

# 浮体混在型河川災害の予測・減災モデルの構築とiRICへの実装

京都大学 防災研究所

北海道大学大学院 工学研究院

富山大学 学術研究部

竹 林 洋 史

岩 崎 理 樹

木 村 一 郎



# 浮体混在型河川災害の予測・減災モデルの構築とiRICへの実装

## Modeling of flows with floating bodies for mitigating disasters and its implementation in iRIC

木村 一郎<sup>1</sup>・竹林 洋史<sup>2</sup>・岩崎 理樹<sup>3</sup>

Ichiro KIMURA, Hiroshi TAKEBAYASHI and Toshiki IWASAKI

<sup>1</sup>富山大学 学術研究部都市デザイン学系 教授

<sup>2</sup>京都大学 防災研究所 准教授

<sup>3</sup>北海道大学大学院 工学研究院 准教授

### 要 旨

近年の河川災害は、河川水・土砂二相流の枠組を超越し、流木、家屋、車両等の流出、およびそれらの氾濫水への油混入等、浮体を含む事例が急激に増加し、河川災害の物理機構は複雑化しつつある。本研究は災害予測・減災に資する浮体混在型河川流モデルを新規構築しiRICに実装することを目的とする。このため、河川流を浮体相と流体相に分け、浮体相には流木、家屋、油の三つを想定し、流体相には水とともに、状況によっては土砂も含めてモデル化を実施する。本研究は全体的な研究期間を三年間に設定し、本年はその二年目にあたる。このため、昨年度の研究成果をベースに、より実現象に即したモデルへの機能向上を行うとともに、実河川や既往実験と同条件でモデルと適用することで、その妥当性を示した。以下、1では、2018年7月の西日本豪雨時に広島市安芸区矢野東で発生した洪水氾濫現象において多くの自動車が流送された現象を取り上げ、現地調査及びiRICを用いた氾濫流の数値シミュレーションを実施する。2では六角川における油漏洩事故を対象に、いくつかのモデルパラメータや計算スキームを比較することで、再現計算モデルの性能を支配する要因について検討する。3では、流木災害減災対策の一つであるバイパス型捕捉工について、3次元流況流木モデルを用いたシミュレーションを実施し、捕捉工周辺の流況や流木挙動に及ぼす水路形状や計算条件の影響を検討する。

《キーワード：iRIC；流木；土石流；氾濫；油流出；車両流出》

## 1. 急勾配道路上の氾濫流と自動車の流下（担当：竹林洋史）

### (1) 概要

道路は障害物が少ないため、宅地に洪水流が氾濫した場合は氾濫水の流下経路となる。特に、土砂や流木などにより橋梁断面で河道が閉塞すると、河道内の水の多くが氾濫するため、道路上を流れる流量が多くなる。山地域で豪雨が発生すると道路に土砂が流れ込むことが多い。そのため、山地域での道路への洪水氾濫は、道路が急勾配であるため流速が速く、さらに土砂の混入のため道路上の自動車は平地よりも流送されやすくなる。本研究では、2018年7月の西日本豪雨時に広島市安芸区矢野東で発生した洪水氾濫現象によって多くの自動車が流送された現象を対象として、現地調査及びiRICを用いた氾濫流の数値シミュレーションを実施し、急勾配道路上の洪水氾濫特性と自動車の流下特性について検討する。

### (2) 広島市安芸区矢野東で発生した洪水氾濫の概要

図1に示すように、対象地域は広島市安芸区から広島県安芸郡熊野町を結ぶ山越え道路である県道34号線の山間地部に位置しており、県道の横には矢野川が東から西に流れている。道路・河川周辺の斜面では多くの斜面崩壊と土石流が発生し、道路および河川に水と土砂と流木が流れ混んだ。河川に流れ込んだ土砂と流木は河道を閉塞させ、道路および宅地に氾濫した。また、発災時には県道34号線に多くの自動車が存在していた。道路の勾配が7度前後と急勾配となっており、道路上の多くの自動車が氾濫流によって流された。

### (3) 広島市安芸区矢野東の現地調査

図2東側の溪流から発生し、矢野川に流れ込んだ土石流の流れを示す。土石流は宅地内で二方向に分岐し、真っ直ぐ進んだ土石流は崖下の工場を通して矢野川に流れ込んだと思われる。図3に氾濫域上流の河道閉塞の様子を示す。図3で示した地点の東部の梅河団地で大規模な土石流が複数回発生しており、梅河団地から多くの土砂と流木が河道内に急激に流れ込んだ。そのため、橋梁部において土砂と流木が堆積し、河道閉塞が発生した。図4に河道閉塞下流域の河道の様子を示す。図4は下流に向かって撮影

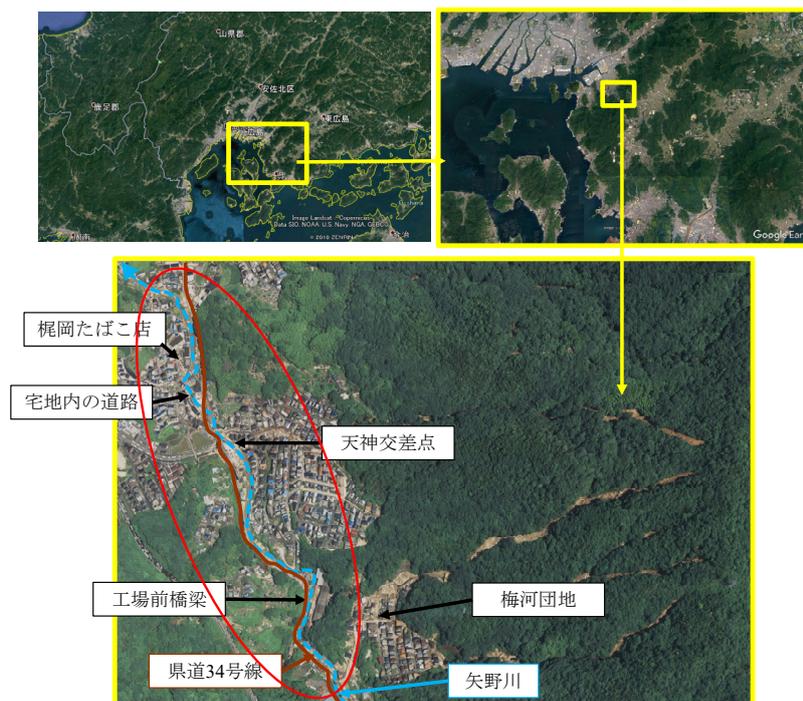


図1 広島市安芸区矢野東の場所



図2 東側の溪流から発生した土石流の流れ



図3 氾濫域上流の河道閉塞



図4 河道閉塞下流域の河道



図5 県道34号線上の被災した自動車



図6 天神交差点まで流された自動車



図7 天神交差点对岸の河岸浸食



図8 天神交差点付近の橋梁



図9 天神交差点下流域



図10 県道34号線と西に分岐している宅地内の道路との分岐点と氾濫流の流れ



図11 県道35号線から西の宅地内へ分岐した道路上を流れる氾濫流



図12 梶岡たばこ店の防犯カメラによって撮影された自動車の流出の様子<sup>1)</sup>

された写真である。図4より、すぐ下流の橋梁には全く土砂や流木が堆積していないことがわかる。また、河岸を見ると、河床から約1.5mの場所に植生が無傷で存在していることがわかる。これは、直上流の橋梁部で河道が閉塞したため、上流からの水と土砂と流木の多くはすぐ横に位置する県道34号線の流れ下り、河道内には洪水流があまり流れていなかったことを示している。

図5に河道閉塞が発生した橋梁から約400m下流の県道34号線上の被災した自動車の様子を示す。また、図6は河道閉塞が発生した橋梁から約800m下流の天神交差点まで流された自動車の様子を示す。被災当時、県道34号線は渋滞しており、道路上に自動車が並んでいた。そこに、水と土砂と流木の氾濫流が道路を流れることによって下流に流されたようである。

図7に天神交差点付近まで流れた道路上の氾濫流の一部は、天神交差点の約50m上流で矢野川に左岸側から戻っている。そのため、矢野川に戻ってきた流れが対岸である右岸に衝突し、右岸が大きく浸食されている。

図8に天神交差点付近の橋梁の様子を示す。図9に天神交差点下流の様子を示す。矢野川に戻ってきた氾濫流によって運ばれた土砂と流木が橋梁に引っかかり、橋梁断面の2/3を閉塞していることがわかる。そのため、矢野川に戻ってきた流れが橋梁を迂回して再度氾濫し、下流域の氾濫を助長したようである。

図10に天神交差点から北に約50mの地点で県道34号線と西に分岐している宅地内の道路との分岐点と氾濫流の流れを示す。また、図11に西に分岐している宅地内の道路上を氾濫流が流れる様子を示す。図に示すように、県道34号線を流れてきた氾濫流は、分岐点で西の宅地内の道路に流れこむとともに、河道内には水がほとんど流れていないことがわかる。図12に西に分岐している宅地内の道路に面している梶岡たばこ店の防犯カメラによって撮影された自動車の流出の様子である。また、図9にはその分岐点が表示されており、写真の右側が県道34号線である。分岐点の県道34号線側には土砂や流木が堆積している。さらに、県道34号線と西に分岐している宅地内の道路との分岐点の道路の勾配は、宅地内の道路の方が県道34号線よりも急である。これらのことにより、県道34号線を南から流れて来た氾濫流や自動車は、宅地内の道路との分岐点で宅地内の道路に流れ込んだと考えられる。

#### (4) 広島市安芸区矢野東の氾濫流の数値シミュレーション

梅河団地西の工場前の橋梁で河道閉塞が発生したとし、橋梁左岸側の道路から氾濫した水が下流域に流れる様子を数値シミュレーションによって再現し、その流動特性を検討する。

##### 1) 基礎方程式

流れの計算は、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる<sup>2)</sup>。水の質量保存則は以下のようである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hV}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $t$ は時間、 $z$ は水位である。水深は $h$ 、 $U$ と $V$ は $\xi$ と $\eta$ 方向における水の反変速度成分であり、以下のように定義される。

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \quad (2)$$

$$V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (3)$$

ここに、 $u$ と $v$ は $x$ と $y$ 方向における水の流速成分である。

表面流の運動量保存則は以下のようである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{hU}{J} \right) \\ & - \frac{hu}{J} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right) \\ & - \frac{hv}{J} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right) \\ & = -gh \left( \frac{1}{J} \left( \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho J} \\ & + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{yx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{yx}) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{yy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{yy}) \end{aligned} \quad (4)$$



図13 解析領域

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{hV}{J} \right) \\
& - \frac{hu}{J} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) \\
& - \frac{hv}{J} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + U \right) \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + V \right) \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right) \\
& = -gh \left( \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho J} \\
& + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{yx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{yx}) \\
& + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{yy}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{yy})
\end{aligned} \tag{5}$$

ここに、 $g$ は重力、 $\rho$ は水の密度。  $\tau_{b\xi}$  と  $\tau_{b\eta}$  は  $\xi$  と  $\eta$  方向における表面流の反変掃流力成分であり、以下のように定義される。

$$\tau_{b\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \tau_{by} \tag{6}$$

$$\tau_{b\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \tau_{by} \tag{7}$$

ここに、 $\tau_x$  と  $\tau_y$  は  $x$  と  $y$  方向における表面流の掃流力成分であり、以下のものである。

$$\tau_x = \tau_b \frac{u_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \tag{8}$$

$$\tau_y = \tau_b \frac{v_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \quad (9)$$

$$\frac{\tau_b}{\rho} = u_*^2 \quad (10)$$

$$u_*^2 = \frac{n_m^2 g}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) \quad (11)$$

ここに、 $u_*$ は摩擦速度、 $n_m$ はManningの粗度係数、 $R$ は径深である。 $u_b$ と $v_b$ は $x$ と $y$ 方向の河床近傍流速である。河床近傍の流速は、水深平均流の流線の曲率より、以下のように求められる。

$$u_b = u_{bs} \cos \alpha_s - v_{bs} \sin \alpha_s \quad (12)$$

$$v_b = u_{bs} \sin \alpha_s + v_{bs} \cos \alpha_s \quad (13)$$

$$u_{bs} = 8.5u_* \quad (14)$$

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (15)$$

ここに、 $\alpha_s = \arctan(v/u)$ であり、 $N_*$ は7.0である<sup>3)</sup>。 $r$ は流線の曲率であり、以下の関係より求められる<sup>4)</sup>。

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left( u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (16)$$

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yx}$ 等は、乱流応力であり、以下の関係から求めている。

$$\sigma_{xx} = 2v \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} k_t \quad (17)$$

$$\sigma_{yy} = 2v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} k_t \quad (18)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = v \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (19)$$

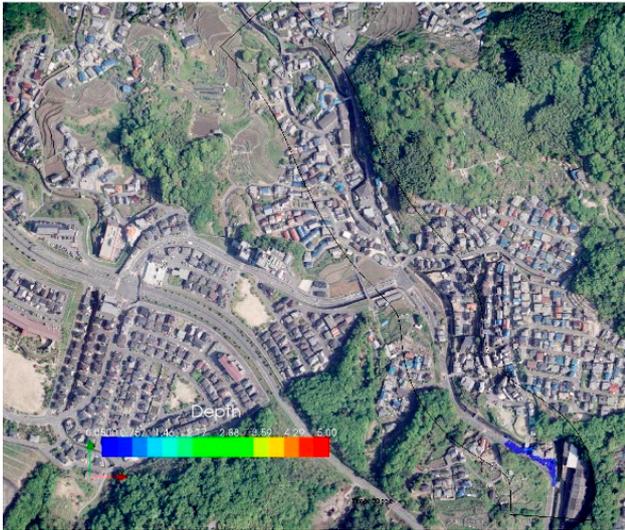
$$v = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (20)$$

$$k_t = 2.07 u_*^2 \quad (21)$$

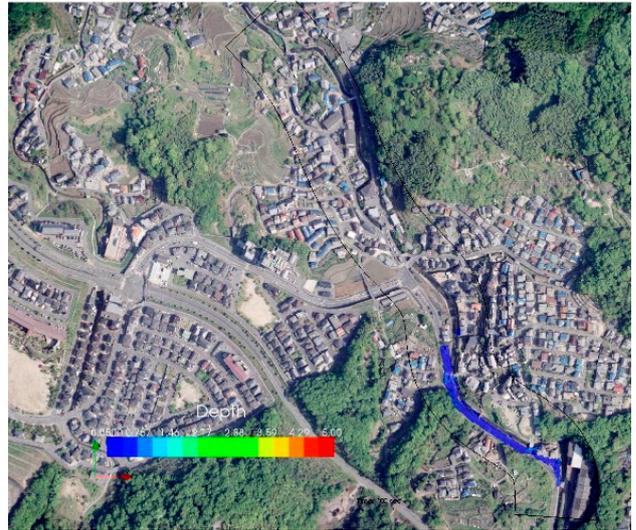
ここに、 $v$ は渦動粘性係数、 $\kappa$ はKarman 常数、 $k_t$ は水深平均された乱れエネルギーである<sup>5)</sup>。

