

移流拡散方程式に基づく流木の解析

ANALYSIS ON THE BEHAVIOUR OF DRIFTWOOD IN TERMS OF CONVECTION – DIFFUSION EQUATION

原田大輔¹・江頭進治¹
Daisuke HARADA and Shinji EGASHIRA

¹正会員 工博 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICCHARM)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The present study proposes a method to simulate the behavior of driftwood based on a convection-diffusion equation with erosion / deposition terms as well as with an accumulation term. The erosion and deposition rate of driftwood is formulated by using its similarity to the erosion and deposition of bed sediment; the rate is treated as the function of relative water depth and size of driftwood. The functional form illustrates that driftwood entrainment does not occur at depths any shallower than the threshold water depth, and the driftwood deposition does not occur at depths any deeper than the threshold water depth. The convection-diffusion equation of driftwood is solved numerically using equations for a depth averaged 2-D flow and a 2-D sediment transport process. The numerical results show that driftwood deposition and trap are simulated well, and that the flood flow is affected seriously by driftwood accumulation.

Key Words : Driftwood, Convection-diffusion equation, Flood flow, Riverbed deformation, Driftwood accumulation

1. はじめに

2016年の岩手豪雨による小本川の災害, 2017年の九州北部豪雨による筑後川水系赤谷川の災害など, 近年流路・河床変動や流木を伴う洪水被害が多数報告されており(例えば¹⁾, このような洪水に対する河道設計法に関する検討は喫緊の課題である。本研究は, そのための基礎となる流木の解析法に関するものである。

流水中の流木の挙動の解析法としては, 流木を剛体として水流との相互作用を考慮して解析する中川らの研究²⁾, 粒子法に基づく後藤らの研究³⁾, 流木を個別要素法を用いて解析する清水らの研究⁴⁾など, 優れた研究がある。これらの解析法に対して, 著者らは移流拡散方程式に基づく流木の解析法を提案し, 2017年の赤谷川の洪水に適用している¹⁾。移流拡散方程式に基づいた流木の解析法では, 平面二次元流れに伴う流木の挙動を容易に取り扱うことができるため, 今後流木対策などの河道計画への利用が期待される。

本研究では, 既往の研究¹⁾にいくつかの知見を加えた上で, 2016年の小本川及び2017年の赤谷川の洪水災害に対して平面二次元流れに伴う流木の解析を行う。特に, 流木の橋梁部への捕捉や障害物への捕捉を考慮して, こ

れらが洪水流に与える影響を明らかにする。また, 流木対策などの河道計画への利用を想定して, 流木供給量の違いが洪水流特性に及ぼす影響について明らかにする。

2. 解析モデル

(1) 洪水流及び河床変動の支配方程式

洪水流及び河床変動について, 既存のモデルに基づいて解析を行う^{5), 6)}。水深平均された平面二次元流れの支配方程式は次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h \sigma_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

ここに, h : 水深, t : 時間, u, v : x, y 方向の水深平均流速, g : 重力加速度, ρ : 水の密度, z_b : 河床位,

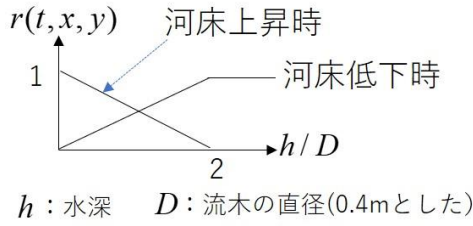


図-1 関数 $r(t, x, y)$ の与え方

τ_x, τ_y : x, y 方向の河床せん断力, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$: 水深平均のレイノルズ応力である。

河床位の時間的変化は次式で与えられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \sum_i \left(\frac{\partial q_{bix}}{\partial x} + \frac{\partial q_{biy}}{\partial y} + E_i - D_i \right) = 0 \quad (4)$$

