

樹林帯における掃流砂量と河床変動に関する研究

BED-LOAD TRANSPORT AND BED VARIATION IN AN OPEN CHANNEL WITH MULTIPLE ROWS OF CYLINDERS

平野 宗夫¹・橋本 晴行²・玉松潤一郎³・Kichan Park⁴・火箱 貴文⁵
Muneo HIRANO, Haruyuki HASHIMOTO, Junichirou TAMAMATSU, Kichan PARK and Takafumi HIBAKO

¹ フェロー	工博	九州大学大学院教授	工学研究科 (〒812-8581)	福岡市東区箱崎6-10-1)
² 正会員	工博	九州大学大学院助教授	工学研究科 (〒812-8581)	福岡市東区箱崎6-10-1)
³ 正会員	工修	NTT鹿児島支店	(〒890-0064)	鹿児島市鴨池新町6-2)
⁴ 学生会員	工修	九州大学大学院	工学研究科 (〒812-8581)	福岡市東区箱崎6-10-1)
⁵ 学生会員		九州大学大学院	工学研究科 (〒812-8581)	福岡市東区箱崎6-10-1)

The roles of forest along the river bank have been noted from the view point of the river environment and flood disaster. Bed load transport and sediment deposition are experimentally examined in an open channel with cylinders installed across the whole channel width in their multiple rows. Cylinders were placed in stagger with their equal spacing on the bed.

The transport rate of bed load was measured on the movable bed. The bed-load transport rate was found less than that in an open channel without cylinders. Effective friction velocity was found from the comparison of the measurement of bed-load transport rate with a transport rate equation. The transport rate of bed load and the non-dimensional average velocity decrease with the arrangement density of cylinders.

Sediment deposition profiles were also measured. In the case of larger density of cylinder arrangement, sediment deposition occurs in the upper stream reach, while, in the case of smaller density, sediment deposition occurs in the downstream reach. The comparison of the calculation and the experiments shows good agreement.

Key Words : *bed load, sand-water mixture, bed variation, trees, multiple rows of cylinders, drag coefficient*

1. はじめに

樹林帯は水害防備林, 飛砂防備林, 防雪林など防災的機能を持つものとして古くから利用されてきたが, 最近, 自然環境的な側面からも注目されるようになり, その機能について定量的な研究が行われるようになってきた。土砂流や土石流などの土砂災害に対しても, 良好な環境空間を創造しつつ, 土砂堆積を促進して下流域への土砂流出を防ぎ, 地域の安全を計るものとして, 各地で樹林帯が計画されている。このような計画に際しては土砂流や土石流と樹林帯との相互作用が問題となるが, その定量的な評価についてはまだ明らかではない。

山麓や溪流における樹林帯については, まず, 阿部・岩元ら¹⁾は土砂流出防止機能に着目した実験を行い, 水山ら²⁾は樹林帯の粗度係数についての定性的な研究を行った。最近では平野・橋本らが³⁾, 実

験水路内に樹林帯の模型を設置し, 土砂・水混相流に対する樹林帯の抗力係数や土砂堆積の特性について実験を行い, 定量的な検討を行って来た。また, 石川ら⁴⁾は急勾配固定床水路に樹林帯を設置し, 上流から給砂を行うことにより, 掃流砂量を調べている。

一方, 緩勾配水路ではあるが, 岡部ら⁵⁾は屈倒性と分岐性をもったモデル植生群内における掃流砂量について検討を行っている。

しかしながら, 樹林帯内における流砂量や河床変動についてはまだ定量的な評価までには至っていないのが現状である。

本研究は, 急勾配水路において樹林帯の模型を設置し, その樹林帯内に移動床を設け, 掃流砂量や底面せん断力について調べるとともに, その成果を用いて樹林帯における河床変動計算を行ったものである。

まず、樹林帯内の流れが常流の場合と射流の場合について、それぞれ樹林帯内に移動床を設けて掃流砂量を測定し、有効摩擦速度や流速係数と樹林帯特性パラメータとの関連を調べた。次に、水路全長に渡って移動床とし、下流のある区間に樹林帯を設置して、堆砂を発生させる実験を行い、土砂堆積の縦断形状を調べた。最後に、樹林帯における河床変動計算も行い、土砂堆積に対する樹林帯特性パラメータの効果を調べた。

