河川基金助成事業

「流木災害減災に向けた捕捉工設計最適化のための基盤技術の構築」

助成番号: 2020 - 5211 - 055

富山大学都市デザイン学部 教授 木村 一郎

2020年度

1. はじめに

近年,毎年のように頻発する豪雨河川災害の大きな特徴の一つとして,大量の流木の河 道内への流出と,それらが橋梁,水制,堤防等の河川構造物や家屋等の建築物への衝突す ることでそれらを破壊し,あるいは流木堆積による河道の閉塞により氾濫災害を励起する 問題が挙げられる.これらの災害を軽減するには,流木発生そのものを抑制する対策が有 効であるが,これとともに河道に流出した流木を捕捉して河川から除去する方法なども考 えられる.前者については,流木発生の可能性のある個所が広範囲にまたがっており,現 実的かつ即効性のある方策を構築することは容易ではない.一方,後者は適切な流木捕捉 工の設計が為されればピンポイント的な施設でも比較的高い効果が期待でき,経済性や即 効性の点でも優れる手法といえる.また,捕捉した流木を燃料や建築材料などの資源とし て利用できる可能性がある点も将来的な利点となりうる.

河道中の流木を捕捉する施設には様々な形態のものが想定されるが、その中でも代表的 なものは河川側岸にバイパス状の水路あるいはワンド状の死水域を設置し、流木をそこに 誘導・侵入させ、堆積捕捉して除去するというものである^{1),2)}.この種の流木捕捉工は、 河道の本流の流れを阻害する可能性が低く、治水上でも有利という点が長所の一つといえ よう.しかし、必然的に本流から逸れた箇所に流木貯留地が設けられるため、いかに、こ の箇所に流木を誘導するかという点が捕捉工の成否を握っているといえる.岡本ら²⁾は、 直線水路の側岸にワンド状の矩形死水域を設け、流木をそこに効率的に誘導する方策とし て、主流のワンドと反対側の岸に水制を設置する方法が有効であるとし、このことを水理 模型実験により示した.岡本らの実験結果によると、水制の下部(水没部分)を一部透過 型(流水が通過できる形)にした場合においても、ワンド側への流木誘導の効果が十分に 発揮されることを示した.このことは、治水上のネックとなりやすい水制の設置を、極力 流水抵抗を増加させない方法で導入し、流木捕捉に資するという点で、工学的に意義の高 い知見と考えられる.

一方,加藤ら³は,山岳地域の河川である岩手県の小本川で計画されているバイパス型 流木捕捉工について,比較的大きい空間スケール(1/50)の装置を用いた精緻な水理模型 実験により検討を行った.対象とした捕捉工では,山間部の河川の湾曲部の外岸側に捕捉 領域を設けることで,水制等を設置することなく,流木運動の慣性力(すなわち,この場 合は流木の遠心力に相当する)そのものを有効に活用して流木を捕捉域に誘導するという ものである.加藤らは,流入口付近の堤防の形状が流木運動に及ぼす影響などを詳細に検 討し,良好にチューニングされた条件では,投入流木量の65%以上の流木を捕捉・除去でき る可能性を示している.

このような流木捕捉工周辺の複雑な流木の動的特性の検討を行う方法として,前述の室 内水理模型実験や現地観測とともに,数値シミュレーションモデルによる方法も極めて有 効と考えられる.河道内の流木挙動や,流木捕捉工への堆積・停止など過程の数値解析モ デリングについては,これまで種々のモデルが提案され,検討が行われてきており,未だ 発展途上とはいえ,その信頼性は次第に高まりつつある.

先駆的なモデルとして,清水ら⁴⁾はレイノルズ平均された平面二次元水深積分モデルに

基づいた河川流計算モデルと流木を球体の結合で表現し,流木が水面付近を二次元的に移 動すると仮定するとともに,流木同士の衝突に個別要素法(DEM: Discrete Element Method) を用いる二次元型流木追跡モデルを考案し,これを橋脚による流木捕捉現象に適用し,適 切に再現できることを示している.一方,初田ら⁵⁾は,同様なモデルを用いて河川蛇行部 における流木挙動を適切に再現できることを述べている.この種のモデルは,流れと流木 の双方を二次元的にモデル化しているため,2D-2Dモデル(2D河川流-2D流木モデル,2D: Two-Dimensional)と呼ぶことにする.一方で,長田ら⁶⁾は,流れ場は二次元モデルで計算 し,流木挙動を三次元モデルに拡張するとともに,流木の弾性変形をも考慮したモデルを 構築した(2D-3Dモデル:2D河川流-3D流木モデル).しかし,河川湾曲部などでは流れの 三次元性が卓越することから,流れ場を三次元的に扱うことが望まれる.そこで,Kimura and Kitazono⁷⁾は,3D-2D型モデルを構築し,湾曲部の流木挙動や橋脚による流木の捕捉停 止現象の検討を行った.

