

II-4

流木の流動と堰止め現象に関する研究

京都大学大学院 学生員 坪野 考樹

京都大学防災研究所 正会員 中川 一

京都大学大学院 学生員 池口 正晃

1 はじめに 本研究では、堤防決壊時に堤内地に流入した流木群が市街地でどのように堰止まるかを明らかにするために、流木の運動と構造物による流木の堰止め現象を説明し得るシミュレーションモデルを構築し、堰止め率の時間的変化および最終的な堰止め率に関して行われた水理実験結果¹⁾の再現を試み、モデルの妥当性を検討した。

2. 流木の基礎方程式 流水の運動については、二次元平面流れの式によりオイラー的に解析し、流木群の流動については、ラグランジュ的に解析する。それぞれの基礎式を示すと以下のようである。

$$x \text{ 方向 } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} \quad (1) \quad y \text{ 方向 } \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3) \quad m_k \frac{du_k}{dt} = -m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} + \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (U_k - u_k) A_{kx} \quad (4)$$

$$\frac{dX_k}{dt} = u_k \quad (6) \quad m_k \frac{dv_k}{dt} = -m_k g \frac{\partial H_k}{\partial y} + \frac{1}{2} \rho C_{Dy} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (V_k - v_k) A_{ky} \quad (5)$$

$$\frac{dY_k}{dt} = v_k \quad (7) \quad I \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \sum N_o \quad (8)$$

$$\tau_{bx}/\rho = \frac{n^2 g u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

$$\tau_{sx} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (u_k - U_k) A_{kx} \right\} \quad (11)$$

$$\tau_{by}/\rho = \frac{n^2 g v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (10)$$

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

ここに、 M, N ; $M=uh, N=vh$, u, v, h ; x, y 方向流速成分および水深, H ; 水深, τ_{bx}, τ_{by} ; x, y 方向の底面せん断応力, τ_{sx}, τ_{sy} ; x, y 方向の水表面でのせん断応力, m_k ; 流木 k の質量, u_k, v_k ; 流木 k の速度, U_k, V_k ; H_k ; 流木 k が位置している地点での水流の局所流速成分および水位, C_{Dx}, C_{Dy} ; 流木に対する x, y 方向の抗力係数, A ; 水表面積 $A=\Delta x \Delta y$ ($\Delta x, \Delta y$ は x, y 方向の空間差分間隔), A_{kx}, A_{ky} ; 水面下にある流木部分の x, y 方向の投影面積, θ_k ; x 軸と流木の長軸との成す角度, I ; 流木の慣性モーメント, N_o ; 流木に作用する流体力, n ; Manningの粗度係数, N_t ; $\Delta x \Delta y$ 内にある流木本数である。以上の基礎式を差分化して数値解析を行うが、(8)式に関しては流体力の分布を求めるのは困難なため、昨年度に得た結果²⁾、すなわち流木は確率的に平均角速度 $\bar{\omega} \cong 0$, 標準偏差 $\sigma_\omega = 81.6 Fr$ (Fr ; フルード数)の分布を持つ角速度で回転することを用いて、 $\theta_k = \theta_{k0} + 2\Delta t \omega = \theta_{k0} + 2\Delta t (\gamma \sigma_\omega + \bar{\omega})$ で評価する。ここに、 $\gamma = (\omega - \bar{\omega})/\sigma_\omega$ で、角速度の確率密度関数 $\Phi\{(\omega - \bar{\omega})/\sigma_\omega\}$ は、正規分布と仮定して、その分布関数 Φ の値を $[0, 1]$ のランダム変数として与えることで、 Φ^{-1} より γ を求め、上式より θ_k を求めている。

流木位置は、基礎方程式から計算される決定論的な位置と、確率論的に求まる変動量との和である次式によって表わせるとする。 $X_k = u_k(2\Delta t) + \Delta X_k = u_k(2\Delta t) + \{4K_x(2\Delta t)\}^{1/2} \text{erf}^{-1}(\alpha)$

$$Y_k = v_k(2\Delta t) + \Delta Y_k = v_k(2\Delta t) + \{4K_y(2\Delta t)\}^{1/2} \text{erf}^{-1}(\beta)$$

ここに、 $\Delta X, \Delta Y$; 確率論的に求まる変動量, K_x ; x 方向の拡散係数, K_y ; y 方向の拡散係数, erf^{-1} は誤差関数 $\text{erf}(u) = \{1 - \phi(\sqrt{2}u)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty \exp(-t^2) dt$ の逆関数で、 α, β ; $[0, 1]$ のランダム変数である。

3. 流木の堰止めモデル 流木が家屋まで達すると、幾何学的な堰止まり方(家屋間よりも流木の方が長くしかも図1の(2)のような状態)以外に、(1)および(3), (4), (5)のような状態の流木でも、家屋の間で流木が1本以上堰止まっていれば、その影響で堰止まりを生じやすくなる。実験結果を利用して家屋模型の間ですでに堰止まっている流木本数とくぐり抜ける流木本数との関係を表わしたものが図2である。図中の曲線は、平均の堰止め確率の二次回帰曲線であり、最小二乗法により流木が家屋間で堰止まる確率を求め

