

流木類の流下・堆積とそれらの河道設計への利用

福岡捷二*・新井田 浩**

河川における流木群の流下・堆積を現地調査、大型模型実験、流れの解析によって総合的に調べている。流木類は低水路法線形と堤防法線形との位相のズレ、植生の分布状況、植生高さや水深との関係、流木類の種類、接近流速の大きさ及び洪水時の風の強さに応じた堆積状況を示すことが明らかになった。このことから、流れ場の3次元解析より低水路河岸に向かう流速ベクトルを求め、これと河道における植生の繁茂状況から流木類の堆積場所の推定が可能となった。

Key Words : floating log, accumulation, river vegetation, alignment of low-water channel, effect of wind, measures

1. 序 論

流木には大量に流出するものと、比較的小規模に流出するものがある。前者は山間部での大規模な土砂崩壊や土石流等に伴って発生した倒木及び強風によって生じた倒木が豪雨によって河道に流出してくるものである。この種の流木は長期間にわたって生じ、河川構造物等の管理上、種々の問題を引き起こすことが多い。後者は高水敷上に生育している樹木やオギ・ススキ等の草本類が新たな洪水で河道を流下するものでこれには過去の洪水で高水敷上に堆積していた流木や枯れた草本類の流出も含まれる。通常みられる流木現象は後者に属するものが多い。昭和40年代の始めまで大河川にあっても橋梁の径間が狭かったために、流木が橋脚に大量に引っかかり水流がせき上げられ、氾濫し、大災害が頻発した。当時、これに関連したいくつかの実験的研究が行われた^{1), 2)}。その後、昭和51年に河川管理施設等構造令が策定され、これに基づいて、橋梁の高さや径間の改善が進んだため、大河川ではこの種の流木災害の発生がきわめて少なくなった。しかし中小河川ではいまなお橋脚の径間が狭く高さの低いものが残されているため、流木災害は後を断たないのが現状である。流木はまた、堰、樋門、樋管、水門などの前面に滞留し、構造物の正常な機能を損なったり、洪水の流下形態に重大な支障を生じさせる心配がある。流木災害を減ずるには、山間部での倒木の量を少なくし、生産域の倒木の河道への流出を抑制する施設を設置することが基本的に重要である。これらについては林学や砂防工学の分野で具体化されつつある³⁾。

しかし河道へ流出する流木を完全に止めることは不可

能である。このため、河道においても流木の流下形態を調べ、流木が害を起こさないような河川施設や河道形状等を検討していくことが必要である。流木が引き起こす他の問題に流木の処理費用がある。洪水後に河道に残された大量の流木類は、河川の正常な機能や景観を損なうために、それらを集め、ゴミとして焼却・撤去するなどの処分を行っている。これに要する費用は毎年かなりの額に達しており、流木処理の費用を少なくするための対策が求められている。

本文では、高水敷上に植生が繁茂している河道での大型模型実験とそこでの流れの3次元解析を行い、流木の流下、堆積に及ぼす植生分布と河道法線形の関係を明らかにし、流木類の堆積場所の推定法を提案する。さらにこの結果を多摩川、長良川での高水敷上の流木堆積の実測結果と対照し、実験・解析による考察の妥当性を検証する。最後に、得られた知見を河道設計に利用していく手法を検討する。

2. 大型水理模型実験

本実験は、河道形状、流れ場、植生の分布と流木類の堆積状況を関係づけるとともに流木類の流下形態を明らかにすることを目的としている。

実験に用いた水路は建設省土木研究所に設けられた水平縮尺1/80、鉛直縮尺1/40の利根川固定床模型である。検討対象区間は120 km~128 kmである。高水敷上には、現地の植生状況に基づき決められた植生模型が植えられている。植生は、高さ方向には水路とほぼ同縮尺、平面的には間隔が10 cm程度にほぼ均一に植えられている。現地植生は草本類と樹木群から構成されている。草本類と樹木群の大きさ、密度によりそれぞれ次の①、②と③、④の形状特性をもつ植生模型が用いられた(写真-1)。

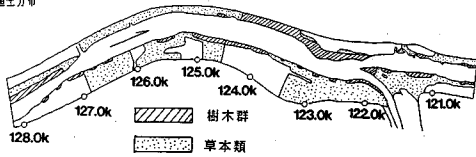
- ①ブッシュ状のもの
- ②針金状のもの

}……草本群模型

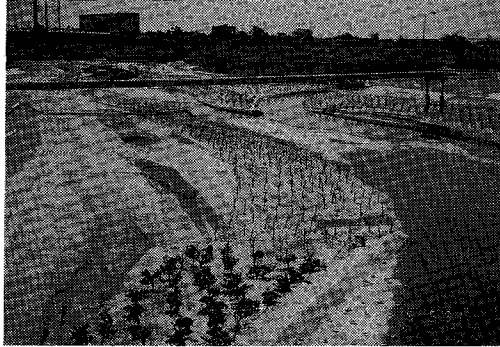
* 正会員 工博・Ph. D. 東京工業大学助教授
工学部土木工学科(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

** 正会員 工修 建設省近畿地方建設局
阪神国道工事事務所調査二課

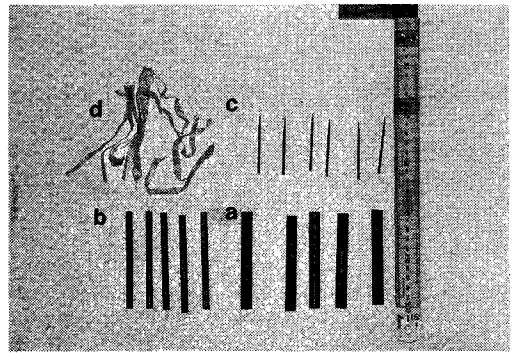
植生分布



図—1 河道の植生分布



写真—1 水路内に植えられた植生模型



写真—2 実験に用いた流木模型

表—1 実験ケース

	流量 (m ³ /s)	風の有無
実験 1	4 000	無
実験 2	6 000	無
実験 3	6 000	2~3m/s、右岸→左岸
実験 4	9 000	無
実験 5	1 1 600	無

