

流木群の流動に関する研究

中川 一・高橋 保・池口 正晃

NUMERICAL SIMULATION OF DRIFT WOOD BEHAVIOR

By Hajime NAKAGAWA, Tamotsu TAKAHASHI and Masaaki IKEGUCHI

Synopsis

A numerical simulation model has been developed for computing the behavior 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.

1. 緒 論

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^{1), 2), 3)}。

最近、ウォーターフロントとカリバーフロントの開発がなされつつあり、その開発と防災、とくに津波・高潮・洪水といった水防災について、どのような災害発生の可能性があってそれに対してどのように取り組むべきか検討されているようであるが⁴⁾、このような地域に限らず、一般の市街地におけるライフライン等に対しても高潮・洪水氾濫時における流木や車といった浮遊物の衝突による被害の拡大についても対策を講じる必要があろう。たとえば、昭和57年の長崎豪雨災害では、多量の自動車が道路上を浮いて流れるといったこれまでに例を見ないような災害形態を経験したが、普通、自動車は氾濫水深が60 cm程度になると浮きはじめ、流れがあると容易に流されることが報告されている⁵⁾。東京、大阪、名古屋といった大都市の地下街の入口には、防潮パネルという高さ1.1 m以上の耐水構造物が設置されており、氾濫水の地下街への進入をある程度食い止められるようにはなっているが、このようなパネルは静水圧にはある程度耐えられるが、流木や自動車などの衝突による衝撃力にはほとんど耐えられないと思われ、もし、これが破損して地下街に急激に氾濫水が流入するようなことがあれば、被害はさらに拡大するものと思われる。

本研究においては、浮遊物のなかでも流木をとりあげることとし、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運動のシミュレーション手法を示し、この解析法の妥当性を水

理実験結果をもとに検討する。

2. 流木群の流動の基礎式

2.1 氾濫水の流動式

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。

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

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

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

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, 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。

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

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。

2.2 流木群の流動式

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 方向の運動方程式:

$$m_k \frac{du_k}{dt} = -m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} + \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (u_k - U_k) A_{kx} \dots\dots\dots (5)$$

y 方向の運動方程式:

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

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 方向流速であり、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まり、

$$\frac{dX_k}{dt} = u_k, \quad \frac{dY_k}{dt} = v_k \dots\dots\dots (7)$$

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氾濫水の 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。

A_{kx} , A_{ky} は以下のように評価する。すなわち、流木を密度 ρ_d 、半径 r 、長さ l の円柱形であると仮定すると、流木の質量 m_k は $m_k = \rho_d \pi r^2 l$ だから、水面が水平であると近似すると

$$\rho_d \pi r^2 l g = \rho r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) g l \cdots (8)$$

が成り立ち、吃水深 h_w は $h_w = r(1 + \cos \alpha)$ より、流木 k が x 軸となす角度（回転角）を θ_k とすると、 A_{kx} , A_{ky} は次式で表される。

$$A_{kx} = h_w l |\sin \theta_k|, \quad A_{ky} = h_w l |\cos \theta_k| \cdots (9)$$

ここに、 α は Fig. 1 に示す角度である。なお、 $\theta_k = 0$ のときは $A_{kx} = r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$ 、 $\theta_k = \pi/2$ のときは、 $A_{ky} = r^2 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$ とする。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、次式で求められる。

$$I \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} = \Sigma N_0 \cdots (10)$$

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 (10) 式を用いないで、3. 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木に作用すると考え、次式のように評価する。

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dx} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (u_k - U_k) A_{kx} \right\} \cdots (11) \\ \tau_{sy} &= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{N_t} \left\{ \frac{1}{2} \rho C_{Dy} \sqrt{(U_k - u_k)^2 + (V_k - v_k)^2} (v_k - V_k) A_{ky} \right\} \end{aligned}$$

ここに、 A は水表面積で、 $A = \Delta x \Delta y$ (Δx , Δy 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。

2.3 シミュレーション手法

2.1 および 2.2 で示した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。氾濫水の数値シミュレーション手法については高橋ら⁶⁾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を以下に行う。

x 方向の流木の運動方程式の差分化：

$$\frac{u_k^{n+2} - u_k^n}{2\Delta t} = -g \frac{H_{kfx}^{n+1} - H_{kbx}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\rho}{2m_k} C_{Dx} \sqrt{(U_k^n - u_k^n)^2 + (V_k^n - v_k^n)^2} \left(\frac{u_k^{n+2} + u_k^n}{2} - U_k^n \right) A_{kx} \cdots (12)$$

y 方向の流木の運動方程式の差分化：

$$\frac{v_k^{n+2} - v_k^n}{2\Delta t} = -g \frac{H_{kfy}^{n+1} - H_{kby}^{n+1}}{\Delta y} + \frac{\rho}{2m_k} C_{Dy} \sqrt{(U_k^n - u_k^n)^2 + (V_k^n - v_k^n)^2} \left(\frac{v_k^{n+2} + v_k^n}{2} - V_k^n \right) A_{ky} \cdots (13)$$

ここに、 H_{kfx}^{n+1} , H_{kbx}^{n+1} , H_{kfy}^{n+1} , H_{kby}^{n+1} 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。

$$\frac{X_k^{n+3} - X_k^{n+1}}{2\Delta t} = u_k^{n+2}, \quad \frac{Y_k^{n+3} - Y_k^{n+1}}{2\Delta t} = v_k^{n+2} \dots\dots\dots (14)$$

なお, U_k^n, V_k^n については, 次式のような内挿によって評価する。

$$U_k^n \text{の補正: } U_k^n = \left(1 - \frac{\eta_k^{n+1}}{\Delta x}\right) u_{I_k^{n+1}, J_k^{n+1}+1/2}^n + \frac{\eta_k^{n+1}}{\Delta x} u_{I_k^{n+1}+1, J_k^{n+1}+1/2}^n \dots\dots\dots (15)$$

$$V_k^n \text{の補正: } V_k^n = \left(1 - \frac{\zeta_k^{n+1}}{\Delta y}\right) v_{I_k^{n+1}+1/2, J_k^{n+1}}^n + \frac{\zeta_k^{n+1}}{\Delta y} v_{I_k^{n+1}+1/2, J_k^{n+1}+1}^n \dots\dots\dots (16)$$

水位 H_k に関しては, 流木が存在している格子の水位を用いることにし,

$$H_k^{n+1} = H_{I_k^{n+1}+1/2, J_k^{n+1}+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (17)$$

とする。ここに,

$$I_k^{n+1} = [X_k^{n+1}/\Delta x] + 1, \quad J_k^{n+1} = [Y_k^{n+1}/\Delta y] + 1 \dots\dots\dots (18)$$

$$\eta_k^{n+1} = X_k^{n+1} - \Delta x(I_k^{n+1} - 1), \quad \zeta_k^{n+1} = Y_k^{n+1} - \Delta y(J_k^{n+1} - 1) \dots\dots\dots (19)$$

なお, $[x]$ は x を越えない最大の整数値である。

3. 流木の拡散係数および回転角に関する基礎実験

同一水理条件のもとで流木を流しても, 流木位置や回転角は水流の乱れによって同じ挙動をとることはほとんどない。したがって, 流木位置や回転角を考えると, 2. で示した支配方程式で決定される値と, 乱れによる変動値との両者を考慮する必要がある。そこで, ここでは流木の拡散係数と回転角を明らかにするために種々の水理量のもとで行った水理実験について示す。

