

樹林帯による土砂流出制御と分級に関する研究

SEDIMENT RUNOFF CONTROL AND SORTING BY FOREST ZONE DURING FLOOD AND DEBRIS FLOW EVENTS

橋本 晴行¹・朴 埈璵²・池松 伸也³・中嶋 周作⁴

Haruyuki HASHIMOTO, Kichan PARK, Shinya IKEMATSU and Shuusaku NAKASHIMA

¹ 正会員	工博	九州大学大学院助教授	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
² 正会員	工修	九州大学大学院助手	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
³ 正会員		九州大学大学院技官	工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
⁴ 学生員		九州大学大学院	工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

One of the roles of forest trees on alluvial fan is to retard the debris and flood flows and protect houses on the alluvial fan. The purpose of the present study is to investigate the flow behavior within the forest-tree area during the flood and debris flows.

Two kinds of experiments were made; one is to examine sediment transport rate within the model-tree area and the other to examine the effect of model trees on sediment runoff control and sorting. From the former experiments it is found that the sediment transport rate can be expressed by effective shear stress. From the latter experiments it is found that the runoff of sediment volume from the model-tree area decreases as the model-tree area and the size of the bed materials becomes larger. Further it is found that sorting of sediments depositing from the flows and outflowing from the model-tree area becomes more significant than that of sediments flowing into the model-tree area.

Key Words : *sediment-water mixture, bed load, debris flow, trees, multiple rows of cylinders, drag coefficient*

1. はじめに

山麓や溪流沿いに存在する樹林帯は土砂流出制御効果をもつことが期待され, その機能について定性的な研究が行われてきた^{1) 2) 3)}. その後, 基礎的な研究として, 樹林帯が水路内に一様に存在する場合について, 流砂量や抵抗則について実験的研究が行われてきた^{4) 5) 6)}. しかしながら, 従来の研究は流砂形態として掃流砂や浮流砂を対象にしておき, 河床材料としては樹木間隔に対して比較的小さい粒径の材料が使用されてきた. しかし, 山麓や溪流沿いでは, 流砂形態として土石流や掃流状集合流動の形態をとることも多く, その結果として, 樹木間隔に対して比較的大きな粒径の土砂が流下してくる場合もある. また実際現象においては, 広範な粒度構成をした土砂が流下しており, 巨礫など粗粒成分は樹林に捕捉され, 比較的細粒な土砂成分は下流に流出してくることも期待される.

本研究は, 急勾配水路において樹林帯のモデルを設置し, その樹林帯内に移動床を設け, 広範な河床勾配と粒径の材料について流砂量を調べるとともに, その成果を用いて樹林帯の土砂流出制御機能を調べたものである. 流砂形態としては土石流, 掃流状集合流動, 掃流砂を対象にし, 河床材料としては樹木間隔に対して比較的粗粒な材料も使用するなど, 樹林帯の土砂流出制御効果を実験・理論両面から調べるとともに, 広範な粒度分布を持つ混合材料を河床材料として使用し, 樹林帯の分級効果についても実験的に調べたものである.

2. 樹林帯における流砂量の測定

(1) 実験方法

樹林帯内での流砂量 q_s を調べるため実験を行った. 用いた水路は, 全長12m, 幅20cmの片側アクリルライト製可変勾配水路である. 本実験条件の範囲内に

においては流れは射流であり図-1の水路を用いた。すなわち、水路下流端から9mの区間に全水路幅にわたって樹木の模型を設置するとともに、下流端から8mまでは敷き厚10cmの移動床とした。

用いた河床材料の特性を表-1に示す。ここに、砂A, B, Cは橋本・平野ら⁵⁾の実験であり、その結果も併せて示した。

樹木の模型には直径 D のステンレス丸棒を用い、千鳥状に配置した。表-2に樹林帯の特性を示す。ここに、樹木の中心間隔を s_p 、樹林帯密度（河床単位面積に占める樹木の断面積の割合）を λ 、水路幅を B としている。また、密生度（流体単位体積あたりの樹木の遮蔽面積）を $a=4\lambda/(\pi D)$ としており、従って、単位面積の河床上の流れにおける樹木の遮蔽面積は水深を h とすると ah となる。

