
論文

模型樹林帯による土石流堆積パターンの変化に
関する研究

奥村 武信*
久保田 哲也*
中條 慎太郎**

A Study on the Efficient Forest Pattern to Obstruct
the Debris Flow

Takenobu OKUMURA*
Tetsuya KUBOTA*
Shintaro CHUJO**

Summary

Debris flow disasters have become prominent in sediment disaster problems recently. Debris flow tends to occur on the upstream basin which is forest area in most cases. Forests will have an increasingly important role in debris flow countermeasures in sedimentation zones i. e. debris flow fan. In this study, forest patterns which efficiently prevent debris flow were studied experimentally with a hydraulic flume and a model fan. The following results were obtained: 1) forests have a certain effect in hampering debris flow, and in making the sedimentation area smaller, 2) forests make the debris flow reach shorter, 3) forests make the flooding area of following water smaller, 4) zigzag pattern forests cause sedimentation to begin further upstream than lattice pattern forests.

* 鳥取大学農学部農林総合科学科生存環境科学講座

Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture, Tottori University

** 山口県 山口土地改良事務所

Yamaguchi Land Amelioration Office, Yamaguchi Prefectural Government

I 緒 言

わが国は国土の約70%を山地が占め、その上、急峻な地形が卓越し、地質的にも脆弱な地帯が多い。しかも、中緯度偏西風帯に属しており降水量が多く、特に梅雨・台風期にはしばしば集中豪雨に見舞われ、自然災害が頻発している。また、近年は国土開発が山間部にまで及んでいることもあり、自然災害の中でも土砂の崩壊・流出といった土砂移動現象に関係する災害が多数に及んでいる。その中でも、特に土石流による災害はこの数年顕著になっており、これら頻発する土石流に対して、より有効な防止軽減策が望まれている。そのため、避難・予警報システムなどソフトな対策の重要性が強調されているが、これは砂防施設の整備を中心とするハードな対策の推進と一体となって初めて十分な成果を発揮するものである。後者の代表的なものは砂防ダムであるが、最近では、自然との調和を要求されるようになり、ダムのみでなく樹林帯を配置した「緑の砂防ゾーン」などが計画されるようになってきた。土石流が樹林帯に突入した場合、流速と掃流力が落ち、その結果として流出土砂が堆積し、流下が阻止できると考えられる。

本報では、谷の出口に位置する扇状地に到達して拡散する土石流に対し、扇頂部に置かれた樹林帯がどのような影響を及ぼすか、模型実験により検討した結果について報告する。

II 実験方法

1. 実験水路

実験水路は、写真1におよび図3に示すような長さ295cm、幅10cm、勾配15°の土石流発生・流下部と、長さ182cm、幅182cm、勾配2°の堆積部からなっている。流下域の水路床には砂礫を張り付け粗度を付け、堆積面には樹林帯が配置できるように5cmメッシュを配した発砲スチロール板を敷いた。

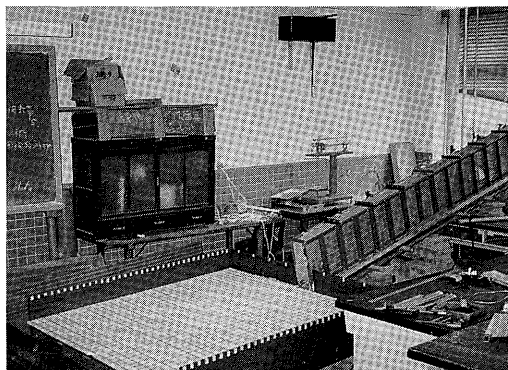


写真1 実験水路

2. 使用した砂礫

実験に使用した砂礫は図1に示す粒径分布をもち、最大粒径9.52mm、平均粒径1.82mm、比重2.61である。標準網フルイで5段階にふるい分けた砂礫を、下に示す割合で実験ごとに混合した。

