

第Ⅱ部門 浮遊砂を含む非定常な水位変化する開水路流れの数値計算(CFD)

京都大学大学院工学研究科博士課程

学生員 ○山上 路生

京都大学大学院工学研究科

フェロー会員 瀬津 家久

1. はじめに

洪水流における土砂輸送は水災害だけでなく河川環境においても重要な問題となっている。そこで本研究では浮遊砂を含む非定常開水路流れを対象に数値計算を行い、その水理特性を検討する。本計算では浮遊砂による浮力効果を組み込んだ応力方程式モデルを用いてまず定常開水路流れにおける浮力効果の影響を検討する。次にVOFを用いて水深が変化する非定常な浮遊砂流れの時間的および空間的な流れ特性を数値的に予測する。

表-1 計算ケース

Case	T_d	U_{m_b}	U_{m_p}	h_b	h_p	k_s	d	ρ_s/ρ_w	$\alpha (\times 10^{-3})$
A60	60	75	100	4.0	6.2	1.50	clear water	clear water	0.38
A120	120	75	100	4.0	6.4	1.50	clear water	clear water	0.19
B30	30	30	60	4.0	6.0	0.01	0.01	2.65	1.48
C1	-	60	-	6.0	-	0.01	0.01	2.65	steady
C2	-	60	-	6.0	-	0.01	clear water	clear water	steady

T_d (s): Duration time between base and peak depth

U_{m_b} (cm/s): Bulk mean velocity at base flow

U_{m_p} (cm/s): Bulk mean velocity at peak flow

h_b (cm): base depth h_p (cm): peak depth

k_s (cm): equivalent sand roughness

d (cm): particle diameter

ρ_s/ρ_w : specific gravity

2. 基礎方程式と計算条件

連続式と浮遊砂効果を組み込んだ運動方程式を以下に示す¹⁾。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right) + g S_i (1 + RC) \quad (2)$$

ここで、 U_i は時間平均流速、 u_i は変動速度、 P は時間平均圧力、 C は時間平均した浮遊砂濃度、 S_i は水路床勾配、 R は相対密度で $R = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ である。 ρ_s と ρ_w はそれぞれ粒子と水の密度である。浮遊砂の輸送方程式は次式で与えられる。

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-u_i c \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial y} \quad (3)$$

w_0 は沈降速度である。さらに(1)および(2)から浮力効果を組み込んだ応力方程式は次式となる。

$$\frac{D}{Dt} \overline{u_i u_j} = \left(-\overline{u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \overline{u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right) + \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \overline{u_i u_j u_k} - \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} + \frac{p}{\rho} \left(\overline{u_j} \delta_{ik} + \overline{u_i} \delta_{jk} \right) \right\} - 2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + g R \theta_j \overline{u_i c} + \theta_i \overline{u_j c} \quad (4)$$

式(4)の右辺の各項はLRRモデルを用いて計算する。ただし浮力効果をあらわす第5項は勾配拡散近似によってモデル化する。計算は流下方向に $x/h_b = 300$ の地点まで行い、流入境界で流速および水深を三角波で時間変化させて与えた。浮遊砂は底面からのみ発生するものとし、芦田らの方法²⁾によって底面濃度を計算した。計算ケースを表-1に示す。定常の清水流も含めた全5ケースを計算した。なお、 α は非定常性の大きさを表す非定常パラメータである。

Michio Sanjou and Iehisa Nezu

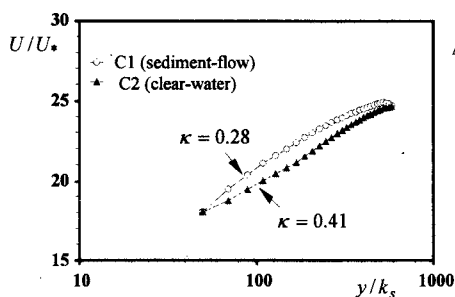


図-1 主流速分布

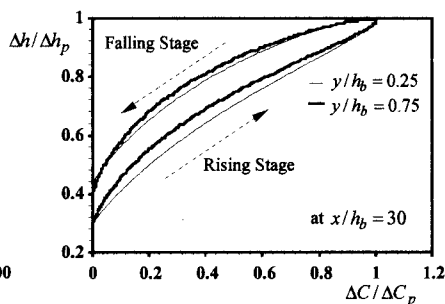


図-2 浮遊砂濃度のループ特性

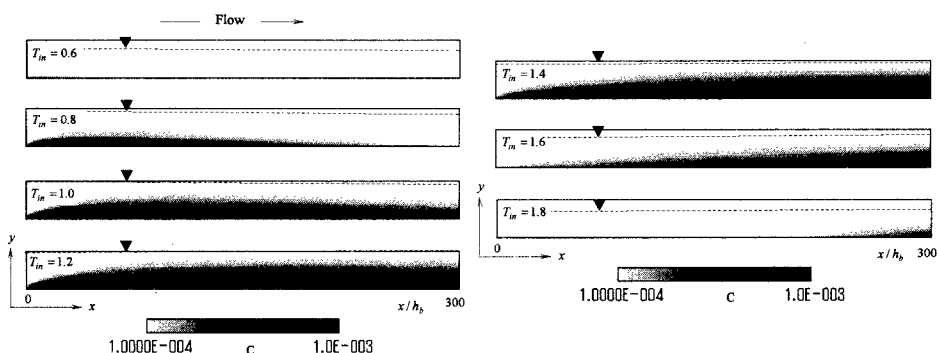


図-3 浮遊砂濃度の流下方向分布の時系列特性(B30)

3. 計算結果と考察

図-1に定常状態における清水流と浮遊砂流の主流速分布を示す。清水流に比べて浮遊砂流では浮遊砂の浮力効果によって主流速 U が増加していることがわかる。特に浮遊砂濃度 C の大きい底面領域では増加率が高い。カルマン定数 κ に関しては清水流の普遍値0.41から0.28へと減少し従来の研究結果と一致する。図-2に水深 h と C の時間変化特性を示す。反時計回りのループがみられるがこれは C のピークが h のピーク以前に現れるためである。この現象は実河川の洪水流にしばしば観察されており、今後このループの定量的な検証を行いたい。図-3にB30の浮遊砂濃度の時間および空間的な分布を示す。 T_m は流入地点における無次元時刻で $T_m \equiv t/T_d$ である。 $T_m = 0.6$ では浮遊砂はほとんど存在しないが、摩擦速度の増加により $T_m = 0.8$ では上流域で浮遊砂が発生する。さらに流量増加とともに上流で発生した浮遊砂濃度の分布が底面から水面へ拡散されつつ下流に輸送され、減水期には上流から濃度分布が減少し清水流に戻る様子が観察される。

4. おわりに

浮遊砂による浮力効果を組み込んだ応力方程式モデルを用いて非定常な浮遊砂流れを数値計算し、その浮遊砂濃度の時間・空間変化特性を予測した。今後これらの予測値を実測で検証したい。

- 参考文献** 1) 福嶋祐介：開水路浮遊砂流の乱流構造の解析，水工学論文集，Vol.30, pp.631-636, 1986.
2) 芦田和男・岡部健士・藤田正治，粒子の浮遊限界と浮遊砂量に関する研究，京大防災研究所年報，Vol.25, B-2, 1982.