これらに対し、加藤ら(2019)⁸⁾は、流れの計算に平面二次元モデルをベースとしつつも、 第一種二次流の影響をEngelund⁹⁾をベースとしたモデルを組み込んだ、準三次元モデルを 採用したq3D-2Dモデル(qusi3D-2Dモデル)ともいうべき大変興味深いモデルを提案してい る.このモデルは、流木のモデル化においても、従来の球体の結合で表すモデルとは異な り、円柱状の形状を直接モデル化して採用しているため、計算機負荷が小さく、大規模な 流域の計算にも適用が容易なものと予想される.このモデルは、加藤らにより岩手県小本 川における流木捕捉工に関する水理模型実験結果の再現が試みられ、実験結果を比較的良 好に再現するという結果が得られている.しかしながら、このモデルでは、無限に長い一 様湾曲部に生じる十分発達した第一種二次流のみを想定している.このため、実河川でみ られる有限長の湾曲部では第一種二次流の影響を過大評価する可能性が指摘される.また 連続的な蛇行部分では二次流発達の空間的な遅れ(ラグ)により、Engelundモデルとは逆 方向の回転の二次流が発生する場合があり、このような場合には流れ場により二次流の遅 れを考慮した、より高度な準三次元モデル(例えばKimura et al.¹⁰⁾やUchida and Fukuoka¹¹⁾) を用いるか、さもなければ二次元の枠組みを放棄して、三次元的な流れのモデルを用いる ことが必要となる.

本研究は、河川流と流木の双方を三次元的に取り扱う3D-3D型モデルにより、加藤ら³⁾に よる小本川の流木捕捉工実験の再現を試みながら、適切な数値解析モデルの検討を行うと ともに、流木捕捉に及ぼす水理パラメータの影響を検討するものである。用いる解析モデ ルとしては、木村¹²⁾が橋脚周辺の流木捕捉の計算に用いた3D-3D型の流木モデルを基本とし ている.しかしながら、加藤らの実験では、流木化した比較的密度の大きい広葉樹を対象 に、比重が1.1の流木を想定している.

比重が大きい流木では、橋桁等への衝突堆積は生じにくいと考えられる一方、比重が1 を超えると河床への沈下による堆積や、それに伴う水位の堰き上げ等の問題が容易に生じ るものと予想される.比重が1より大きい流木は、基本的に河床の近傍を、河床面と頻繁 に接触しながら移動すると考えられるため、河床と流木の摩擦を適切にモデル化すること が必要となる.これについては、先行研究としてKang and Kimura¹³⁾、およびKang et al.¹⁴⁾ が、浅水流を対象とした流木の河床への接触、停止、再移動などを再現した2D-2D型モデル を提案し、実験結果との比較を通じておおむね妥当な結果が得られることを示している. 本研究では、これらの先行研究を参考にしつつ、底面摩擦の影響を三次元モデルに組み入 れる. なお、流木の形状が円柱状の場合、底面付近の挙動は流木軸方向のスライド型移動 と横断方向のローリング型移動では摩擦力が大きく異なるため、摩擦力の平面的異方性を 考慮したモデル化を行う必要がある.これに加えて、Kang et al.^{15),16)}は、既往モデル¹³⁾ では無視されてきた流木と流れとの衝突角度による抗力の変化(投影面積の変化)につい ても考慮したモデル化を行っている.このような点についても、今回の研究で三次元モデ ルに組みいれている.

さらに,湾曲部外岸側の流木捕捉工の捕捉率向上を目指して,流木捕捉の影響に及ぼす 数値解析モデルの支配要因について検討を実施する.ここで,検討を実施する項目として は,乱流モデル(レイノルズ応力の表現),底面摩擦力,鉛直方向の計算格子分割を取り 上げる.これらの検討とともに,流木比重を変化させた条件で検討を実施し,捕捉工最適 化に向けての基本的知見を整理する.

2. 数値解析モデルの構築

2.1 液相(河川流)の数値解析モデル

本研究で構築する 3D-3D 型(三次元河川流一三次元流木挙動型)流木数値解析モデルで は、河川流を動水圧を考慮した三次元モデルで計算している.ここに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¹¹⁾と同様に、河川解析共通国際プラットフォー ム iRIC 上で稼働する三次元ソルバー、NaysCUBE^{17),18)}とする.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ている. また、スタガード格子上で変数配置を行うことで、物理量の保存性や計算の安定性を確保 している点にも特徴がある.

移流項の離散化には空間に三次の精度を有する TVD MUSCL 法が,時間積分には二次 精度のアダムス・バシュフォース法が,乱流モデルには線形および非線形 k-εモデルが採 用されている.水面の移動については,境界適合法が採用されており,運動学的条件によ り計算格子が水面にフィットして上下方向に移動し,最上面の格子面が常に水面に位置す るように計算が進行することで水面変動を捕捉する.

基礎式や離散化方法,境界条件等については既往の文献にも詳述されているのでそちら を参照されたい¹⁸⁾.

流木と河川流の相互作用について,既往の研究では簡単のため流木が流れに及ぼす影響 を無視した One-way 型モデルを採用されたものも見受けられる.しかしながら,本研究 では流木の流れ場への影響を抗力として考慮した,Two-way 型のモデリングを行っている 点が異っている.このモデリングでは,ある計算セル内にける流木の流れに対する抗力を, 次の式で評価している.

$$F_{dr}^{i} = -\frac{1}{2}\rho C_{D} \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{k=1}^{N_{cell}} A_{k} \left| \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\mathbf{p},\mathbf{k}} \right| \left(U^{i} - U_{p,k}^{i} \right)$$
(1)

ここに, F_{dr}: ある計算セルにおける流木が河川流に及ぼす抗力の i 方向の成分, ρ: 河川

水の密度 (≒ 1000kg/m³), *CD*: 抗力係数, \sqrt{g} : 一般曲線座標変換におけるヤコビアン (計 算セルの体積に相当), A: 計算セル内に存在する k 番目の構成球体要素の流れ方向の投影 面積, u: 河川流の流速のベクトル, up: 流木構成球体要素の移動ベクトル, *Ui*: 河川流の 流速ベクトルの反変成分, *Upi*: 流木構成球体要素の移動ベクトルの反変成分, *i*: 一般曲線 座標系の方向を表す変数(ξ , η , ζ)のいずれか, *Nceli*: 対象とする計算セルの内部に存在する 流木の構成球体要素の個数をそれぞれ表す.

