

洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究

Drift Wood Diffusion by Overland Flood Flow

中川 一*・高橋 保**・池口正晃***

By Hajime NAKAGAWA, Tamotsu TAKAHASHI and Masaaki IKEGUCHI

A numerical simulation model has been developed for computing the diffusion of drift wood debouching 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. The positions and rotational angles in a group of drift wood in the experiments are well explained by the calculation.

Keywords: drift wood, diffusion, numerical simulation

1. 緒 言

破堤氾濫によって氾濫水とともに多量の流木群が堤内地に流入し、それが家屋に衝突して家屋破壊を助長したり、貯木場が高潮で被害を受け、多量の流木が流出して民家を直撃し、多数の家屋を破壊に至らしめたり、洪水時に河口にまで流出した流木群が湾内で氾濫し、船の航行や魚介類に多大の被害を与えるといった事例は、洪水、高潮災害が単に水のみによるものではなくて、流木など氾濫水にとまって流れる浮遊物によってもたらされていることを物語っている。

本研究においては、浮遊物のなかでも流木をとりあげ、流木被害を明らかにするにはまず、流木群がどのように挙動するのかを知る必要があることから、流木群が平面場へ氾濫する場合の拡散について、基礎実験によって拡散係数を求め、これを用いた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拡散の解析法を示し、この妥当性を水理実験結果をもとに検討する。

2. 流木群の拡散に関する基礎式

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。

* 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 工学研究科交通土木工学専攻
(〒606 京都市左京区吉田本町)

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

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

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

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、 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。

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

ここに、 n 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。

一方、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。

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

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

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

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

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汜濫水の 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。

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、 $I d^2 \theta_k / dt^2 = \sum N_0$ で求められる。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、ここでは上式を用いないで、3., 4.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、

$$\tau_{sx} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} W_k (u_k - U_k) A_{kx} \right\}, \quad \tau_{sy} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} W_k (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \quad (8)$$

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。

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。汜濫水の数値シミュレーション手法については中川¹⁾の方法によることとし、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く。

3. 流木の拡散係数および回転角に関する基礎実験

3.1 実験装置および方法

実験に用いた水路は図-1に示すような、幅50 cm、長さ500 cm、深さ20 cmの亚克力製の矩形断面水路で、水路勾配は1/370に固定されている。水路上流端から下流1 m および水路下流端から上流1 mの区間を除く3 mの区間にわたり10 cm毎に水路横断方向に標尺を設置し、流木の位置がわかるようにしてある。実験は以下に行った。すなわち、所定の流量、水深に設定した後、 $x = -10$ cm

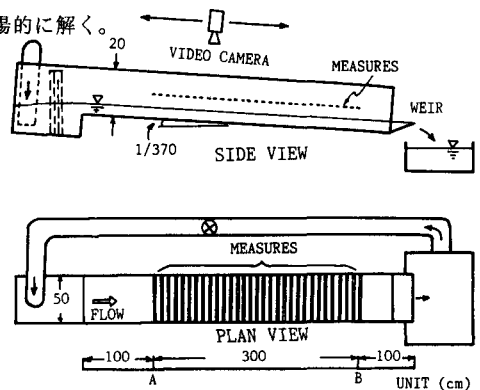


図-1 実験装置

の地点から流木を一本投入し、3mの区間を流下させる。 $x=0,10,20,\dots,300$ cmの計31断面で流木の位置と回転角度をビデオカメラにより収録する。各RUN毎に50本の流木を追跡し、これを統計処理して拡散係数等の解析を行った。