## 2) 解析条件

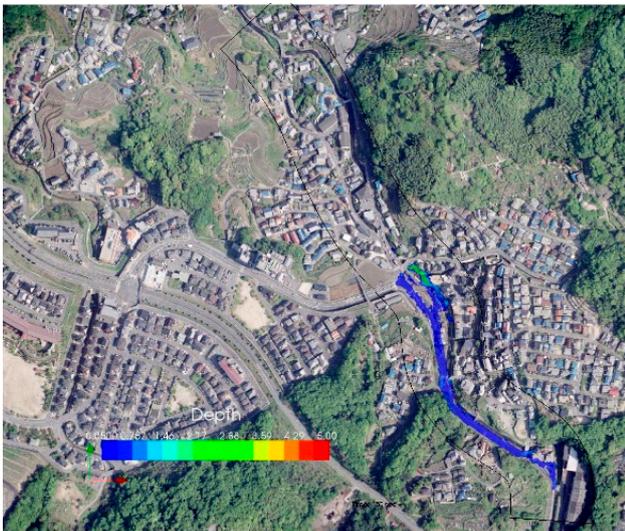
図13に解析領域を示す。解析領域は、梅河団地西の工場前の橋梁から約800mの区間であり、県道34号線から西の宅地に分岐する道路が県道34号線に再度合流する地点周辺が下流端である。解析格子の平均サイズは2m×2mである。地盤データは国土地理院がHPで公開している5m解像度のDEMデータを用いている。ただし、5m解像度のDEMデータでは道路の形状が適切に反映されないため、航空写真と現地調査結果を用いて、地盤データを補正した。また、図5に示すように、天神交差点よりも上流域は、道路と矢野川の間には高さ20cm程度の歩道がある。そのため、堤防の高さを道路よりも20cm高くした。



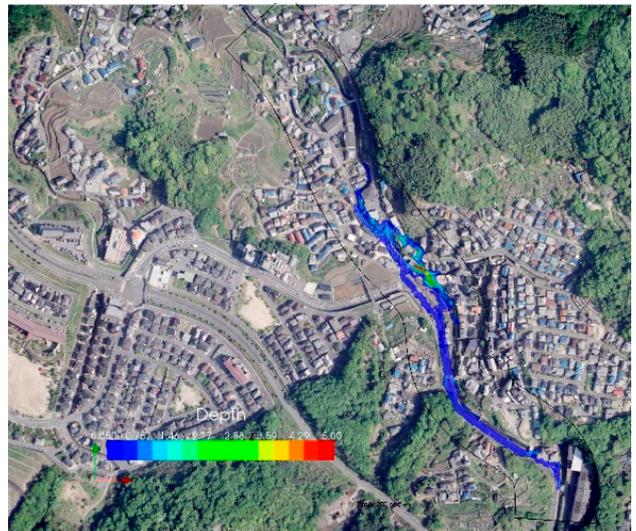
(a) 50秒後



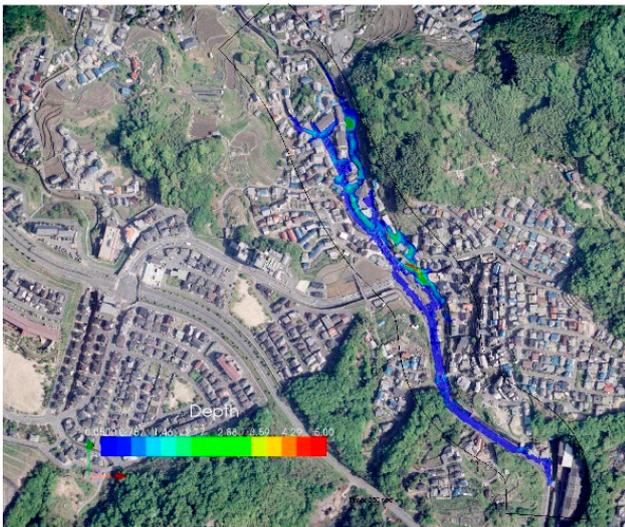
(b) 100秒後



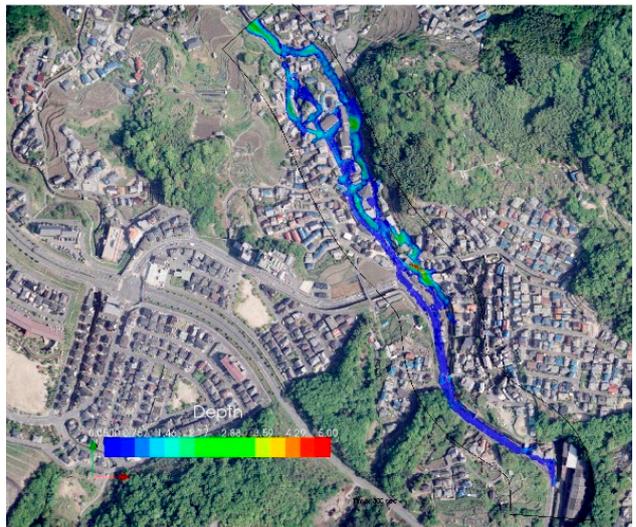
(c) 150秒後



(d) 200秒後



(e) 250秒後



(e) 300秒後

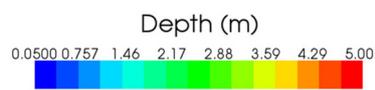


図14 水深の時間変化

家屋などの建物は、高さ10mの不透過構造物として考慮している。上流からの給水地点は梅河団地西の工場前の橋梁左岸側の道路とし、 $2\text{m}^3/\text{s}$ を定常的に与えた。

### 3) 解析結果

図14に水深の時空間的な変化を示す。給水開始から100秒後では道路上のみを流れており、すぐ横を流れる矢野川に水が流れ込んでいないことがわかる。これは、道路と矢野川の間にある20cmの高さの歩道を考慮したためである。なお、歩道と矢野川にはフェンスも設置されており、フェンスにも多くの流木やゴミが引っかかっていた。これらによっても水が道路から矢野川に戻るのを抑制していたと考えられる。150秒後では、道路の流れの一部が天神交差点から約50m上流で矢野川に戻っており、現地調査の結果と一致していることがわかる。なお、本解析では、図8に示す天神交差点付近の橋梁からの迂回流を再現するため、天神交差点付近の橋梁は閉塞していると仮定している。200秒後を見ると、天神交差点を通過した流れと橋梁から迂回して流れた水が合流した流れは、県道34号線と西の宅地に通じる道路の分岐点において県道にはほとんど流れず、西の宅地に通じる道路とその東の矢野川に流れていることがわかる。これは、前述の通り、県道34号線と西に分岐している宅地内の道路との分岐点の道路の勾配は、宅地内の道路の方が県道34号線よりも急であることが大きな原因である。

### (5) 結論

2018年7月の西日本豪雨時に広島市安芸区矢野東で発生した洪水氾濫現象によって多くの自動車が流送された現象を対象として、現地調査及びiRICを用いた氾濫流の数値シミュレーションを実施し、急勾配道路上の洪水氾濫特性と自動車の流下特性について検討した。得られた成果をまとめると以下のようである。

1. 梅河団地で大規模な土石流が複数回発生しており、梅河団地から多くの土砂と流木が河道内に急激に流れ込み、工場前の橋梁部において土砂と流木が堆積し、河道閉塞が発生した。その結果、県道34号線に水と土砂と流木が流れ込み、渋滞のため県道上に並んでいた多くの自動車を下流に流送した。
2. 県道34号線に氾濫した流れの一部は、天神交差点の約50m上流で矢野川に戻っているが、天神交差点付近の橋梁に土砂と流木が堆積して河積が1/3まで減少し、迂回流として再度氾濫した。
3. 県道34号線と西の宅地に繋がる道路との交差点では、道路の勾配が西の宅地に繋がる道路の方が急であるため、氾濫流や自動車は宅地に繋がる道路に流れた。

### 参考文献

- 1) 梶岡たばこ店撮影。
- 2) 竹林洋史：河川中・下流域の河道地形，ながれ，第24巻，第1号，pp. 27-36，2005。
- 3) Engelund, F. Flow and bed topography in channel bends. Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 4) Shimizu, Y. and Itakura, T. Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48, 1991.
- 5) Nezu, I. and Nakagawa, H. Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 53-56, 1993.

## 2. 氾濫流による油移動拡散問題に対する検討（担当：岩崎理樹）

### （1）概要

近年の集中豪雨の増加に伴い、外水・内水氾濫が増加しており、氾濫原におけるリスクが高まっている。従来、河川管理上の課題は、氾濫の発生をどのように防ぐか、また氾濫が発生した場合を見越した対策としてのハザードマップ作成や避難に関する検討などが実施されている。一方、高度に利用された氾濫原に氾濫が生じると、浸水以外の被害が生じる。そのようなもののひとつとして、氾濫流に伴う有害物質の漏洩、及びその移動拡散がある。このような有害物質が広範囲に移動した場合、浸水以外に加えた二次的被害が生じる。そのため、このような被害を少なくするうえでは、漏洩対策はもちろんのこと、氾濫原における有害物質漏洩可能性について検討し、氾濫流による移動拡散範囲などを事前に見積もっておくことも工学的に重要と考えられる。

上記のような問題の一例として、2019年九州佐賀豪雨の際に発生した六角川近傍での油流出事故を挙げることができる。この事例では、時間100mmを超える雨量が六角川流域に2時間にわたって降ることにより、大規模な内水氾濫を引き起こし、六角川沿いに位置していた鉄工所で使用されていたクエンチオイルが流出し、近傍の環境に大きな被害を引き起こした。環境中に拡散した油は広い範囲に長期的な悪影響を及ぼすため<sup>1)</sup>、氾濫流によって油がどのように移動拡散が発生しているのかを理解することは、漏洩事故が発生した際の対処方法やその後の環境評価を行う上で有用な知見を与えると考えられる。

このような油拡散問題は、古くより海洋分野において数多く検討されてきた<sup>2,3)</sup>。これは、タンカー等の船舶からの油漏洩事故などが環境へどのような影響を与えるかを把握するためであると考えられ、これを予測するようなモデルも数多く開発されてきた。一方で、このようなモデルを河川や氾濫流に適用する際には、いくつかの注意が必要と考えられる。その一つとして、油自身が持つ拡散作用である油拡散機構<sup>4)</sup>をあげることができる。油は、水よりも軽い場合が多く、水面に浮かんでいるが、浮力によって流れや乱流の作用がなくとも拡散していくことが知られている。この拡散作用については、時間スケールによって3段階に分けられることが知られている。これは、海洋のように比較的長い時間スケールで油の拡散を考えなければいけない場合は重要になると考えられる一方で、河川や氾濫流では、基本的に流れによる移流が強く、現象についても比較的短時間で進むために、このような拡散作用がどのような影響を持っているかは明らかではない。陸域における油移動拡散モデルは、海洋におけるモデルと比較して、ここ20年本質的な進化をなしていない<sup>5,6)</sup>のは、このように陸域における油輸送過程において、どのような要素が重要となるかに関して検討が進んでいないためと考えられる。しかしながら、陸域で漏洩した油は我々の生活圏に影響しやすく、むしろ海洋よりも大きなインパクトを持つために<sup>7)</sup>、これらについても解析可能なモデルを開発することは工学的に重要な課題といえる。

そこで本研究では、昨年度に再現計算を試みた六角川における油漏洩事故についていくつかのモデルパラメータや計算スキームを比較することで、再現計算モデルの性能とどのような要素が重要となるかについて基礎的知見を得ることを目的としている。

### （2）手法

#### a) 計算モデル

本研究で用いる氾濫モデルは、iRICに同封されているソルバーであるNays2D Floodである。このモデルは、非定常二次元浅水流方程式により氾濫流の挙動を計算している。底面の抵抗則には、Manning則を用い、乱流モデルについては、ゼロ方程式モデルを用いている。

この氾濫モデルから得られる流れ場を利用することで油の輸送について計算する。油の移流拡散モデルについては、数多くのモデルが提案されているが、ここでは、Tkalic et al.<sup>3)</sup>を参考に、Euler型の油輸送方程式を採用した。式(1)に直交座標系における輸送方程式を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_x h}{\partial x} + \frac{\partial u_y h}{\partial y} = Q_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで、 $h$ ：水表面の油厚さ、 $u_x, u_y$ ：油輸送速度、 $D$ ：拡散係数、 $Q_0$ ：単位時間単位面積あたりに流出する油量である。上式が単なるスカラー量の移流拡散方程式と異なるのは、拡散係数の見積もりにある。油輸送の場合は、前述のように油の浮力に起因する油拡散<sup>4)</sup>を考慮する必要があり、この拡散作用と、用いている乱流モデルから得られる乱流拡散係数の和をもって、拡散係数 $D$ を以下のように評価する。

$$D = \frac{gh^2\rho_0(\rho_w - \rho_0)}{\rho_w f} + \frac{\kappa}{6} u_* h_s \quad (2)$$

ここに、 $g$ ：重力加速度、 $\rho_w$ ：水の密度、 $\rho_0$ ：油の密度、 $f$ ：水と油の摩擦に関する係数、 $\kappa$ ：カルマン定数、 $u_*$ ：摩擦速度、 $h_s$ ：水深である。