抗力係数 *Co*については、定数とする場合も多いが、本研究では次のように粒子レイノル ズ数 *Red*の関数とする表現を試みに用いた.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} + 0.4, & Re_d \ge 1000\\ \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15Re_d^{0.687}), & Re_d < 1000 \end{cases}$$
(2)

$$\therefore Re_d = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_\mathbf{p}|d}{\nu} \tag{3}$$

ここに, d: 流木構成要素球体の直径, および, v: 動粘性係数である 19). 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,河川流速に対する構成要素球体の速 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が,抗力 係数を簡易的に定数としたモデルに対する計算結果の影響については, 今後さらに検討す る必要がある.

2.2 固相(流木運動)の数値解析モデル

2.2.1 流木モデルの概要

本研究で用いる流木運動のモデルは,清水ら 4)にならい,一本の流木を球体の接続で表現する(図1参照).この方法は,もともと越塚 20),21)が MPS 型の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 5)や Kimura and Kitazono⁷⁾の方法と類似であり,さらにこれら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 12)を参照されたい.



図1 流木を球体要素の列で表現するモデル

2.2.2 底面相互作用項の導入

前述のように、本研究では比重が1より大きい流木を対象としたモデリングを行う.こ

のため,流木移動は基本的に底面付近の移動となり,底面との摩擦を伴うこととなる.既 往のモデル¹¹⁾では比重が1以下の流木を想定しいたため,この底面摩擦は考慮されていな かったので,新たにこの効果の導入を行った.

まず,流木構成球体を,球体間の拘束を一旦無視し,単独で置かれた流体中の物体とし てラグランジュ方程式により計算ステップΔt間移動させる.底面摩擦項を考慮した球体 のラグランジュ方程式は次のようになる.

$$\frac{d\mathbf{u}_{\mathbf{p}}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \lambda_{A-sub} \frac{A_2}{A_3} \frac{1}{d} \frac{1}{\sigma/\rho + \lambda_{V-sub} C_M} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\mathbf{p}}| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\mathbf{p}})
+ \frac{\lambda_{V-sub} (1 + C_M)}{\frac{\sigma}{\rho} + \lambda_{V-sub} C_M} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \frac{\sigma/\rho - \lambda_{V-sub}}{\frac{\sigma}{\rho} + \lambda_{V-sub} C_M} \mathbf{g}
+ \frac{1}{A_3 d^3 \rho (\sigma/\rho + \lambda_{V-sub} C_M)} (\mathbf{F}_{\mathbf{p}} + \mathbf{F}_{\mathbf{bed}})$$
(4)

ここに、 σ : 球体の密度(流木の密度)、 ρ : 河川水の密度, C_D : 抗力係数, **u**: 河川流の 流速ベクトル, **u**_p: 粒子移動の速度ベクトル, **g**: 重力加速度ベクトル, **F**_p: 粒子間衝突 カベクトル, *t*: 時間, *C*_M: 付加質量係数(*C*_M=0.5 とした), *A*₂, *A*₃: 二次元, および三 次元の形状係数($A_2 = \pi/4, A_3 = \pi/6$), λ_{A_sub} : 球体の流水方向投影面積の水面以下の部 分の割合, λ_{V_sub} : 球体体積の水面以下の部分の割合, **F**_{bed}: 底面摩擦力ベクトルをそれ ぞれ表す.

Fbed は底面摩擦力ベクトルであり、次のように表す.

$$\mathbf{F}_{\text{bed}} = \begin{cases} \mathbf{0} , & \text{if } z_p > d/2 \\ \mathbf{F}_{\mathbf{b}} + \mathbf{F}_{\mathbf{s}}, & \text{if } z_p \le d/2 \end{cases}$$
(5)

ここに、 z_p :要素球体中心の座標の河床面からの高さであり、 F_b は底面摩擦ベクトル、 F_s は河床勾配に伴う重力の影響を表す.

まず, **F**_bについて, 次式で表す.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{b}} = -\mu_p N \mathbf{p} = -\mu_p \frac{N}{|\mathbf{u}_p|} \begin{pmatrix} u_{px} \\ u_{py} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(6)

ここに、 μ_p : 球体と底面の摩擦係数であり、その詳細は後述する.また、N は球体の底面 に対する垂直力である.この計算には、底面勾配は小さいと仮定して、近似的に次式で表 すことにする.

$$N = W - B \tag{7}$$

ここに、Wおよび Bは球体に作用する重力,及び浮力であり,それぞれ次のように計算される.

$$W = \frac{\pi}{6}\sigma d^3g \tag{8}$$

$$B = \frac{\pi}{6}\rho d^3 \lambda_{\nu-sub} g$$

式(9)の λ_{v-sub} は,前述のように流木構成球体の水没部の体積割合を表す係数であり,流 木の比重が1より大きい場合,河床底面付近の流木では通常1(完全水没状態)であるが, 水深が小さい場合などには,流木上面が水面から空中に突出するため,この値が1以下と なる場合もありうる.

