

境界適合格子を用いた不等流場と非平衡浮遊砂の数値解析

名古屋大学大学院工学研究科 学生員 山田淳夫
 正 員 辻本哲郎
 正 員 北村忠紀

1. はじめに

近年、河川の自然環境を重視する河川改修の一つとして河川の線形を極力自然のまま残し、それによって生態系も保全するという方法が一般的になってきている。こういった自然河川の線形は水位や水路幅、瀬淵構造といったような局所的な勾配の変化の存在など、複雑な不等流場をもたらしている。またそのような不等流場においても生息場に影響を与える土砂の挙動の研究は必要とされている。

本研究では水位変化を伴う流れ場とそこでの非平衡浮遊砂の挙動を境界適合格子を用いた数値解析によって予測する手法について検討した。ここでは、底面粗度が流下方向に急変し、それに伴って水面形状も変化する流れ場を対象として、流れ場と浮遊砂濃度分布を数値解析して既往の実験結果¹⁾と比較した。

2. 数値解析の概要

水面が変化する流れの計算を実施する際、その複雑な境界形状に適した格子が必要となる。ここでは空間的に変化する水面と河床を境界とする境界適合格子による数値計算を行った。流れと浮遊砂濃度の輸送方程式は、断面平均された鉛直 2 次元流れのモデルを用いる。基礎式は、一般形保存式をベクトル表示すれば以下のようにかける。

$$\text{div}(\phi BU) = S_\phi \quad (1)$$

ここで、 U ：流速ベクトル、 B ：水路幅である。式 (1) において ϕ 、 S_ϕ をそれぞれ次のように表すと、連続式、 u 、 w の運動方程式、および浮遊砂濃度 C の輸送方程式となる。

$$\cdot \text{連続式} \quad \phi = 1 \quad ; \quad S_\phi = 0 \quad (2)$$

$$\cdot u\text{-方程式 (x 方向流れ成分)} \quad \phi = u \quad ; \quad S_\phi = -gB \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (B\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial z} (B\tau_{zx}) \right] \quad (3)$$

$$\cdot w\text{-方程式 (z 方向流れ成分)} \quad \phi = w \quad ; \quad S_\phi = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (B\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial z} (B\tau_{zz}) \right] \quad (4)$$

$$\cdot C\text{-方程式} \quad \phi = C \quad ; \quad S_\phi = \frac{\partial}{\partial x} (B\alpha_x v_t \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (B\alpha_z v_t \frac{\partial C}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (CBw_0) \quad (5)$$

ここで、 x 、 z ：流下、鉛直方向座標、 u 、 w ： x 、 z 方向成分流速、 B ：河道幅、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 ξ ：基準面からの水面高さ、 p ：静水圧からの偏差分、 C ：局所浮遊砂濃度、 w_0 ：砂の沈降速度、 α ：乱流シュミット数である。乱流応力 τ_{xx} 、 τ_{xz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zz} は Boussinesq 近似により表現する。このとき渦動粘性係数 ν_t は局所水深と摩擦速度で与えられる放物型分布で与える。基礎式は全ての物理量をセル中心で定義する collocate 格子を用い、有限体積法により離散化した後、SIMPLE 法²⁾により解く。ここで、セル境界の値を求める際には、振動解を防ぐために、Rhie&Chow³⁾の方法を用いた。

3. 実験値と計算結果との比較

神田¹⁾の行った実験条件のうち、今回採用したものをまとめたものが表-1 である。CPS1 が底面が粗面から滑面に、CSP1 が滑面から粗面に粗度が急変する流れである。これらの実験では、粗面の底面に半球体粗度を用い、その相当粗度は $k_s=0.9\text{cm}$ としており、いずれのケースでも図 1 のような水面形状の変化が起きている。浮遊砂に関しては平均沈降速度 $w_s=0.7\text{cm/s}$ 、密度 $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $d_m=0.1\text{mm}$ の珪砂を流入部において一様になるように給砂している。

計算にあたって、水面形は実験で得られたものを与え、それに応じた格子を設定した (図 1 参照)。流れ

場の境界条件として、底面では、粗度に応じた対数則を仮定し、水面では、対称条件を課した。流入部では一様流速を与えた。浮遊砂の境界条件として、水面及び底面で正味のフラックスをゼロとし、流入部で所定の一様濃度を与えた。計算結果のうち、図1に流速コンターを併示した。

表-1 実験条件一覧

ケース名	i_b	$q(l/s)$	限界水深 $h_c(cm/s)$	等流水深 $h_{02}(cm/s)$	$u_{*02}(cm/s)$
CPS1	1/500	4.02	2.18	3.77	2.49
CSP1	1/500	3.75	2.08	2.65	2.11

