

## 第3章 流木の堆積

### 3. 1 概説

流木の堆積場所を知ることにより、流木対策を効率的に計画することが可能となる。流木の発生前に堆積場所を予測し、その場所が災害をもたらす位置であればそこへ到達する前に捕捉することになる。堆積しやすい場所・理由が判明すれば、その構造を利用した捕捉計画も可能となる。流木の堆積場所により、災害にならない場合もある。流域住民の生活に影響のない場所であれば問題はなく、放置されていることもあろう。

表 3.1 堆積場所とその要因・形態

堆積場所	堆積要因と形態
山腹・斜面	<ul style="list-style-type: none"><li>立木・灌木類に引っかかる</li><li>倒木に引っかかる</li><li>岩に引っかかる</li></ul>
谷の出口	<ul style="list-style-type: none"><li>勾配急変部のため流下エネルギーを失う</li><li>堆積している砂礫に乗り上げる</li></ul>
溪岸・溪床 河岸・河床	<ul style="list-style-type: none"><li>溪畔林に引っかかる</li><li>倒木に引っかかる</li><li>巨礫・転石に引っかかる</li><li>断面狭窄部で引っかかる</li><li>湾曲部で流路外側に堆積する</li><li>勾配変化部で流下エネルギーを失う</li><li>拡幅部で水位・流速の低下により堆積する</li><li>河床との摩擦により砂礫堆・砂州等に乗り上げる</li></ul>
砂防ダム	<ul style="list-style-type: none"><li>貯砂域・土砂調節域内に土砂とともに堆積する</li><li>堆砂による勾配変化により流下エネルギーを失う</li><li>水通しが狭窄部となり引っかかる</li><li>袖部に引っかかる</li><li>副ダムにより堆積する</li><li>流木対策施設に捕捉される（対策施設がある場合）</li><li>格子が狭窄部となり引っかかる（透過型）</li></ul>
貯水ダム	<ul style="list-style-type: none"><li>上流での堆砂による勾配変化により流下エネルギーを失う</li><li>貯水域に浮遊して堆積する</li></ul>
橋・暗渠・堰等 河川構造物	<ul style="list-style-type: none"><li>橋脚・流下断面が狭窄部となり引っかかる</li><li>橋桁等河川横断部に引っかかる</li></ul>
海岸	<ul style="list-style-type: none"><li>海水に浮遊して集積する</li><li>海岸に乗り上げる</li></ul>

しかし堆積場所が前章で紹介した余籠川のように、橋梁・カルバート等の河川横断構造

物のようなところへしかも大量に堆積した場合は、洪水・土砂や流木氾濫などの災害に直結する。また貯水池に堆積すれば、取水・発電など本来の機能を損なう。海岸に到達して堆積すると、港湾事業に支障をきたし、また観光・レクレーション機能も妨げる。これまでの事例より、流木の堆積場所とその堆積要因・形態を整理して表 3.1 に示す。

本章ではこれらの流木堆積場所のうち自然河道、すなわち表 3.1 でいう「溪岸・溪床・河岸・河床」と「砂防ダム」のうち不透過型砂防ダムについて、堆積要因を考察する。

### 3. 2 自然河道での堆積

自然河道での堆積要因は以下の 3 つに分類できる。

- 1) 河道内の障害物により堆積する。
- 2) 河道の地形要因により堆積する。
- 3) 水位（流量）の低下により堆積する。

表 3.1 「溪岸・溪床、河岸・河床」のうち、河道内の障害物は渓畔林・倒木・巨礫など、河道地形要因は狭窄部・湾曲部・勾配変化点・拡腹部など、水位の低下により堆積する場所は河床の高くなった砂堆・砂州などがあげられる。以下に自然河道での具体的堆積要因と形態を、事例をあげて考察していく。

#### 3. 2. 1 河道内の障害物による堆積

写真 3.1 (a) は、土石流に運ばれた流木が立木により捕捉された例である。複数の立木に流木が横断して停止し、その上流側に後続流木・土石流も捕捉された状況である。河川には渓畔林が侵入しており、このような現象は頻繁に発生するものと思われる。樹林帯は自然に近い砂防材料として、その土砂堆積促進効果が注目されており、これに類した研究もいくつか行われている。流木が混入した場合の土砂堆積促進効果の実験結果では、実験ケースが少なく明らかな効果が認められなかったものの、樹林帯は自然のスリットダムであり、立木が流木と土石流の流下衝撃力に耐えることができれば、有効



下流側から

左岸側から

(a) 立木による流木捕捉  
(広島県屋代川)



(b) 溪畔林による流木捕捉  
(栃木県余笠川)

写真 3.1 溪畔林での流木堆積

な対策工として利用できる可能性を示している。立木による流木の捕捉は、土石流区間だけでなく掃流区間でも多く見られる。流木は一般に水より比重が小さく、河川の流れに浮遊して流下し、溪畔林などの立木により捕捉される。写真 3.1 (b) は溪畔林に堆積したものであり、洪水流により運搬されて流下（以下、「掃流形態」という）した流木が立木に引っかかり、その後水位が低下したものである。土石流により運搬された（以下、「土石流形態」という）ものとの違いは流木の上流側に土砂も捕捉されているかどうかにある。また土石流形態で到達しても、その後土砂が水に洗い流され、流木だけ残留することもある。掃流形態によって運ばれた流木の場合、土石流より流体力が小さく、その分立木にかかる衝撃力も弱く堆積しやすいと思われる。

溪畔林は増水の度に写真 3.2 (a) のように根元を洗われ、やがて倒木となる例が多い（写真 3.2 (b)）。このような倒木は流木の流下断面を上方から狭めており、鉛直方向の狭窄部を形成している。写真 3.2 (c) はその倒木の下側に流下してきた流木が引っかかったものである。

河川内の礫に引っかかって堆積する流木も、特に上流部で見ることが多い。河床の礫は上流で径が大きく、下流に行くほど摩耗して小さくなる、というシュテルンベルグの法則<sup>2)</sup>にもあるように、上流で礫径が大きく堆積もしやすい。写真 3.3 (a) (b) は溪流中に突出した 2 つの礫に一本の流木が横断してまたがって停止し、それがきっかけで後から流れ着いた流木も次々に堆積していった結果である。2 つの転石の間隔が引っかかった流木長より狭く、立木や狭窄部で流木が横断して堆積した例と同様の現象が発生した。この流木群の上流側に土砂は堆積しておらず、またその痕跡も認められなかったため、掃流形態で到達したものと思われる。写真 3.3 (c) は直径 2 m の巨礫により、直径 40 cm の流木が停止している状況を上流側から見たものである。流木長さは 4 m であり、途中から折れ、根茎は削れている。樹皮は剥がれ表面は滑らかで、かなり上流から流下してきたものと推定される。

### 3. 2. 2 河道の地形要因による堆積

溪流・河川は流量・流下幅・河床材料粒径などに影響を受け、狭窄部や湾曲部を持っているのが普通である。河川上流部では狭窄部が多く見られ、このような溪流では長い

倒木による流木捕捉は、河川の自然治山や生態系保全に大きな効果がある。倒木は、河床を構成する重要な要素であり、水の流れを緩和する機能がある。また、倒木は、生物の生息環境を提供する重要な役割を果たす。



(a) 根を洗い出された立木



(b) 根が支えきれず倒木となる

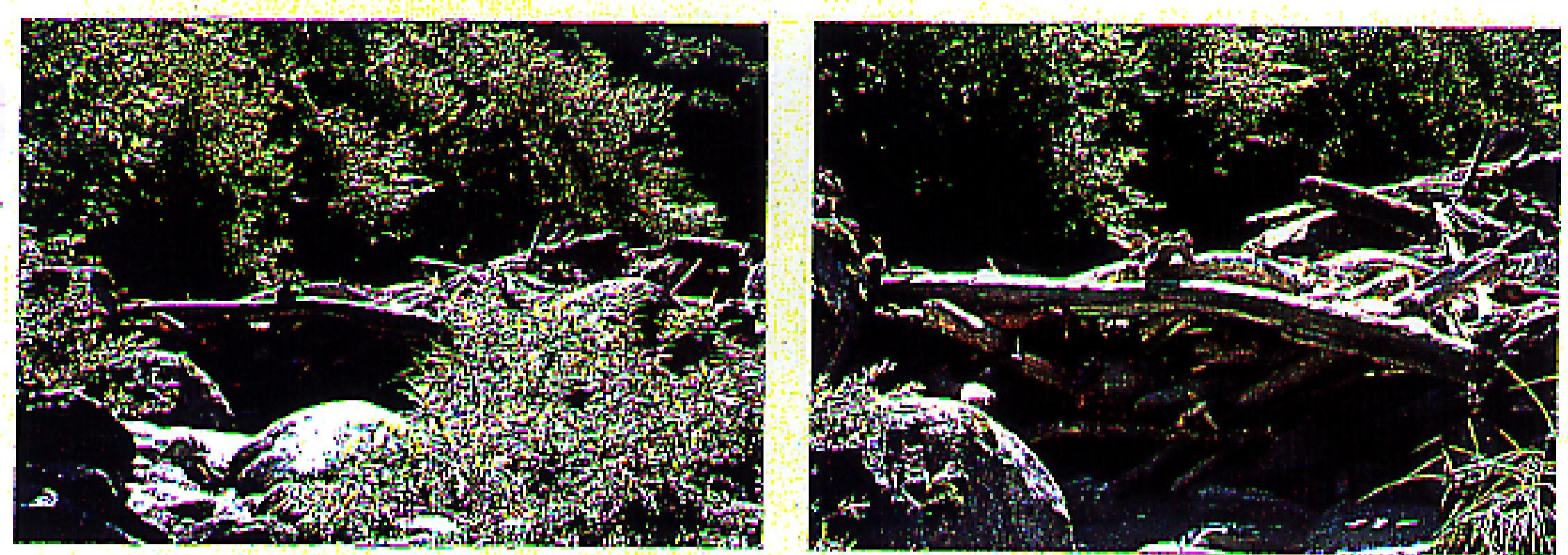
(静岡県井川)



(c) 倒木による流木捕捉

(長野県梓川)

### 写真 3.2 倒木による流木捕捉



(a) 巨礫による流木捕捉

(b) 巨礫による流木捕捉



(c) 巨礫に引っかかり停止した流木

写真 3.3 巨礫による流木捕捉・堆積  
(長野県大田切川)



写真 3.4 狹窄部における流木の堆積と土石流の捕捉  
(広島県荒谷川)



写真 3.5 湾曲部における流木の堆積  
(広島県荒谷川)



写真 3.6 拡幅部における流木の堆積  
(長野県梓川)



(a) 長野県梓川



(b) 栃木県余笠川

写真 3.7 砂礫堆における流木の堆積

流木が両岸を横断して閉塞することにより堆積が発生しやすい。写真 3.4 は狭窄部における流木の堆積状況を、右岸から左岸側に向かって撮影したものである。右岸側（写真手前）で、流木が 3 本渓流を横断するように堆積しており、その上流側（写真左側）には土石流堆積物が捕捉されている。これは流木が堆積した後、土石流が到達したことを物語っており、このように河川の中央で流下経路を塞ぐように堆積した流木は、土石流に限らずその上流側に土砂を捕捉することが知られている<sup>3) 4)</sup>。これは流木による天然ダムであり、大規模なものが決壊すると、より大きな災害につながる危険性がある。

写真 3.5 は湾曲部における堆積を上流から右岸側を見て撮影したものであり、流路は左に向かって湾曲している。こうした湾曲部では、流木の流下速度が落ちるとともに遠心力を受けて外湾側の浅瀬に運ばれ堆積しやすい。

拡腹部では流下幅が拡がることによる流速・水位の低下により、河床との摩擦で流木が堆積する（写真 3.6）。拡腹部の川幅にもよるが、この要因で堆積した流木は河川内で広範囲に散らばって堆積することが多い。