摩擦係数μpについて、流木が円柱形状の場合、流木軸方向の滑動と横断方向の転動の摩 擦係数が大きく異なる.これについて、Kang and Kimura (2018)¹²⁾および Kang et al (2020)¹³⁾にならい、摩擦力異方性を考慮したモデル化を行う.これについて、図2は流木 が底面付近に存在する様子を平面的に見たものである.流木軸方向(t 方向)と横断方向 (n 方向)の摩擦係数の分布を図のように楕円型で仮定する.流木軸方向の滑動の摩擦係 数をμt,横方向の転動の摩擦係数をμnとすると、流木の進行方向の摩擦係数μpは、次式で 表される.



図2 摩擦力異方性のモデル化の説明

$$\mu_p = \frac{\mu_t \mu_n}{\sqrt{\mu_t^2 (1 - \cos^2 \psi_t) + \mu_n \cos^2 \psi_t}}$$
(10)

ここに、 ψ_t は、流木の進行方向と流木の長軸との成す角度であり、この関係により、 $\cos \psi_t$ は次式で求められる.

$$\cos\psi_t = \frac{u_{px}\cos\theta + u_{py}\sin\theta}{|\mathbf{u}_{\mathbf{p}}|}$$
(11)

ここに、 θ は、x軸と流木軸の成す角度である.なお、 μ_t については、静止摩擦係数 μ_{ts} と動 摩擦係数 μ_{tk} の相違($\mu_{ts} \ge \mu_{tk}$)を考慮する.摩擦係数の値を理論的に決めるとは不可能で あると考えられる.そこで本研究では、水理模型実験における流木挙動を、より忠実に再 現するよう値を種々変化させた試行錯誤的計算を実施し、その結果をもとに、最終的には **表1**の値を用いることとした.

名称	記号	値
静止摩擦係数	μ_{ts}	2.0
滑動摩擦係数	μ_{tk}	1.0
転動摩擦係数	μ _n	0.5

表1 用いた摩擦係数の値

底面に接触して滑動,転動する比重の比較的大きい流木の移動形態は,重力と底面の勾配の影響を受ける.これを考慮するため,まず,底面付近に局所的に底面の勾配に沿った *x'-y*'平面(接平面)を考える.ここで,x',およびy'方向の底面勾配は,底面勾配が比較的小さいという仮定のもとでは,一般曲線座標における *ξ*, *n* 方向の勾配を用いて,次のように近似的に表される.

$$\frac{\partial z_b}{\partial x'} \approx \frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x},$$
$$\frac{\partial z_b}{\partial y'} \approx \frac{\partial z_b}{\partial y} = \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$
(12)

ここに, z_b は底面の標高である.これより,流木に働く重力の斜面方向のベクトル $\mathbf{F}_{\mathbf{s}}$ の x, y方向の成分を次のようにモデル化する.

$$F_{sx} = -W \frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad F_{sy} = -W \frac{\partial z_b}{\partial y}$$
(13)



図3 流向と流木軸の角度の関係



図4 中間部の球体(左)と終端部の球体(右)の投影面積の考え方

2.2.3 流木と流水の成す方向による抗力変化のモデル化

本研究では、一本の流木を球体要素の接続でモデル化している.このため、抗力係数は 球体における値(式(12),(13))を用いている.しかしながら、流木の場合、河川の流れの 方向と流木軸の方向によって抗力係数が変化する.これについて、円柱状の物体の場合の 迎え角と抗力の関係を考察した最近の研究^{22),23)}を参考に,抗力係数を変化させる方法が考 えられる.一方で、Kang et al. (2020)は、二次元モデルにおいて、抗力係数を変化させる ことなく、流木の流れに対する角度によって、各球体要素に関する投影面積が変化すると 考えた.これら2つの研究は、角度による抗力の変化を抗力係数に含めるか、投影面積に 含めるかの相違であり、本研究では後者を採用する.Kang らにならい、投影面積に変化 は、図3、図4を参考に、次のように記述される.

$$\bar{A} = A|\sin\phi| \quad (m = 2 \sim M - 1) \tag{14a}$$

$$\overline{A} = A(|\sin\phi| + \max[\cos\phi, 0]) \quad (m = 1)$$
(14b)

$$A = A(|\sin\phi| + \max\left[-\cos\phi, 0\right]) \quad (m = M) \tag{14c}$$

ここに、A: 球体要素の射影面積 (= $\pi/4 d^2$), \overline{A} : 流れと流木角度の影響を考慮した補正後の投影面積、 ϕ : 流木軸と河川の流れの相対速度の成す角度、M: 一本の流木を構成する球体要素の数である.なお、流木軸の方向は球体番号 m=1の球体から、もう一方の端の m = Mの球体に向かう方法を正とする.また、 $\cos\phi$ および $|\sin\phi|$ については、次のように求められる.

$$\cos\phi = \frac{u_{x}'t_{x} + u_{y}'t_{y} + u_{z}'t_{z}}{\sqrt{u'_{x}^{2} + u'_{y}^{2} + u'_{z}^{2}}}$$
(15)

$$|\sin\phi| = \sqrt{1 - \cos^2\phi} \tag{16}$$

ここに, (u'_x, u'_y, u'_z): 河川の流れの球体に対する相対速度, (t_x, t_y, t_z): 流木軸方向の単位べ

クトルをそれぞれ表す.



