

II-211

二次元浅水流モデルによる中規模河床形態の数値シミュレーション(2)

法政大学工学部 正 員 西谷 隆亘

法政大学工学部 正 員 牧野 立平

法政大学大学院 学生員 酢谷 郁雄

1. はじめに 河床変動の予測手段としては観測、模型実験、河床変動計算などがある。従来の河床変動計算は流下方向への一次元的な平均変化の予測であったが、実際河川の河床変動は平面的な広がりを有している。直線移動床実験水路での研究¹⁾により水理量、河床材料、勾配の変化に伴いさまざまな河床形態が存在することが明かにされている。一方、コンピュータの発達により大規模な計算が可能になってきており、数値計算法による二次元河床変動計算の適用例がいくつか報告されている²⁾。しかしながら、流路の弯曲部分での先掘予測の計算の例が多く、直線移動床における数値計算に関する研究は少ない。本研究では二次元浅水流モデルを用い、河床の微小擾乱をきっかけとした二次元流を発生させ、さまざまな水理量に応じた二次元河床変動計算の可能性を検討する。

2. 基礎方程式 本計算では流れの基礎方程式にNavier-Stokes 式を水深方向に平均化して得られる二次元浅水流モデル³⁾を適用する。河床変動計算は以下に示す流砂の連続式により算定する。

$$\text{流砂連続式: } \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

ここに、 λ は河床の空隙率、 q_{bx} 、 q_{by} はそれぞれx、y-方向の単位幅流砂量で以下に示すBrownの式、長谷川の式より算定する。

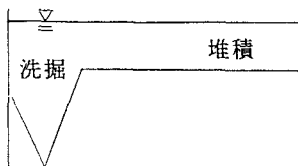
$$\text{流砂量公式: } \frac{q_{bx}}{\sqrt{s g d^3}} = 10 \tau_*^{5/2} \quad (2) \quad q_{by} = q_{bx} \left[\frac{v_b}{u_b} - \sqrt{\frac{\tau_* c}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial y} \right] \quad (3)$$

ここに、s:河床材料の水中比重、d:河床材料の粒径、 μ_s :砂粒の静止摩擦係数、 μ_k :砂粒の動摩擦係数、 τ_* :無次元掃流力、 $\tau_* c$:無次元限界掃流力、 u_b 、 v_b :x、y-方向の河床面近傍の流速、 z_b :河床高である。

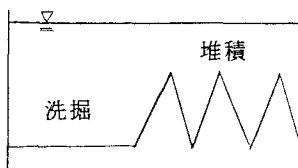
3. 計算方法 流れの運動方程式の差分化に際し、対流項には風上差分、水位の項には後退差分、拡散項に中心差分を行い、離散化方程式の解法にはPatankarの提唱するSIMPLE法⁴⁾を用い解析を行う。また、河床変動の解析には、時間差分にexplicit法を流下方向に後退差分、横断方向に中央差分をそれぞれ行う。計算は過去に直線移動床実験水路で行われた表1に示す水理条件で行う。境界条件は上流端および下流端に流速と水深を与え、上流端から20cm水路の中央に微小擾乱をあたえる。

表-1 計算水理条件

河床形態	流 量	水 深	水面勾配
二次元河床波	10.0 (ℓ/s)	3.0 (cm)	1 / 250
単列砂礫堆	6.0 (ℓ/s)	2.5 (cm)	1 / 135