このように、海洋における油移動拡散問題を解決するために適用された上式では、油拡散が重要な役割を担っていると考えられるが、ここで問題としている氾濫流による油の移動拡散問題についてどの程度重要かよくわかっていない。そこで、本研究では、この油拡散が数値計算結果に与える影響について簡単な検討を行う。この式に含まれるパラメータ $f$ は、油-水間の摩擦に起因したパラメータであるが、現象に応じてチューニングする余地のあるものであることが知られている。ここでは、この $f$ について感度分析的に変化させた検討を行い、結果にどのような影響を及ぼすかについて議論する。

さらに、このような拡散に関する検討を行う際は、移流項の離散に伴う数値拡散は極力小さくすることが望ましいのは言うまでもない。そこで、ここでは、Weighted Essentially Non-Oscillatory (WENO)スキームを適用する。ここでは、3次、5次精度WENOスキームを比較して、その性能について検討した。このスキームには様々な種類が存在するが、ここでは以下のようにする。例えば以下の移流方程式を有限体積法で計算することを考える。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_x h}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

スタガード格子で離散化すると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x} = 0 \quad F = u_x h \quad (4)$$

となるが、このフラックスをどのように求めるかが問題となる。ここでは、格子境界におけるスカラー量 $h_{i+1/2}$ を求める際に、WENOスキームを用いる。3次精度WENOスキームの場合、

$$(e_1, e_2, e_3) = \begin{cases} (f_{i-1}, f_i, f_{i+1}) & u_{xi+1/2} > 0 \\ (f_{i+2}, f_{i+1}, f_i) & u_{xi+1/2} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

とし、以下のように $h_{i+1/2}$ を求める。

$$\beta_0 = (e_2 - e_1)^2, \quad \beta_1 = (e_3 - e_2)^2 \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{3(\delta + \beta_0)^2}, \quad \alpha_1 = \frac{2}{3(\delta + \beta_0)^2}, \quad \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \quad (7)$$

$$\Omega_0 = \frac{\alpha_0}{\alpha}, \quad \Omega_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha} \quad (8)$$

$$W_0 = \frac{1}{2}(-e_1 + 3e_2), \quad W_1 = \frac{1}{2}(e_2 + e_3) \quad (9)$$

$$h_{i+\frac{1}{2}} = \Omega_0 W_0 + \Omega_1 W_1 \quad (10)$$

ここで、 $\delta$ はゼロによる除算防止のための微小な値であり、ここでは $10^{-6}$ とする。  
5次精度WENOの場合は、

$$(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = \begin{cases} (f_{i-2}, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, f_{i+2}) & u_{xi+1/2} > 0 \\ (f_{i+3}, f_{i+2}, f_{i+1}, f_i, f_{i-1}) & u_{xi+1/2} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

として、以下のように求める。

$$\beta_0 = \frac{13}{12}(e_1 - 2e_2 + e_3)^2 + \frac{1}{4}(e_1 - 4e_2 + 3e_3)^2 \quad (12)$$

$$\beta_1 = \frac{13}{12}(e_2 - 2e_3 + e_4)^2 + \frac{1}{4}(e_2 - 4e_3 + 3e_4)^2 \quad (13)$$

$$\beta_2 = \frac{13}{12}(e_3 - 2e_4 + e_5)^2 + \frac{1}{4}(3e_3 - 4e_4 + e_5)^2 \quad (14)$$

$$\alpha_0 = \frac{d_0}{(\delta + \beta_0)^2}, \quad \alpha_1 = \frac{d_1}{(\delta + \beta_1)^2}, \quad \alpha_2 = \frac{d_2}{(\delta + \beta_2)^2}, \quad \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 \quad (15)$$

$$\Omega_0 = \frac{\alpha_0}{\alpha}, \quad \Omega_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha}, \quad \Omega_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha} \quad (16)$$

$$W_0 = \frac{1}{6}(2e_1 - 7e_2 + 11e_3), \quad W_1 = \frac{1}{6}(-e_2 + 5e_3 + 2e_4), \quad W_2 = \frac{1}{6}(2e_3 + 5e_4 - e_5) \quad (17)$$

$$h_{i+\frac{1}{2}} = \Omega_0 W_0 + \Omega_1 W_1 + \Omega_2 W_2 \quad (18)$$

ここに、 $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ はそれぞれ0.1, 0.6, 0.3である。

## b) 計算条件

ここで計算対象とするのは、2019年佐賀豪雨時に発生した六角川における油漏洩事象とする。本イベントについては、昨年度でも対象としているため、詳細については割愛し、ここで設定している計算条件を中心に述べる。

まず、計算領域については図-1a) に示すように油流出が起きた鉄工所を含み、油が拡散した範囲、並びに内水氾濫の要因となった降雨一流出一氾濫過程を再現できるように設定し、計算格子については $5\text{m} \times 5\text{m}$ となるような正方形格子を作成した。図-1b) には、鉄工所周辺域を示している。地形データについては、国土地理院標高タイルの基盤地図情報数値標高モデルのうち、平野部はDEM5B、山地部はDEM10Bを用いて、初期地形を作成しているが、このデータには、鉄工所、及びその周辺にある建物の標高データが含まれていないため、図-1b) に示すようにこれらは別途構造物として設定している。また、DEMデータで表現しきれない細かな水路については、カルバートを設置することにより、小さい水路が連続している状況を模擬している。計算には雨量を与えることとし、図-1a) に示す領域全体に図-2 に示す近傍の雨量観測点である南溪観測所の雨量を空間的に一様に与えている。ただし、地中への浸透

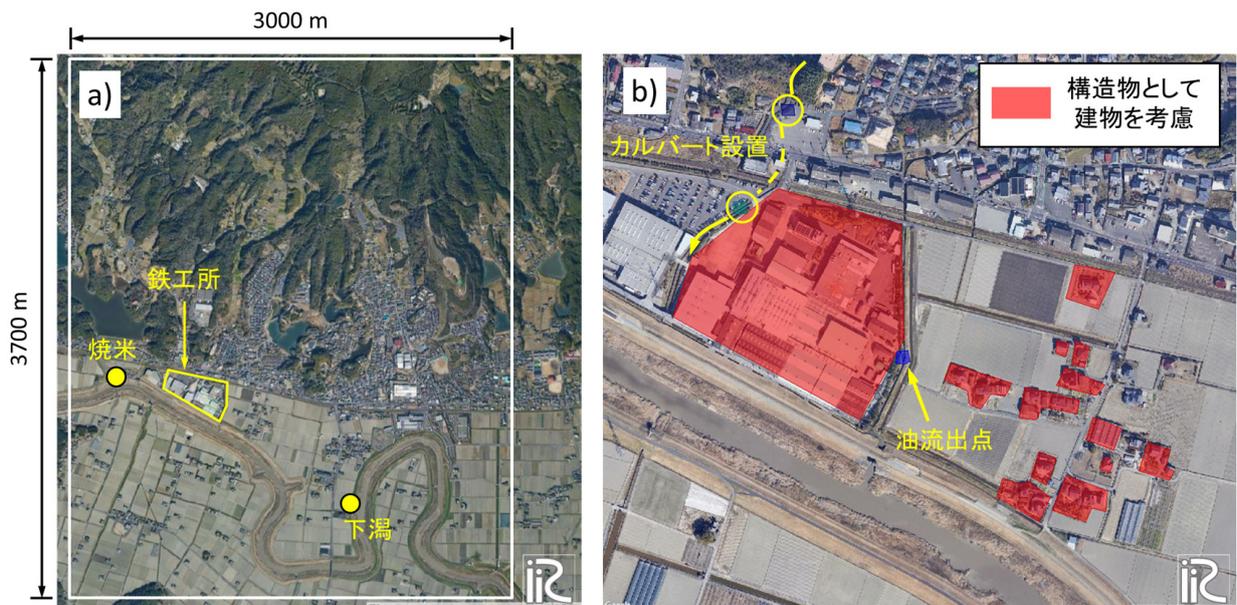


図-1 計算対象領域. a) 計算領域, b) 鉄工所周辺における計算条件設定.

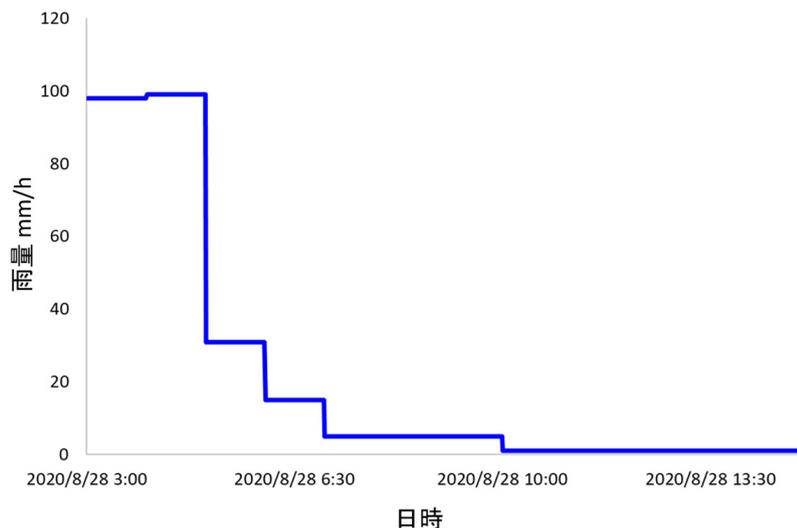


図-2 計算に使用した南溪観測所における雨量

については考慮していない。なお、図-1a) に示す下湯では28日11時40分ごろまで $7.5\text{m}^3/\text{s}$ を最大出力とするポンプ排水が行われており、計算にもこの排水の影響を考慮している。

油に関する計算条件については、以下のように決定した。鉄工所従業員の証言によれば、28日午前4時頃には工場内に鉄砲水が流れ込むことで工場内部が浸水し、午前5時頃には、鉄を冷却する油（クエンチオイル）が流出を開始している。外部への油の流出量は5.4万リットルにも達し、この流出した油は鉄工所の東と南東方向に少なくとも1kmの広範囲にわたって流出、下流に位置する住宅地や病院にまで流れ込み、田畑の汚染や居住困難など甚大な被害を発生させる国内では例を見ない最大規模の油流出事故となった。このような事実を踏まえ、図-1b) に示すように鉄工所近傍に油流出点を設定し、報告されている油の総流出量 $54\text{m}^3$ が、8月28日午前5時～7時までに一定で流出するように調整した。

この条件を基本として、計算スキーム、及び油の拡散効果に関する検討を行う。まず、計算スキームの比較として、3次精度と5次精度WENOスキームの計算結果の比較を行い、数値拡散が与える影響について検討を行う。次に、油拡散の効果について、キャリブレーションパラメータである水-油間の摩擦

パラメータ $f$ を変化させた計算を行う。上記検討では, Tkulich et al.<sup>3)</sup>と同様に $0.01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ として与えるが, 計算モデルの感度分析を行うために, このパラメータを極端に小さく $0.0001 \text{ kg/m}^2\text{s}$ とした計算を行い, 結果を比較する。さらに, 油拡散と乱流拡散について全く考慮しない計算も併せて実施した。なお, これらの感度分析においては, 計算スキームについては5次精度WENOスキームで統一した。

### 3. 計算結果

流れの計算結果については, 前報で既に示し, ある程度現地に即したものとなっていることを確認しているため割愛し, ここでは油の移流拡散に関する結果のみについて述べる。

図-3に3次精度及び5次精度WENOスキームにより計算された油移動拡散の時間変化について示す。どちらの図においても油は氾濫流に輸送されることで南東(図における右下方向)に移流するとともに拡散している。この結果については, 定性的には現地における様子を表現しているといえる。両者の計算結果を比較すると, 3次精度WENOによる結果のほうがわずかに拡散範囲が広く, かつ油厚さについて平滑化された結果になっているが, それほど大きな差ではないと考えられる。本計算は, 既報よりも計算格子サイズを半分にしており, この程度の空間解像度であれば, これらのスキームから生じる数値拡散はそれほど大きくないことがわかる。

次に, 水-油間摩擦パラメータ $f = 0.0001 \text{ kg/m}^2\text{s}$ と上記計算よりも $1/100$ にした結果を図-4に示す。これは, 式(2)から明らかなように油拡散としては100倍大きな効果を想定していることになる。しかしながら, 図-4における比較から明らかなようにこの影響は極めて小さい。すなわち, これら計算において油が拡散しているのは, 時空間的に変化する流れによって移流される分散効果によって生じており, 油自身が持つ拡散作用である油拡散の影響は極めて小さいと考えることができる。海洋においてこの作用が一般に重要であるのは, 流出後比較的長い時間をかけて拡散してくためであると考えられる一方で, 氾濫流による油の移流拡散現象においては, 海洋よりも流れの変化が強い氾濫流による輸送効果が極めて強いいため, これによる分散が油拡散よりも極めて大きくなったものと考えられる。また, 図-5に乱流拡散と油拡散を考慮しない結果についても示しているが, これらの結果とも図-5の結果はほぼ違いがなく, 拡散の影響は極めて小さいことがわかる。貯留型の氾濫形態である六角川の拡散現象では, 乱流拡散作用も小さく, このような結果となった可能性がある。

このように, 本モデルにより評価された油自身が持つ油拡散の効果は極めて小さいが, これはモデルが持つ特性である可能性もある。井上ら<sup>8)</sup>は, 本研究で対象とした六角川における油拡散現象において, ラグランジュ型の油移流拡散モデルを用いて解析を行っており, 油が移動する過程については氾濫流の影響が大きいものの, 時間の経過とともに油が空間的に拡散する作用は, 油拡散の影響も重要であることを示唆している。彼らの計算モデルは, 粒子を用いたモデルであるため, オイラー型モデルで常に問題となる移流項の差分スキームに起因する数値拡散の影響がなく, さらに格子幅の影響も受けないために, 純粋な油拡散の影響を評価しやすい。一方で, 本研究で用いたオイラー型のモデルは, 数値拡散だけでなく, 格子サイズ内の現象は平均化されて表現されるために, 油厚さの二乗で計算される油拡散の要素を過小評価している可能性もある。ここで用いた計算格子は $5\text{m}$ であり, このような氾濫現象を計算するうえでは十分な空間解像度であることを考えると, 油特有の拡散作用について正しく評価するためには, ラグランジュ型のモデルのほうが適しているということが言える。

