

流木群の集積による 流水抵抗の 3 次元数値計算

3D NUMERICAL PREDICTION OF FLOW RESISTANCE DUE TO TRAPPED DRIFTWOOD

中村 元太¹・牛島 省²・黒田 望¹・永井 克明³

Genta NAKAMURA, Satoru USHIJIMA,
Nozomu KURODA and Katsuaki NAGAI

¹ 学生員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 修士課程 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラス)

² 正会員 工博 京都大学教授 学術情報メディアセンター (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 学生員 京都大学工学部 地球工学科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

A computational method, MICS, was applied to the open-channel flows through multiple driftwood fixed in a flume. MICS is a solver for multiphase fields including gas, liquid and solid phases, which are treated as incompressible and immiscible fluids in the computational procedures. Each driftwood is represented with multiple tetrahedron elements and its numerical model has collision-detection spheres near the surface. To improve the computational efficiency of the collision detection among many driftwood, the numerical procedure was parallelized on the shared-memory system. The computational method was applied to the previous experimental results, in which around 50 driftwood were fixed in a flume and their characteristics regarding resistance against open channel flows were investigated. As a result of the computations, it was shown that the resistance coefficients and the differences of water levels between upstream and downstream of the driftwood are reasonably predicted with the present method.

KeyWords : driftwood, free-surface flow, flow resistance, MICS

1. はじめに

近年, 出水時における流木の被害が, 数多く報告されている¹⁾. 例えば, 図-1 に示すように, 流木が橋脚に集積し橋を倒壊させたり, 取水施設などに流木が詰まり水理構造物の機能を低下させるといった事例がある²⁾. また, 山間部においては流木が土砂とともに堆積され, 天然ダムが形成される. その崩壊による被害も無視できない問題である³⁾. これらの被害の多く



図-1 橋脚付近で捕捉された流木群

は, 発生した流木が流れにより輸送されて, 河道内樹木や水理構造物に捕捉されることで生じる. 捕捉された流木群の流水抵抗により, 上流部で水位の上昇が起こることは, 水理構造物の安全評価上無視できない現象である. したがって, 集積した流木群の流水抵抗を

把握することは, 水工学上, 非常に重要な課題であると考えられる.

これらの問題に関する既往研究として, 流木群の輸送と集積についての研究⁴⁾, 個別要素法を用いた流木群の捕捉過程の数値解法⁵⁾, 流木による閉塞機構の数値計算⁶⁾などが行われている. このように, 既報では流木群の輸送および集積過程についての研究が多い. いずれの研究においても貴重な成果が報告されているが, 流木を球体連結モデルを用いてモデル化しているものが多く, 計算精度の向上について検討する余地があると考えられる.

本報では, 物体を含む自由水面流れを固気液多相場として捉え, 抗力係数などの経験定数が不要な解法である MICS を用いる. 既報⁷⁾では, 流木の輸送と集積について実験と数値解析を通して本手法の有効性が示されている. 四面体要素を用いて流木を再現する本解析手法では, 複雑な流木形状および流体力の評価を正確に扱うことが可能である.

本研究では, 自由水面を有する流れ場に捕捉され, 移動しない状態にある流木群周辺の流況に着目し, 流木群による水位の堰上げ効果や流水抵抗の評価に対する数値解法の有効性を検討する.

2. 数値解析手法

(1) 物体を含む自由水面流れの計算法

本報で用いる解析手法では、最初に気相と液相のみから構成される多相場の基礎式を解き、次に得られた計算結果に物体の密度を考慮して物体に作用する流体力を定める。気相と液相から構成される場の基礎方程式は、次のように表される。

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) &= f_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ &+ \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu u_j) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)はEuler表記による質量保存則、式(2)は非圧縮条件、式(3)は保存形表示された運動方程式である。ここで、 t は時間、 x_i は直交座標系の座標成分、 u_i は気相と液相の質量平均速度であり、 p 、 ρ_f 、 μ は順に気相と液相の体積平均圧力、密度、粘性係数である。また、 f_i は外力加速度の x_i 成分である。