### 3. 2. 3 水位の低下による堆積

砂礫堆・砂州などは横断的に見て河床の高いところであり、河川水位の低下とともに河床との摩擦が原因で堆積する。写真 3.7 (a) は砂礫堆の高くなった箇所に取り残された状態であり、撮影場所の長野県梓川沿いではこの形態による堆積が多く見られる。写真 3.7 (b) は第 2 章で記述した栃木県余筐川災害後に撮影したものである。これらの堆積形態も拡腹部での堆積と同様、広範囲に散らばっているのが特徴である。

## 3. 3 不透過型砂防ダムでの堆積

流木災害を防ぐための施設の一つとして流木捕捉工があげられる。その効果的な計画にあたっては計画地点に到達する流木量を高い精度で予測することが重要となる。“流木対策指針（案）（1990 年 10 月 建設省砂防部砂防課）”（以下“指針（案）”という）では、流木量と流木発生量との比から「流木流出率」を算定し、この値をもとに流木捕捉工の設

計を行っている。しかしその値は流域の地形（縦横断地形）や渓床粗度、渓流内の人工構造物など多くの要因に影響を受け、かつデータ量も少ないため、現在示されている計画流木量設定手法は今後も引き続き検討すべき水準にある。

指針（案）によれば、砂防ダムの計画流木捕捉量は、「土石流区間においては不透過型砂防ダムの流木捕捉量は砂防ダム土砂調節量の 1%まで見込む」、「掃流区間においては計画流木量を見込まない」という条件のもとにおいて設定されている。しかし実際に流木対策施設を施していない不透過型砂防ダムにおいて、土砂調節量の 1%をはるかに上回る大量の流木を捕捉した事例が見られること、あるいは不透過型砂防ダムの設置された渓流では、設置されていない渓流に比べて流木流出率が低いことが指摘<sup>5),6)</sup>されており、さらには「土砂調節量の 1%」という値そのものが信憑性に乏しいという報告<sup>7)</sup>もなされている。

本節では土石流区間に設置された不透過型砂防ダムに流木が堆積した事例をもとに、満砂・未満砂状態での流木捕捉実態と不透過型砂防ダムの流木捕捉能力に関する要因について明らかにする。

### 3. 3. 1 砂防ダムの流木捕捉効果

不透過型砂防ダムによる流木捕捉効果を確認するため、砂防ダムのある渓流と無い渓流の流木流出率を比較した。流木流出率は以下のように定義し、その概念図を図 3.1 に示した。

$$f_a = \frac{V_r}{V_g} \times 100 \quad - (3.1)$$

ここに、 $f_a$ ： 流木流出率 (%)

$V_r$ ： 渓床勾配 3° 地点に達する流木量 ( $m^3$ )

$V_g$ ： 発生流木量 ( $m^3$ )

指針（案）に具体的定義が記されていないため、ここでは渓床勾配 3° に到達する流木量と発生流木量の比を流木流出率とした。図 3.2 に不透過型砂防ダムのある渓流と無い渓流における流域面積と流木流出率との関係を示す。渓流内に存在する砂防ダムはすべて不透過型である。“広島県北西部災害（1988 年）” “山形県温海町災害（1987 年）”

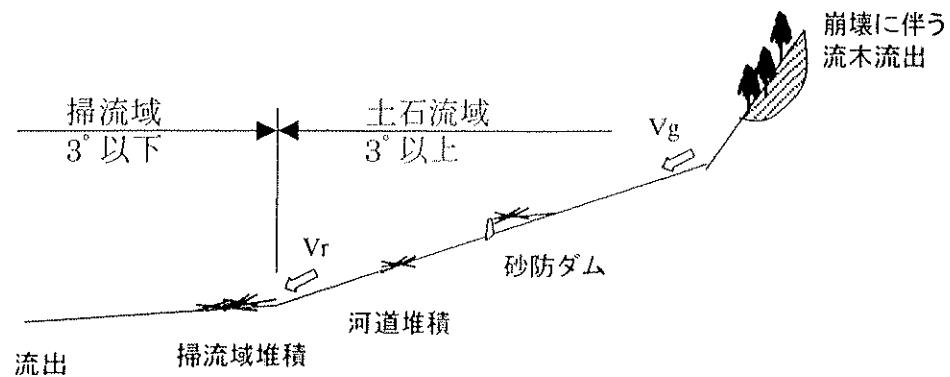


図 3.1 流木流出率概念図

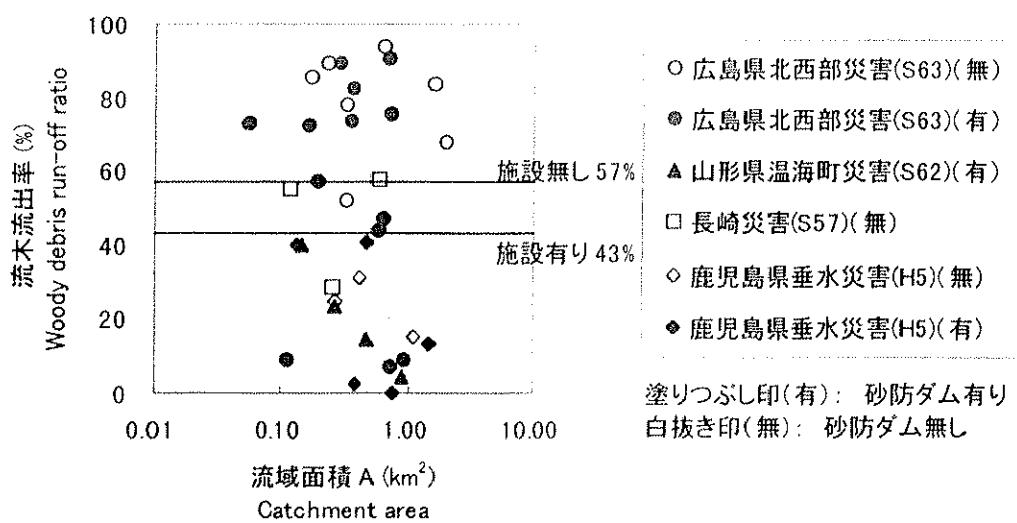


図 3.2 不透過型砂防ダムによる流木流出率の低下

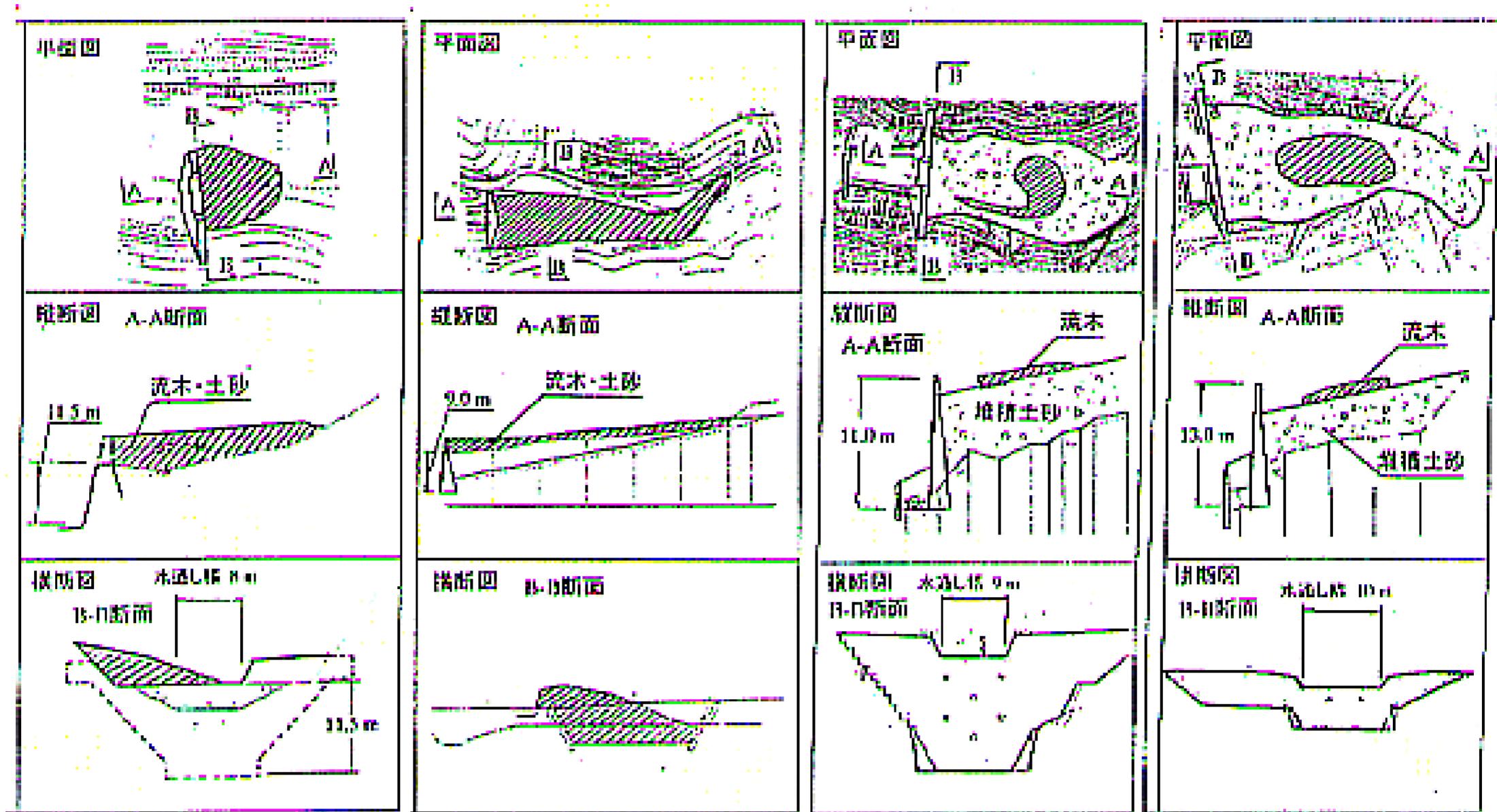
“長崎災害（1982年）”の資料は参考文献<sup>5) 6)</sup>のもので、これに1993年の鹿児島県垂水市における災害資料を加えた。溪流毎のばらつきは大きいが、流木流出率の平均値は砂防ダム有りが43%、砂防ダム無しが57%となっており、砂防ダムのない溪流の方が流出率は高い傾向にある。

満砂状態の不透過型砂防ダムに流木が捕捉された事例<sup>8)</sup>のうち、流木長・径・捕捉量などの測定資料が残されている4つの砂防ダムと捕捉された流木の諸元を表3.2に、流木堆積位置を図3.3に示した。写真3.8はbの砂防ダムによる流木捕捉状況である。ここで発生した流木はいずれも平成5年9月の台風13号によるものである。

表3.2 満砂状態の不透過型砂防ダム流木捕捉状況

県		a 熊本	b 大分	c 鹿児島	d 鹿児島
溪流名		氷川支川川 俣川	屋形川支川 落合川	鶴田川	河崎川
砂防 ダム諸元	施設名	第1号小原 川砂防ダム	第1号通常 砂防ダム	鶴田川通常 砂防ダム	河崎川緊急 砂防ダム
	流域面積 km <sup>2</sup>	3.7	0.42	1.4	3.1
	ダム高 m	11.5	9.0	11.0	13.0
	ダム長 m	37	50	45	47
	水通し幅 m	8	5	10	9
	袖高さ m	3	-	3	2.5
捕捉 流木諸元	流木量 m <sup>3</sup>	60	306	304	1,099
	本数 本	400	1,460	750	2,700
	最大長 m	20	10	7	8
	平均長 m	12	3	5	5
	最大径 m	0.4	0.4	0.5	0.5
	平均径 m	0.12	0.3	0.3	0.3
流木発生時ピーク流量 m <sup>3</sup> /s		31.1	30.8	20.4	45.0
(最大流木長) / (水通し幅) 比		2.5	2.0	0.7	0.9

図3.3の流木堆積位置を見ると、水通しに接して停止しているもの（aとb）と堆砂地上で停止しているもの（cとd）の2つに分類できる。これまでの研究によると流木の捕捉に関わる要因は、流路狭窄部幅と最大流木長の関係にあることが指摘されている<sup>5) 6)</sup>。つまり砂防ダム水通し幅を流下途中の狭窄部と考えると、長い流木が水通しの両袖にわたって引っかかることが予想される。表3.2の“最大流木長”と“水通し幅”比をそれぞれのダムで計算すると、この比の大きいものが水通しに接して堆積している（aとb）。