4.76~9.52mm	5%
2.38~4.76mm	15%
1.19~2.38mm	30%
0.59~1.19mm	30%
~0.59mm	20%

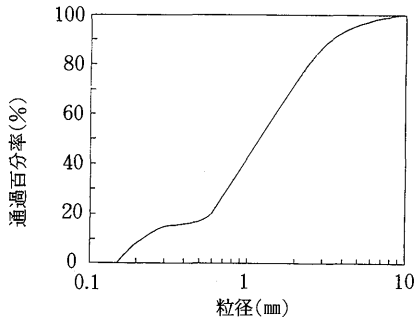


図1 粒度分布

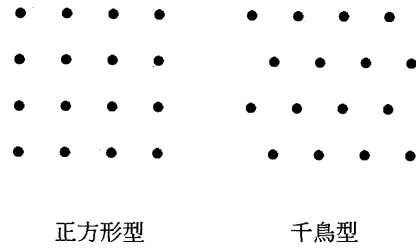


図2 樹木配列パターン

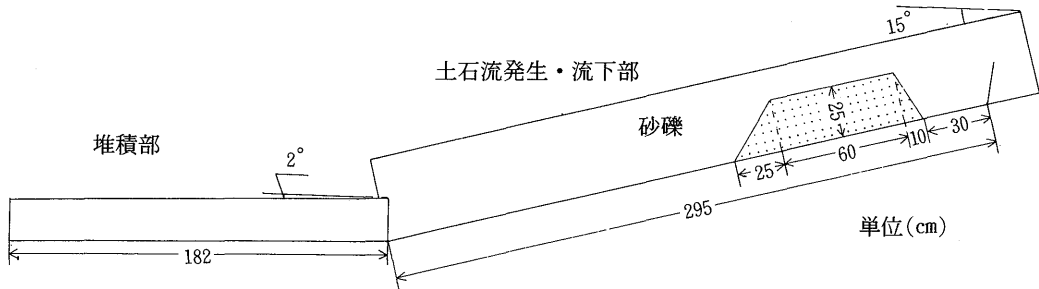


図3 実験水路図

3. 立木模型と配列

立木の模型は、長さ15cm、長径6.5mm、短径5.4mmの竹割箸により作製した。配置場所は堆積面上流端より30~150cmの120cm区間、流心より左右各30cmの60cm幅区間で、樹林帯の分布面積は7,200cm²である。配置パターンは、図2に示すような正方形型と千鳥型とし、立木間の距離は、10.0、7.5、6.0、5.0cmとした。樹木占有面積率すなわち「本数×胸高断面面積」の樹林帯全面積に対する比は、それぞれ0.27、0.49、0.77、1.10%となる。坂口(1975)はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ林の上限本数密度と平均個体の大きさとしての胸高直径との関係を次のように表している²⁾。

$$\text{スギ} : \log N = -1.631 \cdot \log D + 5.501 \quad (1-1)$$

$$\text{ヒノキ} : \log N = -1.356 \cdot \log D + 5.137 \quad (1-2)$$

$$\text{アカマツ} : \log N = -1.638 \cdot \log D + 5.333 \quad (1-3)$$

$$\text{カラマツ} : \log N = -1.727 \cdot \log D + 5.377 \quad (1-4)$$

N : 本数密度 (本/ha) D : 胸高直径 (cm)

D=20~40cmのばあいのNを求め、ここにいう樹木占有面積率を計算すると、表1のようになる。この実験の最大樹木占有面積率1.10%は、胸高直径40cmのヒノキの最大密度の林帯に相当する。

表1 各樹種の最大樹木占有面積率 (単位 %)

胸高直径	スギ	ヒノキ	アカマツ	カラマツ
40cm	0.97	1.16	0.66	0.51
30cm	0.87	0.96	0.58	0.47
20cm	0.75	0.74	0.50	0.39

表2 流動体の容積濃度と密度

流動体の体積 (cm ³)	857	628	700
流動体の重量 (g)	1,258	949	1,031
流動体中の土砂の重量 (g)	650	522	538
容積濃度	0.29	0.32	0.29
流体密度 (g/cm ³)	1.47	1.51	1.47

4. 土石流の発生

水路の上流端30cmのところから図3のように砂礫を厚さ25cmで敷き詰め、砂礫より上流に水を貯め天然ダム状にし、さらに水を給水して天然ダムを崩壊させて土石流を発生させた。

予備実験により、土石流とみなし得る濃度の流動体をつくるのが可能かどうかを検討した。すなわち、容積濃度と流体密度による確認をするため流下部末端で流動体先端を採取し、容積濃度Cdを式(2)より、流体密度 ρ を式(3)より計算した。結果は表2に示した。

$$Cd = \frac{Ws}{\sigma W + (1 - \sigma) Ws} \quad (2)$$

ここに、 σ : 土砂礫の比重

W : 流下物の全重量(g)

Ws : 含有砂礫の絶乾重量(g)

$$\rho = W/V \quad (3)$$

ここに、W : 流下物の全重量(g)

V : 流下物の全体積 (cm³)

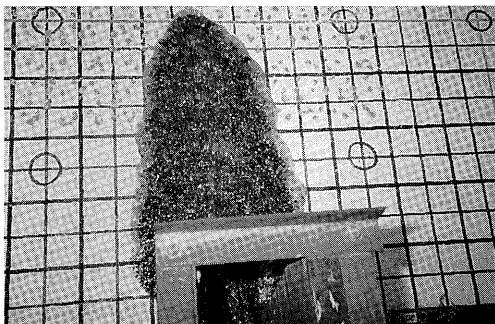


写真2-1 流動体先端部



写真2-2 給水停止後の流動体の堆積状況

土石流の容積濃度は、一般的に0.35~0.60と言われている。この実験で発生した流動体は0.29~0.32であり、土石流であると断定することは難しい。しかし、容積濃度0.15以上が土石流であるとする報告もあり、長野県焼岳では、流体密度1.4~2.1g/cm³の土石流が観測されている。この実験で発生した流動体は、いずれも1.4~2.1g/cm³の範囲内にある。このことと、流動体の堆積状態が非成層で土石流のそれに類似することから(写真2)、この研究で発生させた流動体は、土石流であると判断した。

5. 移動・堆積状況の測定

水路下流端上方に設置したビデオカメラにより堆積部での流下状態を撮影した。ポンプから所定の流量を与え、発生した土石流が堆積面に到達した時刻を0秒とし、その後1秒までは0.1秒間隔、10秒までは1秒間隔で、各時刻における土石流到達範囲の位置を、また所定の時間の給水が終了土石流が完全に停止した後の位置を計測した。

その後、2mの横棒に、5cm間隔で5mm刻みの目盛りを持つピアノ線を通した測定器具を使用して、堆積面の砂礫堆積高をmm単位で測定した(図4)。

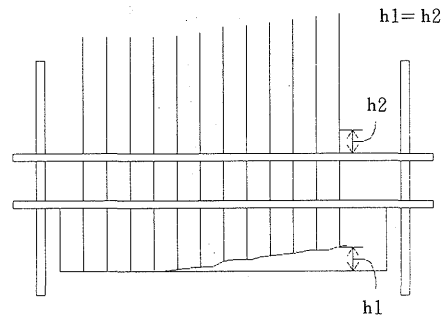


図4 堆積高の測定方法

III 実験結果と考察

1. 樹林帯による土石流流動の変化

堆積面上での土石流の流動は、時間経過に伴い次の3段階に分類された。

明瞭な段波を形成し、ほぼ一定のスピードで流下する。

堆積面に到達し数10cm流下すると先端部は停止する。

これを後続流が追越し、再び段波を形成し流下するが、数10cm流下して停止する。これを繰り返す。

後続流が運んできた砂礫を堆積土砂の上に集積させ、この先端部が少しずつ滑動しながら移動する。

しかし、樹林帯の配置パターンが変わると、堆積面上での土石流の流動は必ずしもこのような経過にならない場合がある。

図5は、土石流が堆積面に到達してからの各経過時刻における土石流到達範囲の位置を示す。なお、長方形の線は樹林帯の配置場所である。この図からは立木密度の違いと到達距離の時間変化との関係が読みとれる。ただし、図中の数字は経過時間(秒)を表す。

