

土石流氾濫シミュレーションモデルの適用検討

Applicability of Debris Flow Simulation Model

福田 義昭* 渡邊 康玄** 星 清***

Yoshiaki FUKUDA, Yasuharu WATANABE and Kiyoshi HOSHI

土石流氾濫区域予測手法の1つとして、「土石流氾濫シミュレーションモデル」が提案されている。このモデルは、ソフトな対策を立案するための危険度評価手法として利用可能であり、また、土石流対策工の効果評価手法としても期待されている。そこで、土砂流から掃流に近い土砂移動問題に対しても本モデルが適用可能であるかどうかを検討し、土砂濃度算定法に改良すべき点があることを明らかにした。

《土石流モデル； 掃流砂モデル； 砂防施設》

A systematic model formulation is needed to predict two-dimensional features of scour and deposit yielded by sediment transportation and debris flows on an alluvial fan. So far two types of numerical models have been applied to evaluate the counter-measure effects of the Sabo works installed; the first is a sediment transport simulation model and the second is a debris flow simulation model.

The present study examines the applicability of a debris flow model to sediment transport-type phenomena. A simulation model was tested through comparison with experimental data in terms of the areas flooded by debris flows.

The results clearly show that an accurate estimation of concentration distribution of a debris flow is the most critical factor for reproducing ded variations as well as sediment discharge; further studies are required to develop a new formula for concentration rate of a debris flow.

Keywords: debris flow model, sediment transport model, Sabo works.

1. はじめに

土砂災害を防止、軽減する方法として、これまで多くの砂防ダムが建設されてきた。また、地形的・地質的にダムサイト適地がない場合や扇状地上で土砂移動をコントロールする場合には、床固工群(低ダム群)、遊砂地、流路工等の工法も行われている。このように、土砂移動をコントロールする場や目的などに応じて工法が選択、施工されてきたが、これらの効果を定量的に評価することが困難な場合が多い。

河川研究室においても、床固工群、遊砂地などの効果検討のため、水路実験を実施してきた¹⁾。しかしながら、水理実験などはあくまでも決まった条件のときの結果で

あり、定量的評価のためには数多くのケースについて実験しなければならず、多くの費用と時間を要する。一方、数値計算による方法は、その手法が確立された場合には経済的、時間的にも有効な手段と考えられる。これまで、掃流タイプのモデルの適用²⁾が試みられてきたが、土砂災害の多くが土石流によるものであり、モデルの適用範囲が問題として残されていた。一方、土石流の氾濫区域予測手法の1つとして、「土石流氾濫シミュレーションモデル」が提案されている。このモデルは、水山らの改良³⁾によって再侵食過程をも表現可能なものとなり、実験結果との比較によりその再現性が確認されてきた。また、このモデルを用いて土石流対策工の効果評価を試みた例⁴⁾

*元河川研究室員 現石狩川開発建設部岩見沢河川事務所 **河川研究室主任研究員 ***前河川研究室長 現局長官房技術開発室長

もある。すなわち、このモデルは、ソフトな対策を立案するための危険度評価手法として利用可能であり、また、対策工の効果評価手法としても期待されるなど、今後の砂防事業を実施していく上で、重要な役割を果たすものと考えられる。しかしながら、土砂流から掃流に近い土砂移動問題に適用された例はなく、その適否が明確にされていない。

本報告では、土石流氾濫シミュレーションモデルを土砂流から掃流の土砂移動を対象とした床固工群の水路実験に適用し、実験値と計算値の比較によりモデルの再現性を確認することとする。また、これらの結果から、本モデル適用にあたっての問題点を検討する。

2. モデルの基礎理論

2-1 モデルの構成

流体の運動を水理学的にモデル化するときの基本的構成は、流体の連続式と運動方程式である。本報告では、土石流の運動をモデル化することによって、土石流の流動とそれに伴う氾濫量・区域を予測し、対策工の効果を評価することを目的としている。したがって、土石流の特性を十分に考慮し、目的に適合したモデル構成を考慮することが必要であり、考慮すべき点について要約して以下に示す。

- (a) 土石流は非定常であり、堆積、侵食が考慮されなければならない。
- (b) 土石流は水と砂礫の混合物である。したがって、水と砂礫のそれぞれについて連続式を考慮する。すなわち、土石流の濃度の変化をモデルに反映させる。
- (c) 氾濫域の予測のため、平面二次元モデルを用いる。
- (d) 土砂移動形態としては、土石流のほか土砂流についても考慮する。
- (e) 岩床や砂防ダムなどの非侵食面の影響を考慮しなければならない。モデル上では、侵食限界高を基盤高とし、その高さ以下に侵食されないようにすることが必要である。
- (f) 土石流の先端部が進行するとともに、計算上の境界も移動する。すなわち、移動境界の考え方をモデルに組込まなければならない。

以上の検討から、モデルの構成要素は概略次のように分けられる。

- ① 流体（水+砂礫）の運動方程式（平面二次元）
- ② 水の連続式
- ③ 砂礫の連続式
- ④ 土砂濃度の算定式（土石流および土砂流）
- ⑤ 基盤高の考慮

⑥ 非計算点の判断（移動境界を組込む）

2-2 基本式

(1) 流体（水+砂礫）の運動方程式

平面直交座標系における二次元（ x 方向、 y 方向）の運動方程式は、それぞれ(2-1)、(2-2)式で表わされる

• x 方向

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (M \cdot u)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (M \cdot v)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F_x}{\gamma} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

• y 方向

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (N \cdot u)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (N \cdot v)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{F_y}{\gamma} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

ここで、 t ; 時間、 x, y ; x 方向、 y 方向距離、 M, N ; x 方向、 y 方向の単位幅当り流量 ($M = uh, N = vh$)、 u, v ; x 方向、 y 方向の水深平均流速、 β ; 運動量補正係数、 g ; 重力加速度、 h ; 流動深、 H ; 流動高(h +河床高)、 γ ; 土石流の密度、 F_x, F_y ; x 方向、 y 方向の摩擦抵抗力である。

水のみを対象とした流れの計算では、抵抗力の項を一般に Manning 公式を用いた河床せん断応力として表わしている。一方、土石流の場合は、砂礫の衝突する角度 α に規制される摩擦力（クーロン摩擦力）と流速の2乗に比例する流体力学的な抵抗力が働くと考え、 x 方向、 y 方向の摩擦抵抗力を、それぞれ(2-3)、(2-4)式で表わす。

$$F_x = SW1 \cdot (\sigma - n\rho)hgCd_x \cos \theta_x \cdot \tan \alpha + k(D/d)u\sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

$$F_y = SW2 \cdot (\sigma - n\rho)hgCd_y \cos \theta_y \cdot \tan \alpha + k(D/d)v\sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

ここで、 σ ; 砂礫の密度、 ρ ; 水の密度、 n ; 微細砂が浮遊することによって生ずる密度の増加係数、 Cd_x, Cd_y ; 土石流中で浮遊せず摩擦抵抗に寄与する粗粒子の容積濃度、 θ_x, θ_y ; x 方向、 y 方向の堆積域の勾配、 D ; 堆積域での粗度高さ、 d ; 砂礫の代表粒径、 α ; 砂礫の衝突条件に基づく角度、 k ; 流体抵抗に関する定数である。また、 $SW1, SW2$ は方向性を持たせる定数であり、1, 0または-1の値をとる。すなわち、抵抗力は流れの向きに対して反対側に働く力であり、方向性を持つものである。それに対して、(2-3)、(2-4)式の右辺の一項目は常に正の値を示し、方向性を持っていない。したがって、 $SW1, SW2$ をそれぞれ、次のように与えることにより方向性を持たせる。

て実
一方、
には
まで、
土砂
用範
区域
ンモ
文良³⁾
験結
た、
例⁴⁾

$$SW 1 = \begin{cases} 1 & (u > 0) \\ 0 & (u = 0) \\ -1 & (u < 0) \end{cases} \quad SW 2 = \begin{cases} 1 & (v > 0) \\ 0 & (v = 0) \\ -1 & (v < 0) \end{cases}$$

なお、水山らのモデル³⁾では、これらが考慮されていない。

(2) 連続式

水および砂礫の連続式は、それぞれ(2-5)、(2-6)式で表わされる。

• 水の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1 - Cd)h\} + (1 - C_*) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

• 砂礫の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} (Cd \cdot h) + C_* \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