図4 流木捕捉地予定地の状況(岩手県小本川)



図5 計画されている流木捕捉工の平面図

3. 検討対象とする流木捕捉工と既往の実験

3.1 対象とする流木捕捉工

本研究では、岩手県小本川の山間地湾曲部に計画されている流木捕捉工を対象に検討を 実施する.図4の写真は現地の様子の航空写真である.一方、図5は、計画されている捕 捉工の平面図を示している.もともとの河道の内岸側に新河道を掘り、外岸側のもとの河 道を流木捕捉工として利用する構造となっている.したがって,流木を捕捉工の方向に, 自然の流木運動の慣性力(すなわちこの場合は遠心力に相当)な流れを用いて誘導しやす い形状となっていると考えられる.対象とするリーチのキロポストは,(KP:川に沿った 河口からのおおよその距離、単位は「km」)は、33.7kmから34.3kmの範囲であり,捕獲 池は約33.9kmから34.05kmの間に存在する.

本流木捕捉工周辺の樹木は広葉樹であり、比重が比較的大きい.このため、比重が1を 超えるような沈降性の流木についても考慮する必要がある.



図6 加藤らの実験により最適化された捕捉工の平面形状



図7 加藤らの実験における実験水路全体の様子

3.2 既往の実験(加藤らの実験)の条件

加藤らは、前述の岩手県小本川の流木捕捉工に関する比較的大規模な水理模型実験を実施し、捕捉効率に関する各種検討を行っている.この実験では、流入口の位置や大きさな どを数通りに変化させて水理模型実験を行い、その中で最も高い捕捉性能を有する捕捉工 の形状を実験により求めている.図6は、そのようにして最適化された形状を表している. 実験装置のスケールは 1/50 である.加藤らが用いた実験装置(寒地土木実験所)の全体の 様子を図7に示す.

本実験に用いられた想定河川流量は 10 年再帰確率の洪水 (Q_{10} =469.7m³/s)と, 30 年 再帰確率の洪水 (Q_{30} =680m³/s)の二通りであり,流木のスケールは長さ 6m, 直径 30cm のものと,長さ 12m, 直径 30cm の二通りが用いられている. なお,これらの値はいずれ も実河川スケールの値である. 流木の比重はいずれの場合も 1.1 (密度 1100kg/m³)とさ れている.実験における流木の投入本数は,長さ 6m のものは 3600本,長さ 12m のもの は 1800 本であった.

実験における底面のマニング粗度係数は、実験で観察された速度と深さを使用して推定 された.流れ方向に沿ったマニング粗度係数の分布を図8に示す.マニング粗度係数の平 均値は約 n=0.03 となった.



図8 実験における主流方向のマニング粗度係数の分布

4. 数値解析の条件

4.1 対象とした実験の条件

数値解析では、加藤らが検討した事例の中から、流木の長さが 6m の事例を対象に計算 を行った。実験では 3600 本の流木を使用したが、すべてを考慮して解析すると、計算負 荷が大きくなる.したがって、今回の計算では、流木の数を 200 または 800 に設定した。 なお,流木数の変更の影響については、今後さらに検討が必要である.

流木を構成する球形要素の数については、流木ごとに5球と10球を使用した2つの計 算ケースを検討した。2つのケースの結果がほぼ同じであることを確認したため、計算効 率を考慮して5つの球を使用したモデルを採用した。

4.2 対象とした計算領域と計算格子

計算は実際のスケールで実行された。計算グリッドの平面形状を図9に示す。計算に使用された河川キロポスト(KP)は、33.9kmから34.3kmの範囲とした。グリッドセルの数は112×40となった。平面計算グリッドの解像度は、過度の計算負荷とならずに河道の基本的な地形形状を十分に反映するように試行計算によって設定された。ただし、平面グリッド解像度の影響については、今後さらに調査する必要がある。流木捕捉施設のスリットは、

スリットバーのメッシュセルを不浸透性の障害物として設定することで表現された。ただ し、グリッドセルのサイズがスリット間隔(2m)よりも大きいため、やむを得ず粗い間隔 (6m)の障害物として設定された。流木片は、捕獲施設の入口で落下による乱気流の影響 がほとんどなくなる流れ距離を考慮して、図8の丸印の位置で空中から落下させて供給した。



図9 計算格子と計算領域

Run	Vertical layer	Turbulence model	Manning roughness coefficient n ¹	Specific gravity of wood ²
1	10	Nonlinear k-ε	0.03	1.1
2	20	Nonlinear k-ε	0.03	1.1
3	10	Nonlinear k-ε	0.025	1.1
4	10	Nonlinear k-ε	0.02	1.1
5	10	Nonlinear k-ε	0.015	1.1
6	10	Linear standard k-ε	0.025	1.1
7	10	Nonlinear k-ε	0.03	1.0
8	10	Nonlinear k-ε	0.03	0.9

表 2 計算条件

¹ Averaged value of Manning roughness in the experiment is n = 0.03

 2 Specific gravity of wood used in the experiment is 1.1.

4.3 比較を行った計算ケース

表2に示す8つの計算ケースで計算を実行し、結果の比較を行った.垂直方向のグリッド分割については、10層と20層の2つのケースを設定した.乱流モデリングの比較については、2次非線形k- ϵ モデルだけでなく、比較のためいn線形標準型k- ϵ モデルも使用した。図8から、計算対象領域の平均マニング粗度係数はn=0.03と推定される。ただし、上流の流木捕捉施設の接近領域はマニングの粗度係数が低くなっている。したがって、平均値であるn=0.03の場合だけでなく、n=0.025、0.02、および0.015の場合についても

計算を行った。実験に使用した木材の比重は実験と同じく 1.1 とした. これに加え,比重 が 1.0 と 0.9 の場合についても計算を実行し,流木比重が異なる場合の流木の挙動の感度 について検討した.