### 4. まとめ

本研究では, 内水氾濫のような陸域の流れによって移動拡散する油を数値シミュレーションにより計算する手法について, 主として海洋において開発されてきたモデルを適用し, その中で油特有の拡散作用である油拡散の効果について検討した。併せて, 物理的な拡散を表現するために極力数値拡散の少な

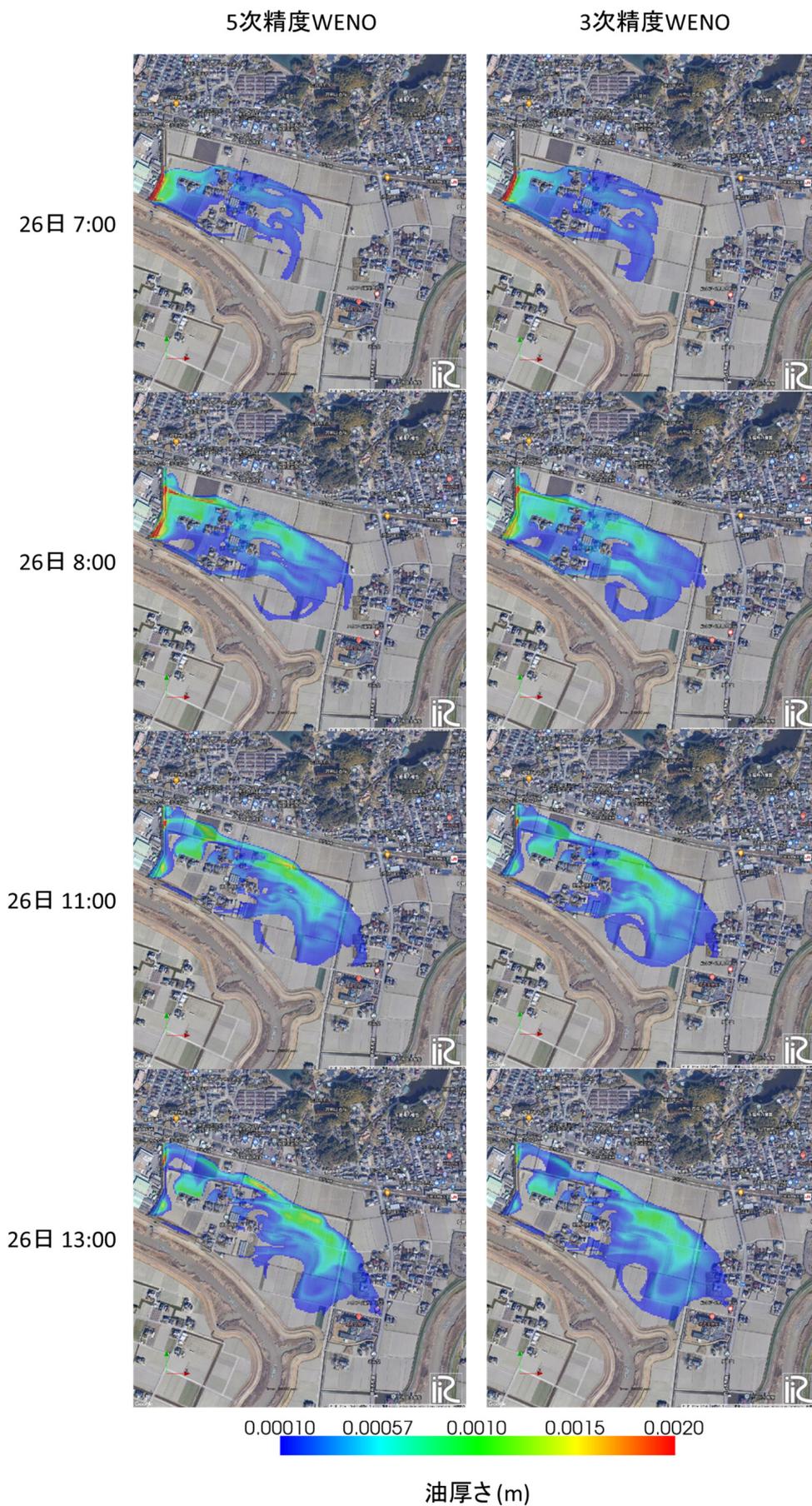


図-3 油拡散に関する計算結果. 計算スキームの影響.

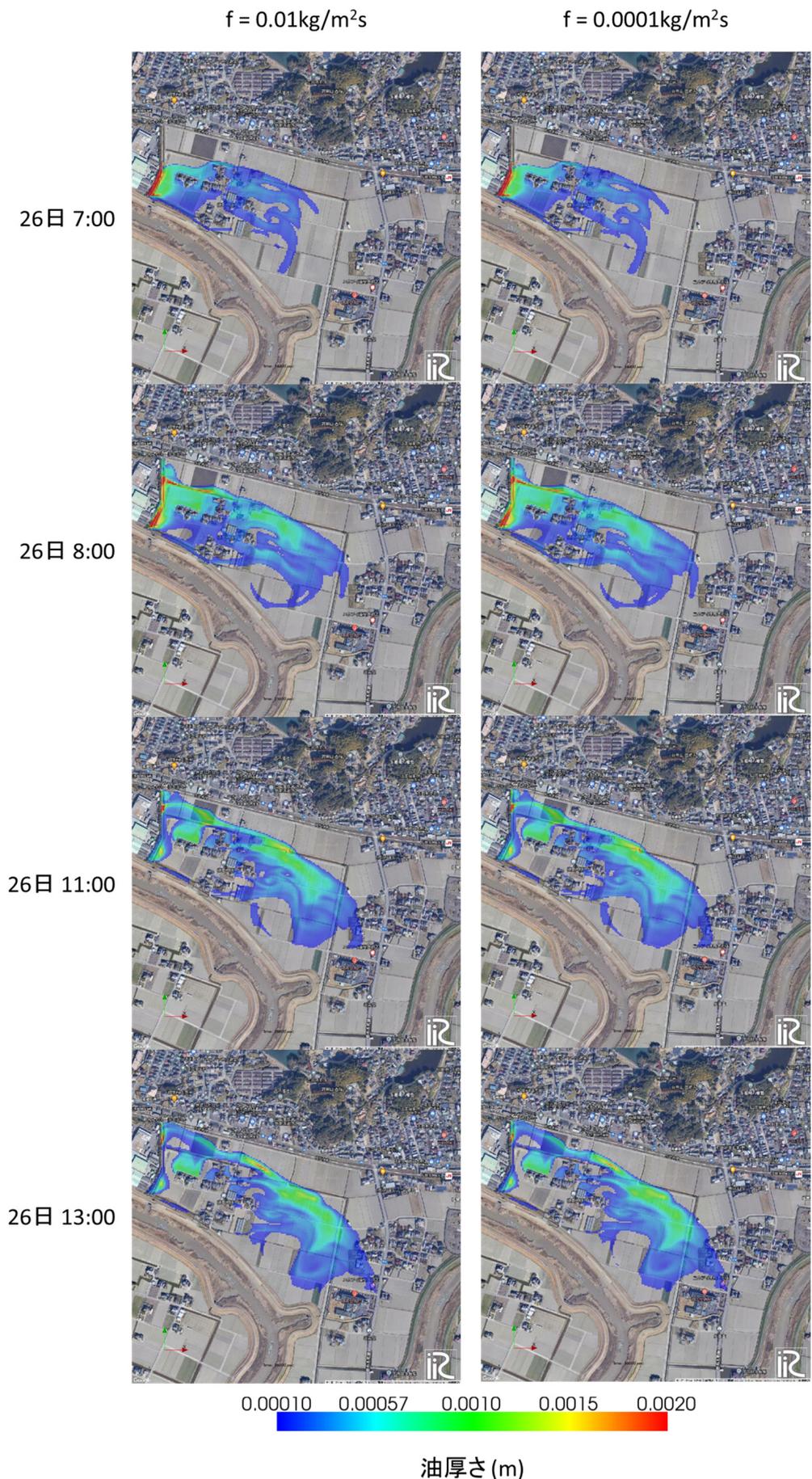


図-4 油拡散に関する計算結果. 水-油間摩擦パラメータ $f$ の影響.

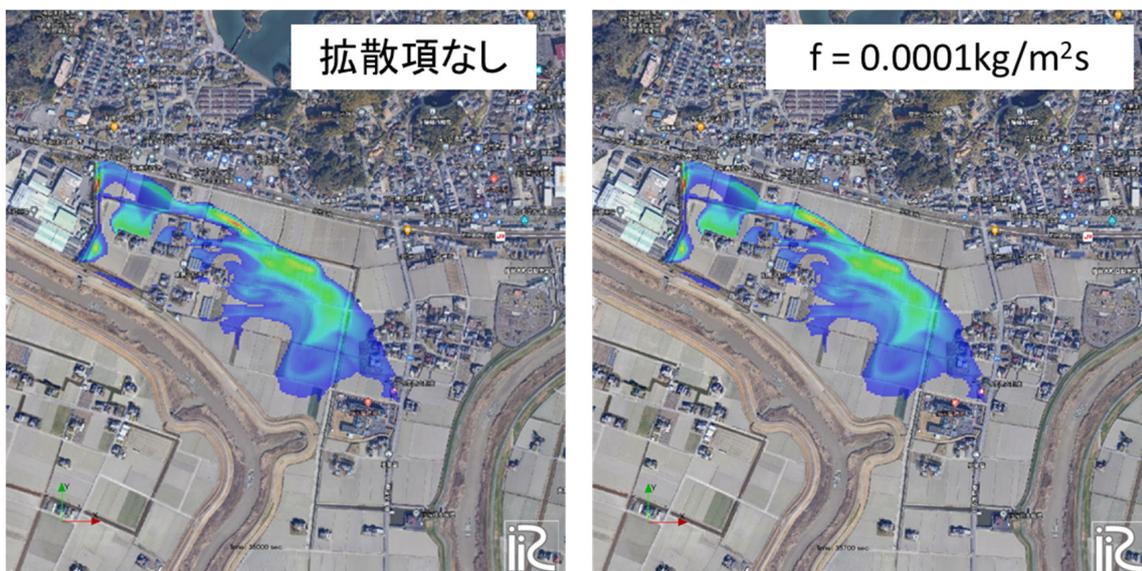


図-5 計算結果に与える油拡散の影響

いスキームであるWENO法を適用した検討も併せて実施し、2019年佐賀豪雨時に発生した六角川流域における油漏洩現象について再現計算を実施した。

得られた結果より、油自身を持つ拡散作用は本現象において極めて小さい影響しか持たないことが示唆された。これは、海洋よりも流れの変化が強い氾濫流による輸送効果が極めて強いため、これによる分散効果が油拡散よりも極めて大きくなったものと考えられる。ただし、ここで得られた結論は、本研究で用いたオイラー型のモデルから示唆されたものであり、格子スケールや数値拡散の影響を含んだものであることに注意が必要である。これらの影響についてより検討するためには、数値拡散や格子解像度の影響が小さいラグランジュ型モデルによる結果との比較が重要と考えられる。さらに、本検討では、油拡散の影響は小さいという結論だが、海洋における油拡散モデルでは考慮されていないモデルを構築することも、氾濫流による油輸送過程の再現性を向上させる要因となりえる。例えば水面勾配の影響や、浮遊土砂への油の吸着、及びそれによる油—土砂粒子の結合と輸送過程<sup>9,10</sup>など、河川・氾濫流により輸送される油の挙動には大きく影響することが考えられる。これらについては、今後解決されるべき課題であると考えている。

#### 参考文献

- 1) Kingston, P.F.: Long-term environmental impact of oil spills, Spill, Science & Technology Bulletin, vol.7, pp.53-61, 2001.
- 2) 松崎義孝, 藤田勇: 海水面における流出油の拡散・移流に関する数値計算法の開発と油流出事故の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.1, pp.15-30, 2014.
- 3) Tkalich, P., Huda, M.D.K. and Gin, K.Y.H.: A multiphase oil spill model, Journal of Hydraulic Research, Vol.41, pp.115-125, 2002.
- 4) Fay, J.A.: The spread of oil on a Calm Sea, Plenum Press, pp.53-64, 1969.
- 5) Yapa, P.D. and Tao Shen, H.: Modelling river oil spills: a review, Journal of Hydraulic Research, Vol.32, pp.765-782, 1994.
- 6) Kvočka, D., Zagar, D. and Banovec, P.: A review of river oil spill modeling, Water, Vol.13, 1620, 2021.
- 7) Jeznach, L.C., Mohan, A., Tobiason, J.E. and Reckhow, D.A.: Modeling Crude Oil Fate and Transport in Freshwater, Environmental Modeling & Assessment, Vol.26, pp. 77-87, 2021.

- 8) 井上卓也, 旭一岳, 岩崎慎介, 清水康行: 内水氾濫による流出油の移流拡散に関する数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), 第76巻, pp.I\_667-I\_672, 2020.
- 9) Zhu, Z., Waterman, D.M. and Garcia, M.H.: Modeling the transport of oil-particle aggregates resulting from an oil spill in a freshwater environment, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol.18, pp.967-984, 2018.
- 10) Wang, S., Yang, Y., Zhu, Z., Jin, L. and Ou, S.: Riverine deposition pattern of oil-particle aggregates considering the coagulation effect, *Science of the Total Environment*, 739, 2020.