ここで、Cd; 土石流に含まれる砂礫の容積濃度、C*; 堆積層の砂礫の容積濃度、z; 河床高、q_x, q_y; x方向、y方向の水のみの単位幅当り流量、q_{Bx}, q_{By}; x方向、y方向の砂礫のみの単位幅当たり流量(流砂量)である。

一方、x方向、y方向の土砂の容積濃度を、それぞれCM, CNとすると、(2-5)、(2-6)式中のq_x, q_y, q_{Bx}, q_{By}は、x方向、y方向の流量M, Nを用いて次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} q_x &= (1 - CM)M \\ q_y &= (1 - CN)N \\ q_{Bx} &= CM \cdot M \\ q_{By} &= CN \cdot N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-7)$$

ここで、(2-7)式の関係(2-5)、(2-6)式に代入することにより、水および砂礫の連続式は、それぞれ(2-8)、(2-9)式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1 - Cd) \cdot h\} + (1 - C_*) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{(1 - CM) \cdot M\} + \frac{\partial}{\partial y} \{(1 - CN) \cdot N\} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Cd \cdot h) + C_* \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (CM \cdot M) + \frac{\partial}{\partial y} (CN \cdot N) = 0 \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

(3) 土砂濃度の算定

土砂濃度を算定するためには、土砂の輸送形態を仮定する必要がある。土砂の輸送形態としては図-2.1に示すように各種考えられるが、ここでは、土石流と土砂流について考慮する。土砂濃度の算定に際しては、まず、土

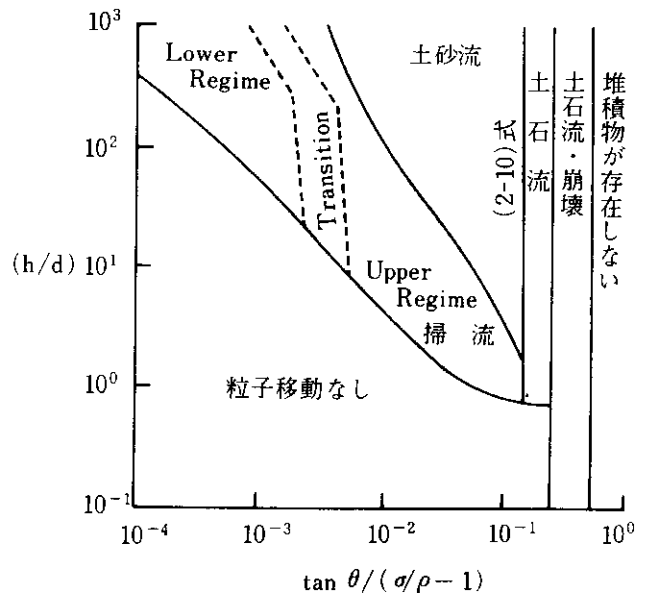


図-2.1 各種輸送形態の発生領域区分

石流と土砂流の領域区分を行う必要があり、その境界となる河床勾配Scを次式により求める。

$$Sc = \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + \lambda^{-1})} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

ここで、λ; 実験定数(λ=0.7~1.0)である。

土石流と土砂流の土砂濃度(x方向とy方向)の算定には、高橋の土石流の(2-11)式⁵⁾、および水山の土砂流の(2-12)式⁶⁾を用いることとする。

• 土石流

$$\text{土砂濃度}(CM \text{ または } CN) = \frac{\tan \theta}{s(\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

• 土砂流

$$\text{土砂濃度}(CM \text{ または } CN) = \frac{C_1 \tan^2 \theta / s^2}{1 + C_1 \tan^2 \theta / s^2} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

ここで、tan θ; 河床勾配、φ; 砂礫の内部摩擦角、C₁; 実験定数(nρが1.0の場合は20、nρが1.0よりも大きい場合は25程度とする)、s; 微細砂による密度の増加を考慮した砂礫の水中比重(s = σ/ρ - 1)である。

なお、土砂濃度の上限値は0.9C*とする。

3. 方程式の差分化と計算方法

基本式の数値解法としては、陽形式な蛙飛び法を採用する⁷⁾。

差分格子および諸量の定義点を図-3.1に示す。また、時間に関する諸量の計算方法は、図-3.2に示すように定義する。

土石流・崩壊
堆積物が存在しない

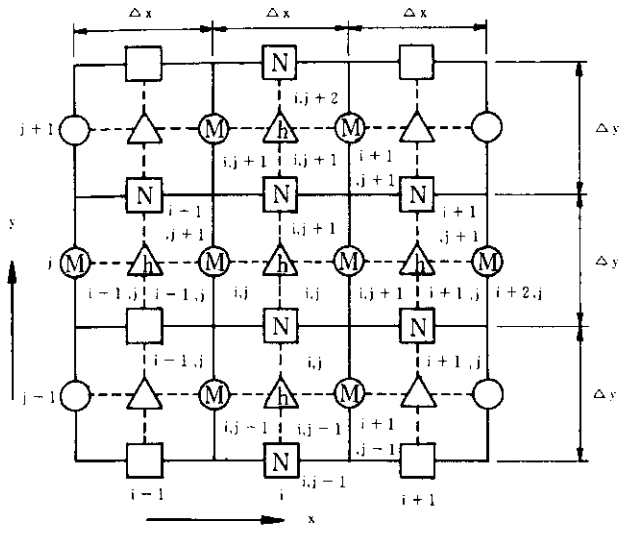


図-3.1 計算格子と諸量の定義点

境界と
0) 算定
砂流

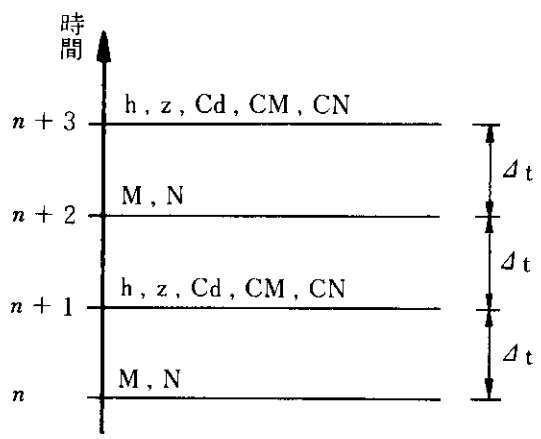


図-3.2 時間に関する定義点

3-1 運動方程式の差分化

(1) M の計算

(2-1) 式の差分化にあたり、移流項については次のように変形しておく。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(M \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(M \cdot v)}{\partial y} &= u \frac{\partial M}{\partial x} + M \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} + M \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= M \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} \dots (3-1) \end{aligned}$$

ここで、二次元の連続式より (3-2) 式が得られ、(3-1) 式に代入すると、移流項は (3-3) 式のように変形される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots (3-2)$$

採用
た、
に定

$$\frac{\partial(M \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(M \cdot v)}{\partial y} = \frac{M}{h} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{h} \frac{\partial M}{\partial y} \dots (3-3)$$

(2-1) 式の各項を、以下のように差分化する。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_{i,j}^{n+2} - M_{i,j}^n}{2\Delta t} \dots (3-4)$$

$$\begin{aligned} A1 &= \frac{\beta M}{h} \frac{\partial M}{\partial x} \\ &= \begin{cases} \frac{2\beta M_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \cdot \frac{M_{i,j}^n - M_{i-1,j}^n}{\Delta x} & (M_{i,j}^n \geq 0) \\ \frac{2\beta M_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \cdot \frac{M_{i+1,j}^n - M_{i,j}^n}{\Delta x} & (M_{i,j}^n < 0) \end{cases} \dots (3-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A2 &= \frac{\beta N}{h} \frac{\partial M}{\partial y} \\ &= \begin{cases} \frac{2\beta N m_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \cdot \frac{M_{i,j}^n - M_{i,j-1}^n}{\Delta y} & (N m_{i,j}^n \geq 0) \\ \frac{2\beta N m_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \cdot \frac{M_{i,j+1}^n - M_{i,j}^n}{\Delta y} & (N m_{i,j}^n < 0) \end{cases} \dots (3-6) \end{aligned}$$

ただし、

$$N m_{i,j}^n = \frac{N_{i-1,j}^n + N_{i-1,j+1}^n + N_{i,j}^n + N_{i,j+1}^n}{4} \dots (3-7)$$

$$A3 = gh \frac{\partial H}{\partial x} = g \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{2} \cdot \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \dots (3-8)$$