基礎式は、空間中に固定されたコロケート格子配置の元で有限体積法により離散化される。式(1)に対して保存形スキームを用いて数値解を求めることにより、気液相の密度 ρ_f 、すなわち自由水面形状が定められる。式(3)をコロケート格子上で離散化し、MAC系解法に基づく予測段階、圧力計算段階、修正段階の演算を順に適用する。予測段階では、セル中心における流速の推定値 u_i^* を陰的解法であるC-ISMAC法により求める。また、圧力計算段階では、C-HSMAC法⁸⁾を利用する。これらの解法の詳細は、既報⁹⁾に示すとおりである。

(2) 物体に作用する流体力

流体中に存在する流木群は剛体であると仮定し、四面体要素の集合として表現する。

物体を構成する四面体領域に作用する流体力は以下のように計算する¹⁰⁾。流体計算セル内に物体部分が含まれる場合には、式(3)に対応する次の運動方程式が成り立つとする。

$$\begin{aligned} \frac{Du_i}{Dt} &= -\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_b} g \delta_{3,i} - \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial \phi^*}{\partial x_i} \\ &+ \frac{1}{\rho_b} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu u_j) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度、 x_3 は鉛直上方に向かう直交座標系の成分、 $\delta_{i,j}$ はクロネッカーのデルタである。 ϕ^* は圧力計算により定められる静水圧からの偏差である。式(4)の右辺第1項は浮力、第2項は流れにより生ずる圧力、第3項は粘性力に相当する。また、 ρ_b はセル内に占める物体部分の質量が考慮された多相場の密度であり、四面体サブセル法¹¹⁾により定められる。四面体サブセル法は、流体計算セルを細分割してサブセルを生成し、四面体内に含まれるサブセルの個数から、セル内の物体体積を近似的に求める手法である。

図-2に流体力の導出方法の概略を示す。物体に作用する流体力は、式(4)の右辺から定められる。ある流体計算セル C 内において、セル体積 V_C 、物体 k を構成する四面体要素 T_{km} がセル中に占める体積割合 α を用いて次式から流体力成分 F_{Cmi} 求められる。

$$F_{Cmi} = \alpha \rho_b V_C \cdot RHS \quad (5)$$

ここに、 RHS は、式(4)の右辺を表す。

物体の動的応答計算の結果は、多相流場に反映される。四面体要素 T_{km} の速度ベクトル v_{km} を用いて、次式よりセル内の質量平均流速 u を定める。

$$u = \frac{1}{m_C} \left(m_f u_f + \sum_k \sum_m \rho_{bk} \Delta T_{Ckm} v_{km} \right) \quad (6)$$

ここで、 m_C と m_f は、それぞれ着目する流体計算セル内の全質量および気相と液相の質量、 u_f は気相と液相の質量平均流速ベクトルである。

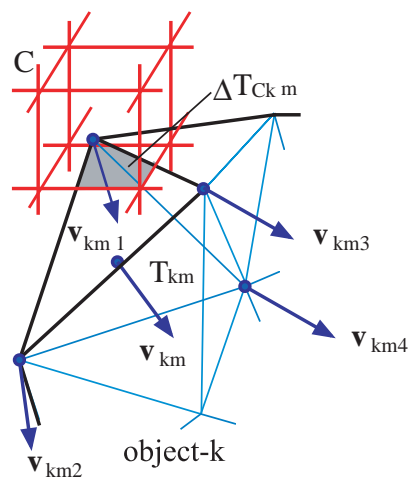


図-2 物体の速度を多相場に考慮する方法

3. 数値解析結果

本研究では、水理構造物などに捕捉され、移動しない流木群を対象として、それらの流水抵抗を検討する。計算対象としては、櫻井ら¹²⁾の実験結果を用いる。

(1) 計算条件

計算では、櫻井ら¹²⁾が用いた水槽と同様の領域内の水および空気部分に対して、流下方向、横断方向、鉛直方向に $100 \times 30 \times 30$ の流体計算セルを決定した。時間増分 Δt は、流木を設置する計算では、 0.5×10^{-4} s とし、流水抵抗を検討する計算では、 1.0×10^{-2} s とした。計算には、京都大学学術情報メディアセンターの T2K スーパーコンピュータ (Fujitsu Sparc Enterprise M9000) を利用した。

