

## 山間河道における流木の挙動に関する実験的考察

藤田裕一郎・黒川 悦彦

### EXPERIMENTAL CONSIDERATIONS ON BEHAVIORS OF DRIFTWOOD IN MOUNTAINOUS RIVER CHANNELS

By Yuichiro FUJITA and Yoshihiko KUROKAWA

#### Synopsis

Driftwood amplifies flood damage and makes restorations difficult, by heaping up in front of river structures and by remaining on farmlands and urban areas. Two kinds of fundamental experiments were carried on to elucidate transport process of driftwood in mountainous rivers. One of them was conducted to simulate supplying process of driftwood from riverside and to clarify its effects on stream channel changes. Driftwood models with a simple form had little influence on channel widening and bedforms when they were being conveyed downstream. Their effects on channel change became intense when a flow of large discharge concentrated them to heap up around a bed level retainer of iron angle installed at the downstream end. In another experiment, two types of driftwood models, which were devised to be more similar to actual one, were injected into a small depth flow over a rough bed covered with bed protection block models. The models traveled downstream sliding and rolling on the rough bed and stopped when they were sustained simultaneously by both a sidewall and bed roughness elements.

#### 1. 緒 言

中小河川の河道災害は、山間部において負荷される大量の流木のために被害の拡大することが知られている<sup>1)~3)</sup>。すなわち、流木は、河岸侵食、支溪流の土石流、山腹斜面の表層すべりなどによって、直接・間接に山間河道に供給され、そこを一種のフィルタとして中・下流部へ流送される。その間に、河岸や構造物に損傷を与え、河道を堰止めて溢水氾濫を引き起こす。ついで、農地や市街地に氾濫堆積して家屋を倒壊し、残存して災害の復旧を著しく困難にする<sup>4)</sup>。

著者ら<sup>3), 5)~7)</sup>は、こうした流木による洪水災害を防止軽減することを目的として、山間河道における流木の挙動を明らかにするために実験的な基礎研究を進めている。本年度も引き続き、傾斜部と水平部とを持つ移動床の洪水・土砂氾濫河道実験装置<sup>3)</sup>を用いて、流木が兩岸から急勾配の山間河道に取り込まれていき、緩勾配区間に達して氾濫する場合を対象として基礎実験を行い、その特徴を検討して河道災害に及ぼす影響を考察した。つぎに、河道の流木流送能力について考察するために、形状の異なった2種の流木模型を作成し、ホロースケアブロックによる粗面路床水路において流送実験を行い、河道中における流木の挙動について検討した。本文では、それらの結果について報告する。

## 2. 側岸侵食性流路における流木の挙動に関する基礎実験

### 2.1 実験の概要

#### (1) 実験装置

実験には、Fig. 1 に示した、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所河川災害総合基礎実験施設内に設置された洪水・土砂氾濫河道実験装置を用いた。装置の概要は既報<sup>5)</sup>の通りであって、今回の実験でも、上流傾斜水路区間では、水路部中央の中心線に沿った幅 1.19m、長さ 7m の部分を高さ 20cm の仕切壁で仕切り、外側を通路として使用したが、さらに、Fig. 1 のように、下流水平氾濫部にも水路部側壁の外側に沿わせて C 型鋼で高さ 0.2m の側壁を設け、その上に水路部のレールと同じ高さになるようにレールを

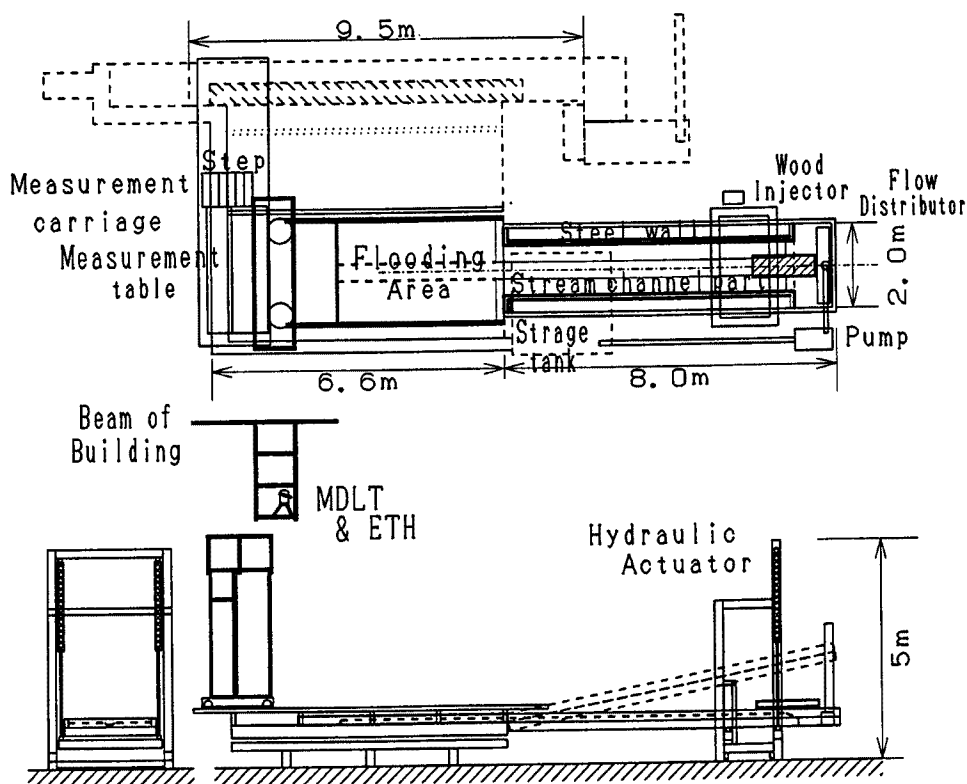


Fig. 1. Experimental apparatus.

敷設した。これらのレールを連続的に走行させるために、砂面敷均し及び水位測定用の手押し台車には、Photo. 1 に示したように、車輪を二重に取り付けている。このようにして、水路部に勾配を設定した場合でも、手押し台車が水路部—氾濫部間を通して側壁上を滑らかに走行できるようにした。台車に取り付けた所定断面形状の整型板でこれらの仕切壁と側壁の中に敷いた実験砂を敷均し、連続した側岸侵食性流路を整型するようにした。

なお、この装置の座標系は、水平面内に水路部下流端を  $x = 0\text{m}$  として上流方向に  $x$  軸を、水路部中心線を  $y = 0\text{m}$  として右岸方向に  $y$  軸を、 $x = 0\text{m}$ ,  $y = 0\text{m}$  における水路床を  $z = 0\text{m}$  として鉛直方向に  $z$  軸をとった直交座標系であって、実験砂は既実験と同様に  $x = 7\text{m}$  から  $x = -4\text{m}$  の区間に厚さ 10cm で敷き、下流端には通水時に路床高が変化しないように、Run K1, K2 では 5cm 角、それ以外では 3cm 角の鋼製アングルによる砂止め堰を設けた。一方、水路上流端の整流用貯水部上方には、側壁間に鋼製アング

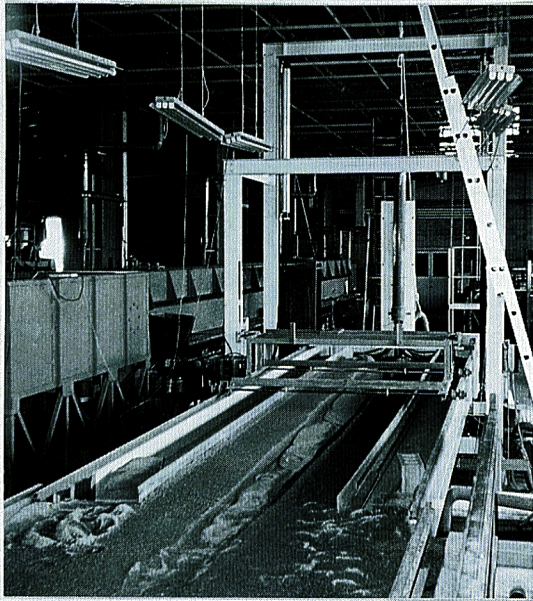


Photo. 1. A measurement carriage with coupled wheels.

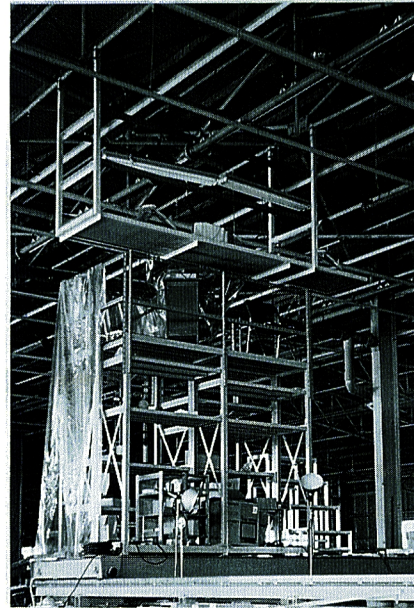


Photo. 2. A measurement table attached to the building beams.

ルを横断方向に渡し、小型ベルトコンベアを設置して、 $x = 6.8 \text{ m}$  の位置から流木模型を水路に投入して上流からの給木状況を模擬できるようにした。

また、計測作業台を設けていた既設電動台車を下流に固定するとともに、既実験で指摘されていた作業中の測器の振動や台車のたわみによる測定精度の低下を避けるために、**Photo. 2** のように計測台を上方の建屋の梁に直接懸け、その上に河床の測定のための光学式3次元河床測定システムの検知部である、モータドライブ・レーザセオドライト及び電子セオドライトを設置した。さらに、作業台の下部と計測台上にはそれぞれ1台の実験経過記録用 VTR カメラを据え、同時に撮影間隔をタイマで制御した2台のモータドライブカメラをそれぞれ水路部と氾濫部の約  $5 \text{ m}$  上方に固定して、流路の変化と流木の挙動を把握した。それらにタイマの実験時刻が写し込まれるように大型 LED を組込んだ実験時間表示装置を作成して  $x = 0.5 \text{ m}$  左岸に置いた。

## (2) 実験条件

本実験でも、既報<sup>5)</sup>と同じ平均粒径  $d_m = 1.42 \text{ mm}$  の急速濾過砂を用い、氾濫部の勾配も 0 に固定したが、水路部勾配は  $1/200$ ,  $1/100$ ,  $1/50$  の3種を設定した。流路横断形状は、**Table. 1** に示したように、底面幅  $0.10 \text{ m}$ 、開口幅  $0.23 \text{ m}$ 、深さ  $0.065 \text{ m}$ 、及び、底面幅  $0.15 \text{ m}$ 、開口幅  $0.23 \text{ m}$ 、深さ  $0.04 \text{ m}$  の2種の台形である。

流木模型として、 $0.2 \text{ m}$  長、 $12 \text{ mm}\phi$  のポリプロピレン棒（比重約  $0.92$ ）を約500本用意し、既実験と同様に、通水に先立って両側河岸上に左右とも横には間を開けないで5列、縦には  $5 \text{ cm}$  ずつ間を開けて26列配列し、側岸侵食とともに水路内に供給されるようにした。一方、水路上流端のベルトコンベアからは流木模型を10本ずつ一定間隔で投入するようにした。投入速度を実験の進行状況に応じて変化させたので、**Table. 1** のように1, 2回目の通水で給木速度が異なった実験もある。また、2回目の通水時には下流端に堆積した流木模型を回収して給木したので、1回目よりも本数が  $100 \sim 150$  本増している。

