

流木群に関する流水抵抗の数値計算

Numerical prediction on flow resistance of driftwoods

- 中村元太, 京都大学大学院 社会基盤工学専攻, 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ
牛島省, 京都大学 学術情報メディアセンター, 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
黒田望, 京都大学大学院 社会基盤工学専攻, 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ
永井克明, 京都大学工学部 地球工学科, 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

Genta Nakamura, Department of Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University, Kyoto 615-8540 Japan
Satoru Ushijima, Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, 606-8501, Kyoto, Japan
Nozomu Kuroda, Department of Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University, Kyoto 615-8540 Japan
Katsuaki Nagai, Faculty of Global Eng., Kyoto University, Kyoto 606-8501 Japan

This paper deals with the applicability of the computational method to the three-dimensional free-surface flows affected by the multiple driftwoods trapped in the flows. To deal with the free-surface flows including the complicated-shaped solid objects, a computational method MICS is employed in the present study. It has been shown that the MICS enables us to represent the shapes of the solid objects with tetrahedron elements and to estimate the fluid forces acting on the objects without empirical constants like drag and lift coefficients. The numerical procedures regarding collision detections among the objects are parallelized in the present study. As a result of the application to the experiments, in which actual driftwoods are used in a flume, it was shown that the MICS allows us to predict the resistance coefficients of a group of driftwoods and the differences of water levels between upstream and downstream of them.

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, Fig.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⁾.



Fig. 1: Captured driftwoods nearby pier

これらの被害の多くは, 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. このように, 集積した流木群の流水特性を把握することは, 非常に重要な課題であると考えられる. 本報では, 捕捉された流木群が流れ場に与える流水抵抗に着目する.

これまでの流木に関する研究として, 流木群の輸送と集積についての研究⁽³⁾, 個別要素法を用いた流木群の捕捉過程の数値解法⁽⁴⁾, 流木による閉塞機構の数値計算⁽⁵⁾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い.

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⁽⁶⁾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モデル化する本解析手法では, 複雑な流木形状を再現することが可能であり, 流体力を適切に評価できることが示されている.

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) 基礎方程式

本報で用いる解析手法では, 物体を含む自由水面流れ場を物性値の異なる混ざり合わない非圧縮性流体の混合体として取り扱う. この多相場に対する基礎方程式は, 次のように表される.

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

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

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

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-ISMALC 法により求める. また, 圧力計算段階では, C-HSMALC 法⁽⁷⁾を利用する. これらの解法の詳細は, 既報⁽⁸⁾に示している.

(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⁽⁹⁾. 流体計算セル内に物体部分が含まれる場合には, 式 (4) に対応する次の運動方程式が成り立つとする.

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

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. 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⁽¹⁰⁾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. また, ここに, 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.

Fig.2 に流体力の導出を示す. 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, 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.

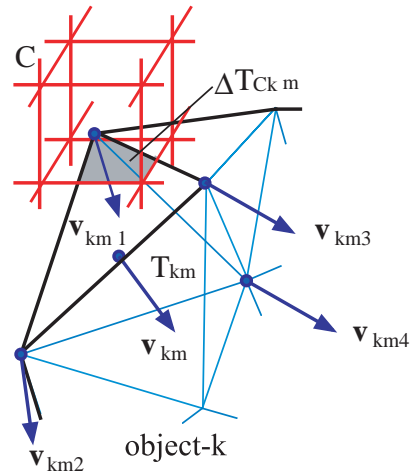


Fig. 2: The way of considering the velocity of objects in calculating

3. 数値計算結果

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, 独立行政法人土木研究所の実験結果⁽¹¹⁾を用いる.

(1) 計算条件

計算では, 櫻井ら⁽¹¹⁾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 においては, 流木を設定する固体計算では, 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 M 9000) を利用した.