ここに, λ : 空隙率, q_{bix}, q_{biy} : x, y 方向の i 粒径階の掃流砂量であり, 掃流砂量式として江頭らの式⁷⁾を用いている。 E_i, D_i : 浮遊砂の侵食率及び堆積率であり, 浮遊砂の浮上量式として岸・板倉の式⁸⁾を用いている。

(2) 流木の解析モデル

先の研究¹⁾において, 著者らは河道における流木の侵食および堆積は, 土砂の侵食及び堆積に対応して起こるとしてモデル化し, 移流拡散方程式に対してこれらを導入すると共に, 流木の橋梁への捕捉項を導入することによって, 流木の挙動を記述している。これらの式と流木の河床への貯留方程式は, それぞれ次のようである。

$\partial z / \partial t > 0$ の場合 (河床上昇時)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) \\ & - c_* \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) \\ & - v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) + v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (6)$$

$\partial z / \partial t < 0$ の場合 (河床低下時)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) \\ & - c_* \frac{\partial z}{\partial t} S - v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} S + v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (8)$$

ここに, C_{drf} : 単位体積の流れに含まれる流木の濃度, c_* : 土砂粒子濃度, S : 単位面積あたりの河床に存在する流木体積, v_n : 障害物 (橋梁) に対する鉛直方向の流速, D : 流木が存在する表土層の深さで, ここでは当面, 流木の直径程度と考え, 0.4m としておく。 $r(t, x, y)$ について, 河床低下時でも水深が浅い場合は流木の流水中へ

の取り込みは生じず, 河床上昇時でも水深が深い場合には流木の河床への堆積は生じない。 $r(t, x, y)$ はそのような現象を考慮したもので, ここではその限界値は水深が流木直径の2倍程度となる場合であると考え, $r(t, x, y)$ を図-1のように与える。

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の流木の拡散係数であって, これらは流木の幾何学的スケールと流れの時空間スケールから定まるはずである。中川ら⁷⁾や後藤ら⁸⁾は実験により拡散係数を算出しているが, 両研究の拡散係数の値は10倍程度異なっており, 現状では適切な評価法が見当たらない。そこで当面, 以下の式により与える。

$$\varepsilon = (\kappa / 6) u_* h \quad (9)$$

ここに, κ : カルマン定数(0.4), u_* : 摩擦速度である。

δ 関数は, 障害物による流木の集積を表したもので, 障害物のあるところ (位置 (x_i, y_i)) では流木が捕捉されると考えて $\delta=1$ とし, それ以外では0としている。ただし, 流木は障害物で必ずしも捕捉される訳ではなく, 例えば橋梁部では, 流木長と径間の比, 桁下クリアランスといった要素が流木の捕捉の有無に影響を及ぼすことが知られている^{9), 10)}。 p_b はこのような要素を考慮したもので, 0から1の値を与える。

3. 解析条件

(1) 対象河川及び各災害の概要

2016年の小本川及び2017年の赤谷川の洪水災害についての解析を行う。小本川は, 2016年の台風10号による出水により, 谷底低地の全体を洪水流が流下し, 大きな被害を被った¹¹⁾。ここでは9人の犠牲者を出した福祉施設が位置する乙茂地区の2km程度の区間を対象として解析を行う。

赤谷川では, 2017年7月, 梅雨前線に伴う豪雨により甚大な被害が生じた。土石流や斜面崩壊によって大量の土砂や流木が谷底低地に流入し, 被害を助長したと考えられる。ここでは筑後川との合流点から乙石川の合流点までの3.5km程度の区間を対象として解析を行う。

(2) 計算条件

各計算において, 初期の河床形状は出水前の航空レーザー測量に基づく国土地理院基盤地図情報5mメッシュ数値標高モデル(DEM)¹²⁾を用いた。

流量ハイドログラフについて, 小本川では乙茂地区の5km程度下流に位置する赤鹿観測所で観測された水位ハイドログラフを等流計算で流量に変換したもの¹¹⁾を用いる。なお, 計算期間中の平均流量はおおよそ2,050(m³/s)である。赤谷川ではRRIモデル¹³⁾による降雨流出解析結果を用い, これを上流端の境界条件とした (図-2の実線参照)。解析区間の粗度係数について, 現地の地被状況を



