

堤内地における流木群の挙動に関する研究

中川 一・高橋 保・安達 宏介

BEHAVIOR OF DRIFT WOOD WITH OVERLAND FLOOD FLOW

By Hajime NAKAGAWA, Tamotsu TAKAHASHI and Kohsuke ADACHI

Synopsis

The drift wood flowing down the river in the midst of a flood is one of the main causes that increases the damages of disaster. When the drift wood is dammed up by the bridge piers, the water level in the river is increased and sometimes bank breach occurs due to overtopping of water. In such a case, drift wood flows into protected low-land with flooding water and destroys the houses or gives the severe damages to them. After the flood, drift wood is usually mounded on streets by jamming between the houses and mounded on farms. These phenomena not only damage to crops and houses but also disturb the restoration of the disaster.

In this study, experiments for damming up of the drift wood in one and two dimensional simplified flow fields are carried out. The dam up factor of the drift wood is derived from one dimensional experimental results. By using this factor, experimental results are comparatively well explained. It is also found that in two dimensional experiments, because the incidence angle of the drift wood to the front row of house blocks becomes large owing to the lateral spread of water, the drift wood is more easily caught on houses than in one dimensional experiments.

1. 緒 論

洪水時には山腹崩壊や河岸侵食によって多量の立木が河道内に取り込まれ、流木群となって流下し、橋梁や河川構造物に甚大な被害を与えることがある。そして、それが堤防決壊の主要因ともなって洪水氾濫を生起せしめ、堤内地に流木群が流入することで、家屋破壊が助長され、減水後も街路や農耕地に流木がうず高く堆積して災害規模の増大と災害復興の遅延をもたらすことになる。Photo. 1は、昭和58年山陰豪雨災害において、島根県三隅町三隅地区内の主要幹線道路（旧国道9号線）である大橋通りに堆積した流木の山である。この流木は、洪水とともに三隅川を流下し、大橋通りの延長上に架設されていた三隅大橋の橋脚で堰止められ、これが水位上昇をもたらして橋の上下流で破堤氾濫が生じ、堰止められていた流木群が一気に堤内地に流入し、家屋を破壊しながら大橋通りを流下して堆積したものである¹⁾。昭和34年の伊勢湾台風では、名古屋港から堀川にかけて集中的に立地していた貯木場が被害を受け、100万トン以上であったと言われている原木が5mを越す高潮のために一挙に流出し、名古屋市内の民家を直撃し、多くの家屋を破壊・流出させたことは、強風ではなく流木が家屋破壊の主原因となることを如実に物語っている²⁾。また、流木が河口まで流出して船の就航に支障をきたすという事例が、1990年7月大分県大野川河口で発生しており、流木が主要な原因となる被害が広範囲にわたって発生していることがわかる。

本研究においては、堤防決壊時に堤内地に流入した流木群が、市街地にどの様に氾濫、堆積するかを明



Photo. 1. Drift wood mounded along Ohashi Street. (presented by Misumi town office)

らかにし、それによる家屋破壊や水位の堰上げ、土砂堆積の助長による水害規模の増大化を定量的に評価できる手法を確立することを目標としている。ここではその第一歩として、流木群が堤内地の市街地家屋間で堰止まる機構を、一次元水路内に家屋群を整列配置した場に流木群を供給した水理実験により考察する。ついで、二次元的拡がりのある堤内地内での流木群の流動、堰止めに関する水理実験を行ない、現象を支配する諸要因を抽出して、現象を再現し得るシミュレーション方法の手がかりを得る。

2. 1次元場における流木群の堰止め機構に関する実験

2.1 概説

流木群の堰止め機構に関する研究は、従来、河川工学の立場からは橋梁の流木疎通能力を検討し、将来の架橋計画において流木を支障なく流下させ、流木による派生的災害を防止するような橋梁設計指針を得ることを目標とし、砂防工学の立場からは、土石流とともに流下してくる流木を効率的に制御するための透過型砂防ダムの設計手法を得ることを目標として行なわれてきた。前者では、流木を支障なく流下させる最短橋脚間隔が問題となり、後者では、流木を有効に堰止めるスリット間隔（格子間隔）が問題となっており、両者は若干目標を異にしているが、流木がどのような条件で堰止まるのかを明らかにする必要がある点は共通である。

前者の立場から、足立・大同³⁾は流木による支間閉塞に関し、閉塞する限界条件を、表面流速をパラメータとして流木密度（流下中の流木が水面で占めている面積の全水面積に対する比）と支間長と流木長との比で求め、流木密度が小さく、支間長が大きく、表面流速が大きいほど閉塞しにくい結果を実験的に得ている。しかしながら、パラメータにといった流速が実験で得た実流速であるため一般的な限界表示式を与えるものとはなっていない。また、彼らは流木の堆積（堰止め）による水位上昇量 Δh を連続式とエネ

ルギー式とから次式のように得ている。

$$\Delta h \propto \left(\frac{V}{A} \right)^m \frac{v_0^2}{2g} \propto L^{m'} v_0^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V ；堆積した流木の総体積、 A ；橋脚前面の流木堆積断面積、 L ；堆積した流木群の長さ、 m 、 m' 、指数であるが、 L については未知数であり、堰上げ高さを予測するには堰止め流木量を見積る手段が必要となる。

後者の立場から、水原⁴⁾は流木止柵による流木の堰止め率を模型実験で検討し、足立らと同様の結果を得たが、さらに、流木群の堰止めには運動中の流木の偏走角（流木の長軸が主流となす角）、水深が影響することを示した。しかしながら、これらの影響を考慮した堰止め率を表わす一般的な表示がなされていない。水山ら⁵⁾は土石流の発生するような溪流において、流木対策施設の設置規準が作成されていないことに鑑み、土石流とともに流下してくる流木群を効率的に制御できる透過型砂防ダムの設計手法を確立するための基本的事項を明らかにすることを目的として模型実験を多数行ない、実験結果をもとに流木止スクリーン・スリットによる流木堰止め率（流木捕捉率）が次式によって評価可能であるとした。

$$\left. \begin{array}{ll} Fr \cdot \theta \leq 0.8 \text{ のとき} & T = 1.0 \\ 0.8 < Fr \cdot \theta < 8 \text{ のとき} & T = \log(8/Fr) \\ 8 \leq Fr \cdot \theta \text{ のとき} & T = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 T ；堰止め率で流木止スクリーン・スリットにより捕捉された流木本数のスリットに到達した総流木本数に対する割合、 $\theta = hD^2/d\ell^2$ 、 h ；水深、 D ；流木止スクリーンの横方向純間隔、 d ；流木の直径、 ℓ ；流木長、 Fr ；フルード数である。(2)式でなぜフルード数が流木の堰止め率に影響するかは明確ではないが、水面での擾乱の程度が一旦堰止まった流木群のアーチアクションを破壊したり堰止めそのものを阻害する原因になっているものと推察される。

以上の研究成果からもわかるように、破堤によって堤内地に流入した流木群は家屋間隔、道路幅、空き地といった場の条件、流速、水深などの水理量、流木長、流木直径、流木の比重、流木フラックス（単位時間、単位幅当りに通過する流木本数）等の流木の特性量、等によって家屋と家屋の間に堰止まったり、空き地に堆積したりする。ここでは、これらの条件を単純化するために1次元水路を用いて家屋間隔、流量、流入流木フラックス（単位時間、単位幅当りに供給する流木本数）を種々変化させた実験を行ない、流木群の堰止め機構について検討する。