ただし、 $H = h + z$

$$\frac{F_x}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} \left\{ SW 1 \cdot (\sigma - n\rho) \cdot g \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{2} \right.$$

$$\left. Cd_x \cos \theta_x \tan \alpha + k (D/d) \cdot \left(\frac{2}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \right)^2 \cdot \frac{M_{i,j}^{n+2} + M_{i,j}^n \cdot \sqrt{(M_{i,j}^n)^2 + (N m_{i,j}^n)^2}}{2} \right\} \dots (3-9)$$

ただし、 $\cos \theta_x = \Delta x / \sqrt{\Delta x^2 + (z_{i,j}^{n+1} - z_{i-1,j}^{n+1})^2}$
(3-3)~(3-9) 式を (2-1) 式に代入し、 $M_{i,j}^{n+2}$ について整理すると次式が得られ、この式が M の計算式となる。

$$\begin{aligned} M_{i,j}^{n+2} &= \frac{1}{1 + (\Delta t / \gamma) A5} \left\{ \left[1 - (\Delta t / \gamma) \cdot A5 \right] M_{i,j}^n \right. \\ &\quad \left. - 2 \Delta t (A1 + A2 + A3 + A4 / \gamma) \right\} \dots (3-10) \end{aligned}$$

ただし、

$$A4 = SW 1 (\sigma - n\rho) g \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{2} Cd_x \cdot \cos \theta_x \cdot \tan \alpha \dots (3-11)$$

$$A5 = k(D/d) \cdot \left(\frac{2}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}} \right)^2 \cdot \sqrt{(M_{i,j}^n)^2 + (Nm_{i,j}^n)^2} \quad (3-12)$$

(2) N の計算

(2-2) 式中の移流項についても、(2-1) 式の場合と同様に、次のように変形する。

$$\frac{\partial(N \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(N \cdot v)}{\partial y} = \frac{M}{h} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{h} \frac{\partial N}{\partial y} \quad (3-13)$$

(2-2) 式の各項を、以下のように差分化する。

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{N_{i,j}^{n+2} - N_{i,j}^n}{2 \Delta t} \quad (3-14)$$

$$B1 = \frac{\beta \cdot M}{h} \frac{\partial N}{\partial x} = \begin{cases} \frac{2 \beta M m_{i,j}^n}{k_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \cdot \frac{N_{i,j}^n - N_{i-1,j}^n}{\Delta x} & (M m_{i,j}^n \geq 0) \\ \frac{2 \beta M m_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \cdot \frac{N_{i+1,j}^n - N_{i,j}^n}{\Delta x} & (M m_{i,j}^n < 0) \end{cases} \quad (3-15)$$

ただし、

$$M m_{i,j}^n = \frac{M_{i,j}^n + M_{i,j-1}^n + M_{i+1,j}^n + M_{i+1,j-1}^n}{4} \quad (3-16)$$

$$B2 = \frac{\beta N}{h} \frac{\partial N}{\partial y} = \begin{cases} \frac{2 \beta N_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \cdot \frac{N_{i,j}^n - N_{i,j-1}^n}{\Delta y} & (N_{i,j}^n \geq 0) \\ \frac{2 \beta N_{i,j}^n}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \cdot \frac{N_{i,j+1}^n - N_{i,j}^n}{\Delta y} & (N_{i,j}^n < 0) \end{cases} \quad (3-17)$$

$$B3 = gh \frac{\partial H}{\partial y} = g \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{2} \cdot \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} \quad (3-18)$$

$$\frac{F_y}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} \left\{ SW 2(\sigma - n\rho) g \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{2} C_d y \cos \theta_y \cdot \tan \alpha + k(D/d) \cdot \left(\frac{2}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \right)^2 \cdot \frac{N_{i,j}^{n+2} + N_{i,j}^n}{2} \sqrt{(M m_{i,j}^n)^2 + (N_{i,j}^n)^2} \right\} \quad (3-19)$$

ただし、 $\cos \theta_y = \Delta y / \sqrt{\Delta y^2 + (z_{i,j}^{n+1} - z_{i,j-1}^{n+1})^2}$

(3-13)~(3-19) 式を (2-2) 式に代入し、 $N_{i,j}^{n+2}$ について整理すると次式が得られ、この式が N の計算式となる。

$$N_{i,j}^{n+2} = \frac{1}{1 + (\Delta t / \gamma) B5} \{ |1 - (\Delta t / \gamma) B5| N_{i,j}^n - 2 \Delta t (B1 + B2 + B3 + B4 / \gamma) \} \quad (3-20)$$

ただし、

$$B4 = SW 2(\sigma - n\rho) g \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{2} C_d y \cdot \cos \theta_y \cdot \tan \alpha \quad (3-21)$$

$$B5 = k(D/d) \left(\frac{2}{h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}} \right)^2 \cdot \sqrt{(M m_{i,j}^n)^2 + (N_{i,j}^n)^2} \quad (3-22)$$

なお、(3-9) 式中の Cd_x 、(3-19) 式中の Cd_y の算出法については後述する。

3-2 連続式の差分化

水の連続式 (2-8) 式は、次のように差分化する。

$$\begin{aligned} & \frac{(1 - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot h_{i,j}^{n+3} - (1 - Cd_{i,j}^{n-1}) \cdot h_{i,j}^{n+1}}{2 \Delta t} \\ & + (1 - C_*) \frac{z_{i,j}^{n+3} - z_{i,j}^{n+1}}{2 \Delta t} \\ & + \frac{(1 - CM_{i+1,j}) \cdot M_{i+1,j}^{n+2} - (1 - CM_{i,j}) \cdot M_{i,j}^{n+2}}{\Delta x} \\ & + \frac{(1 - CN_{i,j+1}) \cdot N_{i,j+1}^{n+2} - (1 - CN_{i,j}) \cdot N_{i,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (3-23)$$

砂礫の連続式 (2-9) 式は、次のように差分化する。

$$\begin{aligned} & \frac{Cd_{i,j}^{n+1} \cdot h_{i,j}^{n+3} - Cd_{i,j}^{n-1} \cdot h_{i,j}^{n+1}}{2 \Delta t} + C_* \frac{z_{i,j}^{n+3} - z_{i,j}^{n+1}}{2 \Delta t} \\ & + \frac{CM_{i+1,j} \cdot M_{i+1,j}^{n+2} - CM_{i,j} \cdot M_{i,j}^{n+2}}{\Delta x} \\ & + \frac{CN_{i,j+1} \cdot N_{i,j+1}^{n+2} - CN_{i,j} \cdot N_{i,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (3-24)$$

ここでの未知量は $h_{i,j}^{n+3}$ と $z_{i,j}^{n+3}$ であり、(3-23)、(3-24) 式の両式に含まれている。そこで、(3-23) 式と (3-24) 式を連立させて $h_{i,j}^{n+3}$ を消去し、 $z_{i,j}^{n+3}$ について解くと次式が得られる。

$$\begin{aligned} z_{i,j}^{n+3} = & z_{i,j}^{n+1} + \{ (Cd_{i,j}^{n-1} - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot h_{i,j}^{n+1} \\ & + \frac{2 \Delta t}{\Delta x} \{ (CM_{i,j} - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot M_{i,j}^{n+2} - (CM_{i+1,j} \\ & - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot M_{i+1,j}^{n+2} \} + \frac{2 \Delta t}{\Delta y} \{ (CN_{i,j} - Cd_{i,j}^{n+1}) \\ & \cdot N_{i,j}^{n+2} - (CN_{i,j+1} - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot N_{i,j+1}^{n+2} \} / \\ & (C_* - Cd_{i,j}^{n+1}) \} \quad (3-25) \end{aligned}$$

流動深 $h_{i,j}^{n+3}$ についても上記と同様に整理された次式により求められる。

3-3
本
とし
うに
シ
は、
い場
加重
によ
流出
を補
なる
おか
とと
各
(1
土
の
(2-
も不
示す
(2-
(:
tan

$$h_{i,j}^{n+3} = \left[(C_* - Cd_{i,j}^{n+1}) \cdot h_{i,j}^{n+1} + \frac{2 \Delta t}{\Delta x} \{ (C_* - CM_{i,j}) \cdot M_{i,j}^{n+2} - (C_* - CM_{i+1,j}) \cdot M_{i+1,j}^{n+2} \} + \frac{2 \Delta t}{\Delta y} \{ (C_* - CN_{i,j}) \cdot N_{i,j}^{n+2} - (C_* - CN_{i,j+1}) \cdot N_{i,j+1}^{n+2} \} \right] / (C_* - Cd_{i,j}^{n+1}) \dots (3-26)$$