### 3. バイパス型流木捕捉工周辺の流木挙動に関するモデリングと考察（担当：木村一郎）

#### (1) 本章の目的と概要

近年増加傾向にある流木災害の防災・減災のためには、河道を流れる流木の量を減らすことが直接的な対策として重要となる。これに対する方策は、次の2つに大別される。

- ①流木の発生そのものを抑制すること
- ②河道内の流木を補足・除去すること

最初の項目については、流木の発生源となるのは山地の森林や、河岸林であることを考えると、森林の適切な管理や、河岸浸食の抑制などが功を奏すると考えられる。しかしながら、発生源は広範な地域に及ぶため、その対策には巨額の費用や長い時間が必要となる。一方、第二の項目については、ピンポイント的な施設である程度の効果があるものと予想され、また、あらかじめ被害の予想される地域の近傍に設けるなどの方策も可能であることから、より現実的で、直接的な効果が期待できそうである。

本研究では、このような河道中を流送される流木を効率的に捕捉し、停止させ、除去するための河川施設を三次元数値シミュレーションモデルを用いて検討するものである。このために、既存のiRICの三次元ソルバーNaysCUBEに必要な改良を加えるとともに、このソルバーを用いて、流木捕捉工の捕捉率に及ぼす影響因子の解明や、効率的な捕捉を可能とする捕捉工の形状、水理条件等について考察する。



図1 橋脚による流木捕捉の例（2008年8月 額平川貫気別橋<sup>1)</sup>）

#### (2) 流木捕捉工

##### a) 流木捕捉工の考え方

河道の流木を補足する施設を検討する場合、現状の河道における流木の捕捉・停止の現状を知ることが、捕捉施設を適切に設計する上での参考となると考えられる。実河川における災害時などの流木の停止状況をみると、橋脚への捕捉、河岸林への捕捉、砂州上への堆積・停止、側岸の凹部（入り江状の地形）やバイパス状の水路への侵入・停止などの形態があることがこれまでの研究で報告されている。このうち、橋脚での流木捕捉は流木捕捉をスリット状の構造物で行う場合と類似の挙動を示しているとい

える(図1)。これらのさまざまな流木捕捉形態を、河川流になるべく影響を及ぼさない形で人工的に作ってやることができれば、自然の営力を生かした流木捕捉工の創造が可能になると考えられる。

#### b) バイパス型(ワンド型)流木捕捉工

以上のような考えにもとづき、Schmocker and Weitbrecht (2013)<sup>2)</sup>は、流木を捕捉する方法として、蛇行水路の外側にバイパス水路(入り江状の領域)を設けて、流木をそこに誘導し、スリットで捕捉する工法を提案している(図2)<sup>2)</sup>。図3は、これをさらに模式的な平面図に描きなおしたものである。このような捕捉施設は、河道を閉塞して流水を阻害することなく流木を除去できる画期的な工法と考えられる。図2、3では、バイパス水路はいずれも河川湾曲部の外岸側に設けられている。これは、湾曲部に流送されてきた流木の慣性力(湾曲部の場合これが遠心力として流木を外岸側に押しやる力として働く)を有効に使って効率的に流木を外岸側の補足域に誘導することを想定したものと考えられる。このようなバイパス型の流木捕捉工の我が国における事例の一つとして、岩手県小本川の捕捉工が上げられる(図4)。加藤ら<sup>3)</sup>はこの捕捉工について、大規模な模型実験を行い、効率的な捕捉工の形態を提案している。一方、木村ら(2021)<sup>4)</sup>やKimura et al. (2021)<sup>5)</sup>は、加藤らの実験結果を三次元シミュレーションモデルであるiRICのNaysCUBEで再現計算を実施し、流木挙動の基本的特性を再現することに成功するとともに、流木挙動が流木密度、河床粗度係数、乱流モデルの3つの要素に大きく依存することなどを示している。

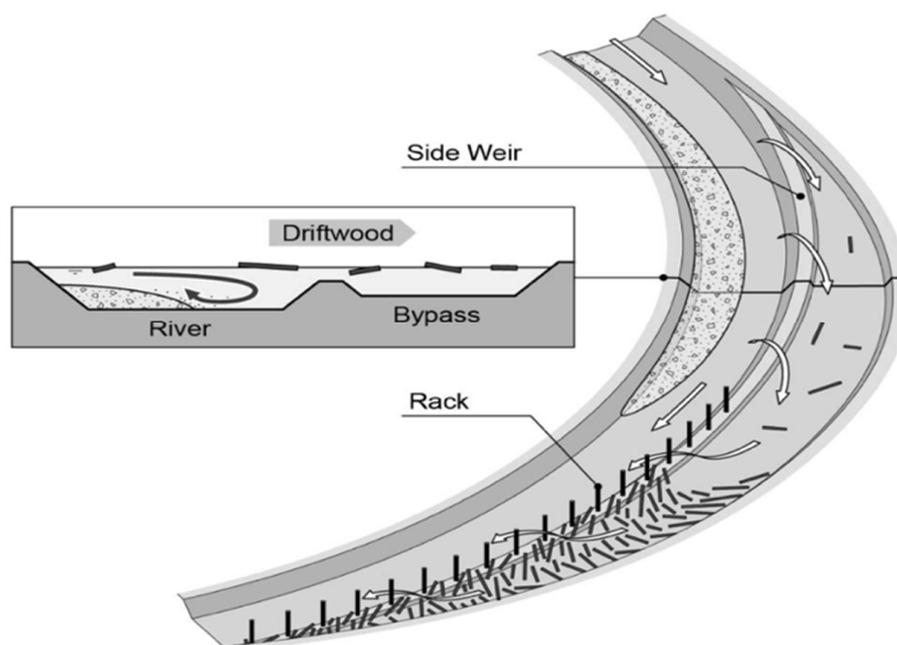


図2 バイパス型流木捕捉工法の概念図<sup>2)</sup>

一方、河道形状が直線の場合については、流木運動に伴う慣性力(遠心力)利用できないため、捕捉域にいかにか流木を誘導するかが大きな問題となる。この点に注目し、岡本らは直線形状の実験水路の片側にワンド状の捕捉域を設けた水路により、詳細な模型実験を実施した<sup>6)</sup>(図5)。この結果、捕捉域の対岸に水制を設置することで、その流木刎ね効果により効率的に流木捕捉を行うことが可能でること、水制は下方が透過型のものであっても大きな捕捉効果が期待でること、流木を設けない場合は流木捕捉率が非常に小さくなることなどを示した。この研究は、ワンドと水制という既存の伝統的ともいえる河川構造物を組み合わせた捕捉施設である点が注目される。また、一般に、水制は河川の流水断面積を狭

小化し、水位を上昇させる可能性があるため、その設置にあたっては治水面に及ぼす悪影響を慎重に検討する必要がある、しかし、この研究では水面より下の部分を透過型とした水制を用いることで、流水への悪影響をかなり小さく抑えられる可能性がある点にも工夫がみられる画期的な提案といえる。

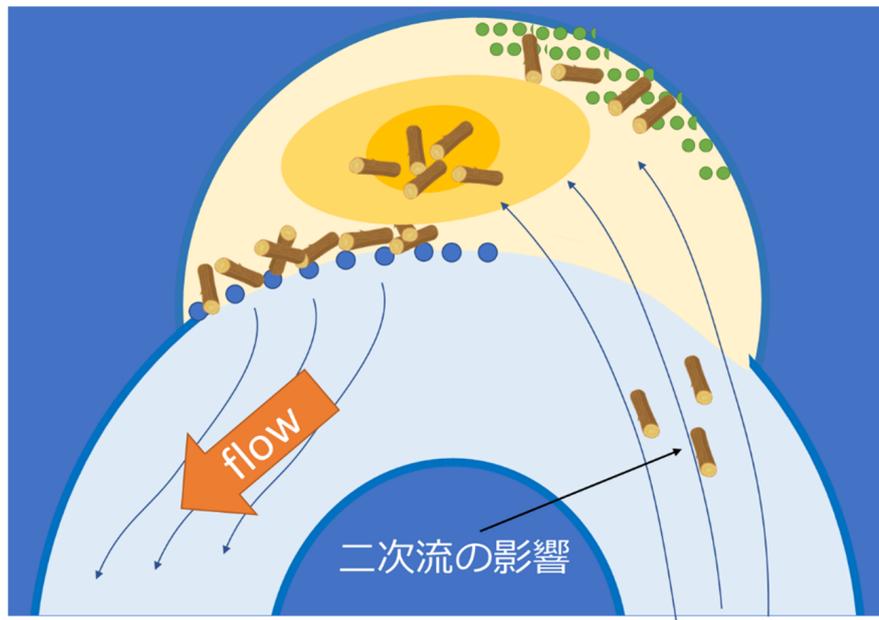


図3 バイパス型（ワンド型）流木捕捉工の概念図

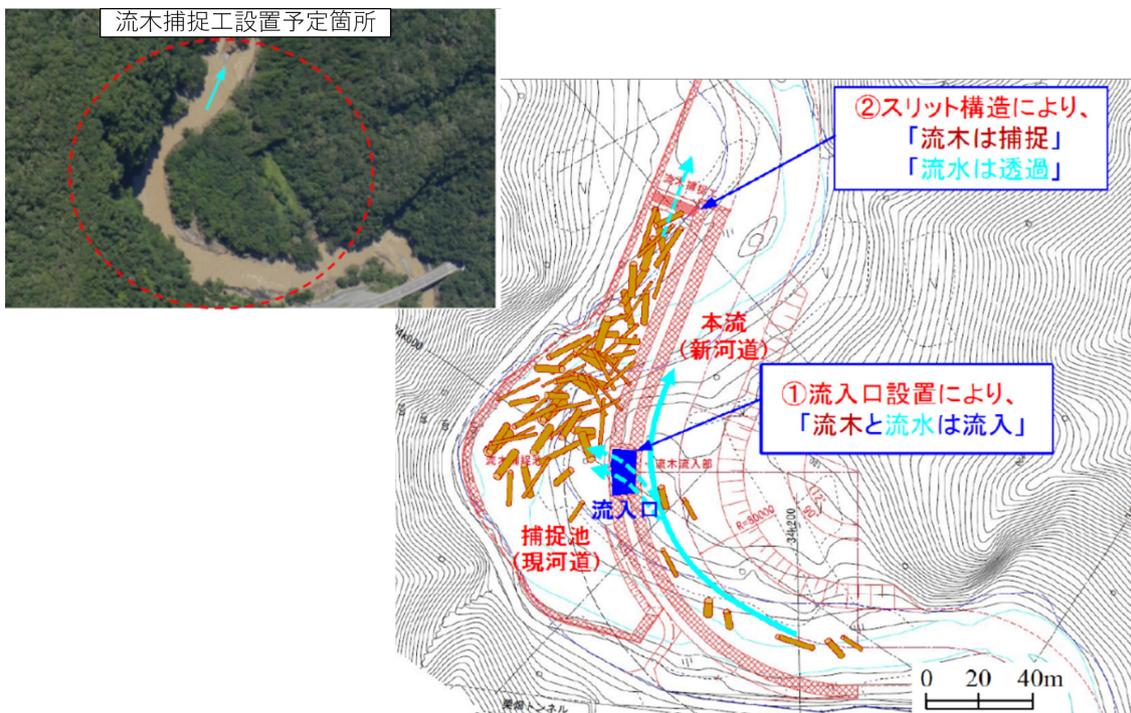


図4 我が国におけるバイパス型流木捕捉工の事例（岩手県小本川）<sup>3)</sup>

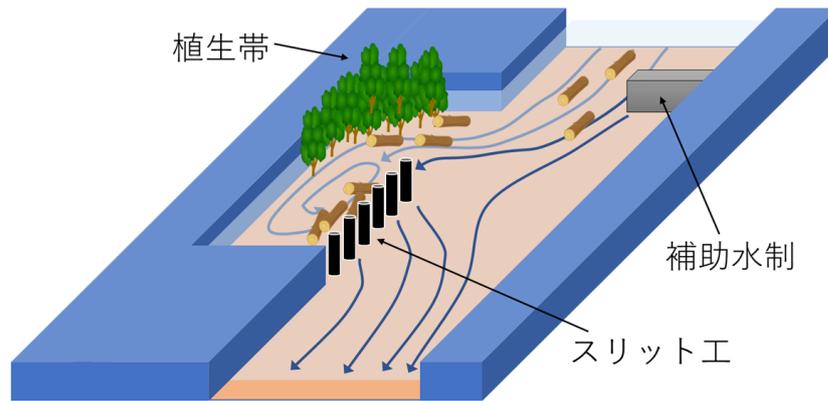


図5 直線河道に設けられたワンド型流木捕捉工と水制の役割の模式図

本研究では、この岡本らの実験結果をとりあげ、この実験を精度よく再現する数値シミュレーションモデルを構築するとともに、捕捉工周辺の流木捕捉挙動の基本特性やそれに及ぼす影響因子、最適な捕捉工の形状等について検討を実施する。

### (3) 検証に用いた岡本ら(2018)の実験条件

検証データとして採用した岡本ら(2018)の実験で用いられた実験水路は、全長1000cm、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型開水路(図6参照)<sup>6)</sup>である。この水路は、主流域の幅は20cm、モデル遊水域は幅6cm×長さ90cmである。遊水域開口部の下流側には流入した流木を捕捉するため、厚さ0.3cm、40cm×15cmのメッシュ板(1.5cm×1.5cmメッシュ)が設置されている。さらに、実河川で遊水域内への土砂流入を防ぐことを想定して、遊水域境界部には厚さ0.3cm、40cm×2cmの板(越流型堰)が設置されている。また、遊水域の対岸上流側には流木をアクティブに誘導するために、前述のように非越流型の水制模型が設置されている。