正方形型で見ると、6秒までは樹木占有面積率による差はあまりない。7秒では樹林帯の有無による差が少し現れ、8、9秒では0.00%、0.27%のものと高い樹木占有面積率のものとで明らか

かに差がある。10秒になると、樹林無しに比べて、樹林があるために樹木占有面積率0.27%で40 cm, 0.49%で43cm, 0.77%で66cm, 1.10%で80cmも到達距離が短くなる。

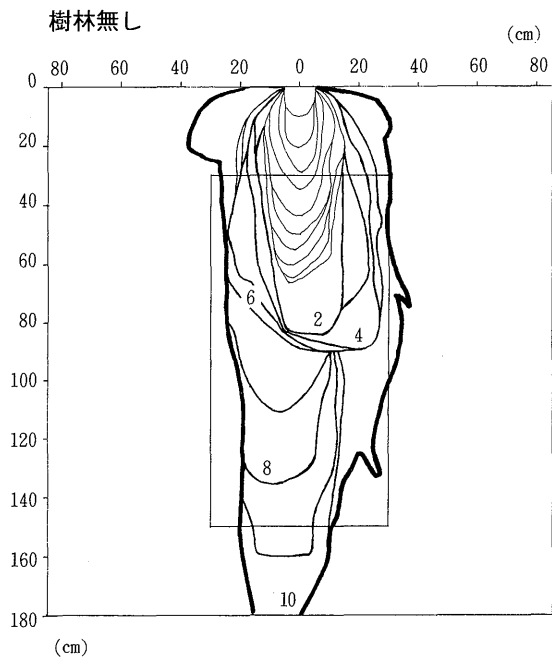


図 5-1 各経過時刻における土石流到達範囲(1)

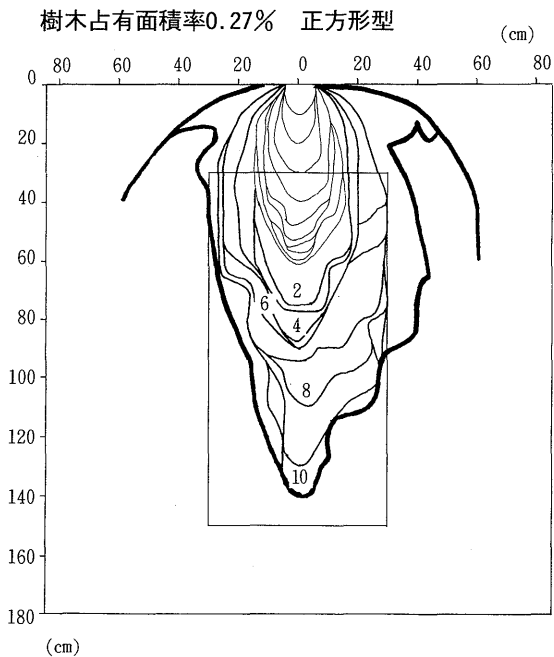


図 5-2 各経過時刻における土石流到達範囲(2)

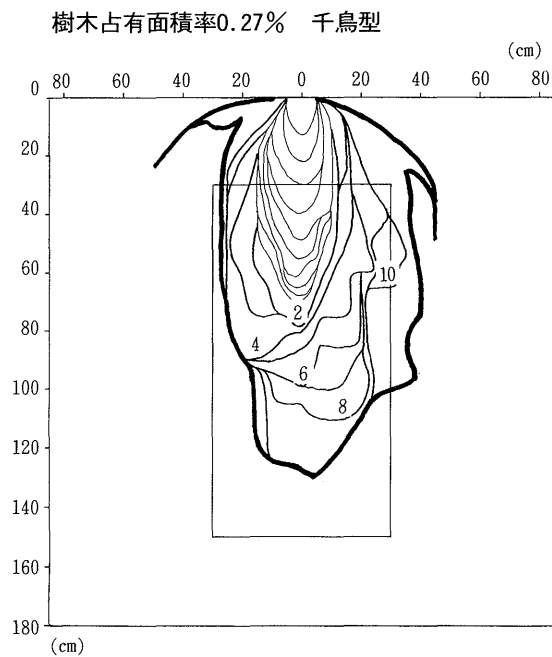


図 5-3 各経過時刻における土石流到達範囲(3)

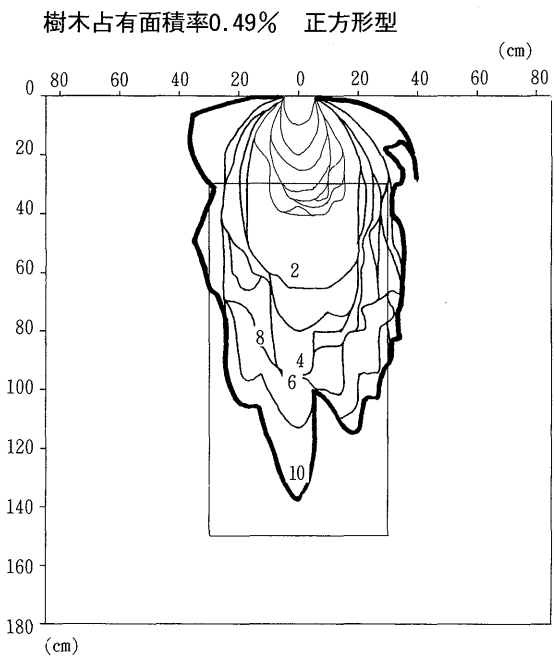


図 5-4 各経過時刻における土石流到達範囲(4)