(a)第1号小原川砂防ダム (b)第1号通常砂防ダム (c)鶴田川通常砂防ダム (d)河崎川緊急砂防ダム

図 3.3 流木堆積位置図



写真 3.8 満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉状況  
(屋形川支川落合川第1通常砂防ダム： 大分県砂防課提供)

### 3. 3. 2 流木の捕捉に関する要因

前章において不透過型砂防ダムによって流木が捕捉されるための要因を 3つ示したが、ここでは前者 2つについて述べる。

#### 1) 水通し幅と流木長

不透過型砂防ダムによる流木捕捉状況についての資料<sup>8)</sup>を基に、砂防ダムの水通しを閉塞することによって捕捉された流木の最大長・平均長と水通し幅の関係を図 3.4 に表した。石川らの実験<sup>5) 6)</sup>によると最大流木長が砂防ダム水通し幅の約 1.3 倍を越えると急激に流木捕捉率が大きくなる、とされている。資料を整理した結果、すべてこの限界線を上回った。

#### 2) 砂防ダム堆砂比と流木捕捉率

砂防ダムの堆砂比とその流木捕捉率（第2章、図 2.14 参照）を比較したのが図 3.5 である。堆砂比とは現在の堆砂量を計画堆砂量で除したもので、堆砂量は測量されていないため災害後の砂防ダム堆砂余裕高、元河床勾配、ダム諸元から計算によって推定した。

砂防ダムの貯砂容量に余裕があるほど流木捕捉率は高い傾向がある。砂防ダムの堆砂比が約 0.5 近傍まで流木捕捉率はほぼ 100 %に近い高い値を示し、それから急速に捕捉率は低くなる。なお、砂防ダムが湛水している状態で掃流砂と共に堆砂池に流木が流入した時には、浮遊して水通しから流下してしまう場合のあることがいわれている<sup>9)</sup>。

ダムが満砂状態（堆砂比“1”）の場合、①流下してきた流木は水通しを通過するもの、あるいは②袖上部を越流するもの、③堆砂地上に堆積した土砂とともに停止するもの、また④水通しにおいて閉塞するものと、⑤袖部に衝突して停止・堆積するもの、に分類される。図 3.5 によると満砂状態における流木捕捉率は 0~80 %までばらつきがある。流木捕捉率が約 80 %と高い事例としては、前章で説明した飛岡川上流堰堤のように、水通しのみならず袖部によっても捕捉された場合があげられる。

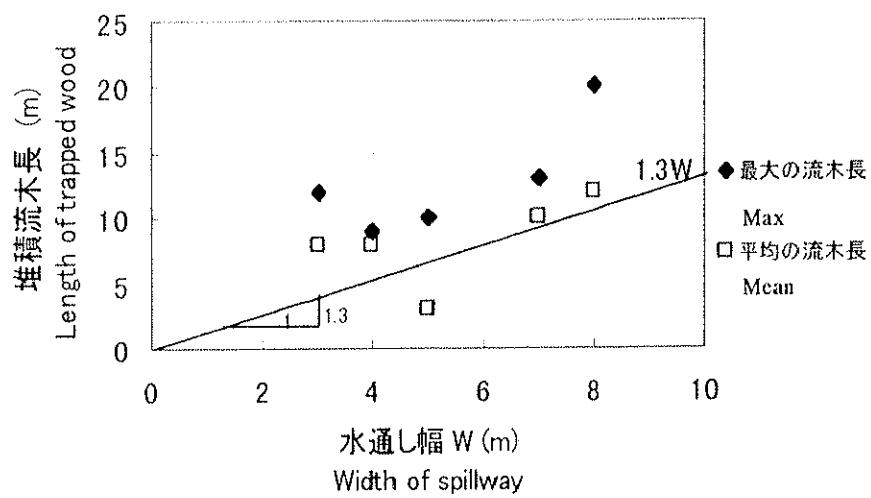


図 3.4 堆積流木長と水通り幅

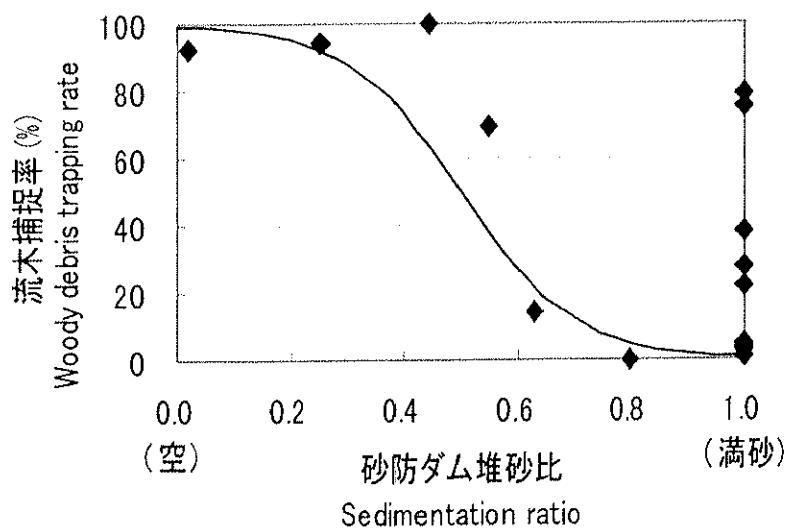


図 3.5 砂防ダム堆砂比と流木捕捉率

### 3. 3. 3 満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉

ここでは、満砂状態の不透過型砂防ダムに流木が捕捉された事例を整理し、その捕捉位置によって分類した。また捕捉率に関する要因として流木長さと水通し幅の関係、及び全体流木量中に含まれる水通し幅より長い流木量に注目して流木捕捉率を表す推定式を仮定し、流木を混入した土石流の捕捉実験を行って検証した。なお今回の解析において砂防ダムは土石流による破損を受けず、流木の折損もないことを条件としている。

#### 1) 捕捉率の推定

従来の流木捕捉に関する研究においては、捕捉量ではなく捕捉率で表されている場合が多い。これは発生流木量がそれぞれ異なっており、これらの資料を相対的に比較するためであろう。ここでいう流木捕捉率とは、砂防ダム堆砂域内で捕捉された流木量と堆砂域に流入した流木量の比をいう（第2章、図2.14）。表3.2の砂防ダムは発生流木量が不明なため流木捕捉率を比較することはできない。aとbの事例のように、水通し幅より長い流木が水通しを閉塞して捕捉率が上がるのであれば、堆砂域に流入した流木量中に占める水通し幅より長い流木量の割合（以下“流木混入率”という）が高いほど水通しを閉塞する可能性も高くなるものと思われる。水通し幅より長い流木が1本でもあれば水通しを閉塞する可能性があるが、閉塞した流木が1本だけでは水通しの面積に比較し閉塞面積が小さく、短い流木はほとんど流出してしまう。流木混入率が上昇し水通しを閉塞する流木が増えると、水通し面積に対する閉塞面積の割合が大きくなり、捕捉される流木量も閉塞面積に比例して増えるものと考えられる。また堆積量と発生量との比である捕捉率は上昇し、やがて一定の値に落ち着くものと思われる。つまり流木捕捉率と“流木混入率”的関係は以下の式で表されるであろう。

$$\frac{dT}{dM} = kM \frac{T_{\max} - T}{T_{\max}} \quad - (3.2)$$

ここに、  $T$  : 流木捕捉率

$M$  : 水通し幅より長い流木の“流木混入率”

$T_{\max}$  : 流木捕捉率上限値

$k$  : 土石流規模や流木の質（長さ・直径）によって決まる定数

流木捕捉率 ( $T$ ) の上昇割合 ( $dT/dM$ ) は “流木混入率 ( $M$ )” に比例して増加し、捕捉率 ( $T$ ) が上限値 ( $T_{\max}$ ) に到達すると上昇率はゼロになる。ここに “ $k$ ” はこの曲線の傾き程度を表す定数である。“流木混入率”  $M=0$  の時の捕捉率を  $T=T_0$  として (3.2) 式を解くと、以下の (3.3) 式が得られる。

$$T = T_{\max} - (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{k}{2T_{\max}} M^2} \quad - (3.3)$$

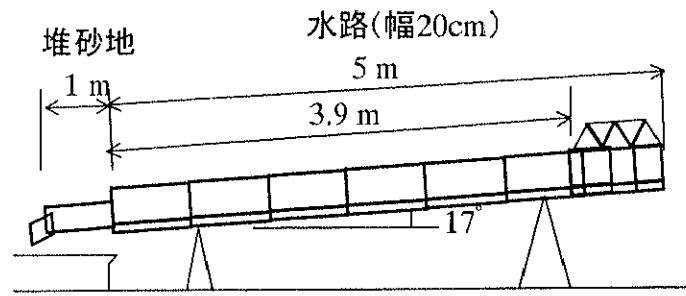
ここに、 $T_0$  : “流木混入率” が 0% の時の流木捕捉率

山腹崩壊による流木の発生源は人工林が多く<sup>10)</sup>これら人工林はほぼ同じ成長をしているものと仮定すると、“流木混入率” はある程度予測できるものと思われる。実験により流木捕捉率上限値 ( $T_{\max}$ )、“流木混入率”  $M=0$  の時の捕捉率 ( $T_0$ )、定数 ( $k$ ) を求めておくと、この式により満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉率が推定可能となる。

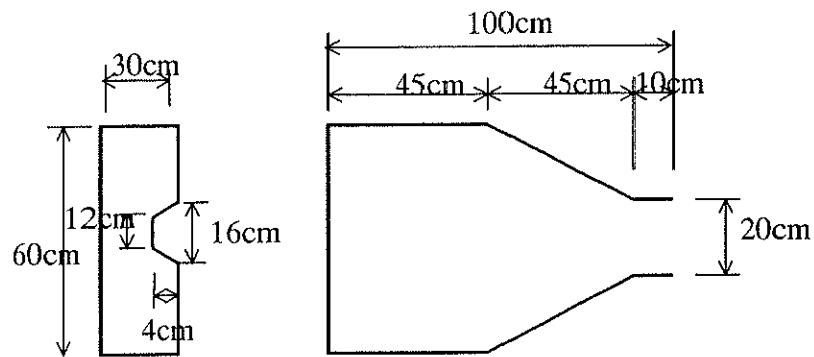
一方 c、d の砂防ダムも堆砂地上に大量の流木を捕捉しており、このような捕捉形態についても考察する必要がある。次章から実験を行って流木の挙動及び捕捉形態を調べるとともに、(3.3) 式の適用可能性を検証する。

## 2) 実験

ここでは水通しに接して大量の流木が捕捉された大分県の第 1 号通常砂防ダム（写真 3.8）を想定し、模型の縮尺を 1/50 として実験諸量を決定した。フルード相似則を用いて実物と比較した諸量を表 3.3 に示した。実験に用いたのは幅 20 cm、長さ 5 m の矩形型断面の循環式水路である（図 3.6）。上流端には越流堰があり、その水位をバルブにより調節して流量を設定できる。水路末端に拡幅部を持つ幅 60 cm、長さ 1 m の堆砂地を模したボックスを設置し、その下流端に高さ 4 cm、下幅 12 cm、上幅 16 cm（袖勾配 1:0.5）の切り欠きを入れて、不透過型砂防ダムの水通しとした。写真 3.9 は実験水路全景である。水路及び堆砂地ボックスを勾配 17° に設置し、堆砂地には水路勾配の 1/2 (8.5°) となるよう、ダム水通し底の高さまで土砂を敷き詰め満砂状態とした。土砂は比重 2.62、