計算における流れ場の概略図を Fig.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させた．

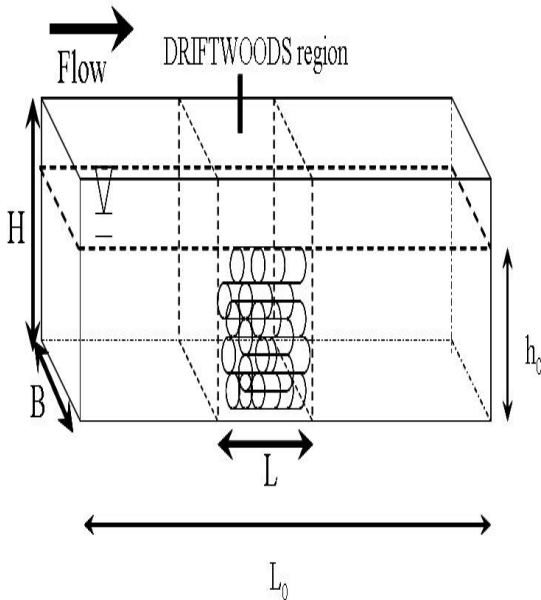


Fig. 3: An outline of a waterway in calculating

櫻井ら⁽¹¹⁾の研究では，現地で採取した流木を用いて Fig.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 Fig.4 に示す．基本形状は，半径 0.06 m，長さ 1.50 m の円柱とした．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．

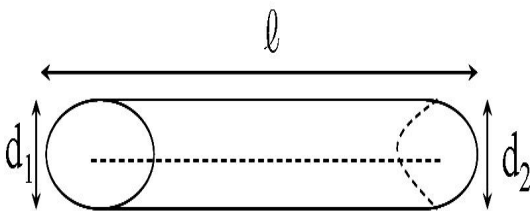


Fig. 4: The basic model of driftwood in calculating

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，大きさと形状をそれぞれ 5 および 3 種類変えて 15 種類の形状とした．形状については，Table.1 に示すように type1 ~ type3 の 3 種類に，その形状を全方向に 0.93, 0.97, 1.00, 1.03, 1.07 倍の 5 種類に設定した．

Tab. 1: The shape of driftwood in calculating

	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

(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．各接触判定球は，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行う際に並列化処理を施した．Fig.5 に示すように，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．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数に割り当てることにより接触判定を並列化させた．

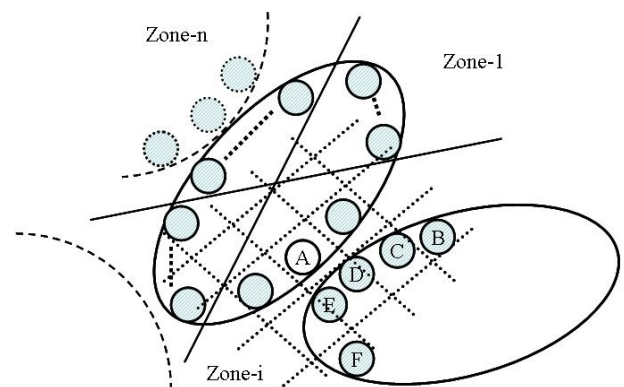


Fig. 5: A schematic drawing in parallelized-calculating collision detections

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 Thread 数と Speed up との関係を Fig.6 に示す．各流木モデルの接触判定球の数は，108 である．Speed up 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．

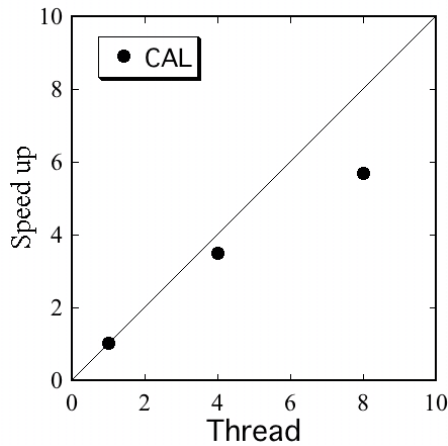


Fig. 6: The relationship between thread number and speed up

比較した接触判定には、球同士の接触と壁との接触が含まれている。Thread 数の増加に対する Speed up の低減は、1/6 程度となった。原因としては、接触する物体数が Thread 数ほどおおきくないためであると考えられる。

