

# 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

## SUSPENDED-LOAD DISTRIBUTION IN AN OPEN CHANNEL FLOW WITH MULTIPLE ROWS OF CYLINDERS

橋本 晴行<sup>1</sup>・高畑 洋<sup>2</sup>・火箱 貴文<sup>3</sup>・Kichan Park<sup>4</sup>

Haruyuki HASHIMOTO, Hiroshi TAKABATAKE, Takafumi HIBAKO and Kichan PARK

<sup>1</sup>正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究科都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 九州大学大学院助手 工学研究科都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>3</sup>学生会員 九州大学大学院 工学研究科都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>4</sup>学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

The roles of riparian vegetation have been noted from the view point of the river environment and flood control. Suspended sediment concentrations are measured in an open channel with cylinders installed across the whole channel width in their multiple rows. Cylinders are placed in stagger with their equal spacing on the bed.

Distributions of suspended load in an open channel with cylinders agree with Rouse distributions by using effective frictional velocities which are estimated by considering the drag force of cylinders. Flux distribution of suspended load in an open channel with cylinders is calculated. Flux of suspended load in an open channel with cylinders is found less than that without cylinders over the whole depth.

**Key Words** : *suspended load, sand-water mixture, 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, その水理学的な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。急勾配の山麓や溪流においても, 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, 地域の安全を図るものとして, 樹林帯が計画されている。このような計画に際しては流砂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<sup>1)</sup>の土砂流出防止機能に着目した実験, 水山ら<sup>2)</sup>による樹林帯の粗度係数についての定性的な研究などがある。最近においては平野・橋本ら<sup>3)4)</sup>が, 樹林帯における樹木の抗力係数や掃流砂量の特性を調べている。また, 石川ら<sup>5)</sup>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, 緩勾配水路において, 岡部ら<sup>6)</sup>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。また, 清水・辻本・北村<sup>7)</sup>は樹木群内での浮流砂濃度分布について理論的検討を行い, 渡邊・平野・井出<sup>8)</sup>は浮流砂濃度分布の測定実験を行っている。

しかしながら, 樹林帯における浮流砂量についても, その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, まず樹林帯内に移動床を設け, 樹木周辺における浮流砂濃度分布の空間的な変化について調べる実験を行うとともに, そのRouse分布への適合性について検討する。さらに, 樹林帯における浮流砂濃度フラックスの特性について樹林帯がない場合と比較・検討したものである。

表-1 樹林帯の種類とその特性

| 種類                        | C                    | F                    |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| $D(\text{mm})$            | 4.0                  | 5.0                  |
| $S(\text{cm})$            | 6                    | 6                    |
| $\lambda$                 | $7.0 \times 10^{-3}$ | $1.1 \times 10^{-2}$ |
| $a_\lambda (1/\text{cm})$ | 0.0222               | 0.028                |

表-2 河床材料の特性と初期堆積層厚

|     | $d(\text{mm})$ | $\sigma/\rho$ | 初期堆積層厚 |
|-----|----------------|---------------|--------|
| 細砂  | 0.17           | 2.61          | 3cm    |
| 微細砂 | 0.08           | 2.63          | 5cm    |

## 2. 浮流砂濃度分布に関する実験

### (1) 実験方法

実験は、全長12m、幅15cmの片側アクリルライト製可変勾配水路を水路傾斜角 $\theta=3.027^\circ$ に設定して行う。

図-1に示すように、水路下流端から9mの区間を樹林帯とする。樹林帯模型は、直径 $D=4.0\text{mm}$ または $5.0\text{mm}$ のステンレス丸棒を全水路幅にわたって中心間隔 $S=6\text{cm}$ で千鳥状に配置して作成する。樹林帯密度 $\lambda$ （河床単位面積に占める樹木の断面積の割合）および密生度 $a_\lambda$ （流体単位体積当りの樹木の遮蔽面積）は表-1のようになる。このような樹林帯内において表-2に示す粒径 $d=0.17\text{mm}$ または $d=0.08\text{mm}$ の砂を敷き詰めて移動床を作る。移動床材料として粒径 $d=0.17\text{mm}$ の砂を用いる場合には、表-1のCまたはFのタイプの樹林帯模型を、 $d=0.08\text{mm}$ の砂を用いた場合にはFのタイプの樹林帯模型をそれぞれ用い、合計3ケースの実験を行う。

