

傾斜地域の河道における流木の挙動に関する実験

藤田裕一郎・田中 好秀・馬場 健志

EXPERIMENTS ON BEHAVIORS OF DRIFT WOOD IN RIVER CHANNELS ON SLOPED AREAS

By *Yuichiro* FUJITA, *Yoshihide* TANAKA and *Takeshi* BABA

Synopsis

Flood hazard in sloped areas is amplified by a large amount of drift wood that is conveyed in rushed waters, being supplied by river bank erosion and surface failure of mountain side during heavy rainfall. Drift wood damages river bank and structures by collisions against them, causes flooding by piling-up in river channels, and remains over farmland and urban areas to make restoration be difficult. Transport capacity of drift wood in stream channels was studied in an experimental flume with a rough bed covered with semi spheres. Experiments were conducted by using two kinds of drift wood models, specific gravities of which are a little greater and less than unity. Simultaneously, influence of drift wood on stream bank erosion and its flooding process was investigated in a newly designed experimental apparatus. An optical measurement system for 3-dimensional variation of stream channels was accomplished along with a personal computer program for its control and measurement. Drift wood models having simple forms, such as thin log shapes, proved to affect hardly bank erosion process.

1. は し が き

傾斜地域の河道災害は、河岸周辺の侵食及び山腹斜面の崩壊や表層すべりによっ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¹⁾⁻³⁾。すなわち、こうした流木は、河岸及び河川構造物に衝突してダメージを与えると同時に、河道を堰止めて溢水氾濫を引き起こし、ついで、農地や市街地の氾濫域に堆積・残存して損害をもたらすだけでなく、災害の復旧を著しく困難にする。

ここでは、このような流木の挙動と河道災害との関連を明らかにするために、粗面路床水路および昨年設計・製作した洪水・土砂氾濫河道実験装置⁴⁾を用いて進めている基礎的な実験について報告する。

2. 粗面路床水路を用いた流木の挙動に関する実験

2.1 実験装置

実験に用いた水路は、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所に設置されている、内幅40cm×深さ30cmの長方形断面を持つ長さ15mの変勾配木製直線水路⁵⁾である。この水路の上流端からの距離 $x=3$ mまでは滑面路床であるが、その下流は、底面に直径約24mmのビー玉を最密に敷き並べた後、下半分の空隙を $x=7.5$ mよりも上流区間にはおが屑と酢酸ポリビニールエマルジョン（木工用ボンド）を、そ

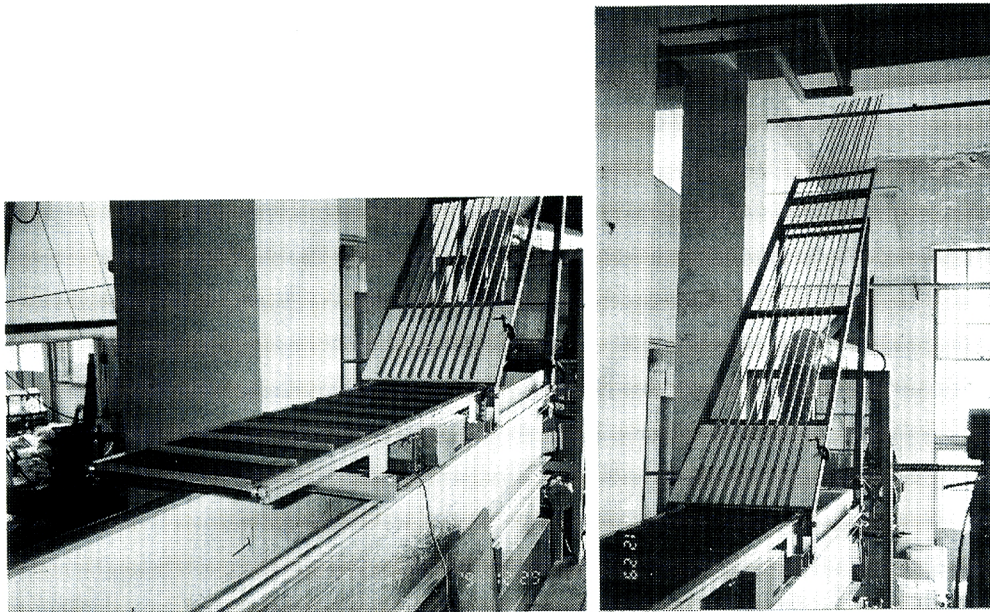


Photo 1. A drift wood model injector.

れよりも下流区間は石膏を充填した半球粗度路床である。

上流滑面区間の側壁上には、ベルトに 20 cm 間隔でヒレを貼り付けた薄型ミニベルトコンベアと 10 本の外径 12 mm ϕ 、厚さ 1 mm、4 m 長のステンレスパイプを組み合わせて作成した給木装置 (Photo. 1) を設置している。給木装置は、軸を流下方向に平行した長さ 20 cm の流木モデルを幅方向に 10 本、流れ方向に 31 本供給する能力を有しており、ミニコンベアのベルト速度を 0.13 ~ 0.54 m/s の範囲で制御して給木速度を調節できるようになっている。水路の側壁上のレールを走行するパソコン制御のアルミ製測定台車にサーボ式波高計 (ケネック製) を取り付け、これを流木の流下とともに移動させて、流木混入に伴う水位変化量を計測するようにした。

2.2 実験方法

実験に先立ち、光学レベルを用いて水路勾配を設定し、そこに粗度要素頂点上の水深が所定の値になるように流量をバルブ調節して与える。ここで、河道の不整を模擬する場合は 6 ~ 9 m 区間の両側壁に 15 mm の突起を 1 m 間隔で取り付けた。ついで、流木を供給しない基底実験の表面流速を浮子で、水位をサーボ式波高計によって測定した後、1 ~ 10 に目盛ってあるミニコンベアのベルト速度調節つまみを所定の目盛に合わせて給木量を設定し、下流端後方に設置した流下状況を録画する VTR カメラを作動させる。流木供給の開始と同時にタイマーのスイッチを入れて、水路上方に設置した流木の挙動記録用モータードライブカメラの平面写真撮影を開始する。

流木モデルが流れ方向に 15 列 (計 150 本: 給木量の半数) 供給された時点で測定台車を動かし始め、サーボ式波高計で流木存在区間のほぼ中央の水位変化を測定する。なお、表面流速は 0.30 ~ 0.65 m/s の範囲 (Table 1 参照) であったが、牽引装置の制約のため台車速度は 35 cm/s に固定し、測定区間を水路上流端から 3 ~ 10 m とした。測定データの出力電圧は、ペンレコーダで記録するとともに、測定のほぼ中央区間についてデータ数 600 個で AD 変換ボードを介して直接パソコンでサンプリングした。このサンプリング結果には、後出の図のように、波長 12 ~ 13 cm (周波数約 3 Hz) のリップルが全ての測定に認められたが、ペンレコーダの記録と比較した結果、それは水位計と AD 変換ボードを繋ぐ伝送ケーブルで拾われたノイズと判断し、考察ではこの変動を無視した。流木モデルの供給終了後、その堆積による堰

Table 1. Experimental conditions of drift wood conveyance

Run No.	Bed slope	Discharge (1/s)	Water Depth (cm)	Belt velocity (cm/s)	Wood supply duration (sec)	Water temperature (°C)	Drift wood model and remarks
1-0	1/100	1.5	1.00-1.35	0	0	8.0	Polypropylene resin stick
1-2				0.13	39.0-41.0		
1-4				0.27	17.5-18.0		
1-10				0.54	9.0		
3-0	1/100	1.1	1.02-0.92	0	0	9.5	Polypropylene resin stick
3-2				0.13	40.5		
3-4				0.27	18.5		
5-0	1/50	2.4	1.08-1.18	0	0	7.0	Polypropylene resin stick
5-2				0.13	38.0		
5-4				0.27	18.3		
5-10				0.54	8.5		
7-0	1/50	1.3	0.92-0.86	0	0	7.0	Polypropylene resin stick
7-2				0.13	39.0		
7-4				0.27	18.0		
7-10				0.54	9.0		
2-0	1/100	1.5	1.00-1.35	0	0	7.7	Projections on sidewalls
2-2				0.13	36.0		
2-4				0.27	17.5-18.0		
2-10				0.54	9.5-9.0		
4-0	1/100	1.1	1.02-0.92	0	0	8.8	Projections on sidewalls
4-2				0.13	36.7-38.0		
4-4				0.27	18.0		
4-10				0.54	9.0		
6-0	1/50	2.4	1.08-1.18	0	0	8.5	Projections on sidewalls
6-2				0.13	35.0		
6-4				0.27	17.7		
6-10				0.54	8.9		
8-0	1/50	1.3	0.92-0.86	0	0	8.5	Projections on sidewalls
8-2				0.13	39.0		
8-4				0.27	18.0		
8-10				0.54	8.7		
Y1-0	1/50	1.9	1.05-1.12	0	0	7.7	Acrylic resin stick
Y1-2				0.13	40.0		
Y1-4				0.27	17.5		
Y1-10				0.54	8.6		
Y2-0	1/50	1.6	0.92	0	0	8.8	Acrylic resin stick
Y2-2				0.13	39.0		
Y2-4				0.27	18.0-18.5		
Y3-0	1/50	4.1	1.81	0	0	7.7	Acrylic resin stick
Y3-2				0.13	37.0		
Y3-4				0.27	19.0		
Y3-10				0.54	8.3		

止めが生じていた場合はもう一度水位を測定したが、波高計の測定針は流木モデルの堰止めを破壊する可能性があったので、堰止め部分の上流端で一旦針を上げ、下流端で下げるようにして行った。

2.3 実験条件

設定した実験条件は **Table 1** に示したとおりであって、流木モデルとしては、6 mmφ ポリプロピレン棒（比重約 0.96）あるいは 5 mm 角アクリル棒（比重約 1.06）をいずれも長さ約 0.2 m に切ったものを 600 本余り用意している。ポリプロピレン棒を流木モデルとした場合は、路床勾配を 1/50 及び 1/100 に設定し、それぞれについて両側壁に 15 mm の突起を 1 m 間隔で配した場合と配しなかった場合を設けた。それらについて、流量を粗度要素頂点の上の水深が、流木モデルの直径 1.5 倍あるいは 2 倍のそれぞれ約 9 mm あるいは 12 mm となるように流量を調節し、無給木時の水位の測定後、1～10 に目盛っているミニコンベアのベルト速度調節つまみを 2, 4, 10 の 3 点に設定して給木を行った。Run 番号の後の数字はこの速度設定目盛の値を示しているが、それぞれ、約 0.13, 0.27, 0.54 m/s ベルト速度に対応している。なお、水流の流送能力が低く、流木モデルが給木落下地点にそのまま堆積した場合はそれ以上に給木量を増やした実験は行わなかった。

流木モデルを比重が 1 よりもやや大きいアクリル棒とした場合は、河床勾配を 1/50 に固定し、側壁突起を設置しない場合のみについて上記のポリプロピレン棒の場合と同様の流木供給量で行ったが、**Table 1** のようにさらに水深を約 18 mm にした場合を加えている。

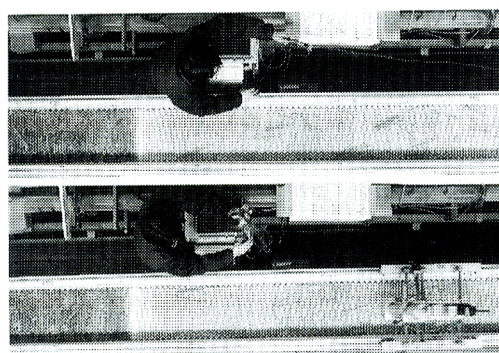
2.4 実験結果

(1) 無側壁突起水路でポリプロピレン棒を流木モデルとした実験

(a) 水路勾配 1/100 の実験 (Run 1 及び 3)

基底時の水深を流木モデル径の約 2 倍とした Run 1 では、給木速度の小さい場合、**Photo. 2 (a)** に示した Run 1-2 のように、流木は 2, 3 本～数本が重なり合い、かなりのものが側壁に衝突しながらもすべて浮遊した状態で流下していき、路床に貯まるものは無かった。流木供給速度を約 2 倍に増加させた Run 1-4 では、**Photo. 2 (b)** のように、流木の塊が 10 数本で構成され、側壁近くの低流速域に集まるものが多かったが、やはり路床に堆積することなくすべて流下していった。最も給木速度を高くした Run 1-10 でも、流木は、**Photo. 2 (c)** の $T=10''$ のように、局所的に集合した状態や $T=20''$ の平均的に分散した状態を示したが、それまでと同様に路床堆積を生ぜずすべて流下していった。

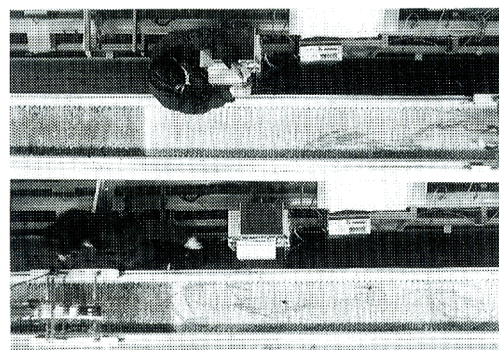
Run 1 について、 $x=6.5$ m の粗度頂点上を基準とした測定水位の流下方向を示せば **Fig. 1** のようであり、この値はほぼ水深変化に対応する。波高計の不調によると思われる Run 1-4 の $x=7.3$ m 地点までの極端な水位低下を除くと、いずれの混在実験でも水位は非混在時よりも明確に低下しており、その差は Run 1-2 で約 3 mm, Run 1-4 と Run 1-10 で 5 mm



(a) run 1-2



(b) run 1-4



(c) run 1-10

Photo 2. Transport condition of drift wood in run 1.

