

◆ 土砂災害特集 ◆

不透過型砂防ダムの流木捕捉機能

南 哲行* 山田 孝** 土井康弘***

1. はじめに

不透過型砂防ダムは本来土砂の捕捉を目的としたものであり、その流木捕捉機能はほとんど明らかにされていない。現在の流木対策計画において満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉量は、土石流区間(河床勾配1/20以上の区間)において土石流捕捉量(土砂調節量)の1%以内、掃流区間(河床勾配1/20より緩い区間)においては見込まない、と仮定して設定されている。しかし既設の不透過型砂防ダムでこの値を上回る流木捕捉が期待できるなら、より効率的な流木対策計画を策定することが可能となる。

本研究は流木対策指針(案)¹⁾改訂のための基礎資料を得ることを目的とし、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を解析し、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した。さらに実験により満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉過程を考察した。

2. 不透過型砂防ダムの流木捕捉実態

2.1 鹿児島県垂水市の事例

平成5年に発生した鹿児島県垂水市における災害報告資料²⁾にある流木堆積状況から、不透過型砂防ダムにおける流木の捕捉形態は、1) 流木が土

石流・流水の通路である水通しを閉塞したことによるもの(飛岡川上流堰堤)、2) 流出土砂が砂防ダムによって捕捉されたために、それに混入していた流木もあわせて捕捉されたもの(中俣川堰堤)、3) 堆砂地上で停止したもの(木場戸谷堰堤・他)、の3つに分類できた。

1)のような捕捉例は過去にも報告されており³⁾流木長さと水通し幅の関係が強く関わっているものと考えられる。2)のように土砂と共に捕捉されるのは、流出土砂量に比して砂防ダムの貯砂容量に余裕のあるときであり、流木が発生した時点での砂防ダム堆砂状況がこの捕捉形態に強く関わるものと推測する。3)については堆砂地上での土石流の堆積による流路の変動、水深・流速など水理的な現象の変化によって堆積土砂上に流木が取り残されたり、粗度の大きな礫にひっかかって堆積

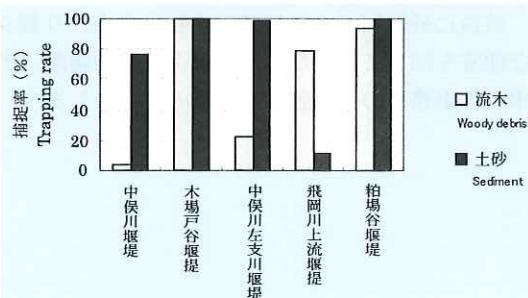


図-1 鹿児島県垂水市中俣川内流域での砂防ダムの
流木・土砂捕捉率

表-1 砂防ダムの諸条件

	堤高(m)	計画貯量(m ³)	完成年	堆砂状況(発生前～後)	流下形態	砂防ダム下流土砂流出	堆砂地内流木位置
中俣川堰堤	11	18,827	平成2年	未～満	土石流	有	接
木場戸谷堰堤	10	9,655	平成2年	未～未	掃流	無	離
中俣川左支川堰堤	10	5,697	平成2年	未～満	掃流	無	接+離
飛岡川上流堰堤	10		昭和57年	満～満	掃流	有	接
柏場谷堰堤	9	14,000	平成2年	未～未	掃流	無	接

* 堆砂状況

“未～満”：災害発生前は未満砂で発生後満砂であった

“未～未”：災害発生前は未満砂で発生後も未満砂であった

“満～満”：災害発生前から満砂状態で発生後も満砂であった

* 堆砂地内流木位置

接：砂防ダムに接して堆積(明らかに水通しの閉塞や袖によって捕捉されたとみなされるもの)

離：砂防ダムに接しないで堆砂地内に堆積

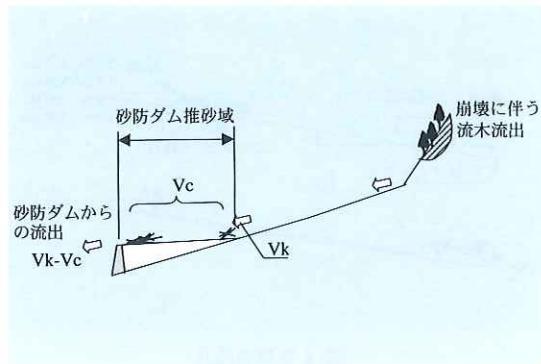


図-2 流木捕捉率概念図

している場合である。

5基の不透過型砂防ダムにおける土砂・流木捕捉率を算出した結果を図-1に、それぞれのダムの堆砂状況、流木下流形態、砂防ダム下流への土砂流出の有無、流木の堆積位置を表-1に示す。