2. 掃流砂量に関する実験

(1) 実験方法

樹林帯内での掃流砂量 q_s を調べるため実験を行った。用いた水路は、全長12m、幅15cmの片側アクリルライト製可変勾配水路で、射流の場合図-1の水路を、常流の場合図-2の水路を用いた。

図-1では、下流端から7mの区間に全水路幅にわたって樹木の模型を設置し、下流端から6mまでは敷き厚5cmの移動床とした。

図-2では、下流端から8.5mの区間に全水路幅にわたって樹木の模型を設置し、下流端から2.5m～7.5mの区間は敷き厚3cmの移動床とした。用いた河床材料は表-1に示すように3種類の砂である。

樹木の模型には直径Dのステンレス丸棒を用い、樹木の中心間隔は6cmで千鳥状に配置した。ここに、樹林帯密度 λ （河床単位面積に占める樹木の断面積の割合）、密生度 a （流体単位体積あたりの樹木の遮蔽面積）は表-2のようになる。

実験では、水路に河床材料を敷き、所定の水路傾斜角 $\theta=1.06^\circ$ あるいは 3.027° に設定したあと、上流端から単位幅流量 q_p 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。

(2) 実験結果

図-3は、流砂量の測定値を樹林帯のタイプごとに表したものである。ここに s は粒子の水中比重である。また h を水深として $u_{*0}=\sqrt{ghs\sin\theta}$ である。同図中には比較のため、著者らにより提案されている急勾配河道における等流条件下での掃流砂量式⁶⁾

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

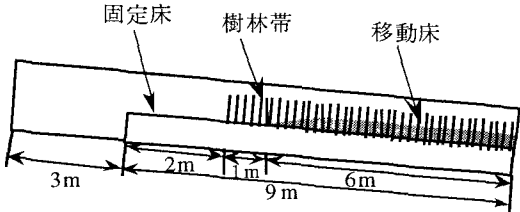


図-1 射流時の使用水路

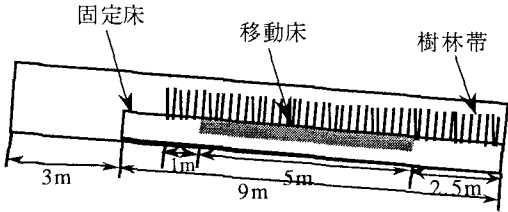


図-2 常流時の使用水路

表-1 河床材料の特性

種類	砂A	砂B	砂C
d(mm)	0.55	0.84	1.9
σ/ρ	2.65	2.62	2.61

表-2 樹林帯の種類とその特性

種類	I	II	III
D(mm)	4.0	2.0	5.0
λ	7.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.1×10^{-2}
$a(1/cm)$	0.0222	0.0111	0.028

の計算結果も無次元掃流力 τ_* を横軸にして示している。ここに、 τ_* は無次元掃流力、 α は粒子間応力に関する係数で、河床砂の比重を $\sigma/\rho=2.65$ とすると $\alpha=0.875$ となる。また、無次元限界掃流力 $\tau_{*c}=0.05$ とした。

実験値はいづれも式(1)の計算値より小さくなっており、樹林帯密度 λ が大きくなるほど流砂量は小さい。樹林帯においても式(1)が成立するものと仮定すると、有効摩擦速度 u_* は見かけの摩擦速度 $u_{*0}=\sqrt{ghs\sin\theta}$ より小さくなっていることが分かる。

図-4は、式(1)に流砂量 q_s の実験値を代入して有効摩擦速度 u_* を逆算し、 $u_{*0}=\sqrt{ghs\sin\theta}$ との比を求めたものである。樹林帯密度 λ が大きくなると、 u_*/u_{*0} の