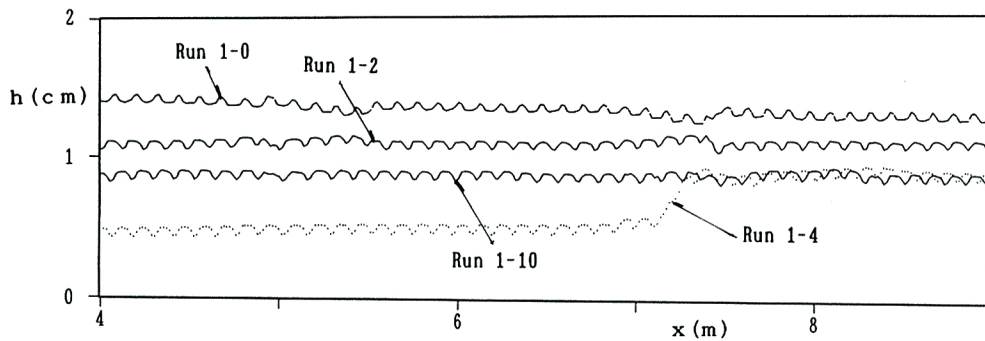


Fig. 1. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 1.

以上に達している。本実験のように底面粗度によって水深が大きく、流速が低くなっている場合には、流木に働く重力²⁾によって水流の加速現象が強調され、水位が低下する可能性もあると考えられる。しかし、このように大きな水位低下はかなりの流速増加を生じることになるにもかかわらず、平面写真を検討した結果では、流木の移動速度に明確な上昇は認められなかった。したがって、このような測定結果は、流木の存在によって水位を検出するサーボ式波高計の水面接触針とフロートに巻き付けて曳行したアース線間の抵抗が増加し、接触針が深く潜り込んだために生じたと考えられ、実験誤差と判断される。

つぎに、流量を減少させ、流木モデル径の1.5倍程度の基底水深としたRun 3では、給木量の最も小さいRun 3-2において、Photo. 3に示したような堰止め現象が生じた。すなわち、 $T=36''$ に $x=7.3$ m地点で停留していた数本の流木に上流から来た流木塊が $T=46''$ のように重なり、そのうちの流路中央付近のものは再び流下していくが、残留した流木には上流からの流木が次々に積み重なって堆積していき、最終的には $T=70''$ のように水路を全幅にまたがって堰止めた。さらに、給木速度を上げたRun 3-4では、水流の流送能力以上の流木供給となったために、流木は落下地点に積み重なり、結果的に、測定区間では堰止め現象は生じなかった。Run 3ではこれ以上に給木量を増やした実験は行わなかった。

Run 3では、Fig. 2に示したように、Run 1で観察されたほど水位変化は明確ではないが、Run 3-2において流木による堰止め部分上流での水位上昇が認められた。水位変化量のRun 1のと相違には、水深の絶対値が影響している可能性もあると思われる。

(b) 水路勾配1/50の実験 (Run 5及び7)

路床勾配を1/50にして流送能力を上げたRun 5では、流木はPhoto. 4(a)に示したRun 5-2、同図(b)に示したRun 5-4のように流木が分散して速やかに流下していった。最大給木量のRun 5-10でも、Photo. 4(c)のように、やや塊状となっているが、流木はすべてスムーズに流下した。このように、流木モデル径の2倍の水深では、流木モデルは供給量

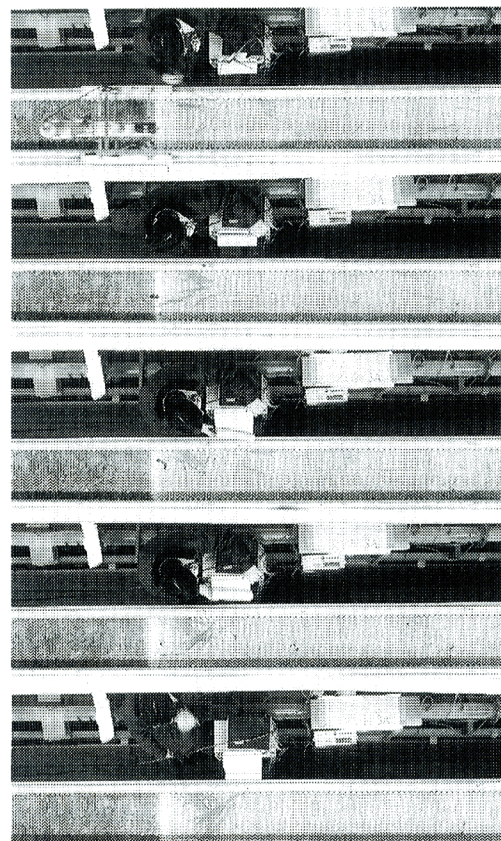


Photo 3. Transport condition of drift wood in run 3-2.

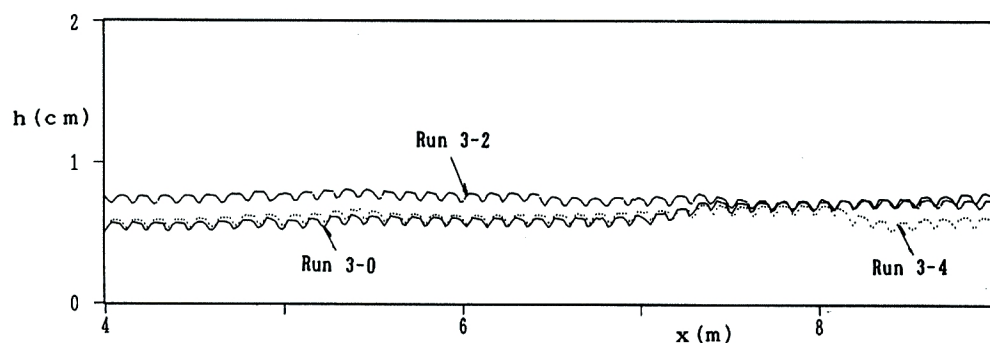


Fig. 2. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 3.

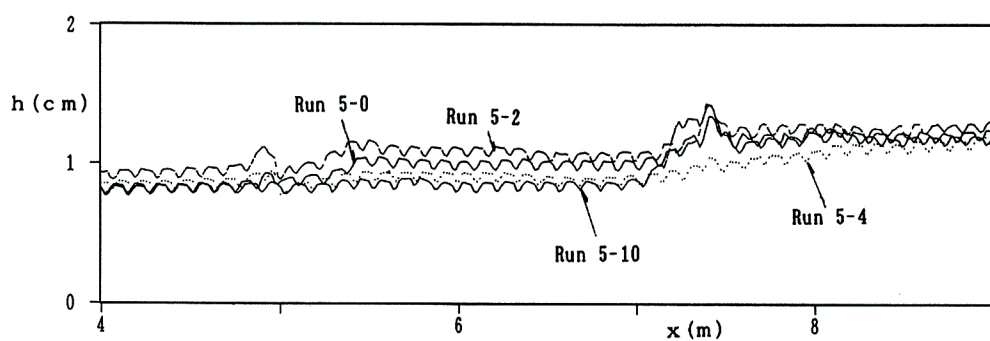
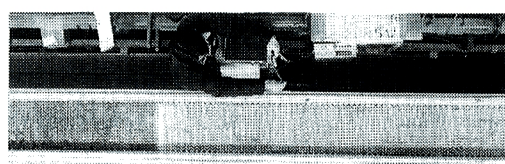
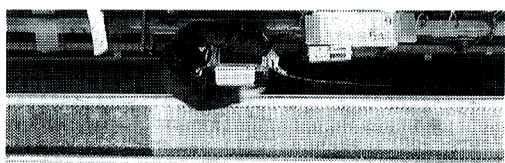


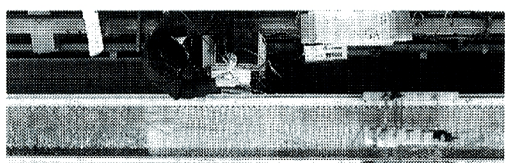
Fig. 3. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 5.



(a) run 5-2



(b) run 5-4



(c) run 5-10

Photo 4. Transport condition of drift wood in run 5.

に関わらずに、十分浮遊して流下するようである。

Run 5における水位変化を示すと Fig. 3 のようである。x = 7.0 m ~ 7.5 m の間で水位が大きく変化しているが、その上流では、Run 5-2 の場合、水位が基底流よりも約 1 mm 上昇し、一方、Run 5-4、5-10 の場合は逆に 1 ~ 2 mm 低下している。全体的にも Run 1 よりも水位変化量は小さくなっている。この変化幅が本実験における水位測定の精度であろう。

最後に、水深を Run 3 と同程度に減少させた Run 7 では、基底流の表面流速の減少を反映して Run 7-2、Run 7-4 及び Run 7-10 のいずれにおいても、流木の流下速度が Run 5 の場合よりも若干遅くなった。しかし、流木は給木密度に拘わらず、分散してすべて円滑に流下していった。

Run 7 シリーズの水位変化を Fig. 4 に示している。このシリーズでは基底流の Run 7-0 に対して、Run 7-4、7-2 及び 7-10 の順に水位低下が増加しており、その量は、順に約 2 mm、約 3 mm 及び約 4 mm であるが、下流区間での Run 7-2 と 7-4 の差は小さく

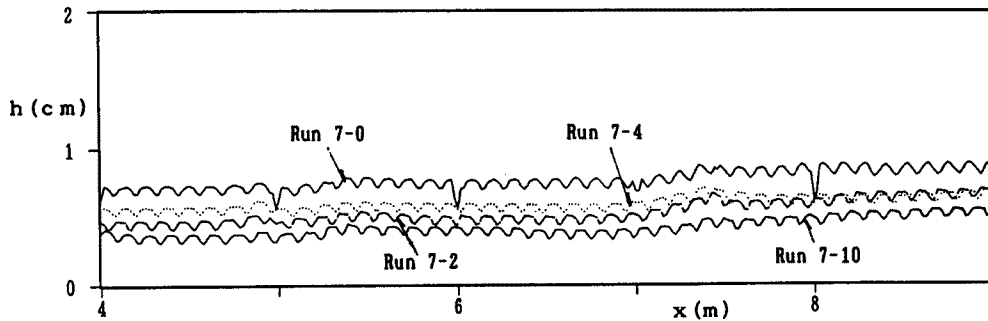


Fig. 4. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 7.

