

流木群の流動と堰止めに関する研究

Behavior of Drift Wood and Its Dam up Process

中川 一*・井上和也**・池口正晃***・坪野考樹***

By Hajime NAKAGAWA, Kazuya INOUE, Masaaki Ikeguchi and Takaki Tsubono

A numerical simulation model has 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. The positions, rotational angles in a group of drift wood, and time change of the number of dammed up drift wood in the experiments are well explained by the calculation.

Keywords: drift wood, dam up, rotational angle numerical simulation

1. 緒 言

流木群が橋脚で堰止められて橋梁被害を生じたり、それに起因して堤防決壊を起こし、氾濫水とともに堤内地に流入した流木群が家屋間で堰止められて家屋破壊を助長して被害を拡大することが洪水氾濫時には頻繁に見られる。このような流木による被害を明らかにするにはまず、流木群がどのように挙動し、どのようにして堰止まるかを予測することが必要である。本研究においては、まず、流れの場をオイラー的に精度よく表し得る計算手法について検討し、ついで、流木の並進運動のみでなく回転運動を力学的に考慮したラグランジュ的追跡法を示し、本手法を用いて流木群の流動に関する水理実験結果の再現を試みる。さらに、流木群の家屋間での堰止め現象をモデル化し、家屋が存在する場での流木群の流動のシミュレーションによって、時々刻々流木が堰止まっていく過程を追跡し、水理実験結果との比較検討を行う。

2. 流水及び流木運動の基礎式

2.1 流水の運動の基礎式

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。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{2} f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \left(2A_h \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h A_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\tau_{sx}}{\rho}$$

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
(〒611 宇治市五ヶ庄)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(同上)

*** 学生員 京都大学 大学院生
(〒606 京都市左京区吉田本町)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{2}fv\sqrt{u^2 + v^2} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \left(2A_h \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ hA_h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

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、 f ;摩擦損失係数、 ν ;動粘性係数、 A_h ;水平渦動粘性係数、 k ;乱流エネルギー、 ρ ;水の密度、 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である。 A_h および k に関しては、細田・木村¹⁾の方法に従い、それぞれ $A_h = \alpha h u_*$, $k = 2.07 u_*^2$ とした。ここに、 u_* は摩擦速度、 α は0.3とした。摩擦損失係数に関しては、 Re 数に応じて次のような層流抵抗則と滑面乱流の抵抗則（遷移領域もこれに含めた）を使い分けた。

$$f = 6/Re \quad (Re < 400), \quad \sqrt{2/f} = 3.0 + 5.75 \log Re \sqrt{f/2} \quad (Re \geq 400) \quad (4)$$

2.2 流木の運動の基礎式

流木同士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。

$$x \text{ 方向運動方程式: } m_k(1 + C_M)du_k/dt = C_M dU_k/dt - m_k g \partial H_k / \partial x - 1/2 \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \quad (5)$$

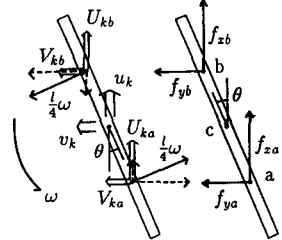
$$y \text{ 方向運動方程式: } m_k(1 + C_M)dv_k/dt = C_M dV_k/dt - m_k g \partial H_k / \partial y - 1/2 \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \quad (6)$$

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、 $W_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2}$, u_k, v_k は

$$dX_k/dt = u_k, \quad dY_k/dt = v_k \quad (7)$$

により流木位置と関係付けられる。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 が位置する地点での 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、 C_M ;仮想質量係数である。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るので考慮していない。

