

数値シミュレーションの紹介～その2

数値解析技術研究会

1. はじめに

流れや土砂移動現象には、1次元から3次元まで様々な数値解析手法が考案されている。現在までに砂防・地すべり技術センターでは、土石流、泥流、火砕流、溶岩流の到達時間および氾濫範囲の予測を目的とした2次元氾濫シミュレーションソフト (J-SAS) を開発している。2次元の数値解析手法は土砂の面的な移動を予測するのに適しているが、河道に沿った縦断的な土砂移動現象を時間的に追跡するには1次元河床変動計算手法の方が有利になる場合もある。

しかし、実際の河川には、湾曲、河幅の変化、支川の流入および構造物などの2次元的な要素が多数含まれており、1次元河床変動計算手法においてもこれらの2次元的な影響も考慮する必要がある。

本研究は、これらの2次元的な要素を取り込んだ1次元河床変動手法の開発を目的としている。本報告は、MacCormack法を用いた1次元河床変動計算の特徴および湾曲河川における1次元河床変動計算の適用性について記述し、河道幅変化に伴う側壁の影響や支川流入が本川の流れに与える影響、さらにスリット砂防ダムの土砂調節機能について検討した結果を事例や実験を通して紹介する。

2. 基礎式と差分法

自然の河道は河幅や河床勾配の変化が大きい。また、河道には砂防構造物も建設されていることが多く、常流と射流が混在する。流れの計算は常流区間では下流側から、射流区間は上流側からというように場合分けして行うのが流れの性質上適切であるが、計算区間に境界が明瞭ではない常流と射流の変化点が複数箇所含まれている場では、このような場合分け計算は難しくなる。MacCormack法による1次元河床変動計算手法では、方程式を保存形 (conservative form) で表現し、弱解として扱うこ

とで、常流と射流が混在するような不連続な水面形を場合分けすることなしに表現できることが知られている。

基礎式

保存形の連続式

$$\left. \begin{array}{l} \text{水} \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_* \\ \text{土砂} \\ \frac{\partial (z_B \cdot B)}{\partial t} + \frac{\partial (q_B \cdot B)}{\partial x (1-\lambda)} = q_{BS} \end{array} \right\} \dots\dots \text{式(1)}$$

保存形の運動方程式

$$\begin{array}{l} \text{水} \\ \frac{\partial}{\partial t} (Au) + \frac{\partial}{\partial x} (Qu + \frac{1}{2} gh^2 B) = q_* w' \cos \theta + gA (i - i_e) \end{array} \dots\dots \text{式(2)}$$

ここに、

- A: 通水断面、u: 本川流速、Q: 本川流量、
- g: 重力加速度、h: 水深、B: 川幅、
- z_B: 河床位、λ: 空隙率、q_B: 掃流砂量、
- q_{BS}: 単位長さあたりの支川からの流入土砂量、
- i: 河床勾配、i_e: エネルギー勾配、
- w': 支川の支川下流方向の流速、
- θ: 本川と支川とのなす角 (上流側の角度)、
- q: 支川の単位幅流量、
- q_{*}: x方向の単位長さあたりの支川からの流量、
- q_{*} = q sin θ

差分法

MacCormack法

基礎式を

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial E}{\partial x} = C \dots\dots \text{式(3)}$$

とする。

Uⁿを格子点 (x = iΔx、t = nΔt) 上の

U の値と定義するとMacCormack法は次のように離散化される。

・予測子段階

$$U_i^p = U_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_{i+1} - E_i) + \Delta t C_i - (D_{i+1} - D_i)$$

・修正子段階

$$U_i^c = \left\{ \frac{1}{2} (U_i + U_i^p) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_i^p - E_{i-1}^p) + \Delta t C_i^p - (D_i - D_{i-1}) \right\}$$

……式(3)

ここで、

$$D_i = K_V u_* h_i (U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}) \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

u_* : 摩擦速度、 K_V : 人工粘性係数

3. 1次元河床変動計算の湾曲河道における適用性

水位や河床位は河道の湾曲部で横断的变化が大きくなることが知られているが、1次元河床変動計算では河道の湾曲の影響を考慮していない。したがって、湾曲を有する河道において1次元河床変動計算を適用する場合、計算によって得られた水位や河床位を実際の横断平均値として取り扱うことができるか検討する必要がある。