(a)実験水路側面図



(b)砂防ダムモデル正面図 (c)末端堆砂地平面図

図 3.6 実験装置概略図

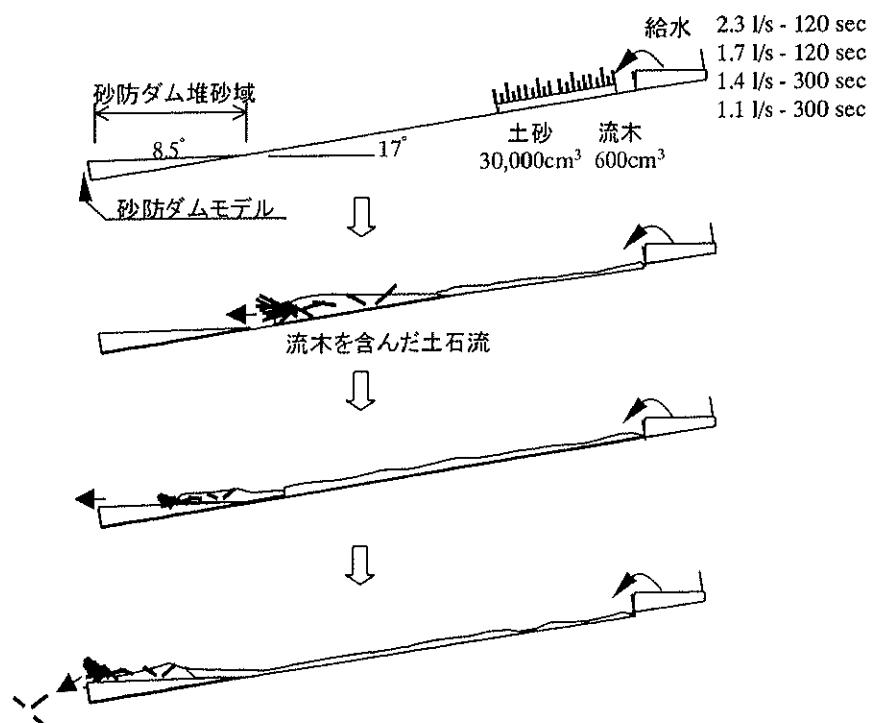


図 3.7 実験の流れ



写真 3.9 実験水路全景



写真 3.10 実験前流木設置状況

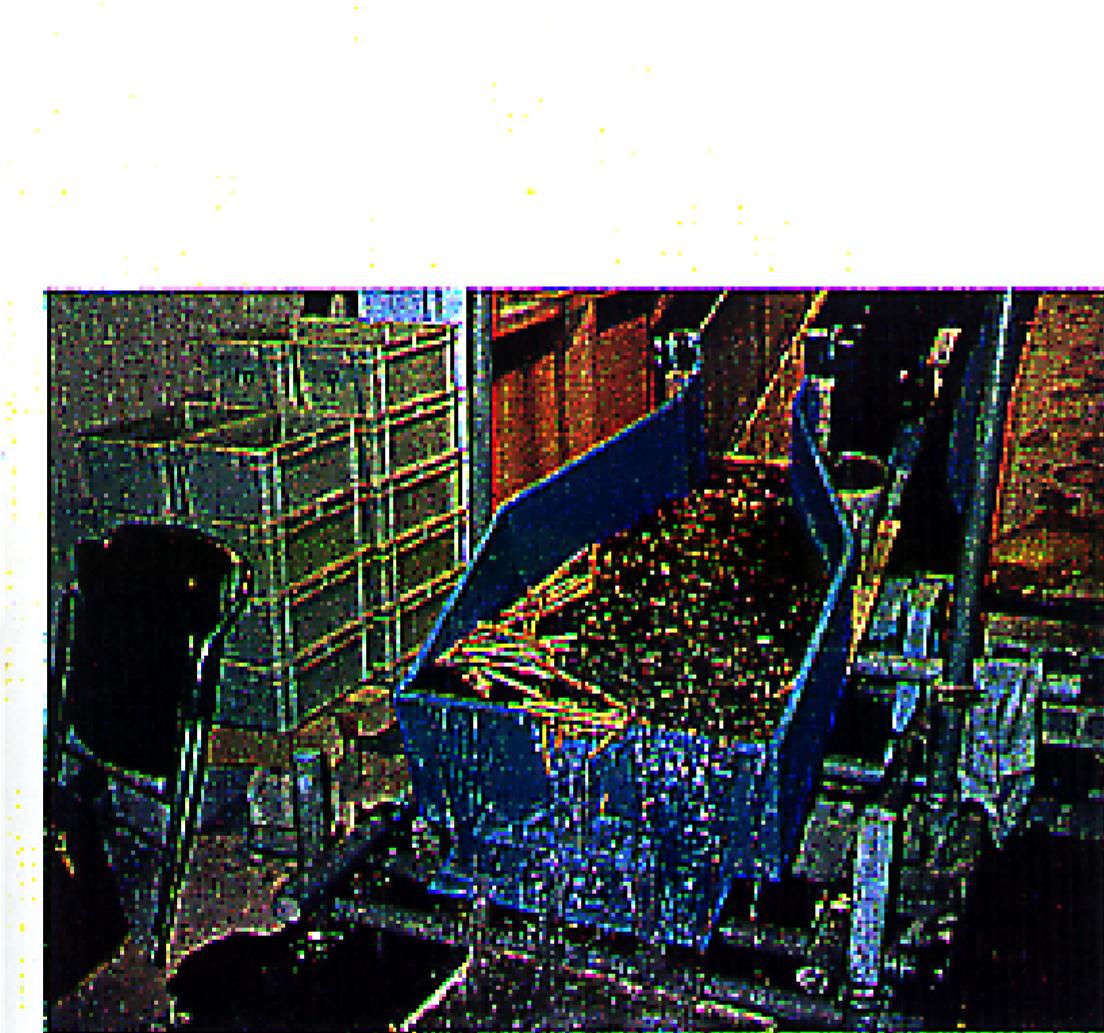


写真 3.11 実験実施状況

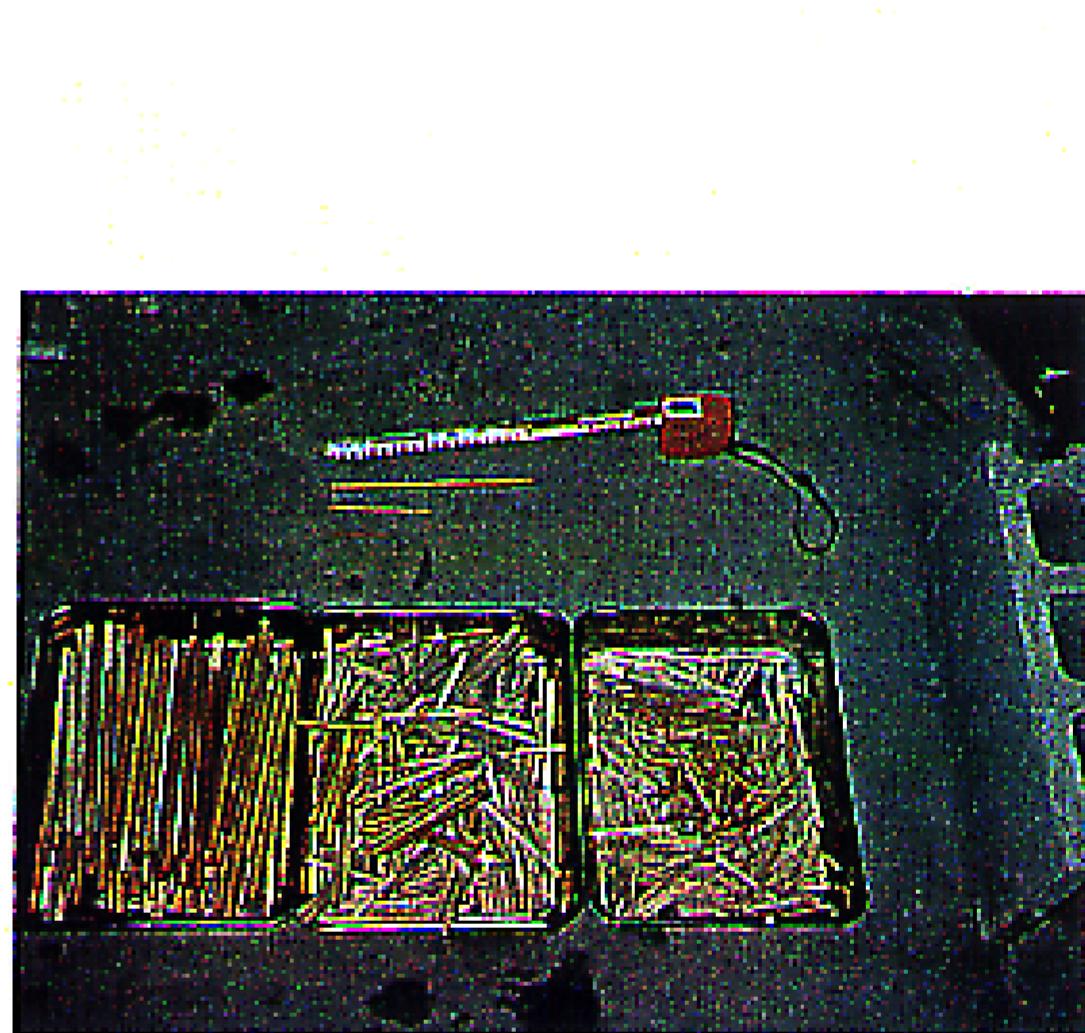


写真 3.12 実験に使用した流木モデル

粒度は 95 %粒径 14.5 mm、平均粒径 6.1 mm のものを用いた。

生産土砂量・発生流木量は不明なため、流域面積と過去の実態<sup>⑤⑥</sup>を参考にそれぞれ 3,750 m<sup>3</sup>、75 m<sup>3</sup>と仮定した。これを換算すると実験に使用する土砂量は 30,000 cm<sup>3</sup>、流木材積は 600 cm<sup>3</sup>となる。水路上流にこの土砂を 1.5 m 長さに敷き、その上に本数を調整した流木モデルをランダムに挿し（写真 3.10）、上流から水を供給して土石流を発生させて流木を含む土石流が満砂状態の不透過型砂防ダムに到達する状況を再現した（図 3.7、写真 3.11）。

表 3.3 想定した砂防ダム及び流域と模型の諸元

縮尺： 1/50

		実物 (Prototype)	模型 (Model)
砂防ダム	堤長	30 m	60 cm
	水通し幅（下）	6 m	12 cm
	水通し幅（上）	8 m	16 cm
	水通し高さ	2 m	4 cm
土石流	流下水路幅	10 m	20 cm
	生産土砂量	3,750 m <sup>3</sup>	30,000 cm <sup>3</sup>
	発生流木量	75 m <sup>3</sup>	600 cm <sup>3</sup>
	流量	40 m <sup>3</sup> /s	2.3 l/s
		30 m <sup>3</sup> /s	1.7 l/s
		25 m <sup>3</sup> /s	1.4 l/s
		20 m <sup>3</sup> /s	1.1 l/s
流木 (3種類)	長さ	3 m	6 cm
	直径	20 cm	0.4 cm
	長さ	5 m	10 cm
	直径	30 cm	0.6 cm
	長さ	10 m	20 cm
	直径	40 cm	0.8 cm

流木は土石流により運ばれるため、土石流発生時の流量は流木捕捉に大きな影響を及ぼすことが考えられる。流木発生時ピーク流量は 30.8 m<sup>3</sup>/s と記録されており<sup>⑧</sup>、これをもとに 40 m<sup>3</sup>/s、30 m<sup>3</sup>/s、25 m<sup>3</sup>/s、20 m<sup>3</sup>/s の 4 流量で捕捉率の変動を調べることとした。これを実験流量に換算すると、それぞれ 2.3 l/s、1.7 l/s、1.4 l/s、1.1 l/s となる。給水時間は実験に先立ち流木を含まない土石流を発生させ、設置した土砂が全て流出するまでの時間を目安として決定した（表 3.4）。2.3 l/s と 1.7 l/s を通水した時は 120 秒、1.4 l/s の時は 300 秒で流出したが、1.1 l/s のケースは一定時間を経過した後給水を続けても、土砂流出がそれ以上起こらなかったため 300 秒で終了した。流