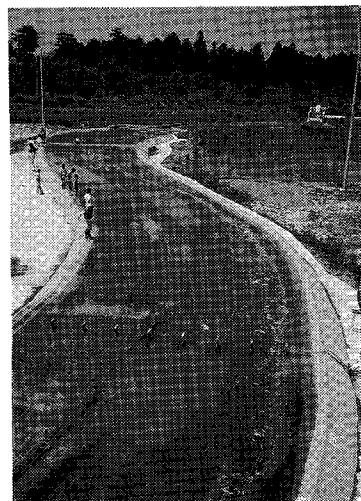
表—2 流木類模型の諸元と投入量

種類	諸元 (mm)	投入量	
木製の模型	a	φ = 10、L = 100	300本
	b	φ = 6、L = 100	300本
	c	φ = 3、L = 60	750本
d. ビニールひも	L = 100	※	

③幹の柔らかいもの(葉が少しある) } ……樹木群模型
 ④葉が繁っているもの }
 これらを現地に準じて適切に配置することによって、観測区間の粗度係数を現地の粗度係数とほぼ一致させている。これによって現地と模型の水面形はほぼ一致している。植生の分布状況を図—1に示す。

実験ケースを表—1に示す。流量は現地スケールで4 000 m³/s~11 600 m³/s(既往最大流量)までの5種類について、定流で実験を行った。実験3は流木の挙動に対する風の影響を調べるために行った。

流木類は上流山間部で発生したと想定される幹の直径が数cm~数10cmの木と、河岸及び高水敷から流出したと想定される草本類(オギ等)とが互いに絡み合った状態で流下し堆積しているものが多い。実験では現地におけるこのような流下・堆積状況を参考にし、また水路に設置した植生模型の諸元を考慮して写真—2に示すような4種類の流木類模型を製作し用いた。流木模型諸元と投入量を表—2に示す。ビニール紐は、洪水中に流下するオギ等の草本植物に相当する。投入方法は上流側128 km地点で低水路の水面全体にわたって面源として連続的に投入した。投入された流木類模型のうち堆積せずに流れ下るのが水路下流端にすべて達した後通水を止め、流木類の堆積場所及び堆積量を流木の種類ごとに測定した。実験の様子を写真—3に示す。



写真—3 実験状況および流木類の捕捉状況

3. 実験結果とその考察

(1) 実験結果

a) 水位及び流速の実験と解析の比較

各実験ケースの水位を代表断面の横断面と共に現地ス

ケールで図—2に示す。

4 000 m³/sは低水路満杯より若干多い流量、11 600 m³/sは植生のほとんどが水没する流量である。6 000 m³/sはほとんど全ての植生が一部水に浸っている流量である。

実験2と実験5での121 km~124 kmにおける表面流

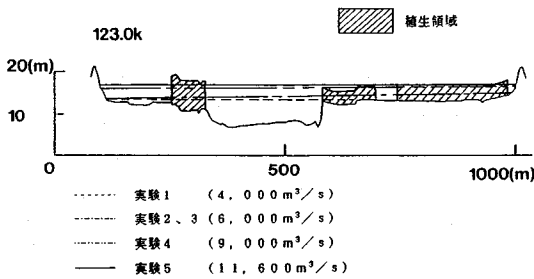


図-2 各実験ケースでの水位と植生高さの関係

速ベクトルの実測値および等流速線(鎖線)を図-3に示す。図中の数値は測定値を現地スケールに換算した値である。この図から、流量が増大するとよく知られているように流速ベクトルの方向が河道全幅にわたってほぼ堤防に沿った方向になることがわかる。

次に流木の流送・堆積場所を見積るために流れ場の3次元解析を行う。計算方法を以下に示す⁴⁾。

実河川は蛇行部を有するため流れの解析には直交曲線座標系を用いることにする。主流方向を s 、これと直角方向を n 、鉛直方向を z 方向とする。流れの基礎方程式は以下に示すような連続式、 z 方向に静水圧分布を仮定した3次元の運動方程式とから構成される。

(連続式)

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

(運動方程式)

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \dots\dots\dots (4)$$

ここで u, v, w はそれぞれ s, n, z 方向の流速成分、 p は圧力、 r は曲率半径を示す。渦動粘性係数は、 $\epsilon = \kappa u_* h / 6$ を用いている。計算では z 方向の流速 w は連続式を用いて流速 u, v により表現し、解く。 u, v の水深方向の分布形は式(5)のように与える。

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_0^3 u_m \cos m\pi z / h \\ v &= \sum_0^3 v_m \cos m\pi z / h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

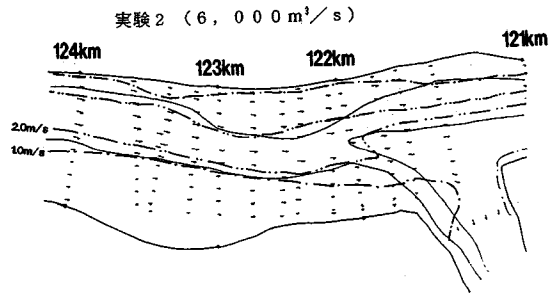
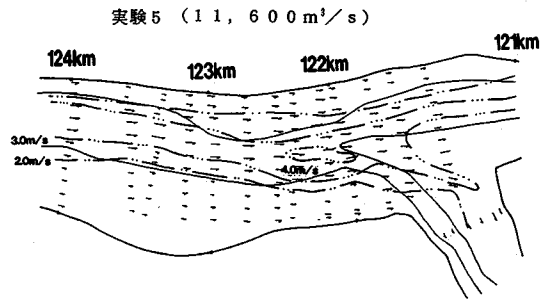