なっている。なお、同図では、基底流の $x=5, 6, 8$ m 地点にパルス状の水位低下が示されているが、これは明らかに場所を示すために設置した 1 m 毎のマーカーのパルスによる影響である。

(2) 側壁突起配置水路でポリプロピレン棒を流木モデルとした実験

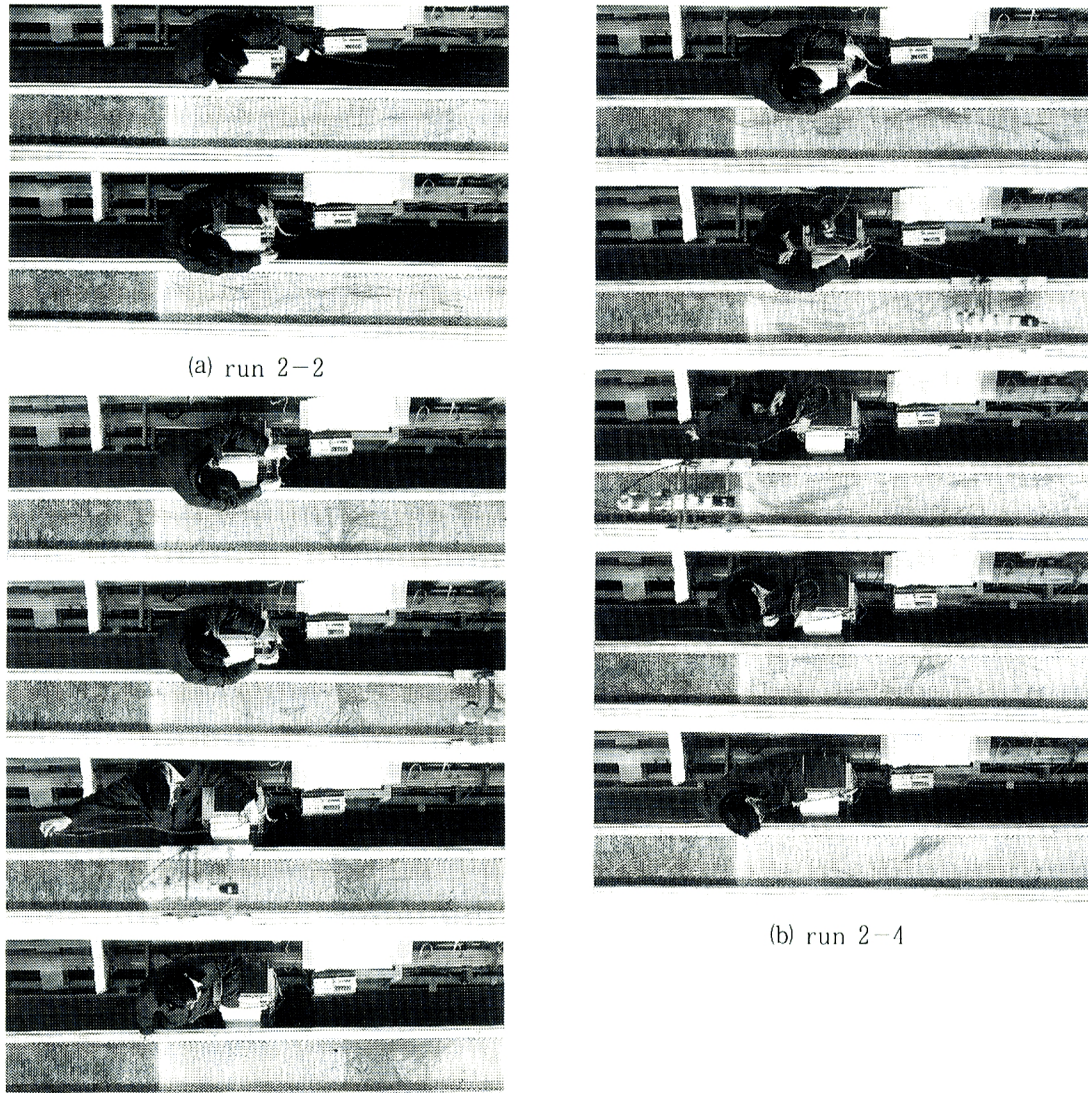
(a) 水路勾配 1/100 の実験 (Run 2 及び 4)

Run 2-2 では、 $x=6\sim 9$ m 区間の両側面に 1 m 間隔で設置された 15 mm の突起に衝突した流木は、**Photo. 5 (a)** から推察されるように、流体力のモーメントを受けて突起との接触点を中心にした回転運動をしながら流下していった。しかし、この流木の供給密度では、突起との接触がきっかけとなった流木の堆積や堰止め現象はみられなかった。Run 2-4 の流木の供給密度では、**Photo. 5 (b)** の $x=6$ m 地点のように両側の突起に同時に衝突した流木塊がともに回転運動を始め、水路中央部で重なりあって水路を堰止める状況を生じ、これに流下してきた全ての流木が次々とトラップされ、上流側に積み重なってジャム化し、一種の流木ダムを形成した。しかし、Run 2-10 では、両側壁の突起に流木塊が同時に衝突して回転を開始する状態が現れず、**Photo. 5 (c)** のように、突起に一度引掛った流木塊が交互に流下していく状態であった。しかしながら、最大の給木密度であったので、 $T=22'$ に $x=6$ m 地点の突起に接触して回転運動を始めた流木に、流下してきた後続の流木が潜り込み、最終的に、 $T=30'$ のような水路の半分を堰止める流木の堆積状況を残存させた。

Run 2 における水位変化を **Fig. 5** に示している。基底流の Run 2-0 と比較すると、Run 2-2 では約 1 mm の水位低下がみられ、堰止めによる Run 2-4 の $x=5.5\sim 6.0$ m 区間の大きな水位上昇、及びゆっくりと流下している高密度の大きな流木塊による Run 2-10 の $x=6$ m から下流の僅かな水位上昇区間を除いて、流木流下中は基底実験に対して全ての実験で同程度の約 1 mm の水位低下を生じていることがわかる。

水深を流木径の約 1.5 倍に下げた Run 4 では、Run 4-2 と Run 4-10 において、Run 2-4 と類似の過程で流木の堰止め現象が発生した。Run 4-4 では、一時、流木の堆積が進行するような状況がみられたが、結局両側の突起を中心に回転していく流木塊が重なり合うことなく、すべて流下していった。一方、Run 4-2 では、 $T=48'$ に $x=6$ m で開始した両側壁からの流木塊の重なり合いが $T=50\sim 54'$ で完全なトラップとなり、最終時点までに流木ダムとなった。また、Run 4-10 でも、 $T=22'$ から $x=7$ m に両側にまたがる流木塊の堆積が発達していき、最終的に水路を堰止めた。

Fig. 6 は Run 4 における水位変化を示している。その低下量は、流木の堆積の影響を若干受けているが、基底流の約 9 mm の水深に対して Run 4-2 で約 2~4 mm、Run 4-4 で約 4~5 mm 及び Run 4-10 で約 5 mm となっていて、明らかに給木密度の増加していく Run 4-2、4-4 及び 4-10 の順に水位低下量が大きくなっている。しかし、このような水位変化については、Run 1 の水位低下について指摘したサーボ式波高計の検出針とアース間の抵抗増加の問題がそのまま当てはまり、現象を正しくは表していないと思われる。



(a) run 2-2

(b) run 2-4

(c) run 2-10

Photo 5. Transport condition of drift wood in run 2.

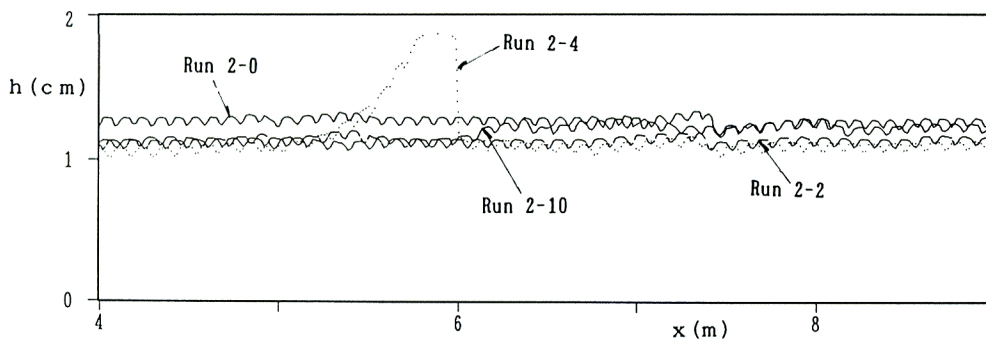


Fig. 5. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 2.

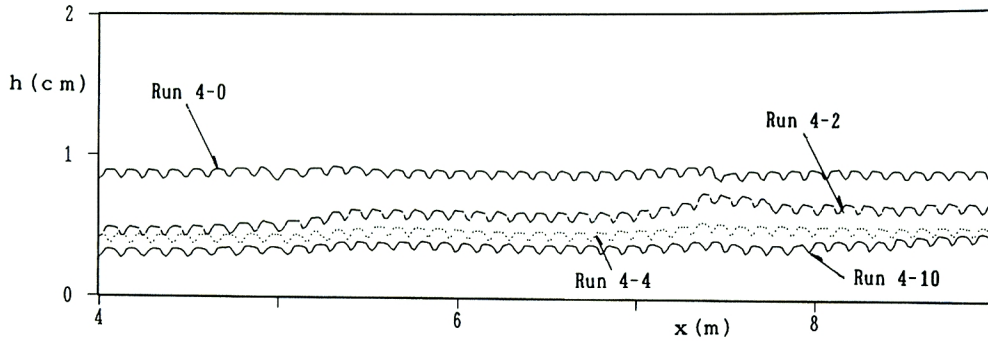


Fig. 6. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 4.

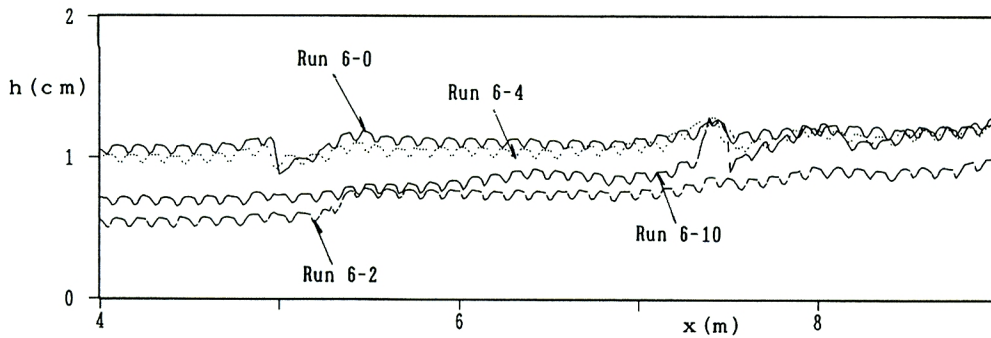


Fig. 7. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 6.

(b) 水路勾配 1/50 の実験 (Run 6 及び 8)

流木モデル径の約 2 倍水深の Run 6 では、流木供給量に応じて密度は相違していたが、側壁の突起にかかわらず流木はいずれも分散し、比較的大きな速度ですべて流下していった。Run 6 の水位変化を示すと Fig. 7 のようであって、Run 6-0 の基底水位に対して Run 6-4 はほとんど変化しておらず、一方、Run 6-10、6-2 では水位低下量がこの順に大きくなっている。Run 6-10 の流下方向への水位上昇は、かなり高密度の流木存在区間を波高計が追い越していった区間のものである。

水深を流木モデル径の約 1.5 倍に減少させた Run 8 のうち、Photo. 6 に示した Run 8-2 では、 $T=22''$ に $x=6\text{ m}$ の右側壁の突起に接触・滞留していた余り密でない流木塊に上流からの流木が潜り込むという、Run 2-10 の堆積と類似の過程で、 $T=36''$ にかけて水路の半分を堰止める流木堆積がみられた。また、Run 8-4 では、 $T=18'' \sim 22''$ の間に、突起に無関係の $x=5.5\text{ m}$ 地点の両側に流木が堆積を始め、 $T=30''$ まで両側の流木塊が重なり合わないまま残存したが、最後まで全面的な堆積とはならなかった。Run 8-10 では、最大給木量であったために、それが流水の流送能力を超え、流木が落下地点に停留したことによっている。Run 8-10 では、Run 4-10 よりも流量が多く、勾配も急であったにもかかわらず、流送能力が低かった点については今後検討する必要がある。

Run 8 の水位変化を示した Fig. 8 では、基底の Run 8-0 と比して、他の実験は $x=5\text{ m}$ までにはほぼ

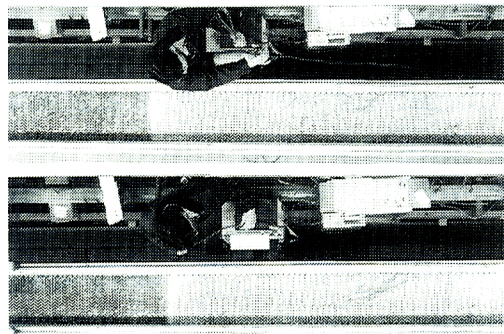


Photo 6. Transport condition of drift wood in run 8-2.

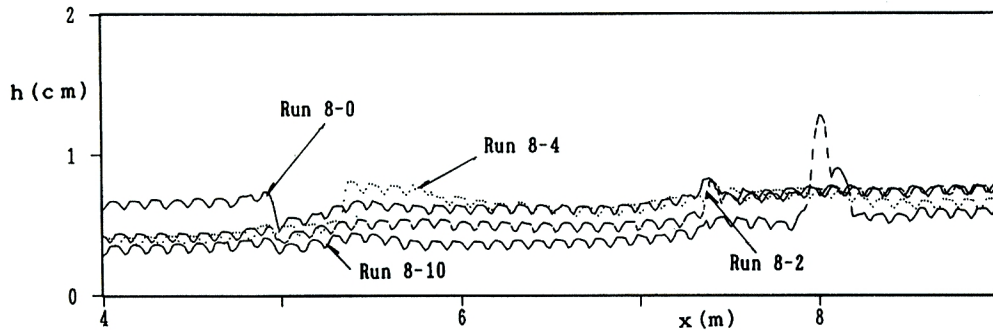


Fig. 8. Changes in water depths during drift wood conveyance in run 8.