図-2 赤谷川における上流端で与えた流量ハイドログラフ及び上流端から供給した浮遊砂

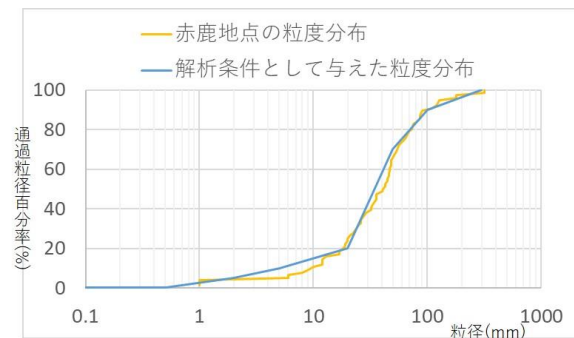


図-3 小本川の現地観測で得た土砂粒度分布及び解析で与えた粒度分布

考慮し、小本川では全域を0.04として、赤谷川では全域を0.05と設定している。土砂の粒度分布については、現地調査に基づいて、小本川、赤谷川でそれぞれ図-3、図-4のように初期河床材料の粒度分布を与えている。小本川では上流端から平衡流砂量を供給している。一方、赤谷川では上流域で多量の崩壊・土石流が発生していることから、適切に上流端の条件を設定する必要がある。そこで既往研究^{1), 14)}と同様の方法によって、解析区間上流端から流入する細粒土砂の量を推定し、平衡流砂量に加えて、図-2の破線で示す量の浮遊砂を上流端において供給している。

(3) 流木の条件

流木の供給量については、これを適切に設定する必要がある。流木の生産量は、以下のように推定することができる。

$$V = A_{tr} P_1 m \quad (10)$$

ここに、 V ：流木の生産量(m^3)、 A_{tr} ：流域における崩壊・土石流の移動痕跡の面積(m^2)、 P_1 ： A_{tr} の内で侵食域の面積の割合、 m ：単位面積あたりの立木の体積(m^3/m^2)である。赤谷川における既往研究¹⁴⁾を参考に、これらの値を以下の方法により推定している。 A_{tr} については、被災後の航空写真を解析し、その面積を求めている。 P_1 について、ここでは A_{tr} の6割程度と仮定する。 m

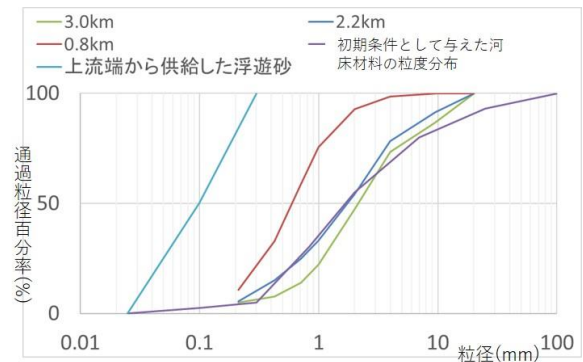


図-4 赤谷川の土砂粒度分布及び解析条件として与えた粒度分布（凡例の数字は筑後川合流点からの距離）

について、著者らが数か所の現地調査を行った結果を用いている。このようにして推定した流木生産量のうち、下流に輸送されて解析区間上流端に到達する流木はその半分程度であると考え、これを解析区間の上流端から与える。すなわち、計算区間の全域で計算開始時に式(6)及び(8)の $S=0$ として、上流端から $C_{drf}=0.01$ として供給した。小本川における流木の流入量は赤谷川とは異なるが、ここでは小本川、赤谷川共に解析区間上流端での $C_{drf}=0.01$ として与える。