2.2 実験装置及び実験方法

実験水路はFig. 1に示すような長さ約9 m、幅30 cm、深さ30 cmの鋼性両面ガラス張りで、勾配は1/500に固定した。水路上流端から約6 mの位置にFig. 2に示すような長さ10 cm、幅5 cm、高さ10 cmの木製家屋模型を配置し、水路上流端から約1.5 m下流に架設したベルトコンベヤー式の給木装置を用いて給木した。給木装置は、電動式ローラーが幅30 cm、長さ60 cmの目盛り付耐水性トレーシングペーパーを巻き取るようになっていて、ペーパー上に予め配置した流木模型がペーパーの巻きとりによって水路に供給されるようになっている。ローラーの回転速度が任意に変えられるので、これにより流入流木フラックスが設定できる。流木模型として、長さが3, 4, 5, 6, 7 cmの5種類で、直径2.2 mm、密度0.83 g/cm³の円柱形木材を用いた。

実験方法は以下のようなものである。流木を供給する前に、Fig. 2に示した4通りの家屋配置それぞれに対し、0.5, 1.0, 1.5 ℓ/secの3通りの定常流量を与え、水路下流端に設けた堰を調節して等流状態を作成した後、3 mm四方の紙片をトレーサーとして流し、家屋模型配置位置上部に設置したビデオカメラで流況を集録して画像解析により表面流速、流跡線を求めた。ついで、給木装置のトレーシングペーパー上に

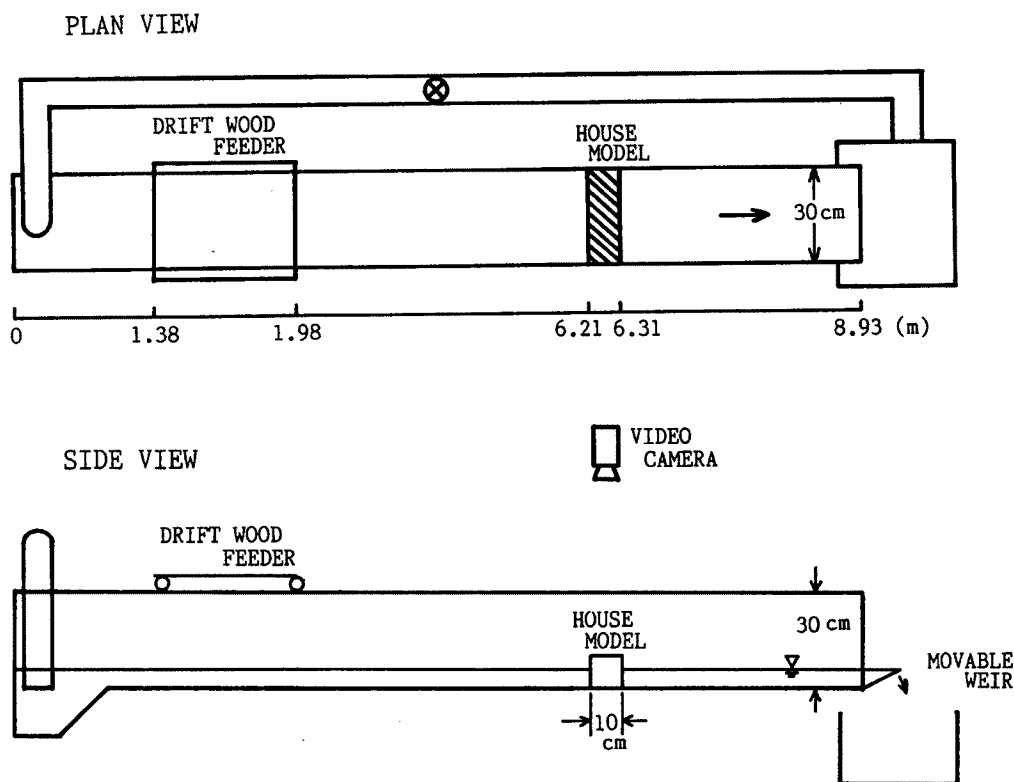


Fig. 1. One dimensional experimental set-up for dam up by drift wood.

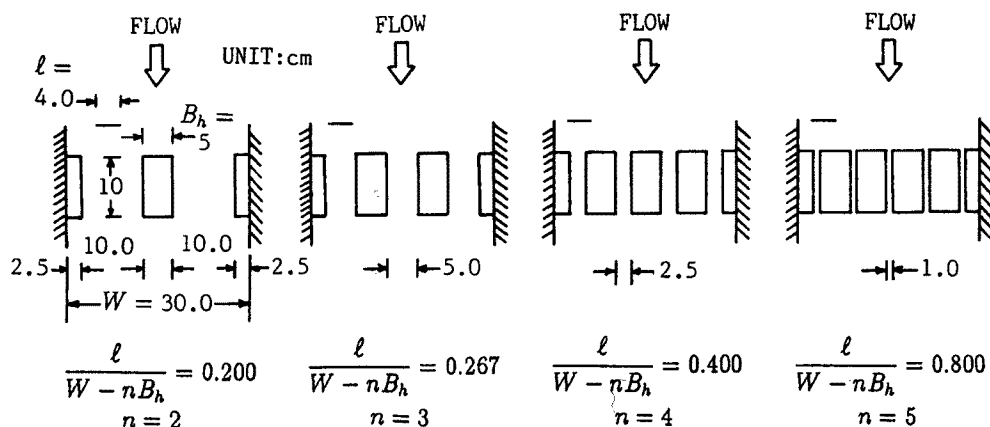


Fig. 2. Arrangement of model house blocks in the flume.

Fig. 3 に示すように、水路中心線と流木の長軸が並行になるよう、水路幅方向に 29 本、水路上流側に 10 列、計 290 本流木を配置し、ローラーの回転数を調節して流入流木フラックスが所定の値になるようにした。ここでは、これを 0.40, 0.69, 193 本/sec/cm の 3 通りとした。

水路幅の制約で家屋配置形態が 4 通りしかできないため、用いる流木長を変化させた。すなわち、流木の堰止めには場の条件として流木長、家屋幅、家屋間隔が影響するものと考えられ、家屋が一様に配置される場を対象とすれば次式で表わされる流木長と家屋間の空隙長の総和との比 η (流木長比と呼ぶことに

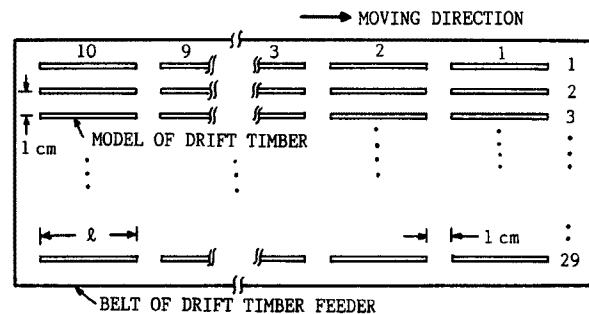


Fig. 3. Arrangement of model drift timbers on the belt of drift timbers feeder.