図-3 表面流速ベクトルの実測値

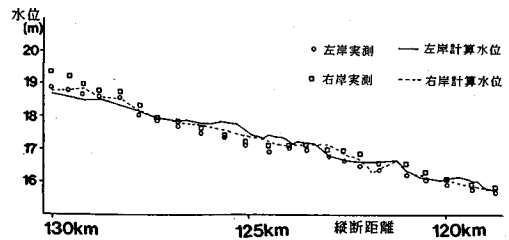


図-4 縦断水位の計算値と実測値との比較 (流量 11 600 m³/s)

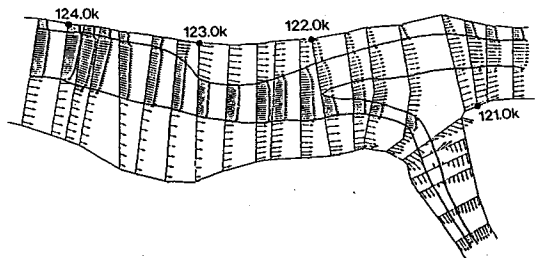
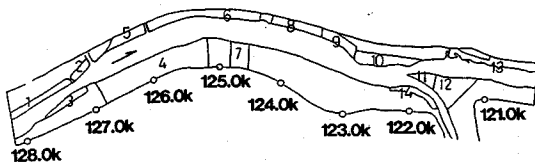
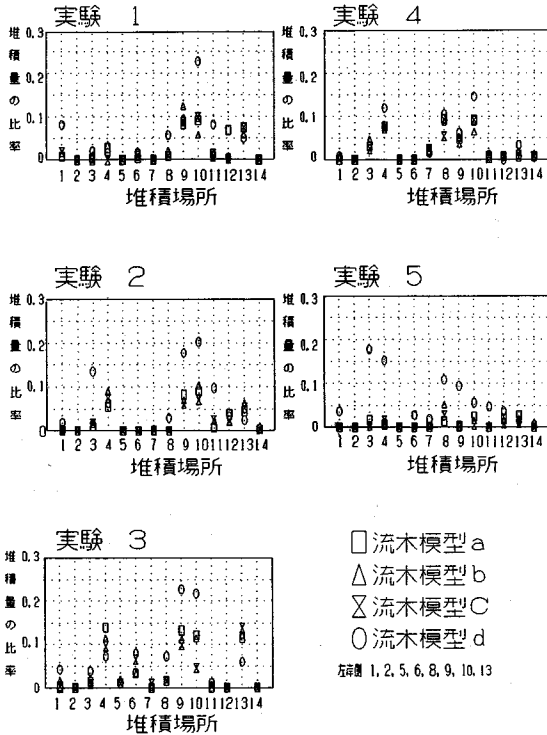


図-5 表面流速ベクトルの計算値 (流量 11 600 m³/s)

式(5)中の $u_0, u_1, u_2 \dots, v_0, v_1, v_2 \dots$ は式(5)を式(1),(2)に代入し $\cos(m\pi z/h)$ ($m=0, 1, 2 \dots$) を重みとして水深方向に積分し、得られた方程式を差分化することによって求めている。縦断水位の計算値と実測値を比較したものを図-4に示す。水位の計算値は実測値とほぼ一致していることがわかる。計算に用いた低水路粗度係数は $n_0 = 0.016$ 、高水敷粗度係数は $n_f = 0.025 \sim 0.035$ である。昭和57年洪水(流量 11 600 m³/s)を対象とした表面流速ベクトルの計算結果を図-5に示



図中の番号は堆積場所を示す
 図—6 流木類の堆積場所



図—7 流木類の堆積場所と堆積量の比率との関係

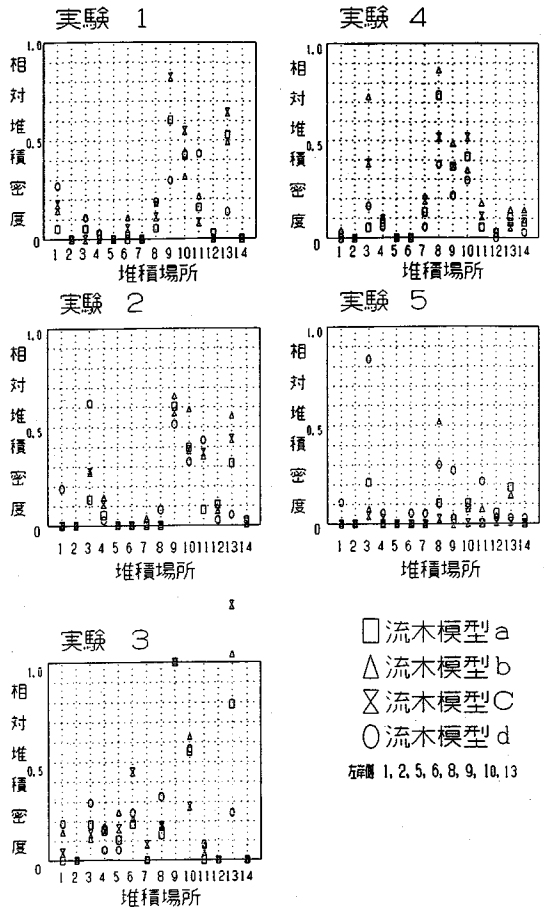
す。

図—5と図—3の実験5の結果と比較すると、樹木群などの存在のため高水敷上の流速に多少の違いがみられるが、計算値は実験値をよく説明している。以上の結果より、計算が流れ場を説明するのに十分な精度をもつと判断される。

b) 流木類の堆積場所

流木類の堆積が見られた場所を図—6に示す。図中の数字は堆積場所を示す番号である。

図—1の植生分布と対照すると、流木類の堆積場所は植生の存在位置とほぼ一致していることがわかる。ただし、植生が存在している領域であっても122~123 km右岸のように低水路の法線形との関係から堆積が生じていない領域もある。実験ケースごとに全投入量に対する各堆積場所での堆積量の比率を図—7、相対堆積密度を図—8に示す。ここで相対堆積密度は、実験3での堆積場所9の堆積密度(堆積量を堆積場所の面積で除した値)