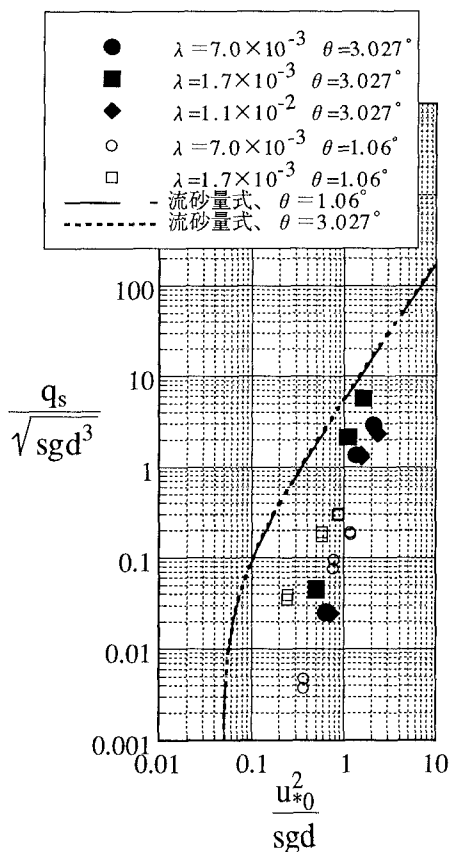


図-3 樹林帯における掃流砂量

値は小さくなること分かる。

図-5は、式(1)より逆算した有効摩擦速度 u_* を用いて流速係数 $\phi = v/u_*$ を求め、樹林帯密度 λ との関係を示したものである。流砂量式(1)の精度には問題が残るが、流速係数 ϕ は、通常知られている清水流の場合の値よりは小さく、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⁶⁾。また樹林帯密度 λ が大きくなると小さくなる傾向がある。

3. 河床変動に関する実験

(1) 実験方法

実験に使用した水路は、2章において用いた水路と同じで、全長12m、幅15cmの片側アクリルライト製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3m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-6にその模式図を示す。河床材料として、粒径 $d=0.84\text{mm}$ 、密度 $\sigma=2.62\text{g/cm}^3$ の均一な粗砂（表-1の砂B）を用いた。樹林帯の模型の諸元は既に表-2に示している。

実験では、水路を傾斜角 $\theta=3.027^\circ$ の急勾配に設置し、上流端で単位幅当たり $q_b=200\text{cm}^2/\text{s}$ の水量を供給

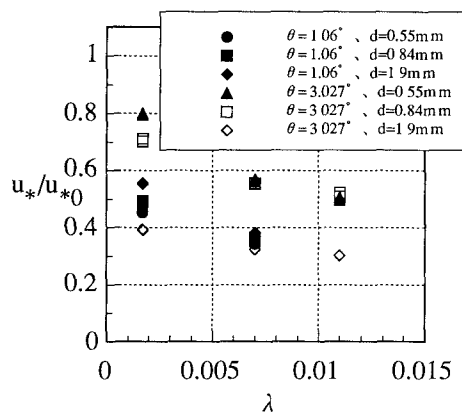


図-4 有効摩擦速度と樹林帯密度との関係

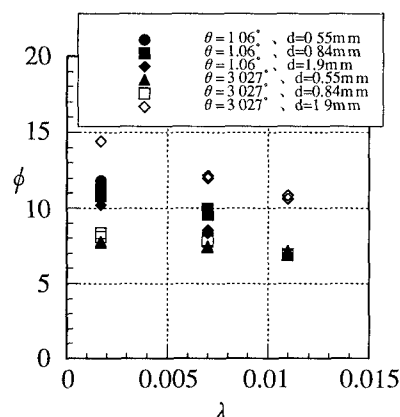


図-5 流速係数と樹林帯密度との関係

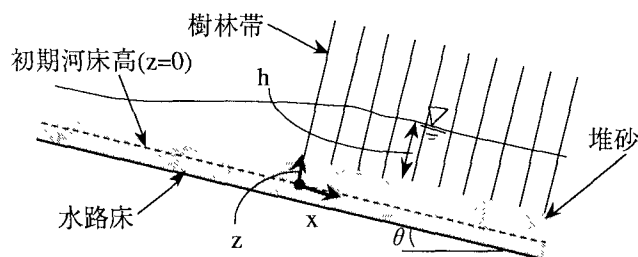


図-6 水路の模式図

した。樹林帯の上流側で土砂・水の二相流が発生・流下し、樹林帯の入り口に達すると、水と土砂を合わせた全流量 q_t は $q_t=217\text{cm}^2/\text{s}$ 、土砂輸送濃度 C_T は $C_T=0.03$ となった。そのため樹林帯内に流入すると堆砂が発生した。この状況を下流端の3.8mの区間に渡って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。

(2) 水面・堆砂形状についての実験結果

図-7(a), 8 (a), 9(a)は, それぞれ樹林帯のタイプI, II, IIIについて, 堆砂形状の時間的変化を示したものである. 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する. 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. 最初はピークの位置より下流側に多く堆積するが, 時間の経過とともに上流側に多く堆積するようになる. 樹林帯密度が大きい場合は上流側に局所的に堆積するが, 樹林帯密度が小さい場合は広範囲に堆積する.