所期の断面形状、水深および上流部勾配に対して、予め対数則に基づいて計算しておいた実験条件表から流量を選定し、既実験<sup>5)</sup>における給水ポンプ制御のインバータ周波数と供給流量との関係を参考にして周波数を設定した。同時に、実験条件表で予測された側岸侵食速度に基づいて通水時間を見積り、それに応じて写真撮影間隔、給木時間、水位測定時刻等を設定した。また、1回目の通水によって側岸侵食が進み、側岸

Table 1. Prescribed experimental conditions of driftwood transport in laterally erodible channels

| Run No.  | Channel slopes |                  | Initial trapezoidal Shape |                 |                | Discharge<br>l/s | Flow duration |          |
|----------|----------------|------------------|---------------------------|-----------------|----------------|------------------|---------------|----------|
|          | Upstream reach | Downstream reach | Opening width cm          | Bottom width cm | Bank height cm |                  | min           | sec      |
| Run K1*  | 1/200          | horizontal       | 23                        | 10              | 6.5            | 2.89<br>3.32     | 12<br>24      | 00<br>00 |
| Run K2*  | 1/200          | horizontal       | 23                        | 10              | 6.5            | 5.96<br>5.88     | 6<br>14       | 30<br>00 |
| Run K3*  | 1/100          | horizontal       | 23                        | 10              | 6.5            | 3.13<br>3.04     | 7<br>15       | 00<br>00 |
| Run K4*  | 1/100          | horizontal       | 23                        | 15              | 4.0            | 3.34             | 7             | 00       |
| Run K5*  | 1/50           | horizontal       | 23                        | 15              | 4.0            | 2.93             | 6             | 00       |
| Run B1** | 1/200          | horizontal       | 35                        | 23              | 6.0            | 4.56             | 17            | 00       |
| Run B2** | 1/200          | horizontal       | 35                        | 23              | 6.0            | 2.52             | 20            | 00       |
| Run B3** | 1/200          | horizontal       | 35                        | 23              | 6.0            | 4.05             | 12            | 00       |

Remarks: \* Driftwood models were injected from the upstream end.

Driftwood models were 12 mm- $\phi$ , 200 mm long polypropylene resin sticks.

\*\* Experiments were conducted in the last year.

Driftwood models were 5 mm- $\phi$ , 200 mm long acrylic resin sticks.

上の流木模型がほとんど無くなった場合には2回目の通水は行わなかった。

以上の設定条件をまとめて Table. 1 に示しているが、比較のために既実験の条件も Run B として示している。同表のように、Run K 1, K 2 では、流木模型を変え、流路幅を狭くした効果を知るために、水路部の勾配と側岸高を既実験とほとんど等しくしたが、Run K 2 では、Run K 1 よりも掃流力を上昇させて側岸からの流木模型供給量を増すように水深を大きくし、かつ、氾濫部の水平路床区間での溢水を図るために流量を増加している。一方、Run K 3 では、同じ断面に対して、水路部勾配を 1/100 に上げて掃流力の増加を図り、流量は Run K 1 とほぼ同じにした。Run K 4 では、水路部勾配は 1/100 に保ったが、流木供給が側岸侵食に及ぼす影響がより明確となるように側岸の高さを 4 cm に下げ、Run K 1, K 3 と同程度の流量を与えた。さらに、Run K 5 では、Run K 4 と同断面、同程度の流量に対して水路部勾配のみを 1/50 とした。

### (3) 実験方法

初めに、水路幅が 2 m と広いので、レーザレベルを用いて  $y$  軸方向に傾斜しないように、注意を払いながら油圧アクチュエータを操作して水路勾配を設定し、勾配を変更した場合には、既述の光学式 3 次元河床計測システムによる測定基準点となる  $x = 2, 4, 6$  m 断面の左右側壁の高さをそれぞれ測定した。なお、スライド支承を取付けているビームの H 鋼をボルトで支柱に緊結して水路勾配を固定しようとしたとき、1/100 以上の勾配では H 鋼の断面が歪んで正しく設定できないことが判明したので、ビーム下部に直接ライナを挿入して所定勾配を設定した。その後 H 鋼のウェッブを補強したので、この歪は現在でほとんど無視できる。

ついで、初期形状の砂面の敷均しを行った。すなわち、中央に所定形状の整形型を取り付けた手押し台車で、水路部、続いて氾濫部に台形断面の流路を整形したが、両区間では敷均し幅が異なるため整形できなかった接合部の両脇部及び上流端流入部は手で敷均した。流路初期形状は、光学式 3 次元河床計測システムと計測制御プログラム<sup>5)</sup>によって、水路部、氾濫部とともに 0.5 m 間隔で計測した。横断方向には、 $x = 6.5 \sim -0.5$  m 区間は  $y = -0.3$  m  $\sim$  0.3 m の 0.6 m 幅、 $x = -0.5 \sim -3.5$  m 区間は  $y = -0.6$  m  $\sim$  0.6 m の 1.2 m 幅の範囲である。

初期形状測定後、流木模型を既述のように両側岸上に設置するとともに、投入用の流木模型を速度調節し



たベルトコンベア上に横断方向に 10 本ずつ 7 組並べ、残りも 10 本ごとにまとめて用意しておいた。

続いて、既報<sup>5)</sup>と同様の手順で実験を開始する。まず、カメラのタイマの撮影間隔をセットするとともに VTR を録画状態にし、周波数と供給流量の関係に基づいて、周波数を設定しておいたインバータのスイッチを入れて上流端整流槽にポンプ給水を始める。供給流量は、送水パイプ吐出口の位置や低水槽の水位などによって変化するの、通水の都度整流槽の水位上昇速度から検定した。

水路部の  $x = 6\text{ m}$  に水流先端の厚い部分が達した時点を実験開始時刻として、実験時間表示装置及びモータドライブカメラと連動するタイマをスタートさせた。流水先端が氾濫部下流端に達し、背水がほぼ落ち着いたと見られる時点から、手押し台車に取り付けたポイントゲージを用いて初期水位測定を上流側から 1.0 m 間隔で  $x = 6.0\text{ m} \sim 3.5\text{ m}$  の範囲で行った。測定が氾濫部の中間に達した時点でベルトコンベアから給木を開始し、給木された流木模型が流下し終われば、再び水位を下流側から上流に向かって同様に測定した。その間、通水時間の長さに併せて写真撮影間隔をタイマで調節し、1 通水を 1 本のフィルムに収めるようにした。水位測定後、ほぼ最初に予定していた時刻にインバータを止めて停水し、しばらくしてカメラ制御のタイマのスイッチを切り、流路からある程度水が引いた後に VTR を停止した。

完全に水が引いた後、下流端の砂止め堰付近に貯まった流木模型を河床を乱さないように取り除いた後、河床形状を再び計測する。続いて、2 回目の通水も同様に行ったが、予めタイマには 1 回目のインバータ停止時刻をプリセットしておき、第 2 通水時の流れの先端が  $x = 6\text{ m}$  を通過する時点で実験の時刻が連続するようにした。また、水路部や氾濫部側岸上の流木模型は第 1 回終了時のままにしておき、回収した全ての流木模型を 1 回目と同様にベルトコンベアから投入したが、その本数は前項で述べたように側岸侵食によって流下した分だけ増加している。

ポイントゲージによる水位の測定値は、 $x = 1.5\text{ m}$ ,  $3.0\text{ m}$ ,  $4.0\text{ m}$  の両側岸において同じポイントゲージを使用して 3 点ずつ測定した水平部の高さの平均値を、光学式 3 次元河床計測システムで測定した同位置の高さの平均値と比較して後者の座標に換算した。

## 2.2 実験の結果

### (1) 実験の経過

Run K1 の第 1 及び第 2 通水時の状況をそれぞれ **Photo. 3** の上、下に示している。写真から判るように、側岸上に配置した流木模型のうち河道に取り込まれたものは少なく、この条件下では顕著な側岸侵食は生じていない。したがって、流下した流木模型は、ほとんどがベルトコンベアから投入されたものであり、それらは、**Photo. 3** のように、流下方向に対して様々な角度を取りながらも、全て河道に堆積することなく浮流して下流端まで進み、そこで砂止め堰に引っかかって溜まった。しかしながら、このジャム化した流木模型の塊が流れに及した堰止め効果はそれほど強くなく、氾濫部の水平路床区間でも溢水しなかった。このように、平面写真には流木による直接的な河道侵食への影響はほとんど認められない。

Run K2 の条件下では、**Photo. 4** (上：第 1 通水時及び下：第 2 通水時) のように、側岸がより侵食されており、側岸上からもかなりの数の流木模型が取り込まれ、ベルトコンベアから供給量を加えると相当数の流木模型が流路を流下した。しかし、流下中には Run K1 よりも流下方向に対する角度の小さい流木模型が増えていて、ここでも河道に引っかかって堆積するものはなかった。しかしながら、**Photo. 4** に見られるように、砂止め堰付近に流木ジャムを形成した流木模型は、多くが軸を水路と直角に近い方向にし全体的に空隙を小さくするようにして高密度に集積されていた。この密な流木ジャムの影響のために、その直上流にかけて流路が大きく拡がり、水平路床の中央区間では側岸上に流木模型もかなり氾濫して残存した。一方、このように流路が拡大したために、第 2 通水時に供給された流木模型は砂止め堰で滞留することなく流出した。

Run K3 では、条件設定で意図したように、水路区間では水深が浅く、流速が速い実験となった。水深が小さいために側岸斜面に接触する流木模型が多くなり、第 1 通水時の **Photo. 5** 上および第 2 通水時の同下

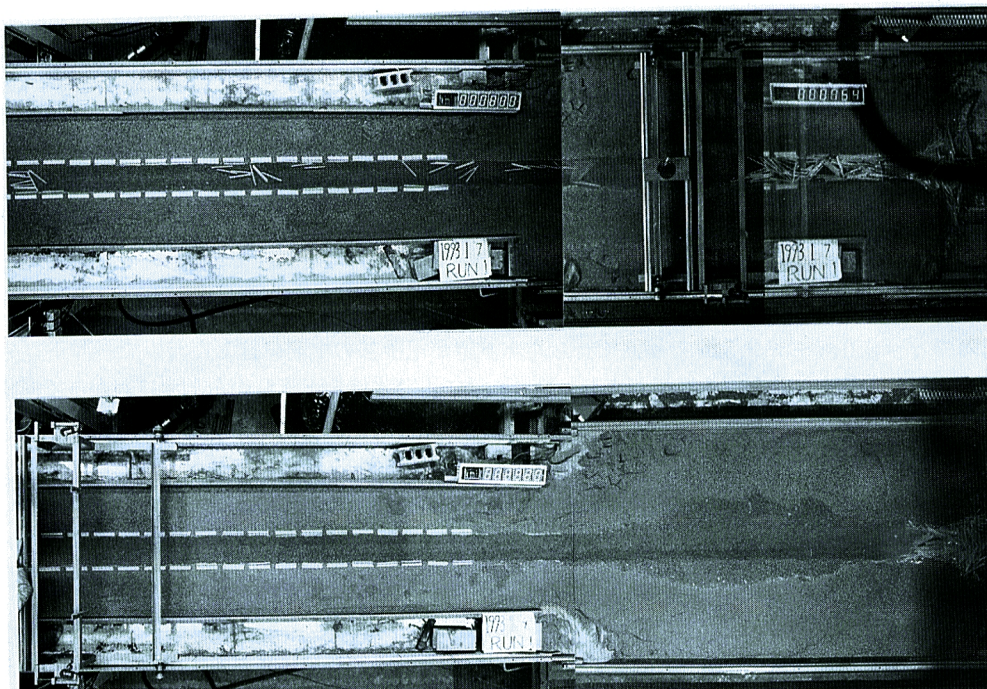


Photo. 3. Plan views of modeled driftwood transported during the first period (top) and during the second period (bottom) in run K1. (Flows are left to right through Photo. 3 to 7.)