単位幅流量 $q_p=202\text{cm}^2/\text{s}$ の水を水路上流端から供給し、定常状態になったときに流量及び流砂量を下流端で測定する。同時に、浮流砂濃度分布を測定するため、下流端から約1mのところの内径4mm、外径5mmの銅製の円管を水深方向に中心間隔1cmで4本設置し、サイフォン方式で流れを採取する。

樹木の背後と側面で浮流砂濃度分布が異なることが推測されるため、濃度分布測定は図-2に示すaからiの9点でそれぞれ行う。これらの点において、水深方向に5mm間隔で6から7点の高さの浮流砂濃度を測定する。各高さ毎の測定濃度は流れ場の幾何学的対称性を考慮して空間平均され、実験結果のRouse分布との適合性が調べられる。

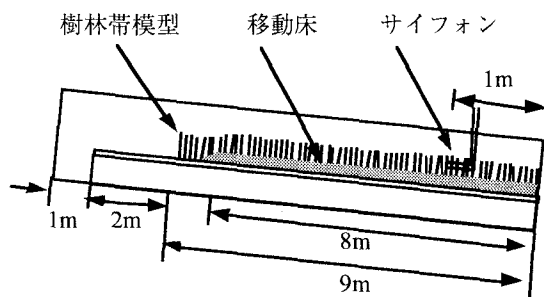


図-1 実験水路

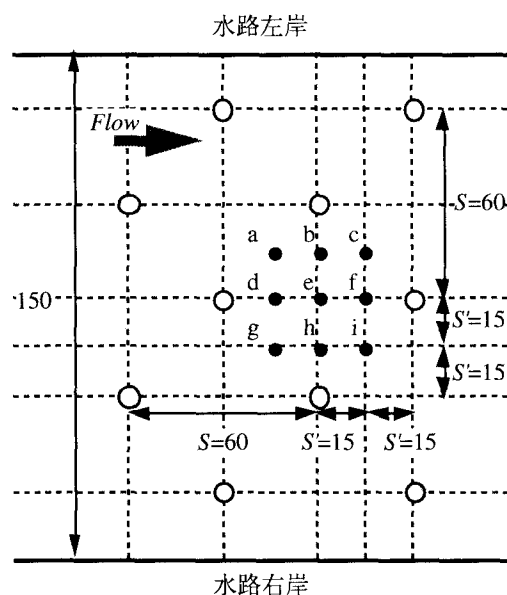


図-2 樹林帯模型と浮流砂濃度測定点の配置  
(○：ステンレス棒、●：測定点；単位mm)

1回の実験では、図-2のaからiの測点のいずれか1点で、高さ方向に4点の浮流砂濃度の同時測定が行われる。そこで各測点につき、サイフォンの高さを変えて同一条件の実験が2回行われる。

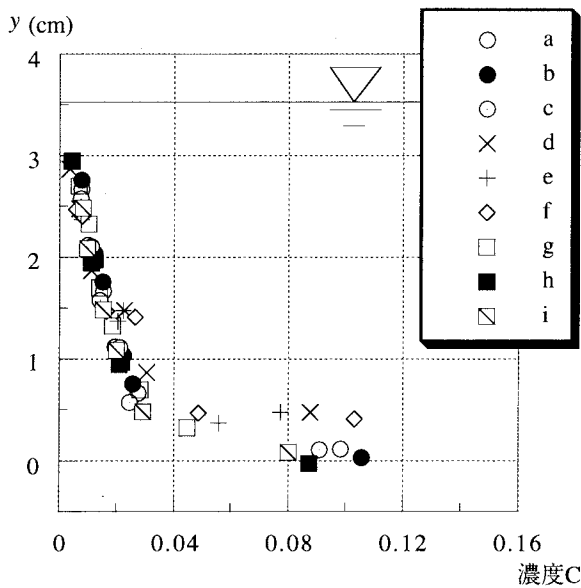
また、河床の高さおよび水深を測定するため、下流端から約1mのところの水路側方からビデオカメラを用いて流れの状況を撮影する。