同じ水位低下量を生じている。しかし、Run 8-4では、 $x=5\sim 6$ mの区間において大きく水位が上昇して、 $x=5.5$ mの突起とは無関係に生じた流木の堆積と対応しており、堆積部の下流ではほぼ基底流と同水位となる。一方、Run 8-2及び8-10ではこの順に大きな水位低下量を示しているが、Run 8-2では、 $x=6$ mで形成された水路半幅の流木堆積のために水位が上昇しており、Run 8-10だけが距離パルスの影響と思われる $x=8.0$ m付近を除いて全区間で低水位となっている。しかし、この実験では流木モデルは落下地点に堆積して測定区間に達していないので、このように大きな水位低下はやはり測定誤差の可能性が高い。

(3) 突起有しない水路でアクリル棒を流木モデルとして用いた実験

流木モデルとしたアクリル棒は比重約1.06と水よりも重いので、これまでのポリプロピレン棒とは違って、流木モデルは沈んだまま河床粗度上を流下していく。このため流木径の約2倍の水深を有するRun Y1では、Photo. 7に例示したように、流木の供給開始から1分近く経過しても、流木群の先端はおよそ $x=7$ mまで流下したのみであった。これらの流木モデルは、やはり浮遊したポリプロピレン棒とは相違して、ほとんどが軸を水流と平行にして水深から受ける抗力を小さくしている。このため、流下速度が低下したものと思われるが、この条件では完全に移動停止の状態に至るものは少ないようであった。

Run Y1における水位変化を示すとFig. 9のようである。外来ノイズによると思われる場所的な変化が大きいため、全体的に基底流のRun Y1-0の水位と比較すると、Run Y1-2の水位はほぼ等しく、Run Y1-4及びY1-10では僅かに水位が低下しているが、ほとんど変化はないと判断できる。なお、 $x=7\sim 7.3$ m区間の顕著な水位の上昇と $x=7.4$ mにお

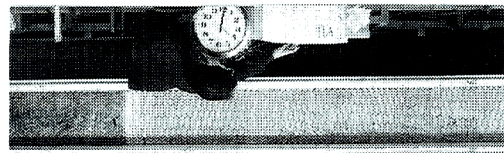


Photo 7. Transport condition of drift wood in run Y1-10.

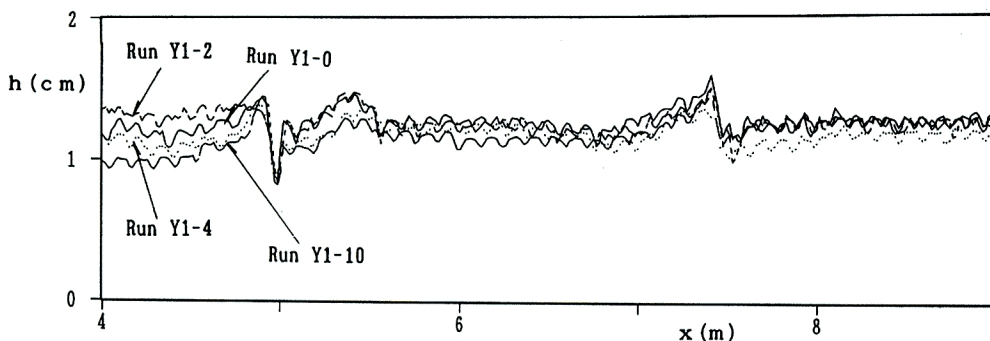


Fig. 9. Changes in water depths during drift wood conveyance in run Y1.

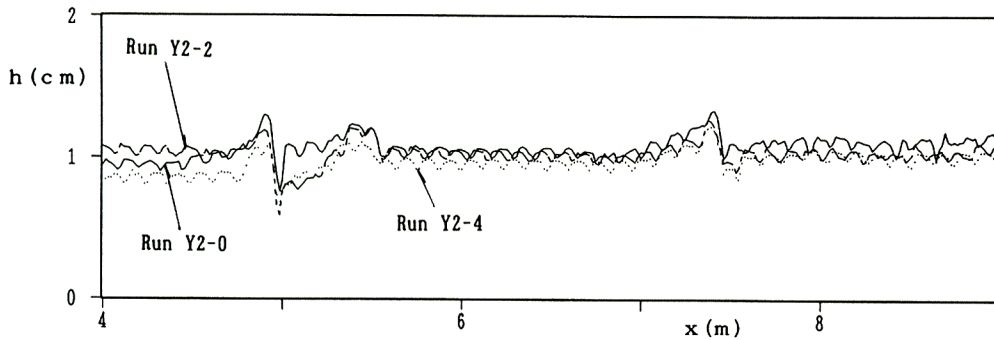


Fig. 10. Changes in water depths during drift wood conveyance in run Y2.

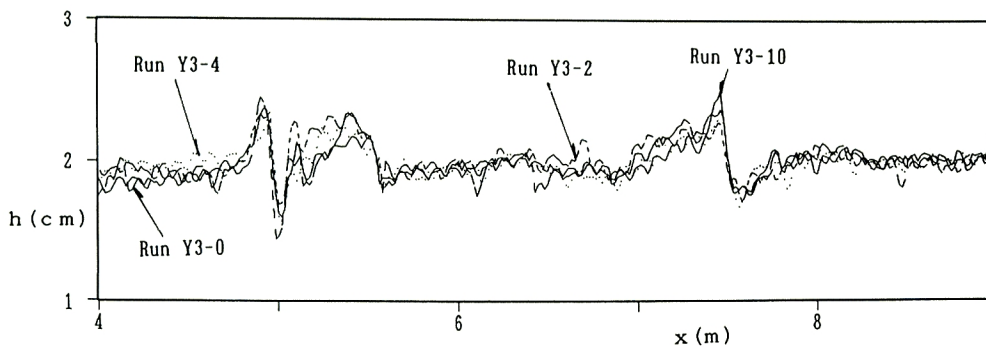


Fig. 11. Changes in water depths during drift wood conveyance in run Y3.

る急激な低下はこの Run Y シリーズの全実験に認められ、先に述べた粗度要素の下部の空隙の充填方法の違いによる影響が強く現れたと考えられる。

水深を流木モデル径の約 1.5 倍に減少させた Run Y2 では、流木密度の低い Run Y2-2 でも流木はおよそ $x=6$ m 地点までしか流達しなかった。さらに、給木速度を上げた Run Y2-4 では、大半の流木が供給された地点に落下すると同時に停滞したので、そこで実験を打ち切った。Fig. 10 には Run Y2 の位変化を示している。Run Y2-2 では基底流と差がなく、Run Y2-4 では約 1 mm 低くしているが、有意な変化量との判断は困難である。

流量を Run Y1 の約 2 倍に増加させた Run Y3 では、例示した Photo. 8 のように、どの場合でも流木モデルは大半が流下して、最終的に側壁近傍の低流域に数～10 本程度の流木が軸を側壁に平行に近付けて停留・残存した。流木密度が比較的高い場合には、流送時に流れと軸のなす角の大きい流木がかなり認められ、全体的な流木速度もやや高い。側壁近傍の流木モデルはこうした高密度部分の流下後、水路中央部との流速差によって軸を流れに平行にして抗力を減じ、停留するものと思われる。Run Y3 における水位変化を Fig. 11 に示している。流量が多いため水深が約 20 mm と大きくなっていて、水面の変動もやや活発であるが、いずれの実験についても基底水位との系統的な差は生じておらず、ここでもポリプロピレ

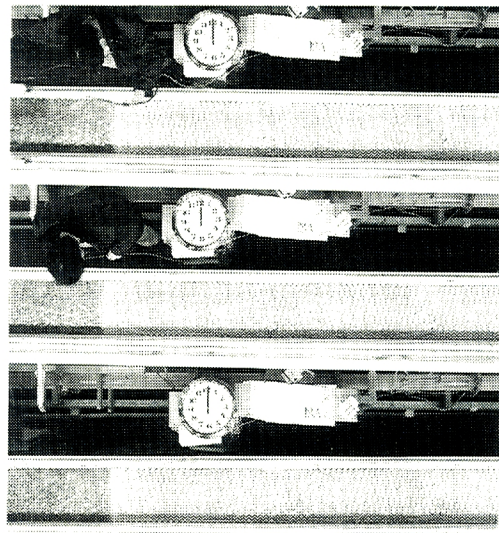
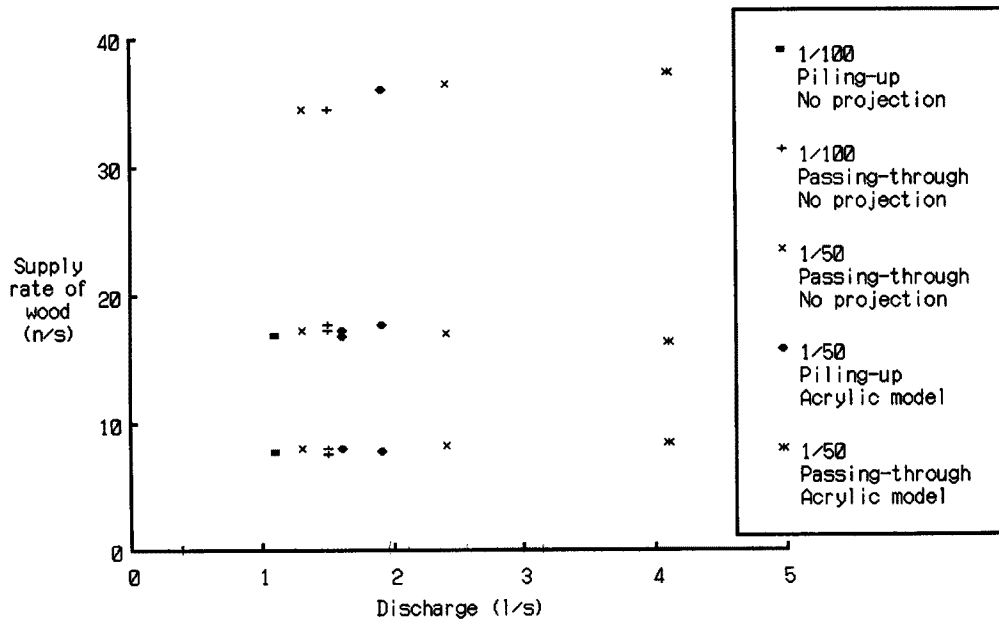


Photo 8. Transport condition of drift wood in run Y3-10.

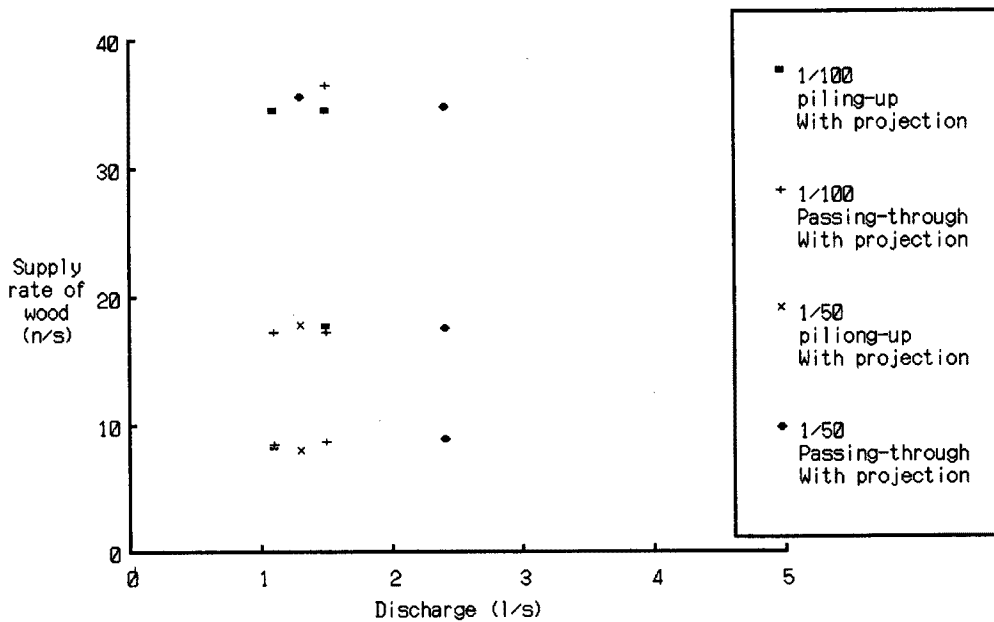
ン棒の場合とは大きく異なった傾向を示している。

2.5 粗面河道における流木挙動に関する考察

今回の実験結果を流木群の河道堆積の発生・非発生に着目して最も単純に示せば、側壁に突起のある場合と無い場合について、それぞれ Fig. 12(a), (b) のようになる。これらの図は、ある勾配と流量に対し



(a) without irregularity on the sidewalls.



(b) with irregularity on the sidewalls.