また, 図-10(a), 11 (a), 12(a)は, それぞれ樹林帯のタイプI, II, IIIについて, 水面形の時間的変化を示したものである. 堆砂のピークに対応して, 水面形のピークもほぼ同じ位置に発生している.

表-3 計算条件

樹林帯	I	II	III
C_D	1.0	1.0	1.0
ϕ	8	8	7
λ	7.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}	1.1×10^{-2}

(3) 河床変動計算

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.

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

$$(1 - \lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial q_t}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial(C_* z)}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

ここに C_* は堆積層における土砂の体積濃度である. 流速係数 ϕ は図-5の実験値を, 抗力係数 C_D は清水流の場合の実験値^{7), 8)}を参考にして決めた(表-3). また, 流砂量式は橋本・平野⁶⁾の式(1)において $\tan \theta$ を摩擦勾配 I_f とおき変えて不定流に拡張したものである.

差分化にはMacCormack法を用いた. 計算区間は $x=-300 \sim 300(\text{cm})$ である. 初期条件としては, まず,

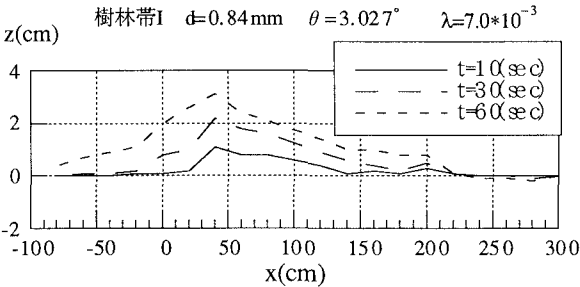


図-7(a) 樹林帯Iの場合の堆砂形状の実験結果

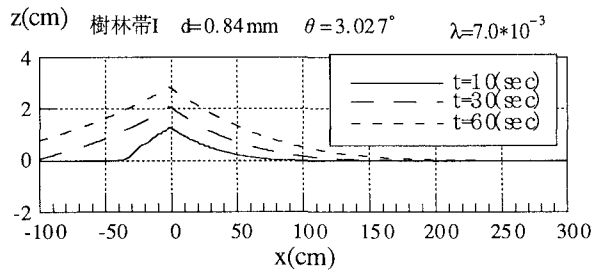


図-7(b) 樹林帯Iの場合の堆砂形状の計算結果

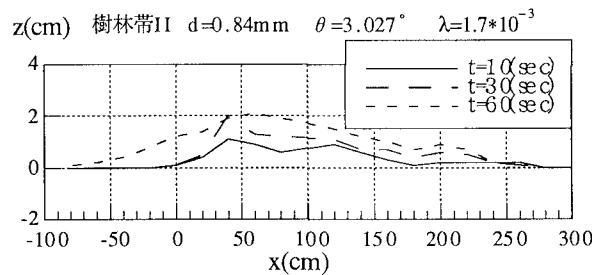


図-8(a) 樹林帯IIの場合の堆砂形状の実験結果

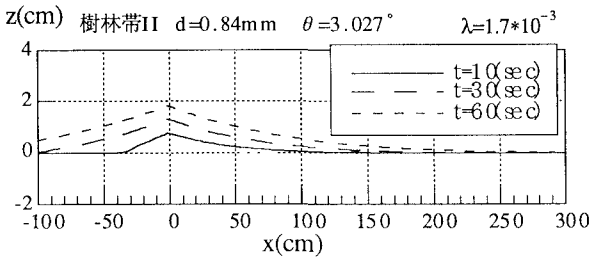


図-8(b) 樹林帯IIの場合の堆砂形状の計算結果

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 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, $x=-300\text{cm}$ において一定な全流量 $q=217\text{cm}^2/\text{s}$ と平衡流砂量, 等流水深を与え, 河床高