木はどの通水量の場合もこの設定時間内に移動・堆積・流出を終了し、それ以上通水しても一旦堆積した流木が再流出することはなかった。

流木モデルは長さ・径の異なる3種類（表3.5、写真3.12）を用意し、水通し幅より長い流木モデル（20 cm、水通し幅の1.67倍）が全体流木量に占める割合（“流木混入率”）を変化させ、流木及び土砂の捕捉率を測定した。

表3.4 実験に使用した通水量と通水時間

通水流量 (l/s)	通水時間 (sec)
2.3	120
1.7	120
1.4	300
1.1	300

表3.5 実験に使用した流木モデル

	直径 (cm)	長さ (cm)	(流木長さ) / (水通し幅) 比
流木1	0.4	6	0.50
	0.6	10	0.83
流木2	0.4	6	0.50
	0.6	10	0.83
	0.8	20	1.67

\* 水通し幅： 12cm

実験に使用した“流木混入率”と流木本数の関係を表3.6に示した。実験中は上方からビデオ撮影を行い、流木の挙動とその時間的变化を観察した。

表3.6 実験に使用した流木本数

20 cm “流木混入率” (%)	本数		
	20 cm Φ 0.8 cm	10 cm Φ 0.6 cm	6 cm Φ 0.4 cm
0	0	168	168
10	6	151	151
20	12	134	134
30	18	117	117
40	24	101	101
50	30	84	84
60	36	67	67
70	42	50	50
80	48	34	34
90	54	17	17
100	60	0	0

\* 流木材積： 600 cm<sup>3</sup>

### 3) 実験結果

#### a) 堆砂地上での流木挙動パターン

土石流と共に流下してきた流木は土石流フロントに集中する傾向があり<sup>10)</sup>、まず流木が堆砂地に達し、その後土石流後続流・表流水の順に到達する。堆砂地内に入ると勾配の変化・拡幅の影響により土石流の流速が落ちるため、流木は一旦堆砂地の中央付近で停止する。すぐその後堆砂地に到達した後続土砂が、停止した流木を覆うようにして堆砂地上に拡がり停止する。これ以降の流木の挙動は以下の4つのパターンに分類される。

A (図3.8(a)) : 流木が堆砂地上で停止した後、大部分がそのまま堆積するパターン。

土石流先頭部を構成していた土砂が先に停止した流木を覆って堆砂地上中央に拡がり、後続土石流がこの土砂に向かって流下してくる。しかし流木を覆った土砂を水通しまで運ぶほどの力はなく、土砂の上流側で流速が弱まって一旦停滞する。後続土石流は引き続き堆砂地へ流入して首振り現象を繰り返し、やがて流木を覆った先頭部の土砂を乗り越え流下し始める。流下する土石流とともに先に堆積していた土砂も、徐々に流下方向に向かって堆積形状を変えながら流出する。この時土砂に覆われていた流木の一部は土砂とともに流下方向に向かって移動し堆積位置を変えるが、土砂が流木を覆っているため後続土石流の影響を直接には受けず、流出することはない。土砂が流出するにつれ、土砂内に取り込まれた短い流木が表面に洗い出されて流出するものがあるが、大半は堤防内にとり残される。(写真3.13)

B (図3.8(b)) : 長い流木が砂防ダム本体に到達し袖に接して水通しを一旦閉塞するが、やがて後続流に押されて流出するパターン。堆砂地中央で停止した流木と土砂は後続土石流の流体力を受け、砂防ダム本体に向かって進む。長い流木の長軸が流下方に対し垂直近くになり、砂防ダムの袖に接触して停止する。短い流木も長い流木が水通しを閉塞することにより、その背後で停止する。しかし長い流木は袖の左右どちらか一方にしか引っかかっておらず、後続の土砂・流水に押されて次第に水通しから流木の片側がはみ出してくる。この現象により流木の組み合わせが変わって流木間に隙間ができる、土砂及び流水がその間から徐々に流出し始める。さらにその隙間が大きくなり、やがて一気に流木群は流出する。それまで流木を覆っていた土砂も流木の

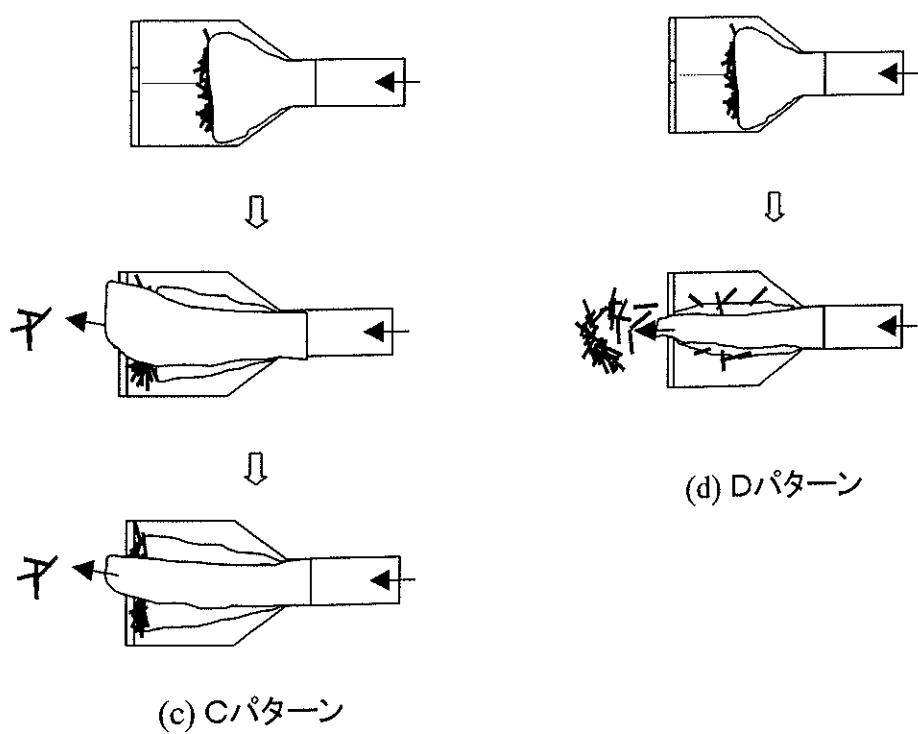
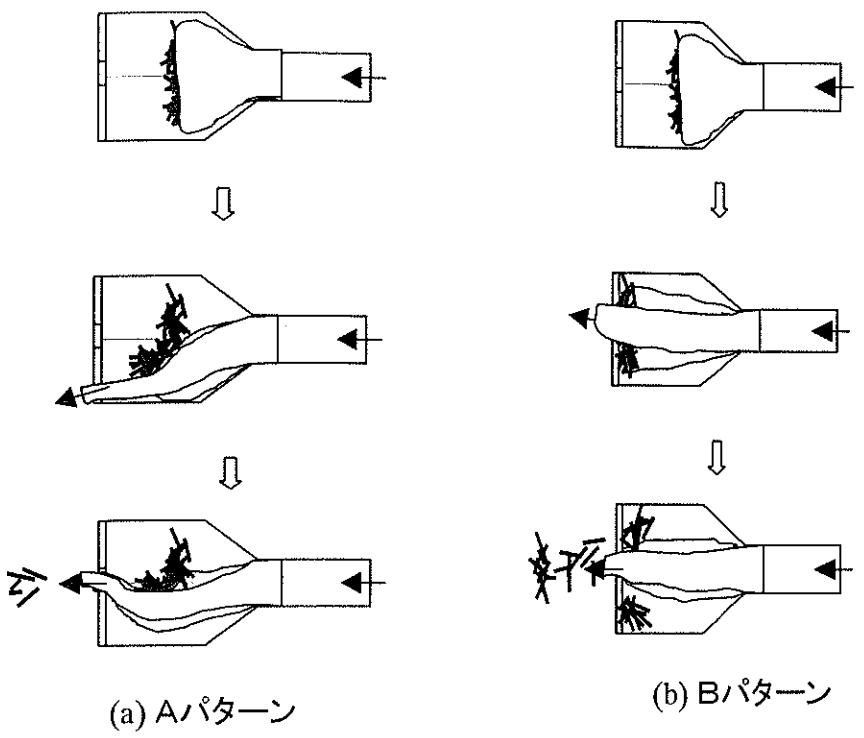


図 3.8 堆砂地上での流木挙動パターン

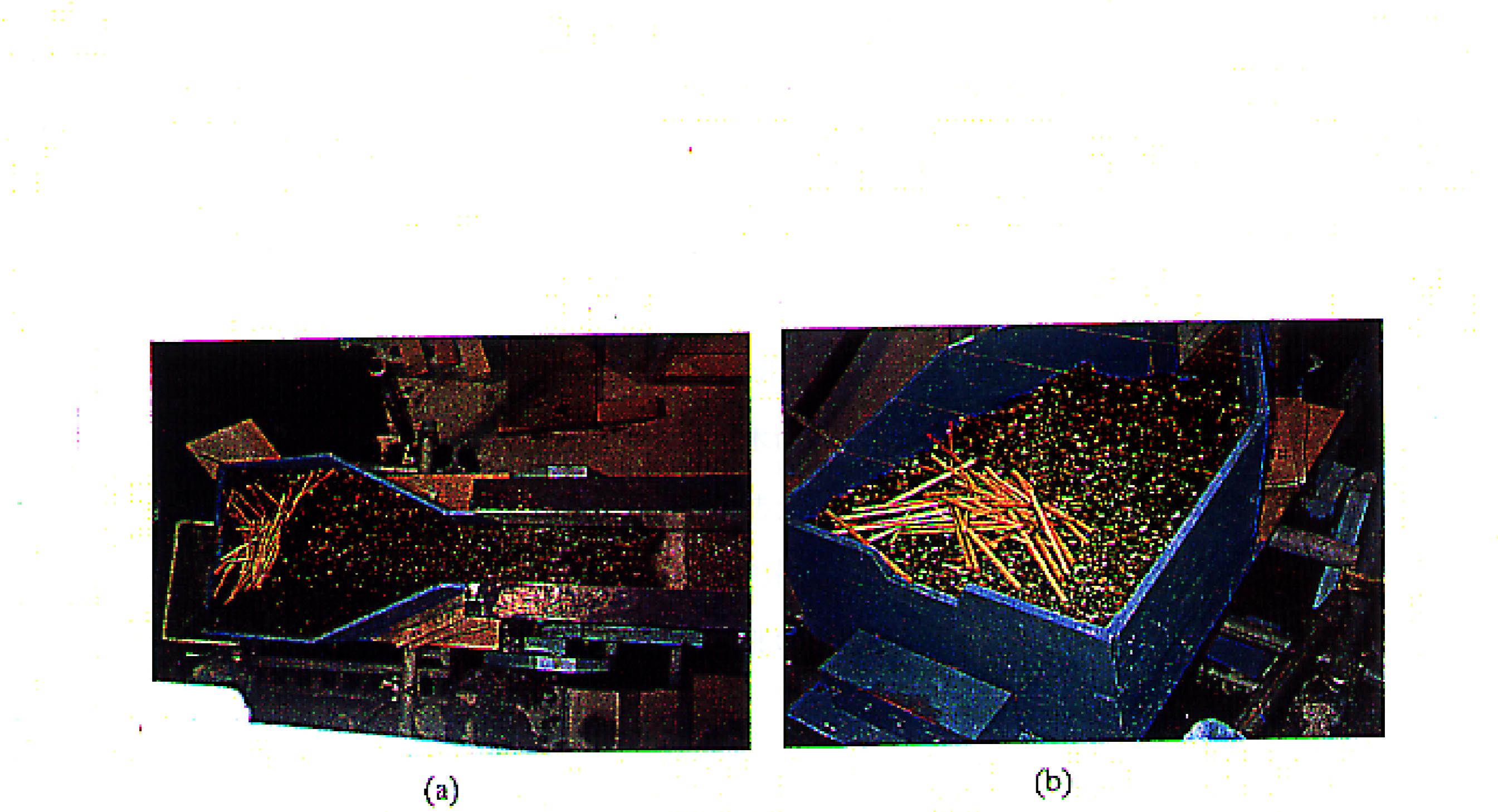


写真 3.13 堆砂地上での流木堆積(Aパターン)

