

## 樹林帯における土砂堆積の数値計算

九州大学大学院 ○学生員 多川博章

九州大学工学部 正 員 平野宗夫

九州大学工学部 正員 橋本晴行

## 1. はじめに

樹林帯は水害防備林、飛砂防備林、防雪林など防災の機能をもつものとして利用されており、水理学的に大きな粗度集団と考えることができ、樹木によって流速が減少した結果流出土砂を堆積させる機能をもつ。また、樹林帯内の流れは山地河川のように流れの遷移を伴う場合もあり、射流・常流の遷移を伴う河道を対象にした河床変動予測のための不定流計算の実行は必ずしも容易ではない。

本研究は、流入土砂による樹林帯内の土砂堆積現象を掃流砂によるものと考え、遷移を伴う不定流計算に有効な方法として最近注目されている MacCormack 法<sup>1)2)</sup>を樹林帯モデルに適用し、1次元での河床変動計算を行ったものである。

## 2. 流れの基礎式

図-1は今回用いた樹林帯モデルの概略図である。樹林帯内における運動方程式，連続式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial v q_i}{\partial x} = \rho_i(1 - \lambda)gh \left[ -\frac{\partial(h+z)}{\partial x} \right] - \rho_i(1 - \lambda) \frac{v^2}{\phi^2} - \frac{\rho_i v^2 C_{Dah}}{2} \quad (1)$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial q_t}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$(1 - \lambda) \frac{\partial(C^*z)}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

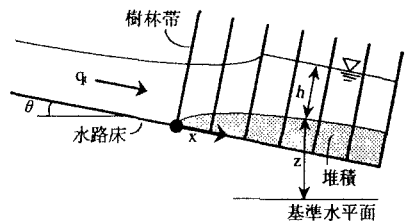


図-1 樹林帯モデル概略図

ここに、 $t$ ；時間、 $x$ ；河床方向に沿う流れ方向の座標、 $q_1$ ；総流量、 $h$ ；水深、 $z$ ；河床高、 $\lambda$ ；樹林帯密度（河床単位面積に占める樹木の断面積）、 $a$ ；密生度（流体単位体積あたりの樹木の遮蔽面積）、 $\phi$ ；流速係数、 $C_D$ ；抗力係数、 $g$ ；重力加速度、 $C_s$ ；最密充填濃度、 $q_s$ ；掃流砂量、 $\rho_t = \sigma C + \rho_w(1 - C)$ である。掃流砂量式には次式を用いるものとする<sup>3)</sup>。

$$\frac{q_s}{\sqrt{s}pd^3} = \frac{14}{3} \tau^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \frac{1}{(\alpha - I_f)} \quad (4)$$

ここに、 $s$ ；土粒子の水中比重、 $d$ ；粒径、 $\tau_*$ ；掃流力、 $\tau_{*c}$ ；限界掃流力、 $I_f$ ；摩擦勾配、 $\alpha=0.873$ である。

### 3. MacCormack法の適用

MC法は2次の精度をもつ計算法であるが、段波や跳水のような不連続現象もかなり良い精度で計算できる。また、MC法はアルゴリズムが比較的簡単で計算時間も節約できることから、流れのみに関する計算ばかりでなく河床変動の計算にも利用しやすいと考えられる。

MC法による計算方法は、まず「予測子段階」と呼ばれる第1段階において、時間ステップ $\Delta t$ で粗い近似解を求め、ついで、「修正子段階」と呼ばれる第2段階において、時間ステップを $(1/2)\Delta t$ として、前段階の結果を修正するというものである。予測子段階においては下流から上流に向けて、修正子段階においては下流から上流に向かって計算を進める。また、河床変動量の計算にもMC法の概念を取り入れ、各時間ステップ及び、予測子・修正子双方の段階において河床変動量を計算する。下流端にはボックス型差分を用いる。

#### 4. 計算結果および考察

河床勾配が一定で固定床となっているような架空の樹林帯モデルについて、河床変動のシミュレーションを行った。固定床であるため、流れによる洗掘は考えないものとした。流れは、 $t=0$ の初期状態においては全く流れていないものと仮定し、諸条件として表-1に示す諸量及び、流入境界条件として一定の水深2cm、流量200cm<sup>2</sup>/sを与えた。流砂量式において摩擦勾配  $I_f = v^2 / (g h \phi^3)$  を用いて計算を行うと数値振動が起こってしまうため、今

回は  $I_f \div \partial z / \partial x$  とした。また、土砂・水混相流の場合、 $C_D$  の値は清水流の場合（約1.0）よりも大きくなるため<sup>4)</sup>、 $C_D$  の値は1.0～2.0まで変化させた。

