

流木群の流動に関する研究(2)

——流木群の堰止め——

中川 一・井上 和也・池口 正晃・坪野 考樹

NUMERICAL SIMULATION OF DRIFT WOOD BEHAVIOR (2)

——DAM UP OF DRIFT WOOD——

By *Hajime* NAKAGAWA, *Kazuya* INOUE, *Masaaki* IKEGUCHI and *Takaki* TSUBONO

Synopsis

A numerical simulation model had been developed for computing the behavior of drift wood and its dam up process due to jamming between and/or in front of the houses when drift wood debouches into horizontally two-dimensional flow field. The calculation is accomplished by an interacting combination of Eulerian fluid and Lagrangian drift wood equations, in which a turbulent diffusivity and rotational angular velocity of the drift wood are stochastically given based on the statistical analysis of these values in the experiments.

Dam up geometrical condition is obtained from the relation with the position of centroid of drift wood, its rotational angle, and the position of houses. Dam up probability of drift wood coming from upstream to the houses under the condition that another drift wood is already jammed between houses, is obtained by the analysis of the hydraulic experiments. By using these two dam up conditions, numerical simulation on the flow behavior of drift wood and the dam up process of drift wood are carried out. Time change of the number of dammed up drift wood is well explained by the calculation.

1. 緒 言

洪水時には山腹崩壊や河岸侵食によって多量の立木が河道内に取り込まれ、流木群となって流下し、橋梁や河川構造物に甚大な被害を与えることがある。そして、それが堤防決壊の主要因ともなって洪水氾濫を生起せしめ、堤内地に流木群が流入することで、家屋破壊が助長され、減水後も街路や農耕地に流木群がうず高く堆積して災害規模の増大と災害復興の遅延をもたらすことになる。

流木群の堰止め機構に関する研究は、従来、河川工学の立場からは橋梁の流木疎通能力を検討し、将来の架橋計画において流木を支障なく流下させ、流木による派生的災害を防止するような橋梁設計指針を得ることを目標とし、砂防工学の立場からは、土石流とともに流下してくる流木を効率的に制御するための透過型砂防ダムの設計手法を得ることを目標として行われてきた。前者では、流木を支障なく流下させる最短橋脚間隔が問題となり、後者では、流木を有効に堰止めるスリット間隔（格子間隔）が問題となっており、若干目標を異にしているが、流木がどのような条件で堰止まるのかを明らかにする必要がある点は共通である。

前者の立場から、足立・大同¹⁾は流木による支間閉塞に関し、閉塞する限界条件を、表面流速をパラメー

タとして流木密度（流下中の流木が水面で占めている面積の全水面積に対する比）および支間長と流木長との比で求め、流木密度が小さく、支間長が大きく、表面流速が大きいほど閉塞しにくいという結果を実験的に得ている。しかしながら、パラメータにとった流速が実験で得た実流速であるため一般的な限界表示式を与えるものはない。

後者の立場から、水原²⁾は流木止柵による流木の堰止め率を模型実験で検討し、足立らと同様の結果を得たが、さらに、流木群の堰止めには運動中の流木の偏走角（流木の長軸が主流となす角）や水深が影響することを示した。しかしながら、これらの影響を考慮した堰止め率を表わす一般的な表示がなされていない。水山³⁾は土石流の発生するような溪流において、流木対策施設の設置規準が作成されていないことに鑑み、土石流とともに流下してくる流木群を効率的に制御できる透過型砂防ダムの設計手法を確立するための基本的事項を明らかにすることを目的として模型実験を多数行い、実験結果をもとに流木止スクリーン・スリットによる流木堰止め率（流木捕捉率）を示している。その際、フルード数をパラメータにとっているが、なぜフルード数が流木の堰止め率に影響するのか明確ではない。水面での擾乱の程度が一旦堰止まった流木群のアーチアクションを破壊したり堰止めそのものを阻害する原因になっているものと推察される。

著者らは以前に流木群が堤内地の市街地家屋間で堰止まる機構を、一次元水路内に家屋群を整理配置した場に流木群を供給した水理実験により考察し、堰止めの過程を流れの水理量や流木の特性を用いてマクロ的に予測する方法を提示している⁴⁾。また、前年度においては流木群が平面場へ氾濫する場合の拡散について、流木のラグランジュ的運動追跡法と、氾濫水のオイラー的挙動解析法とを組み合わせた流木運動のシミュレーション手法を示している⁵⁾。本研究では、流木群が家屋によって堰止められる機構を新たにモデル化し、このラグランジュ的な流木群の流動のシミュレーション手法を用いて、先の堰止めに関する水理実験結果を説明することを試みる。

2. 基礎方程式

2.1 氾濫水の流動式

水平粘性を無視し、静水圧近似を仮定した二次元平面流れの基礎式は以下のように表せる。

$$x \text{ 方向運動量式: } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

$$y \text{ 方向運動量式: } \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 M, N ; $M = uh, N = vh$ なる流量フラックス、 u, v ; それぞれ、 x および y 方向流速、 h ; 水深、 H ; 水位で、 $H = h + z_b, z_b$; 地盤標高、 g ; 重力加速度、 ρ ; 水の密度、 τ_{bx}, τ_{by} ; それぞれ x および y 方向の底面せん断応力、 τ_{sx}, τ_{sy} ; それぞれ流木の存在を考慮した水面での x および y 方向のせん断応力、 t ; 時間、 x, y ; それぞれ水平方向の座標軸である。底面せん断応力には Manning の抵抗則を用いると以下のように表せる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{n_r^2 g u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{n_r^2 g v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n_r は Manning の粗度係数である。なお、 τ_{sx}, τ_{sy} については後述する。