計算における流れ場の概略図を図-3 に示す。水路幅 B 、水路高さ H 、流木群設置長さ L 、水路長さ L_0 は、それぞれ 1.5 m, 1.2 m, 2.0 m, 10 m である。流れ場中央部に流木群を設置し固定した。

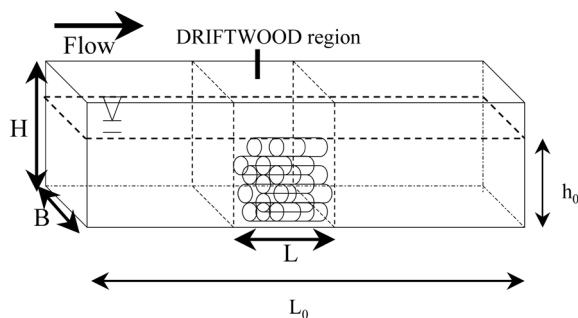


図-3 計算上での水路の概要

櫻井ら¹²⁾の研究では、現地で採取した流木を用いて図-3 に示すような水路内の中央部に流木群を設置し流水抵抗が実験的に検討された。計算に用いた流木モデルの基本形状を図-4 に示す。基本形状は、半径 0.06 m、長さ 1.50 m の円錐台とした。この基本形状は、実験における平均的な流木形状から定めた。

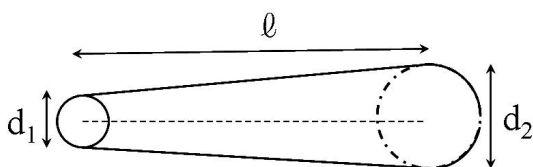


図-4 計算で用いた流木モデルの基本形状

表-1 計算で用いた流木モデルの形状

	d_1 (m)	d_2 (m)	軸の形状
type-1	0.06	0.06	直線
type-2	0.05	0.07	直線
type-3	0.05	0.07	曲線

各モデルの四面体要素数と節点数は、それぞれ 109 および 54 である。計算で用いた流木モデルは、表-1 に示す type1 ~ type3 の 3 種類の形状を用いた。また、大きさに関しては type1 ~ type3 の流木モデルに対して全方向に 0.93, 0.97, 1.00, 1.03, 1.07 倍の 5 種類を設定した。なお、表-1 に示す軸の形状における「曲線」とは、片持ち梁の原理で先端集中荷重を与え先端変位が 7.5cm となるように曲げたものを指す。計算では、5 種類の大きさの流木モデルをほぼ 20% ずつになるように混合させた流木群を用いた。

図-3 に示す領域に、これらの流木モデルを落下させて各流木の位置を定めた。空隙率 ϕ は流木が占める体積 V_w と設置体積 V を用いて次式のように定義される¹²⁾。

$$\phi = 1 - \frac{V_w}{V} \quad (7)$$

(2) 接触判定の並列化

本解析手法では、物体の接触判定に接触判定球を用いている。接触判定球は、物体表面を構成する各四面体要素につき 1 つ配置している。

本報では流木の接触判定を並列化した。この方法では、まず領域全体に幅が接触判定球の直径の最大値に等しい仮想セルを生成し、接触判定球が含まれるセルを定める。次に、着目する接触判定球が属するセルと隣接するセルにある接触判定球についてのみ接触判定を行う。すなわち、図-5 において、判定球 A に対して判定球 B, D については判定を行うが、判定球 C, E については行わない。対象となる物体に含まれる接触判定球を複数のスレッドに割り当てることにより接触判定処理を並列化した。