湾曲部における1次元河床変動計算手法の適用性を確認するために、写真-1に示す湾曲部を有する河道の水理模型実験で測定された河床位や水位の横断平均値と、1次元河床変動計算による河床位と水位を比較し、図-1に示す。

図-1より、湾曲部など横断的に河床位や水位が異なる場所においても、河床位や水位の横断平均値と1次元河床変動計算結果はほぼ一致することがわかる。このことから、湾曲部においても1次元河床変動による計算値を横断平均値として取り扱うことは可能だと考えられる。

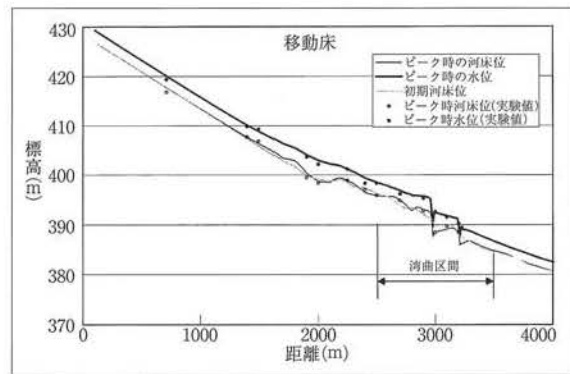


図-1 湾曲河道における一次元河床変動計算と実験値

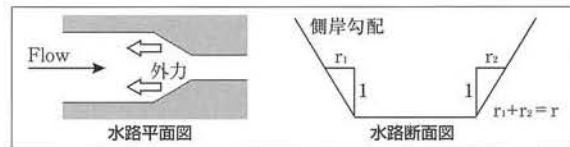


図-2 流体が側壁から受ける外力

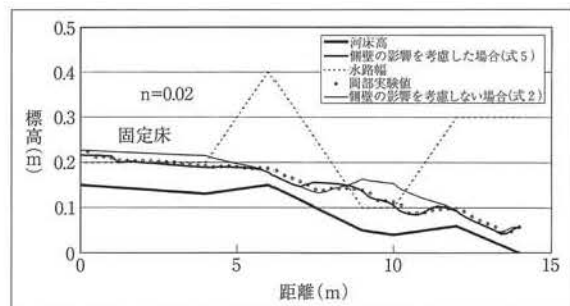


図-3 水路縦断面図

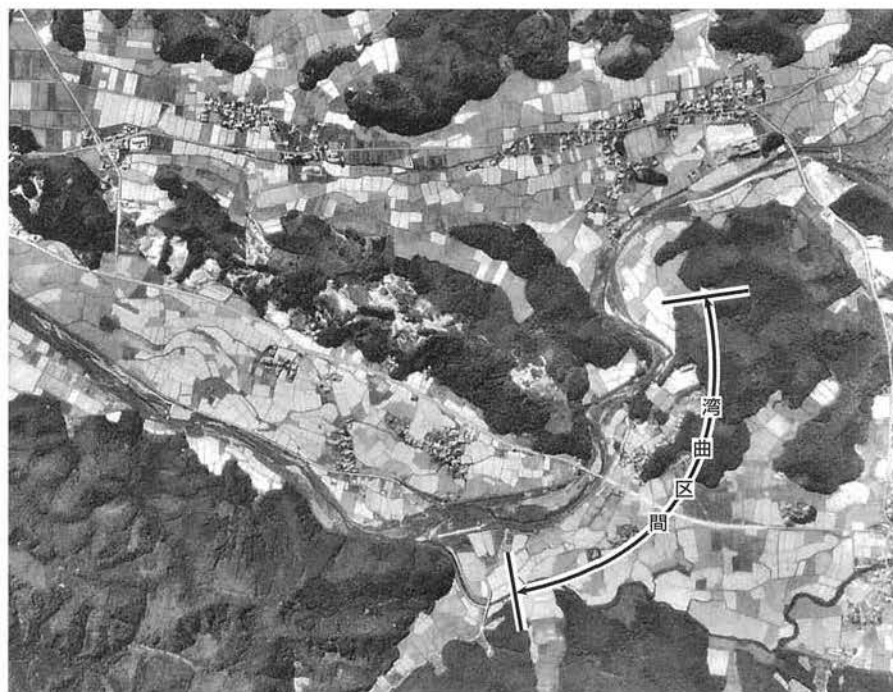


写真-1 湾曲部を有する河道計算

4. 側壁の影響に関する検討

河道の拡幅部や狭窄部での流れを表現する場合、図-2に示すように流体が側壁から外力を受ける。しかし、式2に示した運動方程式にはその外力が考慮されていない。

流体が側壁から受ける外力の影響を1次元河床変動計算に組み込まなければ2次元的な河幅変化の影響を表現することは難しい。ここでは、台形断面水路における側壁からの外力(C)を式4と仮定した。側壁の外力を考慮した運動方程式を式5に示す。

$$C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} g B h^2 + \frac{1}{6} g r h^3 \right) - g A i \quad \dots\dots \text{式(4)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A u) + \frac{\partial}{\partial x} \left(Q u + \frac{1}{2} g h^2 B \right) = q^* w' \cos \theta + C \quad \dots\dots \text{式(5)}$$

つぎに、側壁の外力を考慮しない運動方程式(式2)と考慮した運動方程式(式5)で実際に数値計算を行い、どの程度計算結果が異なるのか比較した。また、岡部ら¹⁾が同じ条件で行った実験結果も併わせて比較した(図-3)。