5.計算結果と考察

5.1 横断面内の流況

まず,遠心力の不均衡によって引き起こされる第一種二次流の構造を検討する。これは、 湾曲部分の流木挙動に大きな影響を与えると考えられている。

図9は、流木捕捉施設の上流側と補足エリア内にある断面 A-A'と B-B'(図8)に沿った Run1と2の流速ベクトルを示している。主流方向の渦度の分布も色の輪郭として示され ています。図8の上部と下部のパネルは、それぞれ20層(Run 2)と10層(Run 1)の 垂直グリッド分割の場合の結果を示している。断面の流れのパターンをわかりやすくする ために、垂直方向の目盛りを水平方向の目盛りに比べて3倍に拡大している.



図 10 Run 1 と Run 2 における横断面内の流況の比較

Run 1, Run 2 では,計算結果では,鉛直方向の計算グリッド解像度に関係なく、第一 種二次流がセクション A-A'で再現され、外岸(右岸)から左岸への流れが水路床付近で 確認された。また、垂直グリッド分割が 20 層の場合、水面近くの右岸側に反時計回りの 小さな渦セルが観測された。以下、この渦セルを,表面近くに生じているということで「表 面渦」と呼ぶことにする。分割が 10 層の場合、明確な表面渦は観察されなかった。セク ション B-B'では、流木捕捉領域で第一種二次流が依然として支配的であるが、20 層の場 合でも表面渦は観察されなかった。

図 11 は、断面速度ベクトルと、さまざまなマニング粗度係数を使用した場合の計算結 果における, A-A' セクションに沿った流れ方向の渦度のカラー等高線の比較を示してい る。二次流れのパターンは、粗度係数の大きさの影響を強く受けていることがわかる。支 配的な渦度セルが時計回りの方向にあることは明らかである(流れ方向の渦度の青色は、 屈曲部での第一種二次流を示す).ただし、表面渦(表面近くの反時計回り方向の渦セル、 流れ方向の渦度の赤い領域として示されている)は、反対の回転方向を持っている。図 9 の計算リーチの平面図は、A-A'セクションの上流リーチ(KP34.2~KP34.3)に反対方向 の曲がりが存在することを示している。これにより、第一種二次流が,反時計回りに励起 される.二次流の発生は曲がりの形状より遅れているため、KP34.2~KP34.3 のセクショ ンで生成された第一種二次流は、A-A'セクションでも持続する。これが、A-A'セクション で観察された表面渦の原因と考えられる.



図 11 種々のマニング粗度係数を使用した場合の断面流況の比較(A-A'断面,渦度分布と, 流速ベクトル)

図 12 は、線形,および非線形の乱流モデルを使用した場合の計算結果における、A-A' セクションに沿った流れ方向の渦度と,断面速度ベクトルと色の等高線を示している.両 方の結果は、底部近くに第一種二次流が存在することを示している。ただし、線形標準 kεモデルの計算結果は、非線形 k-εモデルで得られたものよりも大きな表面渦を再現され ている.



図 12 異なる乱流モデルを使用した場合の計算結果における断面流況の比較(A-A'断面, 渦度分布と流速ベクトル)

5.2 二次流強度の検討

流木捕捉施設周辺の流木の挙動のメカニズムを検討するには、流木運動の慣性力と、第 一種二次流の影響を考慮する必要がある。流木運動の慣性力は、曲がり角で流木を外側の 土手方向に押し出すように働く(すなわち流木に働く遠心力を意味する)。これは、流木を 捕獲領域に導くのに役立つと考えられる.一方、二次流は河床近くの内岸に向かって流れ、 木材の比重が1より大きい場合、流木が補足エリアに入るのを妨げる方向に働く。これら 2 つの相反する効果を調べるために、 A-A'セクションに沿った Un/Us のプロファイルに ついて検討する.ここで、Un は底部近くの内側の土手に向かう横方向の速度成分を示し、 Us は底面近くの主流方向の速度成分を示している.

図 13 は、さまざまなマニング粗度係数を用いた計算結果で得られた A-A' セクション

に沿った Un/Us のプロファイルを示している。この図から、底面の粗度が増すにつれて、 主流に対する二次流れの比率が大きくなることが明確に理解できる。

一方,図 14 は、異なる乱流モデルで得られた結果の A-A' セクションに沿った Un/Us のプロファイルを示す。非線形モデルで得られた結果は、線形モデルで得られた結果と比較して、より強い二次流れをもたらすことがわかる.



図 13 異なるマニング粗度係数の計算における Un/Us の分布の比較(A-A'断面)



図 14 異なる乱流モデルを用いた計算における Un/Us の分布の比較(A-A'断面)

5.3 流木挙動の検討

図 15 は、10 層の垂直グリッド分割の場合の、流木の入力ポイントから下流領域の河床 付近の流木の移動のシミュレーション結果と流速ベクトルを示している。図に示す時間は、 流木が投入されてからの経過時間である。この図は、流木が水路床の近くを移動しつつ、 2 つのグループに分かれていく様子が示されている. すなわち,一つは補足域に侵入する グループ,もう一つは,補足域よりも内岸側を進むグループである.後者は,湾曲に起因 する二次流の底面付近の成分によるものと推定される.

時計回りの再循環流が流木キャプチャ領域内で生成されている.このため、補足区域に入った流木は、再循環流とともに左岸側を移動していき、循環内部およびその周辺の流速が 小さいため、流木の一部は一部が堆積して停止している。このシミュレートされた流木挙 動は、水理実験での観察された流木挙動の様子と定性的に一致している.