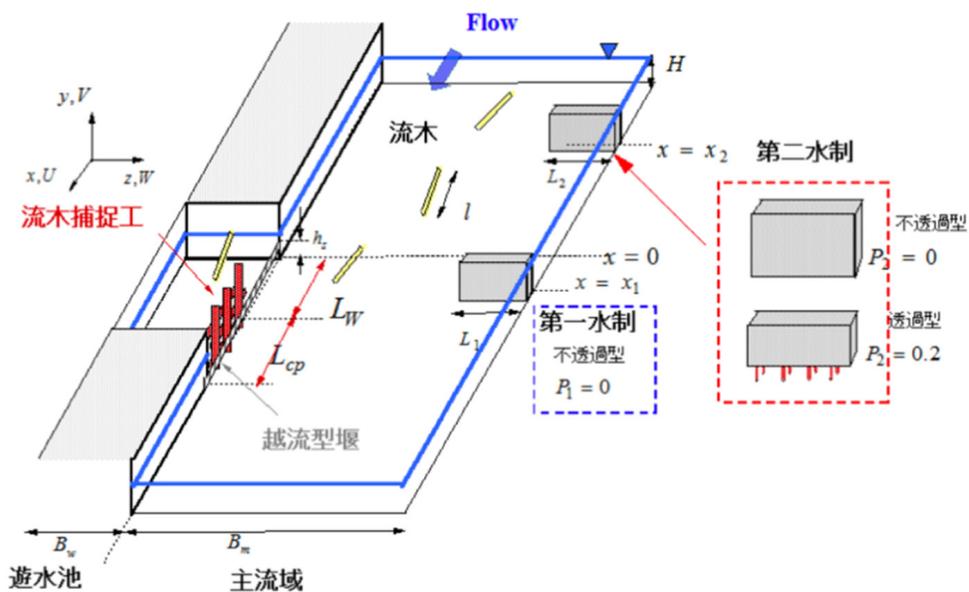


図6 岡本らの実験における水路の概要<sup>6)</sup>

岡本らの流木投入実験では、遊水域部の4m上流から流木模型を10本ずつまとめて横断方向に均等になるように投入した。着水時の給木方向はランダムとなる。これを10秒ごとに繰り返し行い、全100本

の流木が投入された。再現性を確認するため全100本の流木投入実験を3回行い、3回の実験の平均値で捕捉率が評価されている。流木模型としては、木製の円柱(直径6.0mm, 長さ6.0cm, 1/40スケール)が用いられ、その比重は0.6であった。対岸の水制の設置方法としては、遊水域対岸側に長さ3.8cmの不透過型の第一水制を越流部上流から流下方向位置15cmの位置に、透過型の第二水制を越流部上流から100cmの位置に設置した。実験の水力条件としては、水深10cm, 断面平均流速40cm/s, 流量0.08m<sup>3</sup>/sであった。

#### (4) 数値解析モデル

##### a) 液相のモデル

本研究で採用する3D-3D型流木数値解析モデルでは、河川流を三次元モデルで計算する。用いる三次元モデルの基礎となるベースモデルは、既往の研究<sup>4,5)</sup>と同様に、河川解析共通プラットフォームiRIC上で稼働する三次元ソルバー、NaysCUBE<sup>7)</sup>である。このソルバーでは、移動境界適合格子系上でレイノルズ平均されたナビエ・ストークス方程式と連続式を三次元的に解くもので、ベクトルおよびテンソルについては反変成分を基本変数として用い、スタガード格子上で変数配置を行っている。移流項の離散化には空間三次精度のTVD MUSCL法が、時間積分には二次アダムス・バッシュフォース法が、乱流モデルには非線形k-εモデルが採用された。水面移動については、境界適合法が採用されており、計算格子が上下方向に移動し、最上面の格子面が常に水面に位置するように移動することで水面移動を捕捉計算する。

今回使用した数値解析モデルでの流れの解析で用いる基礎式は、移動一般曲線座標系におけるレイノルズ平均された三次元流れの連続式、非定常運動方程式、さらに、乱流モデルの構成則とk, ε方程式から構成される。これらの基礎式は、流速ベクトルの反変成分を主変数とし、運動方程式の移流項には保存形表現を採用している。レイノルズ応力の構成則には二次非線形渦粘性型モデルを採用し、渦動粘性係数はk-εモデルにより与える。

この数値解析モデルで用いられている流れの移動一般曲線座標三次元基礎方程式の具体的記述は次のようになっている。まず、固定デカルト座標系における基礎方程式の表を示す。基礎方程式は連続式、運動方程式、k-方程式、ε-方程式から構成されている。連続式(デカルト座標系)は、

$$\frac{\partial U^i}{\partial x^i} = 0 \quad (1)$$

である。ここに、 $x^i$ : 空間座標,  $U_i$ : 流速を表している。次に、デカルト座標系の基礎式を、まず格子移動を含まない静止一般曲線座標系の基礎式に変換する。これにより、流速ベクトルの反変成分 $V^i$ に基づく計算空間の基礎式に変換される。流速ベクトルの物理直交成分 $U^i$ と計算空間における反変成分 $V^i$ とは変換公式により機械的に変換される。重力項やレイノルズ応力項にも同様の変換を施すと、各基礎式は次のような表記となる。連続式(一般曲線座標系)は、

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^\alpha \sqrt{g}}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (2)$$

である。ここに、 $\xi^i$ =一般曲線座標,  $V^i$ =流速ベクトルの反変成分,  $g$  = メトリックテンソルの行列式を表している。最後にこれらの式を移動一般曲線座標系に変換する。移動座標とするのは、水面変動や河床変動の影響を動的に考慮するためである。移動座標系に変換された基礎式は次のように示す。連続式(移動一般曲線座標系)は、

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^\alpha \sqrt{g}}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (3)$$

である。次に、運動方程式(移動一般曲線座標系)は、

$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[ -\overline{v^i v^j} \right] + 2\nu \nabla_j e^{ij} \quad (4)$$

である。ここに、 $W^i$ =格子移動速度の反変成分、 $p$ =圧力、 $\nu$ =動粘性係数、 $\rho$ =流体の密度、 $F^i$ =重力加速度の反変成分を表している。

なお、 $k$ 方程式、 $\varepsilon$ 方程式についても同様に移動一般曲線座標系のもとで定式化されるが、この詳細については省略する。

流木と河川流の相互作用について、本研究では流木が流れに及ぼす影響を考慮したTwo-way型のモデルを用いて評価している。この抗力係数 $C_D$ については、次のように粒子レイノルズ数 $Re_d$ の関数とした。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} + 0.4, & Re_d \geq 1000 \\ \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}), & Re_d < 1000 \end{cases} \quad (5)$$

$$\therefore Re_d = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_p| d}{\nu} \quad (6)$$

ここに、 $d$ : 流木構成要素球体直径、および、 $\nu$ : 動粘性係数である<sup>8)</sup>。この定式化では、抗力係数をレイノルズ数(球体直径を長さスケール、流れと球体速度の相対速度の大きさを流速スケールとする)の関数としている点に特徴がある。

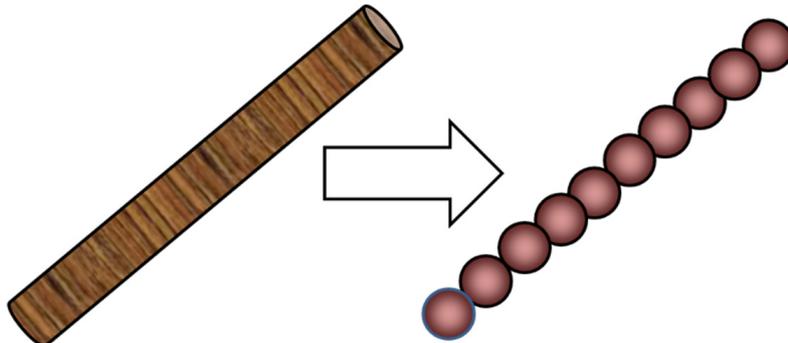


図7 流木を球体要素の列で表現するモデル

## b) 流木のモデル

### ①流木モデルの概要

本研究で用いる流木モデルは、清水ら<sup>9)</sup>にならう一本の流木を球体の接続で表現する(図7参照)。この手法は、越塚<sup>10)</sup>がMPS型粒子法において示した計算方法を二次元流木計算に応用した初田ら<sup>11)</sup>やKimura and Kitazono<sup>12)</sup>の方法と類似であり、これを三次元空間に拡張したものといえる。計算方法の詳細については既報<sup>13)</sup>を参照されたい。

### ②流木フェンスのモデル化

さらに、今回使用した数値解析モデルには、流木を補足するルリッド工や網場の役割を適切に再現するための新たに「流木フェンス」のモデル化を行った。この機能は、遊水域に捕捉された流木が主

水路に再び流れていかないために堰き止める機能である。この機能は、「網場」のような役割を果たす。これをフェンスの存在する対象セルに、「セル属性」として設定することにより、水の流れには影響を及ぼさずに固体物のみを堰き止めることが可能となる。図8に流木フェンスの設定の様子を示す。フェンスの高さは、底面からのセル数で設定する。非越流型の流木フェンスの場合は、ダイアログボックスから「Emerged Fence」を選択する。

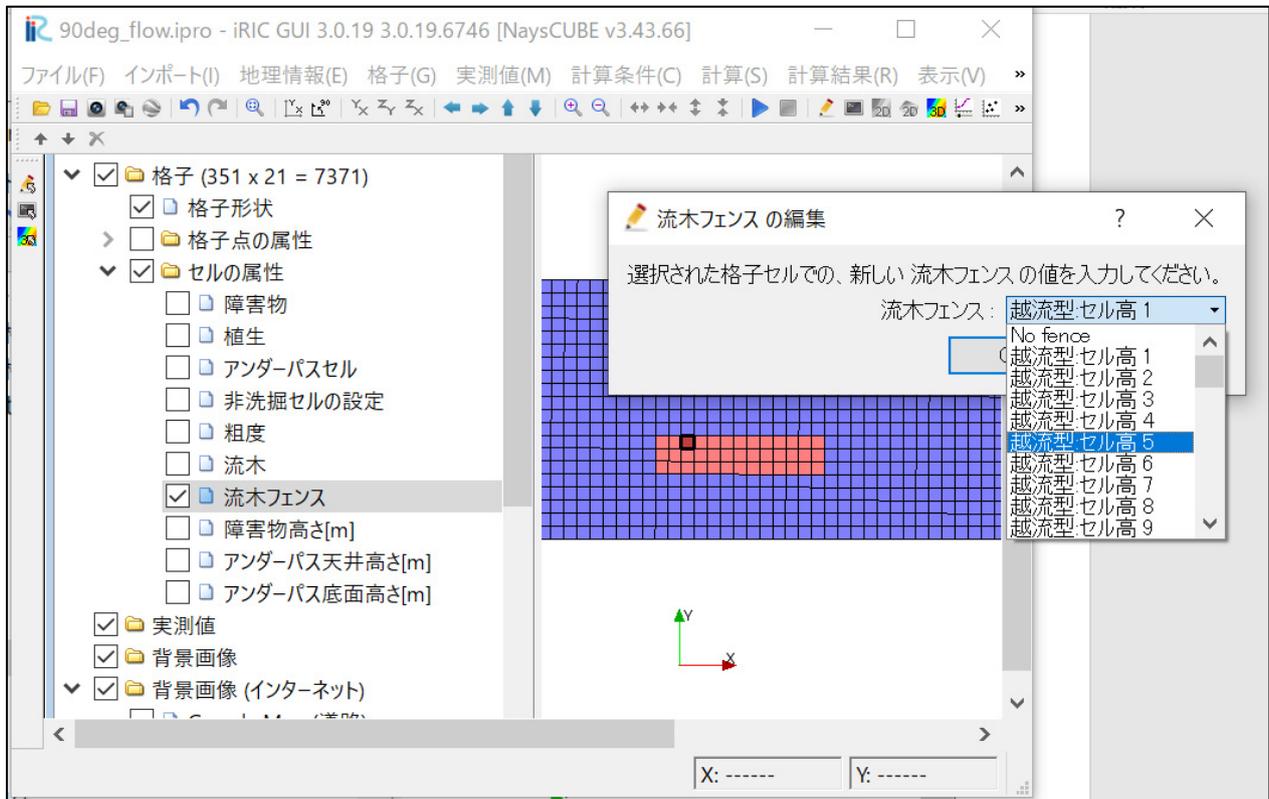


図8 流木フェンスの設定画面

### (5) 数値シミュレーション結果と考察

#### a) 数値解析による流れ場の再現性の検討

##### ① 横断流速コンター比較

今回行なった流れの計算結果と岡本らの実験における横断方向流速コンターの比較を図9に示す。図の範囲は、第一水制の下流から捕捉域中央付近までである。これを見ると、両者は定性的にある程度一致した結果となっている。計算結果、実験結果ともに第一水制以降の流速は共に右岸側に向いているが、遊水域への流入付近は、岡本らは右岸側の流速が多く含まれているが、今回の計算の方は、左岸側の流速が多く含まれている。この相違は、後述のように流木の捕捉率を計算結果では岡本らの実験よりも過小に評価していることに影響していると考えられる。今後、この部分の改善を行うことで、より精度の高い再現につなげることができ、流木捕捉システムの改善に企てることができると考えられる。

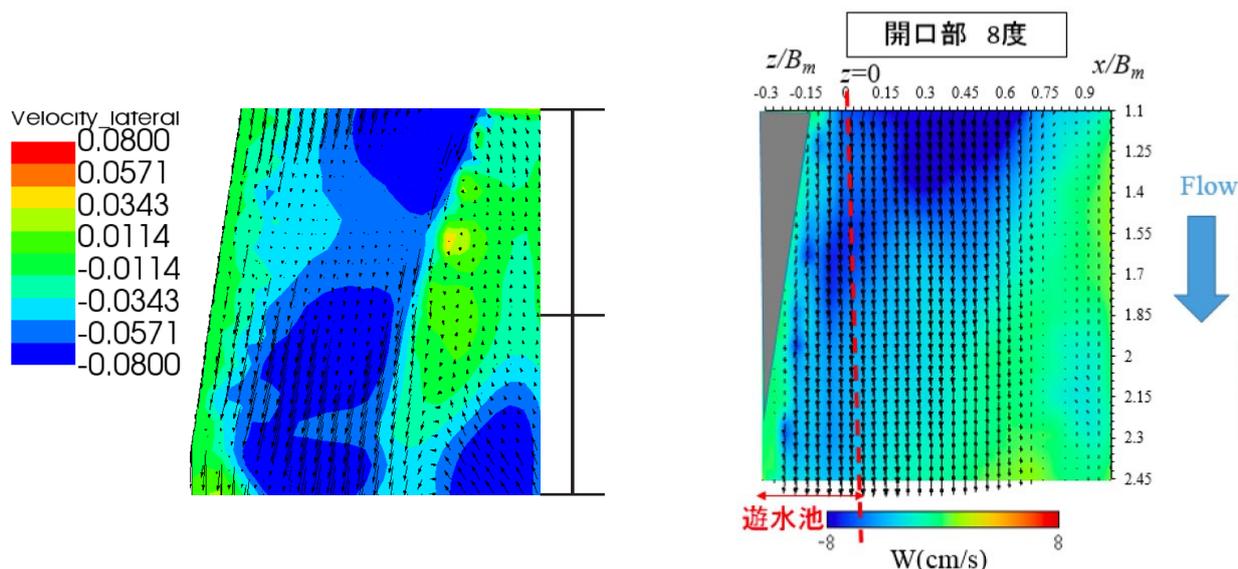


図9 横断方向流速コンター比較

②アスペクト比の影響

補足域のアスペクト比が流れ場に及ぼす影響を検討するため、複数のアスペクト比で計算を行う。今回使用する水路モデルは図10に示した。アスペクト比とは、遊水域幅：遊水域長の比率のことである。今回行った計算では、水路に水を流したときの流速、流速ベクトル、遊水域に流木を投入した時、制水の有無時に流木を上流側から投入した時の流木の流れ方についての影響を検討した。今回の使用する水路条件は表1に示した。