表-1 実験条件および実験結果

RUN No.	Q (cc/s)	h (cm)	u (cm/s)	u_* (cm/s)	Fr	Re	K (cm ² /s)	$\bar{\omega}$ (deg/s)	σ_ω (deg/s)	K/ u_*h
RUN 1	600	2.68	4.48	0.326	0.091	950	0.216	0.368	8.019	0.247
RUN 2	600	5.26	2.14	0.154	0.031	859	0.112	-0.083	2.170	0.118
RUN 3	600	8.58	1.40	0.101	0.017	783	0.126	-0.149	1.846	0.145
RUN 4	1000	2.68	7.46	0.504	0.153	1583	0.435	-0.110	12.494	0.322
RUN 5	1000	5.51	3.63	0.244	0.054	1436	0.232	-0.097	4.615	0.173
RUN 6	1000	8.68	2.30	0.155	0.029	1301	0.188	-0.077	2.367	0.140
RUN 7	1400	2.91	9.62	0.618	0.189	2198	0.502	1.528	15.738	0.279
RUN 8	1400	5.71	4.90	0.314	0.072	1998	0.342	0.527	5.730	0.191
RUN 9	1400	8.68	3.23	0.206	0.040	1821	0.458	0.250	3.723	0.256

表-1に示すように、流量を600,1000, 1400 cm³/sec の3通り、水深を約3, 6, 9 cmの3通りの計9通りの実験を行った。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。

3.2 流木の拡散係数

50本の流木の流下にとまう水平拡散の状況の一例を図-2に示す。ただし、この軌跡は流木の重心位置の変化である。このデータをもとに流木の横断方向の拡散係数を評価する。

一般に、一様流中で拡散する物質の空間的な分布（例えば濃度分布）は正規分布を呈し、拡散係数Kと分散 $\overline{Y^2}$ との間には $K = \frac{1}{2} \frac{d\overline{Y^2}}{dt}$ なる関係が成り立つ。実験値から流木の拡散係数を求めるため、水路幅50 cmを50等分し、各1 cm幅に存在する流木の本数の全体に占める割合を各断面毎に求めた。その一部を示したものが図-3である。これより、流木が流下するにつれて水路中央部から変位し、度数分布もほぼ正規分布とみなし得ることがわかる。なお、図中の曲線は各断面において平均値 $\overline{Y_{mean}}$ （図中のYM）、分散 $\overline{Y^2}$ （図中のS）を求めて、

正規分布を仮定したときの計算値である。これより、流下にとまなって分散が大きくなり、実験値の度数分布とも比較的良好一致している。各RUNでの各断面における拡散係数K_iのアンサンブル平均の拡散係数Kを表-1に示す。Kがどのような水理量に規定されるかは不明であるが、 u_*h (u_* は摩擦速度で $u_* = \sqrt{gRI}$ 、Rは径深、Iは勾配)で無次元化すると表-1のようになり、水理条件により多少ばらつきは大きい、各RUNの値の平均をとると $K/u_*h = 0.208$ となる。なお、流速分布に対数則が成り立つとして u_* を求め、これを用いてデータ処理を行っている。一般の開水路の横方向拡散係数 D_{tt} がElderにより実験的に $D_{tt} = 0.23u_*h$ のように求められており²⁾、これと比較的近い値になっている。しかし、後藤³⁾によるとKは流木長と水深（代表的な渦径）との比 l/h にはあまり依存せず、 $K = 0.032u_*h$ となり、ここで得た実験結果の約1/10のスケールになっている。これは、流木の比重等、流木の特性が影響しているものと思われ、今後流木の特性を考慮した検討が必要である。

3.3 流木の回転角

図-4は、流木の流下にとまう回転運動に関し、その角速度 ω (°/sec)の頻度分布を示したものである。図中の曲線は実験値から求めた角速度の平均値 $\bar{\omega}$ （図中のWM）と分散 σ_ω^2 （図中のS）を用いて計算された正規分布である。なお、 σ_ω は角速度の標準偏差である。同図より、流木の角速度の平均