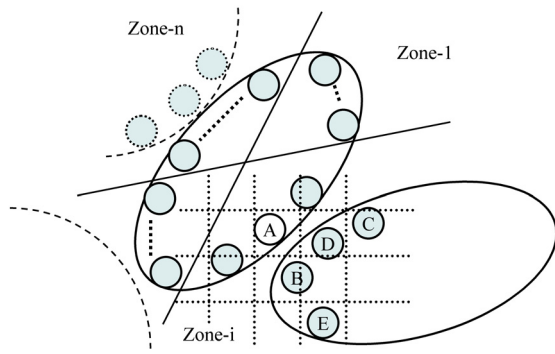


図-5 接触判定の並列処理の概念図

並列化された接触判定の計算時間を検討するため、流木モデルを60本落下させた場合のスレッド数とスピードアップとの関係を図-6に示す。各流木モデルの接触判定球の数は、108である。スピードアップは、逐次計算に要する計算時間を並列計算に要する計算時間で除した値である。

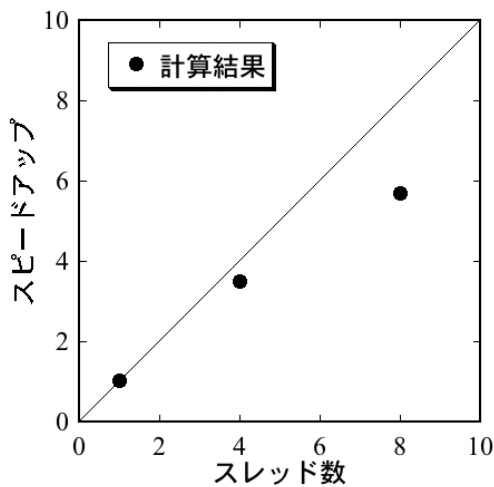


図-6 スレッド数とスピードアップの関係

図-6に示すように、スレッド数の増加に対するスピードアップの上限は、6程度となった。この原因としては、1つの流木モデルに接触する流体本数の最大が6本程度となるためであると考えられる。

(3) 流水抵抗に関する検討

計算条件は、表-2のように設定した。表-2に示すように、空隙率 ϕ は0.680および0.832とした。

表-2 計算条件

空隙率 ϕ	流木本数	初期水深 h_0	流入流速
0.680	67	1.00m	0.33m/s
0.680	67	0.85m	0.39m/s
0.680	67	0.70m	0.48m/s
0.832	35	1.00m	0.33m/s
0.832	35	0.85m	0.39m/s
0.832	35	0.70m	0.48m/s

実験で得られた損失係数を計算結果と比較する。櫻井ら¹²⁾によって定義された損失係数 f_{dwL} は、流下方向の単位流木層厚当たりの損失が流木中の速度水頭に比例するとしたもので、次式で表される係数である。

$$\Delta H_L = f_{dwL} L \frac{V_{mid}^2}{2g} \quad (8)$$

ここで、 ΔH_L ：流木上下流の水位差 (m)、 f_{dwL} ：損失係数 (1/m)、 L ：流木層厚 (実験・計算ともに流木設置長さ) (m)、 V_{mid} ：断面平均流速 (m/s) (断面積は、上流水深と下流水深の平均値より算出する)、 g ：重力加速度 (m/s²) である。

空隙率 $\phi=0.680$ および $\phi=0.832$ における実験と計算の比較検討を行った。図-7に、水位差 ΔH_L (m)と断面平均流速 V_{mid} (m/s)を比較した結果を示す。

