

## 1. 研究目的

米国西海岸地域は、1996年2月に大規模な豪雨に見舞われ、山間地では崩壊や土石流が多発した。オレゴン州西部の H.J. Andrew 実験林の Lookout Creek (流域面積: 67.6km<sup>2</sup> 平均勾配: 2.2度) 中流域の交互砂礫堆区域では、土石流によって発生した複数の流木(流木径、流木長の最頻値の範囲は各々0.5-1.5m、10-25mで日本の流木よりもかなり大きい)が、段丘上の際や砂礫堆の前縁部において、流水の主流方向とほぼ平行にかつ互いにほぼ平行に縦断的に連続して堆積する現象が顕著であった(現地では woody levee と呼んでいる。以下、流木堤防と言う)。これらの流木堤防は、出水規模によっては、再流出する危険(1996年2月の出水では、過去の流木堤防が破壊・流出し、下流域で橋梁の閉塞や家屋の一部破壊等の被害が生じた)がある。流木による災害対策を講じる上で、その水理学的な形成・最移動条件を明らかにする必要がある。現地での流木単体の運動・堆積特性については既に幾つかの研究が成されているが、流木堤防の形成条件については、水理学的な情報(水位、ハイドロ、洪水痕跡、流れの観察記録)がほとんど存在せず、未だにわずかな定性的記載に留まっている。

本研究では、水理模型実験によって流木堤防の形成条件を考察した。

## 2. 流木堤防の形成に関する模型実験

## 2.1 実験条件と方法

図-1に実験装置を示す。幅0.4m、長さ9mの直線流路を溪流本川、幅0.4m、長さ2mの直線流路を溪流支川とみなして、支川が直角に本川に合流する場合を想定した。溪流本川、溪流支川の勾配は各々、2.5度、17度である。溪流本川には、7cmの厚さで砂と礫からなる河床材料を敷き詰めた。その粒度分布は、D16、D50、D90が各々、2mm、8mm、20mmである。

本川の流量は2000cm<sup>3</sup>/sec(一定)とした。ちなみに、この流量条件では、給水直後の本川水位は1.3cm、フルード数は1.1、摩擦速度は7.5cm/sec、無次元掃流力は0.043である。流路幅Bに対する水深hの比は30.8であり、池谷ら<sup>2)</sup>が示した単列砂礫堆の形成条件  $10 \leq B/h \leq 40$  の領域に含まれる。給水開始から約10分後には、明瞭な交互砂礫堆が形成される。このようにして、一度、形成された砂礫堆ができるだけ再移動しないように、給水開始から実験終了までの間、上流端から適当な量の砂を与えた。

支川の上端からは本川と同一の河床材料からなる土砂と水(土砂: 6400cm<sup>3</sup> 水: 9600cm<sup>3</sup> 土砂濃度40%)と下記に示す流木模型を一緒に流して本川との合流部に流入させる。ちなみに今回の実験では、土石流が本川に流入することによる本川水位の急激な上昇、本川の閉塞が生じないように土砂量を設定した。

流木模型は、根無しモデルとして直径12mm、8mm、長さ30cm、密度0.7g/cm<sup>3</sup>の丸棒2本を用いた。また、根つきモデルとして、先の直径12mmの丸棒に根系モデル(直径2.4cm、厚さ0.6cm、密度0.7g/cm<sup>3</sup>)としての木製円盤をくぎで打ち付けたものを2本用いた。ちなみに、静水中での流木模型の浮遊限界水位は、根無しモデルは直径12mmが10mm、直径8mmが6.5mm、根つきモデルは15mmである。

実験は流木を流さない場合を2ケース(予備実験)、上記の3種類の流木模型を流す場合を3ケース(Run1-3)、計5ケース行った。本川に所定の流量を与え、交互砂礫堆を流路内に形成させた後に、支川から流木模型を含む土石流を流して、流木の運動・堆積プロセス、流木堤防の形成プロセスとその分布等を調べた。また、縦断的に地形横断測量、水位、流速等を計測した。