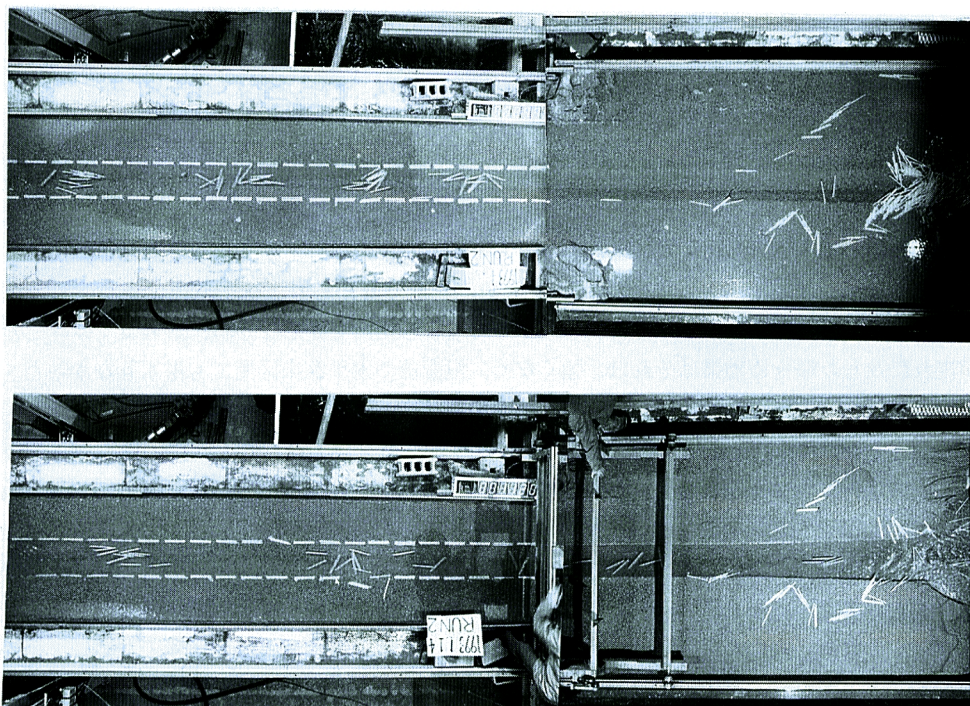


Photo. 4. Plan views of modeled driftwood transported during the first period (top) and during the second period (bottom) in run K2.



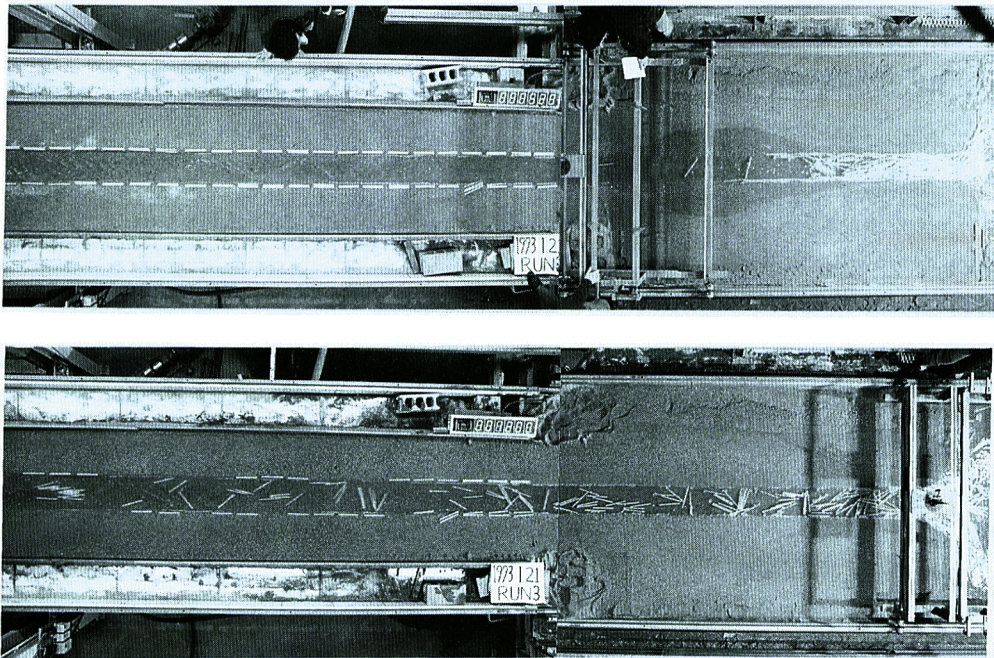


Photo. 5. Plan views of modeled driftwood transported during the first period (top) and during the second period (bottom) in run K3.

のように、流木模型の向きはかなり乱れて流下したが、ここでも全ての流木模型が下流端まで流れていった。砂止め堰付近では、ジャム化による流水阻害によってその上流区間の流速が低下し、そこに順次流木模型が滞留していったが、水流が氾濫しなかったために側岸上に乗り上げる流木模型はなかった。なお、**Photo. 5** 下のように上流区間の路床には、Run K 1, K 2 では認められなかった交互砂州が形成されていた。

Run K 4 では、前述のように、Run K 3 までの実験では流送中の流木模型が流路変化にほとんど影響しなかったもので、流路の規模を小さくするために初期断面の深さを 4 cm とした。このため拡幅速度が上昇し、第 1 通水のみで側岸侵食がかなり進んで、**Photo. 6** のように、側岸上の流木模型はほとんど残らなかったもので、第 2 通水は行わなかった。しかしながら、流路に取り込まれた流木模型はやはり下流端まで一気に流送され、側岸侵食に対する影響はほとんど認められなかった。また、流木模型の流送密度が上がったために、砂止め堰上流での流木ジャムはかなり早く発達し、 $x = -2$  m 付近までの区間が流木模型で埋め尽くされた。そのため流路から水が著しく溢れて氾濫水が左右の側壁までに達し、**Photo. 6** のように、本実験で最大本数の流木模型が側岸上に堆積した。また、水流の蛇行や交互砂州の発達もかなり明確であった。

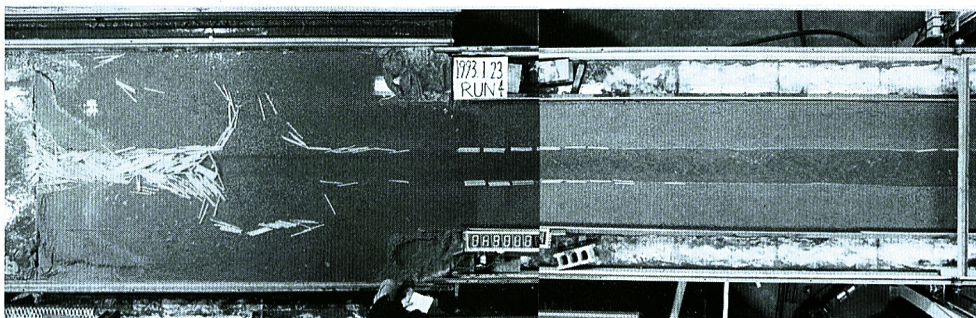


Photo. 6. A plan view of modeled driftwood transported in run K4.



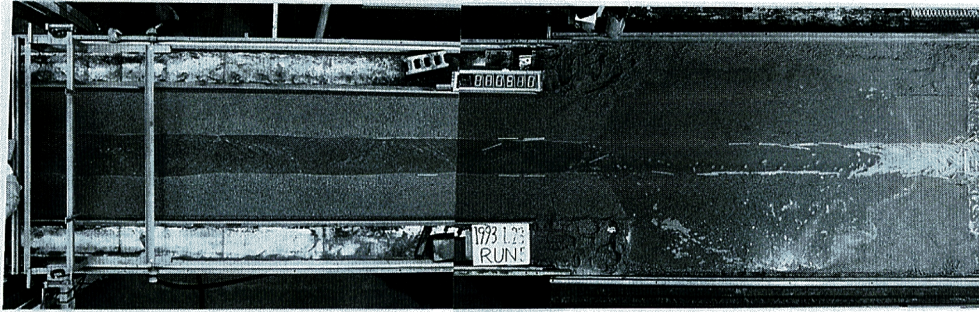


Photo. 7. A plan view of modeled driftwood transported in run K5.

さらに勾配を上げて 1/50 とした Run K5 では、増加した流速によって、**Photo. 7** に示されているように、6 分間の通水で側岸上に配置した流木模型が無くなる位に側岸が侵食されるとともに、流路内の流木模型は、どのような向きのものでも一気に下流端に達し、かなりの流木模型が砂止め堰を乗り越えて流されていった。このように、砂止め堰を越流して流出した流木模型が多かったため、**Photo. 7** のように流木ジャムは Run K1～K4 よりも発達しなかった。一方、上流の勾配区間における水流の蛇行や砂州の発達は大実験中で最も顕著であって、路床変動にも浮流した流木はほとんど影響しないことが分かる。

## (2) 流路の変化と水理量

流路変動に対する流木の流送と滞留の影響を検討するために、各 Run について、初期及び停水時に測定した流路横断形状の変化を示し、ついでそれらの横断形状測定と時間的に近い水位計測値を組合わせて求めた断面平均水理量の特徴を述べる。

断面平均水理諸量のうち、まず、水位以下の断面積の台形積分値及び 2 測点間距離を累加した潤辺から断面諸量を求め、供給流量を用いて流速、速度水頭等を算定した。ついで、その断面を挟む上下流の断面から全エネルギー勾配を評価して河床の掃流力や流水抵抗諸量を求めた。水位が側岸の高さを越えていた溢水状態については、路床の最深点から両側に向かって断面積を求めていき、当初は測点上の水深が最初に平均粒径の 4 倍以下になった地点までを流水断面積とすることを考えていた。しかし、側岸上の越流水深が 1 cm を上回るような場合もあったので、左右の側岸上それぞれについて、最高点との高低差が最初に平均粒径の 2 倍以下になる地点までの断面積を流水断面積と見なすこととした。

**Fig. 2** の上下には、このようにして算定した断面平均水理量の流下方向変化を Run K2、及び K4 について例示している。**Fig. 2** から判るように、水理諸量は全体にかなりばらつき、かつ、実験の設定条件を反映して上流水路部の勾配区間と下流氾濫部の水平区間では傾向が大きく異なっている。そこで、上流水路部と下流氾濫部のそれぞれの区間について平均して、実験の水理条件と見なした。その結果を **Table. 2** に一括表示している。

初めに、Run K1 では、初期形状測定に間違ったプログラムを使用し、かつ、測定に不慣れであったために、断面形状の変化を把握し難い面があったが、小流量と緩勾配を反映して、**Fig. 3** のように、上流の水路区間でも変化は側岸の崩落程度と小さく、下流の氾濫部の区間では砂止め堰付近を除いてほとんど生じていなかった。砂止め堰付近では、約 1 m 区間が末広がりのようになっていて、流木の滞留によって流路が拡大したものと判断される。**Fig. 3** に示されているように、初期の水面形は上流側ではほぼ河床に平行な等流に近い状態を示し、一方、下流区間はほぼ水平となっていて、高い目に設定した砂止め堰による堰上げ背水が明らかである。水深の変化も、レールの継ぎ目に当たって誤差の生じ易い  $x = 0$  m 付近を除いて、初期はほぼ一定であった。その後、下流端から進行した流木模型の滞留によって、下流区間では 2 cm 近く水位が上昇し、平均流速の低下とともに掃流力は実験砂の移動限界以下まで減少した。