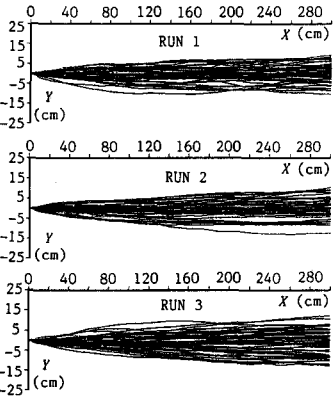


図-2 流木の水平拡散

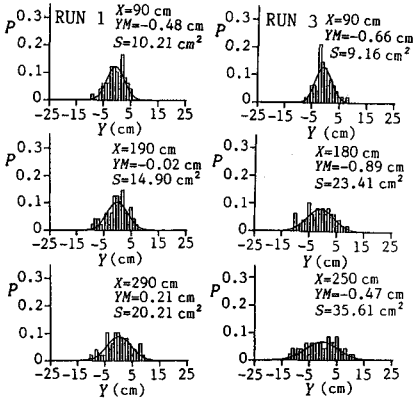


図-3 流木の水平拡散に関する頻度分布

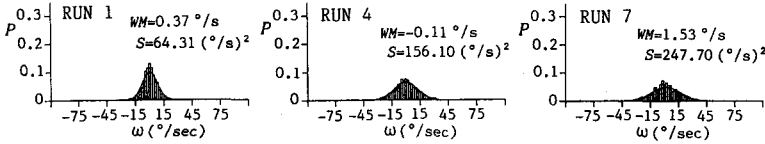


図-4 流木の回転角速度に関する頻度分布

を用いて計算された正規分布である。なお、 σ_ω は角速度の標準偏差である。同図より、流木の角速度の平均

値はほぼ $\omega \approx 0$ であり、分散は水理量に規定されているようである。各RUNにおける ω と σ_ω の値を前出の表-1に示す。図-5はフルード数 Fr と σ_ω との関係を示したものである。同図より、 Fr と σ_ω とは強い相関があり、 $\sigma_\omega = 81.6Fr$ なる関係式が成立するようである。本実験における流木の流動は水表面であることから、自由表面の擾乱の程度が影響しているものと推察されるが、まだ理由は明らかでなく、今後流木の比重等の特性を変えて検討していく必要がある。

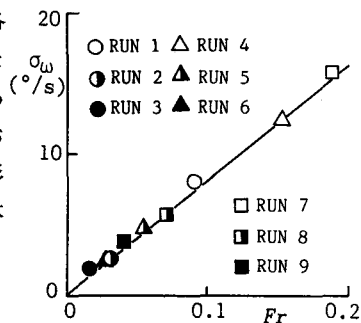


図-5 Fr と σ_ω との関係

4. 二次元汜濫場における流木群の拡散に関する実験

4.1 実験装置および実験方法

用いた実験装置は図-6に示すように、長さ170 cm、幅160 cmの木製汜濫台と長さ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。一次元水路は汜濫台の一边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。汜濫台の周囲は汜濫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、汜濫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本の流木が供給されるようになっている。予め堤内地で汜濫流がほぼ定常的に流れ、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拡散過程を追跡した。

測定項目は、流木の拡散過程であり、汜濫台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。

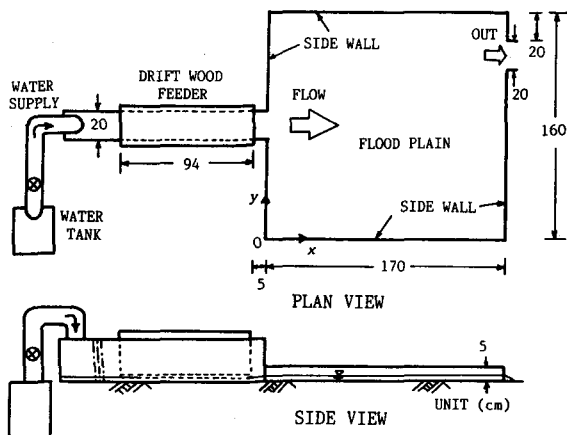


図-6 汜濫場における流木群の拡散に関する実験装置

4.2 計算の初期条件、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、堤内地において所定の流入流量で汜濫計算を実行し、定常な汜濫場を作成して、これを初期条件に用いることにした。定常汜濫場が形成された後、流入境界地点で、実験のビデオ解析から得られた流入流木の時刻、本数、各流木の x, y 座標(座標原点は図-7に示してある)、回転角 θ_0 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、粗度係数 $n = 0.01$ 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 $C_{Dx} = C_{Dy} = 2.0$ とした。