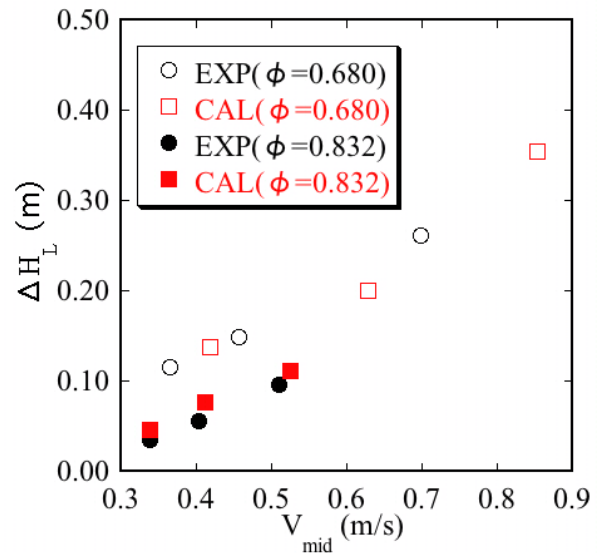


図-7 平均流速と水位差の関係

空隙率が高いケースおよび小さいケースともに、計算結果において流速が増加するにつれて水位差が増加する傾向が示されている。この傾向は、実験結果と一致し、良好に流木群の流水抵抗を再現できていると考えられる。