障害物での流木の捕捉について、小本川、赤谷川共に橋梁部では $\delta=1$ として、流木を捕捉させている。ただし、既往研究^{9), 10)}を参考に、洪水流の桁下クリアランスが2m以上ある場合には流木の捕捉が生じず、流木の長さ(20mとした)が橋脚の径間長よりも短い場合にも流木の捕捉が生じないように、式(5)～(8)において $p_b=0$ としている。また、小本川ではコンクリート構造物への流木の捕捉が顕著に見られたため、コンクリート構造物の上流側では $\delta=1$ としてこれを考慮することとした。

また、流木が堆積する場合には、これが堆積する場合の空隙率を0.5として、河床高を上昇させた。ただし橋梁部では河床高を上昇させず、流木が堆積した分の流水断面積を減少させている。ここで、流木の堆積高さが3mを超えた場合、それ以上の堆積が生じないよう $\delta=0$ と設定した。

(4) 解析ケース

小本川において、表-1に示す4つのケースの解析を行った。流木の供給量の違いによる洪水流への影響を見るために、Case4では流木の供給量を20%としている。

4. 解析結果

(1) 小本川の解析結果

小本川の洪水流の解析結果について、Case3のピーク流

表-1 解析ケース

Case1	固定床（河床変動なし）
Case2	移動床・流木なし
Case3	移動床・流木あり（上流端 $C_{drf}=0.01$ ）
Case4	移動床・流木あり（流木の供給量はCase3の20%）

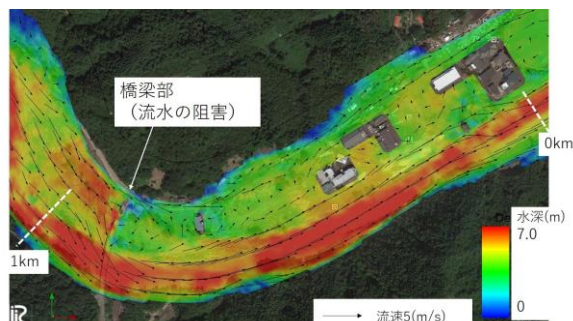


図-5 小本川の洪水時流況（Case3，ピーク流量時）
（縦断距離は図-8と対応）

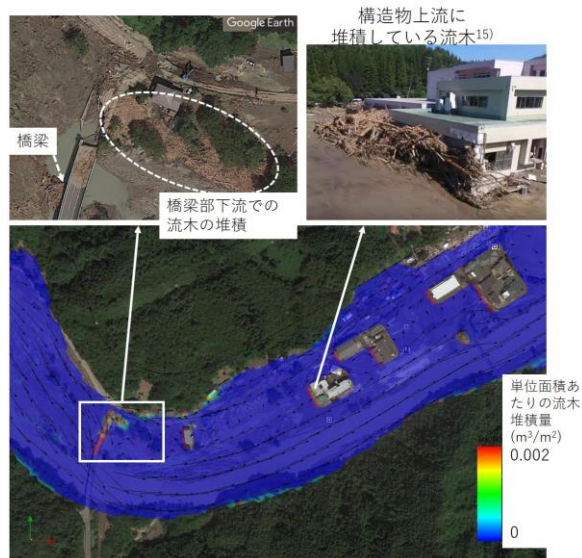


図-6 流木の堆積状況の分布（通水終了時）

量時の流況について、Case3のピーク流量時の流況について図-5に示す。図において、主要なコンクリート構造物についてはこれらを考慮しているため、これら構造物のある部分では着色されていない。図-5中左側の湾曲部に注目すると、ここでは橋梁部の閉塞によって左岸側の洪水流が阻害されて、右岸側に集中していることが分かる。なお、橋梁の左岸側では径間が短いため(20m以下)、ここでは流木が捕捉されるが、橋梁の右岸側では径間が長いので流木が捕捉されない。