図10 使用した数値実験用水路の平面図

表1 アスペクト比を変化させたケースの数値実験の条件

水路	水路長(m)	水路幅(m)	遊水域長(m)	遊水域幅(m)	水位(m)	勾配
水路①	1.0	0.2	0.1	0.1	0.05	1/1000
水路②	1.0	0.2	0.2	0.1	0.05	1/1000
水路③	1.0	0.2	0.3	0.1	0.05	1/1000
水路④	1.0	0.2	0.5	0.1	0.05	1/1000

・流速・流速ベクトルへの影響

最初に、各水路に行って流量の水を流して、アスペクト比が、水路内の流速、流速ベクトルにどのような影響を与えているのかについて検討していく。今回の計算条件は表2に示した。計算結果として、4つの水路全てで、一度流れが安定してからは流速や流速ベクトルが安定して、大きな変化が生

じることがないことがわかった。アスペクト比の影響として、アスペクト比が大きいほど、流速が安定するまでに時間がかかり、安定してからの流速が大きくなる。計算開始後 50秒の時点での水路内の各横断地点での流速比較を図11に示した。水路①のみ、ワンド内の流速の落ち込みが急であるが、他の水路では、分布は比較的なだらかである。これは、アスペクト比が小さいケースでは、遊水域に水が流入してすぐに遊水域の下流側側面に衝突することが原因と考えられる。

表2 計算条件

流量(m <sup>3</sup> /s)	マンニング係数	CEL条件の係数
0.02	0.01	0.13

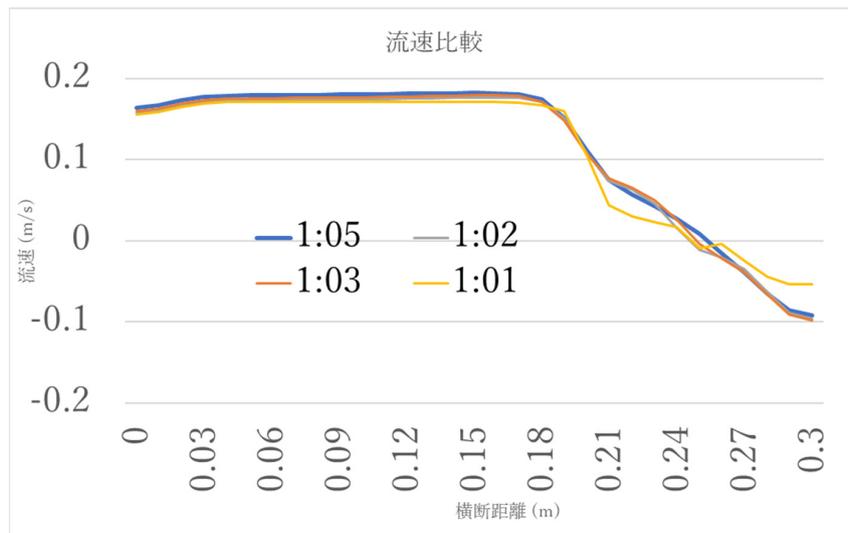


図11 50秒時点での各水路の横断地点での流速比較グラフ

・遊水域への流木投入計算

次に、水の流れが安定した各水路の遊水域の中央付近に流木を投入して、流木が遊水域内に留まる割合に対してアスペクト比がどのように影響しているかを検討する。今回の実験では、一つの条件で3回の計算を行い、その平均値を求めた。この数値実験で使用する計算条件は表2と同様である。一方、流木に関する条件は表3に示した。今回の計算では、流木同士の衝突は考慮せず（すなわち、1-wayモデル）に計算を行った。計算結果を表4に示す。この表によると、アスペクト比が大きいほど、遊水域から抜け出ていく流木の割合が大きいことがわかった。この理由としては、アスペクト比が小さいと、流木が出ていく前に遊水域内の側面に引っかかることで遊水域内に多くの流木が留まるが、アスペクト比が大きいと側面に引っかかることなく遊水域外に流されていく。水路①は、遊水域の幅、長さが共に10cmなので、10cmの長さの流木が投入することができなかつたので、今回の計算では結果無しとした。

表3 流木の条件

本数(本)	長さ(m)	直径(m)	密度(kg/m <sup>3</sup> )
32	0.10	0.01	900

表4 実験①流木投入計算結果

水路	一回目残留割合	二回目残留割合	三回目残留割合	平均三流割合
水路①				
水路②	21.9%(7本)	28.1%(9本)	25.0%(8本)	25.0%(5.7本)
水路③	28.1%(9本)	25.0%(8本)	21.9%(7本)	25.0%(8本)
水路④	9.4%(3本)	15.6%(5本)	12.5%(4本)	12.5%(4本)

b) 数値シミュレーション1：遊水域開口部の角度・水制の影響

①遊水域開口度について

岡本ら(2018)の研究は、遊水域の開口部の角度を90度と8度の2パターンを用いて、遊水域の形状が流木捕捉率にどのような影響を与えているのか考察されている。岡本らの研究では、開口部の角度90度のケースよりも8度のケースの方で流木捕捉率が大きくなった。その理由として、開口部の角度90度のケースよりも8度の方が遊水域の入り口が斜めになるので、内部に斜めに向かう流れが発生していることが影響していると考察されている。本研究でも、これに従って90度と8度の2パターンを用いて、数値シミュレーションを行う。

②遊水域開口部による水の流れ計算

本節での数値計算で使用するモデル水路の条件を表5に、数値計算の条件を表6に示した。今回の計算で使用する水路モデルの隅角部90度のケースの平面形状を図12に、隅角部8度のケースの平面形状を図13に示した。今回の水路に使用した計算格子は、水路の横断方向に1cmメッシュ×26個、水の流れ方向に1cmメッシュ×350個としている。遊水域の入り口には越流型堰を再現するために、越流構造物を長さ50cm、高さ2cmの範囲で設置した。

開口部角度が流れに及ぼす影響を検討するため、水制が無い場合について、水制が有無の条件での流れの計算結果を図14に示した。計算結果から、主流域内については、遊水域の開口度は流速に対して影響をあまり与えていないことがわかる。しかし、遊水域内の流速に対しては、影響がみられ、遊水域の開口部の角度90度のケースよりも8度のケースの方が、流速が小さい部分が広く分布していることがわかる。これは、遊水域内の水が側面に触れない部分の広さが影響していると推測される。

表5 水路条件

水路長(m)	水路幅(m)	遊水域長(m)	遊水域幅(m)	遊水域角度
3.50	0.20	0.90	0.06	90・8

表6 計算条件

流量(m <sup>3</sup> /s)	勾配	水位(m)	マンニング係数	CEL条件係数
0.008	1/1000	0.10	0.01	0.13

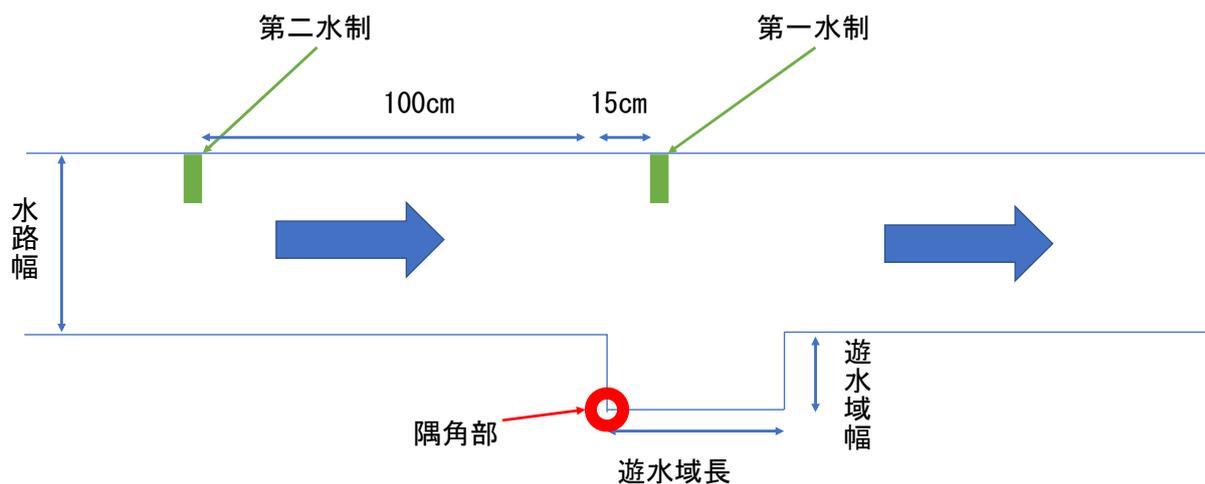


図12 使用する水路の平面図(90度)

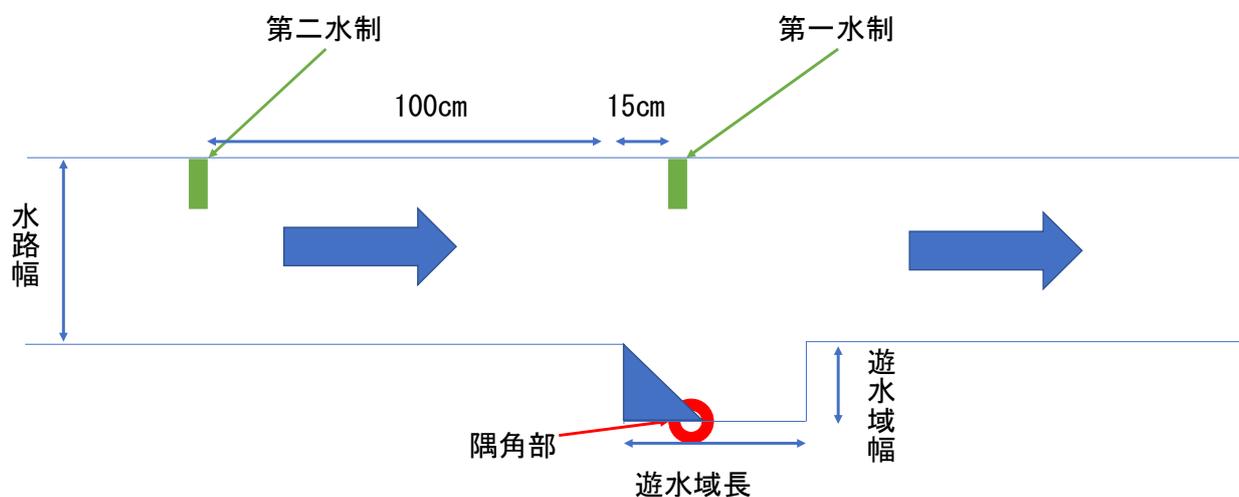


図13 使用する水路モデル(8度)

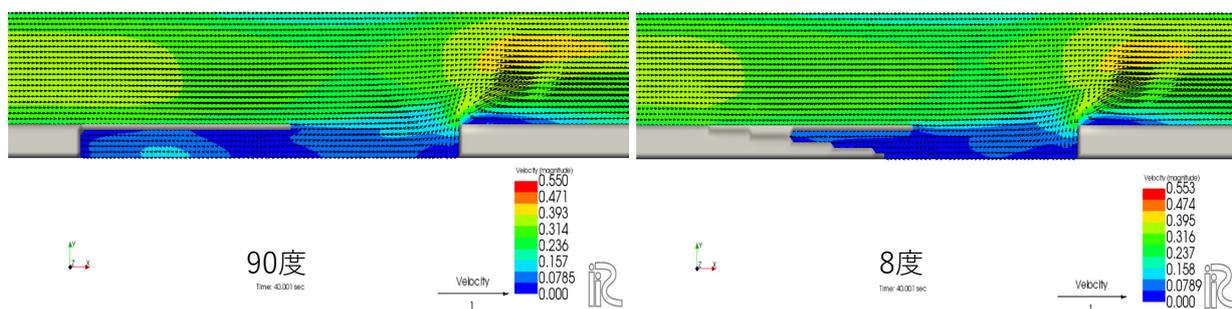


図14 数値シミュレーション2における計算結果(左:開口部90°, 右:開口部8°)

### ③水制の有無に伴う流れ場の変化の検討

次に、水制の有無が流れ場にどのような影響を及ぼすかについて検討する。今回の計算で使用する水路の条件は前頁にも示した表5であり、計算条件も表6と同一である。今回使用する水路モデルは前述の図12、図13同一とした。水制を設置する水路では、長さ4cmの不透過型第一水制を遊水域左端から下流側の対岸に15cmの位置、長さ3cmの不透過型第二水制を遊水域左端から上流側の対岸に

100cmの位置に設置した。開口部の角度90度のケースの計算結果を図15に、8度のケースを図16に示した。開口部の角度90度のパターンでは、水制が無い場合、主流域内の流速差に大きな違いは生じていないが、水制が存在する場合、主流域内の流速差が大きくなった。さらに、場所によっては、主流域内の流速が大きく乱れる状態となった。不透過型の水制による水跳ねにより、水制上流側の流速が減速され、主流域の中心部分の流れが速くなっていることも観察される。開口部の角度8度のケースでも90度のケースとほぼ同様の相違が認められた。