2.2 流木群の流動式

流木同志の衝突の影響や流木が付着して流動したりすることが無いと仮定すれば、個々の流木の重心の運動方程式は以下のように表せよう。

x 方向の運動方程式：

$$m_k \frac{du_k}{dt} = -m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} - \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (u_k - U_k) A_{kx} \dots\dots\dots (5)$$

y 方向の運動方程式：

$$m_k \frac{dv_k}{dt} = -m_k g \frac{\partial H_k}{\partial y} - \frac{1}{2} \rho C_{Dy} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (v_k - V_k) A_{ky} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 u_k, v_k はそれぞれ第 k 番目の流木の x および y 方向流速であり、個々の流木の重心位置をラグランジュ的に追跡することにより求まり、

$$\frac{dX_k}{dt} = u_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = v_k \dots\dots\dots (7)$$

である。また、 m_k ；流木の質量、 X_k, Y_k ；流木の重心の位置、 U_k, V_k, H_k ；それぞれ流木 k が位置している地点での氾濫水の x, y 方向の局所流速成分および水位、 A_{kx}, A_{ky} ；水面下にある流木部分の x, y 方向の投影面積、 C_{Dx}, C_{Dy} ；流木に対する x および y 方向の抗力係数である。なお、浮力は水面に垂直に作用するので水平二次元座標系では水平方向には無視でき、仮想質量も無視している。

A_{kx}, A_{ky} は以下のように評価する。すなわち、流木を密度 ρ_d 、半径 r 、長さ l の円柱形であると仮定すると、流木の質量 m_k は $m_k = \rho_d \pi r^2 l$ だから、水面が水平であると近似すると

$$\rho_d \pi r^2 l g = \rho r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) g l \dots\dots\dots (8)$$

が成り立ち、吃水深は h_w は $h_w = r(1 + \cos \alpha)$ より、流木 k が x 軸となす角度（回転角）を θ_k とすると、 A_{kx}, A_{ky} は次式で表される。

$$A_{kx} = h_w l |\sin \theta_k|, \quad A_{ky} = h_w l |\cos \theta_k| \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 α は Fig. 1 に示す角度である。なお、 $\theta_k = 0$ のときは $A_{kx} = r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$ 、 $\theta_k = \pi/2$ のときは、 $A_{ky} = r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$ とする。

流木 k の重心を通る軸まわりの回転運動は、流木に作用する流体力のモーメントが評価可能であれば、次式で求められる。

$$I \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \sum N_0 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 N_0 は流木に作用する流体力のモーメントであり、 I は流木の慣性モーメントである。実際には流木に作用する流体力の分布を評価するのは困難なため、ここでは式 (10) を用いないで、5. で示すような統計量の処理により評価することにする。

水表面におけるせん断応力 τ_{sx}, τ_{sy} は、流木に作用する抗力の反作用として流水に作用すると考え、次式のように評価する。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{sx} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (u_k - U_k) A_{kx} \right\} \\ \tau_{sy} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 A は水表面積で、 $A = \Delta x \Delta y$ ($\Delta x \Delta y$ は x および y 方向の空間差分間隔) であり、 N_t は格子内 $\Delta x \Delta y$ に存在する流木の総本数である。

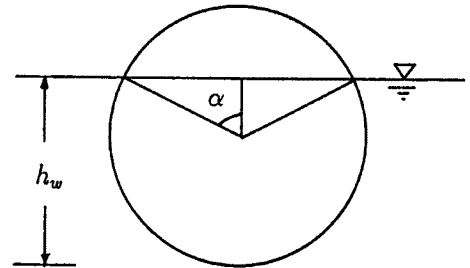


Fig. 1. Definition sketch of angle α .

3. 基礎方程式の差分化

3.1 氾濫水の流動式の差分化

2.1 および 2.2 で示した方程式系を解析的に解くことは困難なので、差分近似して数値解析を実行することにする。その際、Fig. 2 に示すような h , M , N の変数の配置とし、式 (1) および (2) の運動量保存則の差分化にあたっては、時間に関しては前進差分、移流項については保存性と移動性を持つようにした第1次風上差分、圧力項は中心差分、摩擦項には Vasiliev の不安定を避けるように implicit な形にして中央差分を行う。式 (3) の連続式の差分化は時間に関して前進差分、空間に関して中央差分とし、leap frog 的に計算を進める。すなわち、時刻 $(n+3)\Delta t$ での新しい値を決定するのに、時刻 $(n+2)\Delta t$ での M , N , 時刻 $(n+1)\Delta t$ での h 値を用いて計算を進める。たとえば、 x 方向の運動量を差分化すると以下のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^n}{2\Delta t} \\
 & + \begin{cases} \frac{u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n M_{i-1,j+1/2}^n}{\Delta x} & : u_{i,j+1/2}^n \geq 0, \quad u_{i-1,j+1/2}^n > 0 \\ \frac{u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - 0}{\Delta x} & : u_{i,j+1/2}^n > 0, \quad u_{i-1,j+1/2}^n \leq 0 \\ \frac{u_{i+1,j+1/2}^n M_{i+1,j+1/2}^n - u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} & : u_{i,j+1/2}^n \leq 0, \quad u_{i+1,j+1/2}^n < 0 \\ \frac{0 - u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} & : u_{i,j+1/2}^n < 0, \quad u_{i+1,j+1/2}^n \geq 0 \end{cases} \\
 & + \begin{cases} \frac{\tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - \tilde{v}_{i-1,j+1/2}^n M_{i-1,j+1/2}^n}{\Delta y} & : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \geq 0, \quad \tilde{v}_{i-1,j+1/2}^n > 0 \\ \frac{\tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - 0}{\Delta y} & : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n > 0, \quad \tilde{v}_{i-1,j+1/2}^n \leq 0 \\ \frac{\tilde{v}_{i+1,j+1/2}^n M_{i+1,j+1/2}^n - \tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} & : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \leq 0, \quad \tilde{v}_{i+1,j+1/2}^n < 0 \\ \frac{0 - \tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} & : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n < 0, \quad \tilde{v}_{i+1,j+1/2}^n \geq 0 \end{cases} \\
 & = -g \frac{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \cdot \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + z_{b(i+1/2,j+1/2)} - h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} - z_{b(i-1/2,j+1/2)}}{\Delta x} \\
 & - \frac{g \left(\frac{n_{r,i-1/2,j+1/2} + n_{r,i+1/2,j+1/2}}{2} \right)^2 \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} + M_{i,j+1/2}^n}{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}} \sqrt{(u_{i,j+1/2}^n)^2 + (\tilde{v}_{i,j+1/2}^n)^2}}{\left(\frac{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \right)^{1/3}} \quad (12)
 \end{aligned}$$

