

## 流木群の流動に関する研究(3) —流木の回転運動を考慮した解析—

中川 一・井上和也・池口正晃

### NUMERICAL SIMULATION OF THE DRIFTWOOD BEHAVIOR (3) —ANALYSIS CONSIDERING THE DYNAMICS OF THE ROTATIONAL MOTION OF THE DRIFTWOOD—

By *Hajime NAKAGAWA, Kazuya INOUE and Masaaki IKEGUCHI*

#### Synopsis

A numerical simulation model has been developed for computing the behavior of driftwood and its dam up process due to jamming between and/or in front of the houses when driftwood debouches into horizontally two-dimensional flow field. Calculations were made with an interacting combination of Eulerian fluid and Lagrangian driftwood equations. Equation of rotational motion of driftwood is evaluated dynamically as well as equation of translational motion. The positions, rotational angles of grouped pieces of driftwood, and the amount of dam-up of water level due to jamming of driftwood found experimentally are well explained by the calculated values. Moreover, the risk of swept away of wooden houses found to be increased by the dam-up experimentally.

#### 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みられる。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。さらに、堰止めによる水位上昇量の定量的評価と、これに起因する木造家屋の流失危険度がどの程度増加するのかを明らかにすることが重要である。

著者らは前報<sup>1)</sup>において流木群の流動のシミュレーション手法を示すとともに、堰止め機構のモデル化を行い、家屋間および家屋前面で流木群が堰止まる過程をシミュレートする手法を提示し、水理実験による検証を行った。その際、流木群の回転運動については確率論的な取扱いがなされ、流木の回転運動を力学的に評価できていなかった。さらに、流木群の堰止めによる水位上昇およびこれに伴う家屋流失危険度の評価については残された課題であった。

本研究では、まず、一昨年<sup>2)</sup>の報告では流れの場の数値計算に1次の風上差分を用いたため数値粘性の影響が大きく、流れの場をうまく再現できなかったため、これを精度よく再現し得る数値解析法について検討する。ついで、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示す。流木の運動については並進運動だけでなく回転運動についても力学的な評価を試みる。さらに、水原が行った流水と流木との相対速度と回転角度に関する水理実験結果<sup>3)</sup>を数値解析によって再現を試みるとともに、流木群の堰止めによる家屋流失危険度を水理実験結果をもとに考察する。

2. 流水およ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。

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

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

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

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,  $f$ ; 摩擦損失係数,  $\nu$ ; 動粘性係数,  $A_h$ ; 水平渦動粘性係数,  $k$ ; 乱流エネルギー,  $\rho$ ; 水の密度,  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ ; 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<sup>4)</sup>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,  $\alpha$  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。

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

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附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。

$$(m_k + mC_M) \frac{du_k}{dt} = m(1 + C_M) \frac{dU_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} - \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \dots\dots\dots (5)$$

$$(m_k + mC_M) \frac{dv_k}{dt} = m(1 + C_M) \frac{dV_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial y} - \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \dots\dots\dots (6)$$

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,

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

により流木位置と関係付けられる。また,  $W_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2}$ ,  $m_k$ ; 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,  $m$  は流木体積部分の流体の質量である。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。

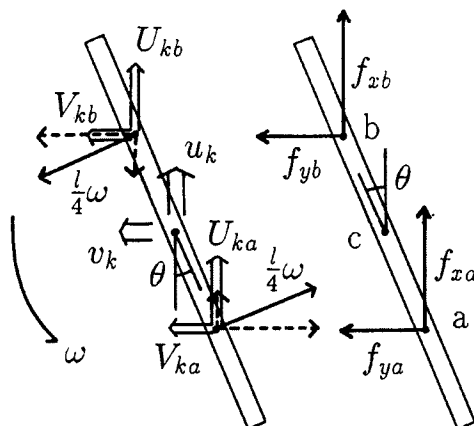


Fig. 1 Definition sketch of the rotational angle of the driftwood.

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。**Fig. 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。

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

ここに、

$$f_{xa} = (1/2) \rho C_{Dx} \sqrt{(U_{ka} - u_k - u_{rka})^2 + (V_{ka} - v_k - v_{rka})^2} (U_{ka} - u_k - u_{rka}) (A_{kx}/2)$$

$$f_{ya} = (1/2) \rho C_{Dy} \sqrt{(U_{ka} - u_k - u_{rka})^2 + (V_{ka} - v_k - v_{rka})^2} (V_{ka} - v_k - v_{rka}) (A_{ky}/2)$$

$$f_{xb} = (1/2) \rho C_{Dx} \sqrt{(U_{kb} - u_k - u_{rkb})^2 + (V_{kb} - v_k - v_{rkb})^2} (U_{kb} - u_k - u_{rkb}) (A_{kx}/2)$$

$$f_{yb} = (1/2) \rho C_{Dy} \sqrt{(U_{kb} - u_k - u_{rkb})^2 + (V_{kb} - v_k - v_{rkb})^2} (V_{kb} - v_k - v_{rkb}) (A_{ky}/2)$$

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

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

$\theta_k$  ; 流木の回転角,  $I$  ; 流木の慣性モーメント,  $\ell$  ; 流木長であり、添字  $a, b$  は  $a$  点および  $b$  点における水理量を表わす。

水表面におけるせん断応力  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  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、

$$\tau_{sx} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_i} \left[ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \right], \quad \tau_{sy} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_i} \left[ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \right] \dots\dots\dots (9)$$

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、 $N_i$  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。

$$U_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_k, \quad V_k \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_k \dots\dots\dots (10)$$