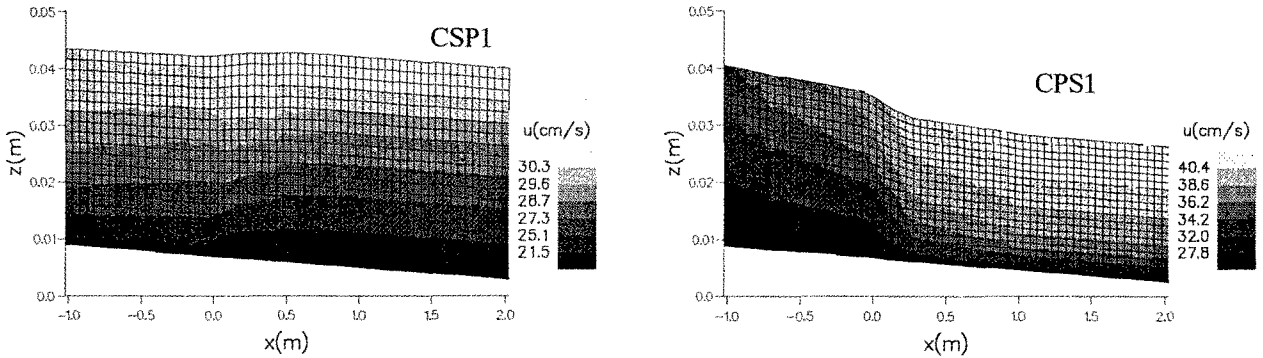


図1 計算格子と流速コンター図

図2は粗度急変点を x 軸原点として流速の変遷を示した図である。図中 u_{*02} は粗度急変後に流れが平衡に至った領域での摩擦速度である。いずれのケースにおいても、粗度変化後、河床近傍の流速が新たな平衡流速にむけて素早く対応する現象を表現できた。しかしながら、遷移部入り口付近の流速分布が実験値を十分に再現できておらず、今後の課題である。

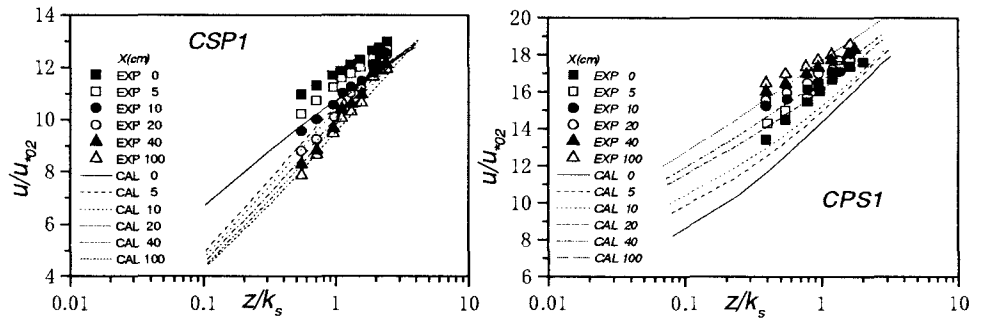


図2 流速分布の変遷

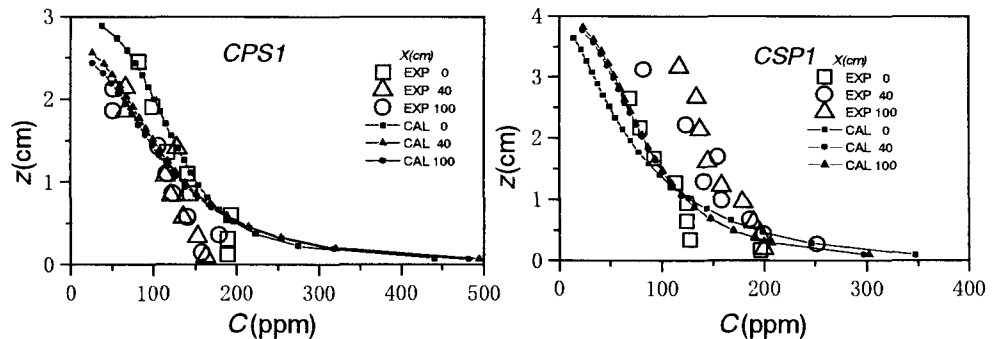


図3. 濃度分布の変遷

図3は浮遊砂濃度分布形状の流下方向変化を示したものである。河床近傍での値が実験

値とずれているものの、流下に伴い濃度分布が新たな平衡状態に移行する過程は捉えられている。

4. おわりに

境界面が複雑な流れ場においても境界適合格子を用いて計算領域を指定することによって簡単なモデルでも不等流場の浮遊砂濃度分布の予測が可能である。今後、本解析手法を水位変動計算を取り入れた非定常場の解析に拡張していきたい。

参考文献 1)神田佳一；京都大学学位論文 河道横断構造物の護床工周辺部の流れと局所洗掘に関する研究,1995, 2)Joel H.Ferziger, and Milovan Peric ; Computational methods for fluid dynamics, Springer-Verlag 1996, 3)Rhie and Chow ; Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation, AIAA J21,1525-1532