表-3に実験時の水理条件を示す。ここに、 $q_t$ は単位幅あたりの流量、 $z_b$ は採水時における河床高、 $C_f$ は流砂の輸送濃度をそれぞれ表す。

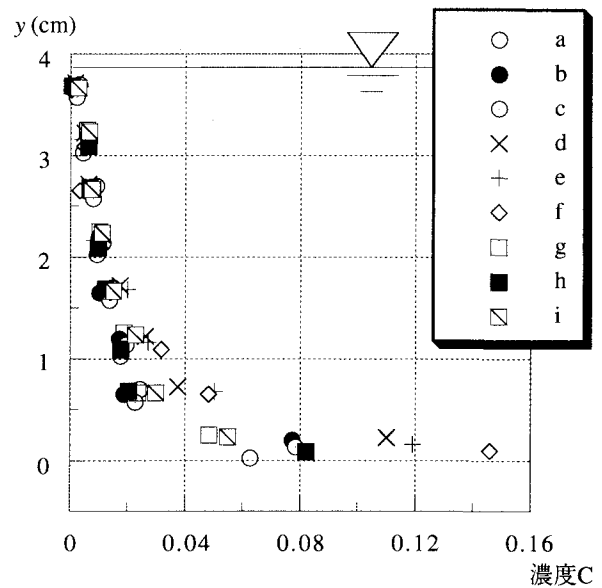
### (2) 実験結果

図-3および図-4に濃度分布の測定結果を示す。図中、 $y$ は河床からの高さを表し、凡例のaからiの記号は図-2に示された測点を表す。

$d=0.17\text{mm}$ の細砂を用いた実験では、円柱背面領域にあたるd、eおよびfの測点における河床付近の浮流砂濃度が他の測点の濃度に較べて若干大きい。また、樹林帯密度の差による



(a) 樹林帯C ( $\lambda=7.0 \times 10^{-3}$ )



(b) 樹林帯F ( $\lambda=1.1 \times 10^{-2}$ )

図-3 細砂 ( $d=0.17\text{mm}$ ) を用いた場合の浮流砂濃度分布

表-3 水理条件

| 河床材料                        | 細砂     |        | 微細砂   |
|-----------------------------|--------|--------|-------|
| 樹林帯                         | C      | F      | F     |
| $\theta (^{\circ})$         | 3.027  | 3.027  | 3.027 |
| $q_t(\text{cm}^2/\text{s})$ | 209.1  | 210.9  | 251.0 |
| $h(\text{cm})$              | 3.52   | 3.88   | 4.39  |
| $Fr$                        | 1.01   | 0.89   | 0.87  |
| $Re$                        | 2374   | 2738   | 2866  |
| $z_b(\text{cm})$            | +0.07  | +0.09  | -0.86 |
| $C_T$                       | 0.0294 | 0.0277 | 0.104 |

浮流砂濃度分布の違いはあまり見られない。

$d=0.08\text{mm}$ の微細砂を用いた実験では、通水後に河床低下が生じて、通水前に高さが固定されている採水用のサイフォンでは、底面付近の濃度を測定することができない。細砂の場合に較べて、微細砂は粒子の沈降速度が小さく、流れの乱れによる拡散の効果を強く受ける。そのため濃度分布が一様化している。

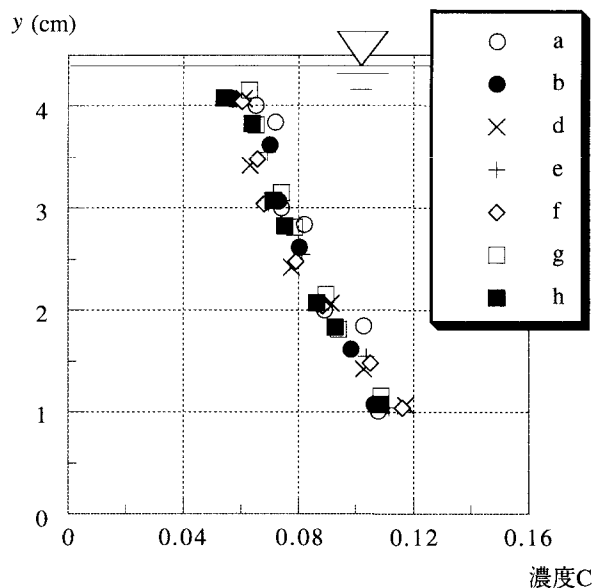
### 3. 浮流砂濃度分布に関する考察

#### (1) Rouse分布曲線との比較

樹林帯をともなう開水路1次元流れにおいて、等流状態のときの流下方向の釣り合い式は以下になる。

$$(1-\lambda)gh\sin\theta = (1-\lambda)u_*^2 + \frac{1}{2}C_D a \lambda h U^2 \quad (1)$$