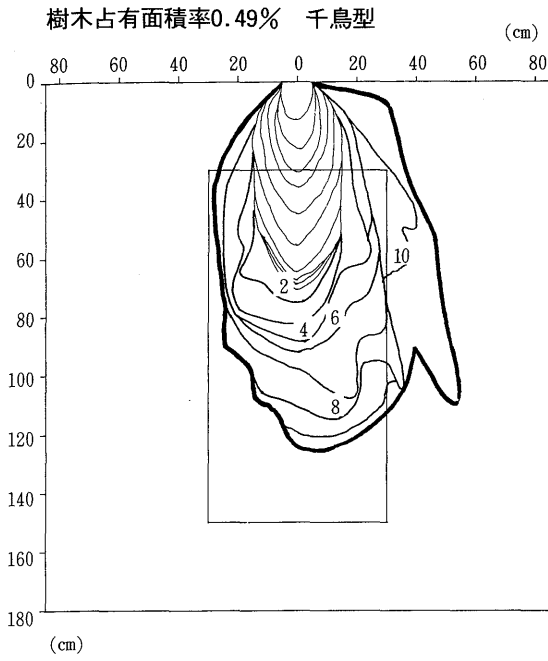


図 5-5 各経過時刻における土石流到達範囲(5)

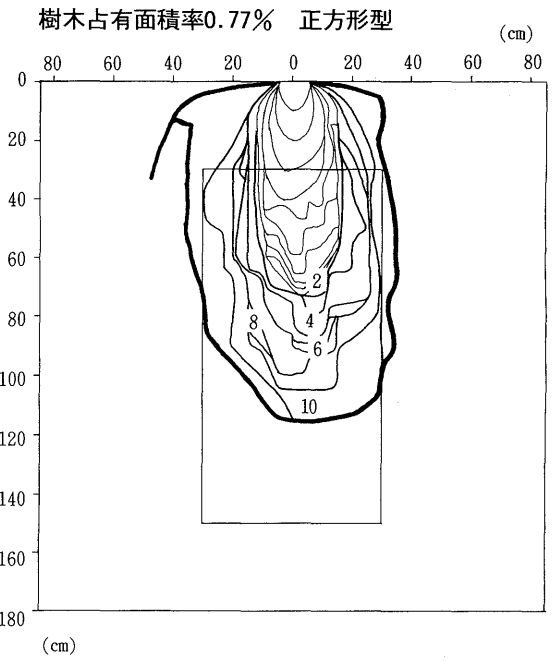


図 5-6 各経過時刻における土石流到達範囲(6)

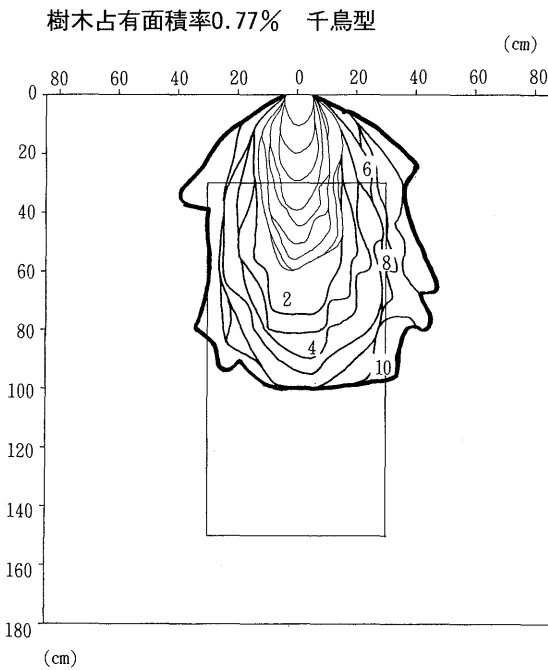


図 5-7 各経過時刻における土石流到達範囲(7)

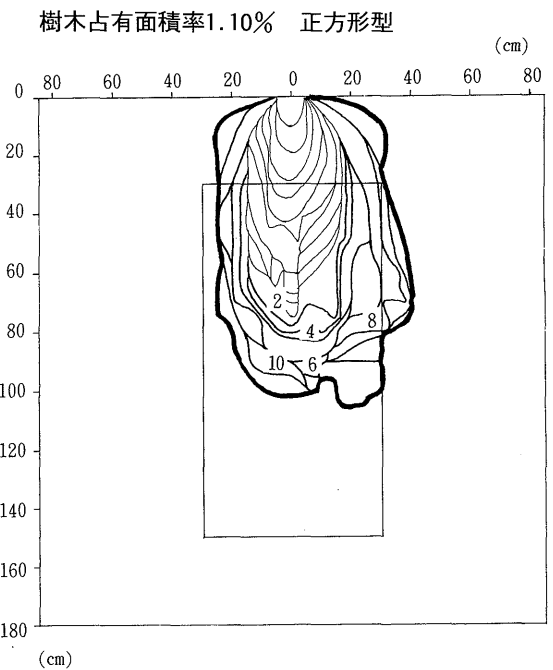


図 5-8 各経過時刻における土石流到達範囲(8)