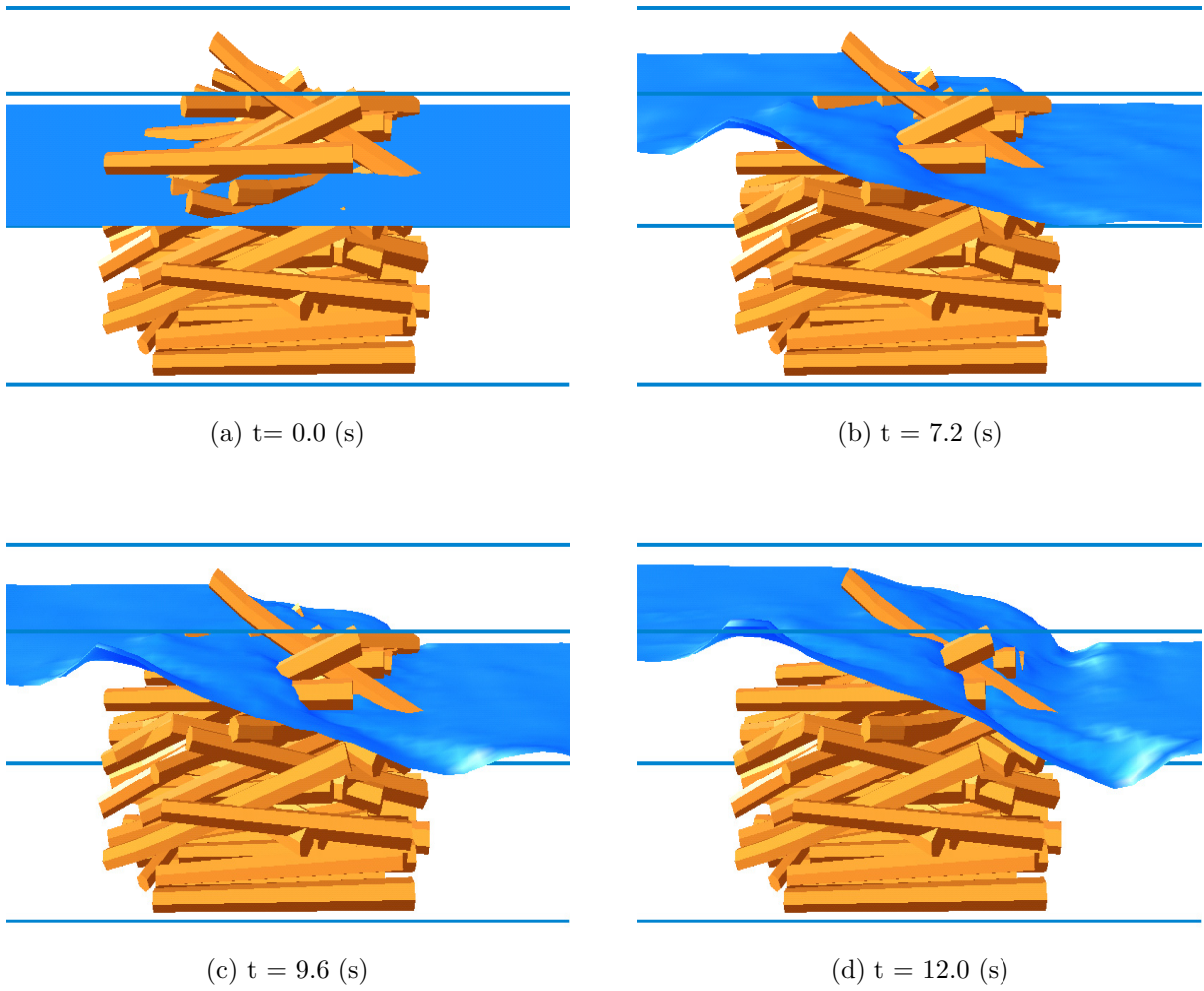


図-8 流木群付近の流況の計算結果 ($\phi = 0.680$)

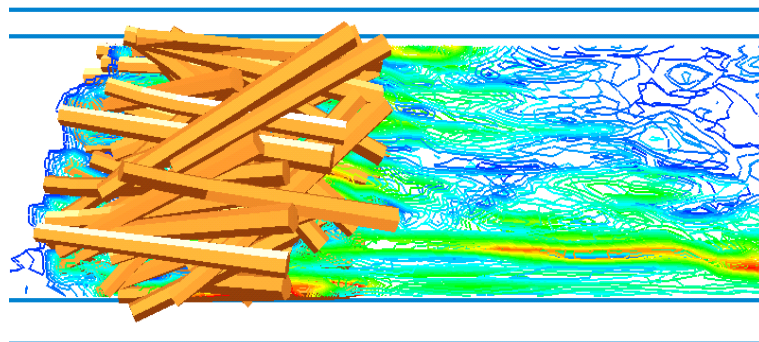


図-9 流木群周辺の渦度分布 ($\phi = 0.680$)

図-8に、空隙率 $\phi=0.680$ のケースにおける流木群付近の各時刻の水面形の計算結果を示す。時間の経過とともに構造物の上流側で水位が上昇する現象である「堰上げ」が起こり、流木群の存在が流水抵抗として働き流木上流部の水位が増加する様子が確認できる。その後、ある程度時間が経過すると水位差はほぼ一定となる。このように、流木群付近の流況が、妥当に計算されていると考えられる。

図-9は、空隙率 $\phi=0.680$ 、水深 h_0 が 1.00 m のケースの計算結果における、高さが 0.55 m の水平断面内の流木群周りの渦度分布を示している。流木群下流域の複雑な渦度分布が確認できる。流木群下流域では、集積した流木群の隙間を水が流れることにより、非常に複雑な流れ場の形成が計算されている。また、その影響が流木群下流部付近だけではなく、広く下流域にまで及んでいることが示されている。

図-10に、損失係数 $f_{dwL}(1/m)$ と断面平均流速 $V_{mid}(m/s)$ の関係を示す。まず、空隙率が小さいケースに関しては、計算結果において流速が増加するにつれて損失係数が減少する傾向が示されている。この傾向は、実験結果と一致し、良好に流木群の流水特性を再現できていると考えられる。次に、空隙率が大きいケースに関しては、計算結果において流速が増加するにつれて損失係数が大きくなり、ほぼ一定値となっていることが確認できる。