実験では、水路に河床材料を敷き、所定の水路傾斜角 $\theta=3.03^\circ, 6^\circ, 12^\circ$ に設定した後、上流端から単位幅流量 q_{w0} の水を供給した。樹林帯に流入した流れが等流状態になったことを確認した後、下流端において流れを採取し、流量及び流砂量をそれぞれ測定した。また、側方からはビデオカメラを用いて樹林帯内での水深及び流れの状況を撮影した。樹林帯の抵抗に起因して流砂量は少なくなるため、流砂量計測時における、河床浸食による勾配の変化は、初期勾配に対して無視できる程度であった。

(2) 実験結果

図-2は、無次元流砂量の実験値を樹林帯のタイプごとに示したものである。ここに、 s を粒子の水中比重、 h を水深、 $u_{*0}=\sqrt{gh\sin\theta}$ として、 $\tau_{*0}=u_{*0}^2/(sgd)$ であり、無次元の見かけの掃流力である。同図中には比較のため、樹林帯が存在しない場合における急勾配河道の等流条件下での掃流砂量式⁷⁾

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = 4.7 \tau_{*0}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*0}}\right) \frac{1}{(\alpha - \tan\theta)\cos\theta} \quad (1)$$

の計算結果も示している。ここに、 α は粒子間応力に関する係数で、河床砂の比重を $\sigma/\rho=2.65$ とくと $\alpha=0.875$ となる。また無次元限界掃流力 $\tau_{*c}=0.05$ とした。樹林帯が存在しない場合においては、 τ_{*0} は、等流条件下では無次元有効掃流力となる。

実験値はいずれも式(1)の計算値より小さくなっており、見かけの掃流力では流砂量は評価できないことが分かる。そこで、樹林帯における等流の場合の力の釣り合い式より有効掃流力を求め、それにより流砂量を評価することを検討する。

まず、等流の場合の力の釣り合い式は

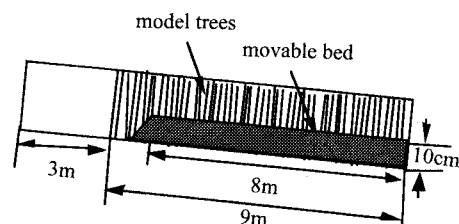


図-1 実験水路の縦断面図

表-1 河床材料の特性

種類	砂A	砂A'	砂B	砂C	レキD	レキE
$d(\text{mm})$	0.55	0.60	0.84	1.9	3.3	5.9
σ/ρ	2.65	2.65	2.62	2.61	2.64	2.64

表-2 樹林帯の種類とその特性

樹林帯のタイプ	I	I'	II	III	III'
$D(\text{mm})$	4.0	4.0	2.0	5.0	5.0
$s_t(\text{cm})$	6.0	5.7	6.0	6.0	5.7
λ	0.0070	0.0077	0.0017	0.011	0.012
$a(1/\text{cm})$	0.0222	0.025	0.011	0.028	0.031
$B(\text{cm})$	15	20	15	15	20

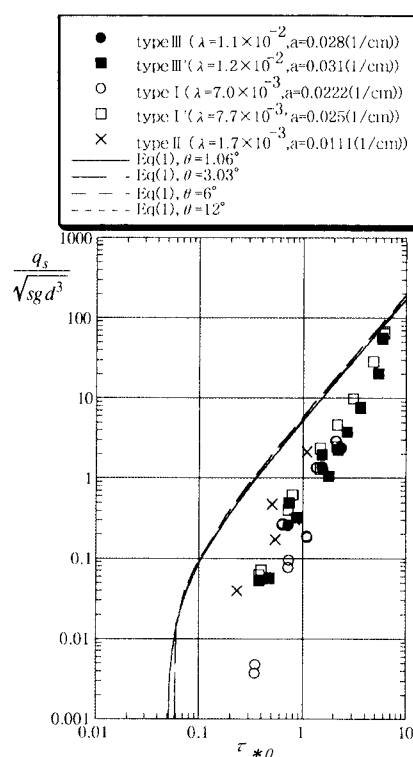


図-2 樹林帯における無次元流砂量と無次元の見かけの掃流力との関係

$$0 = (1 - \lambda) \rho g h \sin\theta - (1 - \lambda) \rho u_*^2 - \frac{1}{2} \rho v^2 a h C_D \quad (2)$$