4.3 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、次式で評価した。

$$\Delta X_k = \sqrt{4K(2\Delta t)\text{erf}^{-1}(\alpha)}, \quad \Delta Y_k = \sqrt{4K(2\Delta t)\text{erf}^{-1}(\beta)} \quad (9)$$

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、

$$\text{erf}(s) = \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-t^2) dt, \quad \Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp(-t^2/2) dt \quad (10)$$

である。拡散係数 K については、実験で得た $K/u_*h = 0.208$ を用いることにするが、この拡散係数は一様流速場で求めた横方向拡散係数であり、流下方向の拡散は議論されておらず、主流方向に対してどれだけ拡散するかのみが評価できる。ここでは x および y 方向の拡散に対してもこれが適用できるものと仮定する。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。

$$\left. \begin{aligned} X_k^{n+3} &= X_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta X_k = X_k^{n+1} + u_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K(2\Delta t)}\text{erf}^{-1}(\alpha) \\ Y_k^{n+3} &= Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta Y_k = Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K(2\Delta t)}\text{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4.4 回転角

3.で示したように、一様流場においては流木は平均角速度 $\bar{\omega} \simeq 0$ 、角速度の標準偏差 $\sigma_{\omega} = 81.6Fr$ で回転しながら流下することがわかった。そこで、ここでは流木の回転角 θ_k は、

$$\theta_k = \theta_{k0} + 2\Delta t\omega = \theta_{k0} + 2\Delta t(\gamma\sigma_{\omega} + \bar{\omega}) \quad (12)$$

なる値をとるものとし、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

$$\Phi\left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds \quad (13)$$

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 を求められるとし、(12)式より θ が評価される。

5. 実験結果と計算結果の比較

同一の水理条件で4回の実験(RUN A, B, C, D)を行ったが、流木群投入の再現性にばらつきがあって、流木群の氾濫場への流入時刻および本数、その他にも流入位置、初期回転角等の条件が各RUNで異なっている。そこで、それぞれのRUNでの流木の流入・境界条件を用いて計算を実行した。RUN B について実験結果と計算結果との比較を図-7に示す。計算では多少流木の流動が遅れるが、流木群の拡散の様子が本シミュレーション手法である程度再現されていることがわかる。計算で流木の流動が遅れる一つの理由は、図-8に示すように、氾濫場の流速の計算値が実験値よりも主流域で小さいためであると思われる。なお、流木は水表面における流速の影響を受けることから、平面二次元流の計算から求まる断面平均流速に対して、滑面对数則が成立する

