

建設省 正員 ○池口正晃

京都大学防災研究所 正員 中川 一

京都大学防災研究所 正員 井上和也

1. はじめに 堤内地における流木被害発生の機構を解明するためにはまず、流木群がどのように流動するかを知る必要がある。さらに、堆積範囲の時空間的な分布や流木の堰止めによる水位上昇量等を予測し、例えば家屋流失危険度等の流木被害の定量的評価を行うことが重要となろう。本研究においては、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の挙動追跡法を示し、本手法を用いて流木の流動に関する水理実験結果の再現を試みる。ついで、堤内地家屋群による流木群の堰止め現象をモデル化し、堰止めによる水位上昇量の予測と水理実験結果による検証を行う。

2. 流木の流動に関する研究 流水および流木の運動に関する方程式系は以下の様に表わせよう。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{2} f u \sqrt{u^2 + v^2} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \left(2A_k \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h A_k \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\tau_{xx}}{\rho} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{2} f v \sqrt{u^2 + v^2} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \left(2A_k \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} k \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h A_k \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\tau_{yy}}{\rho} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \right\} \\ \tau_{yy} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} m_k(1 + C_M) \frac{du_k}{dt} &= C_M \frac{dU_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} - \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \\ m_k(1 + C_M) \frac{dv_k}{dt} &= C_M \frac{dV_k}{dt} - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial y} - \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} dX_k/dt &= u_k \\ dY_k/dt &= v_k \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{x(a,b)} &= \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_{k(a,b)} - u_k - u_{rk(a,b)})^2 + (V_{k(a,b)} - v_k - v_{rk(a,b)})^2} (U_{k(a,b)} - u_k - u_{rk(a,b)}) \frac{A_{kx}}{2} \\ f_{y(a,b)} &= \frac{1}{2} \rho C_{Dy} \sqrt{(U_{k(a,b)} - u_k - u_{rk(a,b)})^2 + (V_{k(a,b)} - v_k - v_{rk(a,b)})^2} (V_{k(a,b)} - v_k - v_{rk(a,b)}) \frac{A_{ky}}{2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} u_{rka} &= (\ell/4) (d\theta_k/dt) \sin \theta_k \\ v_{rka} &= -(\ell/4) (d\theta_k/dt) \cos \theta_k \\ u_{rkb} &= -(\ell/4) (d\theta_k/dt) \sin \theta_k \\ v_{rkb} &= (\ell/4) (d\theta_k/dt) \cos \theta_k \end{aligned} \quad (7) \quad (8)$$

ここに、 $M, N: M = uh, N = vh$ で表わされる流量フラックス、 u, v : および 方向の水の流速、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 f : 摩擦損失係数、 ν : 動粘性係数、 A_k : 水平渦動粘性係数、 k : 乱流エネルギー、 ρ : 水の密度、 τ_{xx}, τ_{yy} : それぞれ流木の存在を考慮した水面での x, y 方向のせん断応力、 t : 時間、 u_k, v_k : それぞれ第 k 番目の流木の x, y 方向流速、 X_k, Y_k : 流木の重心の位置、 $W_k = \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2}$ 、 U_k, V_k, H_k : それぞれ流木 k が位置する地点での x, y 方向の表面流速と水位、 C_M : 仮想質量係数、 A_{kx}, A_{ky} : 水面下の流木部分の x, y 方向の投影面積、 C_{Dx}, C_{Dy} : 流木に対する x, y 方向の抗力係数、 I : 流木の慣性モーメント、 θ : 水路 x 方向の軸と、流木の向きとの間の成す角度、 N_0 : 流木に作用する流体力のモーメントである。ここで、 $A_k = \alpha h u_k, k = 2.07 u_k^2, \alpha = 0.3$ 摩擦損失係数は、 $f = 6/Re (Re < 400), \sqrt{f} = 3.0 + 5.75 \log Re \sqrt{f/2} (Re \geq 400)$ とした。図1は回転に関する定義図である。

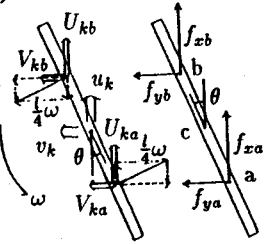


図1 回転の定義図

3. 二次元氾濫場における計算および実験結果 堤内地を想定した2次元氾濫場には流木群を流入させる水理実験を行いその再現計算を行った。氾濫水の計算においては、時間積分にアダムス・バッシュ・ホース法を、移流項には QUICKスキームを適用した。流木の運動においては、時間項においては前進差分、空間については中央差分にして陽的に解いた。流木の位置は次ページのように決定論的な位置と、確率論的に求まる変動量との和で表わせるとした。ここに、 α, β は x, y 座標に関する $[0, 1]$ のランダム変数、 erf^{-1} は(11)式で表わされる $\text{erf}(\xi)$ の逆関数である。同様に、回転角 θ_k も(4)式から決定論的に求まる角速度 $\omega_k (= \frac{d\theta}{dt})$ と確率

$$\left. \begin{aligned} X_k^{n+1} &= X_k^n + u_k^n \Delta t + \Delta X_k \\ Y_k^{n+1} &= Y_k^n + v_k^n \Delta t + \Delta Y_k \end{aligned} \right\} (9) \quad \left. \begin{aligned} \Delta X_k &= \sqrt{4K_x(\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha) \\ \Delta Y_k &= \sqrt{4K_y(\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\operatorname{erf}(\xi) = \left\{ 1 - \Phi(\sqrt{2}\xi) \right\} = \frac{1}{\pi} \int_{\xi}^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta \quad (11)$$