しかし、t=120秒以降、流木捕捉エリアに入った流木のほとんどは、下流側のスリット

フレームワークを通過し、主流域に戻っている.一方,模型実験では、スリット枠を通過 する流木の割合は10%未満であった。すなわち、実験室での実験でのこの挙動は、計算で における流木挙動とはかなり異なっている。この相違の理由は、前述のように、スリット が数値グリッドで障害物セルとして表されるため、計算のスリット間隔が実験のスリット 間隔よりもかなり粗いためである.



図 15 計算結果における河床付近の流線と,流木の挙動(Run 1、鳥瞰図、赤いバー:流木、 垂直グリッド分割:10層、t:流木入力後の経過時間)

図 16 は、t = 180 秒での底部付近の速度ベクトルと流木の分布を示している。緑の破線 は流木が止まって堆積した場所を示す。一方、図 17 は、模型実験における堆積領域を示 している。流木の投入本数が異なるため、堆積密度もかなり異なっているが、堆積位置と その形状はほぼ一致している。



図 16 底部近くの速度ベクトルと t=180 秒での流木分布の平面図 (Run 1)。



図17加藤らの水理模型実験における流木堆積領域(上からの写真)

加藤らが行った実験で、流木の比重は、捕捉域が計画されている地域の支配的な樹種を 考慮して 1.1 に設定された.一方、流出直後の針葉樹や乾燥樹の密度はこれより小さい。 樹木の密度の影響を確認するために、Run 8(比重=0.9)、Run 7(比重=1.0)、Run 1(比 重=1.1)の結果を比較した.他のすべての条件(比重を除く)は、前の計算の条件と同じ に維持された。

図 18 は、3 つの異なる比重(0.9、1.0、および 1.1) に対する t = 60 秒においての計算 結果を示している。流速ベクトルは、比重 0.9 のケースでは水表面の流れの状態と、1.0 と 1.1 の比重のケースでの底面付近の流れの状態を示している。比重が 0.9 のとき、流木 は二次流による外向きの流れの影響を強く受け、流木は外岸に向かっている。この二次流 の働きにより、流木は側壁の近くに押し付けられ堆積している。比重が 1.0 の時でも、外 岸への動きは非常に大きかった。この挙動は、表面近くの二次流れの方向に加えて、湾曲 した部分での流木の運動の慣性力(すなわち,流木自身に働く遠心力)によって引き起こ されたと考えられる.



図 18 流木比重が異なる場合の計算結果の比較

5.4 流木捕捉率の検討

各 Run における流木捕獲率(捕獲された流木の総数÷供給された流木の数×100%)を 表3に示す。実験では、捕捉領域に入る流木のほとんどは、捕捉域下流側のスリットフレ ームによってトラップされた。しかしながら、今回の計算では、上で説明したようにグリ ッドの解像度が粗いため、ほとんどの流木片がスリットフレームを通過した。そこで、捕 捉領域からスリットフレームを通過したて逸脱した流木の数も捕捉された流木本数に含め た捕獲率を算出した。

Run	Capture ratio (%)	
1	32	
2	39	
3	59	
4	96	
5	100	
6	88	
7	94	
8	100	
Laboratory	$65 \sim 87.5$	
experiment		

	表	3	計算結果におけ	る流木捕捉率の比較
--	---	---	---------	-----------

この結果をみると、まず、マニングの粗度係数の値が減少するにつれて、流木捕捉率が 増加することが理解できる(Run 1 (n = 0.03)、Run 3 (n = 0.025)、Run 4 (n = 0.02), Run 5 (n = 0.015)の比較から)。また、木材の比重が減少するにつれて、流木捕捉率が 増加することも明らかである(Run 1 (比重= 1.1)、Run 7 (比重= 1.0)、Run 8 (比重= 0.9) の結果の比較から).一方で、Run 3 (非線形 k- ϵ モデル)と Run 6 (線形標準 k- ϵ モデ ル)の結果を比較することで、乱流モデルが捕捉率に与える影響を確認できる。すなわち、 標準の線形 k-ε モデルを使用した計算結果では、線形モデルを使用した場合よりも高い流 木捕捉率を示している。なお、加藤さらの水理模型実験では、流木捕捉率は65~87.5%の 範囲であった。

6. まとめ

本研究事業では、流木運動と流木捕捉施設周辺の堆積の挙動をシミュレートするために、 3D-3D(三次元河川流および三次元流木挙動)計算モデルを構築した。事例として、岩手 県小本川の捕捉工を選定し、検討地の支配的な樹木種類である広葉樹を考慮して、流木の 比重は1より大きいと仮定した検討を実施した。このような状況における流木は水路床の 近くを移動するため、常に底面摩擦の影響を受ける。したがって、底面摩擦のモデリング が重要となり、これにはスライド運動(流木軸方向)とローリング運動(横方向)の摩擦 力の違いを考慮した異方性床摩擦モデルを提案した。また、各球体要素に対する流れの投 影面積の変化を考慮して、流れ方向と流木軸方向の間の角度による抗力の変化にてういて も考慮したモデル化を行った.

数値解析結果は加藤らによる既往水理実験結果をお概ね良好に再現できたが、スリット 間隔を正確に表現するにはグリッド解像度が不十分であったため、スリットによる流木捕 獲については再現できなかった。

異なる種々の水理条件と計算条件の下で計算を実行し、支配的な要因が何であるのか、 またそれが流木挙動にいかなる影響を及ぼすのかについて、詳細に検討した.この結果、 川の曲がり角の外岸側に沿った流木捕捉施設付近での流木の挙動と捕獲率は、マニングの 粗度係数と乱流モデルの二つの要素に大きく依存することを示しました。このメカニズム は、マニングの粗度係数および乱流モデルが、横断面内での第一種二次流の構造に支配的 な影響を及ぼすことが原因と考えられた.