である。ここに、 ρ_f は流れの密度、 u_* は有効摩擦速

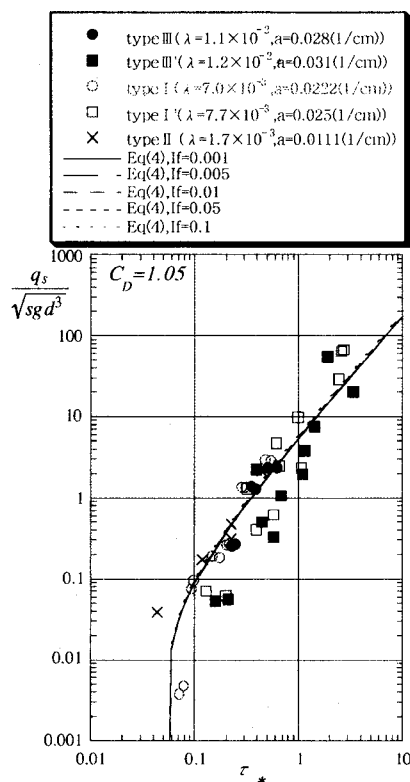


図-3 樹林帯における無次元流砂量と無次元有効掃流力との関係

度, v は断面平均速度, C_D は抗力係数である. 式(2)を変形すると

$$\varphi = \sqrt{(1 - \lambda)(u_{*0}^2 / u_*^2 - 1)} / \left(\frac{1}{2} C_D a h \right) \quad (3)$$

となる. ここに φ は流速係数であり, $\varphi = v / u_*$ である. 式(2)において, C_D として適切な値を用い, その他の量には実験条件と実験値を代入すると有効摩擦速度 u_* を決定することができる. また, それを用いると無次元有効掃流力 $\tau_* = u_*^2 / (sgd)$ も決定することができる. さらに, 式(3)からは流速係数も決定することができる.

$C_D = 1.05$ として求めた無次元有効掃流力と無次元流砂量との関係を図-3に示している. 図中の曲線は, 流砂量式(1)を不定流条件下での流砂量式に拡張した次式

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = 4.7 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{1}{(\alpha - f)} \quad (4)$$

の計算結果である. ここに I_f は摩擦勾配であり, 有効摩擦速度 $u_* = \sqrt{gh I_f}$ より求められる. C_D の値は, 流砂量の実験値と式(4)とが適合するように決定されたものではあるが, 従来より知られている円柱の抗力係数にはほぼ等しい値となっている. また, 流砂量

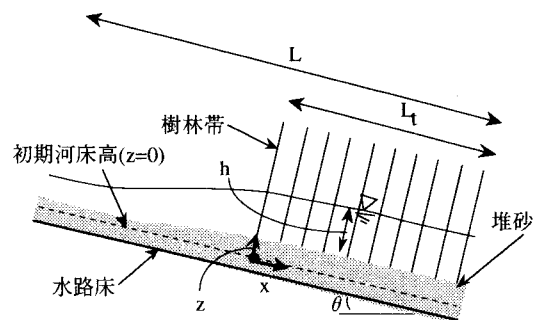


図-4 水路の模式図

表-3 実験条件

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7
$\theta (^{\circ})$	6	6	6	12	12	12	6
$q_{w0} (\text{cm}^2/\text{s})$	98,0200	199	200	102,200	103,201	102	200
$L_t (\text{m})$	2, 4	2, 4	2	2, 4	2, 4	2	2
Model tree type	III'	III'	III'	III'	III'	III'	III'
$B (\text{cm})$	20	20	20	20	20	20	20
$d (\text{mm})$	0.84	3.3	5.9	0.84	3.3	5.9	混合砂

の実験値を有効掃流力を用いて整理すると, 流砂量式(4)との適合性は良好となることが分かる.

また図は省略しているが, 流速係数 φ と樹林帯密度 λ との関係も求めることができる. 急勾配における流砂を伴う流れの流速係数とは同程度の値となっている⁷⁾. また樹林帯密度が大きくなると流速係数は小さくなる傾向がある.