## 2.2 実験結果

図-2にRun-1~3での流木堤防の形成状況ならびに水深hと流木模型の浮遊限界水位<sup>※</sup>hcとの比h/hc(以下、浮遊限界水深比と言う)の分布を示す。Run-1, Run-2では、Lookout Creekでも観察されたように、流木堤防は、砂礫堆前縁部において流れの主流方向にほぼ平行に形成される。またRun-1では、ほとんどの流木の根系は上流側を向いて堆積しているという点においても実現象と調和する。流木堤防の規模(長さ、流木の数)については、Run-1で用いた根系モデル付きの流木模型の方がRun-2の流木模型よりも大きい。その理由としては、根つきモデルの方が浮遊限界水位が高くかつ根系の存在によって抵抗が大きいため堆積しやすいことが考えられる。Run-3では、流木模型の浮遊限界水位が小さいため、流路の全区間に渡って浮遊限界水深比が他の実験ケースよりも大きめであり、ほとんどの流木は下流端まで流出し、流木堤防は形成されなかった。

VTR判読によるとRun-1, 2での流木堤防の形成プロセスは以下のようなものである。土石流によって流木が土砂と共に本川に押出した後、直下の砂礫堆の淵方向に偏走角20-30度程度で流下する。流木群はその過程で互いに衝突・接触しながら速度を減少させ、一部の流木は相対的に流速の小さな領域である砂礫堆前縁部へと移動する。流木が浮遊限界水深比が約1以下の領域に移入した場合は堆積する。<sup>※※</sup>その堆積した流木の主流側での砂礫堆前縁部において浮遊限界水深比が約1以下の領域がスペース的にまだ存在する場合には、先に堆積した流木に隣接して後続の新たな流木が堆積する。そのようにして、複数の流木が砂礫堆前縁部に主流方向と平行して堆積し、流木堤防が

形成される。その直下流の淵を流木が通過する際は、約3~5本の集団で高速で移動する。いずれの流木も主流とほぼ平行して移動しており、淵部を閉塞したり、淵部の断面にひっかかりながら通過することはない。従って、今回の実験条件で形成された砂礫帯の横断的形狀とそこに流入する流木の条件で判断する限りでは、淵のような一種の狭窄部が流木の堆積⇒流木堤防の形成に及ぼす影響は無視できると思われる。流木が淵を通過した後は主流に沿って移動する。その際、直下流の砂礫帯前縁部周辺の速度の小さい領域に移動した複数の流木が浮遊限界水深比が約1以下の領域に移入した場合は、堆積して流木堤防を形成する。

※流木モデルの流水中での浮遊限界水位は、流木に働く流水の流体力や流木の回転による揚力あるいは、流木相互の衝突、流水の乱れ等の影響により、静水中でのそれよりも小さくなるものと思われるが、今回の実験ではそれらの影響を無視している。

※※流木が河床に接触する領域では、浮遊限界水深比以外に、流水による流体力と抵抗力とのバランス<sup>3)</sup>も考慮すべき条件であると考えられるが、今回の実験では砂礫堆前縁部近傍では速度がきわめて小さいのでその影響は考えていない。

### 3. 流木堤防の形成条件

以上のことから、今回の実験条件における流木堤防の形成に影響を与えるファクターとして、流れの強さを表すフルード数  $Fr$  と流木モデルの浮遊限界水深比  $h/h_c$  を考えた。図-3に流木堤防が形成された砂礫堆前縁部と形成されない砂礫前縁部での両者の関係を示す。今回の実験条件では、流木堤防の形成条件は  $Fr$  値として0.4-0.6、 $h/h_c$  値として0.8-0.9、流木堤防の非形成条件は  $Fr$  値が1.4-1.6、 $h/h_c$  値として1.5-1.9となり、両者は明らかに異なる領域に区分されることがわかる。