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 N_0 を評価することで求まる。図-1に示すように流木の重心 c で流木を仮に2等分し、その各々の重心 a, b に流体力の合力が作用するとして回転運動の方程式を記述すれば以下のように表わせるであろう。 図-1 流木の回転に関する定義図



$$I d^2 \theta_k / dt^2 = \sum N_0 = (\ell/4) \{ (f_{xa} - f_{xb}) \sin \theta_k - (f_{ya} - f_{yb}) \cos \theta_k \} \quad (8)$$

$$f_{xa} = (1/2) \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k - u_{rk})^2 + (V_k - v_k - v_{rk})^2} (U_k - u_k - u_{rk}) (A_{kx}/2) \quad (9)$$

$$f_{ya} = (1/2) \rho C_{Dy} \sqrt{(U_k - u_k - u_{rk})^2 + (V_k - v_k - v_{rk})^2} (V_k - v_k - v_{rk}) (A_{ky}/2) \quad (10)$$

$$u_{rk} = (\ell/4) (d\theta_k/dt) \sin \theta_k, \quad v_{rk} = (\ell/4) (d\theta_k/dt) \cos \theta_k \quad (11)$$

ここに、 θ_k ;流木の回転角、 I ;流木の慣性モーメント、 ℓ ;流木長である。

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、

$$\tau_{sx} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \right\}, \quad \tau_{sy} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \quad (12)$$

で評価する。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。

流木運動は水表面近傍での現象であるから、たとえば $Re \geq 400$ の場合には、次式によって断面平均流速を水表面での流速に変換しておく。

$$U_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_k, \quad V_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_k \quad (13)$$

上記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。流れの場の数値シミュレーション手法については、これまで氾濫解析用の1次の風上差分²⁾を用いてきたが、この方

法では数値粘性が大きくて流れの場を十分説明できず、流木群の流動もこれに支配されて実際より遅くなるなど、実験結果がうまく説明できなかった³⁾。本研究では(1)および(2)式において、時間積分にはアダムス・バッシュホース法を、移流項にはQUICKスキームを用いて計算精度を高めた。流木の運動に関する基礎式の差分化は、時間に関して前進差分、空間に関しては中央差分として陽的に解いた。

3. 流木群の流動

3.1 実験装置及び実験方法

用いた実験装置は図-2に示すように、長さ170 cm、幅160 cmの木製2次元水路と長さ150 cm、幅20 cm、高さ20 cmの木製の一次元水路からなっている。一次元水路は2次元水路の一辺の中央に接続されていて、流木や流水をこの一次元水路の上流部から供給するようになっている。2次元水路の周囲は水が越流しない程度の壁で囲ってあるが、下流側の壁の一部は図に示すように幅20 cmにわたり切欠きになっており、水や流木はこの部分から流出するようになっている。一次元

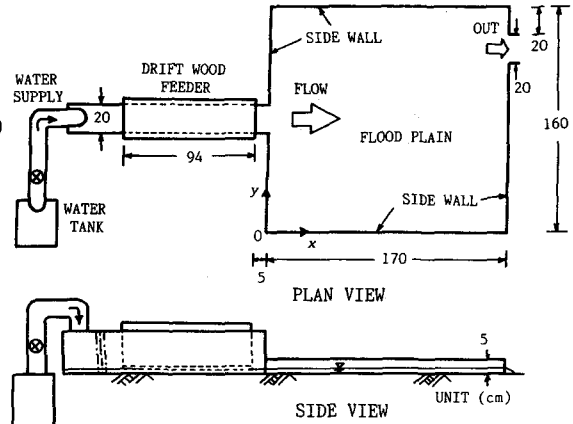


図-2 流木の流動に関する実験装置

水路には長さ94 cmの給木装置が設置してあり、一度に72本の流木が供給できる。予め2次元水路内で水が定常的に流れ、水位変化が生じないような場を作成しておき、その後に流木を供給して流木群の流動を追跡した。なお、実験には長さ2.5 cm、直径2.2 mm、密度0.83 g/cm³の円柱形木材を流木模型として用いた。

測定項目は、流木の流動過程であり、2次元水路上部に設置したビデオカメラにより撮影し、流木位置、回転角度をビデオ解析により求めた。流量はすべて500cc/secとし、同じ水理条件のもとで4回実験を行った。