3. 樹林帯による土砂流出制御と分級に関する実験

(1) 実験方法

実験に用いた水路は, 2章と同じ, 全長12m, 幅20cmの可変勾配水路である. 全長を移動床とし, そのうち下流端から長さ L_t の区間に水路幅全体にわたって樹木の模型を設置して樹林帯とした. 図-4にその模式図を示す. 樹林帯模型にはタイプIII'を用いた(表-2).

まず, 粒径 $d = 0.84 \text{mm}$, 3.3mm , 5.9mm の均一な砂れき(表-1の砂BとレキD, E)を河床材料として用い, 樹林帯からの土砂流出を調べる実験を行った. 次に, 樹林帯による土砂の分級効果を調べるため, 河床材料として混合砂を用いた. この混合砂は, $d = 0.84, 1.5, 2.0, 3.3, 5.9, 12 \text{mm}$ の均一砂を体積比 6.6:6.6:3.3:2 で混合して作製した材料である.

実験では, 水路を所定の傾斜角 θ に設置し, 上流端で単位幅当たり q_{w0} の水量を供給した. 樹林帯の上流側で土砂・水の混相流が発生・流下し, 樹林帯

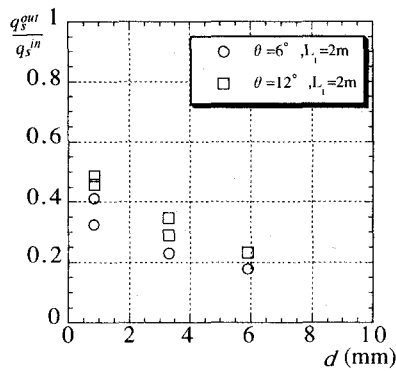


図-5 樹林帯からの流出土砂量・流入土砂量比と粒径との関係

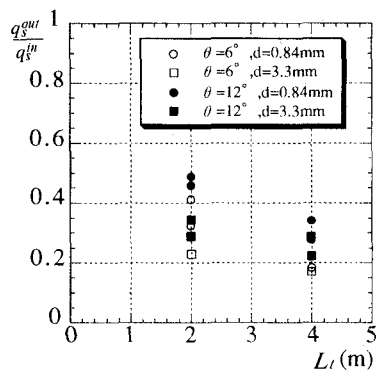


図-6 樹林帯からの流出土砂量・流入土砂量比と樹林帯長との関係

の入り口に達し、樹林帯内に流入すると堆砂が発生した。この状況を側方からビデオカメラを用いて撮影し、河床高や水位の変化を調べた。また下流端では流出してきた土砂と水の混相流をバケツで採取し、流量と流砂量のハイドログラフを調べた。混合砂を用いた土砂分級の実験では、さらに流出土砂及び堆積土砂の粒度分布も調べた。実験条件を表-3に示す。

(2) 土砂流出に関する実験

図-5, 6は、樹林帯からの流出土砂量 q_s^{out} と流入土砂量 q_s^{in} との比をそれぞれ粒径 d 、樹林帯長 L_t に対してプロットしたものである。河床材料の粒径が大きくなるほど、樹林帯長は長くなるほど流出土砂量と流入土砂量との比は減少することが分かる。図-7は、樹林帯のタイプIIIについて、堆砂形状の時間的変化を河床材料毎に示したものである。ここに、 $t=0$ は流れの先端が樹林帯上流端に到達した時刻であり、 x は水路床に沿って取られた流れ方向の座標で、樹林帯上流端を原点としている。堆砂のピークの発生位置は各ケースにおいてほぼ一定で、時間的にはほとんど移動しない。しかし、材料の大きさによって堆砂形状が若干異なり、粗粒な材料のcase6では、堆砂が樹林体内にあまり進行せず、樹林帯の入口付近およびその上流側に比較的多く堆積していること