ここで言う流木捕捉率は以下のように定義する(図-2)。なお砂防ダム直下に流木が散在していることが多いが、本報告書ではこれらを流木捕捉率の対象に含めないこととする。

$$T_a = \frac{V_c}{V_k} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

T_a : 流木捕捉率 (%)

V_c : 砂防ダム堆砂域内流木捕足量 (m^3)

V_k : 砂防ダム堆砂域流木到達量 (m^3)

災害発生後も未満砂状態であった木場戸谷堰堤と柏場谷堰堤は、流木・土砂共に100%近い捕捉率を示している。災害発生前が未満砂で発生後満砂となった中俣川堰堤と中俣川左支川堰堤は、土砂捕捉率は80~100%と非常に高いものの流木捕捉率は20%以下と低い。災害発生前から満砂状態であった飛岡川上流堰堤において、土砂捕捉率は低かったものの、流木捕捉率は80%近くを示している。土砂調節量を計画貯砂量の10%と仮定して、捕捉された流木体積の占める割合を計算すると約13%となり、現行の指針(案)で示されている“1%未満”に比較して大きな値となっている。

2.2 砂防ダム堆砂比と流木捕捉率

砂防ダムの堆砂状況と流木捕捉の関係を把握するため、堆砂比とその流木捕捉率を比較したのが図-3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

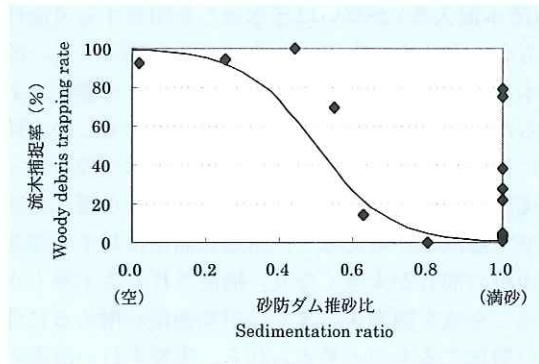


図-3 砂防ダム堆砂比と流木捕捉率

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。砂防ダム堆砂比が1の時(満砂)とそれ以外の時(未満砂)で、異なる特徴を示している。

砂防ダムが未満砂状態の場合、土石流とともに流下する場合の流木捕捉率は砂防ダムの空容量が大きいほど高く、小さいほど低く、その関係は図-3にあるようにロジスティック曲線に類似の曲線で表されるものと考えられる。実態においても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報告されている⁴⁾。

一方砂防ダムが満砂状態(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)水通しを形成する袖の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によると満砂状態における流木捕捉率は0~80%まではらつきがある。流木捕捉率が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。つまり満砂状態の時は、余裕があるときとは別の要因が働き捕捉率がばらつくものと考えられる。

ここで流木が砂防ダム水通しに接して停止した原因が、長い流木が水通しを閉塞したことによるものであったと仮定すると、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

(流木混入率)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水通し全域を閉塞するまでは閉塞面積が増えるに伴い増加するものと考えられる。実験を行い流木の挙動及び捕捉形態を調べたので、次章からその結果について述べる。

3. 実験

3.1 実験の概要

満砂状態の不透過型砂防ダムにおける流木の挙動を把握することを目的とし、水通し幅と流木長に着目した実験を行った。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落合川の第1号通常砂防ダム(流域面積0.42km²)を想定し、模型の縮尺を1/50としてフルード相似則により実験諸量を決定した。実験に用いたのは幅20cm、長さ5mの矩形型断面の循環式水路である。水路末端に拡幅部を持つ幅60cm、長さ1mの堆砂地を模したボックスを設置し、その下流端に高さ4cm、下幅12cm、上幅16cm(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。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、95%粒径14.5mm、平均粒径6.1mm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^{5),6)}を参考にそれぞれ3,750m³、75m³と仮定した。これを換算すると実験に使用する土砂量は30,000cm³、流木材積は600cm³となる。水路上流に土砂を1.5mの長さで敷き、その上に本数を調整した流木モデルをランダムに挿し、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-4)。流木発生時ピーク流量は30.8m³/sと記録されており、これをもとに40m³/s、30m³/s、25m³/s、20m³/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

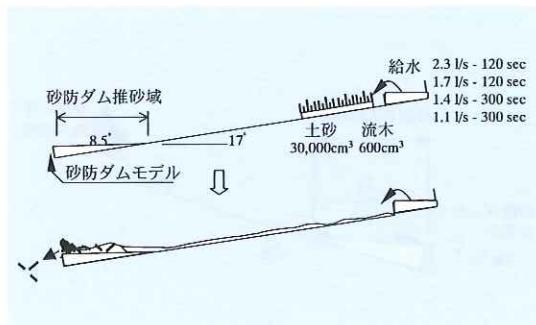


図-4 実験の流れ

表-2 実験に使用した流木本数

20cm “流木混入率” (%)	本数		
	20cm $\phi 0.8\text{cm}$	10cm $\phi 0.6\text{cm}$	6cm $\phi 0.4\text{cm}$
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 : 600cm³