たところ、 $p=0.098n^2$ なる結果を得た。ここに、 n は家屋間で既に堰止まっている本数で、 $p(n)$ は(2)の状態以外で、次に来る流木の堰止め確率である。堰止めモデルは、家屋間に n 本堰止まれば、 $[0,1]$ の一樣乱数 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、堰止め本数を一本増やして堰止め本数 $n+1$ に対して同様の判定を以後繰り返すことにしている。また、流木が図1の(4)のように、家屋全面に 80° より大きな回転角 θ で流下してきて、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、家屋全面で堰止まるとした。

4. 計算条件 計算領域は、幅30cmの一次元水路の流木投入位置から水路下流端までの6.95mの区間である。空間差分間隔は流下方向に $\Delta x=5\text{cm}$ 、水路幅方向に $\Delta y=1.25\text{cm}$ とし、時間差分間隔を $\Delta t=0.004\text{ (sec)}$ として、あらかじめ定常な水流場を計算した。水理実験と同じ条件で、水路幅方向に1cm間隔で計29本の流木に水路上流地点で初速度ゼロを与え、計10回の給木を所定の時間間隔で行い、流水のオイラー的計算と流木のラグランジュ的挙動解析とを同時に行った。なお、対象とした家屋間隔は2.5cm、流木長は4cmおよび6cmの2通り、流量は0.5、1.0および1.5 (l/sec) の3通り、単位時間、単位幅あたりに与える流木本数（流木フラックスCps 本/sec/cm）を0.4、0.68および1.93の3通りとした。流木の密度は $0.83\text{ (g/cm}^3\text{)}$ である。

5. 計算結果 図3は、流木長が4cm、流量が1.5 (l/sec)、流木フラックスが0.4本/sec/cmの場合の流木の堰止め率の時間的変化に関する実験値と計算値とを比較したものである。図4は流木長が6cmの場合の同様の結果である。計算結果は最終的な堰止め率のみでなく、堰止め率の時間変化までもほぼ実験結果を再現しており、本モデルの妥当性が示されたといえよう。なお、堰止め率とは総流木本数(290本)に対する堰止まった流木本数の割合をいう。

6. おわりに 実際の流木の堰止め現象では、一旦堰止まった流木が何らかの擾乱で再び流れ出したり、家屋幅よりも短い流木が絡み合って堰止まったりすることもある。したがって、このような現象を再現するためには、モデルの改良を行う必要がある。

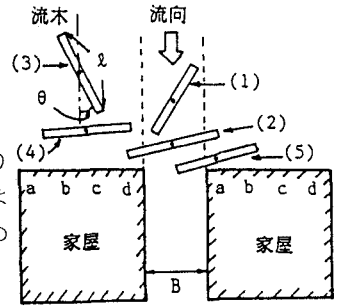
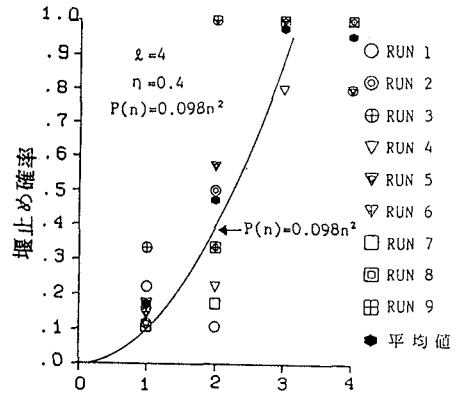


図1 流木の堰止まり方



家屋間で堰止まっている流木本数 (本)

図2 家屋モデル間の堰止め確率

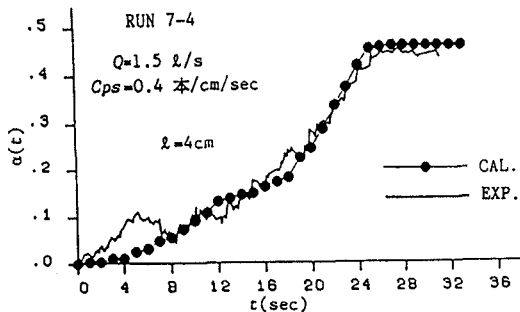


図3 堰止め率 α の時間的推移

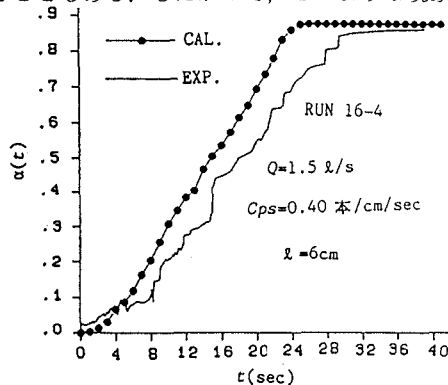


図4 堰止め率 α の時間的推移

参考文献 1) 中川・高橋・安達 堤内地における流木群の挙動に関する研究, 京都大学防災年報 第34号 B-2, 1991, pp.373-386 2) 中川・高橋・池口 流木の流動に関する研究, 京都大学防災年報 第35号 B-2, 1992, pp.249-266