ここに、 $g$ :重力加速度、 $h$ :水深、 $u_*$ :有効



樹林帯F ( $\lambda=1.1 \times 10^{-2}$ )

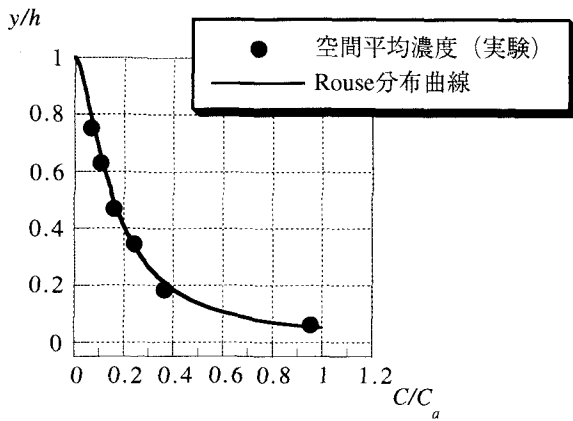
図-4 微細砂 ( $d=0.08\text{mm}$ ) を用いた場合の浮流砂濃度分布

摩擦速度、 $C_D$ :樹木の抗力係数、 $U$ :混相流の断面平均流速である。清水流の実験結果<sup>9)</sup>によると、抗力係数 $C_D$ は約1.0であることが知られている。これを用い、式(1)に実験結果から求められる $h$ および $U$ を代入することにより、有効摩擦速度 $u_*$ を求めることができる。

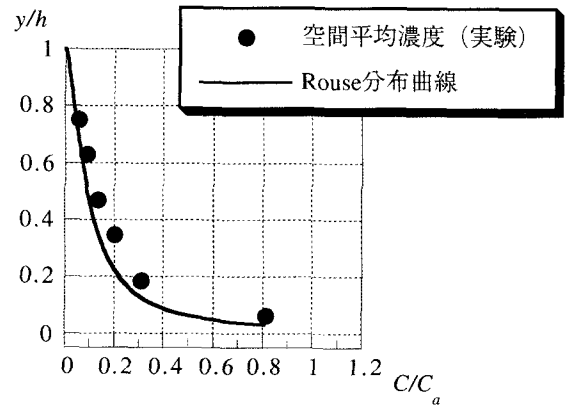
浮流砂濃度分布を与えるRouse分布曲線

$$\frac{C}{C_a} = \left( \frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^Z, \quad Z = \frac{w_0}{\beta \kappa u_*} \quad (2)$$

と実験結果との適合性について検討する。ここに、 $C$ :浮流砂濃度、 $C_a$ :基準点濃度、

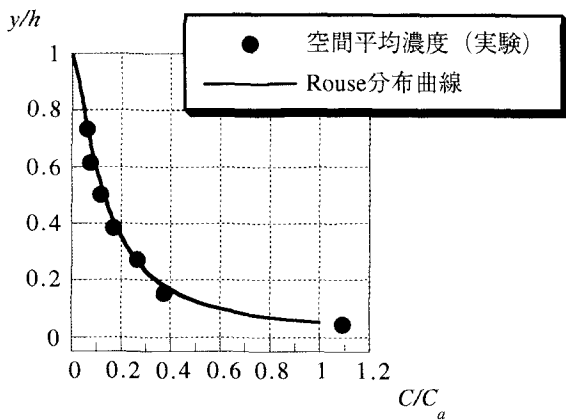


(a)  $a=0.05h$  の場合

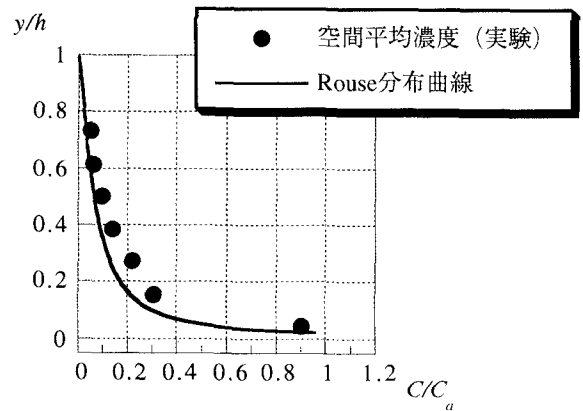


(b)  $a=\delta_G$  の場合 ( $\delta_G/h=0.022$ )