Fig. 12. Conditional diagrams for occurrence of drift wood piles

て堆積の生じる流木密度に限界のあることを示しており、流木群内の相互および次の流木群との相互干渉が無ければ一様な粗度路床における流木群の堆積は生じないことを示唆している。とくに、ポリプロピレン丸棒のようにそれ自体に引っかかり部位のない、浮遊しやすい流木が堆積する場合は、小水深・低流速の実験で観察されたように、流下速度が減少していた流木群の下部に上流からの流木群が潜り込んで積み重なったようになる場合しか無い。したがって、このようなそれほど強くない流木塊の構造を破壊するだけの流体力を水流が有しておれば、流木の堆積は生じないことになる。この限界は、流木群の組み合わせを決定する流木の幾何形状と、引っかかり易さを決定する河床・河岸の凹凸と水深・河幅の関係から明らかにしていかなければならない。今回の実験では流路幅の約1/2の流木モデルを用いたが、流木の軸長/直径比が30弱と、樹根部の効果を考えると極めて細長いものとなっていて、これが堆積の生じにくかった原因の一つであると思われる。一方、アクリル角棒のような水流に沈み易く、角のある流木モデルの場合には、水流よりも移動速度が低く、流れに対して抗力を減じるように挙動して低流速域に溜まり易い傾向がみられた。これは、流木が河床に接触しながら流送される場合には、相対的に流体力を受けないように挙動していく可能性を示唆している。

今後、これらの実験で観察された定性的特徴を定式化して一般的な結論が得られるようにしていく予定である。

また、粗面路床上の流れに流木モデルとして比重が1以下のポリプロピレン棒を混入させた場合、本実験では、これらの流木モデルが水深不足や側壁の不整のために路床に滞留・堆積しない限り、水深が減少する傾向が測定された。この水深減少は、本実験のような粗度路床流れという流速が低く水深の大きくなりやすい条件下では、流木に働く重力の作用によって水流が加速されることによる可能性もあるが、既述のように実験誤差も含んでいるので、検証実験が必要である。いずれにせよ、このような水流の加速現象の水理特性については、既に簡単な考察が行われている³⁾ので、今後はそれとの比較検討を進め、浮遊流木群の挙動を明らかにしていく必要が指摘される。

一方、比重が1よりも僅かに大きいアクリル樹脂棒を流木モデルとした場合、流木モデルは河床上を滑動しながら徐々に流送されていったが、水位の変化にはほとんど影響を与えていない。これは、流木モデルが、河道内の横断方向の流速分布の効果もあって、流下方向に軸を平行にして流体から受ける抗力を最小にしていたことと対応している。このような流木の回転が可能であったのは、半球という粗度形状と無関係ではないように思われる。したがって、河床に触れながら流下していく流木が多少とも水位上昇をもたらすためには、かなり不規則な河床の粗度要素や側壁の不整によって、流木があたかも一時的にトラップされるぐらいになって流下が緩慢になる必要があるように思われる。

結局、流木によって水位が上昇する場合は、河道・流木の規模を問わず、堰止めによる場合に限られることになり、構造物が無い場合での粗面河道の流木容量を予測することが基本的な課題となる。

3. 流木を伴う河道侵食と氾濫堆積に関する基礎実験

3.1 流路変動に関する光学式3次元計測システム

本システムは、傾斜地域の河道災害の発生過程について、洪水・土砂氾濫河道実験装置で行われる流木を伴う河岸侵食と土砂堆積に関する基礎実験の計測手段として開発された新しい計測システムである。以下にシステムの詳細と移動床基礎実験用計測プログラムについて紹介する。

(1) 流路変動に関する光学3次元計測システムの特長と構成

急勾配の広幅区間と水平な氾濫場を有する複雑な実験装置における砂面の変化を簡便に測定することを目的とし、かつ、野外観測にも適用可能な計測システムとして開発に着手されていた本システムは、Photo. 9に示したようなモータードライブレザースェオドライト及び電子セオドライトを中心とする、

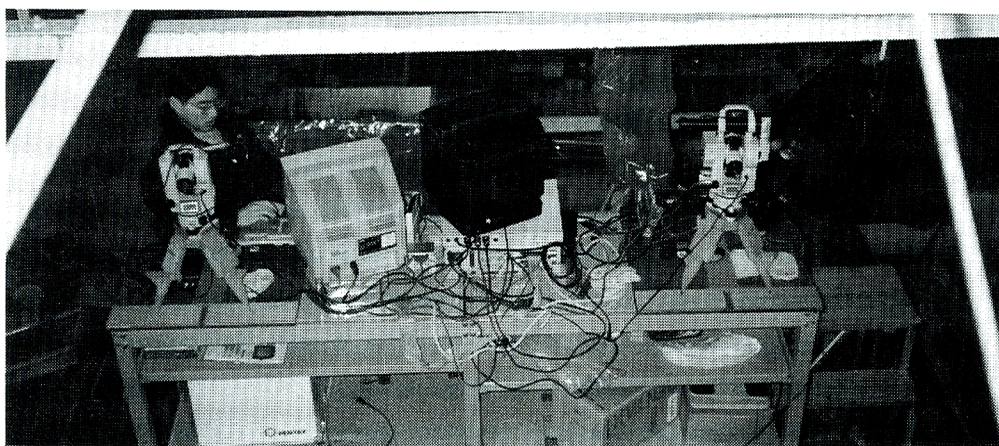


Photo 9. An optical measurement system for 3-dimensional variation in stream channels.

三角法の原理による光学式3次元河床測定システムである。この計測システムでは、まず、砂面の3次元測定をできるだけ自動化するためにモータードライブ化したレーザーセオドライトをパソコン制御して、河床上の所定の測点にレーザースポットによってマークを記させ、ついで、そのマークを別の基準点に置いた電子セオドライトによって観測者が手動追尾・視準すると、両セオドライトの測角値がRS 232 C準拠の通信線を通して自動的にパーソナルコンピューターに取り込まれ、三角法に基づいて、マークされた測点の3次元座標が算定されるようになっている。ここではさらに、電子セオドライトのエルポーアイピースに小型 CCD ビデオカメラを組み込み、Photo. 10のように望遠鏡の十字線を TV 画面でモニターできるようにしている。具体的なシステムの機器構成は次のようである。

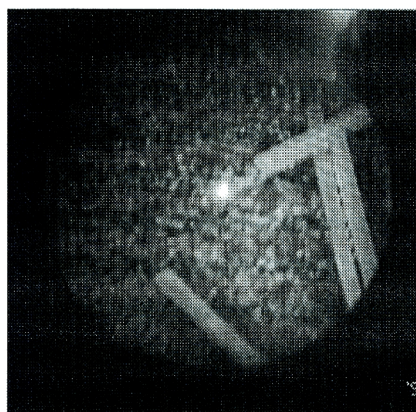


Photo 10. A view of the electronic theodolite telescope monitored by a CCD camera.

① モータードライブレーザーセオドライトシステム

モータードライブレーザーセオドライト（旭精密製特注品、以下 MDLT と略称する）及びパルスモータードライバ（メレック D-541）を含む。

② 追尾用電子セオドライトシステム

電子セオドライト（旭精密 TH-E 10 D、以下 ETH と略称する）、小型 CCD ビデオカメラ（エルモ）及びビデオモニター（SONY）からなる。

③ 制御・計算用パーソナル・コンピュータ

NEC PC-9801 M2：パルスモーターコントロールボード（コンテック PMC-2）、増設 RS 232 C ボード（NEC）及び 40 MB ハードディスクボード（ICM Cb）を含む

このシステムは測定対象に非接触で測定ができ、計測用制御プログラムによって自由な位置や曲線に沿った計測が可能である。また、基本的に一人で広範囲にわたる河道形状の測定ができるので、野外における測量作業に適用する場合などにも優れているという利点を有している。

（2）実験計測プログラムの開発と操作

洪水・土砂氾濫河道実験装置を用いた基礎実験に上記の計測システムを適用させるために制御プログラムを作成した。このプログラムでは、MDLT 及び ETH の位置を両位置間の水平距離と測定対象に設定さ

れた基準点の視準角から逆算して求められるようにし、プログラム作成は、主につぎのような理由でマイクロソフト Quick Basic Ver. 4.5 を用いた。

1. プログラムの作成及びインタプリタ使用の環境が統合されている。
2. インタプリタが高速で、数値データプロセッサを用いると本プログラムで頻用される三角関数計算の速度と精度が極めて高くできる。
3. インタプリタの柔軟性が高く、途中でプログラムの一部を変更しても実行を続行できる。
4. プログラムの構造化が行いやすい。

測定は所定の横断面に沿って行うものとし、河道横断面形状の変化に応じて一定間隔の測定点間に基準量を越える大きな変化があった場合には、自動的にその間の補足測定を行っていくようにした。プログラムは、つぎに説明する①から③の大きく3つのブロックに分けられる。

① 測定準備

まず、使用変数の定義及び基準点データ・水路性状の読み込みを行い、台車位置、測定機器と接続、両セオドライトの水準・求心を確認する。続いて、水路基準点の視準角の概略データに基づいて、自動的にMDLTに基準点近傍を視準させ、一方、ETHの視準角をパーソナルコンピュータのCRT画面に表示させてCCDカメラの視野にレーザーマークを捉えやすくするために、基準点視準角を読み込む。

② 基準点視準

初めに、プログラム中のバグの発見と測定中の障害によるプログラム実行中断時のデータ保存のために、視準（基準点）動作モニターファイルを準備し、MDLTの初期角度をRS 232C回線から入力して基準点視準動作を開始する。すなわち、①のステップで入力した視準点角度と初期角度からMDLTが動作すべき偏角を算定し、それをパルスモータへの出力ステップに換算して、モータードライブコントローラに書き込んでMDLTが基準点の近傍を視準するよう動作させる。同時に、CRTに表示された角度に従ってETHをマニュアルで操作し、基準点を正しく視準する。ついで、MDLTのパルスモータードライブコントローラをマニュアル操作し、モニタ上の十字線とレーザーマークが一致するように微調整して視準を完了させる。得られたデータがコンピュータに取り込まれると、Fig. 13に示したように、両セオドライト間の水平距離 c と下記の正弦公式を用いて基準点 C_i までの水平距離 $a_i, b_i (i=1, 2)$ が求められる。

$$a_i / \sin \alpha_i = b_i / \sin \beta_i = c / \sin \gamma_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α_i 及び β_i はそれぞれMDLT及びETHによる測角値、 $\gamma_i = \pi - \alpha_i - \beta_i$ である。ついで、両器機点の高さ h_{A_i}, h_{B_i} を a_i, b_i にそれぞれの高度角の正接を乗じて求めておく。

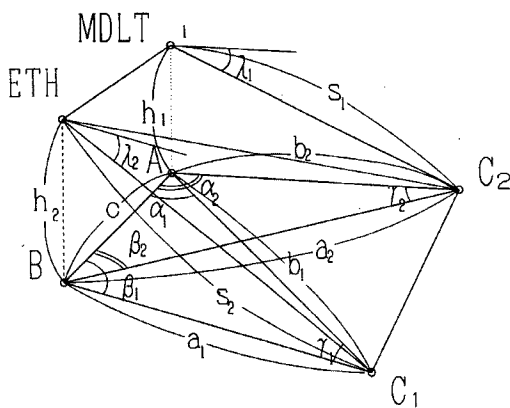


Fig. 13. A definition sketch of locations, distances and angles in the base points aiming.

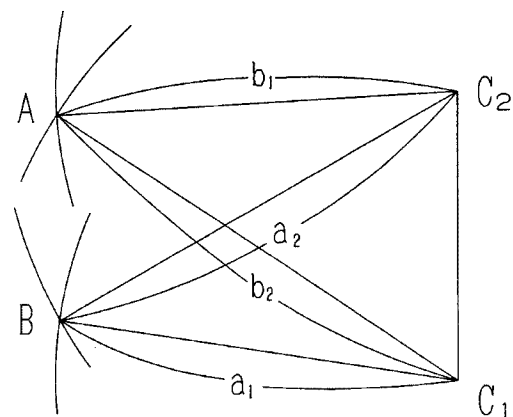


Fig. 14. A calculation diagram of horizontal locations of the theodolites (MDLT & ETH).