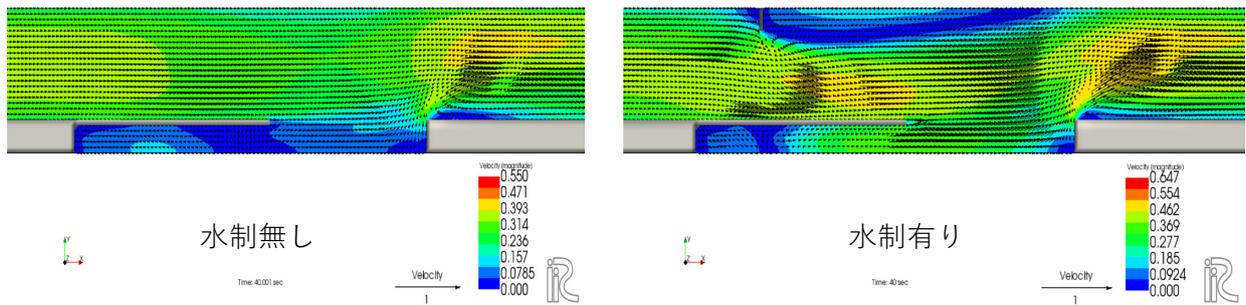


図15 水制の有無による流れ場の変化 (90°)

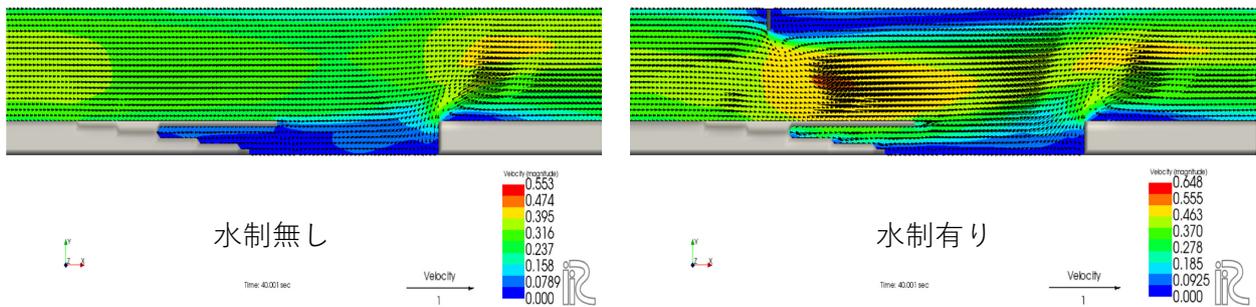


図16 水制の有無による流れ場の変化 (8°)

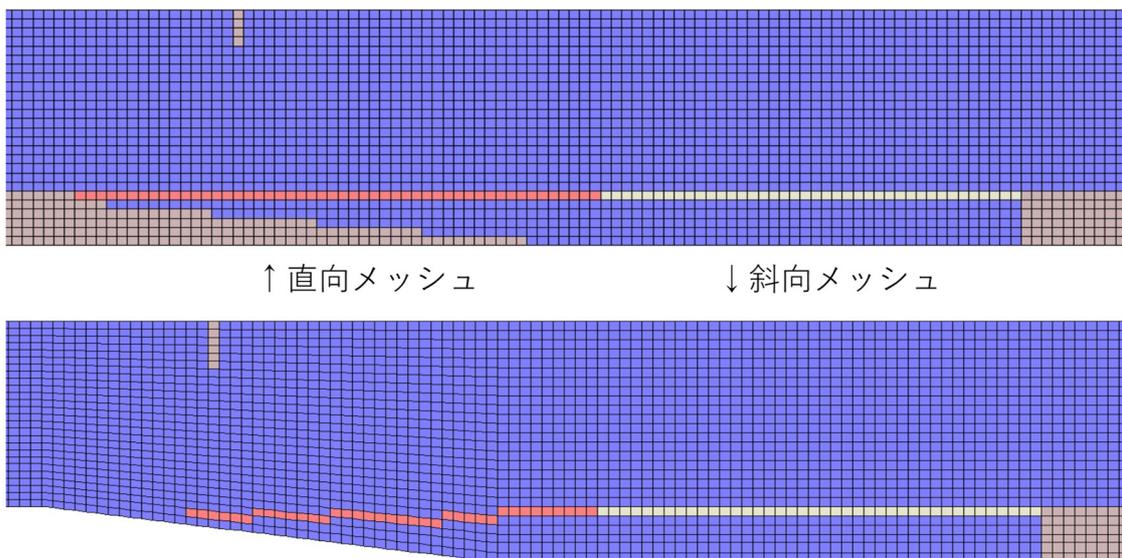


図17 直向メッシュと斜向メッシュの比較

c) 斜向メッシュの導入

図16の計算では、隅角部8度のケースを計算メッシュで再現する際に、直向メッシュの一部をマスク

することで表現している。このため、壁面形状がギザギザとなっている。壁面をより滑らかに表現するためにメッシュの一部分に変更を加え、横断メッシュの数を26個から20個に変更した。直向メッシュの水路と今回使用した斜向メッシュの水路の比較を図17に示した。今回の斜向メッシュの計算での流木挙動を4つの時刻で図18( $t=105.0s$ )、図19( $t=105.4s$ )、図20( $t=105.8s$ )、図21( $t=106.2s$ )にそれぞれ示した。これらの図から、流木が水制の影響を受けながら、遊水域に進入・捕捉される様子が理解できる。

一方、計算結果における流木捕捉率については、直交メッシュの場合41.7%、斜向メッシュの場合、70%となった。一方、岡本らの実験での捕捉率は85%であった。斜向メッシュの導入により捕捉率の再現性は大幅に向上したものの、その値は実験結果よりも2割弱小さい。この原因としては、流木の投入方法の影響や乱流の影響などが考えられる。これらを考慮した計算については、さらに検討を進めていく必要があると考えられる。

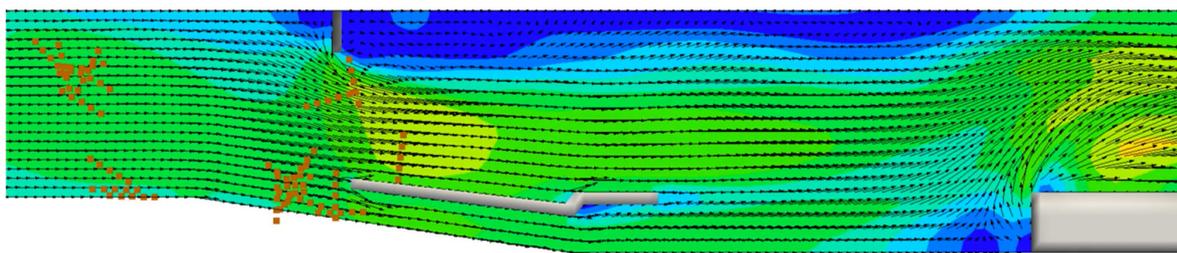


図18 計算結果の流況と流木挙動の様子 ( $t=105.0s$ )

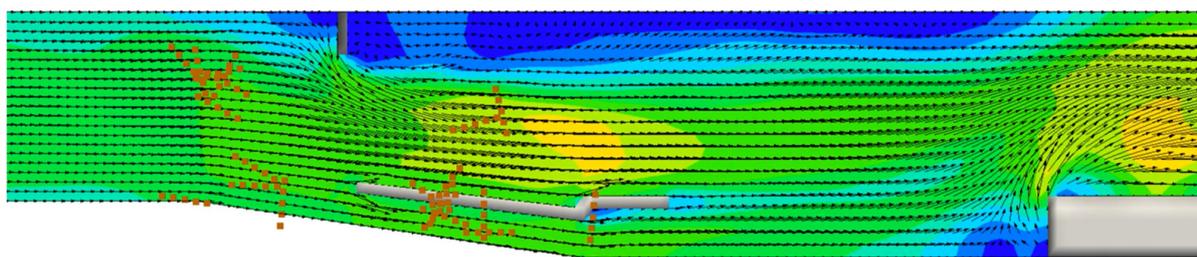


図19 計算結果の流況と流木挙動の様子 ( $t=105.4s$ )

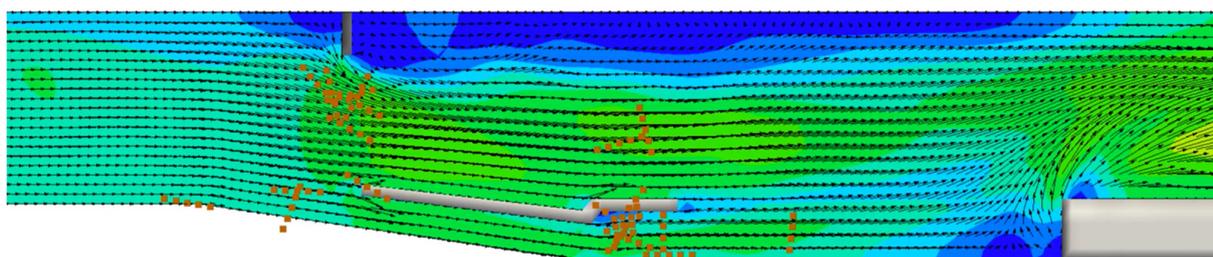


図20 計算結果の流況と流木挙動の様子 ( $t=105.8s$ )

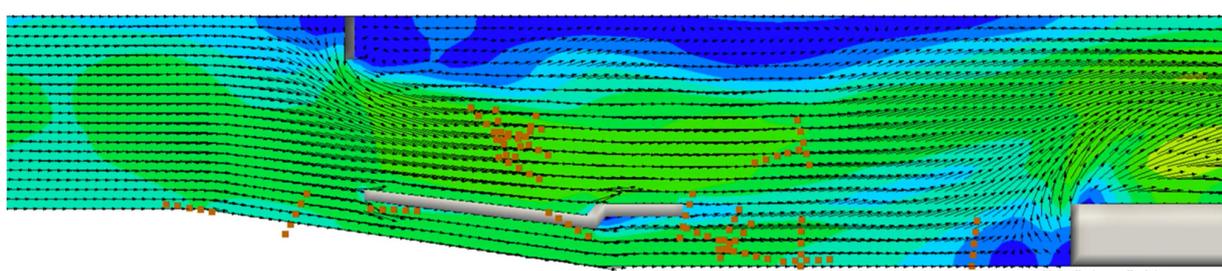


図21 計算結果の流況と流木挙動の様子 ( $t=106.2s$ )

## (6) まとめ

近年増加の傾向にある流木災害の被害を抑えることを目的として設置されるワンド型流木捕捉工について、数値解析モデルを用いて検討を実施した。岡本ら(2018)の既往の水理実験を再現するとともに、種々の条件が流況や流木捕捉に及ぼす影響を数値実験を通じて考察した。得られた主な知見をとめると次のようになる。

- ・既往の三次元流況流木再現モデルに流木フェンスの機能を追加することにより、ワンド型捕捉工周辺の流木挙動の基本的特性を再現することが可能となった。
- ・水制によって流木が捕捉域に効率的に誘導されるという既往実験の結果を、数値解析においても再現できた。
- ・開口部の角度が90°と8°の2つのケースでは、既往実験と同様に、8°のケースの方が流入流況がなめらかとなり、捕捉率が向上することが確認された。
- ・計算格子については、斜向メッシュを導入することで、壁面付近の流況がなめらかに再現され、流木捕捉率の再現精度が向上することが示された。

## 謝辞

本研究の遂行に当たり、京都大学工学研究科、岡本隆明助教より、多くのご助言をいただいた。また、富山大学都市デザイン学部都市・交通デザイン学科一期生、村田翔君より、実験データの整理や、数値解析の実行において様々な協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 赤堀良介, 村上泰啓, 永多朋紀, 唐澤圭, 佐藤徳人, 野村栄正: 河道形成機構の解明と流木による橋梁閉鎖対策等への応用に関する研究, 寒地土木研究所, 寒地河川チーム, 2010.
- 2) Schmocker, L. and Weitbrecht, V. : Driftwood risk analysis and engineering measures, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.139, pp. 683–695, 2013.
- 3) 加藤一夫, 小笠原敏記, 松林由里子, 渡辺一也, 三浦忠昭: 小本川の流木捕捉施設設計に関する水理模型実験による検討, *河川技術論文集*, Vol.24, pp.137–142, 2018.
- 4) 木村一郎, Taeun KANG, 加藤一夫: 流木捕捉工周辺の沈降性流木の挙動に関する三次元シミュレーション, *土木学会論文集B1(水工学)* Vol.76, No.2, I\_967-I\_972, 2020.
- 5) Ichiro Kimura, Taeun Kang and Kazuo Kato: 3D-3D Computations on Submerged-Driftwood Motions in Water Flows with Large Wood Density around Driftwood Capture Facility, *Water* 2021, 13, 1406. <https://doi.org/10.3390/w13101406>, pp.1–21, 2021.5.18.
- 6) 岡本隆明, 山上路生, 樞原: 遊水域を利用したアクティブな流木捕捉システムに関する実験的研究, *土木学会論文集B1*, Vol.74, pp.673–678, 2018.
- 7) Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamura, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDonald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco R. Simões, Hiroshi Takebayashi and Yasunori Watanabe: The International River Interface Cooperative: Public Domain Flow and Morphodynamics Software for Education and Applications, *Advances in Water Resources*, Vol.93, pp.62–74, DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.09.017, 2016.7.
- 8) Schiller, L., Naumann, Z.: A drag coefficient correlation. *VDI Zeitschrift*, Vol.77, pp.318–320, 1933.
- 9) 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*, Vol.51, pp.829–834, 2007.

- 10) 越塚誠一：数値流体力学，培風館，pp178-181，1997.
- 11) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行：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，応用力学論文集, 15, 415-422, 2012.
- 12) 木村一郎：3D-3Dカップリングモデルを用いた橋脚による流木捕捉過程の再現性，土木学会論文集 B1(水工学) , Vol.75, No.2, I\_601-I\_606, 2019.
- 13) Ichiro Kimura and Kazuya Kitazono：Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D-2D model to heavy wood jamming around obstacles, Environmental Fluid Mechanics, Vol.20, pp.503-525, 2020.