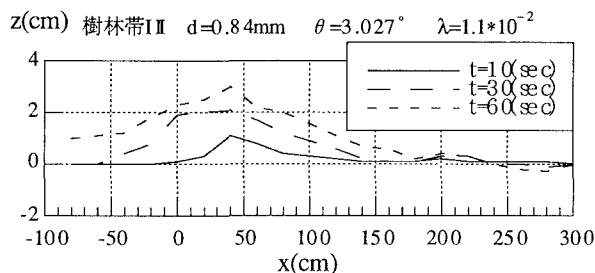


図-9(a) 樹林帯IIの場合の堆砂形状の実験結果

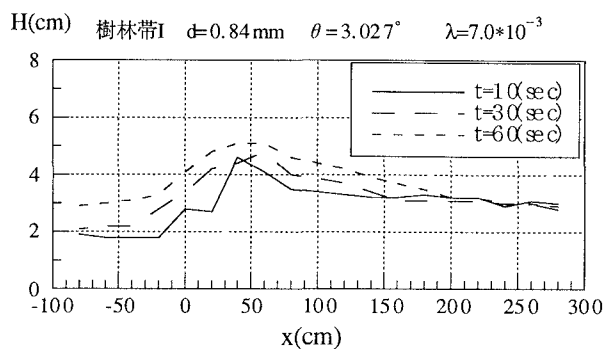


図-10(a) 樹林帯Iの場合の水面形の実験結果

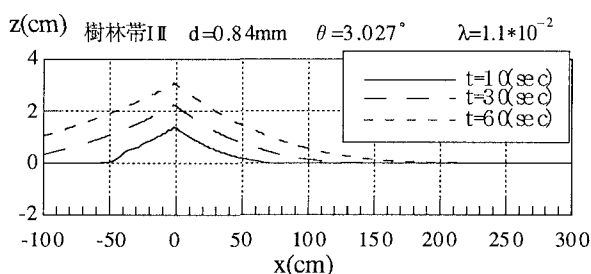


図-9(b) 樹林帯IIの場合の堆砂形状の計算結果

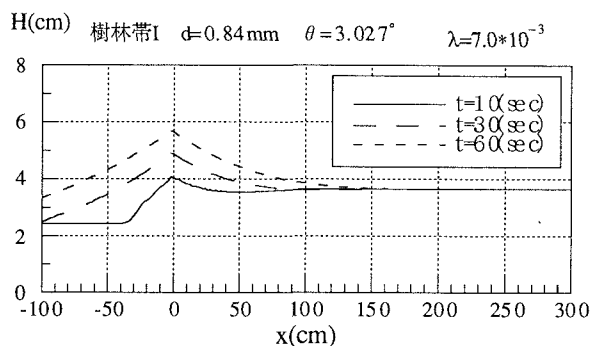


図-10(b) 樹林帯Iの場合の水面形の計算結果

に関しては $z=0$ とした。計算格子間隔は $\Delta x=2\text{cm}$ 、 $\Delta t=0.01\text{sec}$ とした。

図-7(b), 8(b), 9(b)は樹林帯の各タイプ毎の堆積高の計算結果である。堆積高のピークは実験値とほぼ等しい結果となったが、その発生位置は、実験では $x=50\text{cm}$ 付近になるが、計算では掃流力の急減する樹林带上流端の $x=0\text{cm}$ となった。これは、計算モデルにおいて流砂の非平衡性が考慮されていないからと考えられる。また、樹林帯密度が小さい場合は樹林帯の広範囲に堆積し、大きい場合は樹林帯の上流部分において堆積する結果となり、実験結果を概ね説明している。

図-10(b), 11(b), 12(b)は樹林帯の各タイプ毎の水面形の計算結果である。堆積形状の場合と同様に、水位のピークは実験値とほぼ等しい結果となったが、その発生位置は、実験では $x=50\text{cm}$ 付近になるが、計算では樹林带上流端の $x=0\text{cm}$ となった。計算結果は概ね実験結果を説明している。