このように、Run K1 程度の流量であれば、堰によって水位がかなり上昇していると、流木が滞留しても

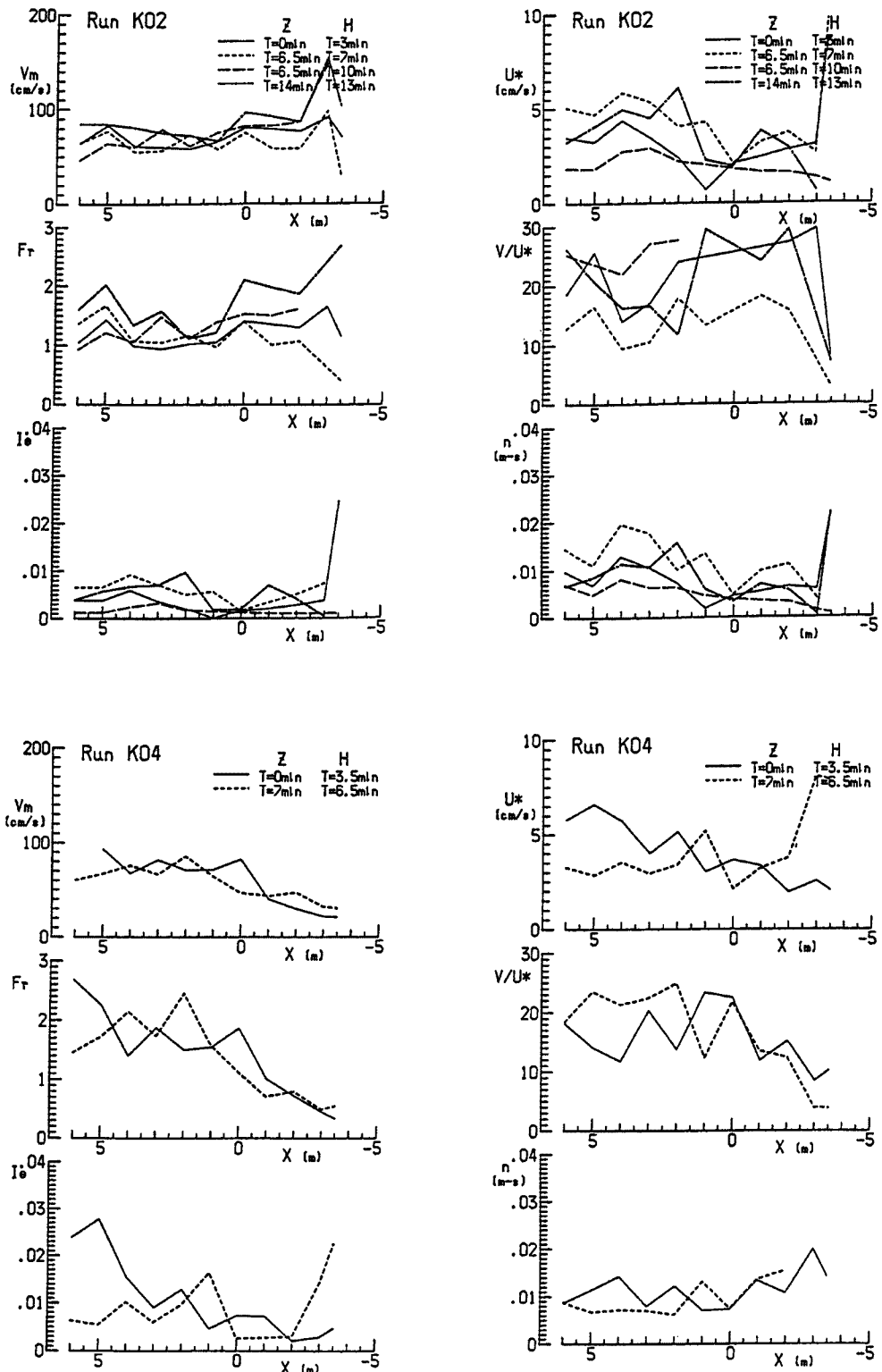


Fig. 2. Changes in hydraulic quantities calculated in run K2 (top) and in run K4 (bottom).



Table 2. Hydraulic quantities in laterally erodible channels in driftwood transport experiments

| Run No.<br>& bed<br>measurement | Reach<br>of<br>average<br>(m) | Mean<br>flow<br>depth<br>(cm) | Water<br>surface<br>width<br>(cm) | Cross<br>sectional<br>area<br>(cm <sup>2</sup> ) | Mean<br>flow<br>velocity<br>(cm/s) | Froude<br>number | Mean<br>energy<br>slope<br>( $\times 10^3$ ) | Shear<br>velocity<br>(cm/s) | Manning's<br>roughness<br>coefficient |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Run K1-1                        | 6.0 - 0.0                     | 3.31                          | 24.26                             | 80.43                                            | 36.99                              | 0.66             | 2.36                                         | 2.50                        | 0.0128                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.14                          | 24.10                             | 75.88                                            | 39.13                              | 0.72             | 1.96                                         | 2.27                        | 0.0109                                |
| K1-2                            | 6.0 - 0.0                     | 3.13                          | 27.07                             | 84.25                                            | 40.13                              | 0.73             | 3.17                                         | 2.85                        | 0.0377                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.04                          | 25.86                             | 78.54                                            | 42.63                              | 0.79             | 1.33                                         | 1.79                        | 0.0075                                |
| Run K2-0                        | 6.0 - 0.0                     | 3.75                          | 23.85                             | 89.33                                            | 67.93                              | 1.13             | 2.98                                         | 2.84                        | 0.0077                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.48                          | 21.45                             | 74.84                                            | 80.19                              | 1.38             | 6.97                                         | 3.84                        | 0.0089                                |
| K2-1                            | 6.0 - 0.0                     | 2.97                          | 32.21                             | 92.22                                            | 65.81                              | 1.24             | 6.00                                         | 4.49                        | 0.0130                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.65                          | 48.61                             | 108.79                                           | 64.20                              | 1.65             | 5.30                                         | 3.32                        | 0.0159                                |
| K2-2                            | 6.0 - 0.0                     | 2.88                          | 28.18                             | 76.07                                            | 80.03                              | 1.57             | 5.29                                         | 3.81                        | 0.0089                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 1.85                          | 32.61                             | 58.83                                            | 106.53                             | 2.65             | 3.86                                         | 2.59                        | 0.0077                                |
| Run K3-0                        | 6.0 - 0.0                     | 2.44                          | 17.57                             | 42.91                                            | 73.82                              | 1.52             | 9.94                                         | 4.43                        | 0.0103                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.28                          | 20.35                             | 67.57                                            | 49.26                              | 0.90             | 5.14                                         | 3.53                        | 0.0130                                |
| K3-1                            | 6.0 - 0.0                     | 1.90                          | 27.41                             | 51.67                                            | 69.40                              | 1.80             | 10.05                                        | 3.69                        | 0.0098                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.12                          | 40.90                             | 104.11                                           | 31.91                              | 0.58             | 4.96                                         | 3.13                        | 0.0183                                |
| K3-2                            | 6.0 - 0.0                     | 1.67                          | 33.65                             | 57.12                                            | 58.85                              | 1.53             | 7.63                                         | 3.34                        | 0.0105                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 2.51                          | 49.93                             | 120.84                                           | 27.84                              | 0.57             | 4.24                                         | 2.97                        | 0.0216                                |
| Run K4-0                        | 6.0 - 0.0                     | 2.01                          | 20.76                             | 41.76                                            | 81.75                              | 1.88             | 14.55                                        | 4.86                        | 0.0098                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 2.34                          | 48.38                             | 109.46                                           | 39.04                              | 0.88             | 5.01                                         | 2.72                        | 0.0131                                |
| K4-1                            | 6.0 - 0.0                     | 1.55                          | 33.38                             | 51.71                                            | 66.61                              | 1.74             | 8.21                                         | 3.35                        | 0.0081                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.31                          | 27.98                             | 86.67                                            | 39.94                              | 0.73             | 9.17                                         | 5.04                        | 0.0262                                |
| Run K5-0                        | 6.0 - 0.0                     | 1.85                          | 20.79                             | 38.50                                            | 78.95                              | 1.91             | 18.90                                        | 5.53                        | 0.0121                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 2.28                          | 22.27                             | 51.48                                            | 63.82                              | 1.47             | 8.31                                         | 3.39                        | 0.0101                                |
| Run K5-1                        | 6.0 - 0.0                     | 1.05                          | 36.34                             | 38.32                                            | 78.43                              | 2.48             | 18.19                                        | 4.14                        | 0.0081                                |
|                                 | 0.0 - - 3.5                   | 3.44                          | 24.86                             | 76.68                                            | 46.88                              | 1.07             | 7.76                                         | 4.50                        | 0.0231                                |

河道の損傷は軽微である。

Run K2 では、流量の増加が流路変動に大きく影響しており、Fig. 4 のように、Run K1 と比較して、かなりの側岸侵食と底面上の堆積が、第 1 通水後には上流区間で、第 2 通水後には下流区間で起きている。しかしながら、 $x = 1.0 \sim 3.0$  m 区間では、流路の変化とくに路床の変動が小さくなっているため、第 2 通水時の下流区間の変化は上流側の河床変動が伝播したものではなく、別の原因に因っていると判断される。すなわち、下流端付近では、Run K1 と同様に流路が拡大しているが、その影響は  $x = -1.5$  m 付近まで及んでおり、とくに、 $x = -2.5 \sim -3.5$  m の区間では、第 2 通水時に著しく拡幅し、路床も上昇して下流区間の変化は下流端から伝わってきたといえる。既に述べたように、Run K2 では、流木模型のジャム化による水位上昇が著しく、下流区間で広く溢水したことや、砂止め堰が Run K3 以降よりも約 2 cm 高く設定されていたことが影響して、側岸から侵食された砂が下流端から流出せずに付近に堆積し、側岸侵食を容易にするとともに、下流端で水流を横方向に広がり易くしていたと考えられる。これらは Run K2 でとくに顕著に見られた特徴であって、下流端の近くにまとまって滞留した流木模型の多くが軸を流路と直交に近い方向にしたこととも関係していると思われる。

水理条件は流量の増加を反映して、水位が初期から Run K1 よりも高くなり、下流区間ではほぼ流路満

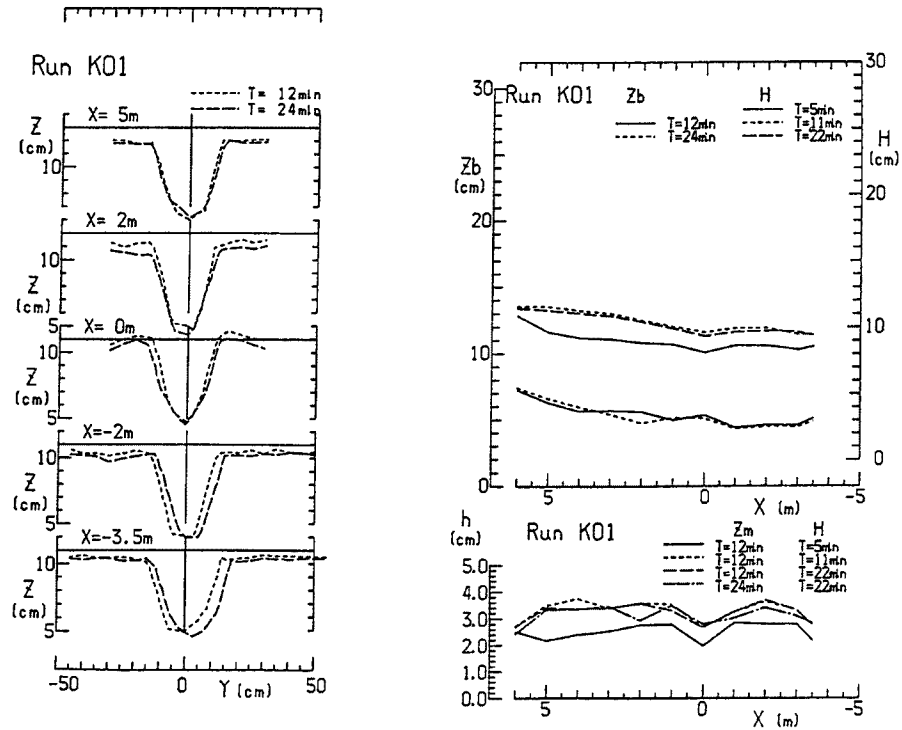


Fig. 3. Changes in cross sectional shapes and longitudinal profiles of the stream channel in run K1.