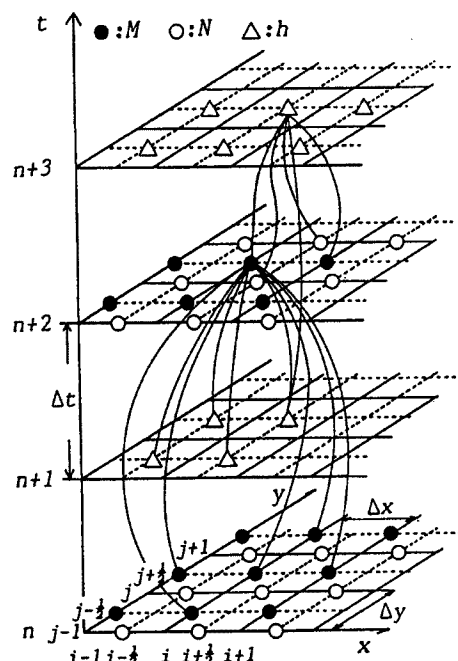


Fig. 2. Grids for two-dimensional unsteady flow calculation and arrangement of hydraulic variables.

ここに、 $u_{i,j+1/2}^n = 2M_{i,j+1/2}^n / (h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1})$, $\tilde{v}_{i,j+1/2}^n = (v_{i-1/2,j}^n + v_{i-1/2,j+1}^n + v_{i+1/2,j}^n + v_{i+1/2,j+1}^n) / 4$, $v_{i+1/2,j}^n = 2N_{i+1/2,j}^n / (h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1})$ である。式(12)は両辺に求めるべき $M_{i,j+1/2}^{n+2}$ が含まれているが、これは陽に解くことができる。 y 方向の運動量式の差分化も同様に実行できるが、ここでは紙幅の都合で省略する。式(3)の連続式の差分式は以下になる。

$$\frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1/2,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \quad (13)$$

3.2 流木群の流動式の差分化

流木の運動に関する基礎式の差分化を以下のように行う。

$$\begin{aligned} \text{流木の } x \text{ 方向の運動方程式の差分化：} & \frac{u_k^{n+2} - u_k^n}{2\Delta t} = -g \frac{H_{kf_x}^{n+1} - H_{kb_x}^{n+1}}{\Delta x} \\ & - \frac{\rho}{2m_k} C_{Dx} \sqrt{(U_k^n - u_k^n)^2 + (V_k^n - v_k^n)^2} \left(\frac{u_k^{n+2} + u_k^n}{2} - U_k^n \right) A_{kx} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{流木の } y \text{ 方向の運動方程式の差分化：} & \frac{v_k^{n+2} - v_k^n}{2\Delta t} = -g \frac{H_{kf_y}^{n+1} - H_{kb_y}^{n+1}}{\Delta y} \\ & - \frac{\rho}{2m_k} C_{Dy} \sqrt{(U_k^n - u_k^n)^2 + (V_k^n - v_k^n)^2} \left(\frac{v_k^{n+2} + v_k^n}{2} - V_k^n \right) A_{ky} \quad (15) \end{aligned}$$

ここに、 $H_{kf_x}^{n+1}$, $H_{kb_x}^{n+1}$, $H_{kf_y}^{n+1}$, $H_{kb_y}^{n+1}$ は流木 k が存在している格子の前後左右の水位であり、添え字 f は x , y 方向の下流側を、添え字 b は上流側を示す。

流木の位置については式(7)を以下のように差分化する。

$$\frac{X_k^{n+3} - X_k^{n+1}}{2\Delta t} = u_k^{n+2}, \quad \frac{Y_k^{n+3} - Y_k^{n+1}}{2\Delta t} = v_k^{n+2} \quad (16)$$

なお、 U_k^n , V_k^n については、流木位置での値が必要であるが、これを評価するために各格子線上での値を用いて次式のような内挿によって評価する。

$$U_k^n \text{ の補正： } U_k^n = \left(1 - \frac{\eta_k^{n+1}}{\Delta x}\right) u_{i_k^{n+1}, j_k^{n+1}+1/2}^n + \frac{\eta_k^{n+1}}{\Delta x} u_{i_k^{n+1}+1, j_k^{n+1}+1/2}^n \quad (17)$$

$$V_k^n \text{ の補正： } V_k^n = \left(1 - \frac{\zeta_k^{n+1}}{\Delta y}\right) v_{i_k^{n+1}+1/2, j_k^{n+1}}^n + \frac{\zeta_k^{n+1}}{\Delta y} v_{i_k^{n+1}+1/2, j_k^{n+1}+1}^n \quad (18)$$

水位 H_k に関しては、流木が存在している格子の水位を用いることにし、

$$H_k^{n+1} = H_{i_k^{n+1}+1/2, j_k^{n+1}+1/2}^{n+1} \quad (19)$$

とする。ここに、

$$I_k^{n+1} = [X_k^{n+1}/\Delta x] + 1, \quad J_k^{n+1} = [Y_k^{n+1}/\Delta y] + 1 \quad (20)$$

$$\eta_k^{n+1} = X_k^{n+1} - \Delta x (I_k^{n+1} - 1), \quad \zeta_k^{n+1} = Y_k^{n+1} - \Delta y (J_k^{n+1} - 1) \quad (21)$$