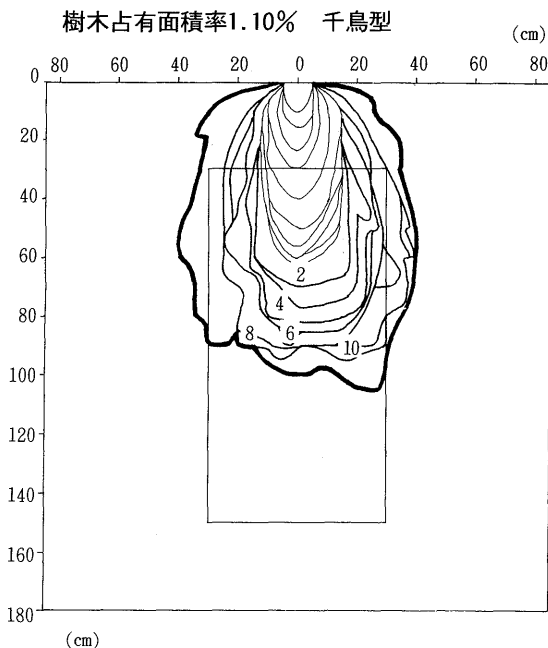


図5-9 各経過時刻における土石流到達範囲(9)

で砂礫堆積面積は樹林無しと比べるとそれぞれ385 cm^2 , 565 cm^2 , 600 cm^2 , 475 cm^2 狭い。立木密度が高くなるほど、面積は狭い。また、10秒では樹木占有面積率0.27%, 0.49%, 0.77%, 1.10%において、樹林無しと比べて、それぞれ1,280 cm^2 , 900 cm^2 , 1,595 cm^2 , 1,940 cm^2 も面積が狭くなっている。千鳥型の場合も同様に、立木密度が高くなるほど面積が狭くなる傾向が見られる。

平均堆積幅を見ると、正方形型の場合、7秒までは樹木占有面積率が高いほど平均幅が狭くなり、それ以降では樹木占有面積率が高いほど平均幅が広がる傾向が見られる。例えば、6秒において、樹木占有面積率0.27%の場合、樹林無しと比べて3.8cm, 0.49%の場合樹林無しと比べて7.9cm, 0.77%の場合樹林無しと比べて8.5cm, 1.10%の場合樹林無しと比べて8.4cm, 平均幅がそれぞれ狭くなっている。10秒では樹林無しと比べると、樹木占有面積率0.27%, 0.49%, 0.77%, 1.10%で、それぞれ樹林無しと比べ1.6cm, 5.2cm, 7.8cm, 10.7cm平均幅が広がっている。

千鳥型でも、6秒までは立木密度が高くなるほど平均幅が狭く、それ以降は立木密度が高くなるほど平均幅が広がる傾向が見られる。

以上の結果をまとめると、傾斜(縦断)方向の移動が卓越している6秒までは立木密度による到達距離の差は見られないが、横方向の氾濫範囲が狭く抑えられる傾向が見られる。後続流による堆積土砂の侵食再移動が生ずるそれ以降の時間では、立木密度が高くなるほど縦断方向の伸びは短く、幅が広がる。しかし、横方向の拡がり程度が縦断方向の伸びの短縮の程度と比較して小さいため、氾濫範囲が狭くなったと考える。

したがって、土石流流動に対する樹林帯の影響は、次の2点に要約されると思われる。

- ① 土石流は直進性が強く、樹林帯はそれを抑える機能はあまり持たないが、慣性の小さい横断方向の流れに対しては効果がある。

千鳥型では、6秒までは樹林の有無による差は見られない。しかし、それ以降では、樹木占有面積率が高くなるほど到達距離が短くなる傾向にある。例えば、8秒において樹林無しと比べると、到達距離は樹木占有面積率0.27%で25cm, 0.49%で20cm, 0.77%で31cm, 1.10%で40cmと短く、樹木占有面積率が高くなるほど短くなっている。また、10秒において樹林無しと比べると、0.27%で50cm, 0.49%で59cm, 0.77%で65cm, 1.10%では85cmも到達距離が短くなっている。

図5より立木密度の違いによる砂礫堆積面の広がり差を見れば、正方形型の場合、樹木占有面積率が高くなるほど面積が狭くなる傾向が見られる。例えば、5秒において樹木占有面積率0.27%, 0.49%, 0.77%, 1.10%

- ② 縦断方向の流れの勢いが小さくなった後続流による堆積土砂の再移動を抑え、氾濫範囲を狭くする効果は明らかである。

2. 樹林帯による土石流堆積パターンの変化

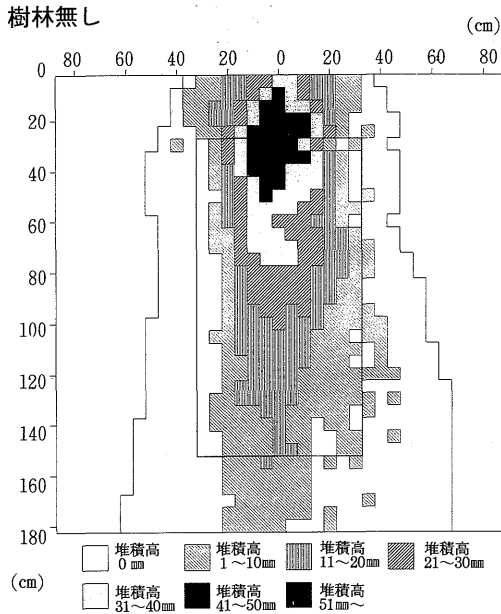


図 6-1 堆積域における堆積高さの分布パターン(1)