する)で場の条件が表わせると考えるのである。

$$\eta = \frac{\ell}{W - nB_h} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W ；水路幅、 n ；水路内に配置した家屋個数、 B_h ；家屋幅であり、流木長と家屋個数を変化させて η が0.2, 0.267, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8の8種類について実験を行なった。結局実験ケースは、 η が8種類、流量が3通り、流入流木フラックスが3通りの計72通りである。各ケースについて、流木が家屋模型に到達する直前の流動状況、家屋模型によって堰止められる、あるいは通過する状況をビデオカメラで撮影し、流木の偏走角度、到達本数、堰止め本数、通過本数、堰止め形状の時間的变化を測定した。なお、供給した流木の一部は水路側壁に付着して流下しないこともあったので、水路内、家屋模型前面および下流端から流出した流木の本数全てを計測した。

2.3 実験結果

実験条件と実験結果をTable 1に示す。ここに、 B ；家屋間隔、 Q ；流量、 C_{sp} ；流入流木フラックス、 N_{en} ；家屋によって堰止まった総流木本数、 N_t ；家屋模型に到達した総流木本数（＝堰止め本数 N_{en} ＋通過本数）、 α_{en} ；流木がもはや流下してこなくなった時点での堰止め率で、 $\alpha_{en} = N_{en}/N_t$ で定義する。 t_{en} ；給木を開始してから家屋模型に流木が初めて到達した時刻を $t = 0$ として最後の流木が到達した時刻、 C_m ； N_t を水路幅と t_{en} で除した t_{en} 時間内の平均的な流木フラックス、 t_{sp} ；給木器による流木供給時間、 U ；断面平均流速、である。一部解析不能（一印）な部分もあるが、同表よりRUN 1～RUN 8すなわち、 $\eta = 0.2, 0.267$ では、最終的な流木堰止め率 α_{en} はほぼゼロであり、一方、 $\eta = 0.6 \sim 0.8$ では α_{en} はほぼ1に近い値となっている。その間の $\eta = 0.3 \sim 0.5$ では、水理量によって α_{en} の値が変化していることがわかる。そこで、なぜ水理量によって α_{en} が変化するのかを検討する。水原は流木の偏走角が堰止め率に影響することを指摘しているが、ここでも偏走角と水理量との関係をまずみてみよう。Fig. 4は、横軸に偏走角、縦軸に偏走角 θ で家屋模型に到達した流木本数を総流木本数 N_t で除した値をとった頻度分布図である。なお、偏走角は $0^\circ \sim 90^\circ$ を 15° 間隔に分割して整理している。図中には平均偏走角（ $\bar{\theta}$ ）、標準偏差 σ 等を示している。同図より、流量が小さいRUN 28, 29, 30では、他と比較して偏走角が大きいときの頻度が高く、平均偏走角が大きくなっている。RUN 31～36では有意な差はないが、これは平均流速がほぼ同程度であることから表面流速も同程度であるからだと考えられる。水原は、偏走角には流木の形状と密度が影響し、表面流速やフルード数、レイノルズ数とは無関係であるとしているが、ここでは、流木の形状や密度を変化させた実験を行っていないのでこれらの影響は検討できないけれども、流速や水深は影響していると思われる。すなわち、Fig. 5に流量が0.5, 1.0, 1.5 ℓ/sec で家屋間隔が2.5 cmのときの家屋前面での流跡線を示すが、これより、水深と断面平均流速とで定義したレイノルズ数が大き

Table 1. Experimental conditions and results

RUN	B (cm)	Q (ℓ/s)	C_{sp} (p/s/cm)	ℓ (cm)	η	N_i (p)	N_{en} (p)	α_{en}	C_m (p/s/cm)	t_{en} (s)	t_{sp} (s)	U (cm/s)	$\eta \frac{\ell^3 C_m}{Uh}$
1	10.0	0.5	0.40	4.0	0.200	260	0	0.00	0.25	34.13	23.9	9.15	0.192
2	10.0	0.5	0.68	4.0	0.200	234	0	0.00	0.30	25.96	14.2	8.05	0.230
3	10.0	0.5	1.93	4.0	0.200	239	2	0.01	0.52	15.45	5.0	8.48	0.399
4	10.0	1.0	0.40	4.0	0.200	267	2	0.00	0.30	30.10	23.9	13.50	0.115
5	10.0	1.0	0.68	4.0	0.200	266	0	0.00	0.46	19.45	14.2	13.70	0.177
6	10.0	1.0	1.93	4.0	0.200	260	0	0.00	0.93	9.25	5.0	13.50	0.357
7	10.0	1.5	0.40	4.0	0.200	264	0	0.00	0.34	26.19	23.9	13.80	0.087
8	10.0	1.5	0.68	4.0	0.200	274	0	0.00	0.46	19.89	14.2	13.90	0.118
9	10.0	1.5	1.93	4.0	0.200	263	0	0.00	0.67	13.15	5.0	14.00	0.172
10	5.0	0.5	0.40	4.0	0.267	226	8	0.04	0.25	29.73	23.9	8.89	0.256
11	5.0	0.5	0.68	4.0	0.267	234	14	0.06	0.38	20.66	14.2	9.07	0.390
12	5.0	0.5	1.93	4.0	0.267	244	2	0.01	0.57	14.16	5.0	9.24	0.584
13	5.0	1.0	0.40	4.0	0.267	252	10	0.04	0.30	27.90	23.9	13.10	0.154
14	5.0	1.0	0.68	4.0	0.267	254	1	0.00	0.43	19.82	14.2	13.50	0.220
15	5.0	1.0	1.93	4.0	0.267	250	12	0.05	0.86	9.66	5.0	12.60	0.441
16	5.0	1.5	0.40	4.0	0.267	272	13	0.05	0.41	21.97	23.9	12.80	0.140
17	5.0	1.5	0.68	4.0	0.267	258	3	0.01	0.39	21.89	14.2	12.80	0.133
18	5.0	1.5	1.93	4.0	0.267	270	0	0.00	0.66	13.71	5.0	13.00	0.226
19	2.5	0.5	0.40	3.0	0.300	227	23	0.10	0.25	30.60	23.9	7.25	0.120
20	2.5	0.5	0.68	3.0	0.300	206	77	0.37	0.36	19.02	14.2	7.58	0.175
21	2.5	0.5	1.93	3.0	0.300	216	47	0.22	0.68	10.58	5.0	7.58	0.331
22	2.5	1.0	0.40	3.0	0.300	239	29	0.12	0.27	29.60	23.9	9.80	0.065
23	2.5	1.0	0.68	3.0	0.300	230	56	0.24	0.44	17.58	14.2	9.80	0.106
24	2.5	1.0	1.93	3.0	0.300	239	81	0.34	0.63	12.75	5.0	9.80	0.152
25	2.5	1.5	0.40	3.0	0.300	247	10	0.04	0.30	27.26	23.9	11.11	0.049
26	2.5	1.5	0.68	3.0	0.300	254	4	0.02	0.43	19.92	14.2	11.11	0.069
27	2.5	1.5	1.93	3.0	0.300	248	22	0.09	0.62	13.31	5.0	11.11	0.100
28	2.5	0.5	0.40	4.0	0.400	247	150	0.61	0.20	40.17	23.9	7.71	0.307
29	2.5	0.5	0.68	4.0	0.400	247	190	0.77	0.48	17.28	14.2	7.83	0.737
30	2.5	0.5	1.93	4.0	0.400	228	176	0.77	0.65	11.72	5.0	7.98	0.998
31	2.5	1.0	0.40	4.0	0.400	266	122	0.46	0.26	34.06	23.9	9.71	0.200
32	2.5	1.0	0.68	4.0	0.400	260	140	0.54	0.36	23.75	14.2	10.01	0.267
33	2.5	1.0	1.93	4.0	0.400	253	157	0.62	0.83	10.11	5.0	9.62	0.638
34	2.5	1.5	0.40	4.0	0.400	261	113	0.43	0.28	31.16	23.9	10.42	0.143
35	2.5	1.5	0.68	4.0	0.400	273	99	0.36	0.40	24.62	14.2	10.21	0.205
36	2.5	1.5	1.93	4.0	0.400	237	145	0.61	0.69	11.51	5.0	10.56	0.353