(A) 実験



(B) 計算

図-1 河床断面模式図

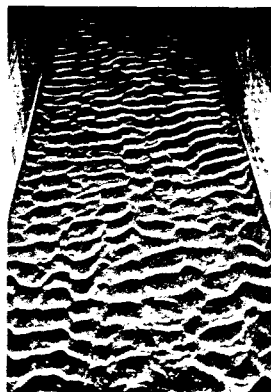


写真-1 二次元河床波

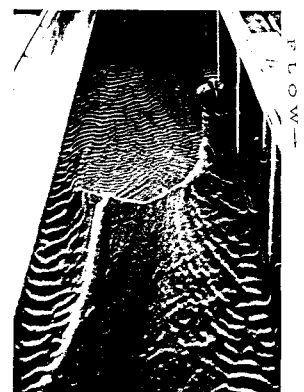


写真-2 単列砂礫堆

4. 結果及び考察 図2は流量と流速を比較的大きくして計算を行った結果である。この形状に相当する河床形態は写真1に示す。この河床形態は実験の場合、上流側で比較的通水開始後すぐの時や、下流端で堰上げ状態で水深が深いところにできやすい。この二次元河床波らしき河床形態を形成する条件として計算結果と実験結果を比較すると水理条件が一致している。これは、流下方向の流速が大きく、横断方向の流速が小さくて二次元流が発達しづらい時に起こりやすい点が共通している。図3は河床変動計算による河床形態の発達過程を示している。上流側に微小擾乱を与え計算を繰り返すと河床の乱れから流れの乱れをつくりそれが下流側へとだんだんと伝わり、蛇行する二次元流が増し、その影響で砂が動き交互に砂州を発達していく様子が見られる。しかし、実験水路においては、ほぼ水路全面的に砂州は同時に形成している。この相異は、計算の場合は微小擾乱を上流側につしつかつていないため水路は理想的な均一な河床になっているので乱れが生じない。一方、実験水路では同程度の乱れがいたるところにあるため同時に発生していると考えられる。また、計算結果と移動床水路

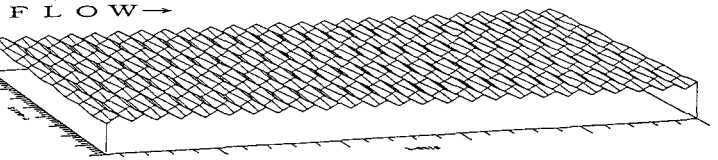


図-2 河床変動計算 河床鳥瞰図

における実験結果（写真2）を比較するとほぼ同じ波長を持つ単列砂れき堆が形成されていることが明らかである。しかし、計算結果と実験結果と相異なる点は、図1の河床断面模式図に示すように洗掘部にくらべ堆積部の等高線の間隔が狭まっている点である。実際の現象としては洗掘部は時間が経つに連れて深掘れを進行させてその付近の河床勾配はきつくなる。一方、堆積部分はなだらかな勾配を形成していく。この原因は掃流力の計算の際に場所的には形状が変化しているにもかかわらず平均的な一定の粗度係数を用いているためと考えられる。

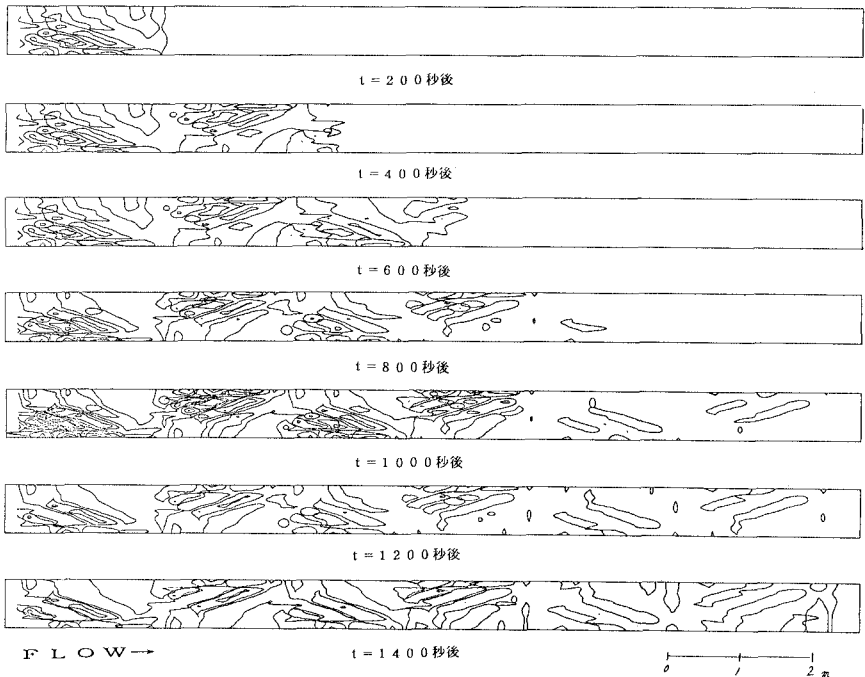


図-3 河床変動計算 河床等高線（発達過程）

5. 結論 本モデルによって、解析例は少ないが、二次元での堆積と洗掘の計算は可能であった。しかし、浅水流モデルでは水流の鉛直方向流速分布が表わせないので、物理的な水流の性状は正しく表現できない。三次元モデルの導入が期待される。さらに、河床の摩擦抵抗だけでなく形状抵抗を考慮する必要がある。

参考文献 1)西谷・牧野:河床波の分類と形成過程に関する実験的研究,法大工学部研究報告,第22号, pp. 139-156, 1986 2)西谷・牧野・土屋:二次元浅水流モデルによる中規模河床形態の数値シミュレーション,土木学会第47回年次学術講演会, pp. 116-117, 1992. 4 3)清水:河川における2次元流れと河床変動の計算,北海道開発局土木試験所報告,第85号, pp. 1-65, 1984 4)保原・大宮司編:数値流体力学,東京大学出版会, pp. 21-23, 1989