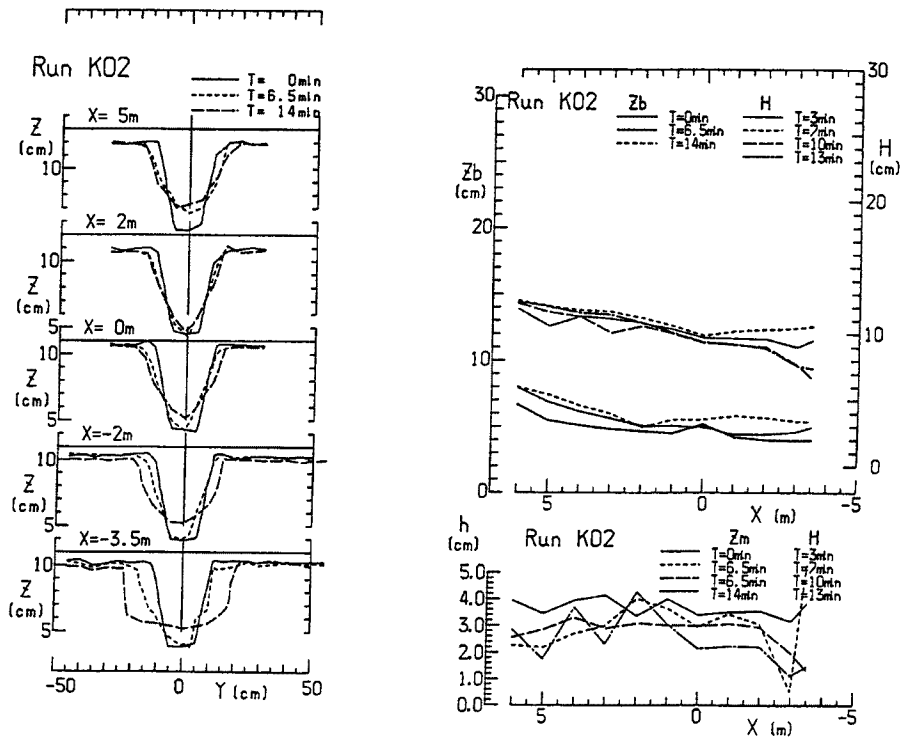


Fig. 4. Changes in cross sectional shapes and longitudinal profiles of the stream channel in run K2.

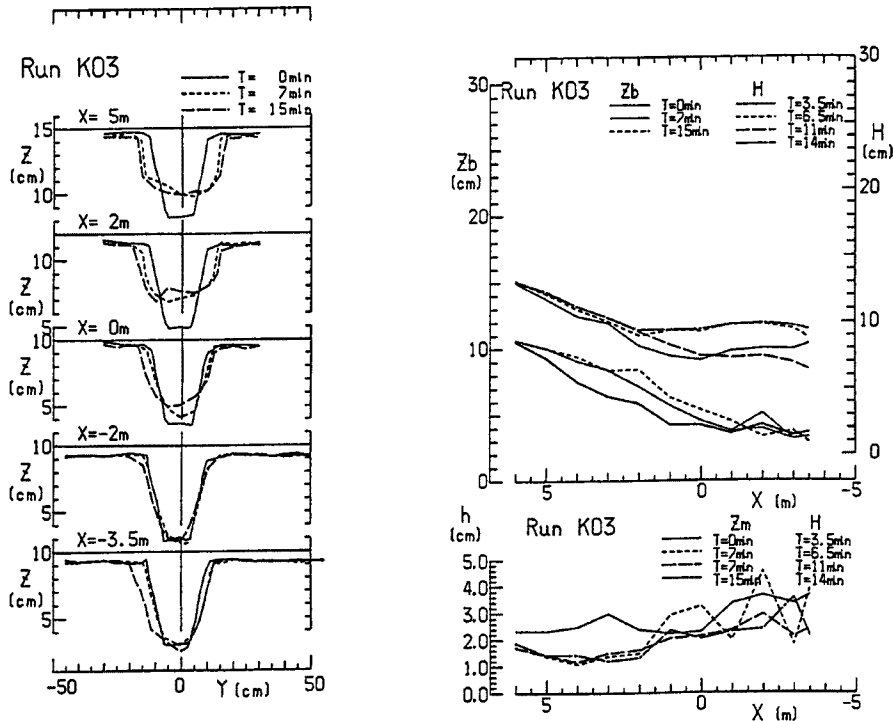


Fig. 5. Changes in cross sectional shapes and longitudinal profiles of the stream channel in run K3.

杯状態であって、流速も高くなっている。このため、流木模型の滞留によって数 mm の水深で側岸上を越流し、平均流速は一時的に低下したが、下流区間の掃流力は第2通水時の初期を除いて高い値を保持しており、流路が著しく拡大したことと一致している。

Run K3 では、Run K2 よりも勾配を大きく流量を小さくした結果、Fig. 5 のように、水路部での側岸侵食量と底面の堆積量とがともにかなり大きくなり、一方、水平氾濫部における流路変化は小さくなって、ジャム化が見られた砂止め堰の上流でも Run K1 と同程度の流路変化しか生じていない。また、 $x = -1 \sim -3.5$  m の区間では、砂州の発生に対応した路床形状の非対称性がみられ、 $x$  方向への流砂移動がかなり活発であったことを示しているけれども、側岸侵食への影響は認められない。

水路部のエネルギー勾配の平均値は、勾配急変点付近の河床が上昇した最終時点を除いて、水路勾配の  $1/100$  に近い値を保っているため、この区間の掃流力は漸減しながらも比較的高い値を維持していた。これによって上流区間では上述のような活発な流路変動が生じ、パラメータの評価から拡幅の結果、流路は交互砂州の形成条件を満足するようになったことが判り、観察結果と一致する。一方、下流区間では初期の掃流力は比較的高かったが、第2通水時には移動限界近くまで低下しており、断面形状の変化の小さかったことに符号する。Run K3 では Run K1 や K2 よりも砂止め堰を低くしたが、流木模型は Run K1 と同じようにかなり上流まで長い区間に滞留しており、掃流力が低くて側岸侵食のような流路変動が生じにくければ、河道に及ぼす流木の影響も小さいようである。

Run K4 でも、路床勾配のある上流区間で側岸侵食が進み、Fig. 6 から判るように流路幅は側岸高の減少のために Run K3 よりもかなり大きくなっている。この区間では、 $y$  方向への流砂の移動も活発であって、交互砂州の発生が Fig. 6 の横断面図でもはっきりと認められるが、通水時間や流路長が短いためにやはり側岸侵食への影響は明らかではない。一方、 $x = 0 \sim -3.0$  m の区間では、 $x = -2.0 \sim -3.0$  m 区間で側岸の水面付近だけがジャム化して堆積した流木模型の直接的な影響のために、わずかに侵食された点を



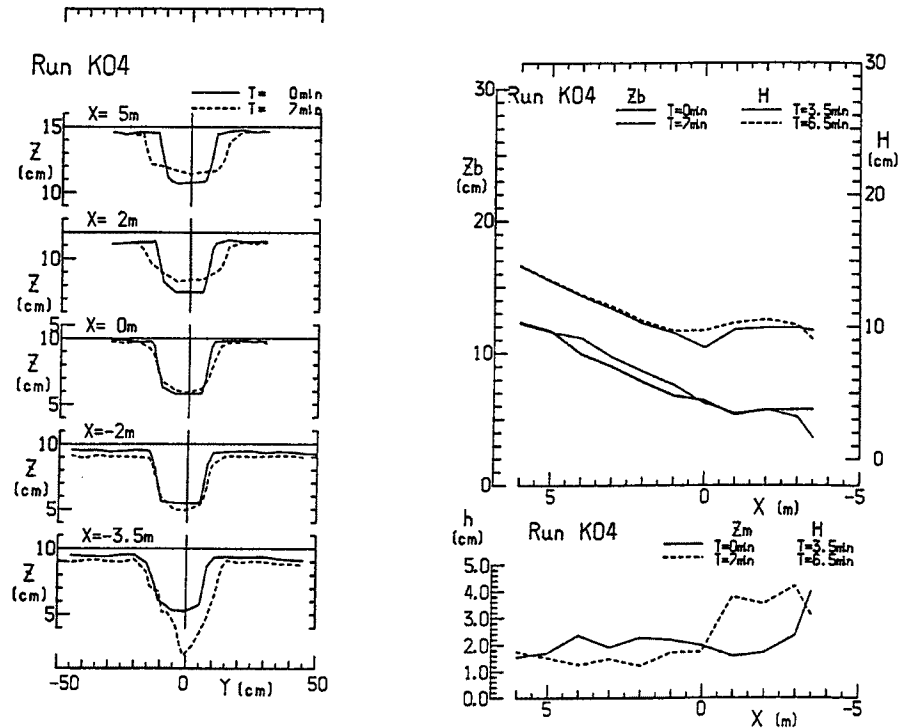


Fig. 6. Changes in cross sectional shapes and longitudinal profiles of the stream channel in run K4.