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。

### 2.3 流木の拡散変動量

$dX/dt = u_k$  および  $dY/dt = v_k$  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、Dukowicz<sup>5)</sup>の研究を参考にして次式で評価した。

$$\Delta X_k = \sqrt{4K_x \Delta t} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha), \quad \Delta Y_k = \sqrt{4K_y \Delta t} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\alpha, \beta$  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、 $\operatorname{erf}^{-1}(s)$  は次式より評価する。

$$\operatorname{erf}(s) = \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-\eta^2) d\eta, \quad \Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad (12)$$

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<sup>1), 2)</sup>。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。

$$\left. \begin{aligned} X_k^{n+1} &= X_k^n + u_k^n \Delta t + \Delta X_k = X_k^n + u_k^n \Delta t + \sqrt{4K_x \Delta t} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha) \\ Y_k^{n+1} &= Y_k^n + v_k^n \Delta t + \Delta Y_k = Y_k^n + v_k^n \Delta t + \sqrt{4K_y \Delta t} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

### 2.4 流木の回転角

2.2 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  $\bar{\omega} \simeq 0$ 、角速度の標準偏差  $\sigma_\omega = 81.6 Fr$  ( $Fr$  はフルード数) で回転しながら流下することが確認され、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<sup>2)</sup>。そこで、ここでは流木の回転角  $\theta_k$  を、決定論的に求まる角速度  $\omega_d$  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  $\omega_p$  との和  $\omega = \omega_d + \omega_p$  の二通りを考える。すなわち、

$$d\theta_k/dt = \omega_d, \quad d\theta_k/dt = \omega_d + \omega_p \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $\omega_d$  は(8)式で決定論的に求まる流木の回転角速度、 $\omega_p$  は変動角速度であって、角速度の確率密度関数  $\phi$  は正規分布で記述され、その分布関数  $\Phi$  は

$$\Phi\left(\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega_p - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) d\eta \quad \dots\dots\dots (15)$$

で与えられるので、 $\Phi$  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  $r = (\omega_p - \bar{\omega})/\sigma_\omega$  を求め、 $\omega_p = r\sigma + \bar{\omega}$  で評価できる。ただし、 $\bar{\omega} = 0$  とした。

## 3. 基礎方程式の差分化

### 3.1 流水の運動に関する基礎式の差分化

流れの場の数値シミュレーション手法については、これまで汜濫解析用の1次の風上差分<sup>6)</sup>を用いてきたが、この方法では数値粘性が大きすぎ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<sup>2)</sup>。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・バシユフォース法を、移流項にはQUICKスキームを用いて計算精度を高めた。このとき、例えば(1)式の差分表示は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{M_{i,j+1/2}^{n+1} - M_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{3}{2}(XDX^n + XDY^n) - \frac{1}{2}(XDX^{n-1} + XDY^{n-1}) \\
 &= -g \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^n + h_{i-1/2,j+1/2}^n}{2} \cdot \frac{H_{i+1/2,j+1/2}^n - H_{i-1/2,j+1/2}^n}{\Delta x} \\
 & \quad - \frac{1}{2} f_{i,j+1/2}^n \frac{M_{i,j+1/2}^{n+1} + M_{i,j+1/2}^n}{h_{i+1/2,j+1/2}^n + h_{i-1/2,j+1/2}^n} \sqrt{(u_{i,j+1/2}^n)^2 + (\tilde{v}_{i,j+1/2}^n)^2} \\
 & \quad + \nu \left\{ \frac{1}{\Delta x} \left( h_{i+1/2,j+1/2}^n \frac{u_{i+1,j+1/2}^n - u_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} - h_{i-1/2,j+1/2}^n \frac{u_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n}{\Delta x} \right) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{\Delta y} \left( \tilde{h}_{i,j+1}^n \frac{u_{i,j+3/2}^n - u_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} - \tilde{h}_{i,j}^n \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} \right) \right\} \\
 & \quad + \frac{1}{\Delta x} \left\{ h_{i+1/2,j+1/2}^n \left( 2A_{hi+1/2,j+1/2}^n \frac{u_{i+1,j+1/2}^n - u_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} - \frac{2}{3} k_{i+1/2,j+1/2}^n \right) \right. \\
 & \quad \left. - h_{i-1/2,j+1/2}^n \left( 2A_{hi-1/2,j+1/2}^n \frac{u_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n}{\Delta x} - \frac{2}{3} k_{i-1/2,j+1/2}^n \right) \right\} \\
 & \quad + \frac{1}{\Delta y} \left\{ \tilde{h}_{i,j+1}^n \tilde{A}_{hi,j+1}^n \left( \frac{u_{i,j+3/2}^n - u_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} + \frac{v_{i+1/2,j+1}^n - v_{i-1/2,j+1}^n}{\Delta x} \right) \right. \\
 & \quad \left. - \tilde{h}_{i,j}^n \tilde{A}_{hi,j}^n \left( \frac{u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} + \frac{v_{i+1/2,j}^n - v_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right) \right\} \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 \tilde{h}_{i,j}^n &= (h_{i+1/2,j+1/2}^n + h_{i-1/2,j+1/2}^n + h_{i+1/2,j-1/2}^n + h_{i-1/2,j-1/2}^n)/4 \\
 \tilde{v}_{i,j+1/2}^n &= (v_{i-1/2,j+1}^n + v_{i-1/2,j}^n + v_{i+1/2,j+1}^n + v_{i+1/2,j}^n)/4 \\
 \tilde{A}_{hi,j}^n &= (A_{hi+1/2,j+1/2}^n + A_{hi-1/2,j+1/2}^n + A_{hi+1/2,j-1/2}^n + A_{hi-1/2,j-1/2}^n)/4 \\
 XDX^n &= \frac{u_{i+1/2,j+1/2}^n M_d^n - u_{i-1/2,j+1/2}^n M_u^n}{\Delta x}, \quad XDY^n = \frac{v_{i,j+1/2}^n M_i^n - v_{i,j}^n M_7^n}{\Delta y} \\
 M_d^n &= \frac{1}{2}(M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i+1,j+1/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i-1,j+1/2}^n) \\
 & \quad + \frac{1}{24}(M_{i,j+3/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) \quad (\text{但し, } u_{i+1/2,j+1/2}^n \geq 0) \\
 M_d^n &= \frac{1}{2}(M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i+2,j+1/2}^n - 2M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) \\
 & \quad + \frac{1}{24}(M_{i+1,j+3/2}^n - 2M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i+1,j-1/2}^n) \quad (\text{但し, } u_{i+1/2,j+1/2}^n < 0) \\
 M_u^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+1/2}^n + M_{i-1,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i,j+1/2}^n - 2M_{i-1,j+1/2}^n + M_{i-2,j+1/2}^n) \\
 & \quad + \frac{1}{24}(M_{i-1,j+3/2}^n - 2M_{i-1,j+1/2}^n + M_{i-1,j-1/2}^n) \quad (\text{但し, } u_{i-1/2,j+1/2}^n \geq 0) \\
 M_u^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+1/2}^n + M_{i-1,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i+1,j+1/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i-1,j+1/2}^n) \\
 & \quad + \frac{1}{24}(M_{i,j+3/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) \quad (\text{但し, } u_{i-1/2,j+1/2}^n < 0)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_i^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+3/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i,j+3/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) \\
 &\quad + \frac{1}{24}(M_{i-1,j+1/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i+1,j+1/2}^n) \quad (\text{但し, } v_{i,j+1}^n \geq 0) \\
 M_i^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+3/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i,j+5/2}^n - 2M_{i,j+3/2}^n + M_{i,j+1/2}^n) \\
 &\quad + \frac{1}{24}(M_{i-1,j+3/2}^n - 2M_{i,j+3/2}^n + M_{i+1,j+3/2}^n) \quad (\text{但し, } v_{i,j+1}^n < 0) \\
 M_i^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i,j+1/2}^n - 2M_{i,j-1/2}^n + M_{i,j-3/2}^n) \\
 &\quad + \frac{1}{24}(M_{i-1,j-1/2}^n - 2M_{i,j-1/2}^n + M_{i+1,j-1/2}^n) \quad (\text{但し, } v_{i,j}^n \geq 0) \\
 M_i^n &= \frac{1}{2}(M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) - \frac{1}{8}(M_{i,j+3/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j-1/2}^n) \\
 &\quad + \frac{1}{24}(M_{i-1,j+1/2}^n - 2M_{i,j+1/2}^n + M_{i+1,j+1/2}^n) \quad (\text{但し, } v_{i,j}^n < 0)
 \end{aligned}$$