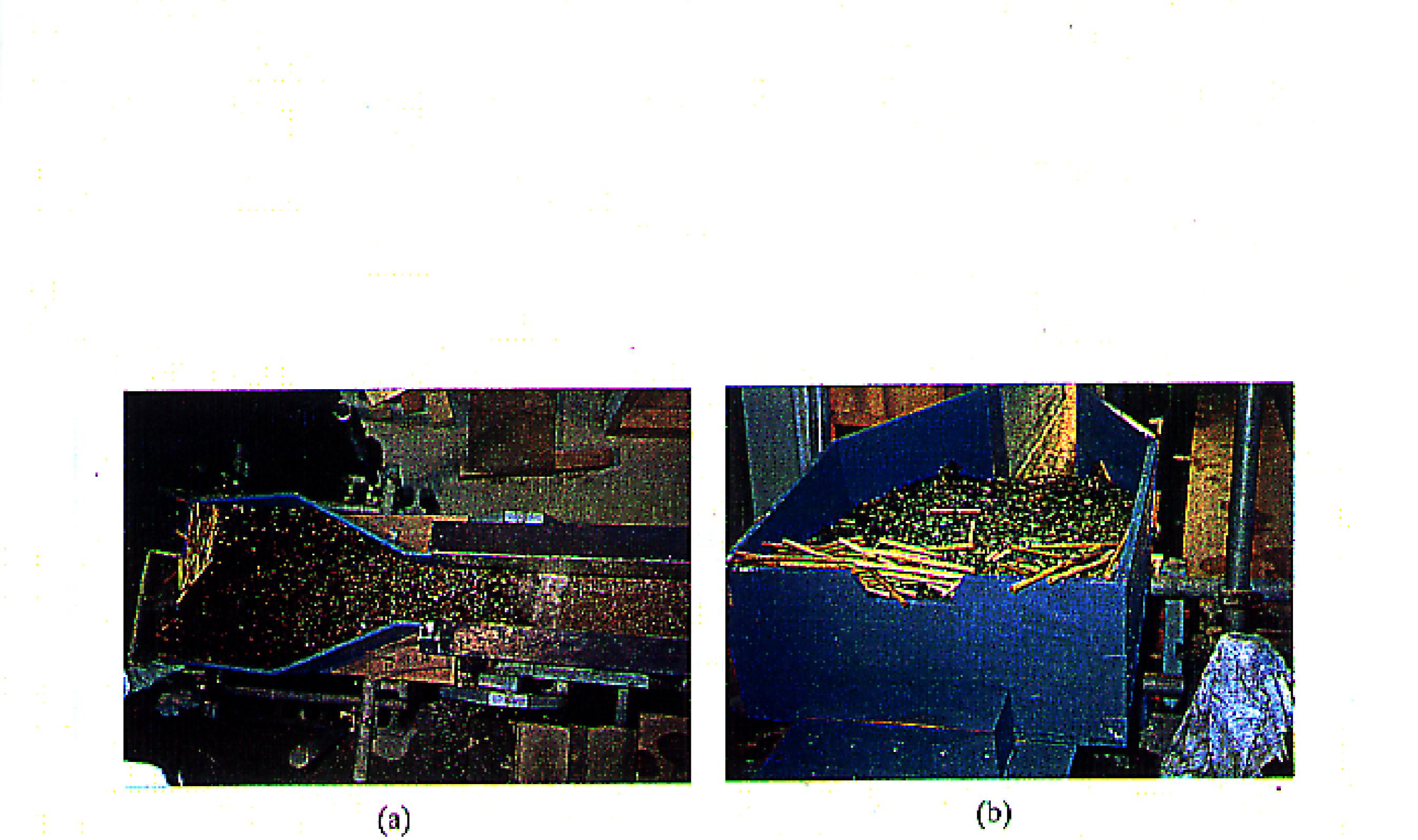


写真 3.14 水通しを閉塞した流木堆積(Cパターン)

流れに伴いほとんど流出する。流木は袖に接して停止するもの、あるいは堆砂地内に埋もれたものが残留する程度である。

C (図 3.8 (c)) : 長い流木が左右両袖に引っかかって水通しを閉塞し、大量に捕捉されるパターン。流木を覆った土砂も、流木が水通しを閉塞することにより袖の高さ近くまで流木上流側に堆積する。流木が砂防ダム本体まで到達する状況は前述の“B”パターンと同じであり、長い流木が左右両袖にまたがって停止するのが違いである。後続流は袖及び閉塞された水通し及び袖部の上を越流し、土砂の下になった流木が流出することはない（写真 3.14）。

D (図 3.8 (d)) : 流木・土砂は後続土石流の流体力を受けて移動し、水通しから流出するパターン。長い流木も長軸が流下方向に対し平行に近く向き、袖に引っかからず水通しを通過する。

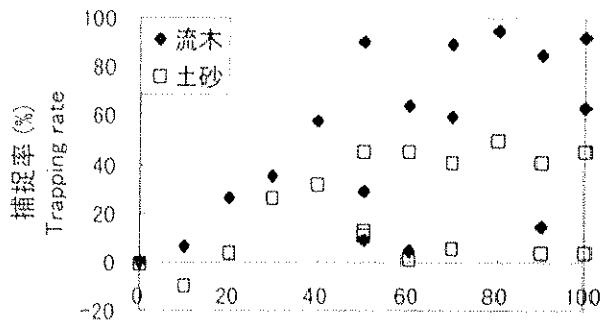
#### b) 流木捕捉率と土砂捕捉率

“流木混入率”と流木・土砂捕捉率の関係を、通水流量別に示したのが図 3.9 (a)～(d)である。この関係より以下のことが言える。

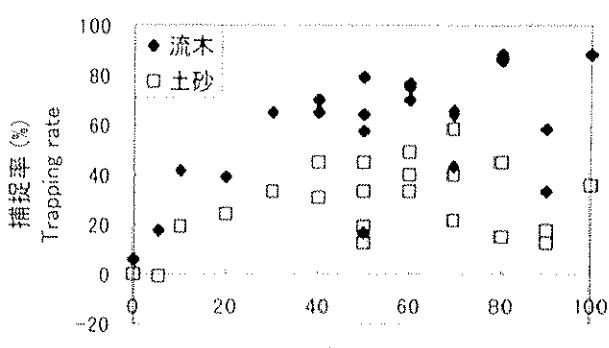
- ① 通水流量が 2.3 l/s, 1.7 l/s の時 (図 3.9 (a) (b))、“流木混入率”が約 50 %未満では“流木混入率”が上昇するにつれ流木捕捉率も高くなる傾向がある。“流木混入率”が約 50 %以上の流木捕捉率は 80～90 %と非常に高くなる場合もあるが、10 %未満と非常に低くなる場合もある。
- ② 土砂捕捉率についても、流木と同様の傾向が見られる。
- ③ 通水流量 1.4 l/s の時 (図 3.9 (c))、上記①②の傾向が明瞭には現れなくなる。
- ④ 通水流量が少ない 1.1 l/s の時 (図 3.9 (d))、①②の関係が見られず、捕捉率は全体的に高い。

#### c) パターン別の“流木混入率”と流木捕捉率

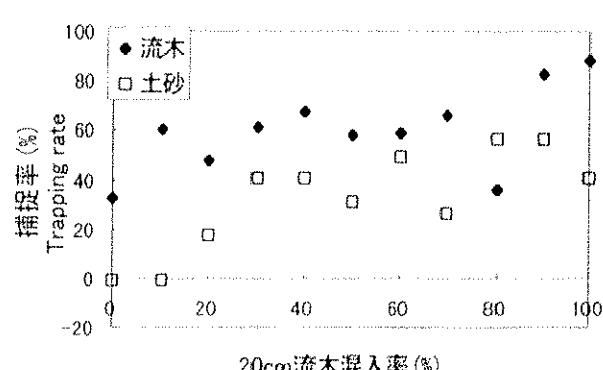
図 3.9 (a)～(d) で示した“流木混入率”と流木捕捉率の関係を、a) で分類した 4 つのパターン別に整理したのが図 3.10 (a)～(d) である。通水流量 2.3 l/s (図 3.10 (a)) については、“流木混入率”が低く捕捉率の低い場合は“D”パターンが多い。また“流木混入率”が高く捕捉率の高いものは“C”パターン、“流木混入率”が比較的高くても捕捉率が低かったのは“B”パターンであった。通水流量 1.7 l/s (図 3.10 (b)) の



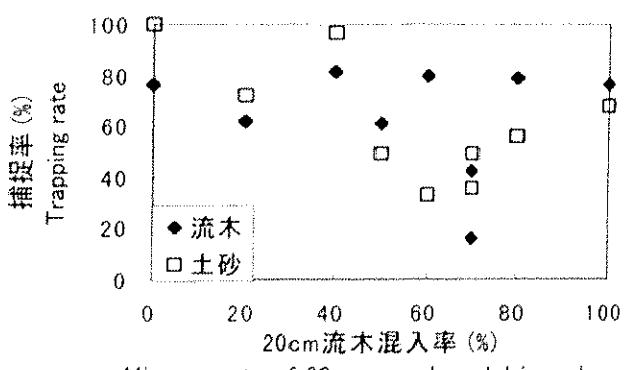
(a)通水量 2.3 l/s - 120 sec



(b)通水量 1.7 l/s - 120 sec

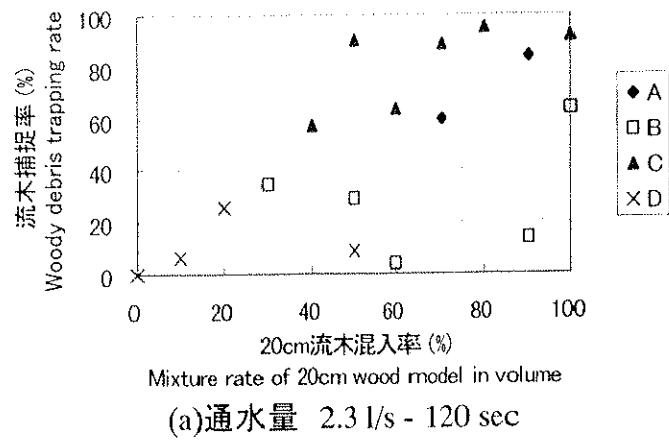


(c)通水量 1.4 l/s - 300 sec



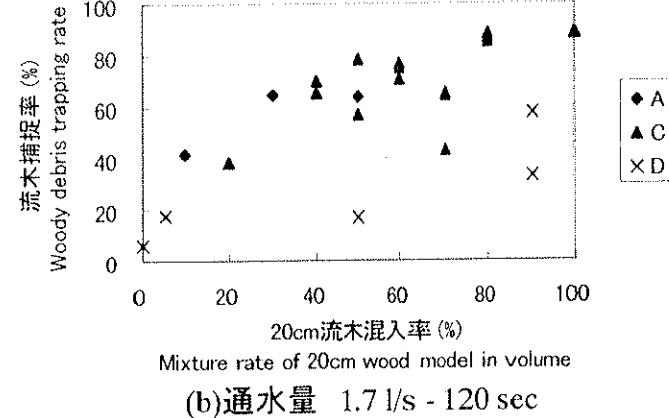
(d)通水量 1.1 l/s - 300 sec

図 3.9 流木・土砂捕捉率と水通り幅より長い“流木混入率”



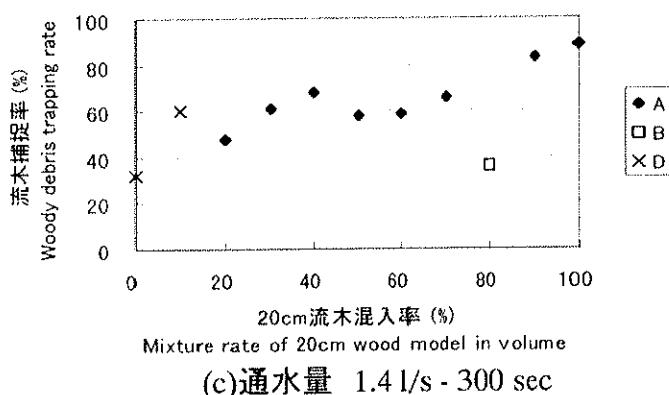
Mixture rate of 20cm wood model in volume