なお、 $[x]$ は x を越えない最大の整数値である。

4. 流木群の堰止めに関する水理実験の概要

著者らは既に流木群が堤内地の市街地家屋間で堰止まる機構を、一次元水路内に家屋群を整列配置した場に流木群を供給した水理実験により考察し、堰止めの過程を流れの水理量や流木の特性を用いてマクロに予測する方法を示している⁴⁾。本研究では、この実験で得た結果を、流木1本1本の流動をラグランジュ的に追跡するシミュレーション手法により再現することを試みる。本章ではまず、その水理実験について簡単に概説する。

実験水路は Fig. 3 に示すような長さ約 9 m、幅 30 cm、深さ 30 cm の鋼製両面ガラス張り、勾配は 1/500 に固定している。水路上流端から約 6.2 m の位置に長さ 10 cm、幅 5 cm、高さ 10 cm の木製家屋模

型を配置し、水路上流端から約 1.5 m 下流に架設したベルトコンベヤー式の給木装置を用いて給木する。給木装置は、電動式ローラーが幅 30 cm、長さ 60 cm の目盛り付耐水性トレーシングペーパーを巻き取るようになっていて、ペーパー上に予め配置した流木模型がペーパーの巻き取りによって水路に供給されるようになっている。ローラーの回転速度が任意に変えられるので、これにより、単位時間、単位幅当りに供給される流木本数 C_{sp} (流入流木フラックス) が設定できる。流木模型として、長さが $l = 3, 4, 5, 6, 7$ cm の 5 種類で、直径 2.2 mm、密度 0.830 g/cm^3 の円柱形木材を用いている。

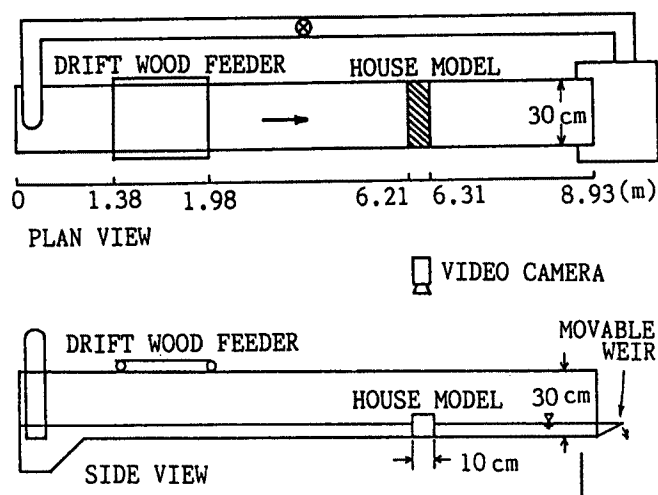


Fig. 3. Experimental set-up for dam up by drift wood.

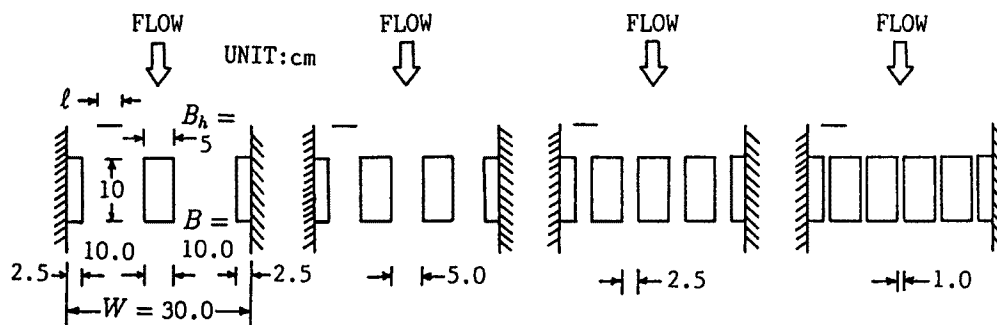


Fig. 4. Arrangement of model house blocks in the flume.

実験方法は以下のようなものである。流木を供給する前に、Fig. 4 に示した 4 通りの家屋配置それぞれに対し、 $Q = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ l/sec}$ の 3 通りの定常流量を与える。ついで、給木装置のトレーシングペーパー上に Fig. 5 に示すように、水路中心線と流木の長軸が並行になるよう、水路幅方向に 29 本、水路上流側に 10 列、計 290 本流木を配置し、ローラーの回転数を調節して流入流木フラックスが所定の値になるようにする。ここでは、これを $C_{sp} = 0.40, 0.68, 1.93 \text{ 本/sec/cm}$ の 3 通りとしている。

水路幅の制約で家屋配置形態が 4 通りしかできないため、用いる流木長を変化させている。すなわち、流木の堰止めには場の条件として流木長 l 、家屋幅 B_h 、家屋間隔 B が影響するものと考えられ、家屋が一樣

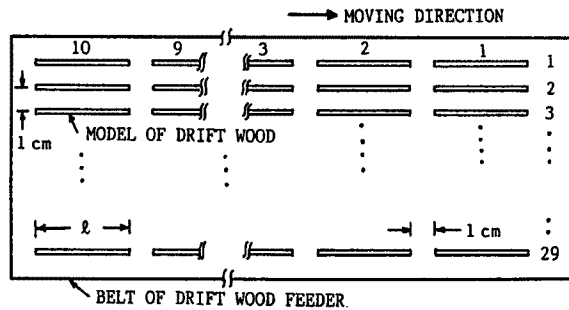


Fig. 5. Arrangement of model drift wood on the belt of drift wood feeder.