以上の視準動作が全基準点について終了したら、**Fig. 14**に基づいて機器点の座標を計算する。すなわち、基準点の組 C_1, C_2 から両セオドライトの点 A, B までの水平距離 a_1, a_2, b_1, b_2 が求められているので、2点からの円の交点として A および B の水平座標 $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$ を求める。また、鉛直座標 z_A, z_B は先に求めた高さ h_{A_i}, h_{B_i} の平均値と C_i の鉛直座標から定める。

③ 河道断面測定

初めに、断面測定の準備として、測定区間、測定範囲、流下方向及び横断方向の測定間隔、さらに、断面測定位置の流下方向許容誤差と測定精度を左右する高低変化の補間観測の基準も併せて設定する。

測定断面及び測定間隔に応じて視準点の水平座標 (x, y) を決定し、鉛直座標 z は河床・河岸あるいは前回の値で仮定する。ついで、**Fig. 15** 及び **Fig. 16** のように、器械点 A, B と測定点 C の間の水平距離 $BC=a, AC=2$ 及び両器械間の $AB=c$ に、余弦公式

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= (b^2 + c^2 - a^2) / 2bc, \\ \cos \beta &= (c^2 + a^2 - b^2) / 2ca \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

を適用して水平視準角 α, β を算出する。高度角 $\lambda_A, は a または b と器高 h_A, h_B と z の差から逆正接関数によって求める。これら4つの角度をCRTに表示させるとともに、MDLTに偏角に応じたパルスを送り込んで測定点の方向を自動視準させ、一方、ETHを視準角の表示値とCCDカメラモニターに基づいて操作し、レーザーマークを追尾・視準する。視準完了後測角データを取り込み、視準点の水平座標を再計算する。すなわち、**Fig. 16**を参照して、測角値 α, β から(1)式の正弦公式で a, b を再計算し、器械点を結ぶ直線 AB の y 軸からの傾き θ を導入すれば、 C 点の (x, y) 座標は次式で求められる。$

$$\left. \begin{aligned} x &= (b \sin(\alpha - \theta) + x_A + a \sin(\beta - \theta) + x_B) / 2 \\ y &= (y_A - b \cos(\alpha - \theta) + y_B + a \cos(\beta - \theta)) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ついで、この x 座標値から測点の z 座標の仮定に伴う測定断面位置の流下方向誤差をチェックする。つまり、視準点の高度角は z 座標を仮定して算定しているが、実際の路床高は異なっているので、視準完了時には水平座標、本実験では主に x 座標、に大きな距離のズレを生じる。したがって、ズレが許容範囲に収まらなかった場合には、その分だけ高度角を補正して再び視準するようにしている。この高度角 λ_i の補正量 $\delta\lambda_i$ は、**Fig. 17** のように、仮定した測点高度と実測高度の差が視準距離 s_i よりも十分小さいとして下式で求められる。

$$\delta\lambda_i = \delta z \cos \lambda_i / s_i = \delta x \sin \lambda_i / s_i \dots (4)$$

以上の作業を繰り返して、測定位置が許容誤差内に入った測定点に対して、前回の測定点との間の高低変化量を検討する。これは、作業効率を上げるために、

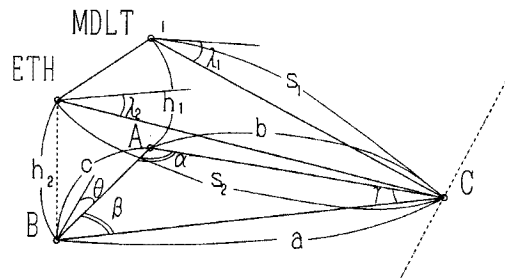


Fig. 15. A definition sketch of locations, distances and angles in the measurement of cross sectional shapes.

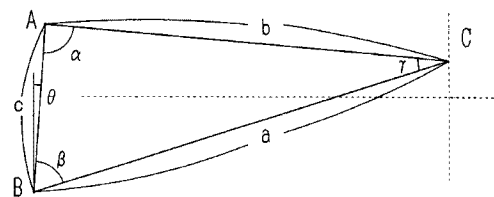


Fig. 16. A calculation diagram of a horizontal location of a surveyed point.

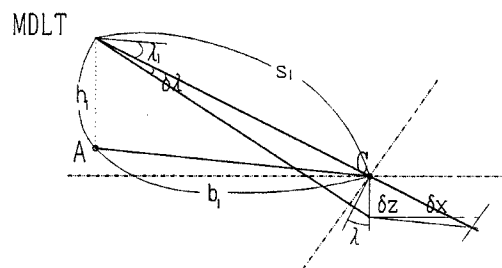


Fig. 17. A calculation diagram of an angle correcting the longitudinal position.

形状変化の緩慢な区間では測定間隔を大きくし、激しい部分にのみ多くの測定点を自動的に設けるようにして、形状測定を実際の地形に即したものとさせるための検討である。本プログラムでは、特別追加点測定と中間補足点測定と名付けた2段階の補完基準を用意した。すなわち、特別追加点測定は測定点間の高低差が補完基準1（本実験では4 cm）以上の時、その間を通常の横断方向測定間隔の1/4間隔で測定していくものであり、中間補足点は現測定点と相隣る測定点間の高低差が補完基準2（同1 cm）以上となった時、それらの中点の測定を追加するものである。中間補足点の測定が終われば、再び両側の通常点との間で高低変化量を吟味し、その差が再度1 cm以上となった時には第2段階補足として特別補足点測定を行う。1/4間隔の特別追加点測定の場合でも、測定点間に特別補足点測定のチェックを行っている。今回のプログラムでは第2段階補足までしか考慮していないが、さらに精度を上げる必要のある場合には補足点測定を繰り返すように変更すればよい。

なお、以上の高低変化量に対する吟味の場合でも、測定点に対しては常に通常点と同様の測定断面誤差のチェックが行われている。

その断面の最終測定が終了すれば、断面測定の良否を判断するためにCRT上にその横断面形状をディスプレイし、測定が良好であったらその横断測定ファイルを作成して次の断面に移る。こうして、所定の区間について所定間隔での測定が終了するとプログラムは終了する。

(3) 計測システムの精度

本システムでは精度を高めるために水路側壁上に基準点を複数設け、その平均値に基づいて計測を進めている。また、断面測定では、 x の許容範囲や河床高の変化範囲の基準を調節して、精度と作業能率のバランスをコントロールすることができる。今回の実験では、測定機器を電動台車の上に設置したために振動によって多少機器が揺れ、それがかなり精度を落としているので、現在作業台と機器設置台を切り放すように準備している。

なお、このシステムの絶対精度は、MDLT及びETHとも10秒精度のセオドライトであるので、視準距離を約10 mとすると $10000 \times 10 \times \pi / 180 / 60 / 60 = 0.48$ mmが精度の基準となる。しかし、上方から河床面を視準した場合、同一の高低差に対する偏角は大きくなり（Fig. 17参照）、その方向の測定精度は上昇する。こうした高度角の精度は器械に取り付けられている水平レベル（気泡管）に最も依存しているので、その設置誤差を打ち消すためには理想的には正反測定を行なわなければならない。

3.2 流木を伴う河道変動と氾濫堆積に関する基礎実験

(1) 実験装置

実験には、Fig. 18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。この装置では、ポンプの回転数をインバータで制御し、流量を0から12 l/sまでの範囲で調節して、水路部上流端の整流部に設置したディストリビュータ型の整流減勢装置で整流して給水している。また、側壁上にはレールが設置されており、その上を砂面敷均し及び水位測定用の手押し台車が走行するようになっている。

今回の実験では、Fig. 18のように、水路部中央の中心線に沿った長さ7 m、幅1.19 mの部分を高さ20 cmの仕切壁で仕切り、外側を通路として使用するとともに、中に実験砂を10 cm厚に敷いて、手押し台車に取り付けた整形板で底面幅0.23 m、開口幅0.35 m、深さ0.06 mの台形断面の側岸侵食性流路を形造るようにし、流路部からの流送物は、堤防決壊実験装置上に設けた幅2.4 m、長さ4 m、高さ0.04 mの氾濫部に堆積するようにした。実験経過の把握のため、装置上方の建屋の梁及び計測台上に2台のVTRとタイマーを接続した2台のモータードライブカメラを取り付けた。

実験の座標系は、水平面内に水路部下流端を $x=0$ mとして上流方向に x 軸を、水路部中心線を $y=0$ mとして右岸方向に y 軸を、 $x=0$ mの路床高を $z=0$ mとして鉛直上方向に z 軸をとった直交座標系である。

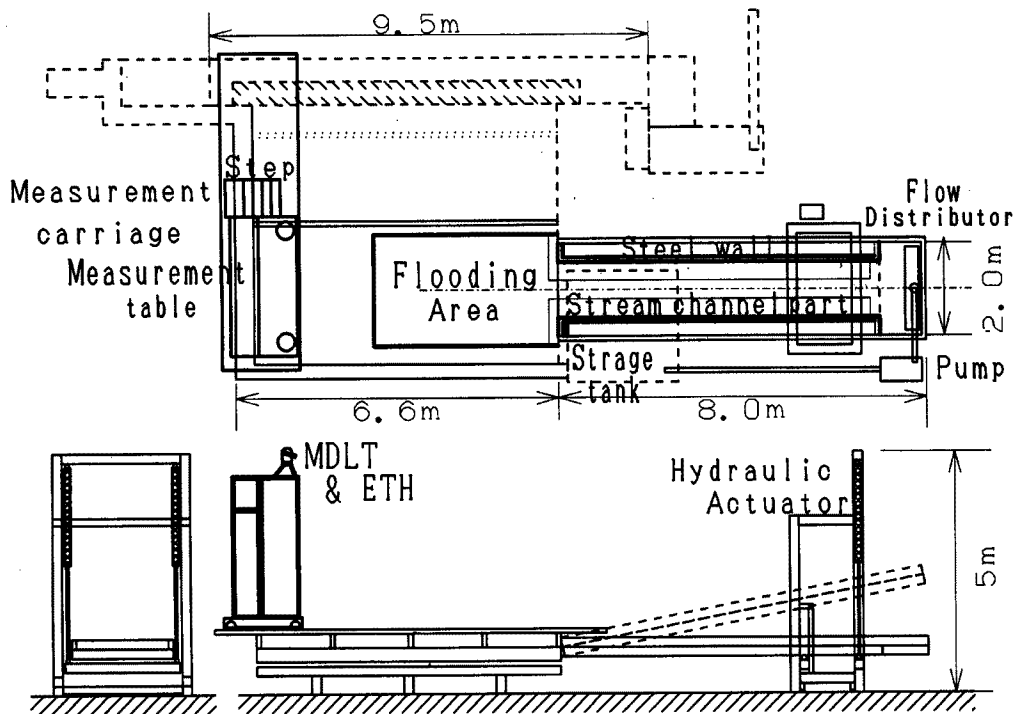


Fig. 18. A plan of the experimental apparatus for flooding of water and sediment.

(2) 実験条件

今回の実験では、平均粒径 1.42 mm の急速濾過砂を用い、水路部の勾配を 1/200、氾濫部の勾配を 0 に固定し、流木模型として 2. で用いた 0.2 m 長、5 mm 角のアクリル棒を Fig. 19 のように、軸を流下方向と平行にして両側岸上に横 10 列、縦 25 列に一定間隔で配列した。Run 1 ではこの間隔を横断方向 2 cm、流下方向 25 cm として合計 500 本の流木モデルを並べ、Run 2 では流下方向の間隔は 25 cm と同様だが、側岸からの流木供給量を増やすために横断方向には間隔を開けず密に 0.5 cm 間隔で並べた。Run 3 は、流路変形の小さかった Run 2 を引き継いだものであるのと同じ間隔である。

流量は、Run 1 では、流量は 2.5 l/s を予定していたが、後述のインバータの低周波領域における給水系の不安定から低水槽への掃還部の測定によれば、約 4.6 l/s となっていた。Run 2 では、Run 1 に予定していた流量に近い 2.52 l/s (初期実測流量) を与えた。ただし、通水とともに低水槽の水位が 40 ~ 50 cm 低下して行くため、その影響で流量がわずかに減少した可能性がある。Run 3 では 4.05 l/s を与えている。通水時間は実験現象の経過に写真撮影間隔を勘案しながら決定した。

以上をまとめて Table 2 に示している。

(3) 実験方法

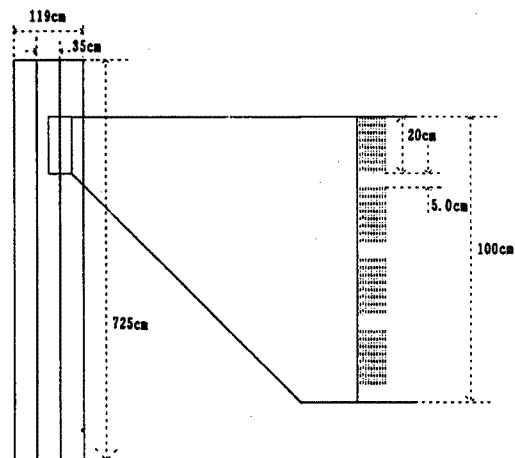


Fig. 19. Arrangement of drift wood on stream banks.