3-3 基盤高を考慮した土砂濃度の計算法

本モデルでは、岩床や人口的な非侵食面を基盤データとして組み込み、河床高がその高さ以下には低下しないように土砂濃度の補正を行っている。すなわち、あるメッシュ内の河床高 z の計算値が基盤高 z_0 よりも低くなるのは、メッシュからの流出土砂量が実際の現象よりも大きい場合、また、土石流として存在する土砂の時間的な増加量が大きい場合であり、これらの量を小さくすることによって河床低下を制御できると考える。したがって、流出する方向の土砂濃度およびメッシュ内の土石流濃度を補正（小さく）すればよく、本モデルでは $z < z_0$ となる可能性が高いと判断されたときに前者を補正し、なおかつ、 $z < z_0$ と計算された場合には後者を補正することとした。

各土砂濃度の計算法および補正の方法を以下に述べる。

(1) 各メッシュの流入・流出土砂濃度 (CM, CN) の計算

土砂濃度の計算は、土石流の (2-11) 式および土砂流の (2-12) 式を用いて行う。なお、図-3.3 に示すように、(2-11) 式と (2-12) 式の関係が不連続であると計算上も不都合が生じると考えられる。したがって、図-3.3 に示す a の点で (2-11) 式と (2-12) 式が一致するように、(2-12) 式中の定数 $C1$ を逆算して与えることとする。

(2-11) 式および (2-12) 式はどちらも河床勾配 $S (= \tan \theta)$ から濃度が求められる式であり、 x 方向、 y 方向

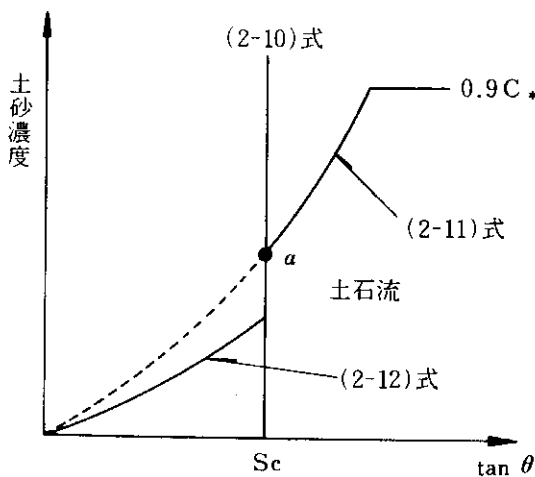


図-3.3 土砂濃度と勾配の関係

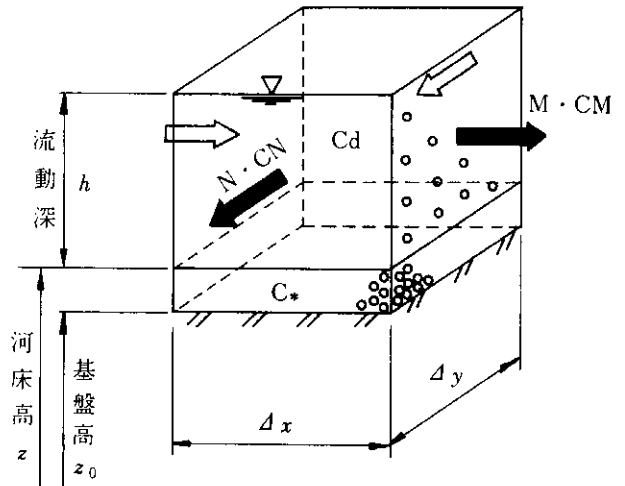


図-3.4 メッシュ内の土砂の分布

の河床勾配 S_x, S_y は次式により算出する。

$$S_{x,i,j} = \left| \frac{z_{i,j}^{n+1} - z_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right| \dots (3-27)$$

$$S_{y,i,j} = \left| \frac{z_{i,j}^{n+1} - z_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} \right| \dots (3-28)$$

x 方向土砂濃度 $CM_{i,j}$ は、(2-10) 式から得られる勾配 S_c と $S_{x,i,j}$ の比較により、 $S_c \leq S_{x,i,j}$ の場合は (2-11) 式から、 $S_c > S_{x,i,j}$ の場合は (2-12) 式から求められる。

ただし、 $M_{i,j}$ の符号と $(z_{i,j}^{n+1} - z_{i-1,j}^{n+1})$ の符号が異なる場合は $CM_{i,j} = 0$ とする。

y 方向土砂濃度 $CN_{i,j}$ の計算も $CM_{i,j}$ の場合と同様である。

全格子で CM, CN が求められた後に、基盤高を考慮した土砂濃度の補正の必要性を判断する。メッシュ内の土砂の分布は図-3.4 に示すとおりであり、メッシュから流出する総土砂量 V_{Bout} とメッシュ内に存在する土砂量 V_B を比較して前者が大きい場合にのみ補正する。また、補正するのは流出する方向の土砂濃度のみであり、次のように行う。

$$\text{土砂濃度}(CM \text{ または } CN) = (CM \text{ または } CN) \cdot V_B / V_{Bout} \dots (3-29)$$

なお、 V_B は次式で計算される。

$$V_B = \{ (z_{i,j}^{n+1} - z_{0,i,j}) \cdot C_* + h_{i,j}^{n+1} \cdot Cd_{i,j}^{n+1} \} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \dots (3-30)$$

(2) メッシュ内の土砂濃度 Cd の計算

メッシュ内の土砂濃度は、メッシュに出入りする土石流とすでにメッシュに存在する土石流の濃度の平均値として次式で与える。

$$Cd_{i,j}^{n+1} = \{ |M_{i,j}^{n+2}| \cdot CM_{i,j} / \Delta x + |M_{i+1,j}^{n+2}| \cdot CM_{i+1,j} / \Delta x + |N_{i,j}^{n+2}| \cdot CN_{i,j} / \Delta y \}$$

$$\begin{aligned}
& + |N_{i,j+1}^{n+2}| \cdot |CN_{i,j+1}/\Delta y| \cdot 2 \Delta t + h_{i,j}^{n+1} \\
& \cdot Cd_{i,j}^{n+1} / \{ |M_{i,j}^{n+2}|/\Delta x + |M_{i+1,j}^{n+2}|/\Delta x \\
& + |N_{i,j}^{n+2}|/\Delta y + |N_{i,j+1}^{n+2}|/\Delta y \} \cdot 2 \Delta t \\
& + h_{i,j}^{n+1} \} \dots\dots\dots (3-31)
\end{aligned}$$

なお、上記の平均値操作は水山ら⁴⁾によって提案された方法であるが、理論的根拠にとぼしい点は今後の課題である。また、 $Cd_{i,j}^{n+1}$ が高濃度であると(3-25)式によって計算される河床高 z が基盤高 z_0 よりも低くなる可能性が生ずる。この場合には $Cd_{i,j}^{n+1}$ を補正する必要があり、(3-25)式中の $z_{i,j}^{n+3}$ を $z_{0,i,j}$ に置き換え、 $Cd_{i,j}^{n+1}$ について解いた次式で計算しなおす。

$$\begin{aligned}
Cd_{i,j}^{n+1} = & \left\{ \frac{2 \Delta t}{\Delta x} (CM_{i,j} \cdot M_{i,j}^{n+2} - CM_{i+1,j} \cdot M_{i+1,j}^{n+2}) \right. \\
& + \frac{2 \Delta t}{\Delta y} (CN_{i,j} \cdot N_{i,j}^{n+2} - CN_{i,j+1} \cdot N_{i,j+1}^{n+2}) \\
& \left. + h_{i,j}^{n+1} \cdot Cd_{i,j}^{n-1} + (z_{i,j}^{n+1} - z_{0,i,j}) \cdot C_* \right\} / \\
& \left\{ \frac{2 \Delta t}{\Delta x} (M_{i,j}^{n+2} - M_{i+1,j}^{n+2}) + \frac{2 \Delta t}{\Delta y} (N_{i,j}^{n+2} \right. \\
& \left. - N_{i,j+1}^{n+2}) + h_{i,j}^{n+1} + (z_{i,j}^{n+1} - z_{0,i,j}) \right\} \\
& \dots\dots\dots (3-32)
\end{aligned}$$