除いて、流路がほとんど変化しておらず、 $x = -2.0$  m 付近まで進んだ流木模型のジャム化が水平部での流速や掃流力低下のみをもたらしたことを示している。しかし、 $x = -3.5$  m では、流路が拡大したばかりではなく水路底面が深くえぐられている。これは、砂に埋もれた流木模型を河床測定前に取り除いた跡であって、このような流木の堆積は河床の洗掘を引き起こすことが判る。

**Table. 2** の上流区間のエネルギー勾配は、初期形状を組合わせたために最上流部の流水断面積が小さくなり、速度水頭が大きく算定されて、水路勾配よりもかなり急になっている。そのため見かけ上掃流力が Run K3 よりもやや増加しているが、Run K4 全体では Run K3 と類似の水理条件となっている。しかし、河道全体の断面積が約 30 % 減少しているために、水位測定結果からは下流区間は水流だけで満杯に近く、わずかな流木模型の滞留によっても容易に越流すると判断される。実際、この Run K4 では流木模型のジャム化によって 1 cm 以上の溢流氾濫が生じており、下流中央区間の流速は非常に低下し、掃流力も移動限界を大きく下回っていて、流路に変化のなかったことと一致している。

Run K5 では、Fig. 7 に示されているように、水路区間に 1/50 の最急勾配を設定したことによって、上流区間での拡幅と交互砂州の発達が顕著となる一方、流木模型のジャム化が流れを堰上げて流速が低下した氾濫部では、 $x = -0.5$  m より下流には砂州が伝播しておらず河床も変動していない。さらに、 $x = -1$  m よりも下流では、Run K4 と同様の流木模型の堆積の直接的影響による側岸上部の侵食、及び  $x = -3.5$  m の流路拡大以外には側岸も侵食されておらず流路はほとんど変化しなかった。

上流区間のエネルギー勾配は水路勾配の 1/50 よりも数 % 低いだけであって、初期に生じた極めて高い掃流力によって、流路は急激に拡幅され、水深は初期の半分程度まで減少して掃流力も低下していった。また、 $x = 0$  m の勾配急変点付近には 1.5 cm にも及ぶ河床上昇が測定されている。一方、下流区間でもエネルギー勾配は 1/100 程度の値を示していて、掃流力もかなり高い値となっている。この区間では、下流端の砂止め堰や流木の滞留によって水位が堰き上げられて水深が減少しないので、エネルギー勾配を負としないように算定区間を上下流に広げていった評価方法のために、掃流力の値は低下していない。しかし、実際

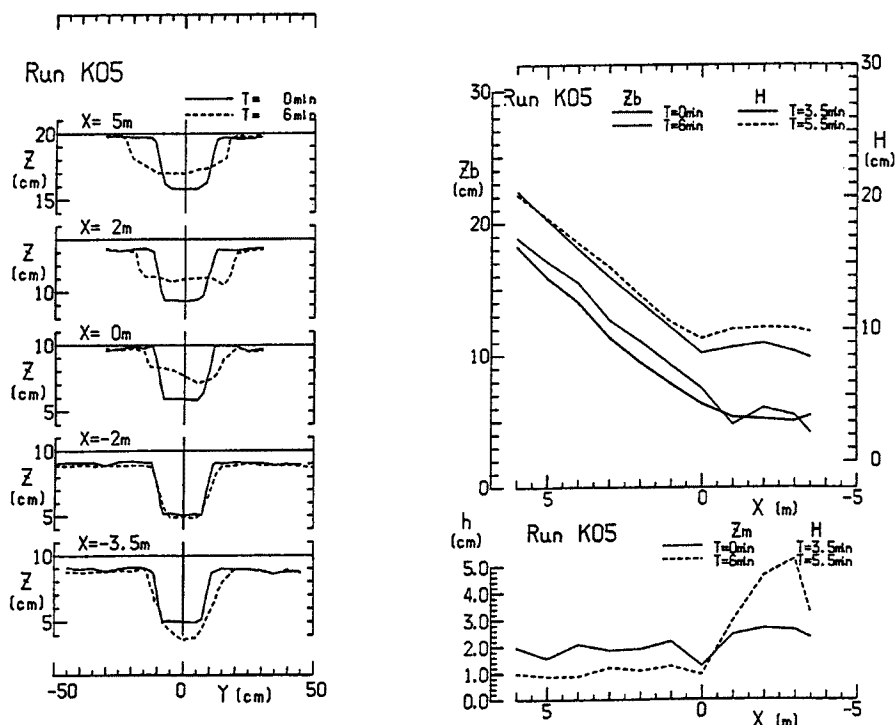


Fig. 7. Changes in cross sectional shapes and longitudinal profiles of the stream channel in run K5.

には、この下流部中央の2m区間では、Run K4と同様に1cmを越える氾濫が生起しており、平均流速は20 cm/s以下に減少しており、全エネルギー水頭の流下方向変化はほとんど0となっている。これは、上記のように下流端の近傍を除いて大きな流路変化が起きていないことと対応している。

### 2.3 実験結果の考察

以上のように、2.では、上流からの流木流速や側岸からの流木供給が側岸侵食に与える影響を把握することを目的として実験を行ったが、全てのRunにおいて、流木模型は上流端からベルトコンベアから投入された後、その地点に堆積することなく、また、側岸から流水に取り込まれた場合でもそこに留まることなく速やかに流送されていった。このように、比重が1以下で、流路幅が流木模型長を越え、水深も模型幅よりかなり大きい条件では、流送中の流木模型は流路の側岸と接触しても側岸に引っかかることなく、路床勾配のある水路部から水平路床の氾濫部までスムーズに流れていき、流木の堆積は砂止め堰に引っかかったことによるもの以外は起こらなかった。したがって、流送中の流木模型の側岸との接触による側岸砂の移動への影響は少なかったと考えられる。しかし、つぎに3.で述べるような側壁近傍における流木模型の停止状況を考えると、水流の水深が小さい場合には、流木は河床と側面に接触することで容易に運動を停止すると思われる、このときには周囲の水流が乱されて側岸に何らかの影響を現れるものと推測される。同時に、その影響は底面にも及び、河床は洗掘されて流木模型に働く浮力や流体力が増加すると、流木は再び流下していくと思われる。

また、観察された砂止め堰による流木模型の滞留の状態は、実験結果によると、流路勾配が緩くて堰き上げ水深が大きく流量が小さい場合には、上流方向へ延びるように貯まっていき、流木模型は軸を流れに対して小さい角度にして流路を埋めていく。このような滞留形態をとった場合には、流木模型は付近での流速を低下させるのみで、流路の形状は側面上部を除きほぼ維持される。一方、Run K2のように流量の大きい場合には、緩勾配区間でも流木模型はかなり激しく流送され、様々に乱れた方向を向いて堆積していく。その

結果、水位は一時著しく堰上げられ、その後流木塊の側方が侵食されて、流速はむしろ上昇するようになり、周辺の流路は侵食されて大きく拡大される。この Run K2 の下流端周辺のように、予め流木の長さに対して流路幅が2倍以上に拡大されていると、新たに流送されてきた流木模型はそこで停止せずに流出した。これからも、流木が停止するためには、底面と側面の両方から同時に接触力を受けることが必要であることが判る。

また、流木の滞留形態の違いは、既に述べたように、本実験では主として供給流量の大きさによる流れの掃流力と砂止め堰の高さによる堰上げ条件の相違によるものと考えられ、流量が大きいと流木の集積密度が高くなり、水流をより阻害するようになって、流路変動に大きな影響を与える。しかしながら、どの程度影響するかといった定量的な面の詳細については今後の検討が必要である。

### 3. 粗面路床水路における流木の挙動に関する実験

#### 3.1 実験の概要

##### (1) 実験装置

実験には既報<sup>5)</sup>と同じ京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所本館一階に設置された幅 40 cm、全長 1500 cm、高さ 30 cm の可変勾配水路<sup>8)</sup>を用いたが、今回は左側壁をガラス張りに改造し、上流 5 m の区間の底面に、護床工模型として用いられてきた Fig. 8 に示すような四隅にイボ型突起のあるホロースケアブロック模型（アルミニウム製、1/40 模型）<sup>9)</sup>を横断方向に7列を敷設して行った。ホロースケアブロック模型の空隙には、2.の実験と同じ平均粒径  $d_m = 1.42 \text{ mm}$  のほぼ一様な砂を Fig. 8 のように突起イボ要素の付け根の高さ（底面高さ）まで均一に詰め、ニスで固めて浸透流を小さくするようにした。このイボ型突起の背後に堆積していた砂もニスで固めており、また、5 m よりも下流の区間においてイボ型突起の底面高さまで均一に敷き詰められていた同一の砂も、通水によって局所洗掘を受けた状態でニスで固められている。

水路の座標系は、水路部上流端を  $x = 0 \text{ m}$  として下流方向に  $x$  軸を、水路横断方向に  $y$  軸を右から左にとり、イボ型突起の底面を  $z = 0 \text{ m}$  として上方に  $z$  軸をとっている。

水路の  $x = 0 \text{ m}$  付近の側壁上に 2.の実験で使った流木模型投入用のベルトコンベアを設置し、一方、実験の記録用に VTR カメラとモータドライブカメラを、 $x = 3 \text{ m}$  付近の側方及び  $x = 6 \text{ m}$  上方の建屋の梁の2箇所それぞれ一台ずつ設置し、2.の実験と同様に、モータドライブカメラの制御と実験時間計時用のタイマと時刻を写し込むための大型 LED 表示器を用いた。

##### (2) 実験方法

初めに、水路勾配を下流端の帰還水路上に置いたレーザーレベルでモニタして設定値に合わせ、ついで、水路下流端の三角堰で検定しながらバルブで調節して所定の流量を給水する。また、ベルトコンベアの手動調節つまみの目盛りと実際の速度との関係を予め調べておき、流木模型を設定条件に応じてベルトコンベア上に縦向きまたは横向きに並べ、ベルトコンベアの手動調節つまみを設定して給木の準備を完了しておく。一方、実験を記録するモータドライブカメラと VTR カメラの撮影準備を済ませ、タイマと表示器を所定の位置に置いて電源を投入しておく。それらの完了後、水路の流れが定常状態になっているのを確認し、VTR カメラを撮り始め、次にベルトコンベアとタイマのスタートスイッチを同時に入れ、実験と写真撮影を開始する。実験開始後は、モータドライブカメラの撮影間隔を流木模型の流送状況に応じて変化させ、流木模型が実験区間から流出してしまうか、停止状態になるまでの状況を記録できるようにする。

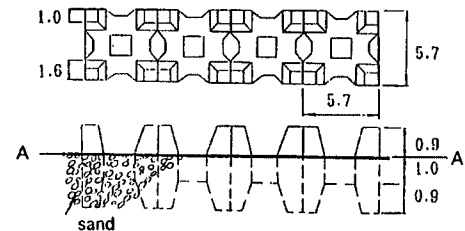


Fig. 8. Sketches of hollow squared block models used (unit: cm).



さらに、実験の水利条件を把握するために、 $x = 1.0 \sim 5.0$  m 区間の 0.5 m 間隔の 8 断面において、定常状態の水位を  $y = 5, 20, 35$  cm の 3 箇所および河床高としてホロスケアブロック模型のイボ型突起の底面高を 7 箇所をポイントゲージによって測定した。これらの値を各断面ごとに平均し、イボ型突起の投影面積を除いて断面平均水量を算定した。ついで、 $x = 0.5 \sim 4.5$  m 区間における表面浮子の通過時間をストップウォッチによって手動計測して表面流速を求めた。

### (3) 実験条件

実験は、それぞれ 4.75 l/s および 1/100 の一定流量及び一定勾配の条件で、下記の 2 種の流木模型の流送状況を把握するために行った。このとき、上述の方法で測定した表面流速の平均値は 0.61 m/s であり、断面平均水量は **Table. 3** に示した最大・最小値の範囲にあった。

Table 3. Hydraulic conditions of driftwood transport experiments on a rough bed covered with modeled blocks

| Extent of values | Mean depth (cm) | Cross sectional area (cm <sup>2</sup> ) | Mean flow velocity (cm/s) | Froude number | Mean energy slope | Shear velocity (cm/s) | Manning's roughness coefficient |
|------------------|-----------------|-----------------------------------------|---------------------------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------|
| minimum          | 2.94            | 100.6                                   | 39.2                      | 0.68          | 0.010             | 5.35                  | 0.016                           |
| maximum          | 3.43            | 120.0                                   | 46.7                      | 0.87          |                   | 6.64                  | 0.025                           |

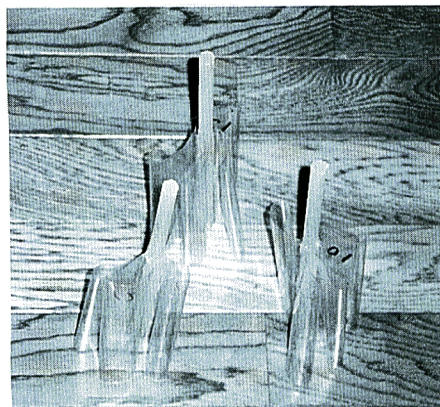


Photo. 8. Driftwood models of Type G (left) and Type W (right) used in transport experiments on a rough bed. Driftwood models of type G were made with three pine branch models of polyethylene resin and those of type W with polypropylene resin stick and a patch of polyvinyl chloride sheet.