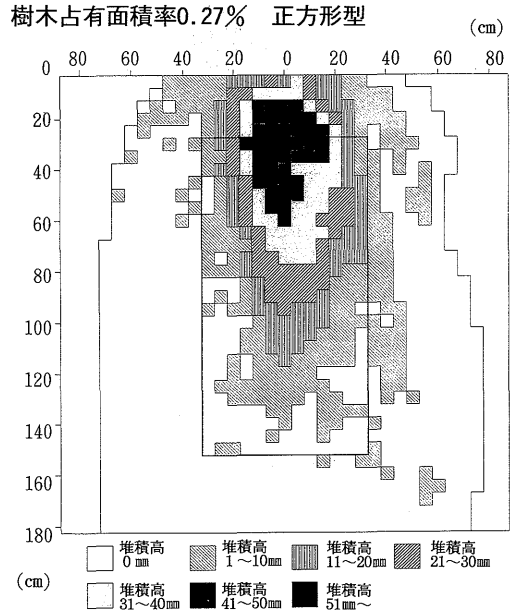


図 6-2 堆積域における堆積高さの分布パターン(2)

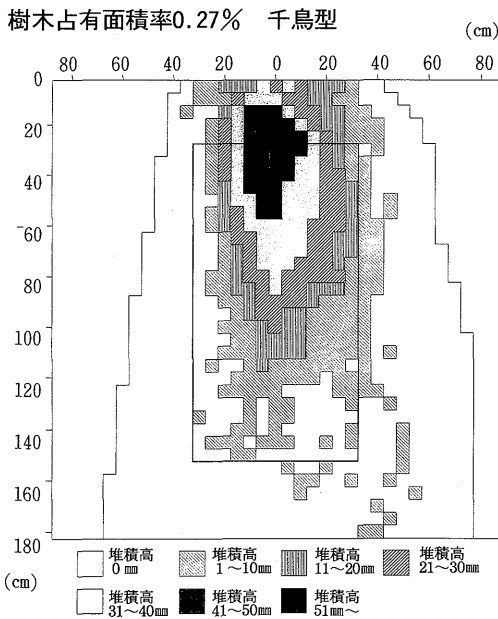


図 6-3 堆積域における堆積高さの分布パターン(3)

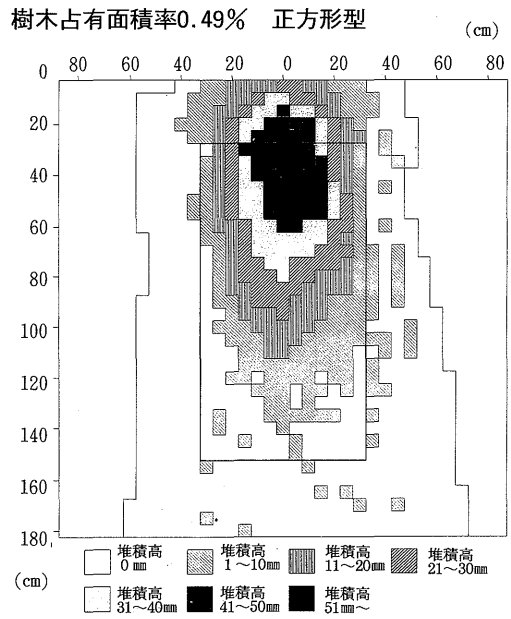


図 6-4 堆積域における堆積高さの分布パターン(4)

樹木占有面積率0.49% 千鳥型

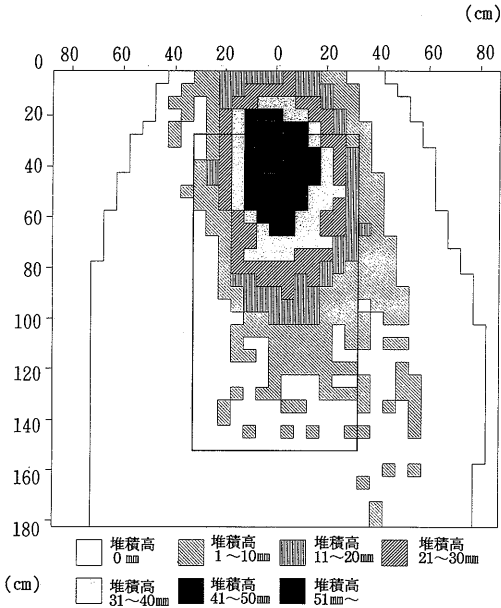


図 6-5 堆積域における堆積高さの分布パターン(5)

樹木占有面積率0.77% 正方形型

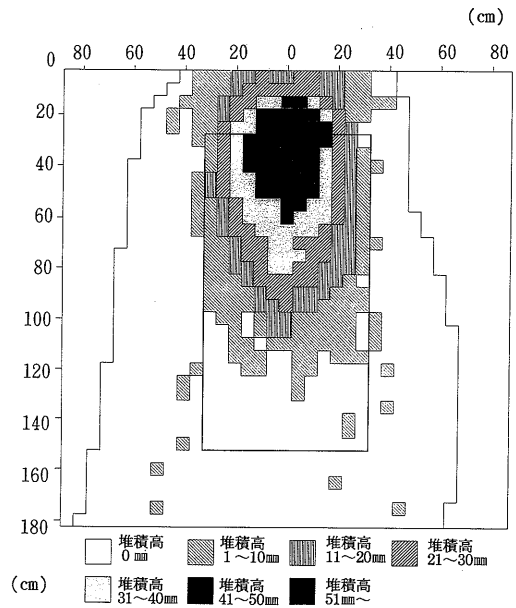


図 6-6 堆積域における堆積高さの分布パターン(6)