なお、上記の補正後には $z_{i,j}^{n+3} = z_{0,i,j}$ と設定する必要がある。

(3) ケーロン摩擦力項の土砂濃度の計算

(3-9) 式中の Cd_x および (3-19) 式中の Cd_y は、次のように与える。

$$\begin{aligned}
C'd_{x,i,j} &= \frac{1}{2} (Cd_{i,j}^{n-1} + Cd_{i-1,j}^{n-1}) \\
C'd_{y,i,j} &= \frac{1}{2} (Cd_{i,j}^{n-1} + Cd_{i,j-1}^{n-1}) \dots\dots (3-33)
\end{aligned}$$

また、微細砂の浮遊による水の密度($n\rho$)の増加を考慮して、次式により補正する。

$$Cd_{x,i,j} = \frac{C'd_{x,i,j} \cdot (\sigma - \rho) + \rho - n\rho}{(\sigma - n\rho)} \dots\dots (3-34)$$

$Cd_{y,i,j}$ についても同様である。

3-4 初期条件および境界条件

(1) 初期条件

初期条件として、河床高(地盤高) z と基盤高 z_0 は与えられるものとする。すなわち、 $z - z_0$ が侵食可能深となり、 $z = z_0$ の場合には堆積のみが許される。この条件設定は、人工的な構造物の影響をも把握するためである。

初期の流動深および流量については、全計算格子点で0を与える。

(2) 流入・流出個所の境界条件

流入個所の境界では、各時間ごとの流入流量と土砂濃

度をそれぞれ与える。したがって、流入量を時間的に変化するハイドログラフとして与えることができ、また、土砂濃度も任意に設定できることから、水のみが流入してくる場合にも適用可能である。

流出個所の境界についても、流出流量と土砂濃度を与えることになるが、実際には流出する位置、時間、量など不明な点が多い。したがって、ここでは境界のメッシュ内に流入してきたものがすべて流出するとして与えることとする。

(3) 移動境界(計算点と非計算点の判断)

土砂が流下するに従って、非計算点であったところが計算点になることもある。したがって、計算点か非計算点かの判断を次のようにして行う。

- ① 流量計算点の両隣の格子で、流動深 $h > \epsilon$ の場合は計算点
- ② 流量計算点の両隣の格子で、流動深 $h < \epsilon$ の場合は非計算点
- ③ 流量計算点のどちらか一方の格子だけが $h > \epsilon$ で、かつ $h > \epsilon$ 側の $H (= h + z)$ が他の点の $H (= z)$ よりも大きい場合に計算点とし、他の場合は非計算点とする。

ここで、 ϵ は移動境界の位置を判定するための水深であり、 $\epsilon = 0.1 \text{ mm}$ 程度を設定した。

3-5 計算手順

計算手順は蛙飛び法に基づき、初めに $t = t + \Delta t$ の時点で M, N の計算を行い、次の時間ステップ($t = t + 2 \Delta t$)で z と h を計算する。また、このとき、基盤高の制約条件を考慮する。さらに次の時間ステップでは元の M, N の計算に戻るように、繰返し計算を進める。計算のフローを図-3.5に示す。

4. 水路実験への適用

河川研究室では、溪間の拡幅部や遊砂地などに設けられた床固工群(低ダム群)の機能・効果を把握するため、水路実験を実施してきた¹⁾。これらの実験は、砂防施設としては比較的河床勾配の緩い場(1/10~1/30)を対象として行われたものであり、土砂流から掃流で移動していると思われるケースを含んでいる。一方、土石流氾濫シミュレーションモデルは、土石流の運動をモデル化したものであり、勾配が緩くしかも掃流に近い土砂移動問題に適用可能であるかどうかの検討が必要である。本報告では、数多く行われた実験の内、代表的なケースに本モデルを適用し、実験結果と計算結果の比較により、モデルの再現性を確認する。また、これらの結果から、本モデルの適用にあたっての問題点を整理することとした。

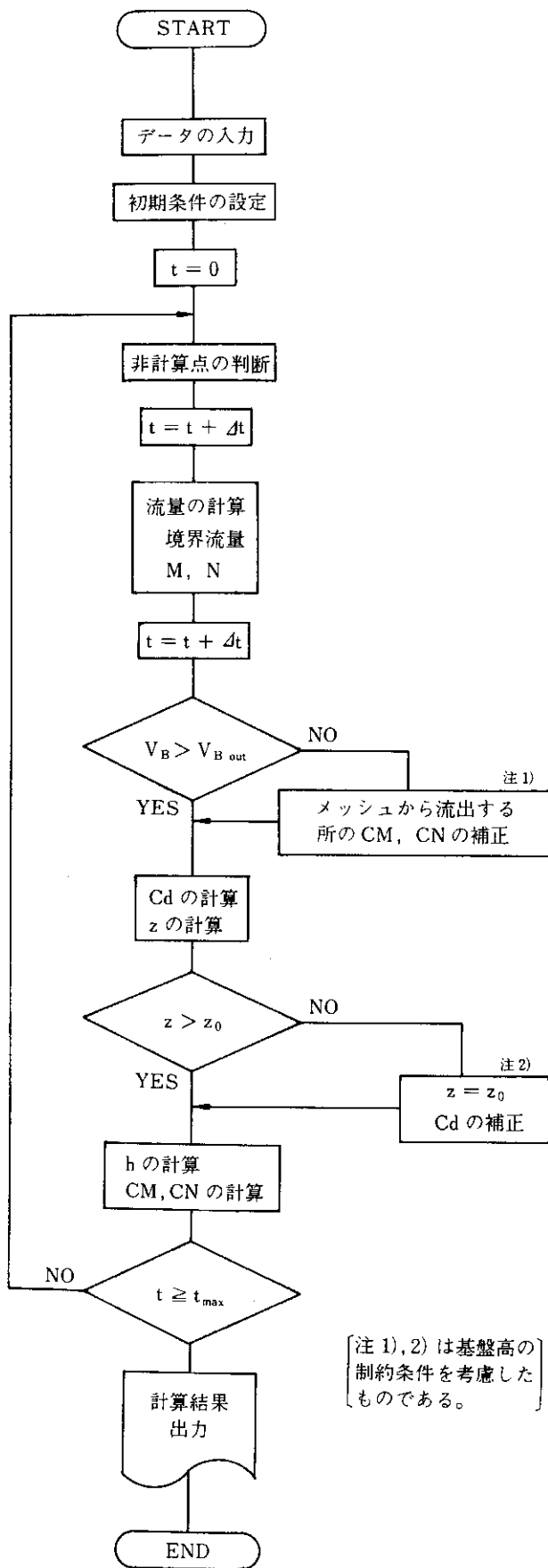


図-3.5 計算フロー

4-1 実験概要

水路実験は、溪間の拡幅部をイメージし、拡幅と河床勾配の変化によって生ずる堆積現象と、そこに設けられた床固工群の効果を把握するために行ったものであり、水路概要は図-4.1に示すとおりである。

実験では、上流端から三角波形（通水時間 300 秒、ピーク時間 100 秒、ピーク流量 3.0 l/s）で水のみを流し、上流水路に敷均した砂を供給砂として拡幅部における堆積状況を観測した。また、下流端から流出する土砂量についても測定している。

なお、実験に使用した移動床砂は、最小粒径 0.1 mm、最大粒径 10.0 mm、平均粒径 1.4 mm の混合砂である。

4-2 モデルパラメータの設定

本報告に示すようなモデルで再現または予測計算を行う場合には、まず、適正なモデルパラメータの設定が必要である。本モデルで用いているパラメータとしては、 $n\rho$, σ , $\tan \phi$, $\tan \alpha$, β , k , γ , D/d と数多くあり、すべてを適正に設定することは非常にむずかしい。すなわち、本モデルのパラメータの設定においては、推定しなければならない点も多く、本モデル適用にあたっての問題点の 1 つでもある。

本報告では、これらのモデルパラメータを以下のように設定した。

$n\rho$ は、微細砂の浮遊による密度の増加を考慮した水の密度である。本実験では、移動床砂を数回の実験に使用しており、十分に水洗いがされていることから、微細砂の浮遊はほとんどないと考えられる。したがって、 $n\rho = 1.0$ と設定する。