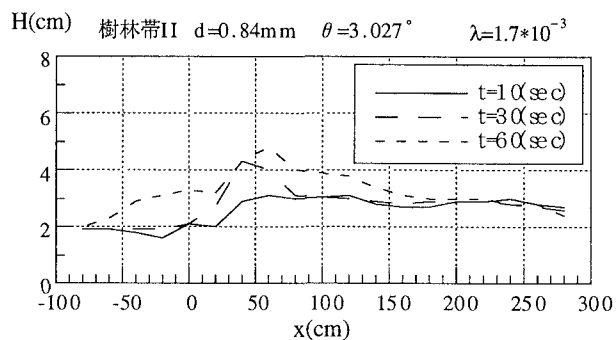


図-11(a) 樹林帯IIの場合の水面形の実験結果

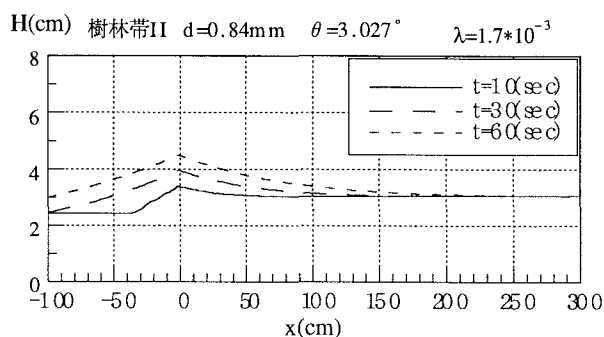


図-11(b) 樹林帯IIの場合の水面形の計算結果

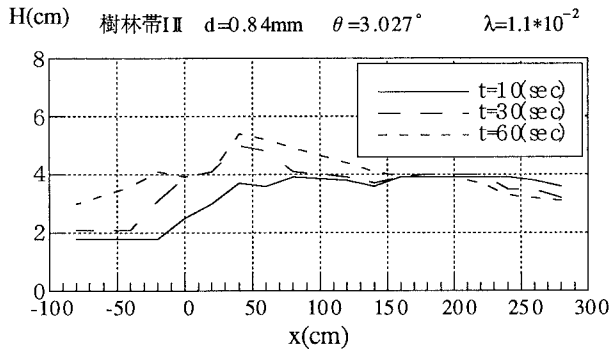


図-12(a) 樹林帯Ⅱの場合の水面形の実験結果

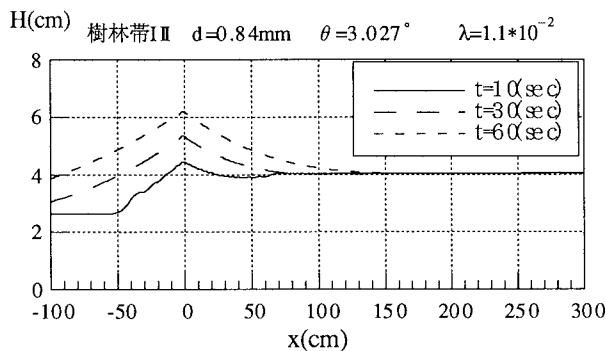


図-12(b) 樹林帯Ⅱの場合の水面形の計算結果

4. おわりに

以上、樹林帯内に移動床を設け、その流れが常流の場合と射流の場合について、それぞれ樹林帯内の掃流砂量を測定した。この測定結果と掃流砂量式を用いて有効摩擦速度と流速係数を求めた。その結果、流砂量式の精度には問題が残るが、有効摩擦速度・見かけの摩擦速度比は樹林帯密度 λ が大きくなると減少する。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 λ 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、水路全長に渡って移動床とし、下流のある区間に樹林帯を設置して、土砂堆積を発生させ、その縦断形状と水面形を調べる実験を行うとともに、河床変動計算により土砂堆積に対する樹林帯特性パラメータの効果を調べた。その結果、樹林帯密度が小さい場合は樹林帯の広範囲に堆積し、大きい場合は樹林帯の上流部分において堆積する結果となった。

謝辞：本研究は、一部、文部省科学研究費補助金基盤研究(B) (1) (代表 橋本晴行) の補助の下に行われたものである。また、本研究に際しては、実験やデータ整理などにおいて当時九州大学学部生の中村拓史、草場浩平、神岡稚子の各氏には多大の助力を受けた。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) 岡部健士・湯城豊勝・児島眞：植生を伴う河床上の掃流砂量に関する研究，水工学論文集，第41巻，1997.
- 6) 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.
- 7) 玉松潤一郎，平野宗夫，橋本晴行，中村拓史：樹林帯における流れの濃度・速度分布に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会概要集，第2部，1997.
- 8) 玉松潤一郎，平野宗夫，橋本晴行，神岡稚子：樹林帯における流れの抵抗特性に関する研究，平成9年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集 (其の1)，1998.

(1998.9.30受付)