また、流木の挙動は,流木そのものに働く慣性力(湾曲部の場合は遠心力に相当)と, 第一種二次流によるスパイラル構造の双方から影響をうけ,流木の比重が1より大きい場 合、この2つの要因は流木挙動に相反する作用を及ぼすことが指摘された.この点は、木 材の比重が1より大きい場合の湾曲部の流木挙動を複雑なものとしており,流木捕捉施設 設計の際に,このことを十分留意する必要があると考えられる.

謝辞

本研究の遂行にあたり,株式会社水工リサーチの加藤一夫氏より,実験データの提供を うけるとともに,種々のご助言をいただいた.また,韓国国立交通大学のカン・テウン研 究員より,数値解析モデルの構築について,ご助力をいただいた.また,名城大学理工学 部准教授岡本隆明先生からも種々の有益なご助言をいただいた.ここに記して深甚なる謝 意を表する.

参考文献

 Schmocker, L.; Weitbrecht, V. Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures. J. Hydraul. Eng. 2013, 139, 683–695, doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000728.

- 2) 岡本隆明,山上路生,橿原義信: 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 B1,74(4), pp.673-678,2018.
- 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,24, pp.137-142,2018.
- 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) 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, Vol.15, pp.415-422, 2012.
- 6) Osada, K.; Shimizu, Y. DEVELOPMENT OF NUMERICAL ANALYSIS METHOD FOR DRIFTWOODS BEHAVIOR WITH BENDING DEFORMATION. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B1 (Hydraulic Engineering 2018, Vol. 74, pp. I_763–I_768, doi:10.2208/jscejhe.74.i 763.
- Kimura, I.; Kitazono, K. Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D-2D model to heavy wood jamming around obstacles. Environ. Fluid Mech. 2019, 20, 503– 525, doi:10.1007/s10652-019-09709-6.
- 8) 加藤一夫, サムナー圭, 三浦忠昭, 菅野貴詳, 千葉喜一, 井上卓也, 清水康行: 流木捕捉 施設における流木の挙動に関する数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.4, pp., 2019.
- Engelund, F. Flow and Bed Topography in Channel Bends. J. Hydraul. Div. 1974, 100, 1631– 1648, doi:10.1061/jyceaj.0004109.
- 10) Kimura, I.; Onda, S.; Hosoda, T.; Shimizu, Y. Computations of suspended sediment transport in a shallow side-cavity using depth-averaged 2D models with effects of secondary currents. HydroResearch 2010, 4, 153–161, doi:10.1016/j.jher.2010.04.008.
- Uchida, T.; Fukuoka, S. Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow. Adv. Water Resour. 2014, 72, 45–56, doi:10.1016/j.advwatres.2014.05.002.
- 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) Kang,T.; Kimura,T. Computational modeling for large wood dynamics with root wad and anisotropic bed friction in shallow flows. Adv. Water Resour. 2018, 121, 419–431, doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.09.006.
- 14) Kang, T.; Kimura, I.; Shimizu, Y. Study on advection and deposition of driftwood affected by root in shallow flows. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B1 (Hydraulic Engineering) 2018, 74(4), 757-762.
- 15) Kang, T.; Kimura, I.; Shimizu, Y. Numerical simulation of large wood deposition patterns and responses of bed morphology in a braided river using large wood dynamics model. Earth Surf. Process. Landforms 2020, 45, 962–977, doi:10.1002/esp.4789.
- 16) Kang, T.; Kimura, I.; Onda, S. Application of Computational Modeling for Large Wood Dynamics with Collisions on Moveable Channel Beds. Adv. Water Resour. 2021, 152, 103912, doi:10.1016/j.advwatres.2021.103912.

- 17) Nelson, J.M.; Shimizu, Y.; Abe, T.; Asahi, K.; Gamou, M.; Inoue, T.; Iwasaki, T.; Kakinuma, T.; Kawamura, S.; Kimura, I.; et al. The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applica-tions. Adv. Water Resour. 2016, 93, 62–74, doi:10.1016/j.advwatres.2015.09.017.
- 18) iRIC web site. Available online: http://i-ric.org/en/2020 (accessed on 7 April 2021).
- Schiller, L.; Naumann, Z. A drag coefficient correlation. Journal of Modern Physics, 1933, 77, 18–320.
- 20) Koshizuka, S.; Oka, Y. Moving particle semi-implicit method: a gridless approach based on particle interactions for incom-pressible flow simulation. Proceedings of 3rd Workshop on Supersimulators for Nuclear Power Plants 1995, Tokyo, pp.43-49.27.
- 21) 越塚誠一:数值流体力学,培風館, pp178-181, 1997.
- 22) Persi, E.; Petaccia, G.; Fenocchi, A.; Manenti, S.; Ghilardi, P.; Sibilla, S. Hydrodynamic coefficients of yawed cylinders in open-channel flow. Flow Meas. Instrum. 2019, 65, 288–296, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2019.01.006.
- 23) Persi E, Petaccia G, Sibilla S, Brufau P, García-Navarro P. Calibration of a dynamic Eulerian-lagrangian model for the computation of wood cylinders transport in shallow water flow. J. Hydroinf. 2019, 21, 164–179.