次に、通水終了時の流木の堆積分布について図-6に示す。構造物の上流側には、図-6中右上の写真¹⁵⁾に示す通り多量の流木が堆積しており、このことは計算でも示されている。さらに、図左側の橋梁のある部分では、橋梁部で流木が捕捉されており、計算でもその事が評価されている。しかし、その下流側で流速が遅くなっている部



図-7 小本川の縦断水位比較（ピーク流量時）

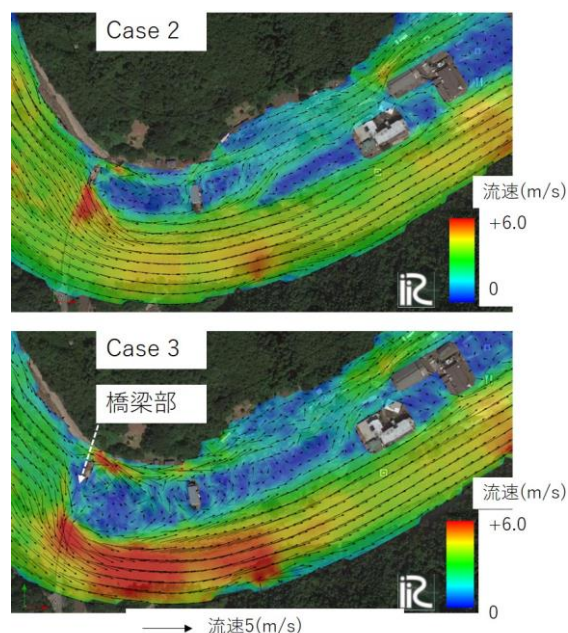


図-8 流速のコンター図についてCase2とCase3の比較
（ピーク流量時）

分にも実際には多量の流木が堆積しており、この部分の流木の堆積は計算結果に表現されていない。これは、計算において樹木による流木の捕捉を考慮していない事に加え、流木の河床への堆積が河床変動と対応して生じると考えているために、水深が浅く土砂の堆積が生じない部分での流木の堆積を考慮していないためである。

図-7は、小本川の各ケースのピーク流量時縦断水位について比較したものである。各ケースの差について、例えば流木の供給量が多いCase3で一概に全体的に水位が高いということはない。しかし局所的には大きな水位差が見られ、流路・河床変動及び流木による影響はむしろ局所的に現れていると言える。例えば0.9km付近の橋梁部の上流側では、流木を考慮したCase3とCase4で水位が高くなっている。