樹木占有面積率0.77% 千鳥型

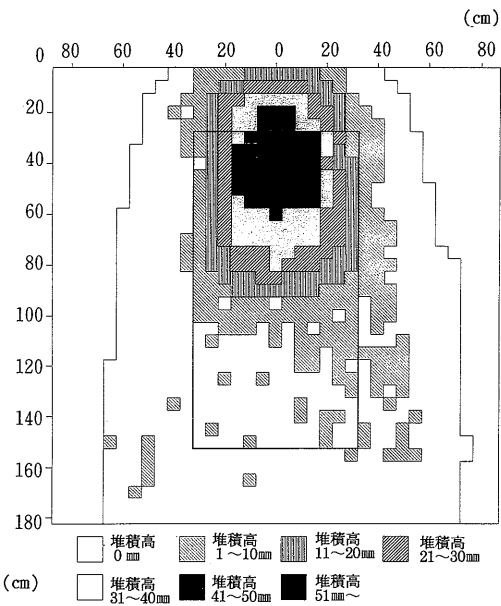


図 6-7 堆積域における堆積高さの分布パターン(7)

樹木占有面積率1.10% 正方形型

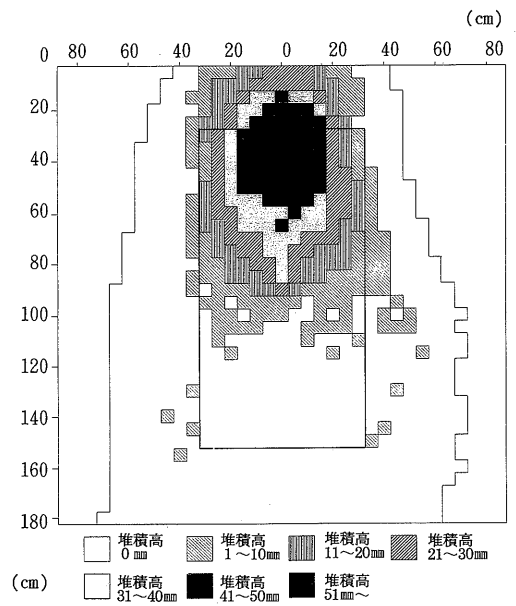


図 6-8 堆積域における堆積高さの分布パターン(8)

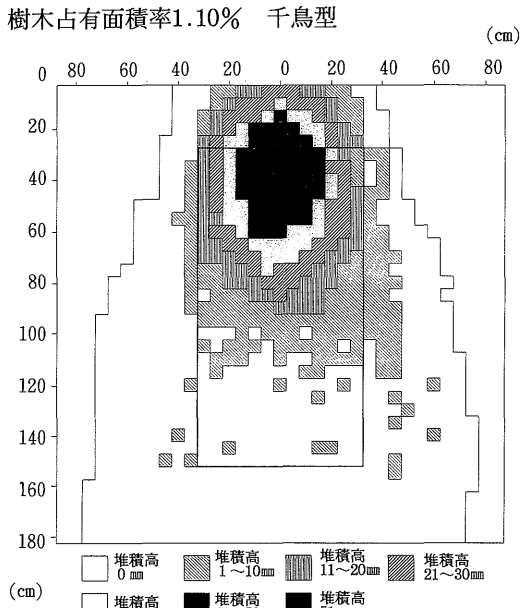


図 6-9 堆積域における堆積高さの分布パターン(9)

図 6 には、5 cm 四方の格子での堆積高を10mmごとに類別して示す。この図で立木密度の違いにより、ある厚さ以上になる縦断方向の距離がどのように変化するかを検討すると、正方形型の場合も千鳥型においても、樹木占有面積率が高くなるほど31mm以上の堆積の厚い部分の面積は大きくなる傾向がある。しかし、20 mm以下の堆積の面積は樹木占有面積率が高くなるほど小さい。