なお、(3)式の連続式の差分化は以下のようになる。

$$\frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - h_{i+1/2,j+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1/2}^n - M_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^n - N_{i+1/2,j}^n}{\Delta y} = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

**3. 2 流木の運動に関する基礎式の差分化**

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表わすと，(5)および(6)式の差分表示は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 (m_k + m_{C_M}) \frac{u_k^{n+1} - u_k^n}{\Delta t} &= m(1 + C_M) \frac{U_k^{n+1} - U_k^n}{\Delta t} - g \frac{H_{kfx}^n - H_{kbx}^n}{\Delta x} \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} C_{D_x} \sqrt{(u_k^n - U_k^n)^2 + (v_k^n - V_k^n)^2} \left( \frac{u_k^{n+1} + u_k^n}{2} - U_k^n \right) A_{kx} \quad \dots\dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (m_k + m_{C_M}) \frac{v_k^{n+1} - v_k^n}{\Delta t} &= m(1 + C_M) \frac{V_k^{n+1} - V_k^n}{\Delta t} - g \frac{H_{kfy}^n - H_{kby}^n}{\Delta y} \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} C_{D_y} \sqrt{(u_k^n - U_k^n)^2 + (v_k^n - V_k^n)^2} \left( \frac{v_k^{n+1} + v_k^n}{2} - V_k^n \right) A_{ky} \quad \dots\dots\dots (19)
 \end{aligned}$$

ここに、 $H_{kfx}^n, H_{kbx}^n, H_{kfy}^n, H_{kby}^n$  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(7)式を以下のように差分化する。

$$\frac{X_k^{n+1} - X_k^n}{\Delta t} = u_k^{n+1}, \quad \frac{Y_k^{n+1} - Y_k^n}{\Delta t} = v_k^{n+1} \quad \dots\dots\dots (20)$$

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内挿することによって求めた。

4. 流木群の流動

4.1 回転運動に関する水原の水理実験結果の再現計算

(1) 実験の概要

流木の回転運動に関して水原が行なった実験<sup>3)</sup>の概要について簡単に説明する。実験に用いられた水路は、幅30cm、高さ20cm、長さ10m（水路床ペイント塗装鉄板、両側壁透明合成樹脂板）の可変勾配型循環式水路である。水路下流端から3.2～3.6mの40cm区間を計測区間とし、流木の流下速度、表面流速および流木の偏走角（流木が主流方向に対して傾いて流れる角度）を計測している。水原は、実験条件として、水路勾配、流量、流木長、流木の断面形状（円形、矩形、三角形）等を種々変化させて、多くの実験を行っているが、ここではそのうち、流木長が3cmの円柱形断面の流木について、流量が2ℓ/secで水路勾配が1/100の場合と流量が5ℓ/secで水路勾配が1/200の場合の2ケースについて実験結果の再現計算を試みる。

(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、1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、 $x = 0$ 地点の水路中央から初期回転角 $\theta_0 = 0^\circ$ 、で1本ずつ計150本の流木を次々に流入させた。なお、計算には空間差分間隔として流下方向に $\Delta x = 5\text{cm}$ 、水路幅方向に $\Delta y = 2.5\text{cm}$ とし、時間差分間隔には $\Delta t = 0.005$ 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 $C_{Dx} = C_{Dy} = 1.0$ とし、仮想質量係数については $C_M 1.0$ とした。