いと（単位幅流量が大きいと）、家屋前面での流線の曲がり角が緩くなっており、このことから家屋近傍における流木の偏走角が小さくなるものと推察されるからである。ただし、流線の曲がり角に関しては、本来なら表面流速と家屋幅か家屋間隔で定義されるレイノルズ数を用いて議論すべきであるが、堰止め率の観点から見れば、水深が大きいと堰止まった流木の下をくぐって流木が抜けでることが生じやすく、水深が小さいとくぐって流出する場合に水路底に突っかかって堰止められて堰止め率が大きくなり、また、表面流速より断面平均流速が水理量を整理しやすいということもあって、ここでは断面平均流速と水深を用いて検討した。結局、単位幅流量が大きいと流線の曲がり角が小さくなり、その結果流木の偏走角が小さくなって堰止まりにくくなることがわかった。Table 1 の RUN 19～RUN 45 からこのことが確認できる。

つぎに、給木速度と流速とによって規定される平均流木フラックス C_m が α_{en} に与える影響を検討する。

Table 1. Continued

RUN	B (cm)	Q (ℓ/s)	C_{sp} (p/s/cm)	ℓ (cm)	η	N_i (p)	N_{en} (p)	α_{en}	C_m (p/s/cm)	t_{en} (s)	t_{sp} (s)	U (cm/s)	$\eta \frac{\ell^3 C_m}{U h}$
37	2.5	0.5	0.40	5.0	0.500	260	227	0.87	0.31	28.40	23.9	7.58	1.162
38	2.5	0.5	0.68	5.0	0.500	224	212	0.95	0.41	18.18	14.2	7.94	1.537
39	2.5	0.5	1.93	5.0	0.500	235	227	0.97	0.63	12.45	5.0	7.94	2.362
40	2.5	1.0	0.40	5.0	0.500	267	234	0.88	0.28	31.63	23.9	9.52	0.525
41	2.5	1.0	0.68	5.0	0.500	243	209	0.86	0.38	21.39	14.2	9.52	0.713
42	2.5	1.0	1.93	5.0	0.500	253	238	0.94	0.52	16.15	5.0	9.52	0.975
43	2.5	1.5	0.40	5.0	0.500	275	195	0.71	0.32	28.96	23.9	11.36	0.400
44	2.5	1.5	0.68	5.0	0.500	251	201	0.80	0.40	21.02	14.2	11.36	0.500
45	2.5	1.5	1.93	5.0	0.500	242	198	0.82	0.55	14.78	5.0	11.36	0.688
46	2.5	0.5	0.40	6.0	0.600	264	233	0.88	0.29	27.06	23.9	7.94	2.255
47	2.5	0.5	0.68	6.0	0.600	251	228	0.91	0.42	19.72	14.2	7.94	3.265
48	2.5	0.5	1.93	6.0	0.600	237	236	1.00	0.71	11.10	5.0	8.33	5.520
49	2.5	1.0	0.40	6.0	0.600	256	241	0.94	0.28	30.23	23.9	9.80	1.089
50	2.5	1.0	0.68	6.0	0.600	246	229	0.93	0.48	17.15	14.2	9.52	1.866
51	2.5	1.0	1.93	6.0	0.600	254	208	0.82	0.61	13.81	5.0	9.80	2.372
52	2.5	1.5	0.40	6.0	0.600	271	233	0.86	0.23	39.17	23.9	11.36	0.596
53	2.5	1.5	0.68	6.0	0.600	261	231	0.89	0.47	18.38	14.2	11.36	1.218
54	2.5	1.5	1.93	6.0	0.600	254	231	0.91	0.57	14.91	5.0	11.11	1.477
55	2.5	0.5	0.40	7.0	0.700	259	255	0.98	0.27	32.06	23.9	7.94	3.889
56	2.5	0.5	0.68	7.0	0.700	250	240	0.96	0.42	20.06	14.2	7.58	6.049
57	2.5	0.5	1.93	7.0	0.700	249	243	0.98	0.62	13.30	5.0	7.94	8.930
58	2.5	1.0	0.40	7.0	0.700	271	260	0.96	0.32	28.39	23.9	9.80	2.305
59	2.5	1.0	0.68	7.0	0.700	248	241	0.97	0.40	20.75	14.2	9.80	2.881
60	2.5	1.0	1.93	7.0	0.700	248	238	0.96	—	—	5.0	9.80	—
61	2.5	1.5	0.40	7.0	0.700	273	244	0.89	0.29	31.40	23.9	11.11	1.393
62	2.5	1.5	0.68	7.0	0.700	264	255	0.97	0.42	21.12	14.2	11.11	2.017
63	2.5	1.5	1.93	7.0	0.700	260	239	0.92	0.79	10.95	5.0	11.11	3.794
64	1.0	0.5	0.40	4.0	0.800	228	215	0.94	0.25	30.96	23.9	5.11	0.768
65	1.0	0.5	0.68	4.0	0.800	227	215	0.95	0.36	21.09	14.2	4.96	1.106
66	1.0	0.5	1.93	4.0	0.800	211	204	0.97	0.44	16.05	5.0	4.77	1.351
67	1.0	1.0	0.40	4.0	0.800	237	226	0.95	0.27	29.20	23.9	4.95	0.415
68	1.0	1.0	0.68	4.0	0.800	213	195	0.92	0.31	23.02	14.2	4.88	0.476
69	1.0	1.0	1.93	4.0	0.800	244	233	0.95	0.42	19.38	5.0	4.76	0.645
70	1.0	1.5	0.40	4.0	0.800	247	242	0.98	0.30	27.15	23.9	6.25	0.307
71	1.0	1.5	0.68	4.0	0.800	252	239	0.95	0.34	24.49	14.2	6.25	0.348
72	1.0	1.5	1.93	4.0	0.800	236	222	0.94	0.70	11.18	5.0	6.28	0.717

同一流量で C_m が大きい実験ケースでは、 α_{en} が大きくなるのが同表の RUN 28～36 で顕著にでている。これは、平均流木フラックスが大きいと局所的に流木同士が絡み合っ流下する機会が増し、見かけ上流木長が長くなって堰止まりやすくなるからだと思う。

2.4 堰止め率の評価

実験結果から、 $0 < \eta < 0.3$ では $\alpha_{en} = 0$ 、 $\eta > 0.5$ では平均的に $\alpha_{en} = 0.95$ 、 $0.3 \leq \eta \leq 0.5$ では α_{en} は水量等によって変化することがわかった。ここでは、 $0.3 \leq \eta \leq 0.5$ における α_{en} がどのような諸量によって規定されるのか、水量との関係式を検討するとともに、堰止め率の時間変化（堰止め流木本数の時間変化）を考察する。