に配置される場を対象とすれば $\eta = \frac{l}{W - n_h B_h}$ で表わされる流木長と家屋間の空隙長の総和との比 η (流木長比と呼ぶことにする) で場の条件が表わせると考えるのである。ここに、 W ; 水路幅, n_h ; 水路内に配置した家屋個数, B_h ; 家屋幅であり、流木長と家屋個数を変化させて η が 0.2, 0.267, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 の 8 種類について実験を行っている。

結局実験ケースは、 η が 8 種類、流量 Q が 3 通り、流入流木フラックス C_{sp} が 3 通りの計 72 通りである。各ケースについて、流木が家屋模型に到達する直前の流動状況、家屋模型によって堰止められる、あるいは通過する状況をビデオカメラで撮影し、流木の回転角度、到達本数、堰止め本数、通過本数、堰止め形状の時間的变化を測定している。

5. 流木群の堰止めに関するシミュレーション手法

5.1 計算条件

(1) 初期条件および流入条件

初期条件および流木の流入条件は以下のようなものである。すなわち、予め所定の流量を流入境界から与え、定常状態を作成した後、水理実験と同様に水路幅方向に 1 cm 間隔で計 29 本の流木を流入境界で初速ゼロで与えた。計 10 回の給木を所定の時間間隔で行った。したがって総給木本数は $29 \times 10 = 290$ 本である。初期回転角を実験では計測していないので、ここでは $[0, 1]$ の一様乱数を発生させ、 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 間のランダム変数に変換し、各流入流木の初期回転角とした。

計算に用いた空間差分間隔は流下方向に $\Delta x = 5$ cm, 水路幅方向に $\Delta y = 1.25$ cm, 時間差分間隔は $\Delta t = 0.004$ sec, Manning の粗度係数は $n_r = 0.01$ m^{-1/3} sec, 流木の諸元は実験条件をそのまま用い、抗力係数については $C_{Dx} = C_{Dy} = 2.0$ とした。計算領域は 4. の Fig. 3 で示した流木投入位置から水路下流端までである。なお、対象とした流れの場は、家屋間隔が 2.5 cm のときで、流木長は 4 cm ($\eta = 0.4$) と 6 cm ($\eta = 0.6$) の 2 通りである。

(2) 拡散係数

$dX_k/dt = u_k$ および $dY_k/dt = v_k$ から求まる決定論的な位置 (X_k, Y_k) からの拡散による変動値 $\Delta X_k, \Delta Y_k$ を、Dukowicz の成果⁶⁾ を参考にして、次式で評価した。

$$\Delta X_k = \sqrt{4K_x(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha), \quad \Delta Y_k = \sqrt{4K_y(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \quad (22)$$

ここに、 α, β はそれぞれ x および y 座標に関する $[0, 1]$ のランダム変数で、

$$\operatorname{erf}(s) = \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-t^2) dt, \quad \Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp(-t^2/2) dt \quad (23)$$

である。拡散係数 K_x および K_y については、今回新たに実験で得た $K_x/u_*h = 0.629$, および昨年度の成果⁵⁾ $K_y/u_*h = 0.208$ を用いることにする。結局、流木位置は決定論的に求まる位置と拡散による変動量と

の和として次式で評価される。

$$X_k^{n+3} = X_k^{n+1} + u_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta X_k = X_k^{n+1} + u_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K_x(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha) \quad (24)$$

$$Y_k^{n+3} = Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta Y_k = Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K_y(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \quad (25)$$

(3) 回転角

流木の回転角については、前年度に得た成果⁵⁾を用いる。すなわち、一様流場においては流木は平均角速度 $\bar{\omega} \approx 0$ 、角速度の標準偏差 $\sigma_\omega = 81.6 Fr$ で回転しながら流下することより、流木の回転角 θ_k は、

$$\theta_k = \theta_{k0} + 2\Delta t\omega = \theta_{k0} + 2\Delta t(\gamma\sigma_\omega + \bar{\omega}) \quad (26)$$

なる値をとり、現時点での回転角 θ_{k0} から $2\Delta t$ 後には $\Delta\theta = 2\Delta t\omega$ だけ回転するものとする。ここに、 $\gamma = (\omega - \bar{\omega})/\sigma_\omega$ で、角速度の確率密度関数 ϕ に正規分布を仮定すると、その分布関数 Φ は

$$\Phi\left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds \quad (27)$$

で与えられるので、 Φ の値を $[0,1]$ の区間のランダム変数として与えることで、分布関数の逆関数より γ を求められ、式 (26) より θ が評価される。

(4) 計算のフロー

氾濫水の挙動のオイラー的解析および流木群の流動のラグランジュ的解析の計算のフローを Fig. 6 に示す。まず、初期条件、境界条件のもとで氾濫計算によって流量フラックス M, N 、断面平均流速成分 u, v および水深 h を求める。つぎに流木位置における氾濫流の流速および水位を内挿によって求める。その際、流木運動は水表面近傍での現象であるから、次式を用いて断面平均流速を水表面での流速になおしておく。

$$\left. \begin{aligned} U_k^n &\Rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_*^n \\ V_k^n &\Rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_*^n \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

つぎに、流木の回転角度 θ_k 、水面下にある流木部分の投影面積 A_x, A_y および流木の流速成分 u_k, v_k を求める。ついで、拡散係数を水理量より評価し、流木位置の変動成分 $\Delta X_k, \Delta Y_k$ を求めて最終的に流木位置 X_k, Y_k を求める。流木位置、家屋位置および流木の回転角度との関係から流木が家屋間あるいは家屋前面で堰止まるかどうかを判定する

(これについては次節で述べる)。堰止まれば流水との相対速度が大きくなり、水表面抵抗が大きくなって水位の上昇が生じる。したがって、堰止まった流木についても、この抵抗を考慮して氾濫水の流動を計算する必要がある。一方、堰止まらずに下流端から流出した流木については、その流木に関してはラグランジュ的な挙動追跡は終了する。上流端からの流木の供給が終了し、かつ、全ての流木の追跡が終了すれば、すなわち、供給した流木が堰止まるか流出するかしては流動している流木が1本も無いような状態になれば、全ての計算は終了する。

5.2 流木群の堰止めのモデル

以上の基礎式を連立して数値解析すると、流木の位置とその回転角度が求まる。そして、流木の重心位置および回転角度と家屋との位置関係から流木が堰止まる幾何学的な条件がわかる。Fig. 7 に家屋と流木との位置関係を示す。流木が堰止まる条件として以下の3つの場合を考える。すなわち、1) Fig. 7 の (2) の