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

論的に求めた角速度変動量 ω_s との和と考える。角速度の確率密度関数 ϕ が正規分布であると仮定すると、その分布関数 Φ に $[0, 1]$ のランダム変数を与えることで、分布関数の逆関数より $\gamma(\omega_s - \bar{\omega}/\sigma_\omega)$ を求め、 $\omega_s = \gamma\sigma\operatorname{IN} + \bar{\omega}$ で評価できる。結局 θ_k は、

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_d + \omega_s \quad (13) \quad \Phi\left(\frac{\omega_s - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega_s - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (14)$$

で求まる。ここに、 σ_ω :角速度の標準偏差、 $\bar{\omega}$:平均角速度で $\bar{\omega} = 0$ とした。

図2は流入条件に実験値を用い、 ω_s を考慮した計算結果と実験結果を示す。流木の拡がりはかなり実験値と一致している。

4. 数値シミュレーションによる水原の実験結果の再現の試み 水原¹⁾の実験によると、定常状態において偏走角(流木が主流方向に対して傾いて流れる角度)が大きい程流木の絶対速度は小さくなる。この現象を本シミュレーションで再現する。図3に水原の実験結果とここで示したシミュレーション法による計算結果を示す。これより、流木の流下速度の方が、表面流速よりも速く、偏走角が大きくなるほど、相対速度が小さくなる傾向が計算で再現されていることがわかる。

5. 流木群の堰止めによる水位上昇 堤内地に流入した流木群が家屋間または家屋前面で堰止まる現象について水理実験を行い、以上述べた手法を用いてこの過程をシミュレートし、また堰止めによって生じる水位上昇を計算する。実験水路は幅50cm、長さ5mの一次元水路で、上流端から50cmで流木を給木し、給木地点から250cm下流に図4のような家屋モデルを配置した。流木の堰止め現象のモデル化は、中川らの²⁾方法を用いた。空間差分間隔は流下方向に $\Delta x = 3.5\text{cm}$ 、水路幅方向に $\Delta y = 1.25\text{cm}$ 、時間差分間隔を $\Delta t = 0.01\text{sec}$ として、予め定常場な流れの場を計算し、ついで水理実験と同じ条件で流木を流入させた。図5は流木の堰止め率の時間変化に関する計算結果と最終堰止め率の実験結果を示す。なお堰止め率とは、総流木本数に対する堰止まった流木本数の割合をいう。最終堰止め率に関しては、実験結果をよく再現している。図6は堰止めによる水位変化の計算値を家屋模型近傍で見たものであり、水位計で測定した実験結果も示している。水位上昇の増分に関して、計算結果は比較的良好に実験結果を再現している。

6. おわりに ここで示したシミュレーション手法で、流木群の流動および堰止めによる水位の上昇がある程度評価可能なことがわかった。今後は、流木による災害の発生機構と対策について検討していきたい。

参考文献 1)水原:流木に関する基礎的研究,京都大学学位論文,1978 2)中川・井上・池口・坪野:流木群の流動に関する研究(2)-流木群の堰止め-,京都大学防災研究所年報第36号 B-2 pp.487-498 1993

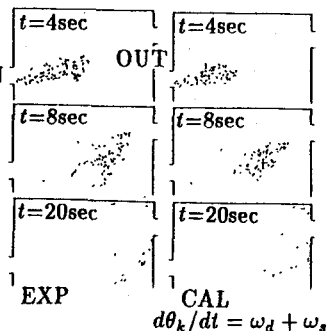


図2 流木群の流動

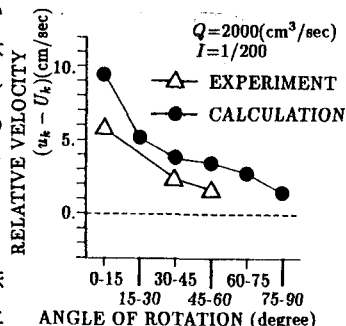


図3 相対速度と回転角の関係

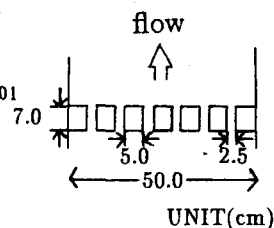


図4 家屋モデル

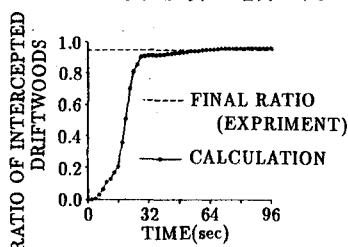


図5 堰止め率の時間的推移

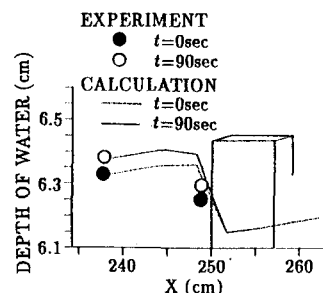


図6 堰止めによる水位上昇