(a) 通水量 2.3 l/s - 120 sec



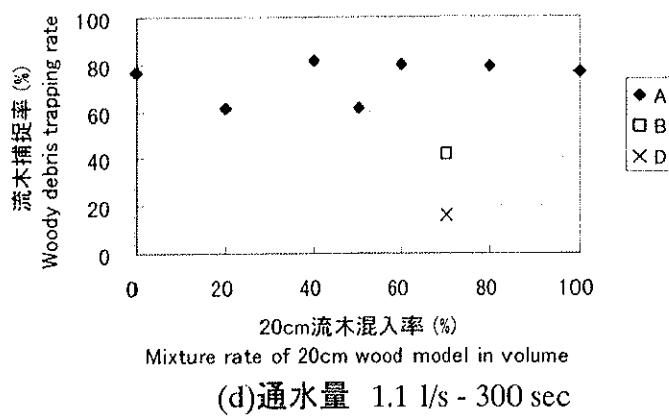
Mixture rate of 20cm wood model in volume

(b) 通水量 1.7 l/s - 120 sec



Mixture rate of 20cm wood model in volume

(c) 通水量 1.4 l/s - 300 sec



Mixture rate of 20cm wood model in volume

(d) 通水量 1.1 l/s - 300 sec

図 3.10 分類パターン別流木捕捉率と水通し幅より長い“流木混入率”

時は、“流木混入率”が比較的高くても捕捉率が低かったのは“D”パターンであること以外は、 $2.3 \text{ l/s}$  の時と同様の傾向である。通水流量  $1.4 \text{ l/s}$  (図 3.10 (c)) の時は、“流木混入率” 20 %以上はほとんど“A”パターンによる捕捉、それ以下の場合は“D”パターンであった。また通水流量  $1.1 \text{ l/s}$  (図 3.10 (d)) の時は“流木混入率”に関係なく比較的高い値を示し、これは“A”パターンによるものが多かった。

図 3.10 (b) (c)において、流木が水通しから流出してしまう D パターンでも流木捕捉率が 50 %以上の高い値を示したのは、堆砂地上で土石流路の左右に残留した流木が多かったことによるものである。

#### d) 通水流量と流木・土砂捕捉率

比較的高い流木捕捉率が得られる“A”と“C”パターンについて、流木と土砂捕捉率の関係を通水流量別に整理した。図 3.11 (a) の“A”パターンの流木捕捉率は 40~90 %の範囲に収まっているものの、土砂捕捉率は 5~100 %と広くばらついている。これを流量別に見ると、通水量の少ないケースほど土砂捕捉率は高い。一方図 3.11 (b) の“C”パターンの流木捕捉率は 40~95 %であり“A”パターンとほぼ同じ値を示していたが、土砂捕捉率は 15~60 %と“A”パターンに比較し通水量の影響を受けにくい。また“C”パターンは通水流量が“ $2.3 \text{ l/s}$ ”と“ $1.7 \text{ l/s}$ ”の時しか発生していない。

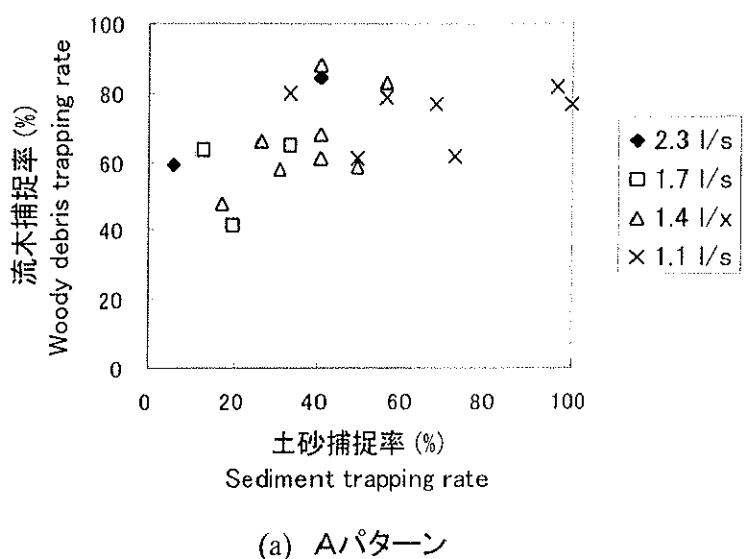
#### e) 無次元後続流量による捕捉形態の分類

堆砂地上で一旦停止した流木の挙動は後続流の影響を強く受ける。同じ流量でもそれが堆砂地上を広がった状態で流下するか、狭い範囲を集中して流下するかにより流木に働く力は異なる。一旦停止した流木が後続流により受ける流体力を表す指標として、後続流量と流下幅、土砂と水の密度、土砂粒径を導入して無次元化し、これを無次元後続流量 ( $q^*$ ) と定義して用いた。この無次元量は以下の (3.4) 式で表される。

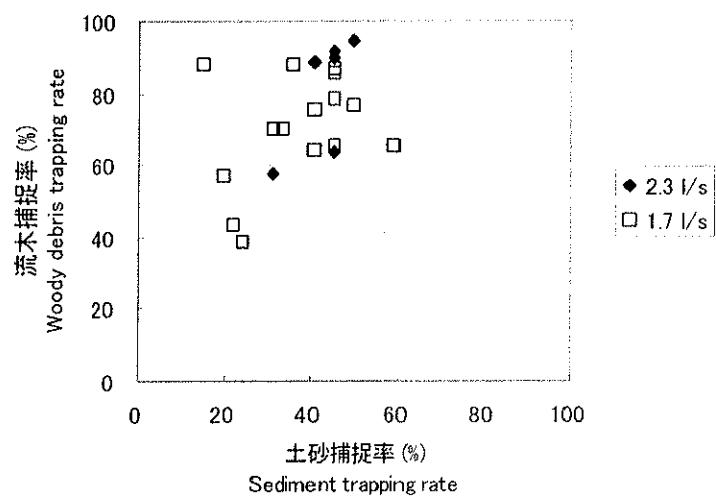
$$q^* = \frac{(1-C) \cdot q_s}{\sqrt{\left(\sigma/\rho - 1\right) g d^3}} \quad - \quad (3.4)$$

ここに、 $q_s$ : 流木が流体力を受けるときの単位幅あたり土石流流量 ( $= Q_s/b$ )

$Q_s$ : 土石流流量  $b$ : 堆砂地上での土石流流下幅



(a) Aパターン



(b) Cパターン

図 3.11 流量別の流木捕捉率と土砂捕捉率

$$\begin{aligned}
 C &: \text{堆砂地上に堆積した土砂の容積土砂濃度} (\approx 0.6) \\
 \sigma &: \text{土砂の密度} \quad \rho: \text{水の密度} \\
 g &: \text{重力加速度} \quad d: \text{土砂の代表粒径}
 \end{aligned}$$

(3.4) 式右辺の分子は水の流量に等しい。上方から撮影したビデオにより、堆砂地上で一旦停止した流木に後続流流体力が働くいたときの後続流下幅を読み取って単位幅当たり流量を計算した。この無次元量と流体力に相関があるものと仮定すると、この値が大きいほど流木に働く流体力も大きいことになる。“流木混入率”との関係を、特に捕捉率の高い“A”と“C”において比較したものが図3.12である。堆砂地上で堆積する“A”パターンの値はばらつきがあるものの、単位幅あたり無次元後続流量平均は5.54、水通しを閉塞する“C”パターンは“A”より高い値を示し、平均は6.89であった。

#### 4) 考察

“流木混入率”が低いと流木捕捉率も低く、高くなるにつれ流木捕捉率は上昇する傾向がある。しかし“流木混入率”が高くても流木捕捉率が低い場合もある。流木捕捉率が高いのは、流量が多いときは長い流木が水通しを閉塞する“C”パターンであり、流量が少ないとときは堆砂地上に堆積する“A”パターンである。

流量が2.3 l/sと1.7 l/s(図3.9(a)(b))の場合、“流木混入率”が低い時は“D”パターンを示し、砂防ダム本体に到達すると一気に水通しから流出した。これは水通し幅より短い流木が多く、水通しを閉塞する確率が低いためと考えられる。また“流木混入率”が高くなると水通し幅より長い流木が多い分、ダムの袖に引っかかる確率が高くなり、“C”パターン、もしくは“B”パターンを示す場合が多かった。流木の両端が両袖に完全にひっかかっていない場合“B”パターンで低い捕捉率、流木が水通しの両袖にまたがってかかった場合“C”パターンで高い捕捉率を示し、これは水通し幅より長い流木が砂防ダム両袖に完全にまたがって停止するかどうかが捕捉率に強く影響することを示している。

流量1.4 l/s(図3.9(c))の場合、やはり“流木混入率”が低いと流木は砂防ダム水通しを通過して流出する“D”パターンを示し、高いと堆砂地上に堆積する“A”パターンであった。流木が水通しに到達して閉塞する“B”及び“D”パターンは発生していない。これは流量が少なくなると土石流の流体力も小さくなり、流木と流木を覆った

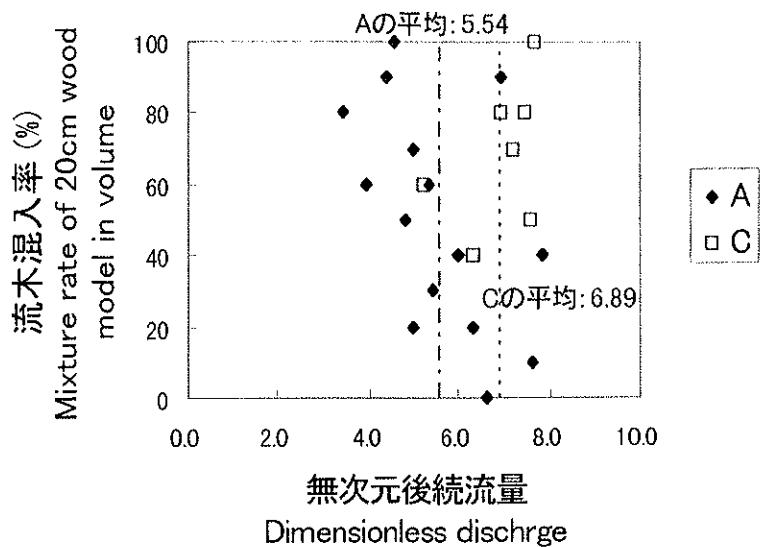


図 3.12 無次元後続流量と“流木混入率”(AとC)