3.1 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は Fig. 2 に示すような, 幅 50 cm, 長さ 500 cm, 深さ 20 cm のアクリライト製の矩形断面水路で, 水路勾配は 1/370 に固定されている。水路上流で整流し, 下流端に設けた可動堰を調節することにより水深を種々変化させることができる。流量はバルブにより所定の値に調節できる。水路上部には, 流木を追跡できるように移動式の台車にビデオカメラが設置されている。水路側壁には水深計測用の標尺が 20 cm 毎に貼付してある。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。

実験は以下のように行った。すなわち, 所定の流量, 水深に設定した後, $x = -10$ cm の地点から流木を回転角がほぼゼロの状態投入し, 3 m の区間を流下さ

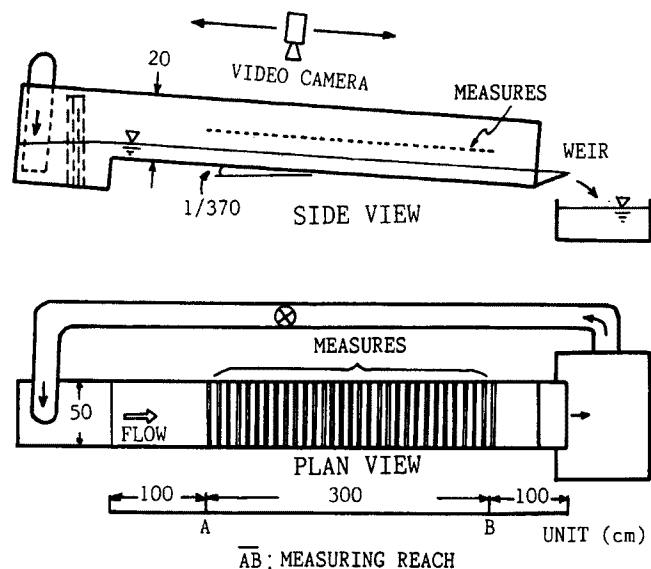


Fig. 2. Experimental set-up.

Table 1. Experimental conditions

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)	$K/(u \cdot h)$
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

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。なお、ビデオ解析には、スーパーインポーズボード（株式会社アイシー製 PSI-400）を NEC 製 PC-9801 VM 2 に装着し、澤井が開発したソフトウェア⁷⁾を用いた。

実験条件は、Table 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 実験結果の考察

(1) 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 Fig. 3 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

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\overline{Y^2}}{dt} \dots\dots\dots (20)$$

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には、Fig. 4 に示すように、ある流木の x 座標 $x = X_i^j (t = t_i^j)$ における横方向の変位 $Y_i^j - Y_0^j$ の分散を評価すればよい。ここに、 X_i^j , Y_i^j は第 j 番目の試行での第 i 断面における流木の x , y 座標、 t_i^j は番 j 番目の試行において、 i 断面に流木が到達した時刻である。ただし、流木の変位が各断面において正規

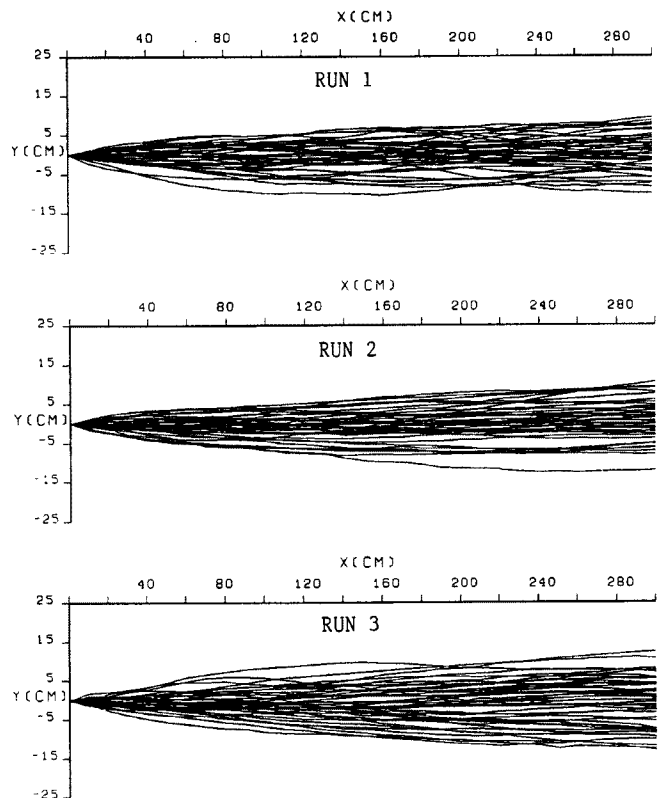


Fig. 3. Path lines of the centroid of drift wood.

分布をなすことが必要である。そこで、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求めたものが Fig. 5 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ていき、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 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。これからも流下にともなって分散が大きくなっていくことがわかる。実験値の度数分布とも比較的良好に一致しており、流木の拡散係数は、流木をラグランジュ的に追跡し、各断面で (20) 式から統計的に求められよう。

統計量の処理は以下のように行った。すなわち、31 の各計測断面における流木の位置を (X_i^j, Y_i^j, t_i^j) とすれば、断面 i における流木の拡散係数 $K_i(t_i)$ は次式で評価できる。

$$K_i(t_i) = \frac{1}{2} \frac{\overline{Y_i^2} - \overline{Y_{i-1}^2}}{\overline{t_i} - \overline{t_{i-1}}} \quad (i=2, 3, \dots, 31) \quad (21)$$

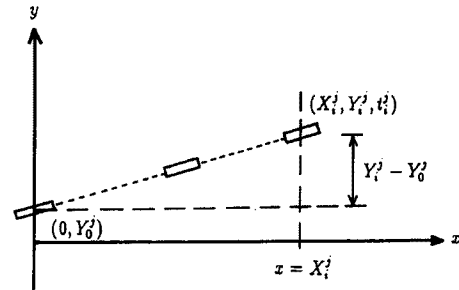


Fig. 4. Definition sketch of drift wood position.