(3) 計算ケース

Fig.3 に示すように、実験で流木を設置した領域と同一の領域に流木を落下させて各流木の位置を定めた。次に、そのデータをもとに流れ場に流木群を設置した。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⁽¹¹⁾。

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

計算ケースは、Table.2 のように設定した。Table.2 に示すように、空隙率 $\phi = 0.680, 0.832$ を対象とした。

Tab. 2: The calculation case

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
		0.85m	0.39m/s
		0.70m	0.48m/s
0.832	35	1.00m	0.33m/s
		0.85m	0.39m/s
		0.70m	0.48m/s

(4) 実験結果と計算結果の比較

Fig.7 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鉛直方向位置が、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形状の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、

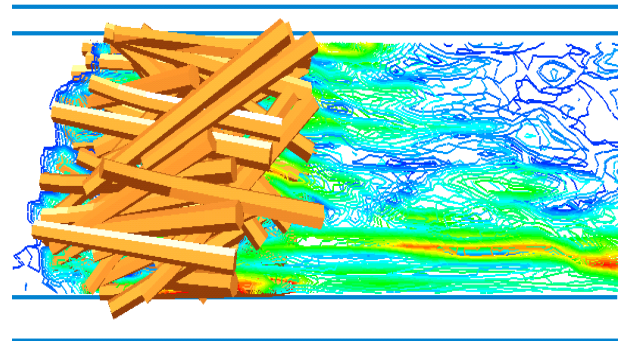


Fig. 7: Distribution of vorticity around driftwoods ($\phi = 0.680$)

形成される非常に複雑な流れ場が再現されている。また、その影響が流木群下流部付近だけではなく、さらに下流域にまで及んでいることが示されている。

水位差 ΔH_L (m) と断面平均流速 V_{mid} (m/s) の関係を実験と計算で比較した結果を Fig.8 に示す。

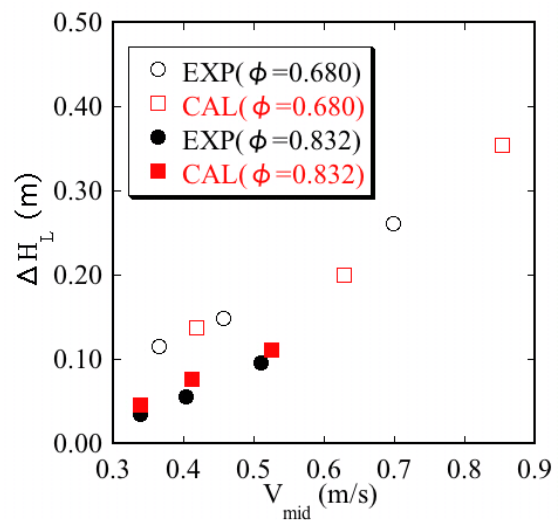


Fig. 8: The relationship between mean velocity and difference of water levels

断面平均流速が増加すると、流木群の上下流の水位差は増加する。実験結果に見られるこの傾向は、数値計算でも良好に再現されており、空隙率の異なる 2 ケースに対して、定量的にも良い一致が見られる。

4. おわりに

本報では、流木群の流水特性について数値解析を行った。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、計算時間を短縮することが可能となった。ほぼ 1/6 の計算時間となった。

次に、流れ場に固定された流木群に対して、水位差において実験と計算の比較を通して流水抵抗の検討を行った。流木群周りの複雑な流れ場を渦度分布により、確認し再現した。

今後は、流木群の運搬から堆積に至るまでの一貫した流木の流れ場に与える特性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

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 五十里洋行, 後藤仁志, 角哲也: 自然調節型洪水吐きの流木による閉塞機構に関する計算水理学的研究, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 793–798, 2006.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.

- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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, ダム工学, Vol. 19, pp. 17–28.