σ は砂礫の密度であり、移動床砂の土質試験の結果から $\sigma = 2.65$ と設定する。

$\tan \phi$ は砂礫の内部摩擦角であり、移動床砂の物理試験の結果から、 $\tan \phi = 0.6$ と設定する。また、砂礫の衝突条件に基づく角度 $\tan \alpha$ も $\tan \phi$ と同値とする⁸⁾。

β は運動量補正係数であり、一般に土石流（ゲイラタント流体）の場合は 1.25 程度になる⁸⁾。しかしながら、本実験では土砂流から掃流に近い流れをしており、正確な値が不明であることから、本報告では、 $\beta = 1.0$ と設定した。

k は流体抵抗に関する定数であり、水山らの研究結果³⁾に基づき $k = 0.05$ と設定した。

γ は土石流の密度であり、土砂濃度の算定式を用いて推定すると、本実験では $\gamma = 1.1 \sim 1.2$ 程度が妥当と考えられる。しかしながら、本報告では土砂濃度を 2 倍程度にした計算も行っている（詳細については後述することから、若干大きめの値を用いるべきである。また、

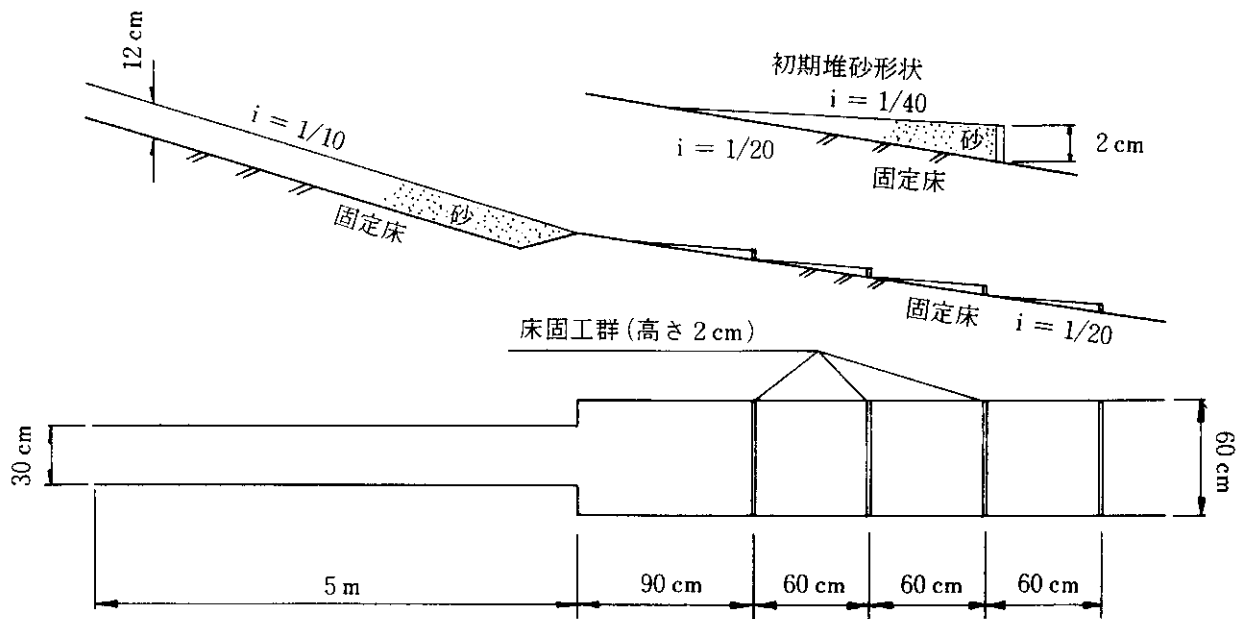


図-4.1 実験水路概要図

$\gamma = 1.2$ で実際に計算を行ったが、実験結果と比較して土砂の移動範囲が小さく、上流側に多く堆積する結果となった。この差異は、流体抵抗力が実際よりも大きく計算されたことに起因するものと考えられる。本モデルにおける流体抵抗力は、運動方程式 (2-1), (2-2) 式中の右辺第 2 項で表現されており、それぞれ (2-3), (2-4) 式に示すように、砂礫の衝突条件に基づく摩擦力 (クーロン摩擦力) と流体力学的な抵抗力が考慮されている。ここで、本実験のように掃流に近い流れに対してクーロン摩擦力を考慮することには疑問が残る。なお、これについては詳細な検討が必要であり、今後の検討課題とする。そこで、本報告では γ を大きくすることによって抵抗力を小さくすることとし、実験での流体の移動速度に近くなるよう、 $\gamma = 1.6$ と設定した。

D/d は堆積域での粗度高さと砂礫の代表粒径の比であり、 $D = d$ と考えて $D/d = 1.0$ と設定した。

土砂濃度については、(2-10), (2-11) 式により求められるが、水山らの研究³⁾によると 2 倍した値を用いることによって良好な結果が得られるようである。本報告では、上記の確認も含めて、土砂濃度を 1.0, 1.7, 2.0, 2.4 倍した場合について、それぞれ計算することとした (以下、土砂濃度の倍率を表わすパラメータとして P を用いる)。

本モデルにより計算する場合には、平面的な距離および時間に関する差分幅 (刻み幅) を決めなければならない。本報告では、 x 方向および y 方向の距離に関する差分幅 Δx , Δy をどちらも 0.075 m と設定した。また、時間に関する差分幅 Δt については、水山らによって提案さ

れた次式の安定条件⁴⁾を十分に満足するように $\Delta t = 0.015$ 秒と設定した。

$$\Delta x / \Delta t > |U| + \sqrt{gh} \dots\dots\dots (4-1)$$

ここで、 U は流速である。

4-3 実験結果と計算結果の比較

実験結果と計算結果の比較は、次のように行うこととする。堆砂形状については、平均河床縦断面形および横断面形の比較とする。なお、水路実験では通水中の測定を行っていないことから、通水後の堆積形状について比較する。また、通水中の土砂移動については、下流端からの流出土砂量の比較により行うこととした。

縦断面形について実験値と計算値を図-4.2 に示す。また、横断面形については、 $P = 1.0$ および $P = 2.0$ で計算した結果と実験値を図-4.3 に示す。なお、横断の位置は図-4.2 (a), (c) に示す $a \sim d$ の断面である。

縦断面形について実験値と $P = 1.0 \sim 2.4$ で計算した結果を、それぞれ図-4.2 により比較すると次のようである。 $P = 1.0$ の計算結果については、堆積が進んでいる状態で計算が終了したものであり、実験値と比較して全体的に堆積高が低くなっている。また、実験値に見られる拡幅部下流での盛上がるような堆積が表現されていない。 $P = 1.7$ および $P = 2.0$ の計算結果については、堆積がほぼピークに達した状態で計算が終了したものであり、実験値を比較的良く再現しているといえる。ただし、このケースについても、盛上がるような堆積については、良好には再現されていない。 $P = 2.4$ の計算結果については、上流側の河床砂が大量に下流に流されることによって少なくなり、堆積傾向にあったものが途中から洗掘

60 cm
0.015
-1)
ことと
横断
を
比較す
からの
また、
算した
図-4.2
た結
である。
状態
具体的
る拡
い。
積が
り、
こ
は、
つい
によ
洗掘