(3) 実験結果と計算結果の比較検討

Fig. 2は、横軸に15度間隔に整理した流木の偏走角を、縦軸に表面流速と流木の流下速度との相対速度をとり、水原の実験結果と本研究で示したシミュレーションによる計算結果とを比較したものである。なお、本実験条件は射流であるため、ここで示したアダムス・バシュフォース法とQUICK法による数値計算手法では解が発散するため、昨年度に示した1次の風上差分法を用いている。図中の黒丸は計算結果であり、流木を1本ずつ計150本流したときに、計測区間内に到達した時点での偏走角が15°間隔のどの範囲にあるかを調べ、その範囲に入った流木本数で平均をとったものである。図中の白丸は水原の実験結果である。同図より、偏走角が小さいと相対速度が大きくなる傾向が実験と計算で現れており、計算結果は実験結果の傾向をある程度再現していることがわかる。このような傾向となる理由は以下のように考えられる。すなわち、定常な流れの状態では、外力と抵抗力とがバランスしている。偏走角が小さいと主流方向の流木投

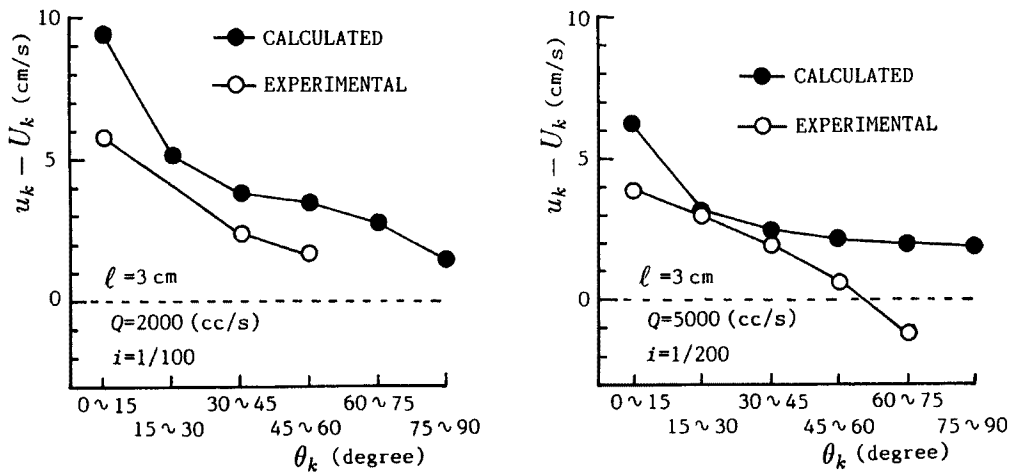


Fig. 2 Relation between rotational angle and relative velocity of the driftwood.

影面積が小さくなって抗力が減少するが、相対速度が大きくなることにより投影面積が減少した分をカバーして抗力を一定に保ち、外力とバランスするようになるためであると考えられる。逆に、偏走角が大きいと投影面積が大きくなってその分相対速度を小さくして外力とバランスするからであると思われる。

## 4.2 二次元氾濫場における流木群の流動

### (1) 実験の概要

実験については一昨年に既に示しているが<sup>2)</sup>、その概要を示しておく。用いた実験装置は Fig. 3 に示す

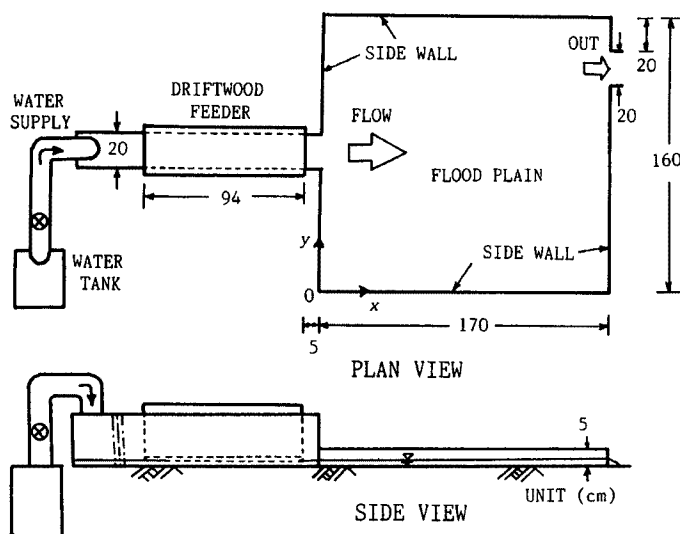


Fig. 3 Experimental set-up for measuring the two-dimensional diffusion of driftwood.

ように、長さ170cm、幅160cmの木製2次元水路と長さ150cm、幅20cm、高さ20cmの木製の一次元水路からなっている。1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1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20cm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。1次元水路には長さ94cm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2.5cm、直径2.2mm、密度 $0.83\text{g/cm}^3$ の円柱形木材を

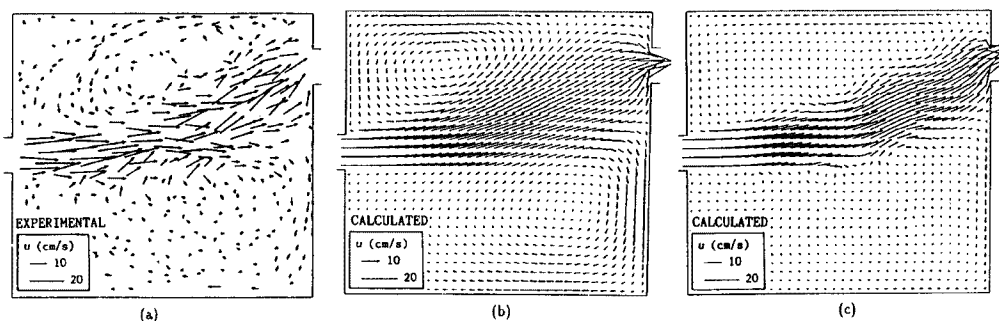


Fig. 4 Comparison of the experimental and calculated flow patterns.



