

II - 225

植生帯を有する流れの浮遊砂濃度分布に関する数値計算

金沢大学大学院 学生員 泉倫光 京都大学工学部 正会員 北村忠紀
群馬大学工学部 正会員 清水義彦 金沢大学工学部 正会員 辻本哲郎

1. まえがき

植生帯を有する流れが十分に発達した領域では、植生帯内の遅い流れと主流部の速い流れが隣り合い、横断方向の活発な運動量、物質混合が生じる。こうした横断混合の実体は低周波流速変動によるものであるが、池田ら¹⁾は低周波流速変動による混合現象をマクロに拡散として捉え、水深方向に浮遊砂の拡散方程式を積分した取り扱いから浮遊砂の横断方向輸送を議論し、その定量的評価に成功している。そこでは、浮遊砂の水深方向分布の相似性を仮定しているが、植生帯を伴う流れにおいては必ずしも水深方向分布の相似性が成り立たないことも考えられる。本研究では、清水ら²⁾による植生の形状抵抗を考慮した代数応力モデルによる流れ場の計算から、断面内での拡散係数の分布に関する情報を得、これをもとに浮遊砂の拡散方程式を断面内で解くことから、浮遊砂濃度分布の水深方向分布の相似性を仮定しない検討を試みた。

2. 流れ場の評価

植生帯を伴う流れ場については、清水ら²⁾による植生の形状抵抗を運動量輸送式のみならず、乱れの輸送式にも考慮した代数応力モデルを用いて評価した。数値計算の方法については、清水ら²⁾と同様である。

3. 浮遊砂の拡散方程式と境界条件

定常で流下方向に平衡（流下方向に濃度の断面内分布が変化しない）な状態では、浮遊砂濃度の拡散方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ VC - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ WC - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial y} (v_0 C) + S_c \quad (1)$$

ここで、 V 、 W ：それぞれ水深方向、横断方向流速、 C ：浮遊砂濃度、 v_0 ：浮遊砂の沈降速度、 ε_{sx} 、 ε_{sy} 、 ε_{sz} ：それぞれ流下方向、水深方向、横断方向の浮遊砂の拡散係数、 S_c ：浮遊砂の生成項であり次式で与えられる。

$$v_0 C_{ae} = \int_0^{y_b} S_c(y) dy \quad (2)$$

ここで、 y_b ：掃流層厚、 C_{ae} ：平衡状態（底面での浮遊砂の上昇フラックスと沈降フラックスがバランスした状態）での浮遊砂の底面濃度で、辻本ら³⁾にならい、次式のように摩擦速度 u_* と結びつけられる。

$$C_{ae} = 0.002(u_* / v_0)^2 \quad (3)$$

自由水面（ $y=h$ ）および側壁または対称軸（ $z=0, B$ ）での境界条件は以下のようなものである。

$$\varepsilon_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} + v_0 C = 0 \quad \text{at } y = h \quad (4) \quad ; \quad \varepsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0, B \quad (5)$$

また、底面では浮遊砂の上昇フラックスと沈降フラックスの差が河床の侵食・堆積量を定めるため、ある決まった値を境界条件として用いることは出来ない。

4. 流下方向に浮遊砂濃度が平衡な条件

浮遊砂濃度が流下方向に変化しないためには、底面での浮遊砂の上昇フラックスを水路横断方向に積分したもの（トータルの巻き上げ量）と沈降フラックスを水路横断方向に積分したもの（トータルの沈降量）が等しくなければならないことから、 C_a を底面濃度として次式が制約条件となる。

$$v_0 \int_0^B C_a(z) dz = v_0 \int_0^B C_{ae}(z) dz \quad (6)$$

5. 支配方程式の離散化と境界の処理およびその解法

式(1)を流れ場を解く際に用いた計算メッシュ（スカラーセル）（図1）のもとでコントロールボリューム法⁴⁾により離散化すれば次式のようになる。

$$a_P C_P = a_N C_N + a_S C_S + a_E C_E + a_W C_W + P + Q \quad (7)$$

$$P = v_0 (C_n - C_s) \Delta z \quad (8) \quad ; \quad Q = S_c \Delta y \Delta z \quad (9)$$

数値計算にあたって、自由水面および側壁または対称軸での境界条件は次のように処理する。

$$(i) \text{ 自由水面：水面からの第1セルにおいて, } a_N = 0 \quad ; \quad P = -v_0 C_s \Delta z \quad (10)$$

$$(ii) \text{ 側壁および対称軸：側壁および対称軸からの第1セルにおいて, } a_E = 0 \quad ; \quad a_W = 0 \quad (11)$$

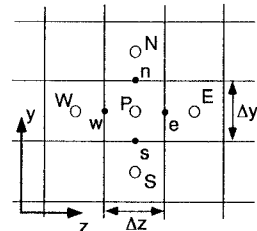


図1 数値計算メッシュ

また、便宜的に掃流層が底面からの第1セルに圧縮されているものとし、流れ場の全領域のセルについて $S_e=0$ とするとともに、底面からの第1セルにおいて次の処理を行う。 $a_s = 0$; $P = v_0 C_{ae} \Delta z + v_0 C_n \Delta z - v_0 C_p \Delta z$ (12)