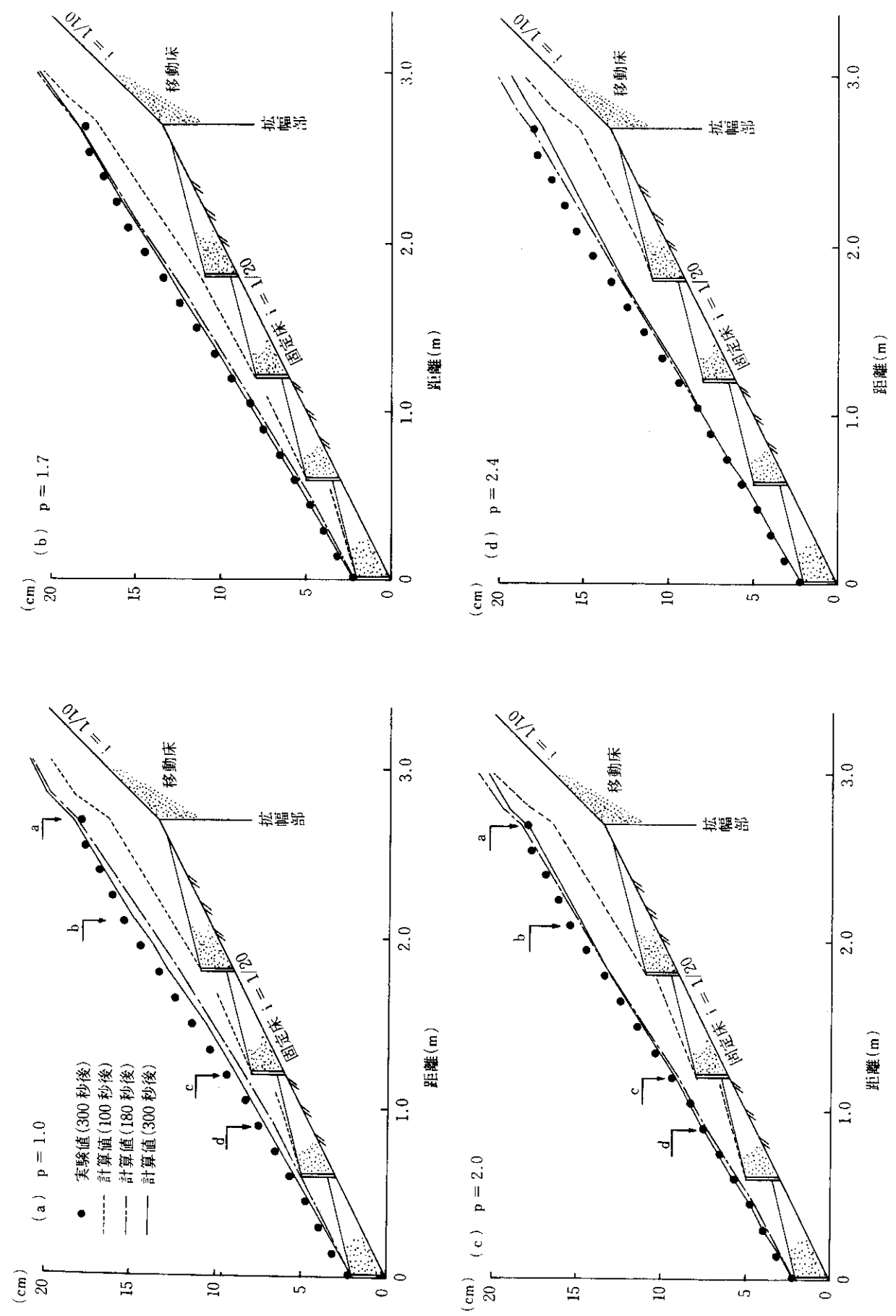


図-4.2 平均河床高縦断面図

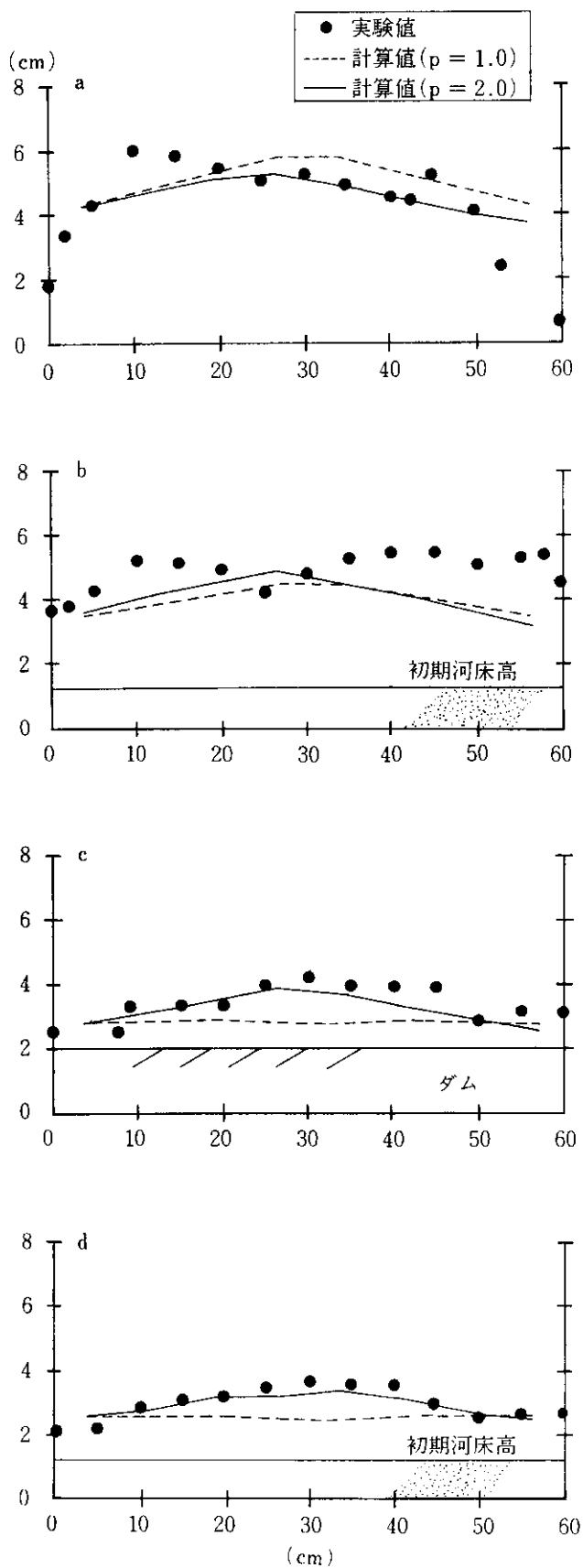


図-4.3 最終堆積高横断面

傾向に変化している。このため、拡幅部下流での堆積高は実験値と比較してかなり低くなっている。以上、縦断形の比較からは、 $P = 1.7 \sim 2.0$ で計算することによって、実験値を比較的良く再現できるといえる。このことは、既往の研究成果³⁾ともほぼ一致することである。

横断形については、図-4.3により実験値と $P = 1.0$ および $P = 2.0$ で計算した結果を比較する。拡幅部の断面(断面 a)では、 $P = 1.0$ および $P = 2.0$ ともに実験値に近い値を示しているが、水路センターより側壁寄りの堆積が再現されていない。特に断面 b においてはそれが顕著であり、結果として堆積高が実験値よりも低くなっている。この差異は縦断形の比較でも現われたように、拡幅部下流での盛上がるような堆積が再現されていないことの原因の一つであると考えられる。下流の断面(断面 c, d)で見ると、 $P = 2.0$ の計算では水路センターで盛上がっている様子など実験値を良好に再現しているといえる。それに対して、 $P = 1.0$ の計算では横断的にほぼ水平に堆積しており、また、堆積高も実験値より低くなっている。したがって、拡幅部下流で実験とは異なる現象が見られるものの、横断形の比較からも $P = 2.0$ 程度で計算した方が優位であるといえる。

以上、最終的な堆積形状により、モデルの再現性を検討したが、通水中の土砂移動についても比較検討が必要である。そこで、水路下流端から流出した土砂量を時間ごとに整理した結果を表-4.1に示す。流出土砂量について、実験値と計算値をそれぞれ比較すると、 $P = 1.0$ で計算した場合が実験値に最も近くなっている。また、計算による堆砂量が実験値よりも少ない(図-4.2(a)参照)ことを考えると、下流端からの流出土砂量が実験値より大きくなっていることも理解できる。それに対して、 $P = 1.7$ 以上で計算した場合については、堆砂量は実験値に近くなっているにもかかわらず、下流端からの流出土砂量は実験値の 3 ~ 5 倍程度になっている。すなわち、全体的な土砂の移動量については、 $P = 1.0$ で計算した

表-4.1 流出土砂量

(単位千 cm)

時間(秒)	実験値	計 算 値			
		$P = 1.0$	$P = 1.7$	$P = 2.0$	$P = 2.4$
0 ~ 60	0.2	0.2	0	0	0
60 ~ 120	2.3	1.4	3.9	2.6	1.6
120 ~ 180	4.2	4.2	13.5	17.9	23.1
180 ~ 240	2.2	4.2	10.0	12.6	17.4
240 ~ 300	0.4	2.1	4.9	6.3	8.6
総 量	9.3	12.1	32.3	39.4	50.7