図-3より、側壁の外力を考慮した基礎式の方が実験値に近いことがわかる。

5. 支川流入に関する検討

MacCormack法を用いた1次元河床変動計算において、支川の流入角度が本川の流れに対してどのように影響を及ぼすか確認するために、支川の流入角度を変えて本川の水面形を比較した。計算結果を図-4に示す。

図-4は支川の流入角度を35°と90°にした場合の本川の水面形を比較したものであるが、支川流入角度

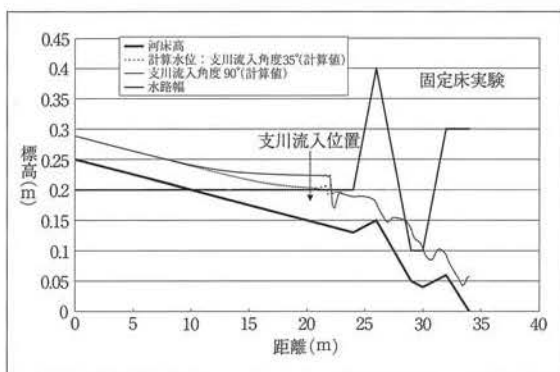


図-4 支川流入角度による水面形の違い

の違いが本川の水面形に反映されていることがわかる。支川が直角に近い角度で本川に流入した場合に比べて、支川が本川とほぼ並行に流入した場合の方が支川の持つ運動エネルギーは減少しにくく、本川の流れをスムーズにする結果を得た。これは経験的に知られている現象と一致する。したがって、1次元河床変動計算による支川の流入角度に関する2次元的な影響も表現できるが、今後実験などにより確認する必要がある。

6. スリット砂防ダムの土砂調節

スリット砂防ダムの排砂過程を含めた土砂調節機能に関して検討を行う。図-5および表-1に示す条件を用いたスリット砂防ダムの土砂調節機能を検討する。

1次元河床変動計算結果を図-6に、スリット砂防ダムからの累積排砂量を図-7に示す。ただし、スリット砂防ダムの堰上げ水位は流量係数を0.4(一定)と仮定して計算した。流量係数は水山ら²⁾の研究を参考に設定した。

図-6(54頁)および図-7(54頁)に示す計算結果は、スリット砂防ダムからの急激な土砂流出は洪水後半に発生し、スリット幅が大きいほどその土砂流出は急激になるなど、スリット砂防ダムの特徴をうまく表現できている。ただし、本計算手法では洪水減水期の堰上げ水位の低下に伴って急激に流出する高濃度な土砂流出に関しても通常の流砂量式を適用しており、堆砂地内の侵食路の形成とそれに伴う排砂状況を考慮していない。

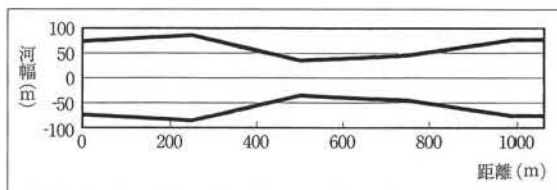


図-5 河道形状

表-1 計算条件

ハイドロ	図-7 参照
河床材料	粒径 3 cm
スリットダムの高さ	12.5m
スリットダムの深さ	12.5m
スリット幅	3 m、5 m、8 m
水通し幅	35m
初期河床勾配	1/30
粗度	0.04