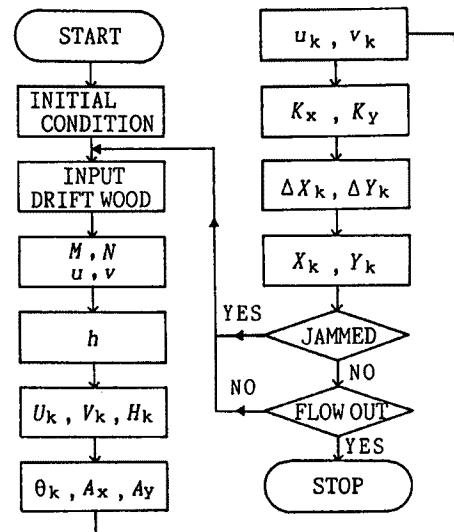


Fig. 6. Flow chart for the method of simulating dam up process.

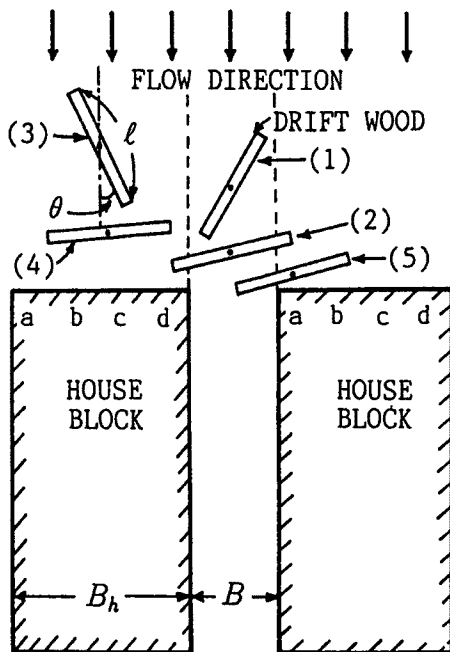


Fig. 7. Relation between drift wood position, its rotational angle, and the position of houses for dam up of drift wood.

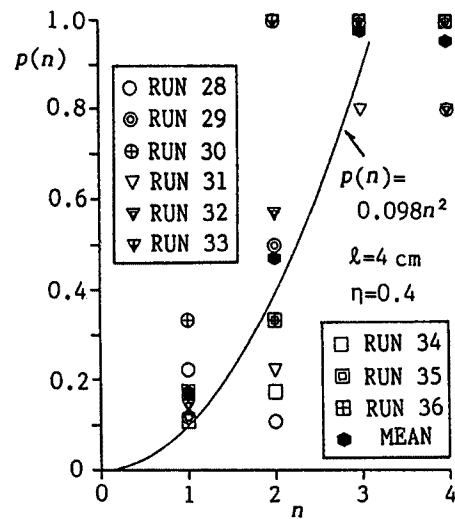


Fig. 8. Dam up probability.

ような位置関係では流木が家屋と家屋の間で堰止まる。2) 流木が Fig. 7 の (4) のように、家屋前面に大きな回転角 θ でやってきて、流木の重心位置が例えば図中の b, c のような家屋の中心部にあるときは、家屋前面で堰止まる。そのときの θ は、実験結果より、 80° 以上とする。3) Fig. 7 の (1), (3), (5) のような状態の流木も、家屋間で既に流木が堰止まっているときには、それによって堰止められることになる。これについては、堰止まっている流木本数に応じて後続の流木が堰止められる確率が異なるので、水理実験から、その条件付確率を評価した。Fig. 8 は、流木長が 4 cm、家屋間隔が 2.5 cm のとき、横軸に家屋間での堰止め本数 n を、縦軸に、その本数に対して後続の流木が家屋間で堰止まる確率 $p(n)$ を表わしたものである。ばらつきが大きいが、

$$p(n) = 0.098 n^2 \dots\dots\dots (29)$$

のような放物線でこれを回帰する。ただし、堰止め確率が求まったとしても、(1), (3), (5) のような状態にある流木が、次々とやってきて、そのうちのどの流木が堰止まるのかは不明であるので、これを特定するために以下のような方法をとる。すなわち、いま家屋間に n 本堰止まっていて、その時の堰止め確率が $p(n)$ とする。 $[0, 1]$ の一様乱数 q を発生させて $p(n) > q$ となればその流木は家屋間で堰止まるとし、堰止め本数を 1 本増して $p(n+1)$ に対して同様の判定を以後繰り返すのである。ただし、家屋間での堰止め本数が N 本以上の時は堰止め確率を 1.0 として、後続の流木は全てその家屋間では堰止まることにした。流木長が家屋間の長さより小さいときには、1) のような幾何学的な条件では堰止まらないが、3) の方法だと、家屋間で流木が堰止まっていないときでも、何等かの方法で堰止め確率が正しく求まっておれば、 $p(0) > 0$ のとき堰止まることになる。 $p(n)$ および N の決定方法は今の所実験に依るしかないが、堰止めるを規定する重要なパラメータであるので、今後さらに検討していく必要がある。ここでは水理実験結果より $N=3$ とした。

5.3 計算結果の考察

Fig. 9 の黒丸で繋いだ線は RUN 28, 29, 30 の, Fig. 10 のそれは RUN 34, 35, 36 の, Fig. 11 のそれは, RUN 52, 53, 54 の流木の堰止め率 $\alpha(t)$ の時間変化に関するラグランジュ的解析法による計算結果を示している。ここに、堰止め率 $\alpha(t)$ とは、上流端で供給した流木が初めて家屋模型に到達した時刻を $t = 0$ sec として、時刻 t において、家屋前面および家屋間で堰止まった流木本数を供給した総流木本数 N_t ($= 270$)