それぞれ2.3ℓ/s、1.7ℓ/s、1.4ℓ/s、1.1ℓ/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、流路内に敷きつめ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。

流木モデルは長さ・直徑の異なる3種類を用意し、水通し幅より長い流木モデル(20cm、水通し幅の1.67倍)が全体流木量に占める割合(以下“流木混入率”といふ)を変化させ、流木及び土砂の捕捉率を測定した。実験に使用した流木混入率と流木本数の関係を表-2に示した。

3.2 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⁷⁾、まず流木が堆砂地に達し、その後土石流後続流・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土石流先頭部が、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。土砂の先頭部が堆砂地上で停止すると後続土砂も水路上に停止する

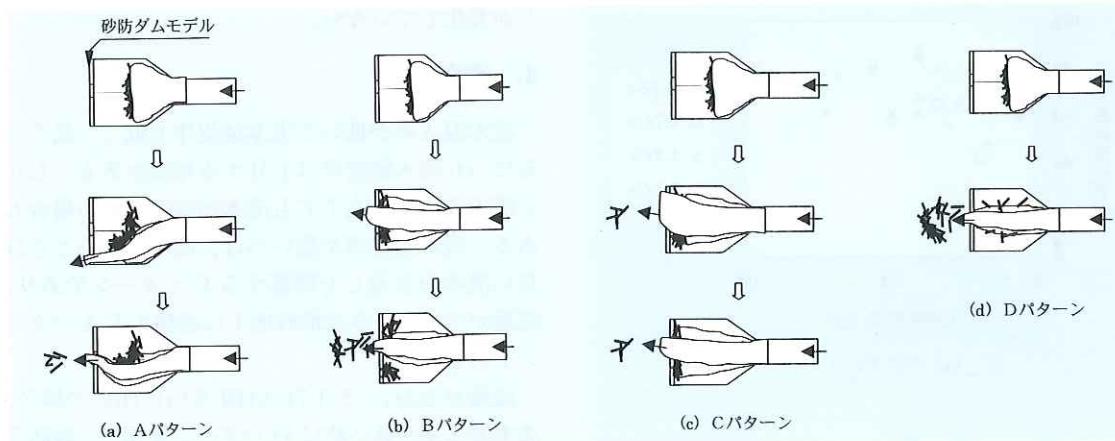


図-5 堆砂地上での流木挙動パターン

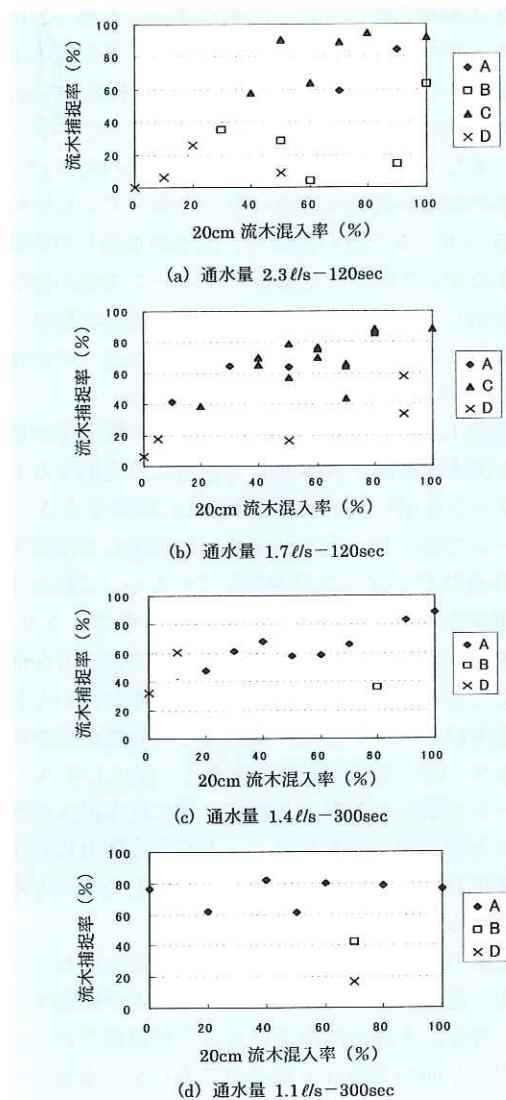


図-6 分類パターン別流木混入率と流木捕捉率

が、引き続き上流から供給される水により徐々に侵食・運搬されて堆砂地に到達する。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-5(a))：流木が堆砂地上で停止した後土石流が流木を乗り越え流下するが、最終的に大部分がそのまま堆積するパターン。