図-8はCase2とCase3について流速のコンター図を比較

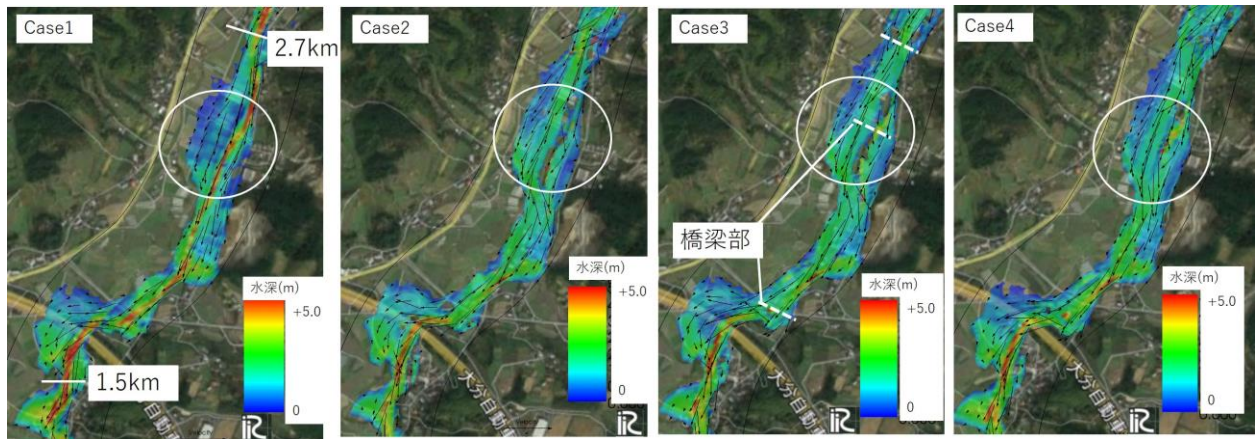


図-9 赤谷川の計算結果について、各ケースの比較（ピーク流量時、コンターは水深）

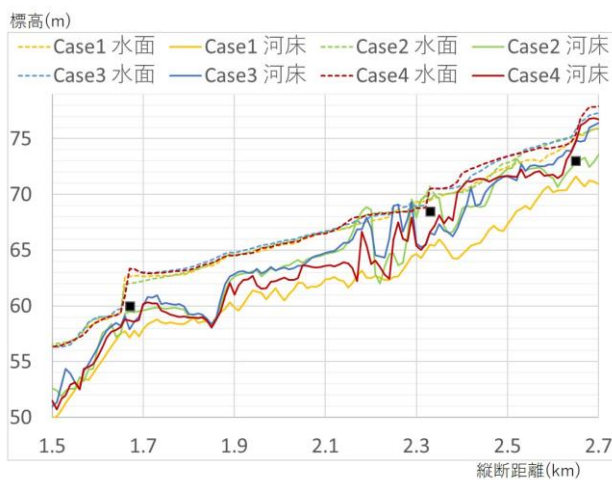


図-10 赤谷川のピーク流量時における滞筋の水位及び河床高（黒い点は橋梁の位置及び高さ）

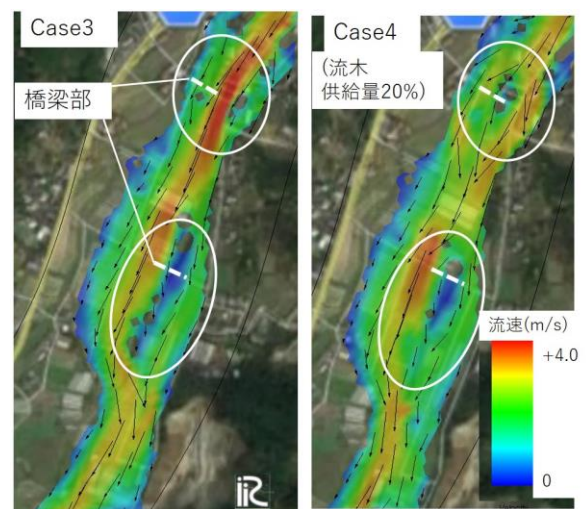


図-11 Case3,4について、流速コンターの比較（ピーク流量時）

したものであるが、橋梁部分での流木の捕捉によって、右岸側により顕著に流水の集中が生じている。このように、流木の捕捉による洪水流の影響は、流木が捕捉される周囲の局所的な洪水流に大きく影響している。

(2) 赤谷川の解析結果

赤谷川について、Case1-4のピーク流量時の洪水流の解析結果を図-9に示す。同じ時刻の滞筋部分における河床高と水位を抽出したものが図-10である。ここで、Case2から4では河床変動が生じた結果、滞筋の位置がCase1と異なるが、抽出した滞筋の位置はCase1と同じである。

図-9において、Case1とその他の解析ケースを比較すると、Case2~4では激しい河床変動が生じた結果、図-9中に白い丸で示した部分のように、元々の滞筋が埋没して洪水流が大きく変化しており、上流からの浮遊砂の供給が河床変動に大きな影響を与えていることが示唆される。図-10において、Case2~4では一概にどのケースが河床高の変化や洪水水位への影響が大きいとは言えないが、