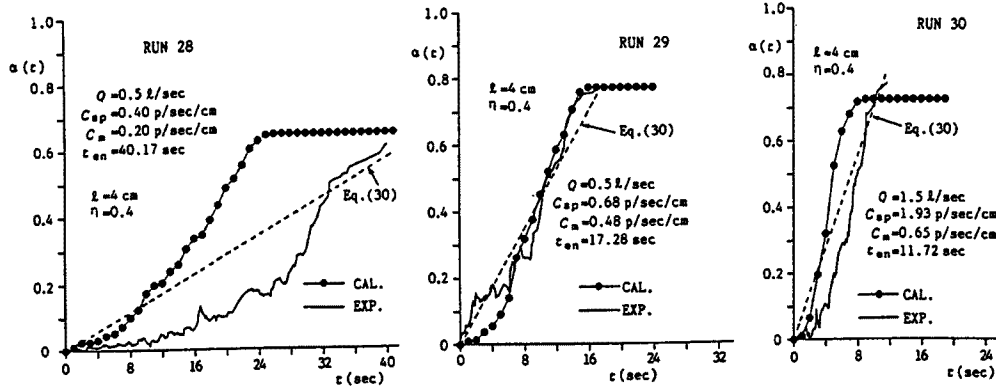


Fig. 9. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one (RUN 28, 29, 30).

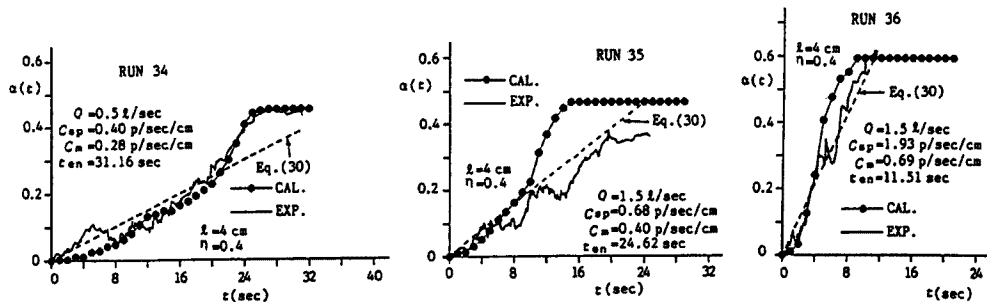


Fig. 10. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one (RUN 34, 35, 36).

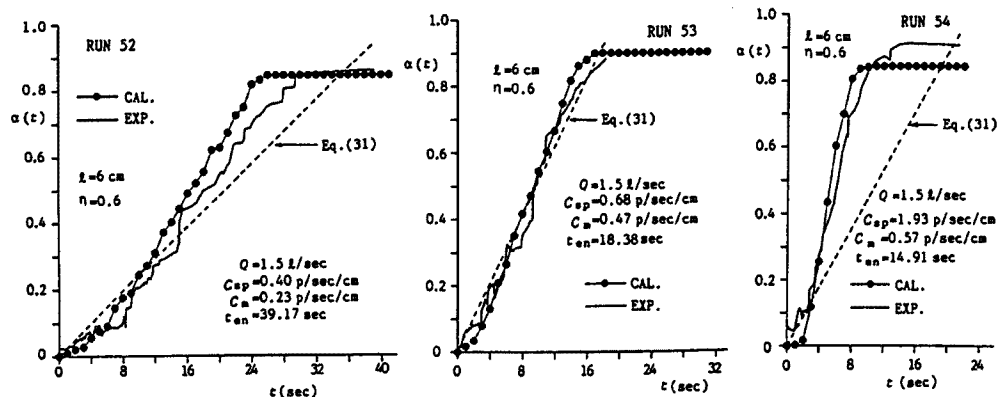


Fig. 11. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one (RUN 52, 53, 54).

本)で除したものである。なお、各 RUN Number は参考文献 4) における Table. 1 の RUN Number に対応している。計算結果は比較的实验結果をよく再現していることが分かる。図中に示した破線は以前に行ったマクロ的解析法による堰止め率の時間変化であり⁴⁾、次式で与えられている。

$$0.3 \leq \eta \leq 0.5 \text{ のとき } \alpha(t) = \left(1 - \frac{0.225}{\frac{l}{W - n_h B_h} \frac{l^3 C_m}{Uh} + 0.225} \right) \frac{t}{t_{en}} \dots\dots\dots (30)$$

$$\eta > 0.5 \text{ のとき } \alpha(t) = 0.95 \frac{t}{t_{en}} \dots\dots\dots (31)$$

$$0 \leq \eta < 0.3 \text{ のとき } \alpha(t) \doteq 0 \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 t_{en} ; $t=0$ から計って家屋模型に最後の流木が到達した時刻、 C_m ; N_t を水路幅 W と t_{en} で除した t_{en} 時間内の平均的な流木フラックス、 U ; 氾濫水の表面流速である。マクロ的解析では堰止め率は時間とともに直線的に変化するとしたが、この方法では初期および終盤の堰止め率がうまく再現できないが、今回行ったラグランジュ的解析ではかなりうまく再現できている。しかし、計算では若干最終の堰止め率が時間的に早く一定になっている。この原因としては、流木の流下方向の拡散が過小に計算されている可能性があること、断面平均流速を対数則を用いて表面流速に変換していることの妥当性の問題、数値計算上の問題等が考えられ、流木の縦拡散および流れの解析法についてさらに検討を加える必要がある。また、RUN 28 については、計算結果と実験結果が大きくずれている。この RUN の流量は 500 cc/sec、 t_{en} は 40.17 sec で、これと同一の流量では t_{en} は 30 sec 前後であることから、この RUN のみ t_{en} が大きくなりすぎており、実験結果として不適当であるのかも知れない。ちなみに、Fig. 12 は流木長が 6 cm であるが、その他の条件は RUN 28 と同じである RUN 46 の実験

値と計算値とを比較したものである。 t_{en} は 30 sec 弱となっていて、計算結果は実験結果をよく再現していることがわかる。

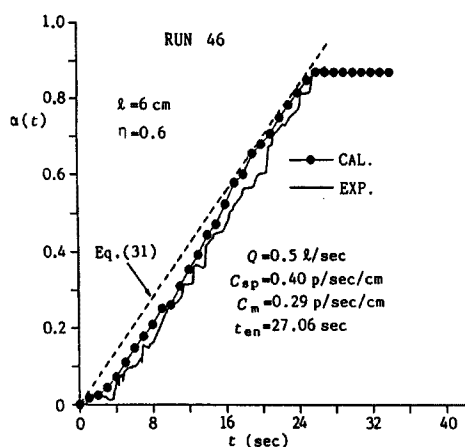


Fig. 12. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one (RUN 46).