3.2 計算の初期条件及び流入条件

初期条件として、流木を流入境界から与える前に、2次元水路において所定の流入流量で水の流動計算を実行し、定常な流れの場を作成してこれを初期条件に用いることにした。定常な流れ場が形成された後、流入境界地点で、実験のビデオ解析から得られた流木の流入時刻、本数、各流木の x, y 座標(座標原点は図-2に示してある)、初期回転角 θ_{k0} を境界条件として与えた。なお、計算には空間差分間隔 $\Delta x = \Delta y = 5$ cm、時間差分間隔 $\Delta t = 0.008$ 秒を用いた。流木の密度、長さおよび直径等の値は実験条件のものをそのまま使い、抗力係数については $C_{Dx} = C_{Dy} = 1.0$ 、仮想質量係数には $C_M = 1.0$ を用いた。

3.3 流木の拡散係数

$dX_k/dt = u_k$ および $dY_k/dt = v_k$ から求まる流木の決定論的な位置(X_k, Y_k)からの拡散による変動値 $\Delta X_k, \Delta Y_k$ を、次式で評価した。

$$\Delta X_k = \sqrt{4K_x \Delta t} \text{erf}^{-1}(\alpha), \quad \Delta Y_k = \sqrt{4K_y \Delta t} \text{erf}^{-1}(\beta) \quad (14)$$

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、 $\text{erf}^{-1}(s)$ は次式より評価する³⁾。

$$\text{erf}(s) = \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-t^2) dt, \quad \Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp(-t^2/2) dt \quad (15)$$

拡散係数 K_x, K_y については、実験で得た $K_x/u_*h = 0.629, K_y/u_*h = 0.208$ 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。

$$\left. \begin{aligned} X_k^{n+1} &= X_k^n + u_k^n \Delta t + \Delta X_k = X_k^n + u_k^n \Delta t + \sqrt{4K_x \Delta t} \text{erf}^{-1}(\alpha) \\ Y_k^{n+1} &= Y_k^n + v_k^n \Delta t + \Delta Y_k = Y_k^n + v_k^n \Delta t + \sqrt{4K_y \Delta t} \text{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3.4 流木の回転角

2.で示した方法により流木の回転角は決定論的に求まるが、流れの変動により回転角も変動するものと推

察される。実際、一様流場においては、実験で用いた流木模型では平均角速度 $\bar{\omega} \approx 0$ 、角速度の標準偏差 $\sigma_{\omega} = 81.6Fr$ (Fr はフルード数)で回転しながら流下することが確認されており³⁾、回転角の変動特性を角速度の変動で議論できることが示唆された。そこで、ここでは流木の回転角 θ_k を、決定論的に求まる角速度 ω_d のみで表現する場合と、これと確率論的に求めた変動角速度 ω_p との和 $\omega = \omega_d + \omega_p$ の二通りを考え、実験値と比較検討する。すなわち、

$$d\theta_k/dt = \omega_d \quad , \quad d\theta_k/dt = \omega_d + \omega_p \tag{17}$$

ここに、 ω_d は(8)式で決定論的に求まる流木の回転角速度、 ω_p は変動角速度であって、角速度の確率密度関数 ϕ が正規分布すると仮定すると³⁾、その分布関数 Φ は

$$\Phi\left(\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds \tag{18}$$

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 $\gamma(= (\omega_p - \bar{\omega})/\sigma_{\omega})$ を求め、 $\omega_p = \gamma\sigma + \bar{\omega}$ で評価できる。ただし、 $\bar{\omega} = 0$ とした。

3.5 実験結果と計算結果の比較

図-3は流木が流入する直前の2次元水路内の流速ベクトルの実験値と計算値を比較したものである。汜濫計算に用いていた1次の風上差分では数値粘性により主流部分の流速が遅くなっていたものが今回の計算では改善され、実験値をよく再現できるようになっている。図-4は、同一実験条件で行なった4回の水理実験(RUN A, B, C, D)のうちのRUN Cの場合について、流入流木の初期回転角を仮に全てゼロにし、回転角速度の変動成分 ω_p を考慮しないときの計算結果を示したものである。同図より流木は主流に沿って流動している