流木模型は、**Photo. 8** の左右にそれぞれ示したような、ポリプロピレン棒に塩化ビニールシートを張り付けた W 型 及び平たい装飾用の松の模型を 3 本組み合わせた G 型の、ともに枝条を有する実際の流木形状により近くなるように工夫した模型をそれぞれ 16 本ずつ用意して用いた。それらの大きさと質量は次のようになっている。

W 型模型の長さ：平均 20.03 cm, 標準偏差 0.108 cm  
 一方の対角幅：平均 10.51 cm, 標準偏差 0.132 cm  
 他方の対角幅：平均 10.10 cm, 標準偏差 0.166 cm  
 質量：平均 33.84 g, 標準偏差 0.400 g  
 G 型模型の縦長：平均 10.47 cm, 標準偏差 0.16 cm

横長：平均 7.10 cm, 標準偏差 0.58 cm

質量：平均 7.67 g, 標準偏差 0.263 g

これから判るように、実験条件の平均水深はいずれの流木模型の幅よりも小さく、1/2 から 1/3 である。

この流れに対して、G 型（実験記号 G で表現）及び W 型（同記号 W）のそれぞれの模型をベルトコンベア上に縦に、すなわち流木模型の軸（幹に相当）が流れと平行となるように並べた場合（実験記号末尾の T で表現）、及び、横に、すなわち軸が流れに直交し、かつ樹木の枝条に当たる部分が互い違いになるように模型の上下を交互に並べた場合（同記号 Y）の 2 つに対して、流路への投入速度を 3 段階（実験記号中の数字 1, 2, 4 が 1 秒当たりの投入本数を表現）変化させた、合計 6 種類の条件を設定して行った。Table. 4 にはこれらを組み合わせた実験条件をまとめて示している。

### 3.2 実験結果

#### (1) 流木模型 G 型 の場合

Run G 1-Y では、上記の実験記号の

説明や Table. 4 に示したように、15 本の流木模型 G 型 を横向きに一列に並べ、供給時間を 15 秒、すなわち、約 1 本/s の割合となるようにベルトコンベア速度を調節した。

投入された流木模型は、水路に入るとすぐに幹が流れ方向に対して平行になるように向きを変え、次の流木模型が投入される前にかかなりの距離を流送されたので、投入地点での堆積は起こらなかった。水流によって流木模型は枝条のある方をやや下流側に向け、河床上を幹を回転軸として転がるように流送されていったが、その流送速度は最も速いものでも約 0.2 m/s であって、平均流速の 1/3 程度であった。転動しながら流下している流木模型がホロスケアブロックの突起に引っかかったり、側壁に接触して運動が妨げられるとその流下が一旦止まり、その流木模型の周辺に他の流木模型が数本堆積していく状況も観察された。河床のホロスケアブロックだけに引っかかったものは全て再び流れ出したが、側壁に接触したものの多くは、Photo. 9 のように滞留したままであった。

Run G 1-T では、15 本の流木模型を縦向きに一列並べ、Run G 1-Y と同じ給木速度で投下した。流木模型は水路に入ると、Photo. 9 のように Run G 1-Y の場合よりも素早く加速されるようであって、このケースでも投入地点での堆積は起こらなかった。流送中の流木模型の運動や堆積の状況は Run G 1-Y の場合とほぼ同様であって、このような給木密度では投入方向の影響は認められず、最終的にはやはり側壁付近に停止したもののだけ滞留した。

Run G 2-Y では、流木模型を横向き一列に並べ、ベルト速度を Run G 1 の 2 倍にして約 2 本/s の投入速度にした。最初に投入された流木模型は、Run G 1 と同じように流れたが、それ以降の流木模型は、十分に加速される前に上流側に投入された流木模型によって流れが遮られたり、あるいは、新たに投入された流木模型に上から直接押さえられたために流送されず、Photo. 10(a) のようにほとんどが投入地点に堆積した。

流木模型を縦向き一列に並べた Run G 2-T では、Run G 2-Y と同様に流木模型の大部分が投入地点で堆積した。しかし、堆積した流木模型の中の最上部の一本をわずかにずらすと、堆積の塊は徐々に崩壊し、流

Table 4. Prescribed experimental conditions of driftwood transport on a rough bed covered with modeled blocks

| Run No. | Driftwood model | Injecting rates (number/sec) | Direction and row number of models on conveyer |   |
|---------|-----------------|------------------------------|------------------------------------------------|---|
| Run G1Y | Type G          | 1                            | Transverse                                     | 1 |
| Run G1Y | Type G          | 1                            | Longitudinal                                   | 1 |
| Run G2Y | Type G          | 2                            | Transverse                                     | 1 |
| Run G2T | Type G          | 2                            | Longitudinal                                   | 1 |
| Run G4Y | Type G          | 4                            | Transverse                                     | 2 |
| Run G4T | Type G          | 4                            | Longitudinal                                   | 2 |
| Run W1Y | Type W          | 1                            | Transverse                                     | 1 |
| Run W1T | Type W          | 1                            | Longitudinal                                   | 1 |
| Run W2Y | Type W          | 2                            | Transverse                                     | 2 |
| Run W2T | Type W          | 2                            | Longitudinal                                   | 2 |
| Run W4Y | Type W          | 4                            | Transverse                                     | 4 |
| Run W4T | Type W          | 4                            | Longitudinal                                   | 4 |



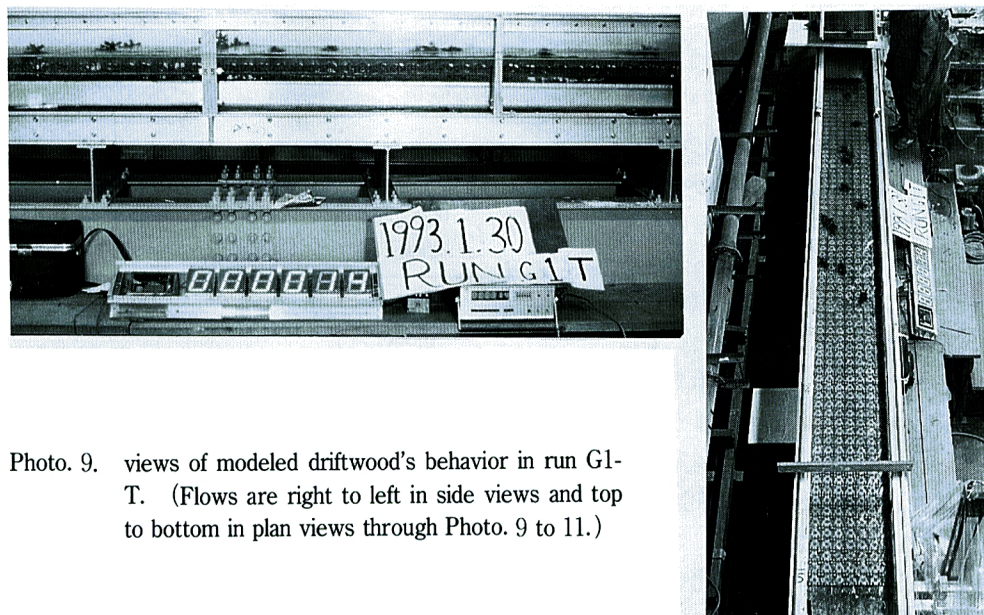
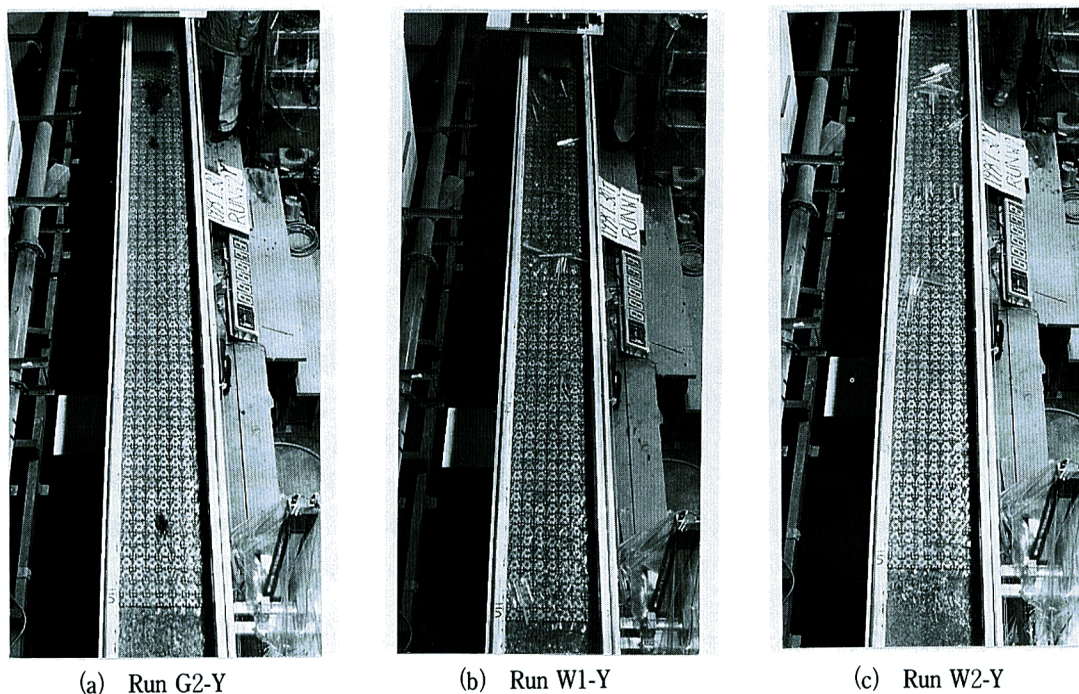


Photo. 9. views of modeled driftwood's behavior in run G1-T. (Flows are right to left in side views and top to bottom in plan views through Photo. 9 to 11.)



(a) Run G2-Y

(b) Run W1-Y

(c) Run W2-Y

Photo. 10. Plan views of modeled driftwood's behaviors.