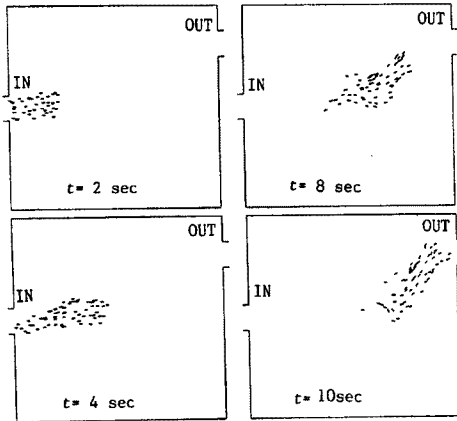


Fig. 5 Calculated positions and rotational angles of driftwood ( $\theta_0 = 0^\circ$ ).

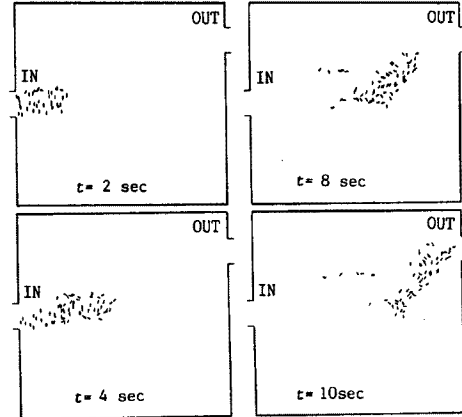


Fig. 6 Calculated positions and rotational angles of driftwood ( $\theta_0 = 90^\circ$ ).

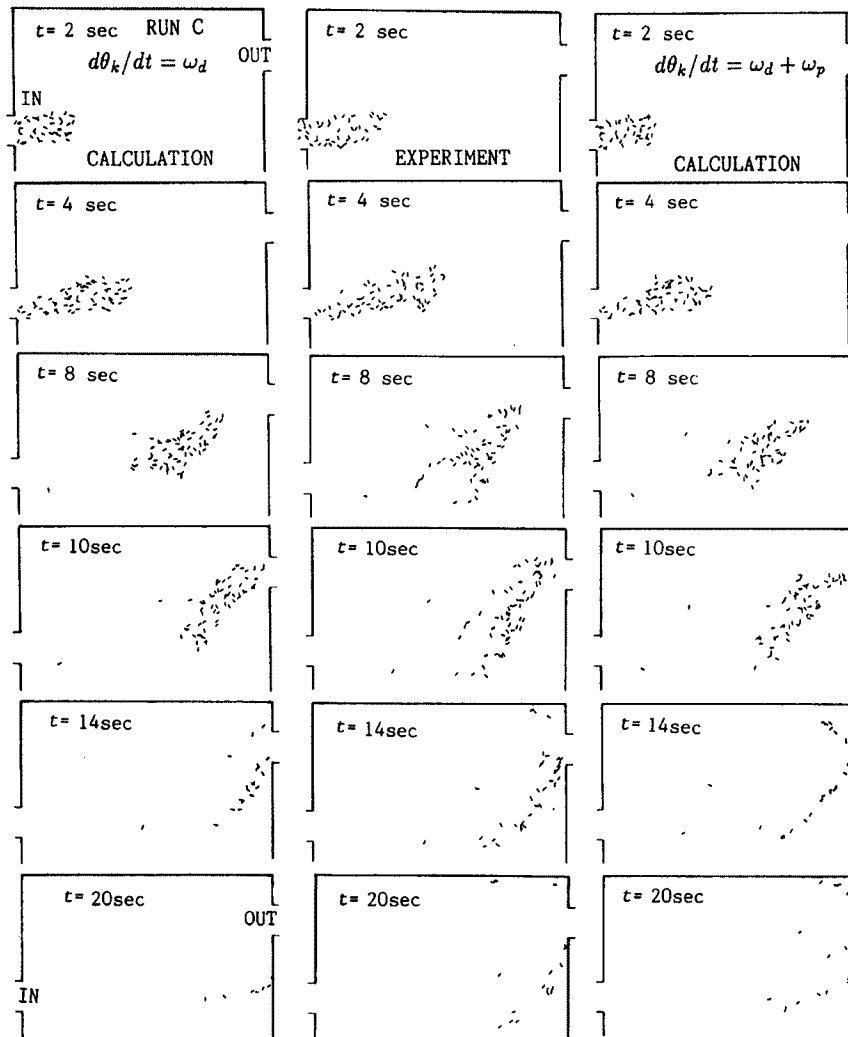


Fig. 7 Comparisons of the experimental and calculated positions and rotational angles of driftwood.