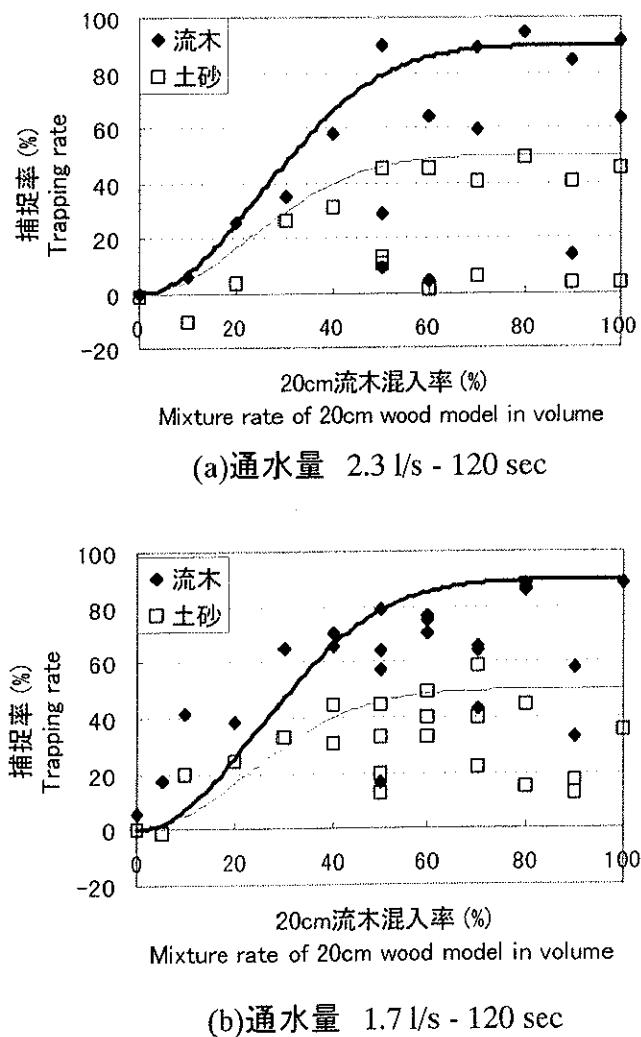


図 3.13 “流木混入率”と流木・土砂捕捉率

土砂を水通しまで運ぶ力が弱いことが考えられる。また“流木混入率”が高いと長い流木が多く、それだけ堆砂地との設置面積が広くなり、従って摩擦抵抗も大きく、停止して“A”パターンを示したと考えられる。逆に“流木混入率”が低いと短く細い流木が多く、土石流流体力に対する抵抗力が弱くなり“D”パターンを示したものと考えられる。

流木の捕捉と土砂の捕捉には、密接な関わりがある。透過型砂防ダムの開口部を流木が閉塞すると、背後に土砂が捕捉されることが観測されている<sup>11) 12)</sup>。今回の実験は不透過型であるが、水通しを開口部と置き換えて考えると同様の現象が起こったものであり、これは“C”パターンによる捕捉である。また流下途中に堆積した流木群に土砂貯留機能があることも指摘されている<sup>3) 4)</sup>。複数の流木が流下途中複雑に絡み合って停止し、その背後に流下してきた土砂が貯留される現象であり、これは“A”パターンに類似したものと考えられる。しかし土砂捕捉率は流木の捕捉状況により変化する（図3.11）。

“C”パターンの場合一旦流木が水通しを閉塞するとその背後に土砂が急速に堆積し、その堆積高さは袖上縁近くにまで達する。すなわち水通しが塞がれると砂防ダムの貯砂容量が袖高さ分増えることになり、その結果土砂捕捉量が上昇する。さらに後続土石流・流水が流下してくると、その貯砂容量を越えた場合は袖上部から越流下する。一方“A”パターンの場合、堆積した流木の背後に土砂が貯留されるのは“C”と同じであるが、後続土石流・流水に侵食された土砂は水通しから流出が続く。土砂が水に運ばれるのは掃流力による影響が大きく、流量が多いほど掃流力も大きくなることを考えると、“A”パターンの土砂捕捉率は流量による影響を受けやすいといえる。つまり堆砂地上で堆積する“A”パターンの場合、その土砂捕捉率は流量が多いと低く、少ないと高くなる。

以上の結果と考察より、長い流木が水通しを閉塞する“C”パターンとにおいて、流木捕捉率が“流木混入率”的增加に伴い上昇し、やがて一定値に近づいていくことが明らかとなった。堆砂地上に堆積する“A”パターンについては、流量が多いと発生しにくく少ないと“流木混入率”との相関がなくなる。すなわち先に推定した(3.3)式は、“C”パターンの流木捕捉率と“流木混入率”的関係を表せる。また同時に流木の背後に土砂を安定して捕捉するため、土砂捕捉率についても同様の式で表すことができる。

$$T = T_{\max} - (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{k}{2T_{\max}} M^2} \quad - (3.3)$$

“C”パターンが発生した図3.9(a)(b)の実験結果から、流木・土砂捕捉率の上限値( $T_{\max}$ )と“混入率” $M = 0$ の時の流木・土砂捕捉率( $T_0$ )を読みとり、係数“ $k$ ”を決めるとそれぞれ流量別の値は表3.7のようになる。図3.13(a)(b)に表示してある曲線は太線が流木、細線が土砂について求めた値を(3.3)式に代入して得られたものである。水通しを閉塞して流木が堆積する“C”パターンの捕捉率については、概ね当初の推定式が妥当であったと言えるだろう。

表3.7 実験で得られた流木・土砂捕捉率に関する諸元

		2.3 l/s	1.7 l/s
流木捕捉率 Woody debris	$T_{\max}$	0.9	0.9
	$T_0$	0	0
	$k$	15	15
土砂捕捉率 Sediment	$T_{\max}$	0.5	0.5
	$T_0$	0	0
	$k$	10	10

また流木の挙動に対し影響の強い土石流について、単位幅あたりの無次元後続流量を計算した結果、“C”パターンは“A”パターンに比べて高い値を示した。この無次元量と流体力に相関があるものとすると、“C”パターンが発生するには堆砂地上に停止した流木をダム本体まで運ぶ十分な流体力が必要であることを意味する。逆に堆砂地上でずっと停止してしまう“A”パターンの場合は、流木を砂防ダム本体まで押し流す流体力が足りなかったことを示している。

### 3. 4 結語

本章では、自然河道と不透過型砂防ダムにおける流木の堆積について論じた。自然河道での流木堆積要因を、①障害物による堆積、②地形要因による堆積、③水位の低下による堆積、の3つに分類した。実態を確認したところ、①②の要因による堆積は多くの流木が集積する傾向が強く、③の要因によるものは単独で広範囲に堆積することが多かった。

力学的に見ると堆積を促進させるためには、流下する流木のエネルギーを失わせることが必要である。移動中の流木が持つエネルギーは位置、速度から成っており、位置エネル

ギーは発生場所により特定されるが、速度はその流木を運ぶ流体が決定する。流木を運ぶ流体とは一般的に土石流か水であろう。すなわち土石流形態か掃流形態で流下するかで、その流下エネルギーが異なる。流木を運ぶ流体のエネルギーが下がれば、堆積しやすい状況になる。流木を下流の生活圏に到達する前に捕捉するためには、現在流木対策工の建設が一般的である。しかしこの工法は河川の中に構造物を設けるもの、或いは既設構造物に流木が堆積しやすくなるよう細工をするもので、経済面・景観面・環境面を考えた上で最良のものとは言い難い。自然河道において流木が堆積した原因を明らかにすることにより、例えば溪畔林や巨礫を適度な間隔で固定する、あるいは狭窄部・湾曲部など堆積しやすそうな地形を利用した対策が可能となり、またこれからはこうした工法が重要視されてくるものと考える。

不透過型砂防ダムの流木捕捉に関する要因について、資料と実験により考察した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 不透過型砂防ダムによる流木捕捉形態は、a)流木が水通しを閉塞して捕捉、b)土砂と共に砂防ダム堆砂地内に埋没して捕捉、c)堆砂地上及び袖部での停止による捕捉、の3つに分類される。
- 2) 不透過型砂防ダムの水通しを閉塞して捕捉された流木の最大流木長は、すべて水通し幅の1.3倍以上であった。
- 3) 満砂状態の砂防ダム堆砂地に到達した流木は堆砂地上で一旦停止し、その後の動きは以下の4つのパターンに分類できる。
  - A：そのまま堆砂地上で停止する。
  - B：砂防ダム本体の袖に到達し水通しを一旦閉塞するが、後続流により流出する。
  - C：砂防ダム本体の袖に到達し、水通しを閉塞して停止する。
  - D：水通しを通過し流出する。
- 4) 水通し幅より長い流木の発生流木量中に占める割合（流木混入率）が高いほど、流木及び土砂捕捉率上限値は上昇する傾向がある。しかし“流木混入率”が上がるにつれその上昇率は低下し、50%程度で一定値に近づく。
- 5) 流木捕捉率が高いのは“A”及び“C”のパターンであり、流量の少ないときは“A”パターン、流量の多いときは“C”パターンによる捕捉形態を示すことが多い。
- 6) 単位幅当たりの流量を土砂・水の密度、土砂粒径により表した無次元後続流量によ

り“A”パターンと“C”パターンは分類できる。この値が“7”程度の値をとるとき、水通しを閉塞する“C”パターンが起こりやすい。

- 7) 混入率に関係なく捕捉率が低い例もあり、これは“B”または“D”パターンである。
- 8) 流木が堆砂地上で捕捉される“A”パターンの場合、土砂捕捉率は流量の影響を受け変動が大きい。一方、流木が水通しを閉塞して捕捉される“C”パターンの場合、土砂捕捉率は流量の変化による影響を受けにくい。
- 9) “C”パターンによる流木・土砂捕捉率は、以下の式で表される。

$$T = T_{\max} - (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{k}{2T_{\max}} M^2}$$

ここに、

$T$ ： 流木・土砂捕捉率

$M$ ： 水通し幅より長い流木の“流木混入率”

$T_{\max}$ ： 流木・土砂捕捉率上限値

$T_0$ ： “流木混入率”が0%時の流木・土砂捕捉率

$k$ ： 土石流規模や流木の質（長さ・直径）によって決まる定数

これらの結果より、以下の手順により満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉量を推定し、流木対策を計画するときの参考資料として用いることが可能となる。①発生流木量・生産土砂量を石川らの方法<sup>5)6)</sup>で推定する。②流木になると推定される立木の高さを測定し、その最大高さと対象とする砂防ダム水通し幅との比率を求める。この比が1より小さい場合は“D”パターンにより流出してしまう可能性が高い。③水通し幅より長い立木の推定発生流木量中に占める割合、すなわち本論で定義した“流木混入率”を計算する。④土石流の水量を土石流対策技術指針（案）<sup>13)</sup>に基づき算定する。なお、土砂の粒径は現地の河床材料調査によって求める。⑤（3.4）式により無次元後続流量を計算し、“A”パターンか“C”パターンになるかを判断する。“C”と判断された場合、“流木混入率”を用いて（3.3）式により流木捕捉率・土砂捕捉率を計算する。⑥発生流木がすべて砂防ダムに到達するものと仮定すれば、流木捕捉量は発生流木量に捕捉率を乗じることにより求まる。

## 引用文献

- 1) 水山高久、天田高白、栗原淳一、小林幹男 (1989) : 樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果、新砂防 Vol.43, No.4 (165), pp. 18-22
- 2) 高橋裕 (1990) : 河川工学、東京大学出版会、311 pp.
- 3) 笠井美青、丸谷知己 (1994) : 山地河川における流木群による土砂の滞留機構、日林誌 76(6), pp. 560-568
- 4) 丸谷知己、笠井美青 (1995) : 土砂滞留に伴う流木群強度の位置的変化、新砂防 Vol.47, No.6 (197), pp. 3-7
- 5) 石川芳治 (1989) : 山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究、京都大学学位論文 p.20, pp. 88~94
- 6) 水山高久、石川芳治、福澤誠 (1991) : 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 p.91, pp. 128~134
- 7) 小山内信智、平松晋也、石川芳治 (1998) : 流木対策施設の効果と維持管理体制の現状、砂防学会誌 Vol.50, No.6, pp. 48~51
- 8) 建設省土木研究所 (1996) : 流木対策砂防施設の維持管理手法検討業務報告書 (平成 8年 2月)
- 9) 瀬尾克美、水山高久、大場章、上原信司 (1984) : 土石流と共に流出する流木の運動と捕捉工に関する実験的研究、土木技術資料 26-2, p. 72
- 10) 矢野義男 (1991) : 流木災害、砂防と治水 Vol.23, No.6, pp. 4-8
- 11) 瀬戸俊彦、葛西俊一郎、山口健太郎、水山高久 (1998) : 鋼製透過型ダムによる砂礫型土石流の捕捉状況、砂防学会誌 Vol.51, No.3, pp. 19-26
- 12) 尾崎幸忠、鴨川義宣、水山高久、葛西俊一郎、嶋丈示 (1998) : 流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査、砂防学会誌 Vol.51, No.2, pp. 39-44
- 13) 建設省河川局砂防部砂防課 (1988) : 土石流対策技術指針 (案)、47 pp.