図—8 各場所での流木類の堆積密度

を1とした場合に対し相対値で示している。これらの図から風の影響がほとんど無かった実験1, 2, 4については流量によらず、3及び8~11で示された場所で堆積量の比率、相対堆積密度ともに大きな値を示していることがわかる。この位置は流れが高水敷に乗り上げ、かつ高水敷植生が多い場所である。ほとんどの植生が水没している実験5では、実験1, 2, 4に比して堆積密度が小さく、流木類の多くは堆積せず流下している。また、風が右岸から左岸に2~3 m/sで吹いてきた実験3の結果を見ると、明らかに流木類は風の影響を受けながら流下し、流下距離が大きくなるにつれて風下側の左岸側に堆積が集中している。このことから、流木類の流下、堆積を考える上で、風の影響を考慮しなければならないことがわかる。

以上から風が吹いていない場合には流木類の堆積が生じ易い所は以下の特徴を持つ場所であるといえる。

- ①高水敷植生が発達し、植生が水没していない場所
 - ②流速の速い低水路流れが高水敷に大きく乗り上げる場所及び乗り上げた流れが低水路に戻る場所
- 以下に①、②が流木類の堆積に与える影響の程度及び

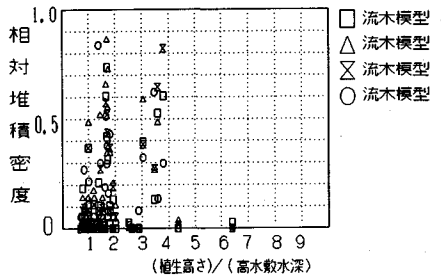


図-9 高水敷水深で無次元化した植生高さと堆積密度の関係

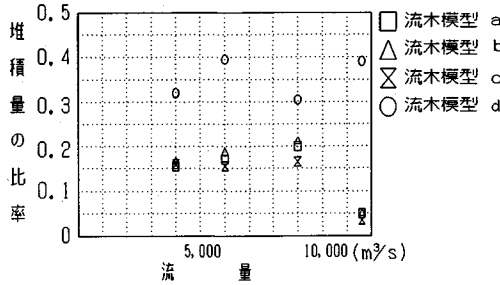


図-10 流木別にみた流量の変化に伴う堆積量の比率の変化

水面を吹く風が堆積にどのように影響しているのかについてさらに考察する。

(2) 流木類の堆積に影響を与える要因

a) 植生高さに対する水深の大きさ

高水敷上の水深で無次元化した植生高さと相対堆積密度との関係を図-9 に示す。

この図を見ると (植生高さ)/(高水敷水深) がほぼ 0.8 程度から堆積が生じ、1.7 程度まで堆積密度が上昇する。この比は 4 程度まで比較的大きな値をもつようである。流木種類別にみた全投入量に対する堆積量の比率の変化を流量 (水深) の関数として図-10 に示す。

この図から、円柱型の流木模型 a, b, c については 9 000 m³/s を越える流量において堆積量が著しく減少しているが、草本類模型 d については流量による堆積量の差はほとんど見られない。これは以下の理由による。すなわち、流量が 9 000 m³/s を越えると (植生高さ)/(高水敷水深) となる場所が多くなり、表面を流れる流木は水没植生の影響を受けにくくなるため、堆積量は減少する。しかし、草本類模型であるビニールひもは流れの変化に敏感に反応し、水面より若干下を流れる傾向がみられる。また、その形を自由に変えられることから、植生が水没する状況においても植生にトラップされ易い。これはオギが樹木群に捕捉されている現地の状態に類似しており、オギの流下形態をよく模擬している。

b) 低水路河岸に対する主流の流速ベクトル

3. (1) b) において、低水路流れが高水敷に乗り上げ、低水路に戻る区間でかつ植生が密に生えているところで流木類の堆積量が多くなっていることを示した。いま流

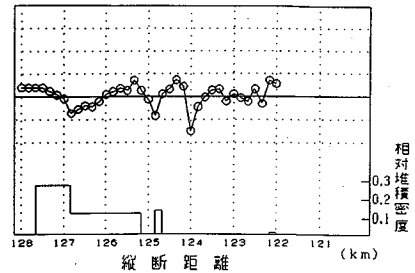
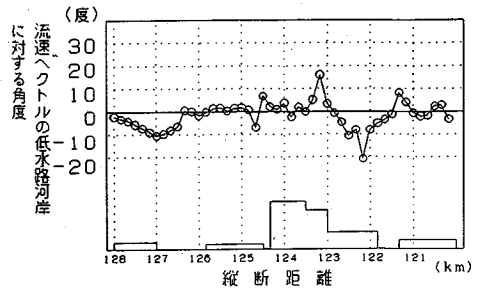


図-11 流速ベクトルの低水路河岸に対する角度と相対堆積密度の関係 (流量 11 600 m³/s)

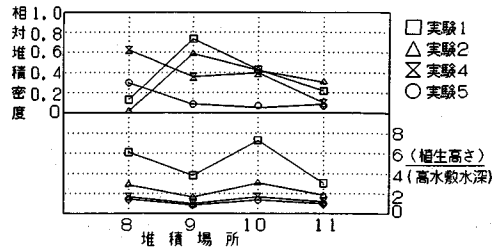


図-12 流量変化に伴う各堆積場所の相対堆積密度と高水敷水深に対する植生高さとの関係

れの特徴を低水路河岸での表面流速ベクトルで代表させ、この流速ベクトルと高水敷上への流木類の堆積量の関係を調べる。

流速ベクトルの低水路河岸に対する角度と相対堆積密度の関係 (実験 5 の場合) を図-11 に示す。流速ベクトルの低水路河岸に対する角度は、図-5 に示された三次元計算の結果を用いている。ここで、流速ベクトルの方向は低水路河岸に対して高水敷側に向かうときを正、低水路側に向かうときを負とする。