図-5 細砂 ( $d=0.17\text{mm}$ )，樹林帯Cの場合の実験結果とRouse分布曲線との比較

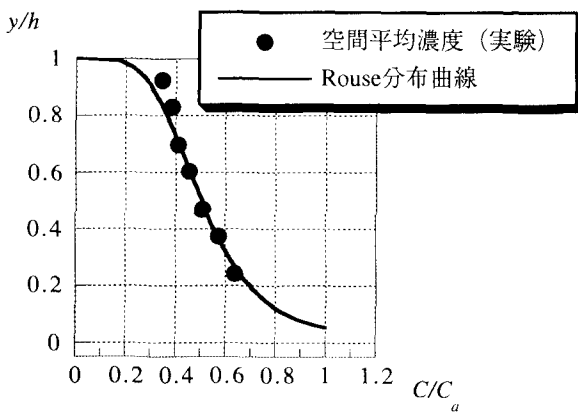


(a)  $a=0.05h$  の場合

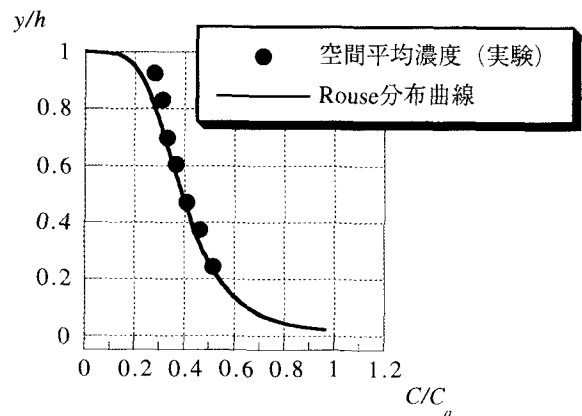


(b)  $a=\delta_G$  の場合 ( $\delta_G/h=0.018$ )

図-6 細砂 ( $d=0.17\text{mm}$ )，樹林帯Fの場合の実験結果とRouse分布曲線との比較



(a)  $a=0.05h$  の場合



(b)  $a=\delta_G$  の場合 ( $\delta_G/h=0.017$ )

図-7 微細砂 ( $d=0.08\text{mm}$ )，樹林帯Fの場合の実験結果とRouse分布曲線との比較

$y$ : 底面からの高さ,  $a$ : 基準点高さ,  $w_0$ : 砂粒の沈降速度 (Rubeyの沈降速度式による),  $\beta$ : 渦動粘性係数と渦動拡散係数の比( $=1.2$ ),  $\kappa$ : カルマン定数( $=0.4$ )である. 有効摩擦速度  $u_*$  には式(1)で求めた値を用いる.

図-5(a), 6(a)および7(a)に, 基準点高さ  $a$  として従来より用いられている  $a=0.05h$  を用いた

場合のRouse分布曲線を, 空間平均された実験値とともに示す. ここに実験値の  $C_a$  は, 空間平均濃度分布の回帰曲線より推定している.

図-5(b), 6(b)および7(b)は, 急勾配移動床水路における高濃度浮流砂流に対して提案されている粒子間力層厚  $\delta_G^{(10)}$  を, 基準点高さ  $a$  に用いた場合のRouse分布曲線を実験値の空間平均

濃度分布とともに示したものである。  $\delta_G$  は  $\sigma$  を砂の密度とすると

$$\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C_\delta)}} = 15 \quad (3)$$

で表される。ここに、  $\rho_t$  は流れの密度であり、水の密度を  $\rho$ 、混相流中の土砂濃度を  $C$  として

$$\rho_t = C\sigma + (1-C)\rho \quad (4)$$

である。  $F(C)$  は堆積層の土砂濃度を  $C_*$  として

$$F(C) = \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \quad (5)$$

と定義される。ここでは  $\rho_t$  および  $F(C)$  中の  $C$  に対し、粒子間力層濃度  $C_\delta$  を代入する。  $C_\delta$  は式(3)と実験値の空間平均濃度分布の回帰曲線式とを連立させて得られる。