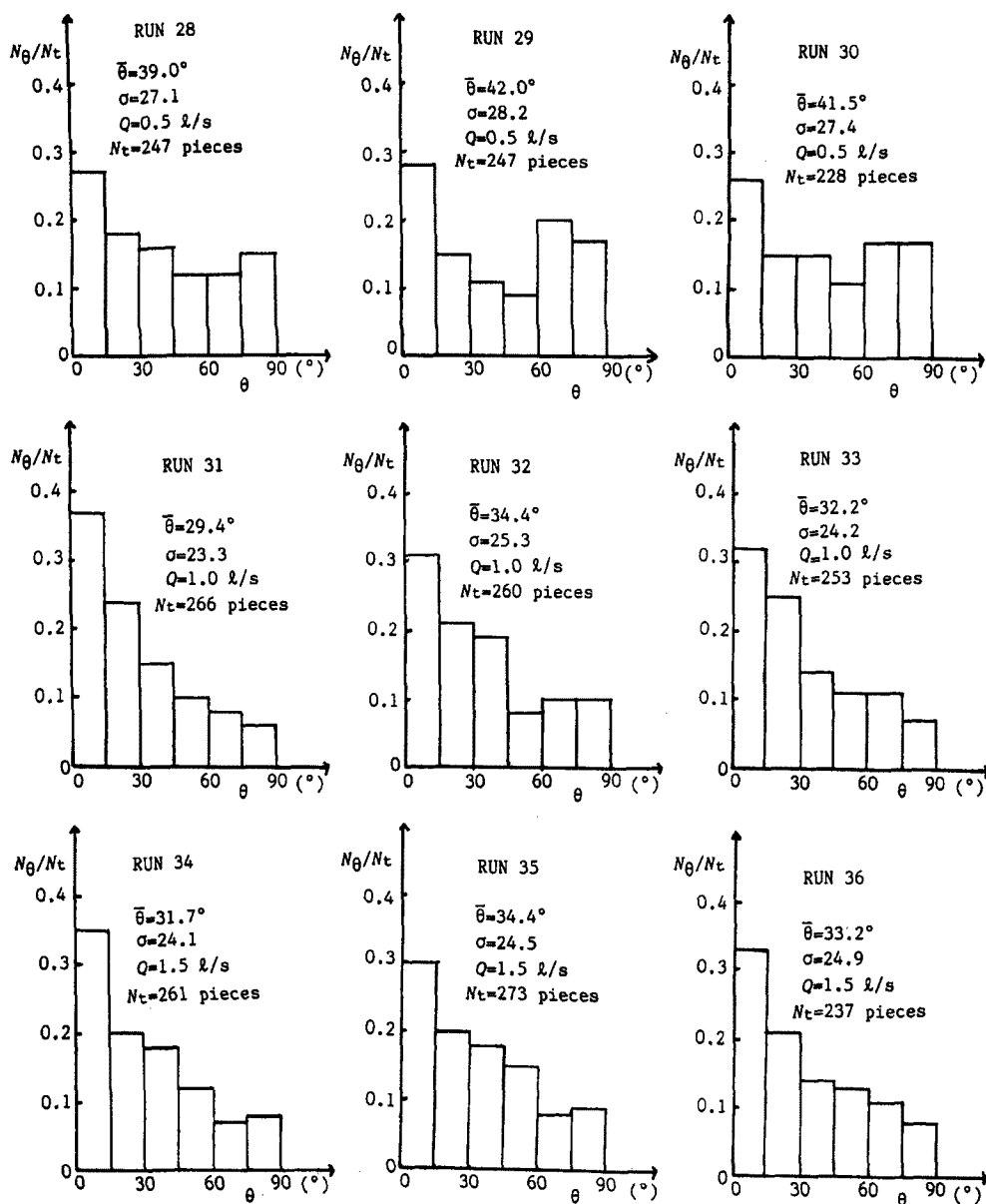


Fig. 4. Distribution of frequency about incidence angle of drift wood to the forefront line of house blocks.

最終堰止め率 α_{en} は次式のような関数と考えられる。

$$\alpha_{en} = f\{(\rho - \rho_d)g, \mu, \rho, g, U, h, W - nB_h, \ell, C_m, t_{sp}, N_t, \dots\} \quad (4)$$

ここに、 ρ ；水の密度、 ρ_d ；流木の密度である。次元解析を行なって無次元量を求めると、以下のようになる。

$$\alpha_{en} = f\left(\frac{(\rho - \rho_d)gh}{\rho U^2}, \frac{\nu}{Uh}, \frac{gh}{U^2}, \frac{W - nB_h}{\ell}, \frac{\ell}{h}, \frac{\ell^2 C_m}{U}, N_b, \dots\right) \quad (5)$$

なお、長さの基本単位には ℓ と h を使い分けている。これより、 α_{en} には密度フルード数、レイノルズ数、

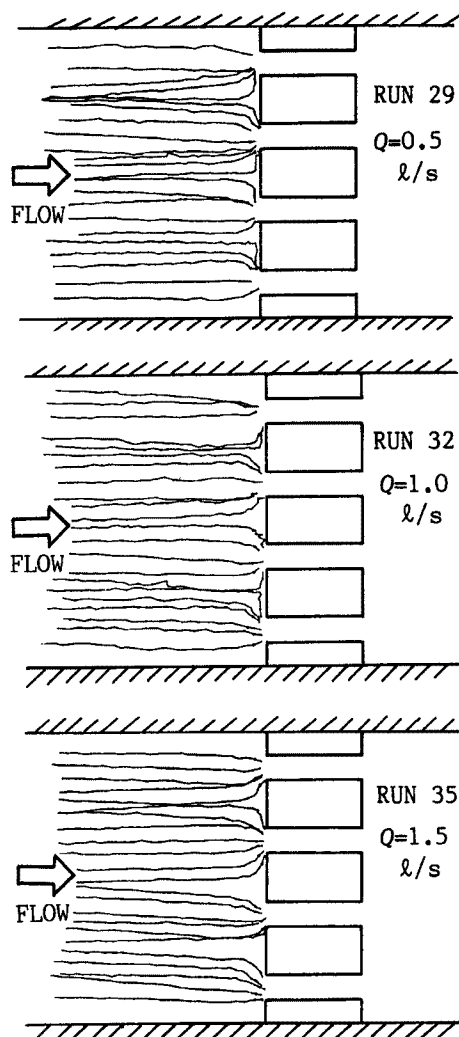


Fig. 5. Stream lines in front of the model house blocks.

の場合、 $\alpha(t)$ を求めることとなる。実験結果から、堰止め率の時間変化は直線的であることがみとめられたので、ここでは、これを次式のように近似する。

$$0.3 \leq \eta \leq 0.5 \text{ のとき } \alpha(t) = \alpha_{en} \frac{t}{t_{en}} = \left(1 - \frac{0.225}{\frac{\ell}{W-nB_h} \cdot \frac{\ell^3 C_m}{Uh} + 0.225} \right) \frac{t}{t_{en}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta > 0.5 \text{ のとき } \alpha(t) = 0.95 \frac{t}{t_{en}} \dots\dots\dots (9)$$

$$0 \leq \eta < 0.3 \text{ のとき } \alpha(t) \approx 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 t は流木が初めて家屋模型に到達した時点から計った時間である。Fig. 7 は RUN 34, 35, 36 ($\eta = 0.4$) の $\alpha(t)$ の実験値と (8) 式による計算値とを比較したものであり、Fig. 8 は、RUN 70, 71, 72 ($\eta = 0.8$) の $\alpha(t)$ の実験値と (9) 式による計算値とを比較したものである。計算結果は実験値の傾向を比

フルード数、流木長比、流木長と水深との比、 $\ell^2 C_m / U$ 、 N_f 等が関連していることが分かる。そこで、2.3 で α_{en} に特に関連するものと思われた流木長比と、 C_m を含んだ $\ell^2 C_m / U$ を取り上げて考えることにする。ただし、単位幅流量が影響すると考えられたので、 $\ell^2 C_m / U$ を $\ell^3 C_m / (Uh)$ と置き換えて用いることにする。すなわち、

$$\alpha_{en} = f\left(\frac{\ell}{W-nB_h}, \frac{\ell^3 C_m}{Uh}\right) \dots\dots\dots (6)$$