図-11 を見ると、左岸側について高水敷方向へ向かう流速成分が継続して現れている区間 (123.5 km ~ 125.5 km)、また流速ベクトルの方向が高水敷側から急激に低水路側に変化する区間 (122 km ~ 123.5 km) において明らかに相対堆積密度が高くなっている。右岸側については、上流側 (125.5 km ~ 127.5 km 付近) を除いて流速ベクトルの方向が小刻みに変化しており、流れが完全に高水敷に入り込んでいない。そのため流木類の堆積も左岸側に比較して少なくなっている。

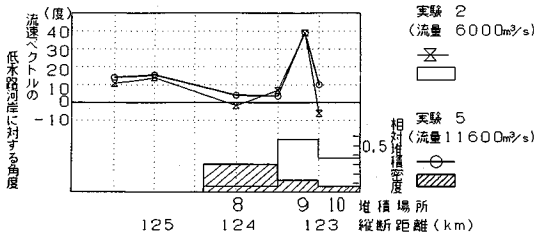


図-13 低水路河岸に対する流速ベクトルの角度

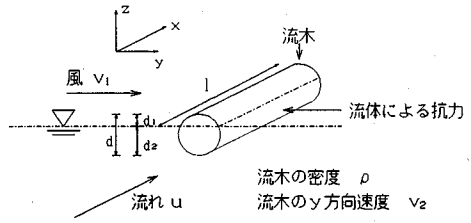


図-14 流木が風から力を受けている時の状況

表-3 各場所の接近流速

場所	実験2	実験5
8	1.42m/s	1.90m/s
9	1.90	2.21
10	1.85	2.56
11	2.02	3.16

つぎに堆積量，密度共に大きな値を示している堆積場所8～11（左岸側）について堆積量を支配する他の要因である植生との関係でさらに調べてみる。

まず図-12に流量の変化に対する各場所での相対堆積密度と（植生高さ）／（高水敷水深）の関係を示す。

流量の増加に伴い，それぞれの堆積場所での相対堆積密度が複雑に変化し，その大きさに逆転が生じているところもある。特に堆積場所8は他の場所と傾向が大きく異なる。流量が増加すると水深が増加し（植生高さ）／（高水敷水深）の値が減少しているにもかかわらず，相対堆積密度は逆に増加している。この理由を明らかにするため堆積場所8～10の区間において図-3に示された実験2と実験5の実測流速ベクトル値を用い，検討した。その結果を図-13に示す。

この図から，実験5の方が実験2の場合と比較して123Kより上流側において流速ベクトルの乗り上げ角度が大きくなっており，これに対応して実験5の堆積量のピークが上流側にシフトしている。この事は流量の増加に伴い，より上流側から高水敷に乗り上げる強い流れが生じ，流木類の流下経路もこれに追従していることを示している。

堆積場所11は分派点付近で，かつ，この位置は流路の中心に位置している。（植生高さ）／（高水敷水深）も1.0以上であり植生が水没していないにもかかわらず，相対堆積密度はそれほど大きな値を示していない。特に6000 m³/s から9000 m³/s にかけては急激に堆積密度が減少している。この理由は地点11の直上流の接近流速と関連があると考えられる。

表-3は実験2と実験5の各場所での接近流速を示す。

堆積場所11の接近流速は他の堆積場所に比較して大きな値を示し，特に実験5は大きい。このことより，高水敷へ向かう接近流速の大きさもまた流木類の堆積に影

響しているといえる。堆積場所10においても9000 m³/s から11600 m³/s にかけて接近流速の大きさに起因した同様な堆積密度の減少が生じている。これらの結果からあるまとまった量の堆積が生じるためには流速が大きすぎないことが必要となる。堆積を起こす流速の上限値は植生の大きさや分布も関係するが，本模型実験から判断して流速の上限値はおおよそ2.5～3.0 m/s（現地スケール）程度であると推定される。

c) 風の影響

3.(1)b) で見てきたように風が右岸から左岸に2～3 m/s で吹いてきた実験3では流木類は流下につれてそのほとんどが左岸高水敷上に堆積した。また長良川の現地観測でも風の影響がきわめて大きいことが4.で示されている。本節では風の作用をうけて流木が河岸に到達する経路と時間を見積ることにする。図-14に示す状況を設定し，一般性を失わない程度に単純化した解析を行うため，以下の仮定をおく。

- (1) 風は主流に直角に吹いている。
- (2) 流木の長軸は主流に平行である。
- (3) 流木の主流方向流速は水の流速と同じである。
- (4) 流速の横断方向成分は小さく無視できる。
- (5) 仮想質量は無視する。

この仮定を適用すると流れに固定した座標において，川幅方向の流木の運動方程式は次のようになる。

$$m \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_1 \cdot A_1 \cdot (v_1 - v_2)^2 - \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2^2 \dots \dots \dots (6)$$

ここに m は流木の質量で $m = \rho \pi d^2 l / 4$ (ρ : 流木の密度， d : 流木の直径， l : 流木の長さ)， ρ_1, ρ_2 はそれぞれ空気，水の密度， A_1, A_2 はそれぞれ風，流水が作用する投影面積 ($A_1 = d_1 \cdot l, A_2 = d_2 \cdot l$)， v_1 は風速の y 方向成分， v_2 は流木の y 方向速度を示す。

一般的に v_1 に比較して v_2 は十分小さい。この時，式(6)の右辺第1項は v_1 のみの関数となる。式(6)を v_2 について解くと式(7)を得る。

$$v_2 = c_1 \cdot \frac{\exp(c_2 \cdot t) - 1}{\exp(c_2 \cdot t) + 1} \dots \dots \dots (7)$$