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。

### (2) 計算の初期条件および流入条件

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Fig. 3に示してある)、初期回転角 $\theta_{k0}$ 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用い、抗力係数については $C_{Dx} = C_{Dy} = 1.0$ とし、仮想質量係数については $C_M = 1.0$ とした。

### (3) 実験結果と計算結果の比較検討

(i) 流速ベクトル Fig. 4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(a)と計算値((b): 1次の風上差分, (c): QUICK)を比較したものである。1次の風上差分では水平粘性項を省略しているにもかかわらず、数値粘性により主流に誘起された大きな渦が主流の両側で見られ、これにより主流域の流速が低下するのが、実験値に比べて過小に計算されていることがわかる。さらに、下流に向かって左側にある渦において、実験では下流端出口近傍の隅角部で流線が流出するものと循環するものとに分かれているように見えるが、計算ではその隅角部よりかなり手前で流線が分かれており、実験と計算とでフローパターンが異なっていることがわかる。一方、QUICKによる計算結果は、せん断不安定による渦対が発生し、これによる小規模な循環流が生じているが、1次の風上差分の時ほど大きくはなく、主流部の流速も実験値に比較的近いものとなっている。また、流線が分かれる位置も下流端出口の隅角部近傍で、実験結果とよく一致していることがわかる。

以上より、流れの場の実験結果をよく再現できたQUICKスキームを用いて、流木群の流動をラグランジュ的に追跡することにする。

(ii) 流木の流動 Fig. 5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 $\omega_p$ 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ことがわかる。Fig. 6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。

Fig. 7は流木流入条件に実験値を用い、 $\omega_p$ のみゼロとした場合の計算結果および $\omega_p$ 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、実験結果を比較的よく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。 $\omega_p$ 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、 $t = 20$ 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き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。

## 5. 流木群の堰止めによる家屋流失危険度

### 5.1 概説

ここでは、堤内地に流入した流木群が家屋間で堰止まることによって水位の上昇が生じることを、今回新たに行なった水理実験の結果をもとに、前報で示した流木群の堰止めのシミュレーション手法<sup>1)</sup>を用いて検討する。ついで、流木群の堰止めによる水位上昇によって木造家屋の流失危険度がどのようになるかを水理実験結果をもとに考察する。

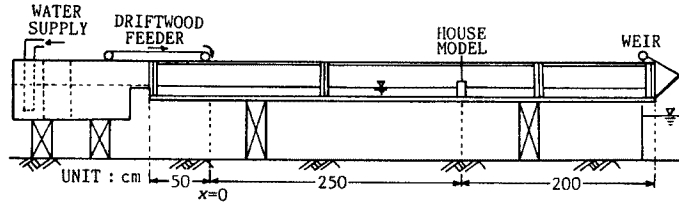


Fig. 8 Experimental flume used for dam up due to jamming of driftwood between and/or in front of the model houses.

5.2 実験装置および方法

実験に用いた水路は Fig. 8 に示すように、幅 50cm、長さ 5 m のアクリル樹脂製で、勾配は 1/200 に調整されている。水路下流端には可動式の堰が設けてあり、水深が変えられるようになっている。水路上流端から 50cm のところに電動式ベルトコンベヤーを設置し、

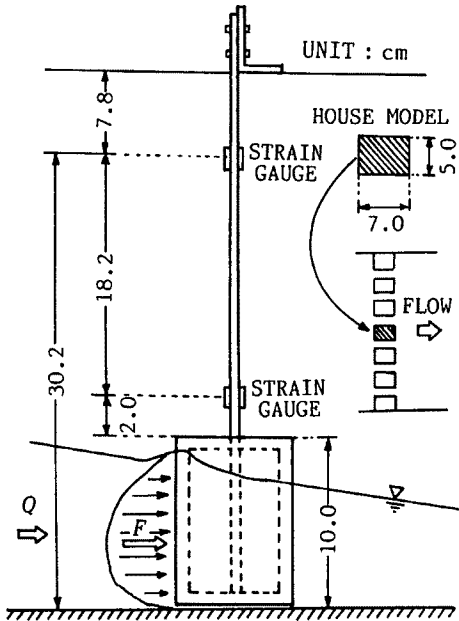


Fig. 9 House model for measuring drag force.

0.83g/cm<sup>3</sup> の円柱形木材である。

から 50cm のところに電動式ベルトコンベヤーを設置し、ベルト上に流木模型を約 850 本整列配置してベルトを回転させることで水路内に給木した。給木地点よりやや下流に  $x = 0$  をとり、この鉛直上方に設けたビデオカメラにより計算の流入境界条件に供するための流木の座標と回転角の時間変化を記録した。また、 $x = 2.5m$  の水路内に、高さ 10cm、幅 5 cm、長さ 7 cm の家屋模型 7 個を水路幅方向に 2.5cm の等間隔に配置し、これにより流木群の堰止めと水位上昇を生起させるとともに、中央の家屋模型は Fig. 9 に示すような流体力計測用とし、流木群の堰止めによる家屋模型への作用力が計測できるようになっている。さらに、この家屋模型上流 1 cm と 12cm には水位計測用のサーボ式水位計を 1 台ずつ設置し、流木群の堰止めによる水位上昇量を計測した。

実験条件は Table 1 に示すように、流量を 3 通り、流木長を 2 通り変化させ、合計 6 通りの実験を行なった。なお、表中の  $Q$  は流量、 $h_0$  は等流水深、 $u_0$  は接近流速、 $F_r$  は  $h_0$ 、 $u_0$  を代表水理量に用いたフルード数、 $l$  は流木長であり、用いた流木模型は直径 2.2mm、密度は

Table 1 Experimental conditions

RUN No.	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$h_0$ (cm)	$u_0$ (cm/s)	$F_r$	$l$ (cm)
1	800	5.83	2.74	0.036	4.0
2	800	5.83	2.74	0.036	6.5
3	1400	6.32	4.43	0.056	4.0
4	1400	6.32	4.43	0.056	6.5
5	2000	6.60	6.06	0.075	4.0
6	2000	6.60	6.06	0.075	6.5

### 5.3 流木群の堰止めによる水位上昇

著者らは前報<sup>1)</sup>で流木群が家屋間および家屋全面で堰止まる現象をモデル化し、堰止め率  $\alpha(t)$  (堰止まった流木本数  $N$  を家屋に到達した総流木本数  $N_t$  で除した値の時間変化) を説明し得る数値シミュレーション手法を提示している。そして、最終的な堰止め率  $\alpha_{en}$  と堰止め率の時間変化  $\alpha(t)$  に関する水理実験結果が、本手法でうまく説明されることがわかった。ここでも、本手法を用いて流木群の堰止め過程をシミュレートし、それにより水位の上昇について水理実験結果とシミュレーション結果とを比較検討する。