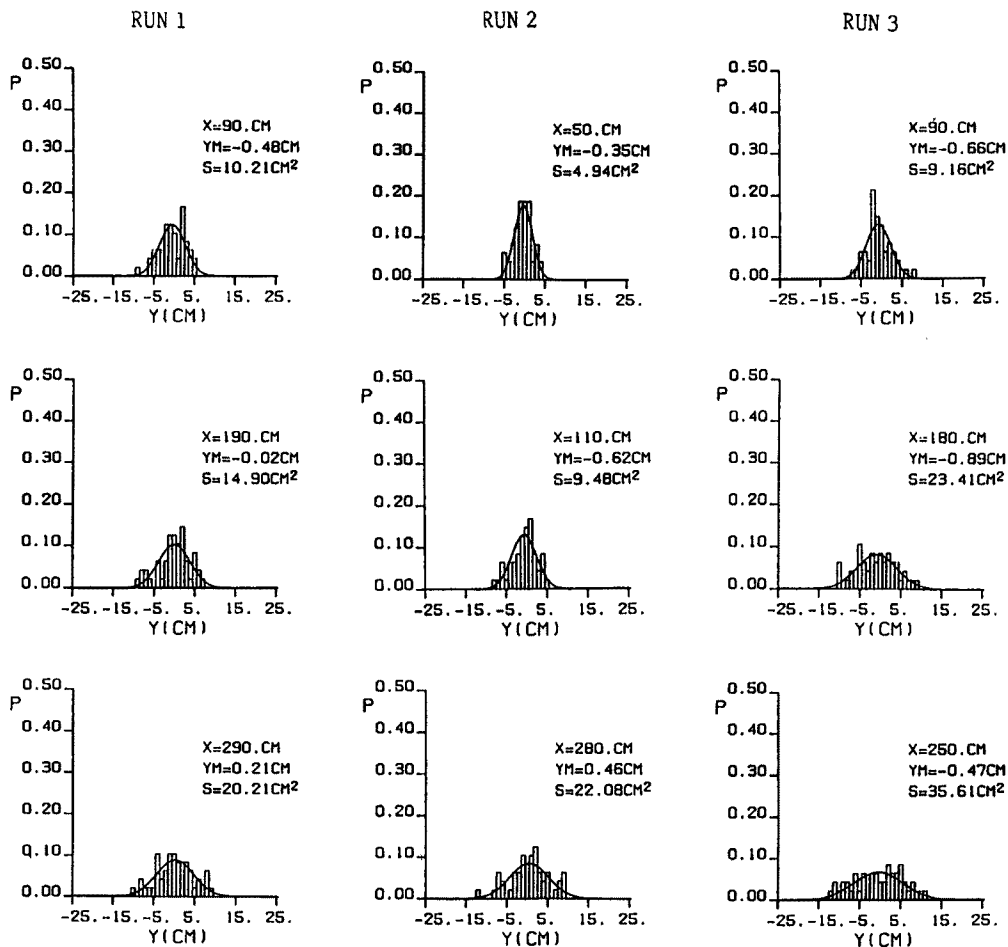


Fig. 5. Frequency distribution of transverse positions of drift wood.

ただし,

$$\bar{t}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_i^j - t_0) \quad (i=1, 2, \dots, 31)$$

$$\bar{Y}_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Y_i^j - Y_0)^2 \quad (i=1, 2, \dots, 31)$$

ここに, N は同一水理条件で行った試行回数 ($N=50$) である。なお, 同一水理条件での平均拡散係数 K を 30 断面のアンサンブル平均として

$$K = \frac{\sum_{i=2}^{31} K_i(\bar{t}_i)}{30} \dots\dots\dots (22)$$

で求めた。各 RUN での各断面における拡散係数 $K_i(\bar{t}_i)$ と平均の拡散係数 K とを Table 2 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, 乱流拡散係数 D_α や分散係数 D_L は通常 $u_* h$ で無次元化され, 水深 h の開水路では

Table 2. Experimental results of transverse turbulent diffusivity of drift wood

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7	RUN 8	RUN 9
$x(\text{cm})$	$K(\text{cm}^2/\text{s})$								
10	0.1452	0.0755	0.0451	0.1650	0.0577	0.0743	0.1362	0.1366	0.0585
20	0.2972	0.1269	0.0549	0.3843	0.1347	0.1309	0.2909	0.3128	0.1311
30	0.3985	0.1421	0.0831	0.4587	0.1666	0.1355	0.3269	0.3620	0.1715
40	0.4339	0.1824	0.1080	0.4728	0.2214	0.1577	0.4363	0.3499	0.2206
50	0.4867	0.1198	0.1207	0.6404	0.2392	0.1630	0.5726	0.4148	0.2928
60	0.4925	0.1637	0.1175	0.5787	0.2753	0.2017	0.6215	0.3365	0.2676
70	0.4104	0.1244	0.1084	0.6104	0.2982	0.2122	0.7028	0.4116	0.3215
80	0.3523	0.1126	0.1187	0.5677	0.3437	0.2233	0.7081	0.4050	0.3174
90	0.3449	0.1367	0.0931	0.4959	0.3295	0.2317	0.9332	0.4205	0.3623
100	0.3526	0.1442	0.1418	0.4203	0.4107	0.2527	0.6703	0.3119	0.4347
110	0.3755	0.1221	0.1198	0.3477	0.3822	0.2109	0.7183	0.4532	0.4707
120	0.1006	0.1220	0.1083	0.3754	0.4051	0.2122	0.7889	0.4863	0.4710
130	0.3007	0.1201	0.1539	0.4244	0.4496	0.1856	0.7608	0.5780	0.5652
140	0.0592	0.1750	0.1589	0.4047	0.4706	0.1588	0.4832	0.4818	0.5517
150	0.1331	0.1076	0.1614	0.5116	0.3912	0.1940	0.7342	0.4490	0.5956
160	0.1886	0.0928	0.1700	0.3617	0.4045	0.2127	0.6834	0.6267	0.5733
170	-0.0474	0.0896	0.1573	0.3933	0.3583	0.2008	0.6464	0.5595	0.6170
180	-0.0261	0.1239	0.1497	0.6765	0.2467	0.1680	0.5733	0.6792	0.6731
190	0.0785	0.1615	0.1917	0.3431	0.2807	0.2536	0.4722	0.4354	0.6546
200	-0.0828	0.1072	0.1573	0.5782	0.2807	0.2235	0.3466	0.3768	0.6867
210	0.1071	0.1057	0.1406	0.5068	0.1562	0.1991	0.5737	0.2349	0.6911
220	0.0670	0.0894	0.1539	0.3266	0.0929	0.2158	0.5124	0.2297	0.6618
230	0.0577	0.0904	0.1508	0.4720	0.0791	0.2085	0.3312	0.2086	0.5807
240	0.1097	0.1047	0.1285	0.4516	-0.0593	0.2006	0.3794	0.3576	0.5193
250	0.1142	0.0424	0.1477	0.3362	0.1248	0.1549	0.0617	0.1239	0.5635
260	0.1571	0.1029	0.0777	0.3755	-0.1149	0.1735	0.2099	0.1984	0.5210
270	0.2990	0.0700	0.0763	0.3351	0.1470	0.1840	0.3390	-0.0377	0.5756
280	0.2177	0.0897	0.1377	0.3991	0.0288	0.1750	0.5350	0.1348	0.4504
290	0.3287	0.0722	0.1055	0.3944	0.1996	0.1710	0.4286	-0.0314	0.4713
300	0.2820	0.0337	0.1283	0.2490	0.1747	0.1429	0.0719	0.2099	0.2762
MEAN	0.2158	0.1116	0.1255	0.4352	0.2323	0.1876	0.5016	0.3417	0.4582

$$D_{\alpha}/u_*h=0.068, \quad D_L/u_*h=5.86 \quad \dots\dots\dots (23)$$

のようである⁸⁾。ここに、 u_* は摩擦速度で、 $u_*=\sqrt{gRI}$ 、 R は径深、 I は勾配である。流木はおもに水面付近に存在するので同様の取扱いは適切ではないかもしれないが、 K を u_*h で無次元化すると Table 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

$$K/u_*h=0.208 \quad \dots\dots\dots (24)$$

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_{α} が Elder により実験的に $D_{\alpha}=0.23 u_*h$ のように求められており⁹⁾、これと比較的近い値になっている。しかし、後藤¹⁰⁾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、 $K=0.032 u_*h$ 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。

Fig. 6 および Fig. 7 は、それぞれ長さスケールに径深を用いて表したフルード数 Fr と K/u_*h との関係およびレイノルズ数 Re と K/u_*h との関係を示したものである。今回の実験領域に限定すれば、両者の間には有意な関係は認められない。