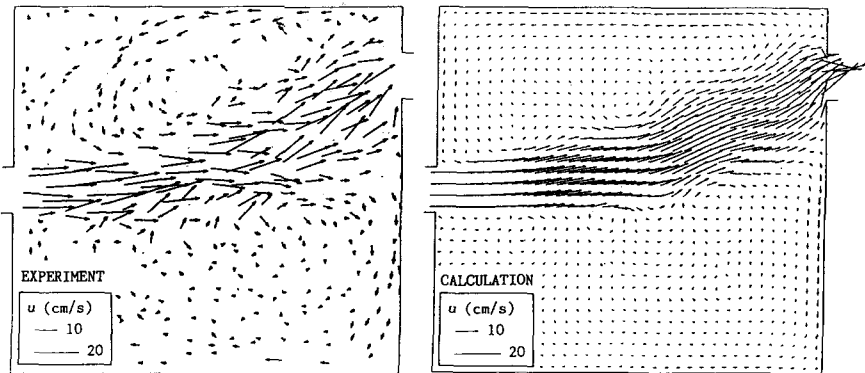


図-3 流れの場の流速ベクトル

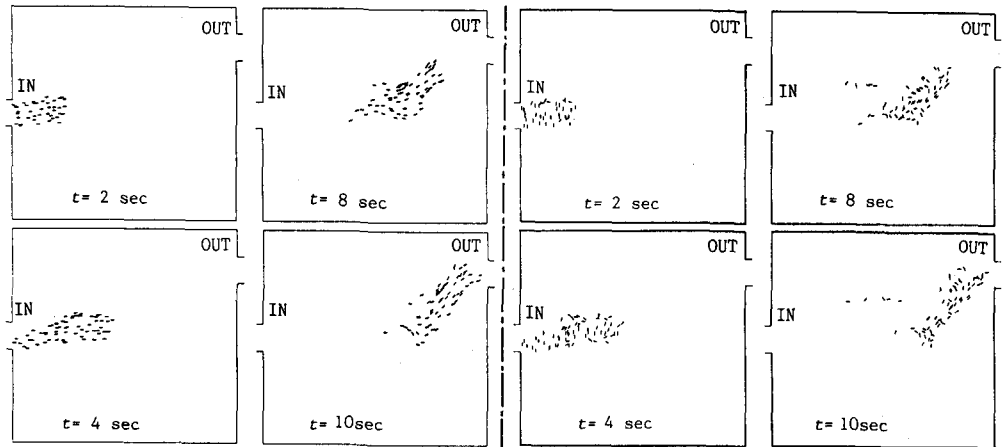


図-4 流木群の流動の計算結果（初期回転角ゼロ）

図-5 流木群の流動の計算結果（初期回転角90°）

ことがわかる。図-5は、初期回転角を全て90°にした場合であるが、10秒後には主流に沿うような回転角をもった流木が多くなっていることがわかる。このように常識的な計算結果が得られたことより、流木の回転角に関する解析方法が妥当であるものと推察される。図-6は流木流入条件に実験値を用い、 ω_p のみゼロとした場合の計算結果および ω_p を考慮した場合の計算結果と水理実験結果をそれぞれ比較したものである。 $\omega_p = 0$ の計算結果は、流木位置については拡散が小さめではあるが、実験結果を比較的良好に再現していることがわかる。回転角度については、計算のほうが若干主流に沿った向きの流木が多いように見受けられる。 ω_p も考慮した計算結果は、流木の拡がりはかなりよく実験値と一致しており、回転角の主流からの変動も実験値の傾向をよく再現している。とくに、 $t = 20 \text{ sec}$ の計算結果は、回転角速度の確率変動量を考慮しないとかなり異なっており、考慮した場合の方が流木の拡がりに関し、実験結果をよく再現していることがわかる。