代数応力モデルによる流れ場の収束解を求めた後、底面濃度 C_s を適当に与え、式 (7) を TDMA⁴⁾ を用いて解き、得られた解から式 (6) の制約条件を満たすように底面濃度を修正し、さらに式 (7) を解き、これを繰り返す。繰り返し計算の過程で、ほぼ濃度分布が変化しなくなった状態で計算をストップし、収束解とした。

6. 数値計算結果

菅ら⁵⁾ の行った実験条件(表1)を用いて数値計算を行った。なお、浮遊砂の拡散係数は便宜的に運動量拡散係数と等しいものとした。すなわち乱流シュミット数を全断面において1とした。

図2に主流速、渦動粘性係数、浮遊砂濃度の計算結果を示す。主流速は植生密生度が大きいほど植生帯境界での等値線が鉛直になる傾向があり、渦動粘性係数においても同様な傾向が認められる。

浮遊砂濃度分布においては植生密生度が大きいほど植生帯境界部において水深全体にわたり高濃度となっている。図3は底面での上昇フラックス $v_0 C_{ae}$ と沈降フラックス $v_0 C_s$ およびその差 $v_0 (C_{ae} - C_s)$ の横断方向分布を示したものである。 $v_0 (C_{ae} - C_s)$ 分布から、植生密生度が大きいほど植生帯境界寄りに堆積し、小さくなるにつれて植生帯全体にわたりなだらかに堆積する傾向にあることが認められ、これは菅ら⁵⁾ の実験結果を定性的に説明している。

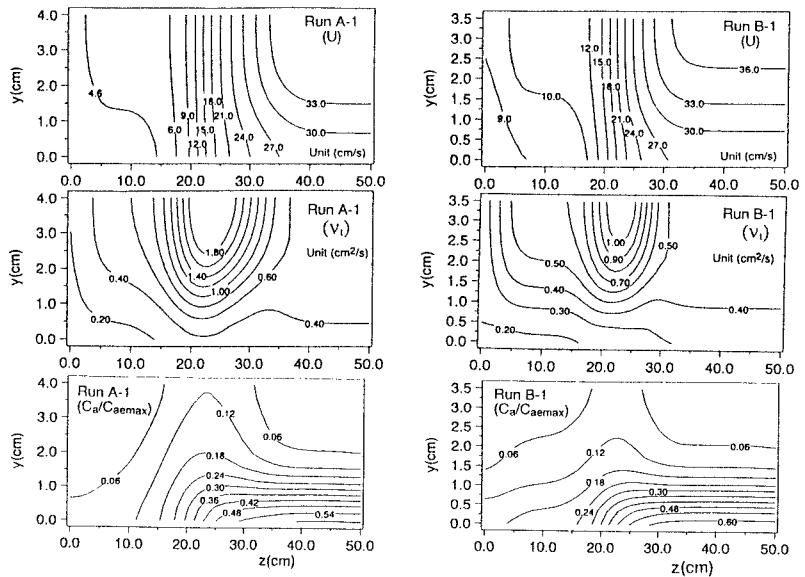


図2 主流速、渦動粘性係数、浮遊砂濃度の計算結果

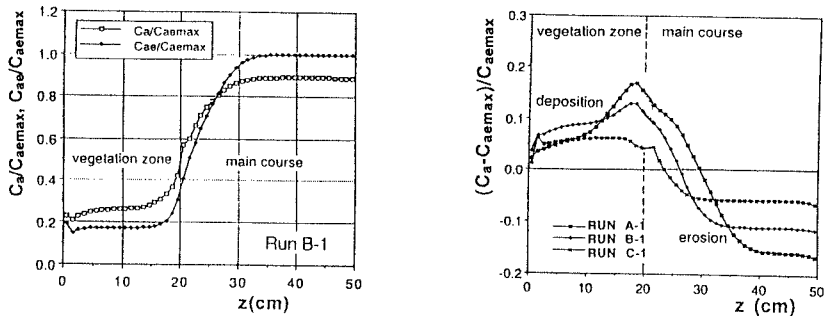


図3 底面での上昇フラックスと沈降フラックス

7. あとがき

本研究では、浮遊砂の拡散方程式を断面内で解くことにより、浮遊砂濃度分布の鉛直方向分布の相似性を仮定しない検討を試みた。乱流シュミット数の与え方など問題は残るが、これらは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 池田・太田・長谷川：土論，No.447/II-19，pp.25-34，1992。
- 2) 清水・辻本・中川：水講36，pp.265-272，1992。
- 3) 清水・辻本・北村：水講35，pp.477-482，1991。
- 4) 香月・中山：熱流動の数値シミュレーション，森北出版，1991。
- 5) 菅・中井：水講38，pp.659-664，1994。