とする。関数関係は不明なので、大胆ではあるが両者の 1 次の積 $\frac{\ell}{W-nB_h} \cdot \frac{\ell^3 C_m}{Uh}$ と α_{en} との関係を検討したのが Fig. 6 である。図中の点は、Table 1 に示した RUN 19 ~ RUN 45 の実験値であり、曲線は双曲線を仮定して最小 2 乗法によって求められた回帰曲線で、

$$\alpha_{en} = 1 - \frac{0.225}{\frac{\ell}{W-nB_h} \cdot \frac{\ell^3 C_m}{Uh} + 0.225} \dots\dots\dots (7)$$

である。実験値のばらつきが大きくてこのような整理法では不十分ではあるが、 α_{en} の傾向は表わしている。厳密には RUN 1 ~ RUN 72 の全てにわたり一貫して最終堰止め率が説明されなければならない。 $\frac{\ell}{W-nB_h}$ のききかたが 1 次式でではなくて、より強くでるような式形であるのかもしれない。

堤内地における流木群の堰止め範囲や規模を求めるには、流木群の流動、分散機構を評価する必要があるのは勿論であるが、対象地点における堰止め量の時々刻々の変化過程を知る必要がある。そのためには、最終堰止め率ではなくてある時刻の堰止め率 $\alpha(t, x, y)$ (任意の時刻におけるある地点の流木本数/最終的にその地点に到達した総流木本数) を知っておく必要がある。1 次元流れ

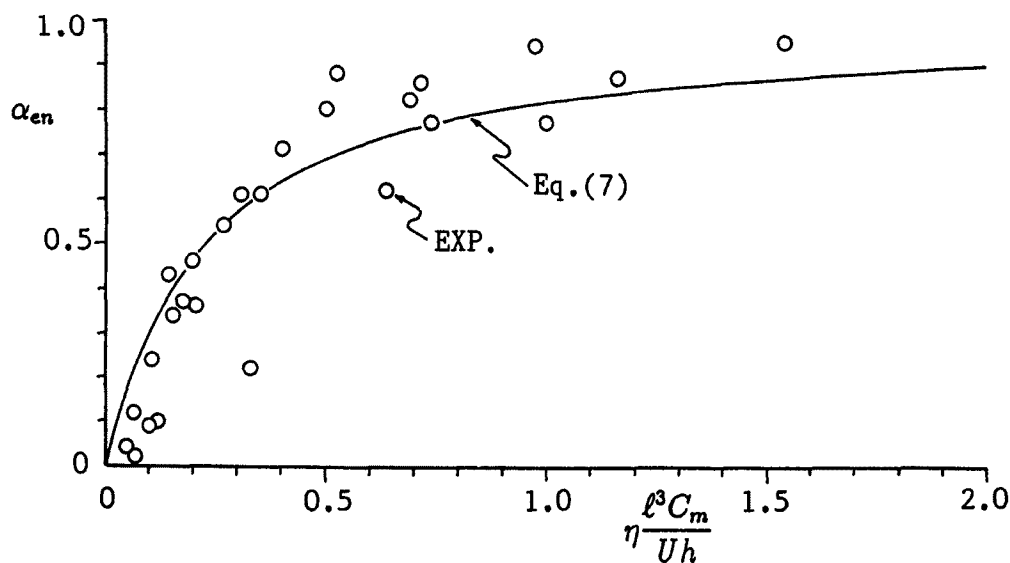


Fig. 6. Relation between $\eta \frac{l^3 C_m}{U h}$ and final dam up factor α_m .

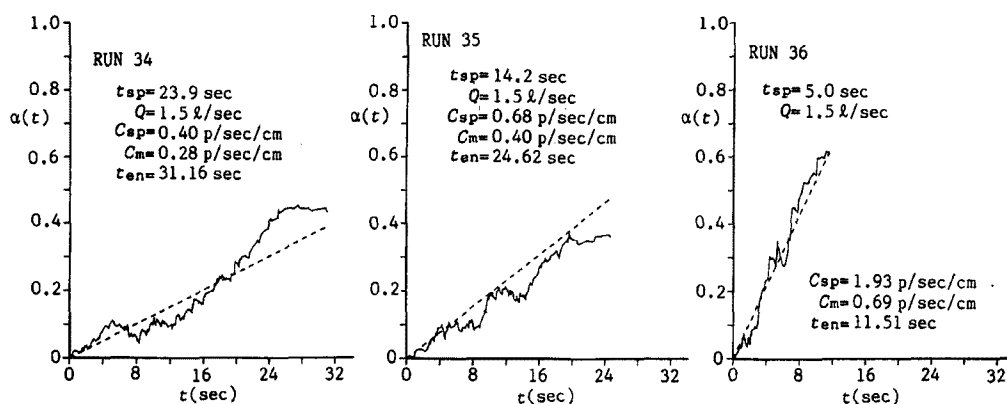


Fig. 7. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one. ($\eta = 0.4$, $Q = 1.5 \text{ l/s}$)

較的よく説明している。しかしながら、Fig. 9 に示した RUN 28, 29, 30 ($\eta = 0.4$) の比較では、実験結果は初期に堰止め率は小さいが、一旦堰止めが生じるとその影響でその後からやってくる流木群は容易に堰止まって、急激に堰止め率が增大していくという経過を辿っているが、計算では最終堰止め率の値まで直線近似しているのでこのような傾向を再現できていないことがわかる。また、実験では、一旦堰止まって弱いアーチアクションを形成していたものが、水面の擾乱や流体力によりそれが破壊され堰止め率を一時的に低下させるが、その後しばらくして再び堰止めが急速に進行することが観察されたが、計算ではこのような現象を考慮した取り扱いとなっておらず、実験結果と計算結果に大きな違いが生じる原因となっている。このように流木群の堰止めには偶然性がかなり影響しており、この現象は本質的には確率過程（一種のマルコフ過程）をとるものと思われるので、この方面からの検討も進めていく必要があろう。

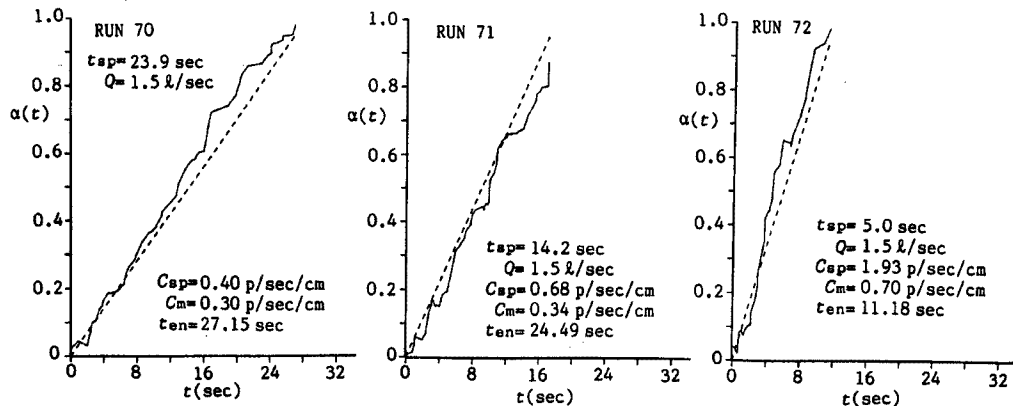


Fig. 8. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one. ($\eta=0.8$, $Q=1.5$ l/s)