ただし， $c_1 = \{ \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1^2 / (\rho_2 \cdot A_2) \}^{1/2}$

$$c_2 = (1/m) \cdot (1/4 \cdot C_D^2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot v_1^2)^{1/2}$$

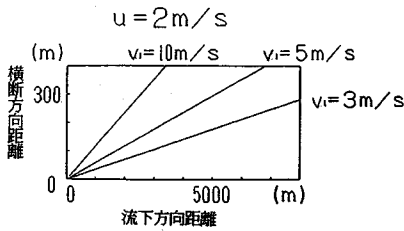


図-15 横風が作用している時の流木の流下経路

表-4 計算条件

ρ_1	ρ_2	ρ / ρ_2	A_1 / A_2	u
1,293 kg/m ³	1000 kg/m ³	0.71	0.49	2.0 m/s

したがって、流木の y 方向移動距離は式 (7) を用いて次式で求められる。

$$y(t) = \int v_2 dt$$

$$= c_1 \cdot \left[2/c_2 \cdot \ln \left\{ \frac{\exp(c_2 \cdot t) + 1}{2} \right\} - t \right] \dots \dots \dots (8)$$

ここで初期条件は $t=0$ で流木が河岸 ($y=0$) に存在するとしている。

x 方向の流れの速度を u とすれば x 方向の移動距離は

$$x(t) = \int u dt \dots \dots \dots (9)$$

で表せる。表-4 の条件について流木の軌跡は式 (8)、式 (9) から図-15 のように求まる。流木が河岸 ($y=B$) に達する時間は式 (8) から求まる。

ここで計算に用いる ρ は実測で求め、 c_D は 1.2 を用いる。また $A_1(d_1)$ 、 $A_2(d_2)$ は流木を採取し、静水中で浮かし、測定することによって求めた。

このように、流木類が堤防に達するのに必要な時間及び流下距離が概算できると、ある川幅、河道法線形(特に低水路の蛇行波長)に対して、風が流木類の移動・堆積に対して支配的かどうかを判断することができる。実河川においては、風速の向き、大きさが一定ではないこと、主流速 u が横断方向に変化すること、流れも風からせん断力を受け流速を生じることなど考慮する必要があるが、概ねここで示された計算法で流木に対する風の影響を評価できる。

(3) 流木類の堆積場所の推定

以上の考察から、流木類の堆積場所を支配する要因が明らかとなった。この結果を用いて、洪水時の流木類の堆積場所を推定することが可能となる。すなわち、3.(1) で示した流れ場の 3 次元解析により、表面流況を把握することにより複雑な河道形状および流量規模に応じて、流木類がどこで高水敷に乗り上げるかを推定する。この解析結果と高水敷植生の分布状況から流木類の堆積場所の推定が可能となる。また、風が吹いている場合は、風を考慮した計算から求まる流木の軌跡と河岸および高

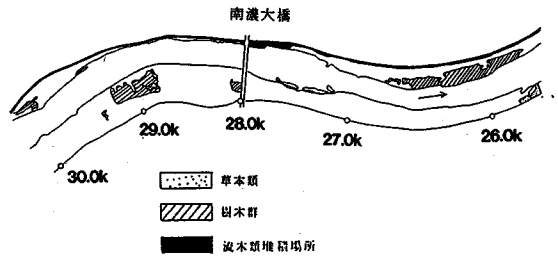


図-16 流木類の堆積状況と植生分布(長良川)

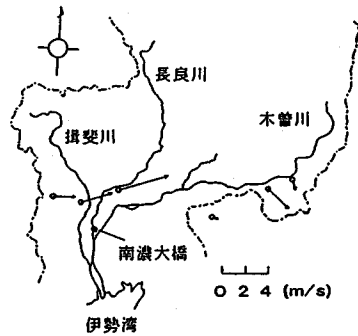


図-17 洪水時の風向・風速(長良川)

水敷の植生など流木が河岸に到達する地点の情報を用いて 3.(2) c) で述べた方法で堆積場所を概略推定できる。

4. 河川での流木類の堆積調査

ここでは、実河川で行われた流木類の堆積調査結果と 3. で得られた実験・解析結果を比較し、論ずることとする。

(1) 長良川における堆積事例

長良川での調査対象洪水は平成 2 年 9 月洪水で、調査区間は (10~30) km 区間である。この区間の河床勾配は約 1/5000 で単断面に近い横断面形をもち、川幅は (400~600) m である。低水路法線形は堤防法線形にほぼ一致している。

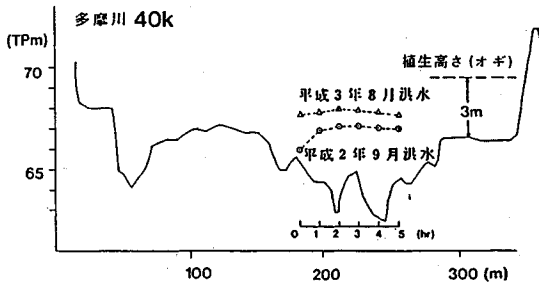
調査対象洪水はかなり大きな規模で、最大水位は高水敷上 2~3 m で堤防の小段程度に達した。

流木類の堆積で最も特徴的なことは、堆積が左岸側の堤防に沿って生じていたことである。左岸側の中でも特に堆積が著しい南濃大橋付近 (28 km) の状況を植生の分布と共に図-16 に示す。この付近の川幅は約 450 m である。

流木類は堤防際に連続的に堆積している。左岸側の高水敷は狭く、そこでの植生はオギや牧草である。この場合、流木の堆積は河道法線形にほとんど依存せず、左岸側にほぼ一様に生じている。