いずれの実験の場合でも粒子間力層厚  $\delta_G$  は  $a=0.05h$  よりも小さいが、どちらの基準点濃度を用いても式(1)で  $C_D=1.0$  として求めた有効摩擦速度  $u_*$  を用いると、浮流砂濃度分布の実験値は Rouse 分布に一致する。

## (2) 浮流砂輸送フラックスの特性

樹林帯をとともなう流れにおける浮流砂濃度フラックス  $uC$  の分布特性を、樹林帯のない場合の浮流砂濃度フラックス分布と比較する。ここでは、急勾配移動床水路における高濃度浮流砂流に対して提案されている考え<sup>11)</sup>に従って考察を行う。

流速  $u$  の分布について考える。いま流れは等流状態で、慣性力層と粒子間力層の二層構造になっているものとする。また、流速分布についての考察では、濃度  $C$  の分布は考慮せず、一様であるとする。

レイノルズ応力が粒子間応力に対して卓越する慣性力層 ( $\delta_G < y < h$ ) における運動量の釣り合い式は、  $x$  および  $y$  方向流速の変動成分をそれぞれ  $u', v'$  として、次のようになる。

$$(1-\lambda)\rho_t g \sin \theta = -(1-\lambda) \frac{d}{dy} (-\rho_t \overline{u'v'}) + \frac{1}{2} \rho_t C_D a \lambda u^2 \quad (6)$$

レイノルズ応力は、  $\varepsilon$  を渦動粘性係数として、

$$-\rho_t \overline{u'v'} = \varepsilon \frac{du}{dy} \quad (7)$$

と表わす。慣性力層内の流速  $u$  は、渦動粘性係数  $\varepsilon$  を適当に定義して式(7)を式(6)に代入し、これを与えられた境界条件のもとに解くことにより得られる。境界条件は、以下の式(8)および(9)を与える。

$$\text{基準点 } y = \delta_G: \quad u = u_\delta \quad (8)$$

$$\text{水表面 } y = h: \quad -\rho_t \overline{u'v'} = \varepsilon \frac{du}{dy} = 0 \quad (9)$$

ここに  $u_\delta$  は後述の式(15)を用いて求められる。渦動粘性係数は

$$\varepsilon = \frac{\kappa u_* h}{6} \quad (10)$$

とする。流速  $u$  は Runge-Kutta 法により数値計算される。

樹林帯が存在しない場合には、渦動粘性係数  $\varepsilon$  を壁面乱流における混合距離  $l = \kappa y$  を用いて評価する。それにより清水流における対数則の導出と同様な方法によって、流速分布を解析的に計算する。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right) + \frac{u_\delta}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right) \quad (11)$$

さて、式(8)の  $u_\delta$  については、次のように考える。粒子間力層 ( $0 < y < \delta_G$ ) においては、粒子間の応力  $\tau_{zx}$  がレイノルズ応力に対して卓越するため、運動量の釣り合い式は

$$(1-\lambda)\rho_t g \sin \theta = -(1-\lambda) \frac{d\tau_{zx}}{dy} + \frac{1}{2} \rho_t C_D a \lambda u^2 \quad (12)$$

となる。  $\tau_{zx}$  は、  $K_{zx}$  を係数として

$$\tau_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C_\delta) \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (13)$$

である。式(12)の両辺を  $y$  で積分すると、

$$\frac{\tau_{zx}}{\rho_t} = g(h-y) \sin \theta - \int_y^h \frac{1}{2(1-\lambda)} C_D a \lambda u^2 dy \quad (14)$$

となる。式(14)において底面近傍  $y \rightarrow 0$  を考えると、右辺は  $u_*^2$  となる。左辺については式(13)を代入する。さらに、境界条件として底面  $y=0$  における流速を  $u=0$  とすると、粒子間力層内の流速  $u$  の分布は

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\xi}{\sqrt{K_{zx}}} \frac{y}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (15)$$

となる。  $\xi$  は濃度分布を一様として取り扱ったことによる補正係数である。いま粒子間力層内の平均流速  $\overline{u_\delta}$  については、  $\overline{u_\delta}/u_* = 4.7$  であること<sup>12)</sup>が知られている。これを用い、式(15)から式(8)の  $u_\delta$  を評価できる。

浮流砂濃度分布  $C$  は、式(2)の Rouse 分布曲線で表されるものとし、基準点高さ  $a$  には式(3)の粒子間力層厚さ  $\delta_G$  を用いる。