場合
し
て、
して
以
を良
んら
らの
モデ
4-4
前
きな
点に
①
では
に対
横断
②
上が
直上
上
砂濃
べる
える
①
して
の土
って
に示
0と
した

堆積高
縦断
よって、
は、
1.0 お
の断面
値
予りの
それが
く
うに、
ない
（断
ター
いる
的に
り低
異な
= 2.0
を検
が必要
と時間
につい
1.0 で
、計
参照）
直より
、 P
値
出土
ち、
ました

F: cmf)
= 2.4
0
1.6
3.1
7.4
8.6
0.7

場合に実験を良好に再現しているといえる。

したがって、単に堆積形状の再現性が良いからといって、既往研究³⁾で報告されているように土砂濃度を2倍して計算することには疑問が残る。

以上の比較検討の結果、現状のモデルではすべての面を良好に再現することは不可能であり、本モデル中になんらかの問題点があると考えられる。したがって、これらの問題点を抽出・整理してその原因を明らかにし、本モデルを改良していくことが必要であろう。

4-4 本モデルの問題点

前述の実験値と計算値の比較から、本モデルで再現できなかった現象、また、実験とは異なった現象を示した点について整理すると、次の2点があげられる。

① 拡幅部下流の断面では図-4.4に示すように、実験では水路センターより側壁寄りの堆積が卓越しているのに対して、計算では水路センターの堆積が多く、また、横断方向に対してほぼ一様勾配で下がっている。

② 拡幅部の縦断形をみると、実験では拡幅部下流で盛上がるように堆積しているのに対して、計算では拡幅部直上流で多く堆積している。

上記の相違が生じた大きな要因として、本モデルの土砂濃度算定上の問題があげられる。以下にその理由を述べるとともに、それらの解決法について若干の考察を加えることとする。

①の側壁寄りの堆積が本モデルで再現できない現因として、次のことが考えられる。まず第一に、本モデルでの土砂濃度が、流下方向および横断方向の河床勾配によって、それぞれ算定されることにある。すなわち、図-4.5に示すように横断方向の河床勾配は最初0であり、 $CN = 0$ として計算されてしまう。また、水路センターに堆積したときには横断方向にも勾配が生じるが、流下方向の

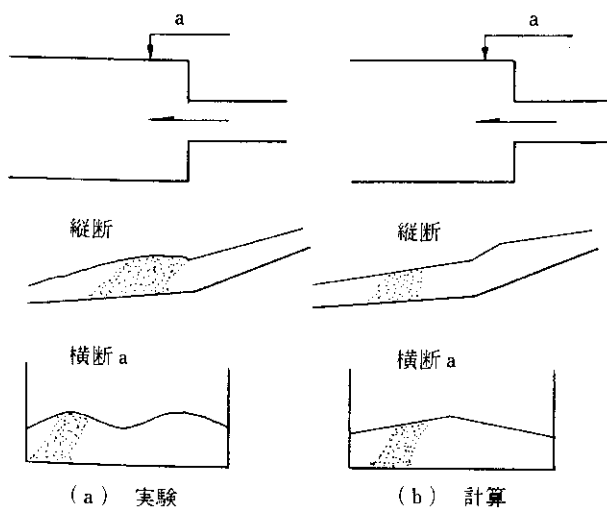


図-4.4 拡幅部での堆積

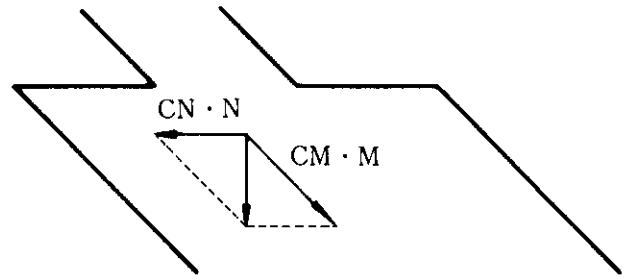


図-4.5 拡幅部の土砂移動

勾配と比較して小さく、 CN も CM より小さな値で計算されるので、側壁寄りの堆積量が少なくなる。第二として、本モデルでは、流れの向きに対して河床が逆勾配である場合には濃度を0として計算することにある。すなわち、拡幅部において水路センターより側壁寄りに高く堆積することは、計算上ほとんどあり得ないことになる。そこで、実際の土砂移動状況を考えると、同一の地点においては CN と CM がほぼ等しく、 x 方向と y 方向の流砂量の違いは N と M の違いに大きく支配されているものと思われる。したがって、土砂濃度については、 x 方向、 y 方向のそれぞれについて与えるのではなく、各地点ごとの濃度として与えるのが妥当であろう。また、これによって、側壁寄りの堆積が表現できるものと考えている。

②に示す縦断的な堆積位置の相違は、土砂濃度を河床勾配の関数とし表わした式に、起因していると考えられる。すなわち、本モデルでは河床勾配の変化点で急に土砂濃度が小さくなるため、上流側の堆積も多くなる。しかしながら、実際には上流からの流れに勢いがあるため、勾配の変化点よりも下流の地点まで高濃度で流れているようである。つまり、土砂濃度は、地形的な条件、流れの状態、濃度の連続条件によって決まるものであり、本モデルでの濃度の算定法では、上記の条件が考慮されていない。したがって、これらを考慮した濃度の算定法をモデルに取入れることが必要となる。

上述してきたように、本モデルは河床勾配の変化に対して実際よりも敏感に反応し、横断方向の拡がりに対して応答が鈍いモデルといえる。しかしながら、土砂濃度算定式の改良を加えることによって、土砂流から掃流に近い土砂移動問題や拡幅部などの堆積・洗掘問題に対しても今後の活用が十分に期待できる。

5. おわりに

土石流氾濫シミュレーションモデルは土石流の運動をモデル化したものであり、掃流に近い土砂移動問題への適用検討が残されていた。本報告では、土砂流から掃流

に近い流れを対象とした床固工群の水路実験に本モデルを適用し、実験結果と計算結果の比較によりモデルの再現性を確認した。結果を要約して以下に示す。

- ① 現状のモデルでは、拡幅部における土砂の分散・堆積を良好に再現できない。
- ② 河床勾配の変化に対して、実際の現象よりも敏感に反応してしまう。

また、上記の相違が生じた大きな要因としては、本モデルの土砂濃度算定上の問題があげられ、これらの改良案について検討した結果を含めて以下に示す。

① 土砂濃度が流下方向と横断方向の河床勾配によって、それぞれ算定されるために、横断方向の土砂濃度が実際よりも小さく計算されてしまう。すなわち、横断方向の分散・堆積が表現できない。したがって、土砂濃度については方向によって分けるのではなく、各地点の濃度として算定した方が妥当である。

② 土砂濃度を河床勾配の関数として表わしているため、河床勾配の変化に対して、実際よりも敏感に反応してしまう。つまり、土砂濃度は地形的な条件、流れの状態、濃度の連続条件によって決まるものであり、本モデルでは上記の条件が考慮されていない。したがって、これらを考慮した濃度の算定法をモデルに取り入れることが必要となる。

以上、本モデルの適用検討の結果、土砂濃度算定式の改良を加えることによって、本モデルの今後の活用が期待できる。なお、改良モデルの開発については、今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 福田義昭, 星 清, 工藤 喬; 砂防施設(低ダム群)に関する実験(第2報), 第28回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1985.
- 2) 福田義昭, 清水康行; 低ダム群設置による河床変動計算について(第2報), 昭和62年度砂防学会研究発表会概要集, 1987.
- 3) 下東久巳, 水山高久, 井戸清雄; 土石流氾濫シミュレーション, 昭和60年度砂防学会研究発表会概要集, 1985.
- 4) 水山高久, 北原一平, 原 義文; 土石流氾濫シミュレーションモデルによる土石流対策工の効果評価, 新砂防, Vol. 40, No. 5, 1988.
- 5) 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, 第25号B-2, 1982.
- 6) 水山高久; 土石流から掃流に変化する勾配での流砂量, 新砂防, 116, 1983.
- 7) 水理公式集, 昭和46年改訂版, p.p. 185, 土木学会1971.
- 8) 高橋 保; 土石流の力学的機構, 水工学シリーズ80-A-1, 土木学会水理委員会, 1980.