洪水のピーク流量時の風向、風速を図-17 に示す。

この図から洪水時南濃大橋付近を中心に西から東(長



図—18 水位ハイドログラフ（多摩川）

良川の右岸から左岸）へ向く2~4 m/sの風が吹いていたことが確認できる。このことから、流木類の左岸側への堆積は、流木類が流下する過程で西風の影響を受け続けた結果と関係づけられる。すなわち高水敷上の堤防際に流木類が吹き寄せられると、堤防際の流速と水深は低水路の流速、水深に比較して十分小さく、また粗度要素も大きいので流木類は流下しにくくなる。そのため流下の過程で、ひとたび流木の堆積が生じると吹き寄せられていた流木類は連続的に堆積するものと考えられる。

(2) 多摩川における堆積事例

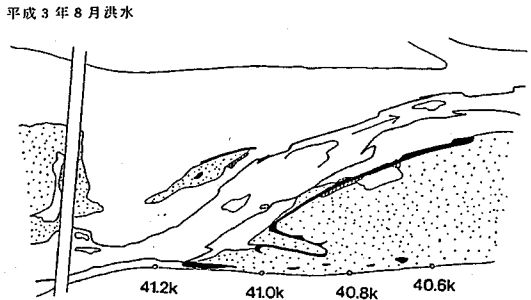
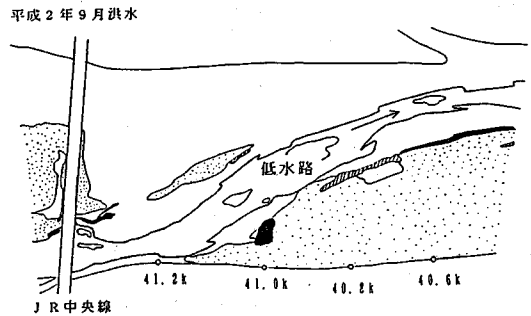
多摩川では平成2年9月及び平成3年8月洪水について37 km~45 kmの区間で流木調査を行った。河床勾配は1/300でかなり大きな勾配を持つ区間である。横断面形はほぼ整備された複断面形で、川幅は(400~600) mである。低水路は蛇行しており低水路法線形と堤防法線形との間には位相のズレが生じている。低水路河岸から高水敷にかけてはオギ等の草本類をはじめとして、ヤナギ、ニセアカシヤといった樹木群もかなり密生しており、洪水流はこれら植生の影響を受けやすい状況にある。

図—18は2つの洪水の40 km地点（日野橋）の水位ハイドログラフと横断面形及び主要な植生であるオギの高さを示す。

2つの洪水の間には約1 mの水位差があり、また両洪水ともに水位は植生高さより低い。

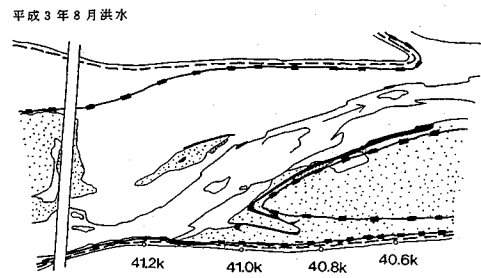
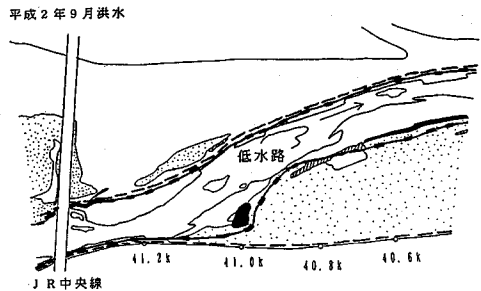
流木類の堆積状況の一例を図—19に示す。

この図から、流木類の堆積がほとんど植生領域内で生じており、また堆積は両岸に生じている。このことは流木類の堆積が高水敷植生、河道法線形、及び流れの影響を強く受けた結果であり、風の影響はあまり受けていないと判断される。41 km付近右岸のように、低水路流れが高水敷に乗り上げる場所では、流木類が高水敷植生中に深く入り込み堆積している。これは、3.(1)で示したように流木類の流下経路にあたる部分に植生が存在しているためで、水位の異なる2つの洪水に共通していることである。しかし、流木類が高水敷に乗り上げる位置、高水敷の植生中に入り込む深さについては2つの洪水の間で違いがみられる。すなわち、水位が高い平成3年洪水の方が平成2年洪水時に比較して、流木類がよ



- 草本類
- 樹木群
- 流木類堆積場所

図—19 植生分布と流木類の堆積状況（多摩川）



- オギ類
- 樹木群
- 流木類堆積場所
- 痕跡水位からみた洪水時の河積
- 流木類堆積からみた洪水時の河積

図—20 痕跡水位からみた洪水時の河積と流木類の堆積からみた河積との比較（多摩川）

り上流側から高水敷に乗り上げ、植生中にも深く入り込んでいる。これは3.(2)で示した結果と一致する。すなわち、水位の上昇ともなつて低水路よりも堤防に沿った流れが卓越し、その結果高水敷に向かう流れの生じるポイントが上流側にシフトすること、流速の絶対値が大きくなることの二点による。

次に、洪水直後の痕跡水位から推定される河積と流木類の堆積状況からみた河積の比較を行い、洪水が流下した有効河積について検討する。

図-20は調査結果を示す。

洪水の最大水位を示す痕跡は、いずれも堤防まで達している。一方、流木類の堆積範囲は高水敷草本類の中にとどまっている。植生内の流木類の堆積痕跡の外縁は、洪水が流れた外縁と見なすことができる。このことは洪水時に高水敷上の植生中に水が乗ったが実際にはほとんど流れていない領域(死水領域)が存在していたことを物語っている。また2つの洪水を比較すると右岸側堤防沿いのように洪水規模(水位)の違いにより死水領域となる範囲が異なっている。このように流木類の堆積状況がそれぞれの水位に応じた有効河積をよく表現していることがわかる。この結果は洪水規模に応じた河道の合成粗度係数^{5),6)}を見積る上で有効な情報を与える。