Table 2. Prescribed conditions of channel process experiments with drift wood

Run No.	Channel bed slope	Discharge (ℓ/s)	Flow duration (min)	Model of drift wood	Arrangement of drift wood	Bed and bank materials
Run 1	1/200	4.56	17.0	Acrylic resin stick	Sparse	Coarse sand
Run 2	1/200	2.52	20.0	Acrylic resin stick	Dense	Coarse sand
Run 3	1/200	4.05	12.0	Acrylic resin stick	Dense	Coarse sand

水路幅が2 mと広いので、 y 軸方向に傾斜しないように光学レベルを用いて注意を払いながら水路勾配を設定し、ついで、初期形状の砂面の敷均しを行った。すなわち、中央に整形板を取り付けた手押し台車で水路部に台形断面の流路を形成し、続いて氾濫部を堤防決壊実験装置に既設の電動台車に敷均し板を取り付けて整形した。さらに両者の連結部と上流端流入部を手で敷き均して、側岸上に流木模型を並べた。

以上の作業の終了後、前節で述べた計測システムとプログラムを用いて、水路部は0.25 cm毎、氾濫部は0.5 m毎に $x = 6.75$ mから $x = -5.0$ mの区間で初期横断形状を計測する。続いて、カメラのタイマーの撮影間隔をセットするとともにVTRを録画状態にする。一方、予め求めておいた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給水始める。

当初、送水パイプ（サクションホース）を建屋の梁上を通す高所に設置していたために、低周波数領域の送水量が不安定となり、Run 1では大幅に超過した流量となった。このため、Run 2からはサクションホースを直接整流・減勢装置に挿入した結果、低周波数でも一定流量から得られるようになった。しかしながら、ポンプ流量は、送水パイプの出口の位置や低水槽の水位などによって変化するので通水に先立ち、給水流量を整流槽の水位上昇速度から検定して、インバータの周波数を所期流量となるように調節した。

所定流量が得られれば給水を続行し、水路部の上流端に水が達した時点を実験開始時間とし、同時に計測用の時計とカメラをスタートさせる。流水先端が氾濫部に達したら、手押し台車に取り付けたポイントゲージで初期水位を測定し始める。通水終了直前に再び水位を同様にして測定した後、インバータを止め、しばらくしてVTRとカメラのタイマーのスイッチを切る。水が引いた後、河床形状を再び計測する。

なお、Run 1では計測プログラムが作成されていなかったため、1 m間隔の河道横断形状をポイントゲージで測定した。

(4) 実験結果とその考察

(a) 実験の経過

Run 1では、通水が始まると側岸の侵食とともに流木は流送されていくが、流木は流下方向とかなり角度を持って離岸し、その後ほぼそのままの角度で流下方向に沿って流れていく。流水に取り込まれた流木の多くは、流量が大きく水深がかなりあったので、Photo. 11に見られるように、河床や氾濫原の出口付近にはほとんど堆積せず流下していき、氾濫部を囲む等辺山形鋼に近い低流速域まで流送された。しかし、いくつかの流木は河床に堆積しており、これらは全て流れに対して抗力が小さくなるように軸が流下方向に平行に揃っていた。これらの堆積した流木のうちには側岸土砂によって埋没しているものも観測された。

しかし、流下していった流木による流路変動への明瞭な影響はVTR記録でも全く認められず、河床に堆積した流木の効果も数が少なかったため判別できなかった。このため、流路変動は通常の側岸侵食実験の場合と差がなく、Fig. 20に例示したような横断形状の測定結果によると、流路は上流端の $x = 6.5$ mを除いて、上下流ともにほぼ一様に17 cmほど拡幅されている。

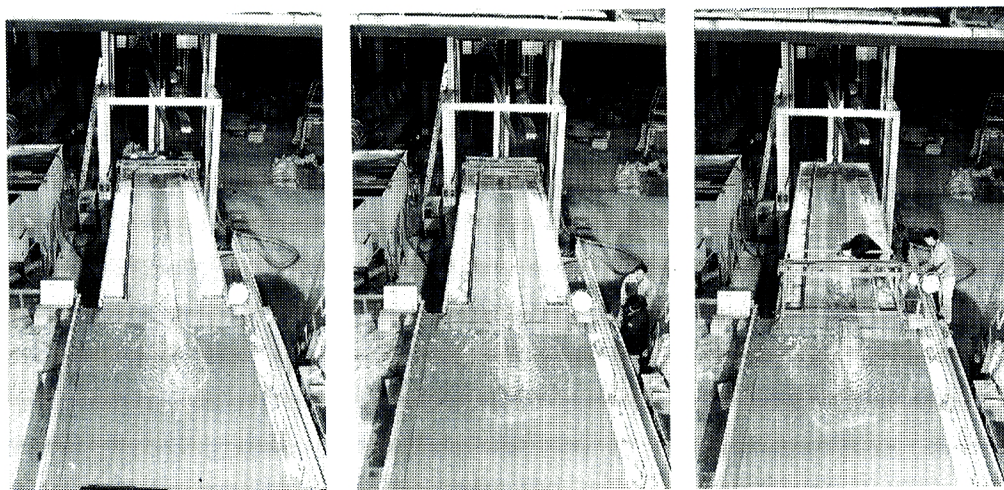


Photo 11. Exmermental views of channel process with drift wood in run 1.

水流にはわずかな蛇行が観察され、横断形状にも $x = 5.5 \text{ m}$ よりも下流では路床形状のわずかな凸部が中央線の左右に交互に現れていて、通水後の路床に見られた未発達な交互砂州に対応し、側岸の肩の位置にも若干の蛇行の生じていることが読み取られる。しかし、全体的には、Photo. 11のように、通水終了時まで流路の平面形状は直線状である。

一方、流路下端から氾濫原にかけての個所では流砂がほぼ円形上に堆積し、その堆積部上には少数の流木が存在するのみで、この部分の水流の流送能力はかなり高いと思われる。

Run 2では、Run 1と比べて小流量であるので、Photo. 12のように、側岸侵食速度が非常に低下し、

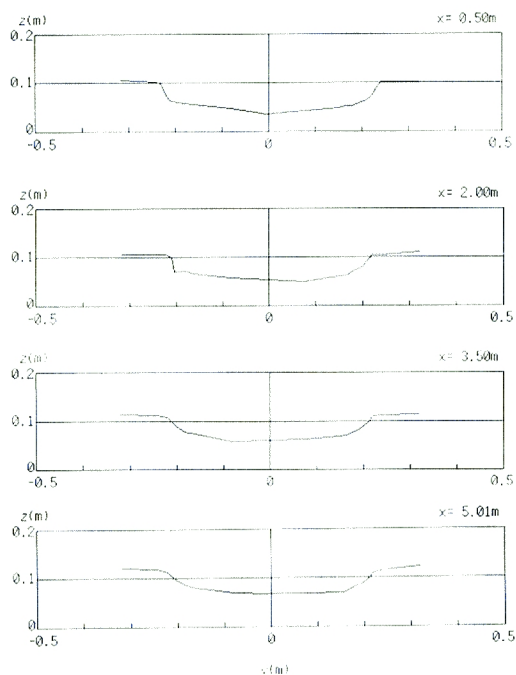


Fig. 20. Examples of the cross sectional shapes at the final stage in run 1.

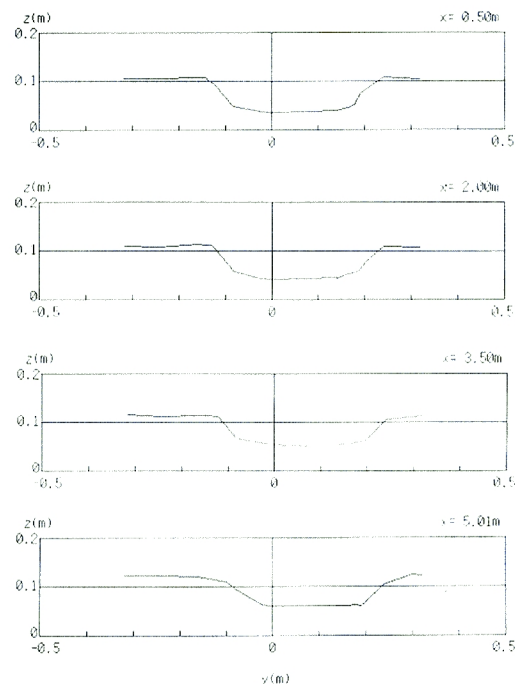


Fig. 21. Examples of the cross sectional shapes at the final stage in run 2.

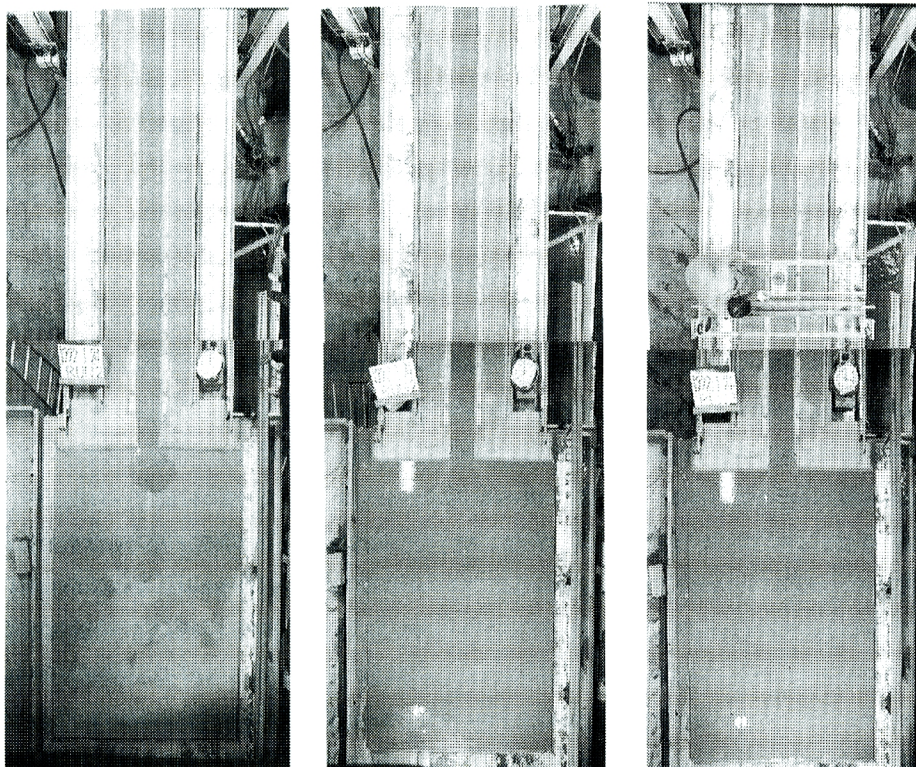


Photo 12. Exmerimental views of channel process with drift wood in run 2.

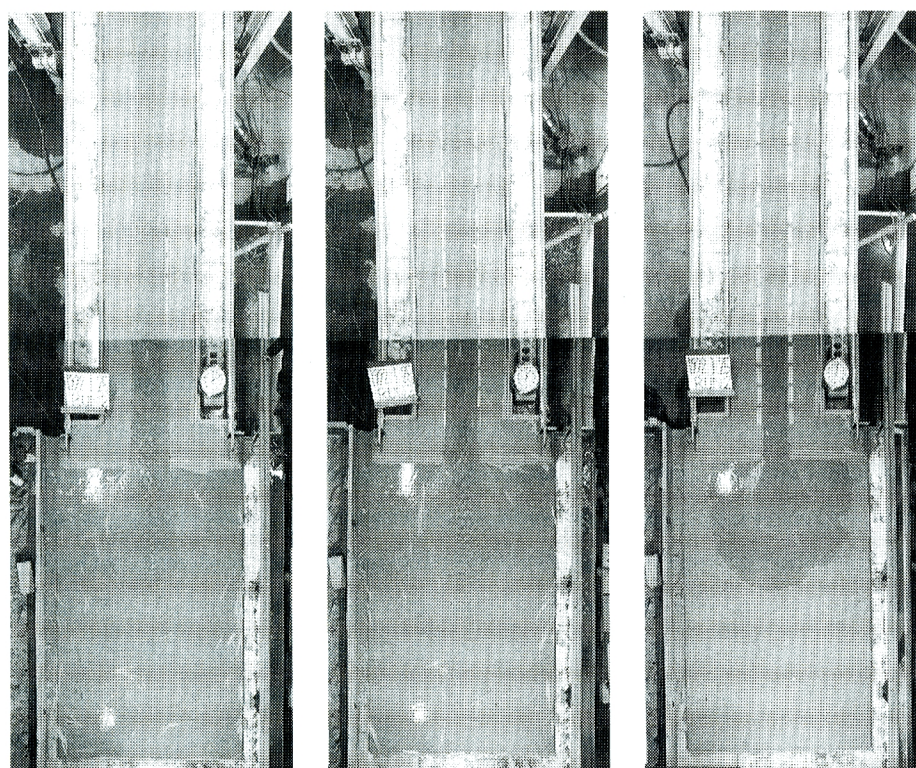


Photo 13. Exmerimental views of channel process with drift wood in run 3.