(2) 流木の回転角

Fig. 8 は、流木の流下にもなう回転運動に関し、その角速度の頻度分布を示したものである。横軸は角速度 ω 、縦軸は各断面 ($x=10, 20, \dots, 300$ cm の 30 断面) における流木の角速度を -90 deg/sec から 90 deg/sec まで $\Delta\omega=2$ deg/sec 毎に分割し、各角速度の度数を求めてそれを断面毎に加算した度数を総度数で除したものである。すなわち、

$$P=\frac{\sum_{i=1}^{30} N_{i,j}}{\sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^m N_{i,j}} \quad \dots\dots\dots (25)$$

である。ただし、 m ; -90 deg/sec ~ 90 deg/sec 区間で角速度を分割した個数、 $N_{i,j}$; 第 i 断面の m 個の区間の第 j 区間に相当する角速度の度数である。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値はほぼ $\bar{\omega} \approx 0$ 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 $\bar{\omega}$ と σ_{ω} の値を前出の Table 1 に示す。

Fig. 9 はレイノルズ数 Re と流木の角速度の標準偏差 σ_{ω} (deg/sec) との関係を示したものである。同図より、

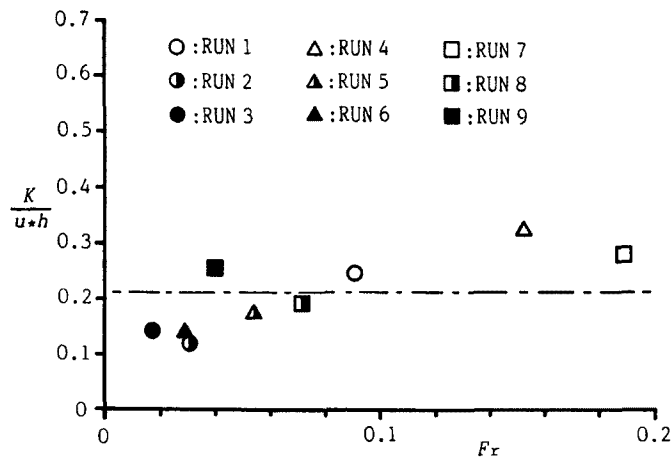


Fig. 6. Relationship between Froude Number, Fr , and non-dimensional turbulent diffusivity, K/u_*h .

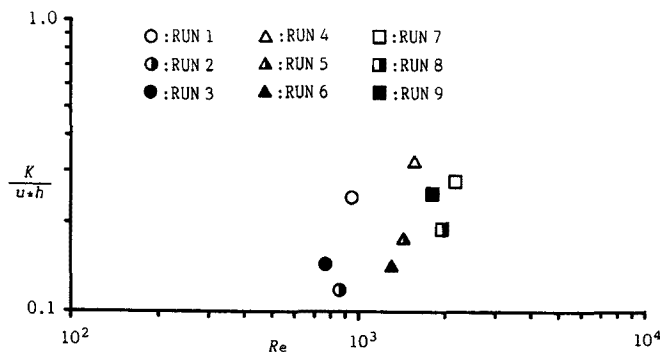


Fig. 7. Relationship between Reynolds Number, Re , and non-dimensional turbulent diffusivity, K/u_*h .

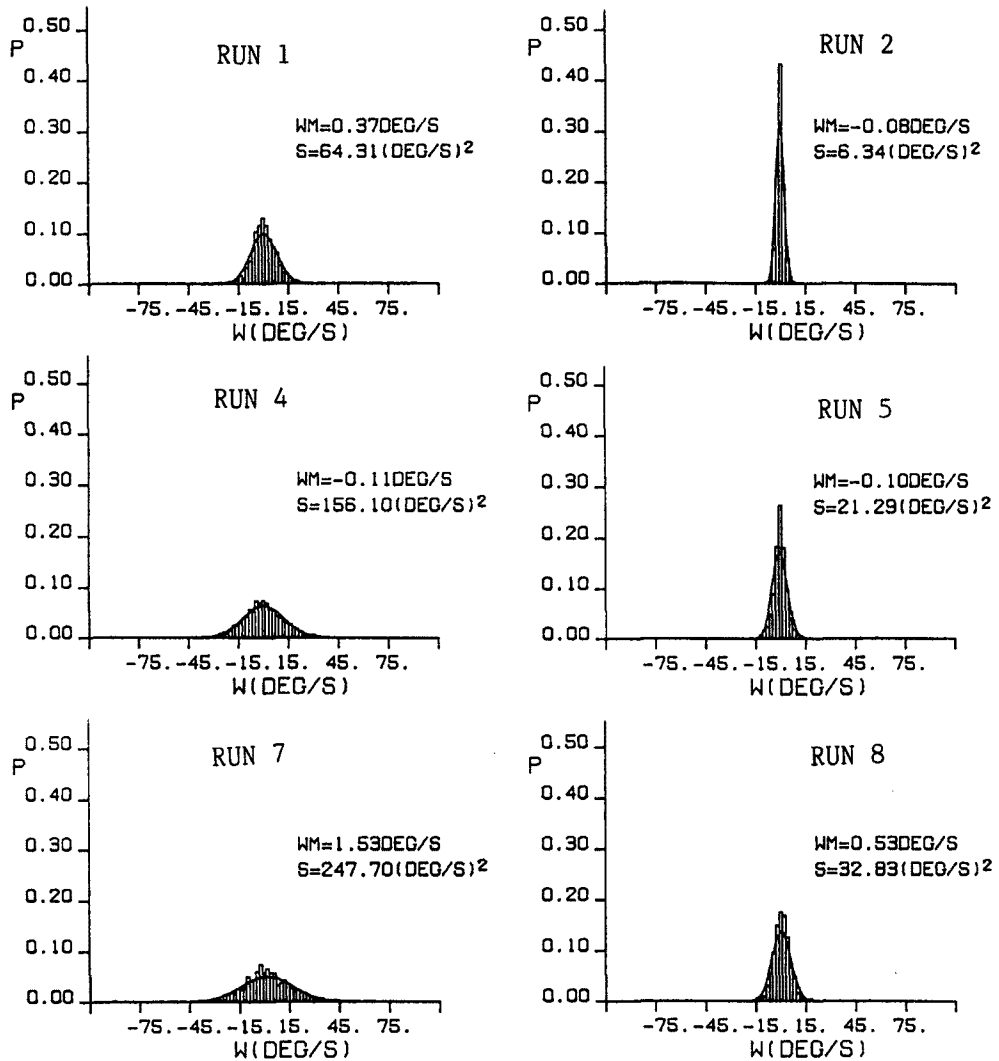


Fig. 8. Frequency distribution of rotational angular velocities of drift wood.

Re と σ_ω との関係は統一的には表せないが、 Re 数が小さいほど σ_ω は小さくなる傾向が認められる。

Fig. 10 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、

$$\sigma_\omega = 81.6Fr \dots\dots\dots (26)$$

と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。

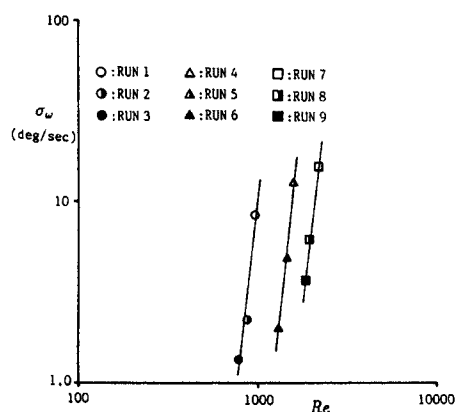


Fig. 9. Relationship between Reynolds Number, Re , and standard deviation of rotational angular velocity of drift wood, σ_ω .