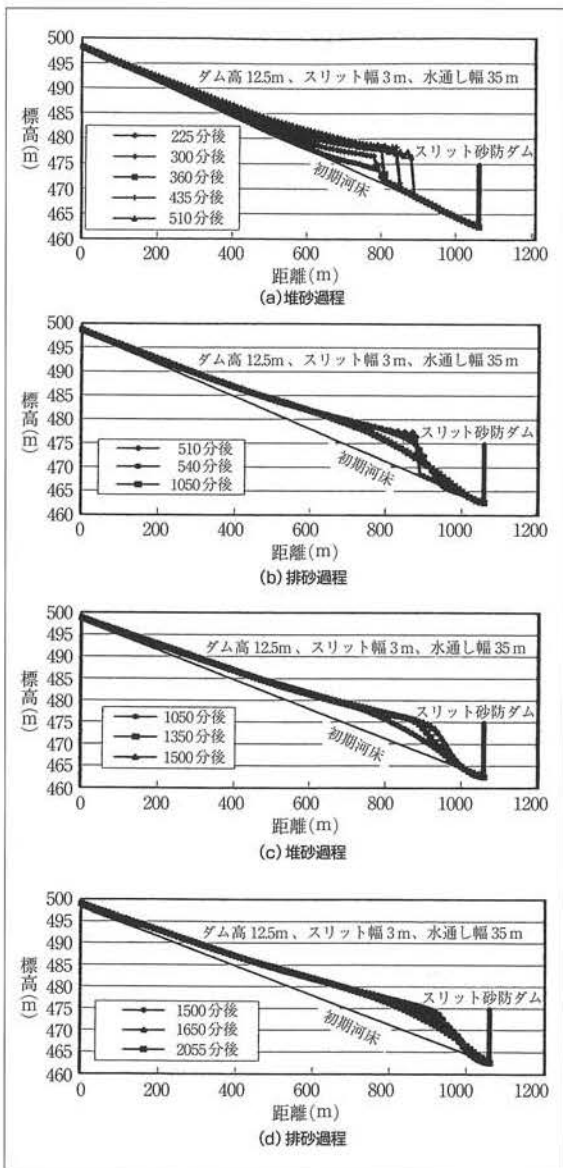


図-6 スリット砂防ダムの堆砂排砂過程

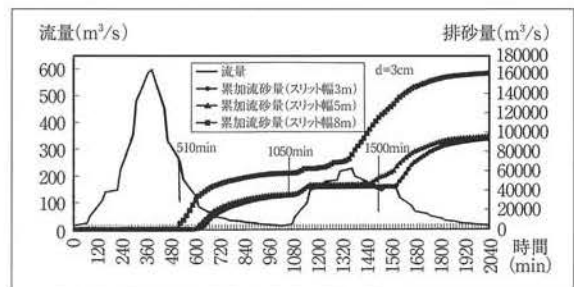


図-7 流量とスリット砂防ダムからの排出土砂量

7. おわりに

MacCormack法を用いた1次元河床変動計算手法は河道形状の変化や構造物影響が大きい河川における有効な河床変動予測手法であると判断される。今後、支川流入、スリット砂防ダムの流量係数およびスリット砂防ダムの排砂過程など水理実験や実河川において計算結果の妥当性を確認する必要があるが、これらの成果は、一貫した流域の土砂管理に対応したネットワーク型の1次元河床変動プログラムの開発に役立つものと考えられる。

なお、ここで紹介した1次元河床変動計算プログラムを作成するに当たり、鳥取大学道上教授、檜谷助教授、京都大学藤田助教授には多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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，pp.25-33，1993
- 2) 水山高久・阿部宗平・矢島重美：スリットダムの流量係数と堆砂形状，新砂防，Vol.42，No.4（42），1989.11

執筆担当：阿部宗平（砂防・地すべり技術センター）
 松村和樹（砂防・地すべり技術センター）
 嶋 大尚（砂防・地すべり技術センター）