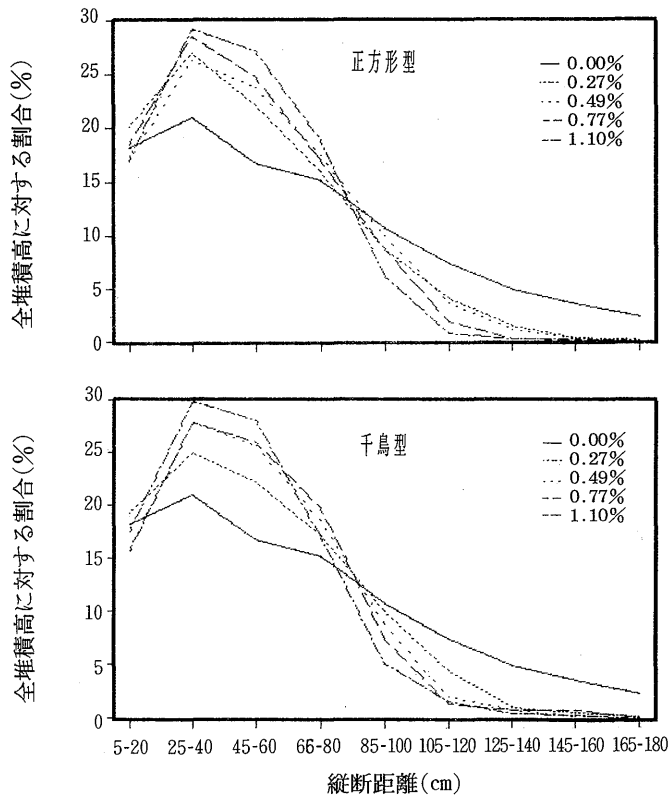


図 7-1 樹木占有面積率の違いによる縦断距離20cmごとにみた砂礫堆積集中度の違い

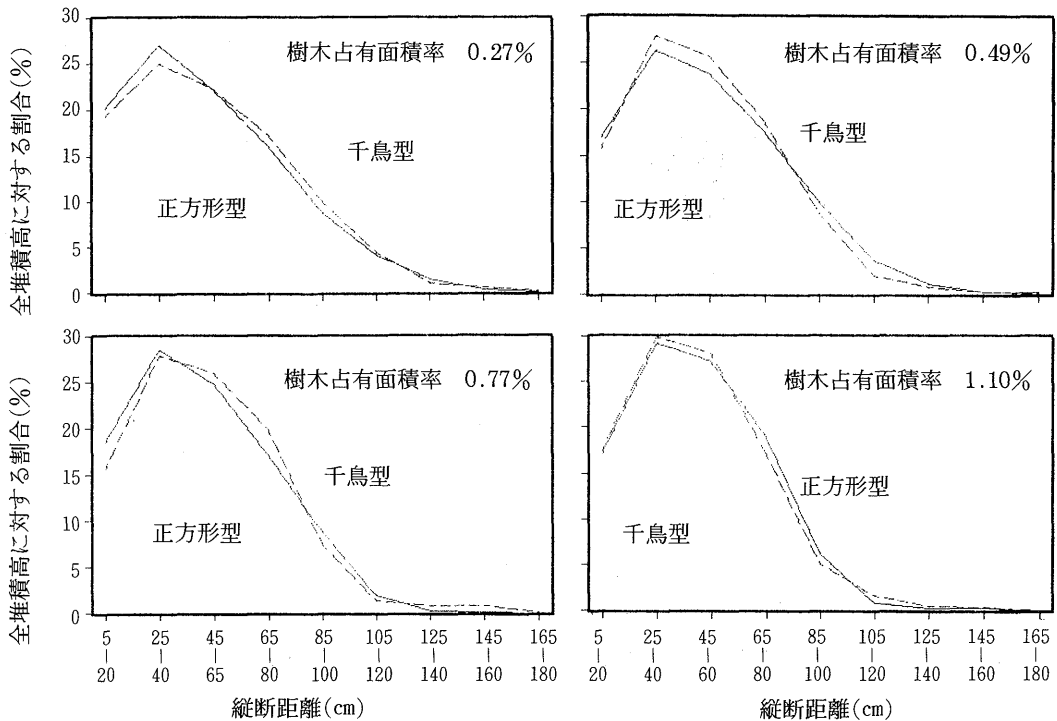


図7-2 配置の型の違いによる縦断距離20cmごとにみた砂礫堆積集中度の違い

図7には縦断距離毎の砂礫堆積集中度の違いを示した。図7-1の正方形型で見ると、最大の砂礫堆積は樹木占有面積率に関わらず縦断距離25~40cmにある。縦断距離80cmまでの堆積土砂量の割合は、樹木占有面積率が高くなるほど大きい。樹林の無い場合は全堆積土砂の71%であるが、正方形型で樹木占有面積率が0.27%、0.49%、0.77%、1.10%では、それぞれ85%、85%、89%、92%である。それだけ、縦断距離80cmより下流側での堆積の割合は樹木占有面積率が高くなるほど小さくなる。千鳥型でも同様の結果が得られた。ただし、図7-2からは、正方形型より千鳥型の方が、占有率の低い場合を除いて、より上流側で堆積する傾向があることがわかる。

故に、樹木占有面積率が高くなるほど土石流の到達距離は短く、氾濫域も狭く抑えることができるが、それだけ砂礫堆積は全体的に高くなり、幅は広がる。また、正方形型配列よりも千鳥型配列の方が砂礫をより上流で堆積させると思われるが、その差は明確とは言えない。

IV 結 言

土石流に対する樹林帯の影響について、本研究では次の結論が得られた。

- ① 土石流は直進性が強い。樹林帯に土石流先端部の流れを阻止することを期待することは難しいと思われるが、横断方向には土石流減勢効果が見られる。
- ② 土石流本体が堆積し後続流による堆積土砂の再移動が始まったときに、樹林帯がその氾濫範

畝を狭く抑える効果が明らかに見られる。

- ③ 土石流の到達距離を短く、堆積域面積を狭く抑えることができるが、それだけ砂礫堆積は全体的に高くなり、幅は広がる。
- ④ 正方形型配列よりも千鳥型配列の方が砂礫をより上流で堆積させるようであるが、この差は決定的とは言えない。

この実験では、土石流により押し倒され流される樹木が流木化することを考慮していない。樹林帯の効果をより正しく検討するためには、土石流の衝撃エネルギーを考慮した実験が今後行われる必要があると思われる。

最後に、堆積高測定について、器具の貸与と使用法の助言を頂いた鳥取大学農学部森林生産学講座の藤井禎雄教授、宮田和夫助教授に記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男, 高橋 保, 道上正規: 河川の土砂災害と対策, 森北出版 (1983)
- 2) 松田佳久: 蒜山演習林における丸太横断排水溝適用試験, 鳥取大学農学部卒業論文 (1989)
- 3) 水山高久ほか: 樹林の流出土砂制御効果に関する実験, 新砂防 Vol.42, No.1, pp.34~36 (1989)
- 4) 水山高久ほか: 樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果, 新砂防 Vol.42, No.4, pp.18~22 (1989)
- 5) 坂口勝美: これからの森林施業 (1975)
- 6) 武居有恒: 砂防学, 武居有恒教授退官記念事業会 (1990)
- 7) 武居有恒: 地すべり, 崩壊, 土石流, 鹿島出版会 (1982)
- 8) 辻 健, 植山素治: 厚い砂礫堆積層上での土石流の移動・停止について, 鳥取大学農学部卒業論文 (1982)