側岸上の流木配置密度を約5倍にしたにもかかわらず、流水中に取り込まれる流木はかなり少なくなっている。前節の計測システムで測定されたRun 2の横断形状はFig. 21に示した例のようである。同図では、制御プログラム中に存在していたバグのために、流路は中心から幾分ずれてプロットされているが、やはり側岸侵食は進んでおらず、ほとんど初期の台形形状が残り、交互砂州も極薄いものしか生じていない。また、側岸の傾斜は低下背水となる下流において上流よりもやや急となっている。また、Run 2では、水流の流送能力も同様に低く、氾濫原まで達する流木は下流区間で取り込まれた数本のものしかない。ほとんどの流路内に堆積した流木はRun 1の場合と同じく、軸を流れ方向に平行に近づけている。

Run 3では、流速がRun 2に比べて速くなり、Photo. 13に示されているように、河道部の水面にはRun 1の場合に近い波が立っている。通水中期からは河道部下流端の出口から氾濫部にかけて反砂堆状の弱跳水が認められ、河道区間の水面波は水路幅の3~4倍程度の波長の蛇行状況を呈している。しかし、側岸の平面形状は直線的であって、水面波の蛇行の影響は認められない。流路に取り込まれた流木モデルは、軸が水流とかなりの角度をなしている場合は流送速度が高く、平行に近い場合では緩やかに流送されたが、そのまま埋没されていくものはみられなかった。

このRun 3では、計測プログラムのバグが取り除け、測定結果はFig. 22に示すように、中央軸($y=0$ m)に対してほぼ左右釣り合っている。横断形状は側岸侵食性流路特有の下に凸な形状をしており、明確ではないが、 $x=5$ mから下流の路床中央部の傾きからは、交互砂州が形成されているものと思われる。また、水路部の上流から中流では側岸斜面はなだらかであるが、下流では側壁が切り立っており、流路幅も若干広くなっていて、水位あるいは水深変化の影響が考えられる。

このように、Run 3では、側岸の侵食速度もRun 1の場合に近く、通水終了までに8割ほどの流木が流水中に入り、そのうちの大半が氾濫部末端の仕切壁の付近まで達して堆積し、円形状の土砂堆積域には滞留する流木モデルは全く認められなかった。これは、明らかに流木モデルの方が土砂よりも流送されやすいことを意味している。

VTR記録によれば、水流に流木モデルが取り込まれていく過程は次のようである。拡幅が進み、流木モデルの一端が水面下に入ると比較的速やかに全体が水面下に滑落し、上流側の先端が先に落ちていた場合には流木モデルがモーメントを受けて回転し、迎え角が増大して一気に流送されていく。一方、下流側が先となった場合は、そのまま側岸に沿って軸を流れに平行にしたままゆっくりと沈みながら流送されていくことが多い。

(b) 河床・水位・水深の流下方向変化

Fig. 23(a)~(c)に初期と最終時点の水面形、中央線上の河床高及びそれらの差から求めた水深をそれぞれに示している。

Run 1の初期では水面波の影響で水深変化に凹凸があるが、水面形はほぼ河床に平行で、水深もほぼ一定の等流状態が明らかである。しかし、最終時点では下流区間で流下方向に水深が減少し、氾濫部への流出に伴う低下背水状態となっている。また、拡幅に伴って河床は約2 cmと著しく上昇しているが、水位

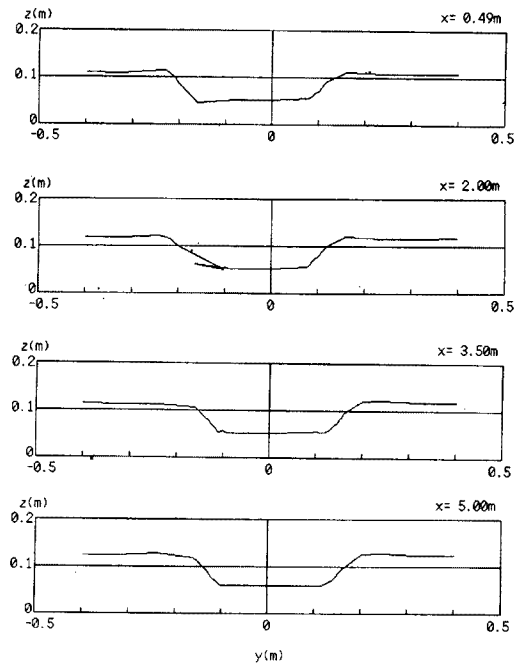


Fig. 22. Examples of the cross sectional shapes at the final stage in run 3.

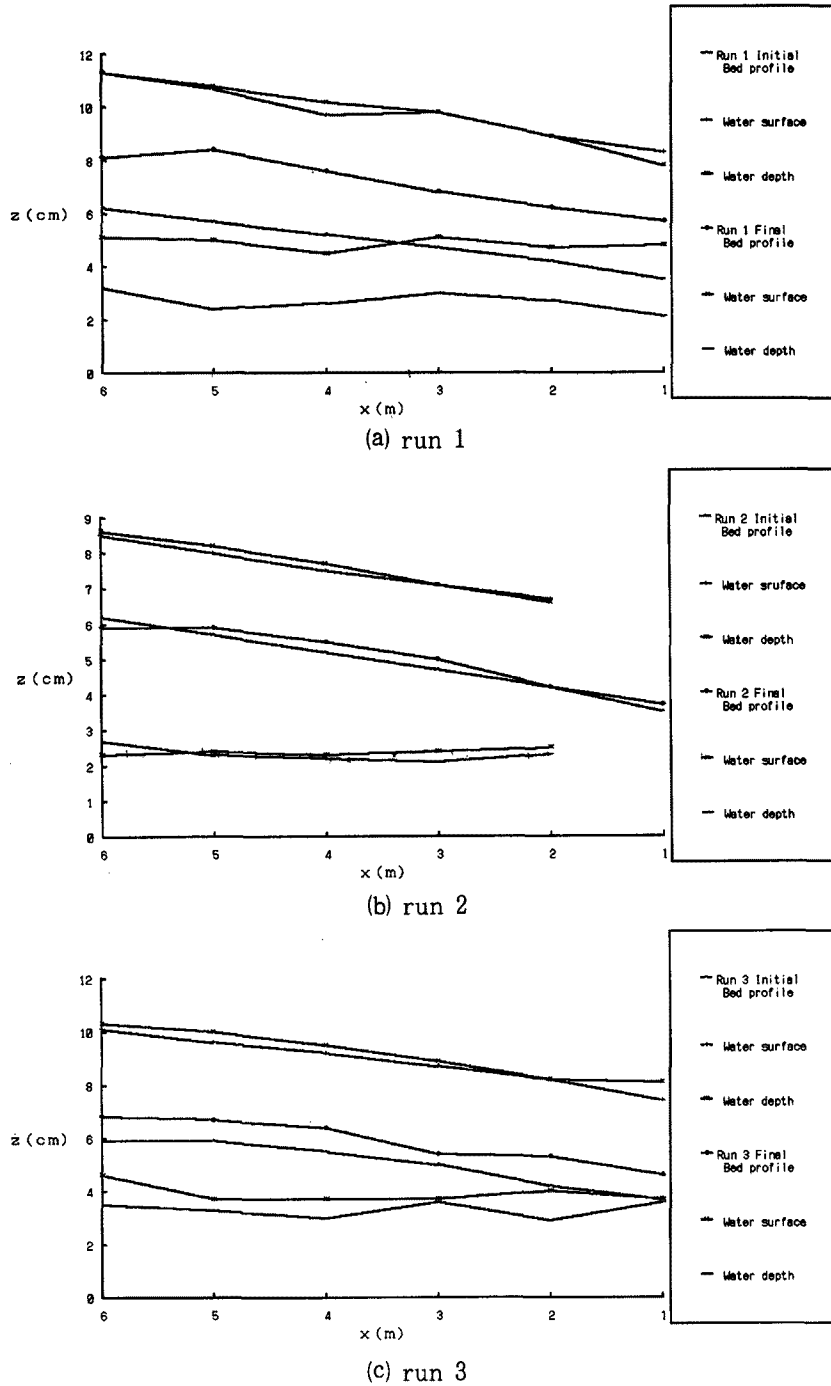


Fig. 23. Longitudinal profiles of water surface, stream bed along the centerline and water depths.

には変化がないので、水深が河床上昇にはほぼ等しい量だけ減少している。

これに対し、Run 2 では流れが穏やかで、水位は直線的に変化し、顕著な河床上昇が生じていないために水深の時間的変化も小さく、水路拡幅が僅かであったことに対応している。一方、通水終了時には上流部で河床低下が生じていて河床縦断形状は直線状になっていない。これは、上流からの流送土砂量が少

なかったためと思われる。水深の流下方向変化からは通水中常に等流に近い状態が維持されていたことが判る。

Run 3では、初期の最上流区間に Run 2の通水による河床低下の影響が残っているが、水深変化からは全体的には通水中ほぼ等流状態が維持されていたようである。しかし、時間的には Run 1と同じく、河床上昇量に匹敵する量の水深減少が生じており、流路拡幅の影響が顕著であり、河床及び水位の縦断形状に砂州の影響と思われる波状変化が認められる。

以上のように、いずれの実験にも側岸からの流木の流入や供給に伴う影響はほとんど認められない。これは、流木モデルが突起や凹凸の無い細い棒であって、流水の障害となり難かったことや初期の流路幾何形状、とくに深さが流木モデルの形状に比して十分大きかったことなどが挙げられる。

4. あ と が き

傾斜地域の河道災害にとって重要な役割を果たす流木の影響について、初めに半球粗度路床水路を用い、側壁に突起を設置した場合と設置しない場合を与えて、傾斜地域の河道の流木流送能力と流木群の挙動について実験的に検討した。また、河道に取り込まれる流木の挙動を把握するために、光学三角測量を応用した新計測システムの移動床基礎実験用計測プログラムを開発し、ついで、洪水・土砂氾濫河道実験装置にいくつかの工夫を加えて、流木を伴う河岸侵食と土砂堆積に関する基礎実験を行った。以下に得られた主な結果について述べ、本研究の結論とする。

最初の粗面路床水路における流木流送については、

水深が小さく、給木密度の高い条件下では、流木の比重が1未満であるにもかかわらず、側壁に突起が無い場合でも路床上に流木が堆積し、ジャム化する現象が認められた。一方、水深の大きい条件下では、最大の給木密度でもジャム化現象は生ぜず、粗面路床流路の流木流送能力に何等かの限界のあることが推定される。

浮遊した流木が堆積する場合は、流下速度の低下した流木群の下部に上流からの流木群が潜り込んで積み重なる場合しかなく、このような流木群内の相互あるいは次の流木群との相互干渉がなければ、一様な粗度河床における流木群の堆積は生じない。

一方、アクリル角棒のような水流に沈み易く、角のある流木モデルの場合には、水流よりも移動速度が低く、流れに対して抗力を減じるように挙動して、比較的低流速域に溜まり易い傾向にある。

また、側壁に突起のある場合には、広い水深・流量範囲に対して堰止め現象が発生し、これより、流木の存在する河道にとって、側岸部の凹凸が流木の疏通を大きく阻害し、洪水流の堰上げ・溢水氾濫を招く危険性の高いことが類推される。

以上の実験観察から得られた流木の流下に関する定性的な特徴について、今後、構造物が無い場合における粗面河道の流木容量を明らかにするなど、定量的な考察を加えていくことが基本的な課題となる。

一方、新たに開発したモータードライブレーザーセオドライト及び電子セオドライトを用いた三角法による光学式3次元河床測定システムについては、電子セオドライトの視準作業の効率化を図るために、セオドライトのエルボーアイピースに小型 CCD カメラを組み込み、レーザースポットと十字線を TV 画面にモニターできるようにし、作業労力を大幅に軽減することができた。

ついで、水路基準点の測角値から両セオドライトの位置を算定し、実験装置上に設定した測線に沿って流路の横断形状を測定していく計測プログラムをマイクロソフト Quick Basic Ver. 4.5 によって作成した。このプログラムでは、横断形状の変化に合わせて横断方向の測定ピッチを細分化して補完測定をするよう工夫がなされている。

洪水・土砂氾濫河道実験装置の水路勾配を 1/200 とし、流木モデルとして 0.2 m 長の 5 mm 角アクリル

棒を用いた流木を伴う側岸侵食実験では、軸を水流に平行にした側岸上の流木が水流中に取り込まれる過程が観測された。すなわち、流木流送は、上流側先端が先に入った場合は一気に、下流側の場合は軸を平行にしたまま河岸斜面上を徐々に運搬されていくような過程をたどる。

側岸上の流木配置密度にかかわらず、流木は側岸近くに少数が堆積したり、側岸近傍を緩慢に流送される場合があるが、それらの大半は軸を水流に平行にするために、側岸侵食への大きな影響は認められなかった。このように、流木配置密度の比較的高い場合でも、流木の流送・堆積にかかわらず、通常と同様の側岸侵食過程が生じると指摘できるが、これは、使用した流木モデルが枝条あるいは樹根部の無い棒状のものであったことや、側岸斜面が高くて拡幅速度が相対的に低くなったことによると考えられる。

今後、整備した実験装置及び新しい計測システムを用いて実験を行い、山間河道から流送されてくる流木量について考察する予定である。

最後に、実験の遂行と図面の整理には明石工業高等専門学校の新田佳一助手に協力して頂いたことを付記し謝意を表します。また、本研究は、平成3年度文部省科学研究費補助金重点領域研究(1)「自然災害」(研究代表者 京都大学防災研究所 高橋 保教授, 課題番号 03201129)から多大の補助を受けていることを記して、関係各位に感謝の意を述べます。

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，1978，107 p.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.