表 - 1 計算に用いた諸条件

| d(mm) | $\sigma$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\theta$ (°) | $\Delta x$ (cm) | $\Delta t$ (sec) | $\tau_{*c}$ | $C_*$ | $\phi$ | $C_D$       | $\lambda$            | a(1/cm) |
|-------|-------------------------------|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------|--------|-------------|----------------------|---------|
| 1.9   | 2.61                          | 3            | 2               | 0.01             | 0.05        | 0.6   | 16     | 1.0,1.5,2.0 | $1.1 \times 10^{-2}$ | 0.0336  |

図 - 2～4は、それぞれ水面形及び土砂堆積厚  $z_s$  の流下方向変化に関する計算結果を示したものである。これらによると、流れが樹林帯によって抵抗を受け、流速が減少することによって射流から常流に移移する様子がはっきりと表れている。また、遷移断面間の水面形状もほぼ妥当なものである。一方、土砂堆積はいずれも樹林帯の上流端付近から始まっており、最大土砂堆積厚は  $C_D$  の増加に伴い約1.1cm、1.65cm、2.0cmと大きくなっている。また、 $C_D=1.0$ の場合、土砂は  $x=40$ cmあたりまで緩やかに堆積しているが、 $C_D=1.5$ の場合は  $x=20$ cm、 $C_D=2.0$ の場合は  $x=14$ cmと、 $C_D$  の増加に伴い堆積長の減少がみられる。以上より、本法は、流れの遷移を伴う樹林帯の河床変動計算の有効な数値解法であるといえる。ただし、時間が経過すると、下流端から流れの遷移部分にかけて水面形と河床形に  $\Delta x$  の波長をもつノコギリ状の振動が生じ始めた。これは、跳水の地点を発生源とし、時間の経過とともに増幅しつつ上流に伝搬した。このような解の振動は、物理的な意味を持つものでなく、不連続現象に対するMC法が本質的に有している不安定性であると思われるが、現在のところこれを理論的に解決する手段はないようである。

### 5. おわりに

以上、樹林帯内における運動方程式と連続式をMacCormack法により離散化させ、樹林帯モデルに適用して掃流砂による1次元河床変動計算を行った。また、抗力係数を変化させて土砂堆積厚及び堆積長を比較した。今後の方針としては、MC法特有の数値振動の適切な抑制方法の検討及び、浮流砂を含めた河床変動計算を行っていく予定である。

最後に本研究に際しては大学院生の恩田邦彦氏には計算手法等において多大の助言、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

- 岡部健士・高橋邦治・穴瀬康雄：MC法を用いた1次元開水路流れの数値計算法、徳島大学工学部研究報告、No.38、1993。
- 岡部健士・芦田和男：流れの遷移を伴う一次元河床変動の数値解法、土木学会論文集、No.434、1991。
- 橋本晴行・平野宗夫：急勾配水路における流砂量と抵抗則、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部(A)、1995。
- 島廻健司・橋本晴行・平野宗夫：樹林帯における土砂・水混相流の抵抗則と土砂堆積、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部(A)、1995。

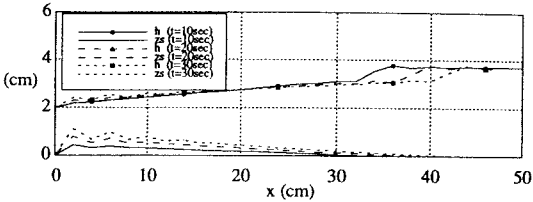


図 - 2 水面形及び土砂堆積厚 ( $C_D=1.0$ )

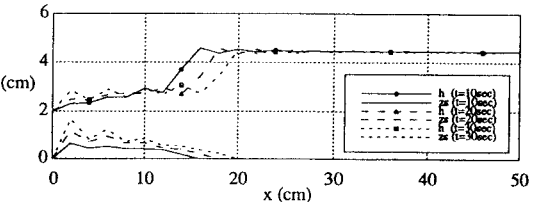


図 - 3 水面形及び土砂堆積厚 ( $C_D=1.5$ )

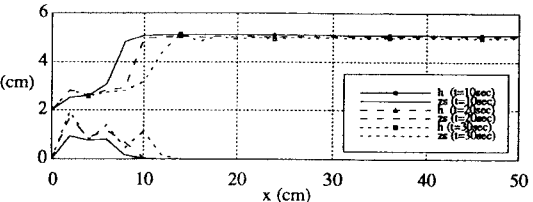


図 - 4 水面形及び土砂堆積厚 ( $C_D=2.0$ )