木模型は順次流下していった。

Run G 4-Y では、流木模型を 2 列に並べ、Run G 2 と同じベルト速度にして、投入速度を Run G 1 の 4 倍とした。ここでは、水路に投入された流木模型は、投入地点で 2 列それぞれに堆積したが、しばらくすると片方の堆積塊だけが崩壊し、流木模型は流送されていき、もう一方は最後までそのままであった。しかし、縦 2 列に並べて実験を行った Run G 4-T では、Run G 4-Y と同じ投入速度にもかかわらず、流木模型は、投入地点では堆積せず、Run 1 と類似の挙動を示しながら、流下していった。



## (2) 流木模型 W の場合

Run W 1-T では、16 本の流木模型を塩化ビニール側を下流方向に向けてベルトコンベア上に 2 列に配置し、設定投入時間を約 16 秒として平均投入速度を 1 本/s とした。流木模型は、ベルトコンベア上から投入されると転倒し、枝条を模した塩化ビニールの側を上流側に向けて水路内に落下する。流水中では、塩化ビニール側を下流に向けようとして水平面内を緩やかに回転しながら流送されていく。このような回転運動の途中で流木模型の一部が側壁に接触するとその動きが止まり、そこに上流から流下してきた流木模型が引っかかっていき、**Photo. 10(b)** のように 2, 3 本から数本が塊となって残存した。

Run W 1-Y では、流木模型を互い違いに横向きにして、塩化ビニール部がベルトコンベアの中心付近となるように並べ、上と同様にして 1 本/s の供給速度とした。流木模型は、水路に投入されると、しばらくは流れの力を受けて Run W 1-T よりもスムーズに加速され、同時に緩やかに回転しながら流下していったが、これも側壁との接触・衝突によって動きが止まると、Run W 1-T と同様の堆積が起こった。

Run W 2-T と Run W 2-Y は、それぞれ Run W 1-T, Run W 1-Y と同じ並べかたでベルト速度を 2 倍にして実験を行ったが、どちらの場合も投入された流木模型は、流れによって加速され流下し始める前に、投下されてきた次の流木模型によって上から押さえられ、このため、多くの流木模型が **Photo. 10(c)** のように投入地点で堆積した。

Run W 4-T では、投入速度を 4 本/s とするために、流木模型を縦向きに 4 列並べ、4 本同時に Run W 2 と同じベルト速度で 4 回落下させた。4 本の流木模型は、最後の 1 回を除いて、投入直後から相互に作用を及ぼし合い、滞留しそうになりながら少しずつ別れていって流送された。しかし、最後に投入された 4 本は投入地点にそのまま堆積した。

Run W 4-Y では、Run W 2-Y よりも流木模型の間隔をつめて並べ、4 秒間で 16 本投入されるようにした。投入された流木は相互に干渉しながら少しずつ流送され、**Photo. 11** のように、一旦  $x = 2.5$  m 付近の水路中央部に滞留しそうになったが、この流木塊のために上流側の水流が堰上げられていくと、しばらくして再び流れ始めた。しかしながら、その途中で側壁に接触して停止・滞留するいくつかの流木模型も観察された。

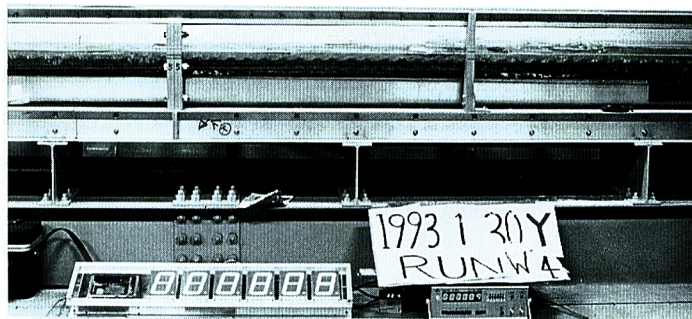


Photo. 11. A side view of modeled driftwood's behavior in run W4-Y.

### 3.3 実験結果の考察

本章で行った流木模型流送実験では、水路底面がホロースケアブロック模型で覆われており、比重こそ 1 よりも小さいが、**Photo. 8** のような互いに引っかかり易い形状の流木模型を用い、かつ、水深も模型幅の  $1/3 \sim 1/2$  と浅かったのにもかかわらず、障害物が存在しない直線水路という条件下では、一度流送され始めた流木模型は停止・滞留し難かった。それが滞留・堆積するのは、その一部が側壁と接触して運動が阻害されるか、その上・下流に何らかの流れを阻害するもの(例えば、上・下流における急激な土砂や流木の



堆積)が生じて、流木模型に働く流れのエネルギーや力が小さくなるが必要とされていた。これより、本実験の条件では、流下中の流木模型は底面の突起から受ける力だけでは停止せず、その移動を停止させるには、さらに、側壁接触による支持力のような何等かの力を同時に受けなければならないことが判る。また、流木模型が流れに入った直後に堆積、すなわち、水流で加速される前に堆積した場合は、次に投下された流木模型が、直前の流木模型を直接上から押さえるか、上流の流れを遮って流送能力を減少させたときであって、実際の河道でも、上流からの流木流送に対して側方からある密度以上の流木供給が発生すると堆積していく可能性が高まると思われる。

しかしながら、実験では最も流木密度の高い Run 4 W においても、路床粗度に接触して流送速度の低下した流木模型が相互に衝突し、塊となって速度を非常に低下させながら流下していったことが観測された。側壁との衝突よりもむしろこの場合のように、底面との接触によって流木の下流方向への運動が弱まって堆積しそうな場合には、水流の疎通を大きく妨げるため、上流側の水位が上昇し、流木塊に働く圧力が増加して流送が維持されると見られる。この場合でも、側壁との接触による抵抗力の影響は大きいと思われる、流木同士の相互作用だけで堆積がおこるのかどうかを判断するためには、滞留による流水の堰止めとそれによる流体圧の増加を的確に評価することが不可欠となる。

実際でも流木は通常比重が 1 より小さく、一方、流木が問題となる洪水時では、河道規模と流量に対応した水深や流速と流木形状との関係に依存して、底面との接触回数や接触力などの状況が異なってくる。大洪水の場合には、接触力は流送速度が高くなるので大きくなる場合もあるが、底面との接触回数はかなり減少すると考えられ、流送途中の流木の挙動に底面が直接的に与える影響は小さくなく、狭い河道では流木が主として影響を及ぼすのは河道側面となる。また、河道の直線部で流木の堆積が起こるためには、下流側に橋梁などの障害物が存在するか、流れに新たな下流方向速度を持たない流木が側方から山腹表面すべり等によってある量以上供給されるか、側面の不整と河床突起の 2 個所に同時に接触して支えられるかの、3 つの条件のうちの一つが存在する場合にはほぼ限られると思われる。

こうして、底面の粗度との接触によって流木が塊となって堆積し始めても、そのために疎通を妨げられた水流が、堆積当初のそれほど強くない流木塊の構造を破壊する程度に流体力を増加させることができれば、滞留していた流木は順次流されていって、堆積は生じないことになる。この限界を明らかにするためには、流木群の組み合わせを決定する流木の幾何形状と流木の流送密度、ひっきり易さを決定する河床・河岸の凹凸と水深・河幅の関係とともに、流体力が有効に働くような流木塊の滞留位置や流れへの投影面積を把握しておかなければならない。これまでの実験から、個々の流木模型が河床に接触しながら流送れる場合には、投影面積を小さくする方向に回転して流体力を受けないように挙動していくことが示されている。流木塊となる場合には、こうした個々の挙動が制限され、より流体力を受け易い状態になると考えられるが、今後、これらの定性的考察を定式化して一般的な結論が得られるようにしていきたいと思っている。

#### 4. 結 言

山間河道における流木の流送過程とそれが河道に及ぼす影響を明らかにするために、はじめに、勾配を有する水路部と水平路床の氾濫部とを持つ洪水・土砂氾濫河道実験装置に側岸侵食性流路を整型し、上流端及び側岸上から流木模型を供給して、流木流送を伴う河道変動に関する実験を行い、流路変動や水理諸量を測定して検討を加えた。ついで、ホロースケアブロック模型による粗度路床水路に、実際形状に近づけた 2 種の流木模型を流下させて、流木の挙動に関する実験を行い、それらの流送・堆積過程について簡単に考察した。以下に、結論として、得られた主な成果をまとめる。

- (1) 側岸侵食性流路における本実験のように、水面幅が流木模型長よりも広く、水深が流木模型直径よりも十分大きい条件では、流木流送は河岸侵食や路床底面の変化にほとんど影響しない。
- (2) 流木は、水平路床流路では傾斜流路に比べて水深が大きくなるのでかえって堆積し難く、そこで

止・滞留する場合は砂止め堰等の障害物の上流区間となっている場合か、あるいは溢水によって側岸まで運ばれた場合のみのものである。しかし、砂止め堰のような障害物があっても、流路が流木模型長の2倍程度以上の幅を有していると流木模型は容易に砂止め堰を通過して流出する。

(3) 水平路床流路における流木の滞留状態には、主として供給流量に応じて、個々の流木が流れに対して軸をほぼ平行にして整然と河道内を上流方向に埋め尽くしていくような形式と、軸の向きが乱れて河道からはみ出すように堆積する形式とがある。前者の滞留形式は小流量の場合に生じ、流量が増加すると後者の形式に方が移行していき、河岸侵食や河道変動に大きな影響をもたらすようになる。

(4) 流木模型は、一定の流量条件下では、ある密度以上で河道に供給されると、相互に干渉し合ってその地点で直ちに堆積するようになる。

(5) 一度流送され始めた流木が河道の直線部で滞留する場合には、障害となる構造物が流下方向にある場合のほか、主に、その一部が側岸に接触し、河床と河岸の2点以上で支えられる場合がある。さらに、流木の上流にそれに働く流れの作用を阻害するものが側方等から供給された場合にも可能性がある。また、河床や側岸に接触して停止しても、そこに上流からの流木がさらに堆積していくと、流体力が増加して再び全ての流木が流下を開始する場合がある。

以上のように、ここでは、山間河道における流木流送に関して、基礎的な実験結果の検討に留まり、定量的な考察を行うことができなかった。流下過程にある流木について、作用する種々の力の評価方法を定式化し、流送速度を定量的に予測するとともに、側岸や河床の突起に接触して停止する条件を明確にして、流木が側岸侵食や河床洗掘へ及ぼす影響を明らかにしていくことを、今後の課題としたい。

最後に、研究の遂行には防災研究所村本嘉雄教授をはじめ、河川災害研究部門の方々のご支援を戴き、また、実験には明石工業高等専門学校神田佳一講師、本学学生北井 徹君、及び文部省国費留学生 Md. Mun-sur Rahman 君に協力して戴いたことに感謝します。また、本研究には、平成4年度文部省科学研究費補助金重点領域研究(1)「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 保教授、課題番号04201126)から多大の補助を受けたことを記して、関係各位に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 足立昭平・大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第1号，1957，pp. 41-49.
- 2) 水原邦夫：流木に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1978，107p.
- 3) 藤田裕一郎：傾斜地域における河道災害について，京都大学防災研究所年報，第34号B-2，1991，pp. 301-317.
- 4) 藤田裕一郎・田中好秀・馬場健志：傾斜地域の河道における流木の挙動に関する実験，京都大学防災研究所年報，第35号B-2，1992，pp. 115-139.
- 5) 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，京都大学防災研究所年報，第34号B-2，1991，pp. 373-386.
- 6) 藤田裕一郎・村本嘉雄・田中好秀：傾斜地域の河道における流木の挙動に関する基礎的考察，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，第2部，(3)-14，1992，pp. 78-79.
- 7) 藤田裕一郎・村本嘉雄・田中好秀・馬場健志：傾斜地域の河道流木に関する実験的検討，第11回日本自然学会学術講演会要旨集，B6，1992，pp. 94-95.
- 8) 神田佳一・大坪 高・村本嘉雄・藤田裕一郎：開水路粗度急変部における浮遊砂の流送過程，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，1990，pp. 369-383.
- 9) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・金川 清・中村元郎：護床工下流部の局所洗掘，水工学論文集，第35巻，1991，pp. 501-506.