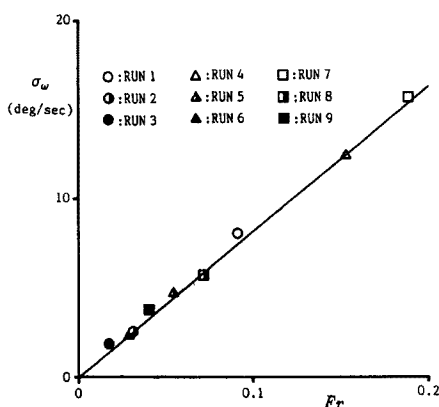


Fig. 10. Relationship between Froude Number, Fr , and standard deviation of rotational angular velocity of drift wood, σ_ω .

4. 二次元汜濫場における流木群の流動に関する実験

堤内地を想定した二次元汜濫場に、多数の流木を流入させ、それらがどのように拡散していくかを水理実験を通して明らかにし、2. で示したシミュレーション手法でどの程度実験結果が再現できるかを検討する。その際、流木群の位置は、流木の運動方程式等を解いて求まる決定論的な位置と、確率論的に評価した乱れによる拡散変動量との和として求めることとし、流木の回転角については3. で求めた回転角の統計値を用いて確率論的に評価することにする。それらの取扱いの詳細については後述する。

4.1 実験装置および実験方法

用いた実験装置は Fig. 11 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。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 Fig. 12 に示すような長さ 94 cm の給木装置が設置してある。この装置の底部には流木が通過できる 4 mm 幅の溝を 4

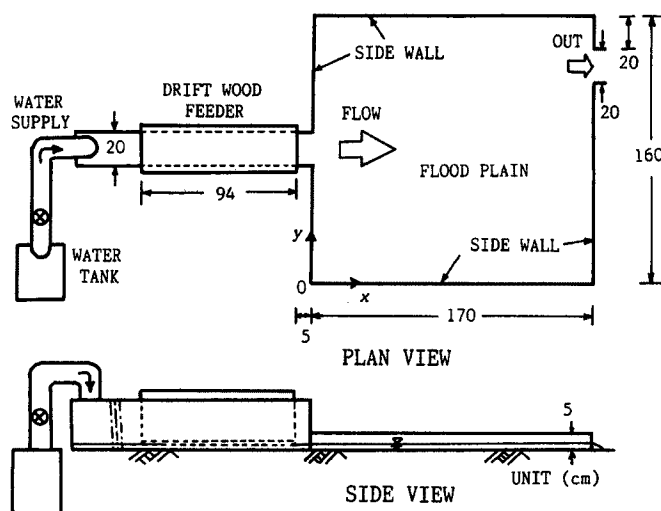


Fig. 11. Experimental set-up for the two-dimensional diffusion of drift wood.

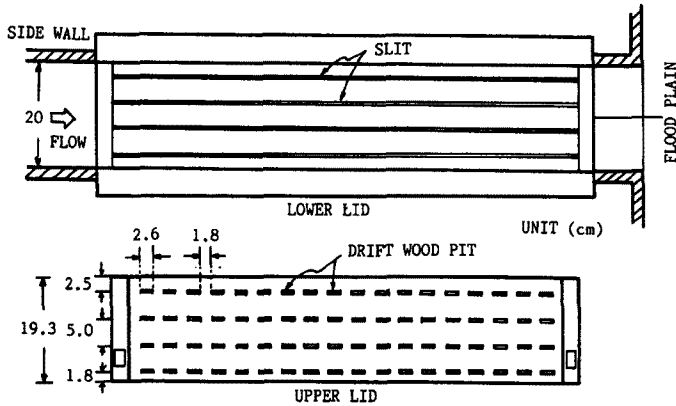


Fig. 12. Drift wood feeder.

列きった2枚の板があり、上部の板をスライドさせることで流木が底から落下し、給木される仕組みになっている。なお、上側の板の溝には仕切りを設け、一列に18本の流木が1.8 cmの間隔をおいて整列できるようにした。結局、一度に4列×18本=72本の流木が上板をスライドさせることで供給されることになる。予め堤内地で氾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、氾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、回転角度を前述のスーパーインポーズボードを用いたビデオ解析により求めた。また、氾濫台へ流木が流入する地点で、個々の流木の流入位置、回転角度、流入時刻等の流入条件を計測するために、流入地点の上部に別のビデオカメラを設置し、流入状況を撮影して、ビデオ解析によりこれらの値を求めた。さらに、氾濫流の表面流速を測定するために、流木を供給する前に5 mm四方の紙片をトレーサーとして流し、ビデオ解析により流速分布を求めるとともに、複数地点で水深を計測し、シミュレーション結果の検定に供した。

流量はすべて500 cc/secとし、同じ水理条件のもとで4回実験を行った。流木が氾濫場に流入する時刻と本数の時間変化をFig. 13に示す。流木の流入時間はほぼ4秒程度であるが、流入本数の時間変化は同一水理条件でも4回とも微妙に違っている。

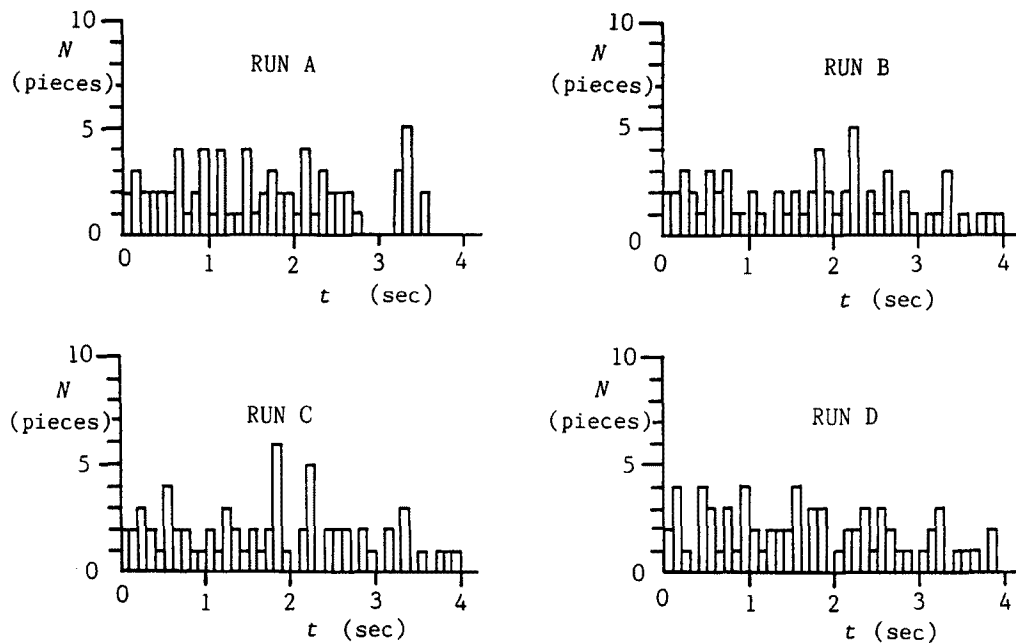


Fig. 13. Temporal change of the supply number of drift wood.