各ケースで局所的に河床高や水面高が様々に異なっており、小本川の解析結果と同様に、流木の捕捉によって洪水流が局所的に大きく影響を受けていることが分かる。

流木の供給量の違いによる洪水流への影響について、局所的な違いをより詳細に調べるため、図-11に解析区間の一部を拡大し、Case3とCase4について流速のコンターとして比較している。図-11において、Case3では上流側の橋梁部では、ピーク流量時には既に多量の流木が捕捉されており、その結果洪水流は元の滞筋から位置を変え、左岸側に集中している。一方、Case4では橋梁にさほど流木が集積していないため、洪水流の集中はCase3ほど明確ではない。また、その下流の橋梁部では、Case3ではCase4と比較してより多くの流木が捕捉されているために、流速の分布に影響のある範囲がより広い範囲にわたっている。このように、流木の供給量の違いが局所的な洪水流特性に大きく影響している。

5. 結論

流路・河床変動を伴う流れ場を対象として、多量の流木を扱うことを目的として、移流拡散方程式に基づく流木の解析法を提案し、その解析法を用いて2016年の岩手豪雨による小本川の災害、2017年の九州北部豪雨による赤谷川の災害の解析を行った。その結果、流木の供給による洪水流への影響は、解析区間全体の水位を大幅に上昇させるというよりも、流木が捕捉される橋梁等の障害物近傍の洪水流に大きな影響を及ぼしている。また、流木の供給量の違いが洪水流に及ぼす影響について検討した結果、障害物への集積量の違いが、洪水流の局所的な流況に顕著な影響を及ぼしていることが明らかになった。

謝辞：本研究は、土木研究所重点研究「中山間地域の洪水災害レジリエンスの総合的な向上に資する技術の戦略的開発」の一環として行われたものである。また、土木研究所ICHARMの山崎祐介専門研究員と南雲直子専門研究員には、現地調査やデータ整理にご協力いただき、中村要介交流研究員には降雨流出解析を実施していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 原田大輔・江頭進治：流砂・流木を伴う洪水流の解析—2017年7月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—。土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_937-I_942, 2018.
- 2) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第38巻, 1994.
- 3) 後藤仁志, 酒井哲郎, 林稔：粒子法による流木群の堰止め過

程の Lagrange 解析, 水工学論文集第45巻, pp. 919-924, 2001.

- 4) 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.
- 5) iRICソフトウェア：<http://i-ric.org/ja/>
- 6) 竹林洋史：河川中・下流域の河道地形. 日本流体力学会誌「ながれ」, 24.1: 27-36, 2005.
- 7) 中川一, 高橋保, 池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集第37巻, pp. 379-384, 1993.
- 8) 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫：津波による木材の流動, 海岸工学研究発表会論文集, 第29巻, pp.491-495, 1982.
- 9) 坂野章：洪水時の流木集積による橋梁近傍の被災と対策に関する実験的検討, 土木技術資料, 48.9: 54-59, 2006.
- 10) 小松利光, 山本晃一：流木と災害, 技報堂出版, 2009.
- 11) 原田大輔, 江頭進治, 萬矢敦啓, 岩見洋一：2016年度小本川災害における流路・河床変動を伴う洪水流の解析, 河川技術論文集, 第23巻, pp.43-48, 2017.
- 12) 国土地理院：基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 13) 原田大輔, 江頭進治, 萬矢敦啓, 岩見洋一：2016年度小本川災害における流路・河床変動を伴う洪水流の解析, 河川技術論文集, 第23巻, pp.43-48, 2017.
- 13) Sayama, Takahiro, et al. "Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin." Hydrological Sciences Journal 57.2, pp.298-312, 2012.
- 14) 江頭進治, 原田大輔, 南雲直子, 山崎祐介, 萬矢敦啓：崩壊・土石流による堆積土砂に着目した微細砂の流出予測法—2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷川を対象として—。土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_925-I_930, 2018.
- 15) 国土地理院：平成28年台風第10号に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H28.taihuu10gou.html>

(2018. 4. 3受付)