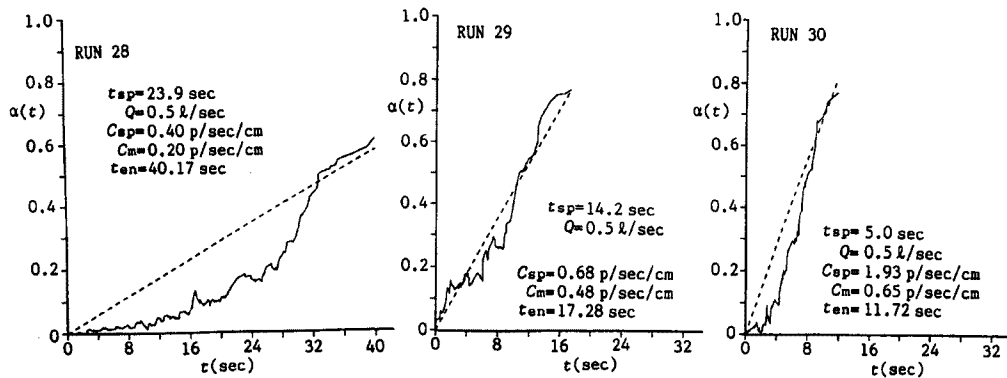


Fig. 9. Comparison between calculated temporal dam up factor $\alpha(t)$ with experimental one. ($\eta=0.4$, $Q=0.5$ l/s)

3. 堤内地における流木群の流動・堰止め機構に関する実験

3.1 実験装置及び実験方法

ここでは、平面2次元場における流木群の挙動が、市街地内ではどのようなものであるのかを流れの場を単純化した氾濫模型実験装置を用いて検討する。実験装置はFig. 10に示すように、長さ1.5 m、幅20 cm、深さ20 cmの木製1次元水路と、長さ1.7 m、幅1.6 mの水平な氾濫台とからなっており、1次元水路は氾濫台の1辺の中央で接続されている。氾濫台の周囲は不透水の壁で囲ってあるが、幅20 cmの排水部が設けられている。1次元水路出口から23 cm上流に2.で用いたものと同じ給木装置を設置した。市街地模型にも2.で用いた木製ブロックを用いた。

実験方法は以下のようなものである。すなわち、まず氾濫台上に家屋ブロックを所定の間隔で配置し、一定流量を供給し続けた状態で表面流況を測定するためのトレーサーを投入して氾濫台上部に設置したビデオカメラでこれを撮影した。ついで、給木装置のトレーシングペーパー上に、流木模型(長さ4 cm)を縦横1 cm間隔で19×22本配置し、ローラーを所定の回転速度に設定し、給木を開始した。流木群の流動状況、堰止め様式も同じビデオカメラで撮影し、後で画像解析を行なって求めた。家屋配置形態は、流下方向(x 方向)にいずれのケースにおいても10 cm間隔で7列、横方向(y 方向)には2.5 cm, 5 cm, および10

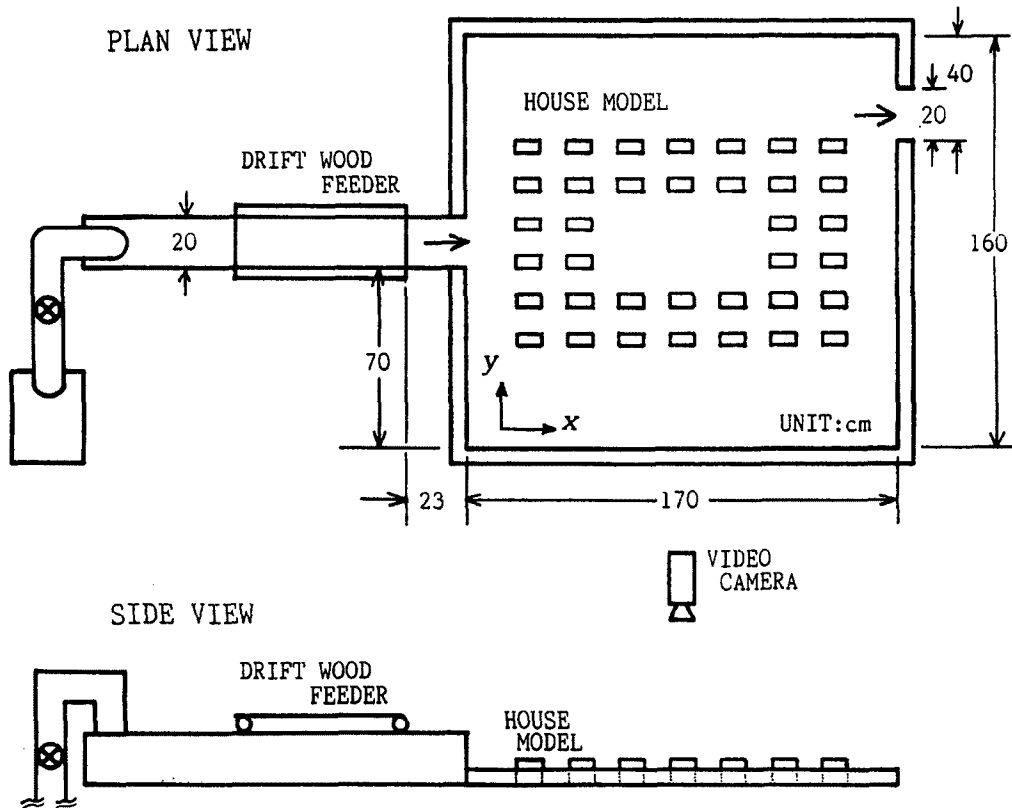


Fig. 10. Two dimensional experimental set-up for dam up by drift wood.

Table 2. Experimental conditions

	B (cm)	C_{sp} (p/s/cm)	t_{sp} (sec)	Q (ℓ /s)	SPACE
RUN A	5.0	0.63	33.2	0.8	NO
RUN B	5.0	0.63	33.2	0.8	YES
RUN C	10.0	0.63	33.2	0.8	NO
RUN D	2.5	0.63	33.2	0.8	NO
RUN E	10.0	0.63	33.2	0.8	YES

cmの3通りの間隔でおおの11列、10列および6列家屋模型を配置した。5 cm間隔の場合には中央部の家屋模型を2×3の範囲にわたり取り除き、空き地を設けた場合の実験も行なった。流入流木フラックス C_{sp} は0.63 p/s/cm、流木供給時間 t_{sp} は33.2 sec、は流量 Q は0.8 ℓ /secに固定した。なお、実験条件を Table 2に示す。

3.3 実験結果の考察

流木の供給が終了し、市街地内に分散した流木群が堰止められて流動を停止し、かつ堰止まらなかった流

木群がすべて排水口から流出した時点での流木の堰止め本数の分布を Fig. 11(a), (b) に示す。(a) は RUN D ($B=2.5$ cm), (b) は RUN A ($B=5.0$ cm, 空地無し) の実験ケースである。1次元水路実験では $B=5$ cmのとき堰止め率はほぼゼロであったが2次元平面場では、RUN Aに見られるように水路出口の中心からずれた第1列目の前面で多量の流木が堰止まった。RUN Dでも1次元の実験結果から推定すると、 $B=2.5$ cmでは通過する流木も半数程度あって、第1列を通過した流木がその下流側でも多数堰止められるものと予想されたが、予想に反してほとんどの流木が第1列の前面で堰止まった。このように、流木群が1次元水路出口から横方向の広がりのある場へ流出する場合には、1次元水路実験結果とは異なる現象が観察された。これは、最前列家屋の前縁線に対する流木の入射角度の影響だと考えられる。すな

