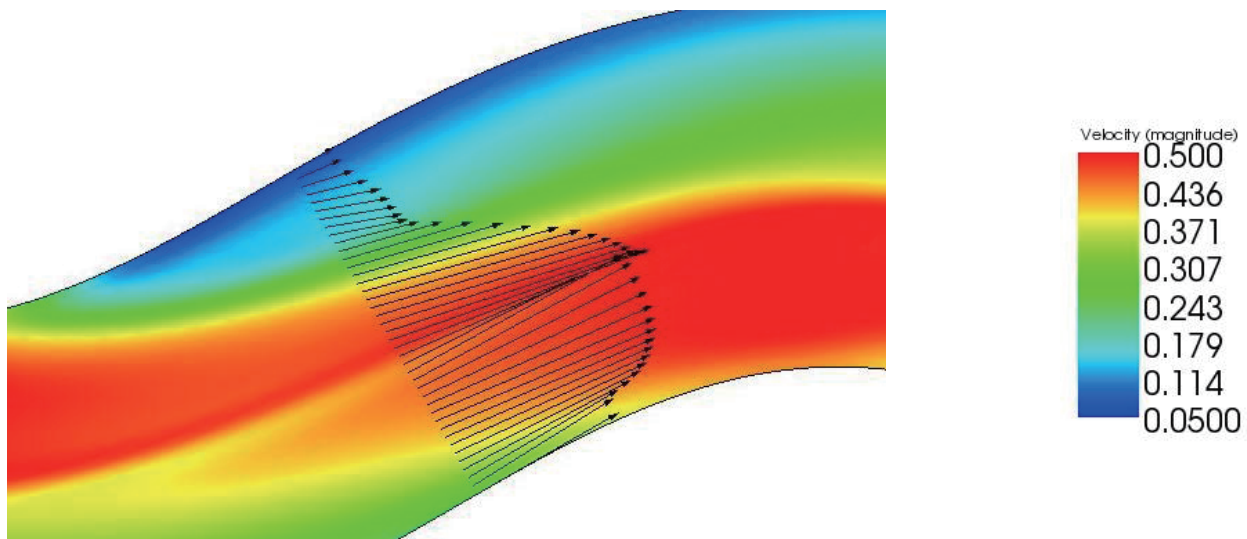


図5.54 回転運動部における流況（Case5）

（10）本章の結論

本研究では、iRIC, NaysCUBE ver3.00.6を使用した三次元および二次元数値計算における流況結果の比較、および、実験・数値計算から第一種二次流と流木の挙動の関係性を解明することを目的としている。以下に結論をまとめる。

a) 流木数値モデルに関する基礎的研究

- ・二次元数値計算では二次流の影響を考慮することが困難であり、また、第一種二次流の影響を考慮した二次元計算である準三次元と呼ばれる計算では、二次流の向きまで細かく計算することができないため、三次元数値計算を行う必要性が確認された。
- ・流木モデルには、中立浮体、等価球体、球体群モデルの3つがあるが、流木として考える場合は球体群モデルを使う必要があることがわかった。しかし、流木の行く先のみに着目する場合、中立浮体でも再現できる可能性があることがわかった。

b) 蛇行模型を用いた水理実験

- ・蛇行水路では、順方向二次流の影響を受け、内岸側を流れていた流木は湾曲部を抜けると、外岸側に向かって力が働いていることが確認された。
- ・順方向二次流の大きさは、蛇行角と関係があることがわかった。
- ・壁面付近には外岸セルが発生し、流木が壁面から少し離れて流れるという可能性が示唆される。
- ・逆方向二次流の影響を受ける水路では、流木が中心に集まることがわかった。流れの乱れが大きく、流木にばらつきも見られる。

c) 数値計算による水理実験との比較

- ・実験において予想された現象が、数値計算においても確認がされた。
 - ★Case3,4において順方向二次流が発生していた。
 - ★蛇行角の大きさが大きいほど、二次流の強さも大きい。
 - ★外岸セルの存在が確認された。
 - ★Case5において逆方向二次流が発生していた。

- ・実験において確認された流木の挙動を説明するために、数値計算の最大流速に着目したところ、その要因を見つけることができた。しかし、数値計算の流木挙動では実験のような現象が確認されなかった。
- ・実際の現象を数値計算で再現するためには、いくつかの課題があることが確認された。
 - ★外岸セルが途中で消滅してしまう。格子をより細分化する必要性が考えられた。
 - ★流木同士の衝突が無視されている。
 - ★回転運動が実験と比較して少なかった。数値計算において回転が確認された場所は、流速の変曲点周辺である。流木同士の衝突が無視されていることも原因の1つとして考えられるが、加えて、現在計算で考えられている要素以上に別の乱流の影響が関わっている可能性が考えられた。

謝辞：本章の研究の遂行にあたっては、水理模型実験、数値解析の全般にわたって、北海道大学大学院工学院修士課程学生、北園和也氏の協力のもとに行われた。また、流木の数値解析モデルの作成にあたっては、愛知工学大学、赤堀良介准教授より、多大なるご指導をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Braudrick, C.A., Grant, G. E. : When do logs move in rivers? , *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 2, pp. 571-583, 2000.
- 2) 福岡捷二, 新井田浩 : 流木類の流下・堆積とそれらの河道設計への利用, 土木学会論文集, No. 479/II-25, pp. 51-60, 1993.
- 3) R. B. Manners, M. W. Doyle, M. J. Small : Structure and hydraulics of natural woody debris jams, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W06432, 17 PP., 2007.
- 4) 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.
- 5) 中川一, 井上和也, 池口正晃 : 流木群の流動に関する研究(3) - 流木の回転運動を考慮した解析 -, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp. 459-473, 1994.
- 6) 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.
- 7) 木村一郎 : NaysCUBE Solver Manual, iRIC Project.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 越塚誠一 : 粒子法, 丸善株式会社, pp.63-66, 2005.