4.2 計算条件

(1) 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氾濫計算を実行し, 定常な氾濫場を作成して, これを初期条件に用いることにした。定常氾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 Fig. 11 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 $n = 0.01 \text{ m}^{-1/3}\text{sec}$ 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 $C_{Dx} = C_{Dy} = 2.0$ とした。

(2) 拡散係数

Dukowicz¹¹⁾ によると拡散物質が空間的に正規分布をなすとき, $dX_k/dt = u_k$ 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 $\Delta X_k, \Delta Y_k$ は, 次式で評価できる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_k &= \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{sgn}(\alpha) \operatorname{erf}^{-1}(|\alpha|) \\ \Delta Y_k &= \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{sgn}(\beta) \operatorname{erf}^{-1}(|\beta|) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

ここに, α, β はそれぞれ x および y 座標に関するランダム変数で, $-1 < \alpha < 1, -1 < \beta < 1$ の一様分布の乱数, erf^{-1} は erf の逆関数, $\operatorname{sgn}(x)$ は x の符号である。本研究でもこれと同様の考え方を採用することにするが, ランダム変数を $[0, 1]$ で与えられるように, 以下のような式を用いることにする。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_k &= \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha) \\ \Delta Y_k &= \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

ここに, α, β は $[0, 1]$ のランダム変数で,

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{erf}(s) &= \{1 - \Phi(\sqrt{2}s)\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-t^2) dt \\ \Phi(s) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s \exp(-t^2/2) dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

である。拡散係数 K については, 実験で得た (24) 式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 (24) 式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。

$$\left. \begin{aligned} X_k^{n+3} &= X_k^{n+1} + u_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta X_k = X_k^{n+1} + u_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\alpha) \\ Y_k^{n+3} &= Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \Delta Y_k = Y_k^{n+1} + v_k^{n+2}(2\Delta t) + \sqrt{4K(2\Delta t)} \operatorname{erf}^{-1}(\beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

(3) 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 $\bar{\omega} \cong 0$, 角速度の標準偏差 $\sigma_\omega = 81.6 Fr$ 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,

$$\theta_k = \theta_{k0} + 2\Delta t \omega = \theta_{k0} + 2\Delta t (\gamma \sigma_\omega + \bar{\omega}) \dots\dots\dots (31)$$

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 は

$$\phi\left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_\omega}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (32)$$

なる正規分布をなすものと仮定すれば, その分布関数 Φ は

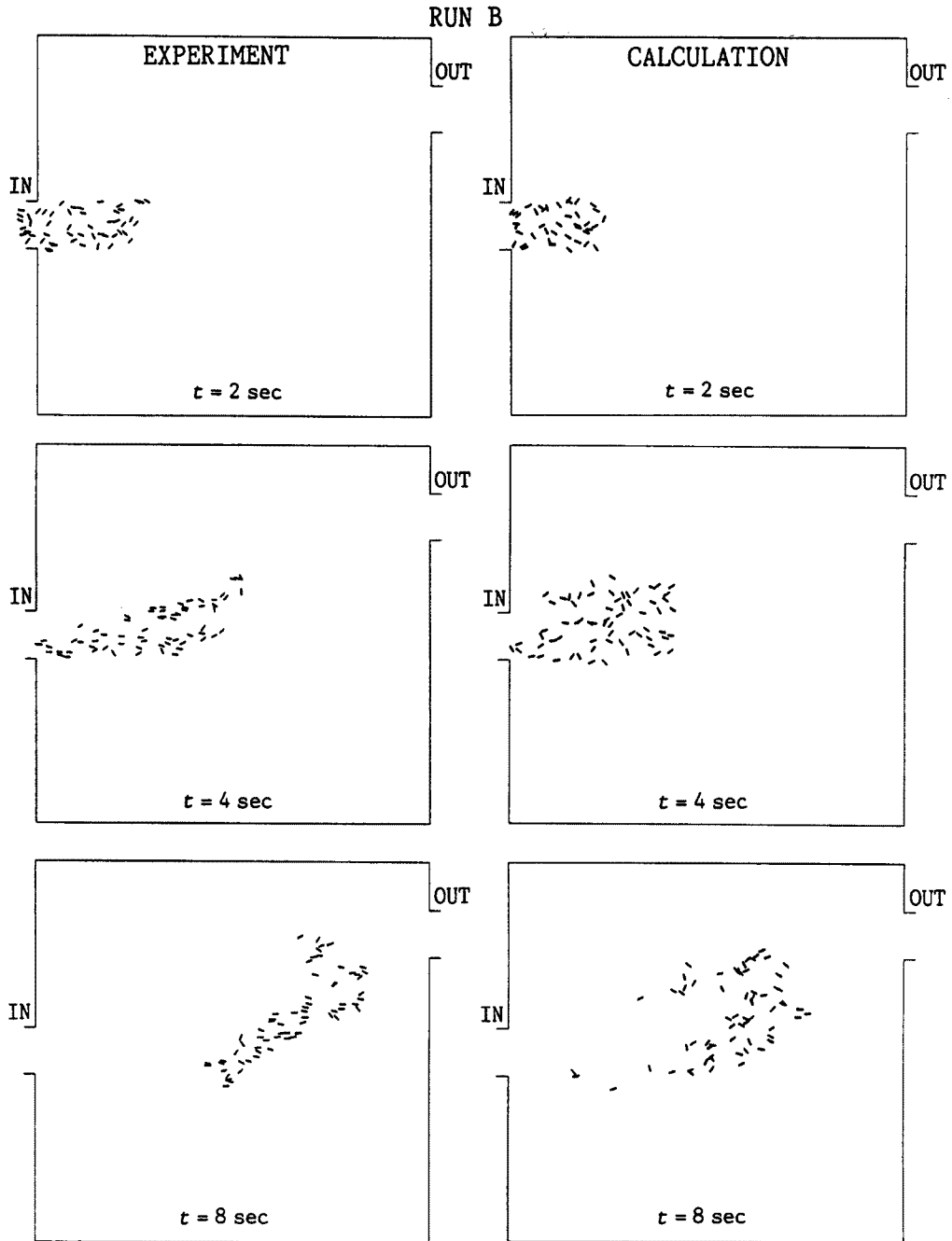


Fig. 14. Comparison between experimental and calculated positions and angles of drift wood (RUN B).

$$\Phi\left(\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\omega - \bar{\omega}}{\sigma_{\omega}}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds \dots\dots\dots (33)$$

で与えられる。分布関数 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 r を求められるとし、(31)式より θ が評価される。ただし、 θ は流木に作用する局所的な流体力の