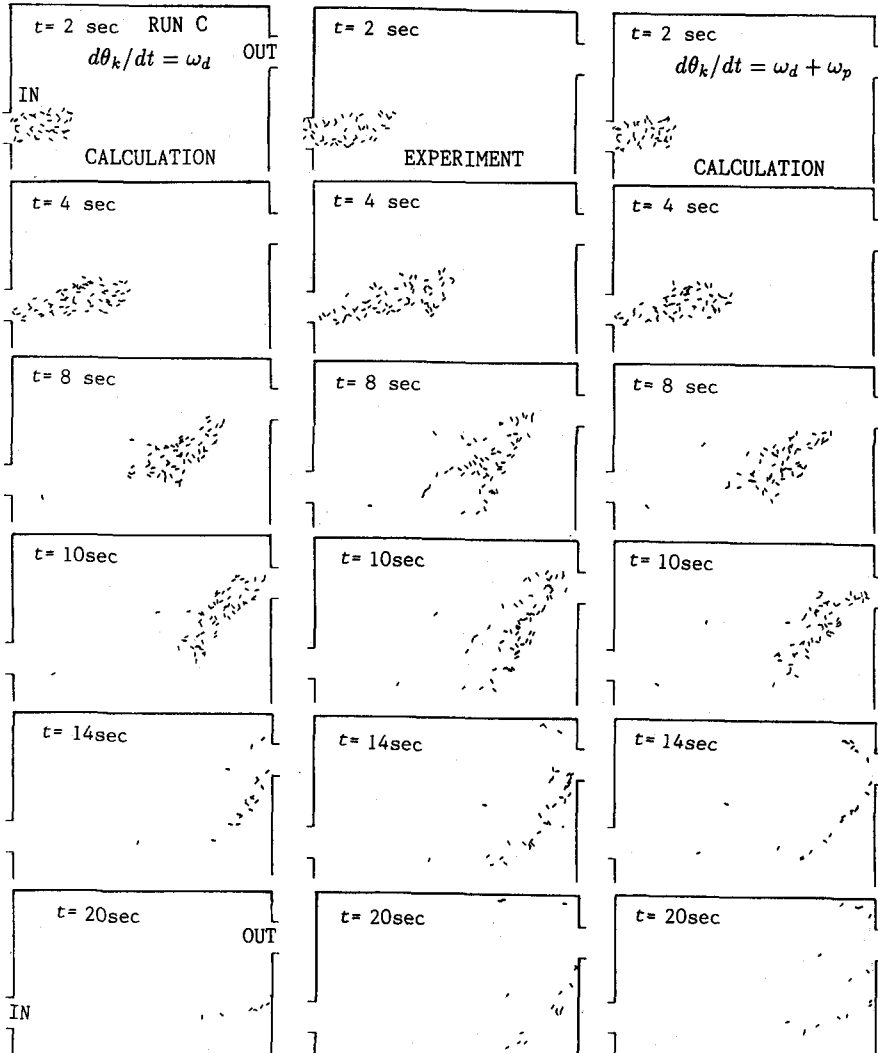


図-6 流木群の流動の計算結果と実験結果の比較

4. 流木群の堰止め

ここでは、堤内地に流入した流木群が家屋間あるいは家屋前面で堰止まる現象について水理実験を行い、以上で述べてきた手法を用いて、この過程をシミュレートする。

4.1 実験装置及び実験方法

実験に用いた水路は図-7に示すような長さ約9m、幅30cm、深さ30cmの鋼製両面ガラス張り水路で、勾配は1/500に固定している。水路上流端から約6.2mの位置に、長さ10cm、幅5cm、高さ10cmの木製家屋模型を図-8に示すように配置し、水路上流端から約1.5m下流に設置したベルトコンベヤー式の給木装置で給木した。ベルトコンベヤーの回転速度を変化させることで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。ベルトコンベヤー上に流木模型を水路幅方向に29本、水路上流側に1cm間隔で10列、計290本を整列配置し、ベルトコンベヤーの回転で水路内に落下させる方式で給木した。流木模型として、長さが $\ell = 3, 4, 5, 6, 7$ cmの5種類で、直径2.2mm、密度 0.83 g/cm^3 の円柱形木材を用いた。なお、流量は $Q = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ l/sec}$ の3通り、流入流木フラックスは $C_{sp} = 0.40, 0.68, 1.93 \text{ 本/sec/cm}$ の3通りとした。