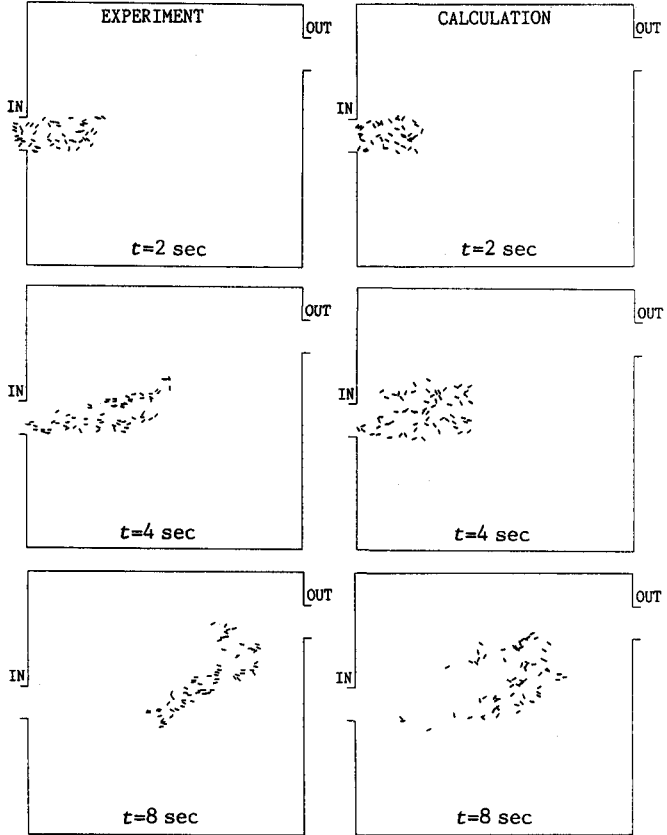


図-7 流木群の拡散に関する実験結果と計算結果の比較

と仮定して、流木位置における氾濫水の表面流速を

$$U_k^n \Rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_k^n, \quad V_k^n \Rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_k^n \quad (14)$$

で求めている。図-8もこのように補正した表面流速の値である。滑面对数則を用いることは、氾濫計算にManningの抵抗則を用いていることと矛盾するが、このことを別にしても、このような補正を行なっても計

算値が主流域で小さくなることから、一層モデルでの表面流速の算定法をさらに検討する必要がある。また、実際には風の影響が水表面では重要になるものと思われ、これを考慮した解析が必要であろう。

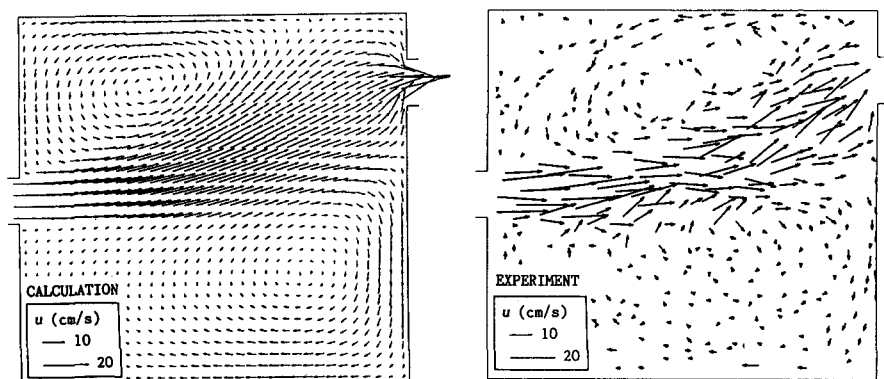


図-8 表面流速に関する計算結果と実験結果との比較

6. 結 語

堤内地における流木群の拡散過程を時空間的に予測するためのシミュレーション手法として、流水のオイラー解析法、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示した。すなわち、流水と流木の流動に関する基礎方程式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、流木群の位置を追跡する手法を示すとともに、流木の回転運動についても、一次元の水理実験結果を統計的に解析し、確率論的な回転運動の定式化を行った。ついで、二次元氾濫場における流木群の拡散過程に関する水理実験を行った。ここで示したシミュレーション手法を用いて計算し、実験値と比較検討した結果、本シミュレーション手法で流木群の拡散過程がある程度再現できることが判明した。ただし、流木群の回転運動については、一様流速場では回転角は初期回転角と局所フルード数から決定されるとした理論の二次元非一様流速場への適用性についてさらに検討する必要がある。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(重点領域研究(1) 課題番号03201129 傾斜都市域の洪水・土砂氾濫災害の予測と軽減・復興対策に関する研究 研究代表者 京都大学防災研究所 高橋 保)の補助を受けた。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Elder, J.W.: The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, Jour. Fluid Mech., Vol.5, 1959, pp.544-560.
- 3) 後藤智明: 流出物の拡がり(自然災害特別研究成果報告書「陸上に氾濫した津波の挙動と津波の流動による被災のメカニズムに関する研究」、研究代表者 東京大学工学部 堀川 清司), 1983, pp.93-97.