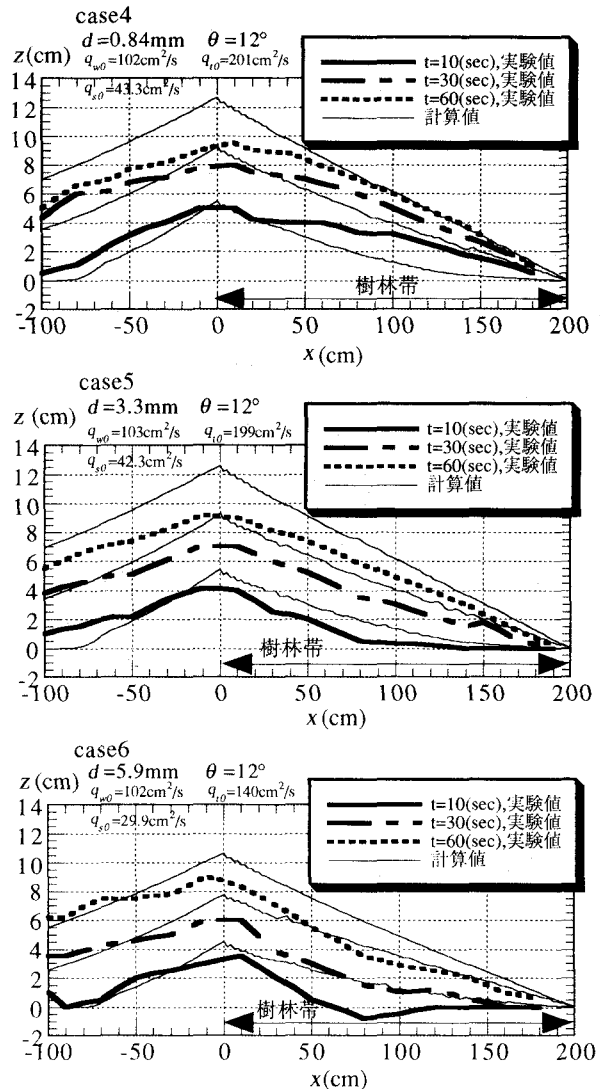


図-7 水路勾配 $\theta=12^\circ$ 、樹林帯長 $L_t=2m$ の場合の堆砂形状の実験と計算との比較

が分かる。

(3) 樹林帯による土砂堆積の数値計算

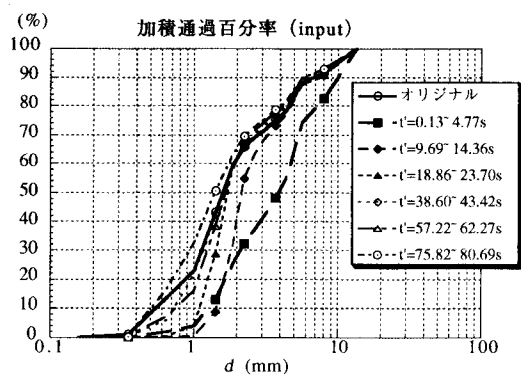
樹林帯における1次元の運動方程式、全相の連続式および流砂の連続式をそれぞれ以下に示す。

$$\frac{\partial q_t}{\partial t} + \frac{\partial v q_t}{\partial x} = (1 - \lambda) g h \left[\sin \theta - \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \cos \theta \right] - (1 - \lambda) \frac{v^2}{\varphi^2} - \frac{1}{2} v^2 C_{Dah} \quad (5)$$

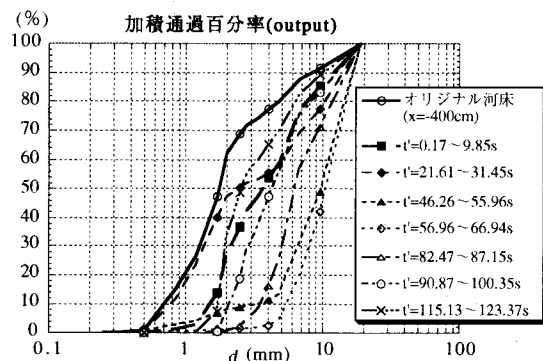
$$(1 - \lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial q_t}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial(C_* z)}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

ここに x 座標は、樹林帯入口を原点として下流方向に取っている。 C_* は堆積層における土砂の体積濃度である。流速係数 φ は実験値を、抗力係数 C_D は前章



(a)流入土砂の粒度分布の時間的変化



(b)流出土砂の粒度分布の時間的変化

図-8 樹林帯への流入土砂と樹林帯からの流出土砂の粒度変化

の成果より $C_D=1.05$ とした。また、流砂量式は摩擦勾配 I_f が 0.14 以下の場合には流砂量式(4)を、0.14 以上の場合には土石流の流砂量式⁸⁾

$$q_s = q_t \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{I_f}{\tan \phi} \quad (8)$$