Fig. 10 は RUN 3 および RUN 4 の堰止め率の時間変化  $\alpha(t)$  の計算結果と最終堰止め率  $\alpha_{en}$  の実験結果とを比較したものである。実験では流体力の計測を行なったので家屋近傍での流木の堰止め過程がビデオ撮影できなかった。したがって最終的な堰止め率のみが計測された。同図より、最終的な堰止め率の実験値と計算値は比較的良く一致していることがわかる。

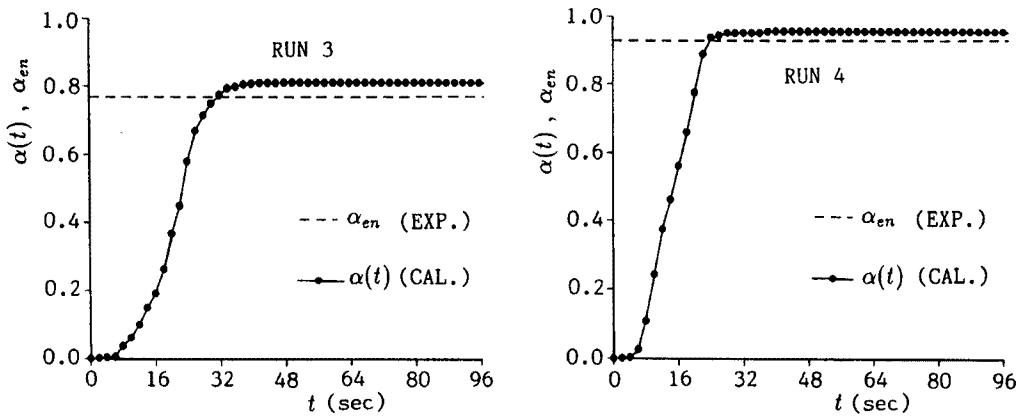


Fig. 10 Comparison between calculated  $\alpha(t)$  and measured  $\alpha_{en}$ .

Fig. 11 は流木群が堰止まる前と後での家屋模型近傍の水位変化の実験値と計算値を比較したものである。なお、家屋模型は中央に配置したもので、流下方向の水面形を示している。流木群が初めて家屋模型に到達した時刻を  $t = 0$  sec として、この時刻と流木が全て家屋模型に到達し終わった  $t = 90$  sec で比較している。 $t = 0$  sec では家屋が存在することにより既に水位は堰上がっているが、 $t = 90$  sec では一部の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。実験値は 2 点でしか計測されていないが、計算でもある程度流木群の堰止めによる水位上昇を再現することが可能なことが判明した。

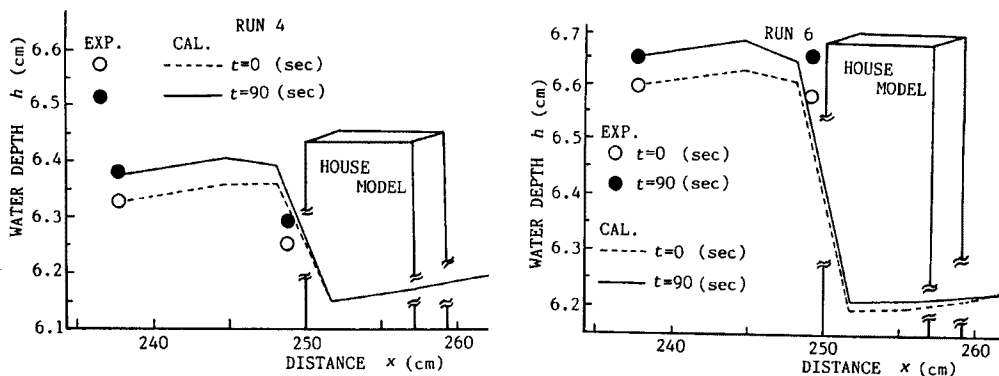


Fig. 11 Comparison between calculated and measured longitudinal water surface profile around house blocks.

Table 2 Example of bearing capacity of the typical Japanese wooden house

TYPE	F	M	$h_c$
I	0.95	49110	5.275
II	1.86	96153	5.275
III	3.70	191272	5.275
IV	1.95	100805	5.275
V	8.10	418730	5.275

F : Total bearing capacity (ton)  
 M : Total bearing moment (Nm)  
 $h_c$  : Height of action point (m)

5.4 流木群の堰止めによる家屋流失危険度

流木による家屋被害は流木が家屋に衝突する事により家屋の一部、例えばガラス窓や壁が破損してそれが家屋全壊や流失の引金になる場合と、多量の流木が堰止まることにより流下方向の流木の荷重と水位上昇による静水圧の上昇分が家屋の耐力を上回ったときに家屋流失に至る場合とが考えられる。流木の衝撃力による家屋破壊については、衝撃力の評価が難しいこともあってほとんど手がつけられておらず、基礎的な研究の段階にある<sup>7)</sup>。ここでは、後者による家屋流失危険度について検討する。

単なる流水のみによる家屋流失危険度については、高橋・中川・加納が水理実験結果と実大家屋の耐力試験結果を拠り所として木造家屋流失危険度指標を提案している<sup>8)</sup>。ここでも、彼らが用いた実大家屋の耐力試験から得られた在来軸組工法木造家屋の耐力結果を用いて、流木群の堰止めによる家屋流失危険度を評価する。実大家屋の耐力試験<sup>9)</sup>より、在来軸組工法による一般的な木造家屋の耐力は Table 2 に示すようである。ここに、TYPE I は柱、梁、床および屋根だけから構成される基本骨組構造、TYPE II は基本骨組に