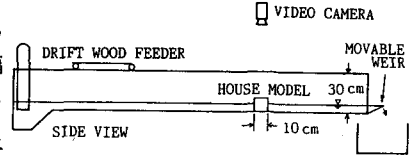
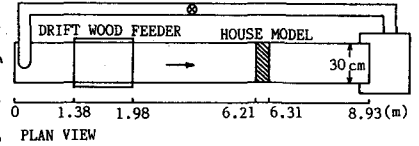


図-7 流木群の堰止めに関する実験装置

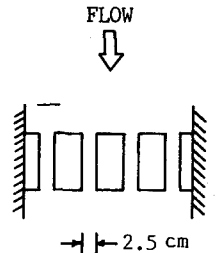


図-8 家屋模型の配置

4.2 計算の初期条件及び流入条件

予め所定の流量を流入境界から与え、定常な流れ場を作成した。その後、水理実験と同様に水路幅方向に1cm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回の給木を水理実験で得た時間間隔で行い、総流木本数は $29 \times 10 = 290$ 本である。初期回転角度を実験では計測していないので、ここでは $[0, 1]$ の一樣乱数を発生させ、 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 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 $\Delta x = 5 \text{ cm}$ 、水路幅方向に $\Delta y = 1.25 \text{ cm}$ 、時間差分間隔は $\Delta t = 0.004 \text{ sec}$ である。流木の諸元は実験条件をそのまま用いた。計算領域は図-7で示した流木投入位置から水路下流端までで、対象とした流れの場は家屋間隔が2.5cm、流木長は4cmと6cmの2通りである。

4.3 流木群の堰止めモデル

2.および3.で示した数値解析方法で、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。図-9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) 図-9の(2)の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(4)のように、家屋前面に大き

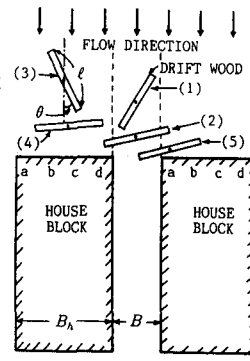


図-9 家屋と流木の位置関係

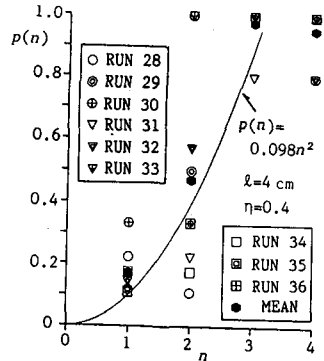


図-10 流木の堰止め確率

な回転角度 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 $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ とする。3) 図-9の(1),(3),(5)のような流木も、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き確率を評価した。

図-10は、流木長が4cmのとき、家屋間で既に堰止まっている流木の本数 n と、その本数に対して後続の流木が家屋間で堰止まる確率 $p(n)$ との関係を示したものである。ばらつきが大きい、平均値を $p(n) = 0.098n^2$ で回帰する。そして、どの流木が堰止まるかを判定するために、 $[0, 1]$ の一樣乱数 q を発生させ、 $p(n) > q$ となればその流木は堰止まるとし、以後、 $p(n+1)$ に対して同様の判定を繰り返す。ただし、 $n > 3$ のときは $p(n) = 1.0$ とする。以上が堰止めのモデル化である。