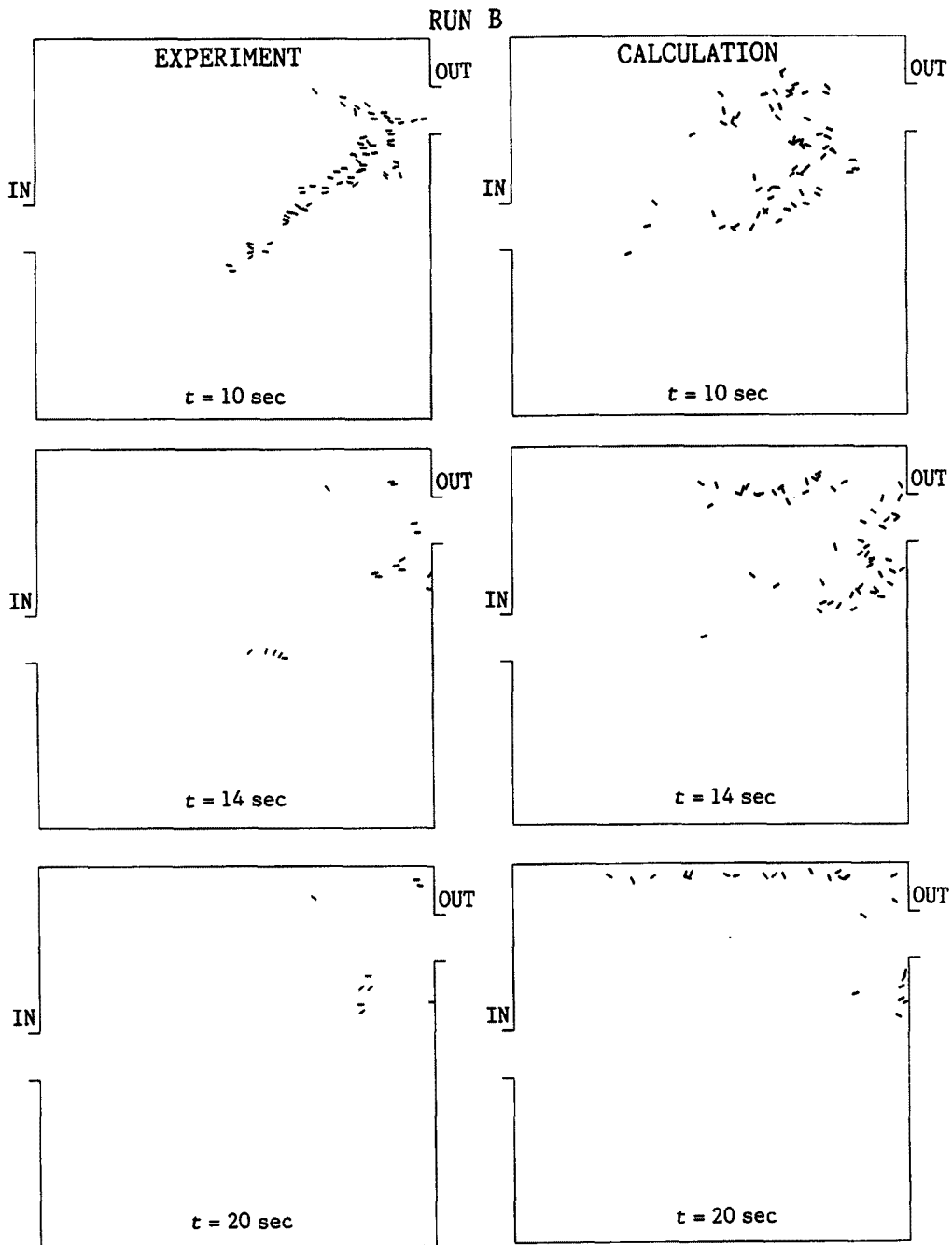


Fig. 14. Continued

分布をもとにした回転運動を考えることにより評価できるものであるが、本解析では流体力の分布を求めるのは困難であるので、上記角速度に関する統計値を基にした計算方法をとることにした。この場合、流木の回転角は初期回転角と局所フルード数のみから求められることになっているが、平面的な非一様流速場への適用性については、速度分布に起因した流体力のモーメントが重要になってくると思われ、今後さらに検討する必要がある。

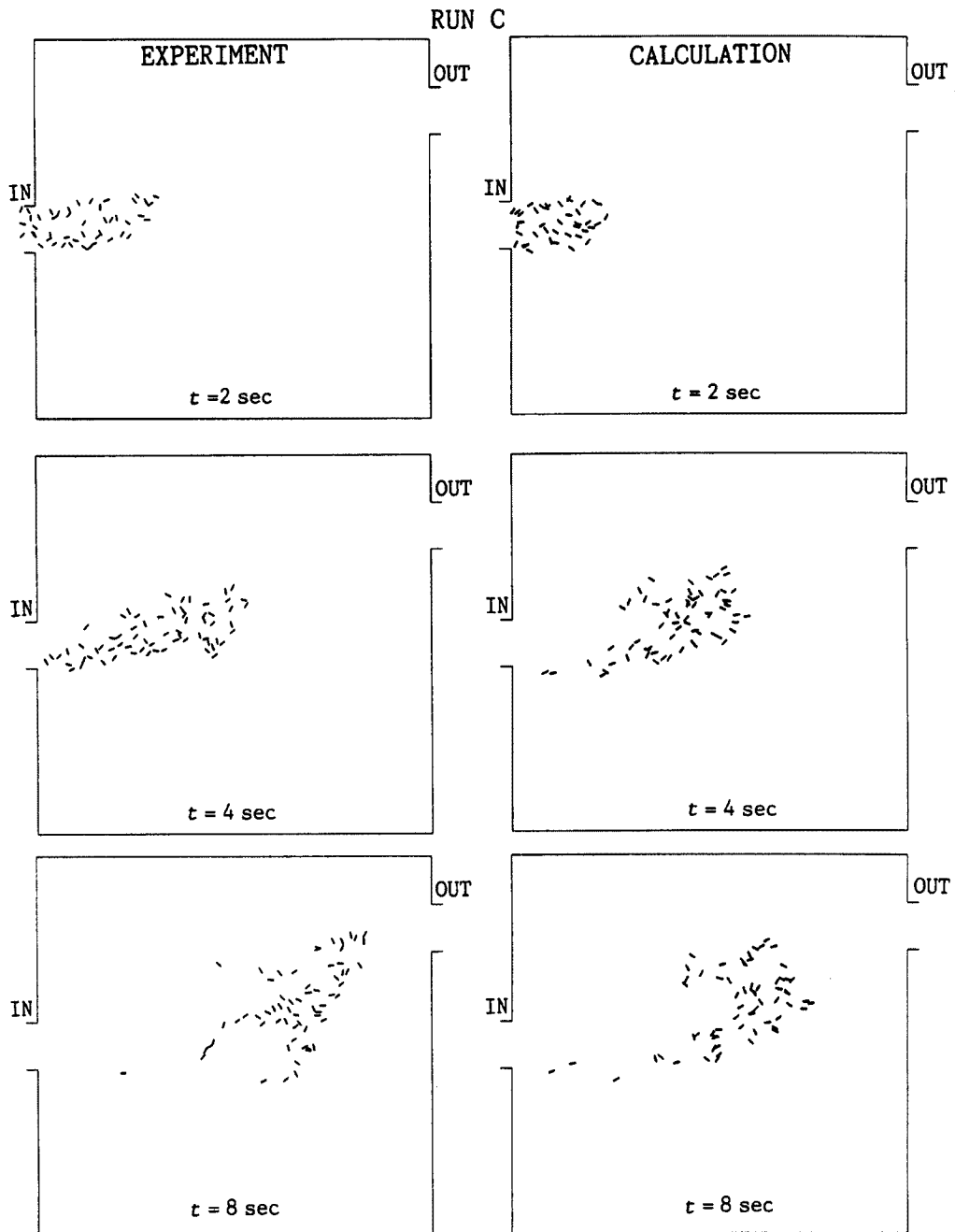


Fig. 15. Comparison between experimental and calculated positions and angles of drift wood (RUN C).

4.3 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た Fig. 13 に示したような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 および RUN C について実験結果と計算結果との比較をそれぞれ Fig. 14 および Fig.