B(図-5(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。

C(図-5(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。

D(図-5(d))：土砂が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。

流木混入率と流木捕捉率の関係を、分類した4つのパターン別に整理したのが図-6(a)～(d)である。特に通水流量が多い時、かつ流木混入率が高いと同じ流木混入率でも異なるパターンを示すことがあったので、この場合は複数回実験を行った。

通水流量2.3ℓ/s(図-6(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パターンが多く、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1.7ℓ/s(図-6(b))の時は、流木混入率が比較的高くて捕捉率が低かったのはDパターンであること以外は、2.3ℓ/sの時と同様の傾向である。通水流量1.4ℓ/s(図-6(c))の時は、流木混入率20%以下の場合にはDパターンであった。

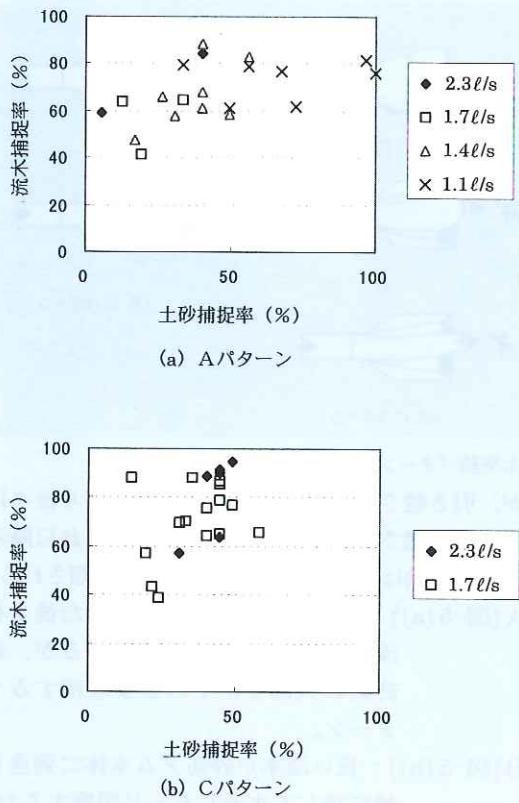


図-7 流量別の流木捕捉率と土砂捕捉率

また通水流量 $1.1\ell/s$ (図-6(d)) の時は、流木混入率が 70% の時 B 及び D パターンを示し低い流木捕捉率であったが、全体的に流木混入率に関係なく高い値を示し、A パターンによるもののが多かった。図-6(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。

3.3 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、流木捕捉率と土砂捕捉率の関係を通水流量別に整理した。

図-7(a)の A パターンの流木捕捉率は 40~90% の範囲にあるが、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、通水流量の少ないケースほど土砂捕捉率は高い。一方図-7(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 に比較し安定した値である。また C パターンは通水流量が $2.3\ell/s$ と $1.7\ell/s$ の時

しか発生していない。

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、流量が少ないときは堆砂地上に堆積する A パターンである。

流量が $2.3\ell/s$ と $1.7\ell/s$ (図-6(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 $1.4\ell/s$ (図-6(c)) の場合、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 C 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接地面積が広くなり、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⁸⁾。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⁹⁾。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挙動パターンにより変化する(図-7)。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を越流する。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。つまり水通しを閉塞するCパターンは貯砂容量が増える分土砂捕捉率も上がるが、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、少ないとなる。

5. おわりに

不透過型砂防ダムが満砂状態にもかかわらず高い流木捕捉率を示すことがあり、今回の実験条件においてこれを確認した。今後はこの結果を踏まえてより合理的な流木対策計画の立案ができるよう、これら各パターンの発生機構と各要因の影響度等についての検討を進めていきたい。なお今回

の研究を進めるにあたり、九州地方建設局大隅工事事務所及び大分県砂防課には貴重な資料を提供していただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 建設省砂防部砂防課：流木対策指針(案), 15pp, 1990.
- 2) 建設省九州地方建設局大隅工事事務所：国道220号流出土砂・流木量災害調査業務報告書, 1994.3
- 3) 小山内信智、平松晋也、石川芳治：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, 1998.
- 4) 潤尾克美、水山高久、大場章、上原信司：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, 1984.
- 5) 石川芳治：山地小渓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, 125p, 1989.
- 6) 水山高久、石川芳治、福澤誠：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.
- 7) 尾崎幸忠、鴨川義宣、水山高久、葛西俊一郎、鳴丈示：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, 1998.
- 8) 濱戸俊彦、葛西俊一郎、山口健太郎、水山高久：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, 1998.
- 9) 笠井美青、丸谷知巳：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, 1994.

南 哲行*



建設省河川局砂防部砂防課
砂防事業調整官
(前 建設省土木研究所
砂防部砂防研究室長)
Noriyuki MINAMI

山田 孝**



建設省土木研究所砂防部
砂防研究室主任研究員、農博
Dr.Takashi YAMADA

土井 康弘***



同 砂防研究室、農博
Dr. Yasuhiro DOI