4.4 実験結果と計算結果の比較

図-11はRUN 28, 29, 30の、図-12はRUN 34, 35, 36 ($\ell = 4\text{ cm}$)の、図-13はRUN 52, 53, 54 ($\ell = 6\text{ cm}$)の流木の堰止め率 $\alpha(t)$ の時間変化に関する実験結果と計算結果とを比較したものである。ここに、堰止め率 $\alpha(t)$ とは、水路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 $t = 0\text{ sec}$ 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ている流木本数を供給した総流木本数(270本)で除したものである。なお、各RUNの実験条件は図中に示してある。計算結果はRUN 28を除き、最終的な堰止め率のみでなく、堰止め率の時間変化に関する実験結果をも比較的よく再現している。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 で、最初の流木が家屋に到達してから最後の流木が到達するまでの時間 t_{en} は 40.17 sec であり、これと同一流量での他の実験では 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、図-14は流木長が 6 cm であ

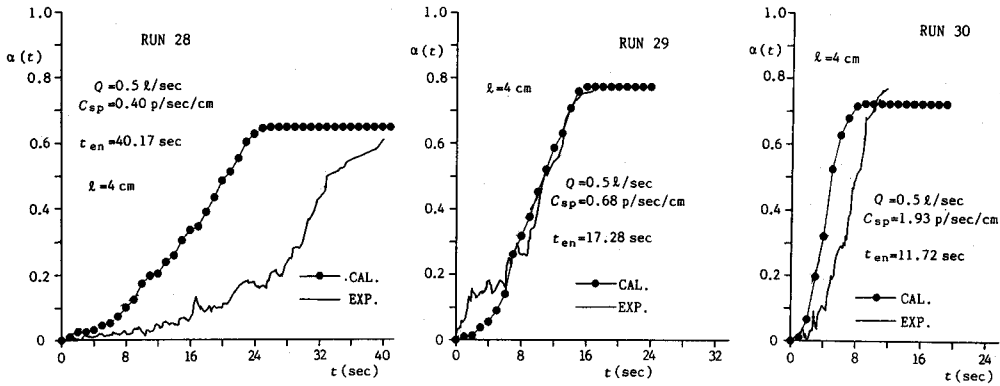


図-11 流木の堰止め率の時間変化($\ell = 4\text{ cm}$)

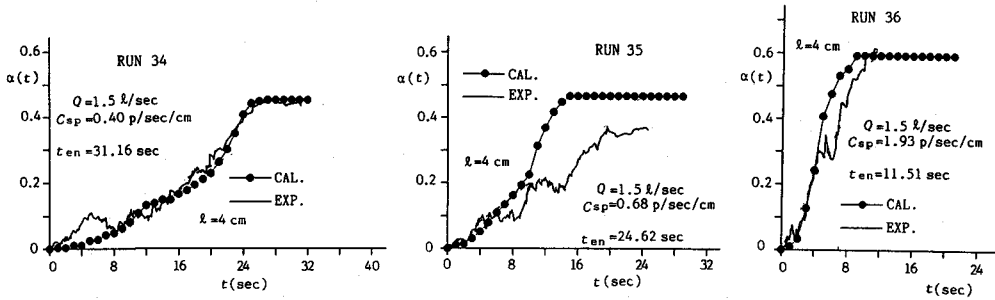


図-12 流木の堰止め率の時間変化($\ell = 4\text{ cm}$)

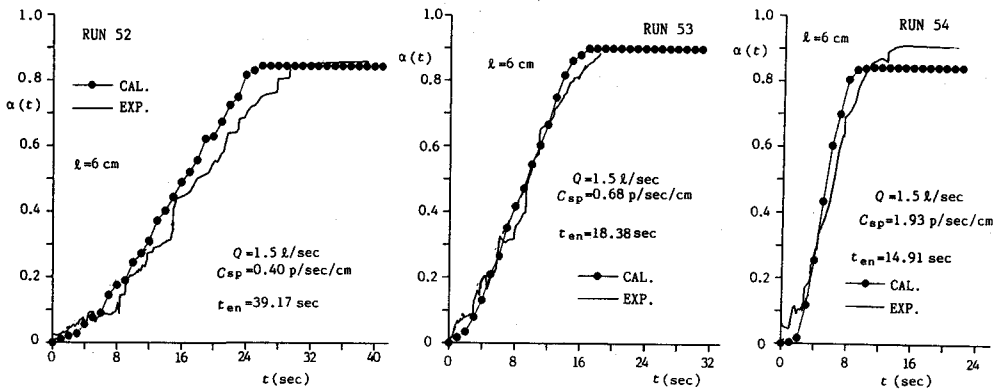


図-13 流木の堰止め率の時間変化($\ell = 6\text{ cm}$)