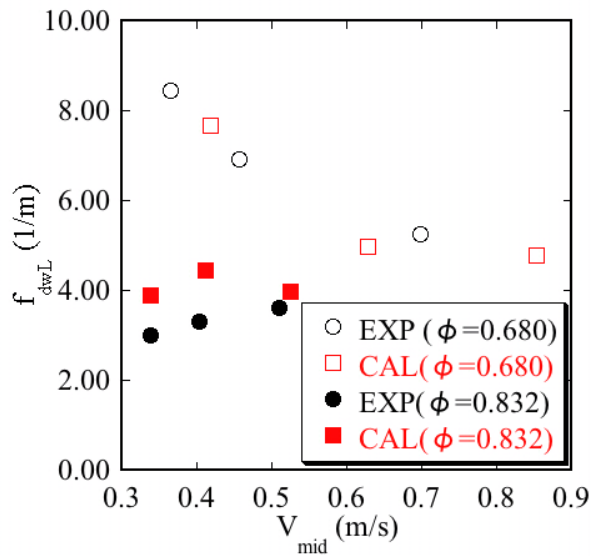


図-10 平均流速と損失係数の関係

4. おわりに

本報では、水路に固定された流木群を含む自由水面流れの数値解析を行った。流木群の接触判定を並列化し、流木群を設置する計算において、スレッド数8の場合に計算時間を約1/6に短縮することが可能となった。

次に、流れ場に固定された流木群に対して、流水抵抗の指標の一つと考えられる損失係数の検討を行った。その結果、流速と空隙率が流水抵抗に影響を与える要因の一つであることが計算でも示された。また、流木群による堰上げの様子がほぼ妥当に計算され、流木群周りには複雑な流れ場が発生していることを確認した。

今後は、輸送から捕捉に至るまでの一貫した流木群の挙動について検討していきたいと考えている。

謝辞

本研究で用いた実験データは、独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 河川・ダム水理チーム 主任研究員である櫻井寿之氏に提供していただいたものである。ここに記して厚く謝意を表する。

参考文献

- 鈴木優一, 渡邊康玄. 沙流川での台風10号における流木の挙動. 水工学論文集, Vol. 6, pp. 1633-1638, 2004.
- 松本健作, 小葉竹重機, 清水義彦, 石田和之, 近内壽光, IoakimIoakim. 流木塊の橋脚への堆積に関する研究. 水工学論文集, Vol. 6, pp. 925-930, 2001.
- 田畑茂清, 水山高久, 井上公夫. 天然ダムと災害. 古今書院, 2002.
- 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, Vol. 8, pp. 543-550, 1994.
- 清水義彦, 長田健吾, 高梨智子. 個別要素法を用いた流木群の流動と集積に関する平面2次元数値解析. 水工学論文集, Vol. 50, pp. 787-792, 2006.
- 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥謙介. 山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション. 水工学論文集, Vol. 51, pp. 835-840, 2007.
- 牧野統帥, 牛島省, 吉川教正, 禰津家久. 流木の流送と集積に関するT型個体モデルによる3次元数値計算. 水工学論文集, Vol. 6, pp. 991-996, 2008.
- 牛島省, 奥山洋平. 非圧縮性流体計算におけるC-HSMAC法とSOLA法の収束特性. 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 197-202, 2003.
- 牛島省, 福谷彰, 牧野統帥. 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法. 土木学会論文集, Vol. 64/II-2, pp. 128-138, 2008.
- 吉川教生, 牛島省, 中村元太. 円柱群に作用する波動流れの流体力に関する数値解析. 水工学論文集, Vol. 53, pp. 1039-1044, 2009.
- 牛島省, 牧野統帥, 禰津家久. 四面体サブセル法を用いる市街地に流入する氾濫流の3次元数値計算. 水工学論文集, Vol. 51, pp. 787-792, 2007.
- 櫻井寿之, 箱石憲昭, 柏井条介. 流水型ダム流木対策スクリーンの水理設計. 水工学論文集, Vol. 19, pp. 17-28, 2009.

(2009.9.30 受付)