5. 堆積流木類の河道計画への利用

本節では、3., 4.の結果を河道計画へ利用していく手法について述べる。

第一に、流木が高水敷に乗り上げる場所を推定し、ここに既に存在する植生を利用し、またはこれを適当な密度、高さをもつように整形することにより、流木類を積極的、集中的に捕捉する。これにより、洪水後に散在して堆積する流木類の処理の費用と労力の軽減化をはかる。洪水流と植生の関係については福岡ら⁹⁾による植生を有する河道内における流況や抵抗の評価法により、検討することができる。ただし、この手段は流木が集中的に捕捉されても流れに悪影響を及ぼさない場所に限定される。

第二に、洪水後の流木類の堆積をトレーサとして流れ場を推定する視点に立った、次のような流木類の利用が考えられる。

①規模の異なる洪水に対して流木類が高水敷の植生中に入り込む深さを調査しそれぞれの洪水位に対する有効河積を見積る。これにより、植生による死水域を河道計画に取り込み、高水敷植生の分布及び洪水の流況を考慮した、合成粗度係数を求める。多摩川におけるさきの平成3年洪水の40.4 km~41.2 kmの区間での流木類の堆積状況から検討した結果を示す。

図-20を参考に、流木類の堆積状況から洪水時の死水域を各横断面内に取り込む。死水域を除いた各横断面

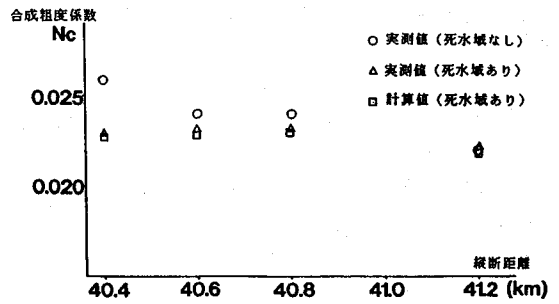


図-21 有効河積を用いて計算した合成粗度係数と全断面有効として計算した合成粗度係数との比較

をその形状に従い数断面に分割し、各分割断面について運動量式をたて、各断面の断面平均流速を求める。流量と高水敷植生による死水域を除いた河積、及び合成径深を用いて次式により合成粗度係数を算出する^{5),6)}。

$$N_c = \frac{A}{Q} \cdot R_c^{2/3} \cdot I^{1/2} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 N_c は合成粗度係数、 A は死水域を除いた河積、 R_c は合成径深、 Q は計算流量、 I はエネルギー勾配を示す。式(10)により計算した各断面での合成粗度係数と死水域を考慮しない場合の合成粗度係数の比較を図-21に示す。この図から流木類の堆積状況から得られる死水域を考慮すれば、植生を有する河道においても縦断的にはほぼ一様な合成粗度係数をとることがわかる。

②低水路法線形が複雑で計算のみでは流れ場の予測が困難な場合、流木類の堆積状況を調査することにより洪水規模の違いによる流況の変化、および低水路法線形、断面形の適否をチェックする。また樋管等の河川構造物を建設する際、その場所が適切であるかどうかの判断に用いることができる。

6. 結 論

本研究で行った大型模型実験、現地調査、解析を通して得られた主な結論を示す。

(1) 大型模型実験の結果から、流木類は洪水時の風、低水路法線形と堤防法線形との位相のズレ、および植生の分布状況、植生高さと水深との関係、流木類の種類、流速の大きさに応じた堆積状況を示すことが明らかになった。風を無視できる場合には、流れ場の3次元解析による低水路河岸に向かう主流の角度および植生分布を考慮することより流木類の堆積場所の推定を可能にした。

(2) 長良川、多摩川における流木堆積調査から、流木の挙動に与える植生、法線形、風などの影響を示すとともに、模型実験で得られた流木堆積の知見との関係に言及した。また流量規模によって流木類の堆積場所、高水敷の植生中に入り込む深さが異なることから堆積範囲

の外縁が洪水時の流れの有効河積を表現していることを明らかにした。この有効河積の評価により植生分布が縦断的に変化する河道においてもほぼ様な合成粗度係数値をとることが明らかになった。

(3) (1), (2)の結果から、高水敷植生による流木類の捕捉機能を河道計画に取り込んでいくための基本的な考え方を示した。

最後に本研究を進めるにあたって便宜を図ってくださった建設省土木研究所、国土開発技術研究センター、建設省中部地方建設局木曾川上流工事事務所、関東地方建設局京浜工事事務所に感謝します。

参 考 文 献

1) 足立昭平・大同淳之：流木に関する実験的研究，京大防

災研究所年報第1号，pp. 41～48，1957.

- 2) 米元卓介：洪水時に流木が橋梁など堤防に及ぼす影響とその対策に関する研究，早稲田大学理工学研究所17輯 pp. 1～14，1961.
- 3) 水山高久・石川芳治・福沢誠：流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究，土木研究所報告第183号，pp. 71～156，1991.
- 4) 福岡捷二・渡辺明英・西村達也：水制工の配置法の研究，土木学会論文集，第443号/II-18，pp. 27～36，1992.
- 5) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩：樹木群を有する河道の洪水位予測，土木学会論文集，447号/II-19，pp. 17～24，1992.
- 6) 福岡捷二・藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，第411号/II-12，pp. 63～72，1989.

(1992. 12. 7 受付)

MOVEMENT AND ACCUMULATION PROCESS OF FLOATING LOGS AND APPLICATION TO RIVER COURSE DESIGN

Shoji FUKUOKA and Hiroshi NI-IDA

The behavior of floating logs in river during floods is investigated by a combined study of field survey, large-scale hydraulic model test and numerical analysis. It was found that the movement and accumulation process of floating logs was controlled mainly by a phase shift of the low water channel to flood channel, the density and distribution of vegetation, the ratio of vegetation height to water depth, and the direction and duration time of the wind during a flood. The prediction of the accumulation position of floating logs became possible from these knowledge and three-dimensional numerical analysis of flow.