粒径  $d=0.17\text{mm}$ 、樹林帯  $C$  の場合に、表-3に示した実験における水深  $h$  を用い、  $\delta_G$  は図-5(b)で求めた値を用いて樹林帯の存在する場合と存在しない場合についての浮流砂濃度フラックス分布  $uC$  をそれぞれ計算する。図-8に  $uC$  を  $u_* C_a$  で正規化して示す。

$y > \delta_G$  において樹林帯のある場合には  $u/u_*$  が小

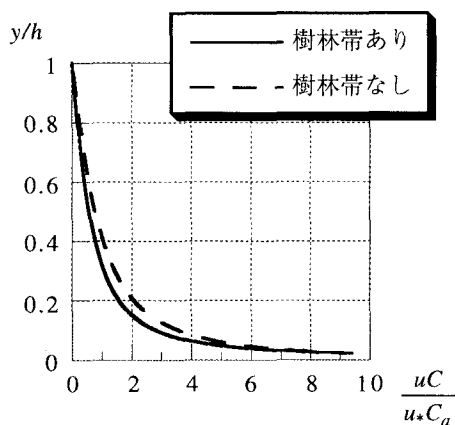


図-8 浮流砂濃度フラックス分布

( $d/h=4.83 \times 10^{-3}$ ,  $\delta_G/h=2.16 \times 10^{-2}$ ,  $w_0/u_* = 0.389$ ;  
樹林帯C:  $\alpha_\lambda h/(1-\lambda)=7.87 \times 10^{-2}$ ,  $C_D=1.00$ )

さくなるため、正規化浮流砂濃度フラックス  $uC/(u_*C_a)$  が若干小さくなっている。樹林帯が存在する場合でも、存在しない場合でも有効摩擦速度が同じであれば、掃流砂量は同じになることが知られている。しかし、浮流砂量の場合、樹林帯のある場合には、それが若干小さくなることがわかる。

#### 4. おわりに

樹林帯をともなう急勾配水路における浮流砂濃度分布を測定し、測定値を空間平均した値をRouse分布と比較した。樹木の抗力を考慮した有効摩擦速度を用いることで、樹林帯内の浮流砂濃度分布もRouse分布に従うことが明らかにされた。また、基準点濃度と基準点高さには、従来からの5%水深における濃度と急勾配移動床水路における高濃度浮流砂流に対して提案されている、粒子間力層厚と粒子間力層濃度のいずれを用いても適切な値を与えることができる。

同じ有効摩擦速度のもと、樹林帯内の浮流砂濃度フラックスを、樹林帯のない場合と比較した。樹林帯をともなう場合の浮流砂濃度フラックスは樹林帯のない場合と比べ、全水深にわたって若干小さくなった。掃流砂量の場合と異なり、等しい有効摩擦速度のもとでは樹林帯が存在すると浮流砂量が若干小さくなることがわかった。

今後は、河床材料および樹林帯について、本研究で用いた種類以外のものでも実験を行い、上述の結果の追試が必要である。

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、本研究全般において九州大学大学院の池松伸也技官には多くの支援をいただいた。また、実験に際しては同大学学部生の荒渡光貴、椎木武史、高岡広樹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) 平野宗夫, 橋本晴行, 玉松潤一郎, Park, K., 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, 1997.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 清水義彦, 辻本哲郎, 北村忠紀: 植生に覆われた砂床上流れの浮遊砂濃度分布, 水工学論文集, 第35巻, 1991.
- 8) 渡邊康玄, 平野道夫, 井出康郎: 樹木群内の流速水深方向分布と浮遊砂濃度分布, 平成6年度河川に関する調査・試験・研究報告書, 北海道開発局開発土木研究所, 1995.
- 9) 火箱貴文, 橋本晴行, 碓正敏, Park, K., 玉松潤一郎, 平野宗夫: 樹林帯を伴う開水路流れの底面せん断力に関する研究, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 第2部, 1999.
- 10) 平野宗夫, 橋本晴行, 寺中孝司: 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41巻, 1997.
- 11) 平野宗夫, 橋本晴行, 多川博章: 急勾配水路における浮流砂を伴う流砂量, 水工学論文集, 第42巻, 1998.
- 12) 橋本晴行, 平野宗夫: 掃流状集合流動における抵抗則と流砂量, 土木学会論文集, No.545, II-36, 1996.

(1999.9.30受付)