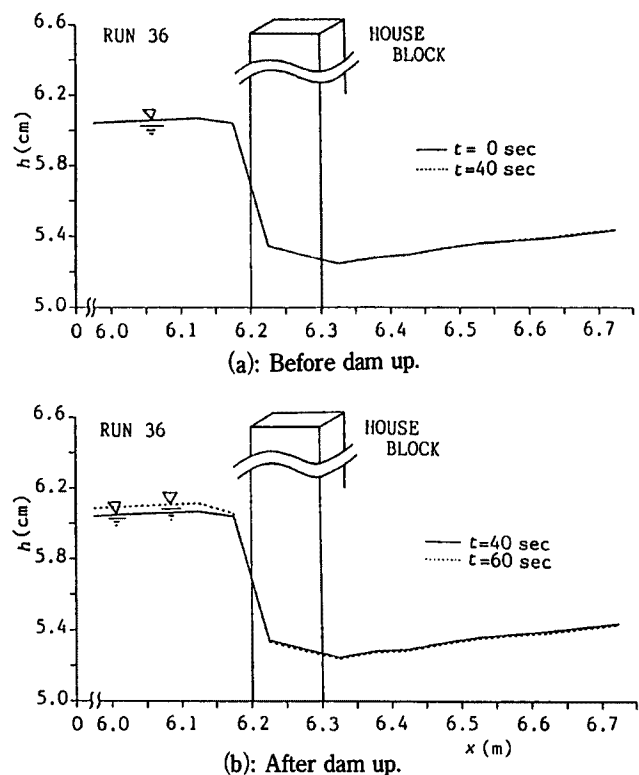


Fig. 13. Longitudinal water surface profile around house blocks.

Fig. 13 は RUN 36 の場合の堰止めによる流下方向の水深変化を家屋模型近傍で見たものである ($y = 10.625 \text{ cm}$)。上の図は流木投入前の $t = 0 \text{ sec}$ における水面形 (実線) と流木群が家屋模型で堰止まる直前の $t = 40 \text{ sec}$ における水面形 (破線) とを比較したものである。流木の流下速度と流水の速度との相対速度が小さく、流水と流木との接触による摩擦抵抗を考慮していないことによって両者の水面形には殆ど差が生じていないことがわかる。一方、下の図は $t = 40 \text{ sec}$ のとき (実線) と流木の堰止めが終了した $t = 60 \text{ sec}$ のとき (破線) の水面形を比較したものである。流木群が堰止められて停止し、流水との相対速度が大きくなっているため、家屋間前方で若干の水位の堰上げが認められ、それより下流での水位変化はほとんど無いことがわかる。ただし、実験で水位の計測を行っていないので、計算の堰上げ高の検証はできていない。

6. 結 語

本研究は、堤内地へ氾濫した流木群が、家屋間や家屋前面で堰止められる現象を説明し得るモデルを構築し、モデルの妥当性を以前行った流木群の堰止めに関する水理実験結果を用いて検証したものである。流水のオイラー的解析法と流木のラグランジュ的追跡法とを組み合わせた解析法を用い、これらから求まる流木の決定論的位置と乱流拡散に起因した拡散変動量の確率論的位置とから流木位置を求め、回転運動に関しては確率論的な評価法によって流木の回転角度を求めた。ついで、流木位置、回転角度と家屋の位置関係から幾何学的に決定される堰止め条件と実験結果より求めた流木の堰止め確率とを用いて流木の堰止めに関するモデル化を行い、これを組み込んだ流木群のラグランジュ的挙動追跡計算を行って堰止め率の時間変化を求めた。その結果、本シミュレーション手法で、以前に示したマクロ的な堰止めモデルよりも精度よく実験結果を再現できることがわかった。

堰止め現象はかなり偶然性が高い現象であるので、実験で得た堰止め率の時間変化はある程度の変動幅を持っているものと思われる。したがって、水理実験の面からも堰止め率のデータを充実させ、モデルの妥当性を検討する必要がある。また、ここでは、一旦堰止まった流木は決してその後流出しないとしているが、実験ではアーチアクションで堰止まった流木も、それが破壊されて流出することもあり、流体力とアーチアクションの破壊関係を明らかにし、堰止め率の変動特性をさらに詳細に表現し得るモデルを構築する必要がある。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費 (重点領域研究 (1) 研究代表者 高橋 保, 課題番号 04201126) の補助を受けたものであり、また、高橋 保教授より貴重な助言をいただいた。関係各位に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 足立昭平・大同淳之: 流木に関する実験的研究, 京大防災研年報, 第1号, 1957, pp. 41-49.
- 2) 水原邦夫: 流木に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1978.
- 3) 水山高久・石川芳治・矢島重美: 透過型砂防ダムによる流木捕捉効果, 土木技術資料, 第30巻, 11号, 1988, pp. 623-628.
- 4) 中川 一・高橋 保・安達宏介: 堤内地における流木群の挙動に関する研究, 京大防災研年報, 第34号B-2, 1991, pp. 373-386.
- 5) 中川 一・高橋 保・池口正見: 流木群の流動に関する研究, 京大防災研年報, 第35号B-2, 1992, pp. 249-266.
- 6) Dukowicz, J. K.: A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, Jour. Comp. Physics, Vol. 35, 1980, pp. 229-253.