を用いた。ここに $\tan \phi = 0.8$ とした。差分化には MacCormack 法を用いた。計算区間は $x = -(L-L_f) \sim L_f$ である。ここに、 L は移動床区間の長さである。初期条件としては、まず、便宜上、計算の不安定を避けるため、流砂量 $q_s = 0$ の清水の場合について全区間で定常状態となるまで計算を行い、この計算結果の水深 h と全流量 q_t を初期値とした。また河床高は $z = 0$ とした。境界条件としては、 $x = -(L-L_f)$ において一定な全流量 q_{t0} と平衡流砂量 q_{s0} 、等流水深を与え、その結果河床高は $z = 0$ とした。計算格子間隔は $\Delta x = 2\text{cm}$ 、 $\Delta t = 0.005\text{sec}$ とした。

図-7 中の実線は堆積高の計算結果である。概ね、計算結果はほぼ実験結果と一致している。しかしながら、材料が粗粒になるほど樹林帯内においては計算結果がやや過大評価となっている。これは、計算においては掃流力の減少が堆砂を

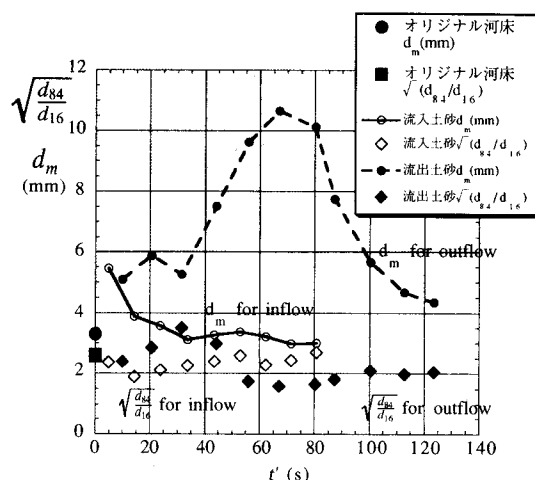


図-9 樹林帯の流出・流入土砂の平均粒径と標準偏差の時間的変化

発生させる仕組みになっているのに対して、実験では掃流力の減少とともに粒子が樹木に衝突して停止する効果が粗粒な材料の場合に顕著になっているものと考えられる。実際、抗力係数 $C_D = 1.05$ の値は清水中における値であり、土砂濃度や粒径が大きくなり粒子衝突効果が現れる土石流領域になると C_D の値をさらに大きく取る必要がある⁹⁾。

(4) 樹林帯による混合砂の分級に関する実験

a) 樹林帯への流入土砂と樹林帯からの流出土砂の粒度分布

図-8 は、樹林帯への流入土砂と樹林帯からの流出土砂の粒度分布の時間的変化を示したものである。また、図-9 は樹林帯への流入土砂と樹林帯からの流出土砂について、それぞれ平均粒径 d_m 、標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の時間的変化を示したものである。ここで $t=0$ は流れの先端が下流端に達した時刻である。

これらの図から、樹林帯に流入する土砂は、比較的粗粒な土砂が流れの先頭に集中し、後続流になると次第に細粒化し、オリジナル河床のそれとほぼ同じ粒度組成となっている。

一方、樹林帯から流出する土砂は、流れの先頭部ではオリジナル河床のそれに近く、比較的細粒で、その後、後続流になると粗粒な土砂が流出して来る。その結果、 $t=60(\text{s})$ 付近で流出土砂の平均粒径 d_m がピークに達する。その後粒径は細粒化し、オリジナル河床の粒度構成に近づいていく。