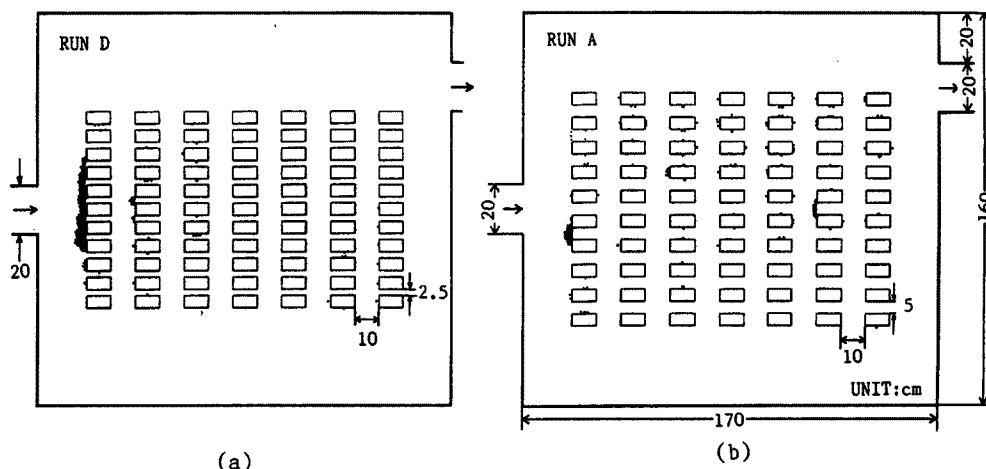


Fig. 11. Distribution of dammed up drift wood. (a): RUN D (b): RUN A

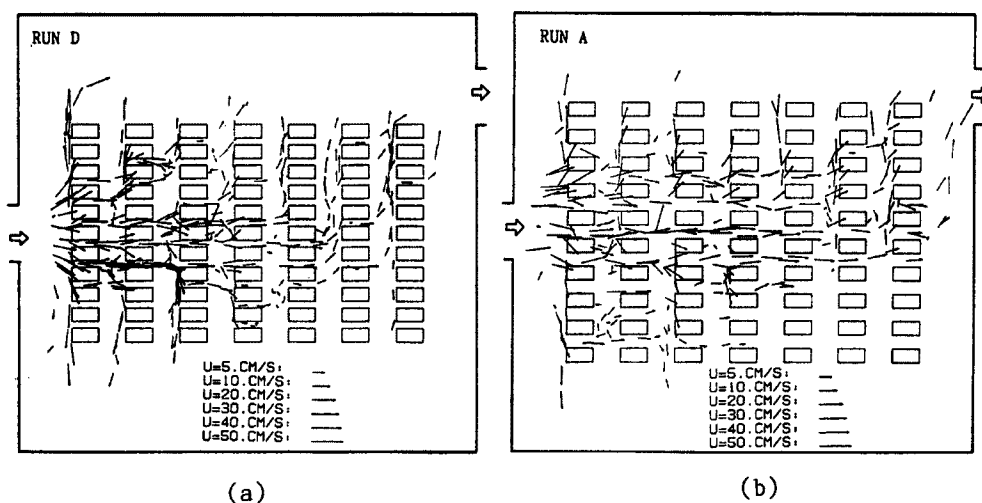


Fig. 12. Distribution of surface flow vectors. (a): RUN D (b): RUN A

わち、Fig. 12(a), (b) に示した表面流速ベクトルの分布から判断して、1次元水路出口近傍の流線は氾濫水の横方向への広がりにより曲がり、それによって流木が家屋模型前面に対し大きな偏走角をもって流入しているからだと考えられる。2次元氾濫場での流木群の流動・堰止め機構に関する実験は、1次元のときと同様かそれ以上に偶然性が影響するので、現在、同一実験ケースを数回行なって実験結果の解析を進行させている。

2次元氾濫場における流木の堆積範囲、規模を予測するには破堤口などから流入した流木群がどの様に運動しながらどの様に分散していくかを求めなければならない。実験から明らかになったように、破堤口付近は急に氾濫水が広がり、横方向流速を持つようになって流木は並進運動と一種の回転運動をしながら分散していく。このことは1次元水路実験では生じなかったことである。1次元の実験で得た堰止め率がどの程度2次元場で適用可能かまだ疑問であるが、流速ベクトルの方向と家屋の前面がなす方向を考慮した解析、すなわち、流木の運動を解析し、偏走角を計算してこれをダイレクトに堰止め率の算定式の中に反映させるなどの修正を行えば2次元場への適用も可能となるかも知れない。そのためには、まず、1

次元水路実験で家屋群が流心とある角度をなしている場合の堰止め率を検討し、ついで2次元場での流木の運動機構、分散機構を明らかにし、偏走角、流木群の存在位置を評価可能にする必要がある。

4. 結 論

ここでは、流木群が堤内地の市街地家屋間で堰止まる機構を、一次元水路内に家屋群を整列配置した場に流木群を供給した水理実験により検討し、ついで、二次元的拡がりのある堤内地内での流木群の流動、堰止めに関する水理実験を行ない、現象を支配する諸要因を抽出して、現象を再現し得るシミュレーション方法の手がかりを得ることを目的に研究を行なった。得られた主要な結果および問題点を挙げて結論とする。

(1) 1次元水路を用いた実験から最終的な流木堰止め率 α_{em} は、場の条件として流木長比 η を導入すると $0 \leq \eta < 0.3$ の範囲ではほぼゼロとなり、 $0.6 \leq \eta \leq 0.8$ では水理量とは無関係に平均的に 0.95 程度となるが、 $0.3 \leq \eta \leq 0.5$ の範囲では水理量によって変化することが分かった。

(2) α_{em} の変化は、種々の無次元量によって支配されていることが次元解析により判明したが、それらの内、 η と偏走角の大きさを規定すると思われる単位幅流量および見かけの流木長を大きくする要因となる平均流木フラックス C_m が支配的であると考え、 α_{em} の評価式を提示した。

(3) 実験結果から堰止め流木本数の時間変化は、時間とともに直線的に増大することがある程度認められたので、 α_{em} をもとに、時間に関して直線近似の堰止め率の時間変化式を示した。

(4) これと実験値とを比較した結果、ほぼ実験値が再現できることが判明したが、堰止められた流木群が破壊されて堰止め率が低下することや、ある時間に一旦流木が堰止められるとそれ以後急激に堰止め率が増大することなど、決定論的な取り扱いではうまく説明できない要因がこの種の現象では存在するので、確率過程論的な解析も検討する必要がある。

(5) 2次元氾濫場における流木群の堰止め機構については、1次元水路出口近傍の流線が氾濫水の横方向への広がりにより曲がり、それによって流木が家屋模型前面に対し大きな偏走角をもって流入するために堰止まりやすくなることがわかった。

(6) 1次元での流木の堰止め率を2次元場へ拡張し、2次元場での流木群の堆積範囲、規模を予測するには、1次元水路実験で家屋群が流心とある角度をなしている場合の堰止め率を検討し、ここで求めた堰止め率を修正し、精練するとともに、2次元場での流木の運動機構、分散機構を明らかにし、偏走角、流木群の存在位置が評価可能なモデルを構築する必要がある。

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) 研究代表者 高橋 保、課題番号 02201121）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，1961，61 p.
- 3) 足立昭平・大同淳之：流木に関する実験的研究，京大防災研年報，第1号，1957，pp.41-49.
- 4) 水原邦夫：流木に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1978.
- 5) 水山高久・石川芳治・矢島重美：透過型砂防ダムによる流木捕捉効果，土木技術資料，第30巻，11号，1988，pp.623-628.