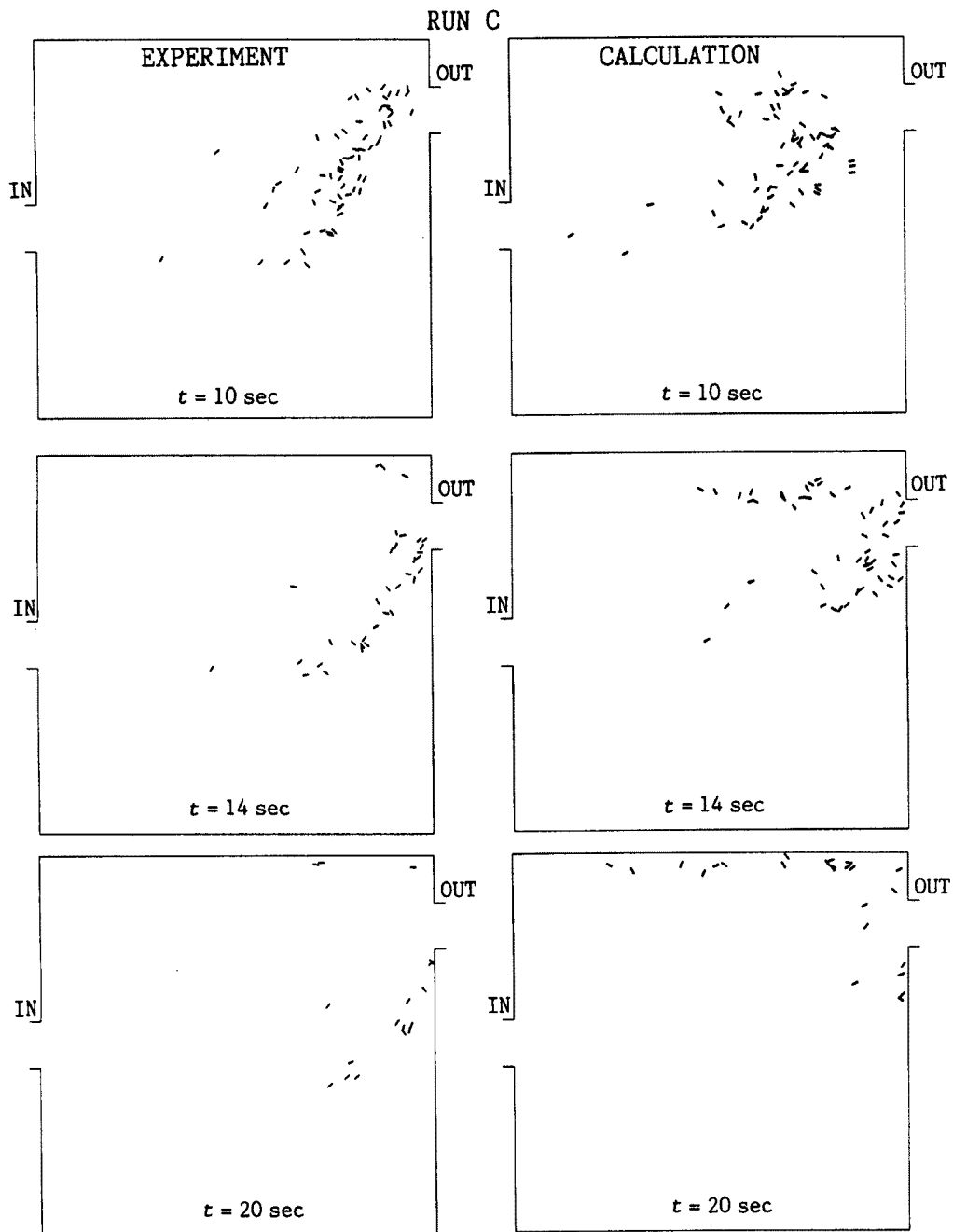


Fig. 15. Continued

15に示す。両方のケースとも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、Fig. 16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と仮定して、流木位置における氾濫水の表面流速を

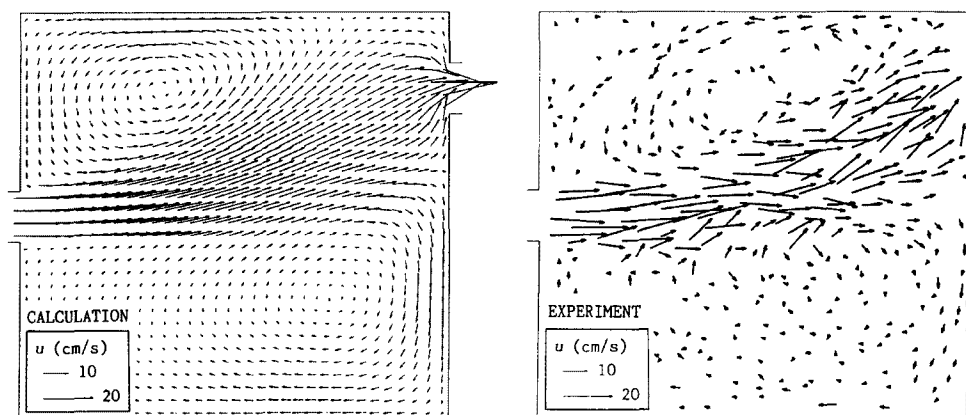


Fig. 16. Comparison between experimental flow pattern and calculated one.

$$U_k^n \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} U_k^n \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$V_k^n \rightarrow \frac{5.5 + 5.75 \log(u_* h / \nu)}{3.0 + 5.75 \log(u_* h / \nu)} V_k^n \quad \dots\dots\dots (35)$$

で求めている。Fig. 16 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、汜濫計算に 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、一層モデルで計算するときの表面流速の算定の方法をさらに検討する必要がある。また、汜濫流の流れのパターンも実験と計算とでは若干異なるところもあり、汜濫計算における水平粘性の効果を含めて、流れのシミュレーション手法の改良を行なうとともに、流木の縦分散係数についても検討する必要があるだろう。

5. 結 語

堤内地で流動する流木群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、流水のオイラー的解析法、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、二次元汜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。また、流木同士の接触、衝突については考慮しなかったが、これについても検討する必要がある。さらに、堤内地の地物条件を与えて、流木群の堰止め、堆積についても前年度の成果¹²⁾を踏まえて、検討していく予定である。

最後に、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・土砂汜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。また、計算の一部に京都大学大型計算機センターのシステムを利用した。関係各位に記

して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河田恵昭・中川 一：三隅川の洪水災害—洪水氾濫と家屋の被害—，京大防災研年報，第27号 B-2，1984，pp.179-196.
- 2) 名古屋市：伊勢湾台風災害誌，1961，p.61.
- 3) 平野宗夫・林 重徳・下津昌司・鈴木敦巳・早川誠而・棚橋由彦：1990年7月九州中北部豪雨による災害の特徴と概要，自然災害科学，Vol.9，No.2，1990，pp.64-72.
- 4) 国土庁大都市圏整備局・建設省河川局監修：ウォーターフロント開発と防災，山海堂，1990.
- 5) 高橋和雄・高橋 裕：クルマ社会と水害 —長崎豪雨災害は訴える—，九州大学出版会，1987.
- 6) 高橋 保・中川 一・西崎丈能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究，京大防災研年報，第29号 B-2，1986，pp.431-450.
- 7) 澤井健二：スーパーインボーズボードとマウスを利用したパソコンによるビデオ画像読み取り法，自然災害科学，Vol.7，No.1，1988，pp.49-57.
- 8) 椿 東一郎：水理学Ⅱ，基礎土木工学全書7，1974，pp.190-195.
- 9) Elder, J.W.: The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, Jour. Fluid Mech., Vol.5, 1959, pp.544-560.
- 10) 後藤智明：流出物の拡がり（文部省科学研究費，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.
- 11) Dukowicz, J.K.: A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, Jour. Comp. Physics, Vol.35, 1980, pp.229-253.
- 12) 中川 一・高橋 保・安達宏介：堤内地における流木群の挙動に関する研究，京大防災研年報，第34号 B-2，1991，pp.373-386.