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。

図-15はRUN 36の場合の堰止めによる流下方向の水深変化の計算値を家屋模型近傍で見たものである。流木群が家屋模型に到達する直前の $t = 0$ secでは、家屋前面で堰上げが生じているが、流木が全て家屋に到達した $t = 20$ secでは、流木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、さらに水位の上昇が認められる。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。今後、実験による計算結果の検証を行ってきたい。

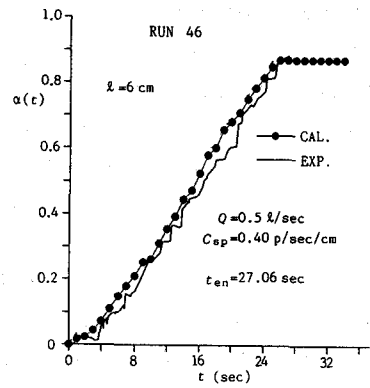


図-14 流木の堰止め率の時間変化($l = 6$ cm)

5. 結 語

本研究では、まず、流れの場を精度よく再現するためにこれまで取り扱ってきた基礎式を改良し、その差分式の時間積分にはアダムス・バッシュホース法を、移流項の積分にQUICK法を導入し、数値解析の精度を高めた。これを用いた数値解析結果は、実験結果をよく再現することが確認された。ついで、2次元水路内での流木群の流動について検討した。流水のオイラー的解析法と流木群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、これから求め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た。流木の回転角についても、力学的に回転角速度を求め、確率変動量との和として角速度を評価した。本手法を用いて水理実験結果の再現を試みた結果、流木位置および回転角度の実験結果が本手法により極めてよく再現され、本手法の妥当性が検証された。さらに、流木群が家屋間で堰止まる機構をモデル化し、本手法を流木群の堰止めに関する水理実験の再現に適用した結果、最終的な堰止め率のみでなく、その時間変化をも比較的良好に再現できることがわかった。

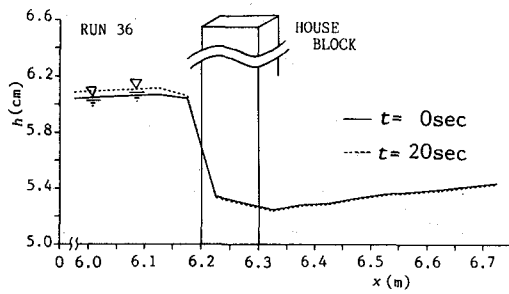


図-15 堰止めによる水位変化の計算値

堰止め確率 $p(n)$ については実験結果をもとに評価したが、堰止め率 $\alpha(t)$ を規定する重要なパラメータであるので、一旦堰止まった流木が再度流出する確率も含めて確率論的な考察をさらに行なっていく必要がある。堰止めによる水位の堰上げやそれによる家屋の流失危険度の増大化についても、水理実験を通してさらに検討していく必要がある。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費（一般研究 (C) 課題番号 05680368）の補助を受けて行なったものであり、関係各位に記して深謝する。

参考文献

- 1) 細田 尚・木村一郎：開水路急拡部の流れにおける渦の発生・発達に関する二、三の検討，水工学論文集，第37巻，1993，pp.463-468.
- 2) 中川 一：氾濫水・土石流の動態とその解析，土木学会水理委員会，水工学シリーズ，1992，pp.A-9-1-A-9-20.
- 3) 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，1993，pp.379-384.