### 4. 今後の研究課題

今回の実験結果は極めて限定された水理・地形条件での結果である。今後、流木長、根系の大きさ、流木径、流路勾配、流量、流量ハイドロ、砂礫堆の種類と規模、分布、砂礫帯の移動速度等のパラメータを変化させた場合の実験を行うことによって、流木堤防の形成領域、非形成領域をより詳細に検討する必要がある。また、流木堤防の再移動条件についても、現地調査ならびに模型実験によって検討していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 例えば Futoshi NAKAURA, Frederick J. Swanson(1992): Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 18, p43-61.
- 2) 池谷浩、伊巻幹雄(1978): 流路工に関する研究(4) 土木技術資料第1408号 p12.
- 3) 石川芳治、水山高久、福澤誠(1989): 土石流に伴う流木の発生及び流下機構、新砂防 Vol. 42 No. 3(164). p5.

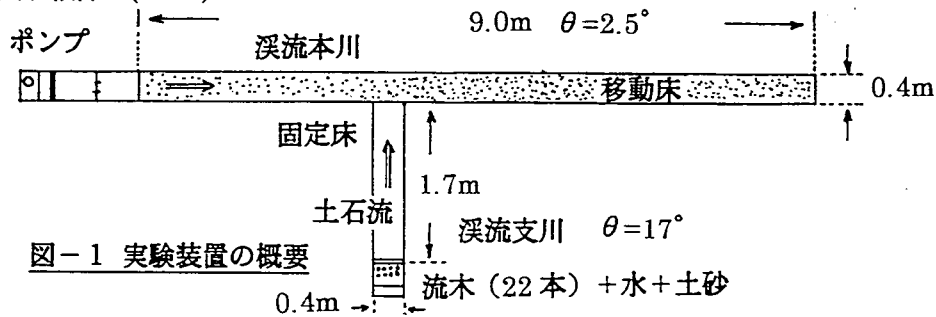
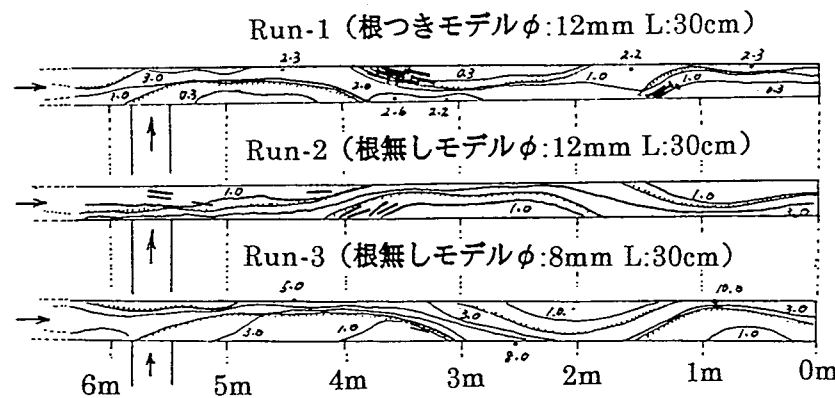


図-1 実験装置の概要



数字は、各々の流木モデルの浮遊限界水位比( $h/h_c$ )を表す。  
(Run-1⇒ $h_c$ :15mm Run-2⇒ $h_c$ :10mm Run-3⇒ $h_c$ :6.5mm)

図-2 各実験ケースでの流木堤防形成条件

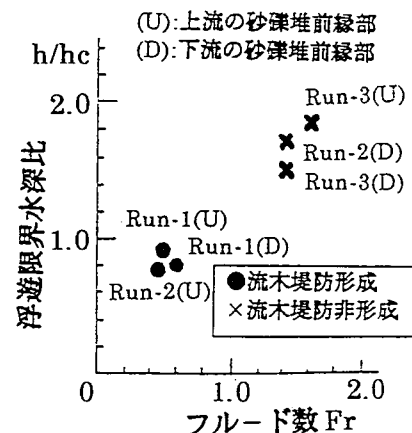


図-3 流木堤防の形成条件