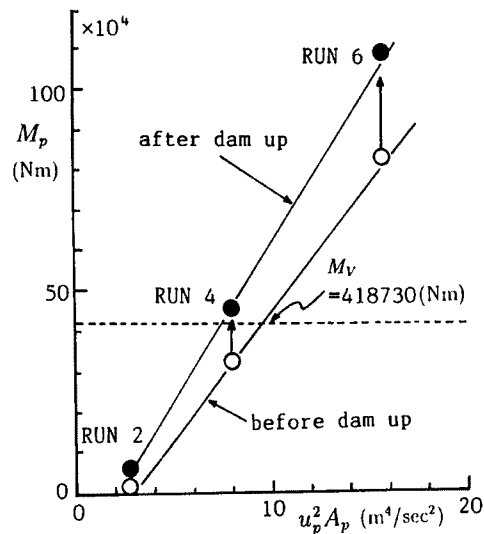


Fig. 12 Relation between  $u_p^2 A_p$  and  $M_p$  after similarity transformation. Open circles correspond to the data before dam up and closed one to data after dam up.

三割り突き付け筋かいを入れた構造、TYPE III は基本骨組に構造用合板を施した場合、TYPE IV は基本骨組に三割り相欠き筋かいを入れた構造、TYPE V はほぼ仕上がった構造である。TYPE V に対応する耐力が実際の家屋構造が持つ水平耐力と見なされよう。ただし、地震力を対象とした実験であるため、加重が繰り返し荷重であること、桁行方向と直角方向の荷重に対する耐力が示されていないこと、およびこの試験結果が普遍性のあるものかどうかなど、このデータが流水による流体力に対する抵抗力(耐力)として適用できるかどうか問題ではあるが、この表より標準的と思われる在来軸組工法による木造家屋の耐力モーメントは約 40 万(N)程度であることがわかる。

Fig. 12 は実大家屋との対応をつけるためにフルードの相似則を用いて、水理実験で得られた家屋模型に作用する抵抗力を変換し、さらに作用点の位置が  $0.732h$  ( $h$  は水深)にあるとして<sup>8)</sup> モーメント  $M_p$  を求め、これと  $u_p^2 A_p$  ( $u_p$  は相似変換後の流速、 $A_p$  は相似変換後の抵抗力の作用面積)との関係を示したものである。なお、幾何学的な相似条件は  $l_m/l_p = 1/109$  (添字 m は模型、p は実物) である。同

図には在来軸組工法による木造家屋の耐力モーメントも示してある。在来軸組工法による木造家屋は「ほぞ」構造をしており、ここが外力のモーメントにより塑性ヒンジとなって構造骨組みの変形が起こると考え、モーメントを流失危険度指標にしているのである。図中の白丸は流木群が堰止まる前のモーメントを、黒丸は堰止まった後のモーメントを示している。これより、流木群の堰止めにより作用するモーメントは  $u_p^2 A_p$  が増加するとほぼ線形的に増加することがわかる。また、RUN 4 では流木群が堰止まる前では流失限界以下であったが、堰止まった後では流失限界を超えていることがわかる。

## 6. 結 語

本研究では、まず、実験結果をもとに流れの場を精度よく再現する数値解析法について検討した。その結果、前報では 1 次の風上差分を用いたため数値粘性の影響が大きく、流れの場をうまく再現できなかったが、時間積分にはアダムス・バッシュフォース法を、移流項の積分に QUICK 法を用いた今回の数値解析では、主流域での流速の値および流れのパターンの実験値をよく再現することができた。ついで、流水のオイラーの解析法と流木群のラグランジュの追跡法とを組み合わせた解析法を示し、これ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た。流木の回転角についても、今回新たに力学的に回転角速度を評価し、これと確率変動量との和として角速度を評価した。本手法を用いてまず、以前水原が水理実験で得た結果の再現計算を試みた結果、水理実験で得た流木の偏走角と相対速度との関係がシミュレーションによりある程度再現可能なことが示された。さらに、本手法を用いて 2 次元氾濫場における流木群の拡散に関する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ってうまく再現され、本手法の妥当性が検証された。

流木群の堰止めによる水位上昇についても今回新たに水理実験を行い、前報で示した流木群の堰止めによる水位上昇の実験結果が数値シミュレーションにより比較的よく再現できることが確認された。さらに、流木群の堰止めによる水位上昇等による家屋の流失危険度についても水理実験結果を基に検討した。その結果、流木群が家屋で堰止まった後では家屋に作用するモーメントが堰止まる前より増加し、木造家屋の流失危険度がかなり増すことが確認された。ただし、数値シミュレーションによる検討はなさず、今後の課題として残された。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究(B)研究代表者 井上和也，課題番号 05452376 および一般研究(C)研究代表者 中川 一，課題番号 05680368）の補助を受けたものであり、関係各位に記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 中川 一・井上和也・池口正晃・坪野考樹：流木群の流動に関する研究(2)，京大防災研年報，第 36 号 B-2，1993，pp.487-498.
- 2) 中川 一・井上和也・池口正晃：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.
- 3) 水原邦夫：流木に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1978.
- 4) 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 卷，1993，pp.463-468.
- 5) Dukowicz, J. K. : A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, Jour. Comp. Physics, Vol. 35, 1980, pp.229-253.
- 6) 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.

- 7) 松富英夫：碎波段波に伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.467，Ⅱ-23，1993，pp.19-28.
- 8) 高橋 保・中川 一・加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京大防災研年報，第28号B-2，1985，pp.455-470.
- 9) 室田達郎・有馬孝礼・佐藤雅俊・斉藤完治・岡田 恒・益田恵吾：在来軸組工法木造住宅の地震時挙動に関する実大静的繰り返し水平加力試験，建設省建築研究所建築研究資料，No.28，1981，pp.1-47.