標準偏差については、流入土砂も流出土砂も著しい差異は見られない。しかしながら後続流の流出土砂では、標準偏差は若干小さくなって

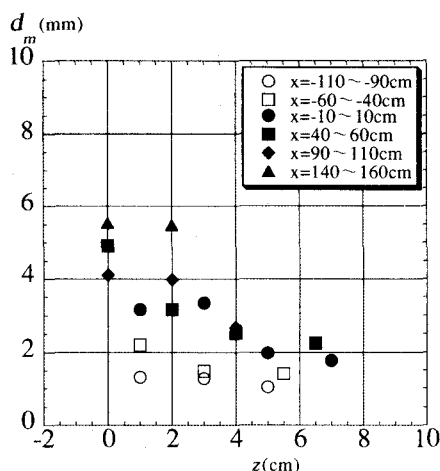


図-10 堆積土砂における局所平均粒径の空間的变化

いる。

b) 堆積土砂層の粒度構造

図-10は、通水後($t=125\text{sec}$), $x=50\text{cm}$ 間隔で堆積土砂を元河床から厚さ2cm毎(長さ20cm, 幅20cm)に採取し、それぞれの粒度分布を調べ、元河床からの高さ z に対してその平均粒径 d_m をプロットしたものである。樹林帯内においては、元河床 $z=0$ 付近には比較的粗粒な土砂が堆積し、一方、上層に行くに従い比較的細粒な土砂が堆積していることが分かる。樹林帯外部の上流側においては堆積層毎の粒度構成の変化はあまり見られない。

4. おわりに

以上、樹林帯内に移動床を設け、水路傾斜角と河床材料を広範に変えて樹林帯内の流砂量と水深を測定する実験を行った。この測定結果と等流のつり合い式を用いて有効摩擦速度を評価した。有効摩擦速度を用いることにより、樹林帯内における流砂量は従来の流砂量式により評価できることを示した。

流速係数は、通常知られている清水流の場合の値よりは小さく、流砂を伴う急勾配流れの流速係数と同程度の値となっている。また、樹林帯密度が大きくなると減少する傾向があることが分かった。

次に、水路全長にわたって移動床とし、下流の一部の区間だけに樹林帯を設置して、その土砂流出制御効果を調べる実験を行った。河床材料は粗粒になるほど、樹林帯は長くなるほど、土砂堆積を促進し、土砂流出を抑制することが分かった。また混合砂を用いて同様な実験を行った。樹林帯に流入する土砂は、比較的粗粒な土砂が流れの先頭に集中するとともに、後続流に行くに従い次第に細粒化するのに対し、樹林帯からの流出土砂は、まず

オリジナル河床の粒度分布に近い比較的細粒な土砂が流出し、その後粗粒な土砂に遷移し、ある時間をピークに粒度が減少を始め再びオリジナル河床に近い細粒土砂に遷移していくことが分かった。さらに、樹林帯内の堆積土砂は、元河床付近において比較的粗粒な土砂が堆積し、上層に行くに従い、比較的細粒な土砂へと遷移していくことが分かった。また、樹林帯外部の上流側においては垂直方向には粒度構成の変化はあまり見られなかった。

謝辞：本研究は、一部、平成14年度（財）砂防・地すべり技術センター研究開発助成金（代表 橋本晴行）の補助の下に行われたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阿部和時・岩元賢・三森利昭：樹林帯の土砂流出防止機能について、昭和62年度砂防学会研究発表会概要集，1987。
- 2) 水山高久・天田高白・栗原淳一・小林幹男：樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果，新砂防，vol. 42, No. 4 (165)，1989。
- 3) 平野宗夫・橋本晴行・多川博章・玉松潤一郎：樹林帯に作用する土砂・水混相流の流体力と土砂堆積，水工学論文集，第41巻，1997。
- 4) 石川芳治・藤田英信・水原邦夫・成富靖：溪畔林をもつ河道における掃流砂量に関する研究，砂防学会誌，51巻，3号（218），1998。
- 5) 平野宗夫，橋本晴行，玉松潤一郎，Park Kichan，火箱貴文：樹林帯における掃流砂量と河床変動に関する研究，水工学論文集，第43巻，1999。
- 6) 橋本晴行，高畑洋，火箱貴文，Park Kichan：樹林帯をともなう急勾配水路における浮流砂濃度分布に関する研究，水工学論文集，第44巻，2000。
- 7) 橋本晴行・平野宗夫：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集，No.545/II-36，1996。
- 8) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，20号B-2，1977。
- 9) 橋本晴行・村上浩史・平野宗夫・鳥野清：土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究，土木学会論文集，No.565/II-39，1997。

(2002. 9. 30受付)