

北海道大学工学部 正員 ○黒木 幹男

北海道大学工学部 正員 岸 力

1. はじめに 中規模河床形態の領域区分に就いてこれまで多くの検討が行われてきたが、浮遊砂の効果に言及しているものは非常に限られている。小規模河床形態の場合に詳細な理論的検討が行われていたのは極めて対照的である。解析理論に浮遊砂を見逃し良い形で取り入れるためには流速、浮遊砂濃度の水深方向の分布を考慮しておく必要がある。中規模河床形態の場合には流れの3次元の構造を明らかにすることが必要であり、また流れの欠乏の原因の1つであろう。著者らは中規模河床形態を模擬した3次元表状河床上の流れの3次元時構造を明らかにすることを試み、成果の一部は昨年報告した¹⁾。本年度は、この解析結果を利用して浮遊砂を考慮した河床安定解析を行ない形成領域区分に与える影響を評価したものである。

2. 砂州上の浮遊砂の運動式 3次元流れ場の浮遊砂の輸送方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(v_1 C) + \frac{\partial}{\partial x_2}(v_2 C) + \frac{\partial}{\partial x_3}(v_3 C) = \frac{\partial}{\partial x_1}(e_1 \frac{\partial C}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(e_2 \frac{\partial C}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3}(e_3 \frac{\partial C}{\partial x_3}) + w_f \frac{\partial C}{\partial x_3} \quad (1)$$

ここで、 x_1 は流れ方向、 x_2 は横断方向、 x_3 は河床から鉛直上方に上った座標軸、 $v_1 \sim v_3$ は各座標軸方向の流速、 $e_1 \sim e_3$ は各方向の浮遊砂の拡散係数、 w_f は砂粒の沈降速度。昨年の解析では流れを擬似定常として取扱っているが、浮遊砂についても同様に取扱いはする。拡散係数については等方性で仮定し、さらに渦動拡散係数 ϵ ($= K u_* h / 6$) に等しいものとした。

流速、濃度を式(1)に示すように平均値と変動値に分けて式(1)に代入する。変動量の2乗以上の項は無視して線型化する、平均濃度に関し式(3)、変動濃度に関し式(4)が与えられる。式(3)を積分し、 $x_3 = bH_0$ で $\bar{C} = C_0$ とすると平均濃度分布は式(5)のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \bar{v}_1(x_3) + \tilde{v}_1, & v_2 &= \tilde{v}_2, & v_3 &= \tilde{v}_3 \\ C &= \bar{C}(x_3) + \tilde{C} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\epsilon \frac{d^2 \bar{C}}{dx_3^2} + w_f \frac{d\bar{C}}{dx_3} = 0 \quad (3)$$

$$v \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x_1} + \tilde{v}_1 \frac{d\bar{C}}{dx_3} = \epsilon \nabla^2 \tilde{C} + w_f \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x_3} \quad (4)$$

$$\bar{C} = C_0 \exp \left\{ -\frac{w_f}{\epsilon} (x_3 - bH_0) \right\} \quad (5)$$

$$\tilde{C} = \tilde{C}(z) \cos(ky) \exp \{ ik(x - a\tau) \} \quad (6)$$

$$\tilde{v}_3 / \tilde{v}_{30} = i \hat{\omega}(z) \cos(ky) \exp \{ ik(x - a\tau) \} \quad (7)$$

次に式(4)を解いて変動濃度分布を求める。ここで、 $\tilde{v}_3$ は河床上を伝わる擾乱と同形式、式(6,7)と同様に与える。両式を式(4)に代入して整理すると式(8)となる。

$$\text{== したがって、} \quad \tilde{C}'' + \frac{w_f}{\epsilon} \tilde{C}' - \left\{ k^2 + l^2 + \frac{i k \hat{\omega}(z)}{\epsilon} \right\} \tilde{C} = i \frac{\hat{\omega}(z)}{\epsilon} \frac{d\bar{C}}{dz} \quad (8)$$

ここで、 x, y 方向の擾乱の波数、 a は横系移動速度、 $\tilde{v}_{30}$ は平均表面流速、 $\hat{\omega} = \omega / \tilde{v}_{30}$ 、 $w_f^* = w_f / \tilde{v}_{30}$ 、 $\tau = t / \tilde{v}_{30}$ 。

式(8)は、流れの場合と同様に、右辺の係数の中に含まれている正の関数 $U(z)$ を一定値と見做して近似解を求める。

$$\epsilon \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial z^2} + w_f^* \tilde{C} = 0 \quad \text{at } z_3 = H_0 - \tilde{z} \quad (9)$$

$$\tilde{C}'(1) + \frac{w_f^*}{\epsilon} \tilde{C}(1) = 0 \quad (10)$$

3. 境界条件 第1の境界条件は本面での sediment flux が0という条件で式(9,10)の右辺を0とする。第2の境界条件は基準点濃度式から与えられる。板倉・岸²⁾は水深の5%の位置に

設定した基準点での濃度を与える式を提案しており、無次元輸流力 Te の関数として与えられる。この関係が向斜的にも成立するものと考えられ式が成立する。

$$C_b(x) = \bar{C}(x) + \tilde{C}(x) \quad \text{at} \quad x = \tilde{x} + b(H_0 + \tilde{x} - \tilde{x}) \quad (11)$$

$Te = Te_0 + \tilde{C}_x$ と代入して整理すると次式を得る。

$$\tilde{C}(b) + \tilde{x} + b(\tilde{x} - \tilde{x}) \left\{ \frac{d\tilde{C}}{d\tilde{x}} \right\}_{\tilde{x}=b} = \frac{dC_b}{dTe} \bigg|_{Te=Te_0} \cdot \tilde{x} \quad (12)$$

式(10, 12)を用いて $\tilde{C}(x)$ の形が決められた。図-1にはその例を示す。図中には数値解析的に求めた厳密解を破線に示している。両者の一致は良好である。

4. 河床安定解析と領域区分 流砂の連続式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} + \frac{1}{1-\eta} \left\{ \tilde{x} \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x_1} + \tilde{x} \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x_1} \int_{\tilde{x}}^{H_0+\tilde{x}} (V_1 C) dx_1 + \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x_2} \int_{\tilde{x}}^{H_0+\tilde{x}} (V_2 C) dx_2 \right\}$$

前節で求めた関係式を上式に代入して整理すると、複系移動速度 a に関する式を得る。もう少し整理すると $a = a(Te_0, \tilde{x}_0, d, k, l)$ となり、砂粒だけの場合には $k=0$ 、砂粒の特性量が違えば l が異なる。

図-2には不安定領域を計算した例を示す。実際は図に示した図則で不安定が生じる。破線に示したものは浮遊砂を無視した場合の不安定領域である。両者が不安定を生じ得る濃散に大きな差を認められる。同様の計算と水理量を変えれば図-3のようになる。手順は前者の以前の解析⁽¹⁾と同様であるから省略して結果の計数を図-3のように示す。

掃流力が增大して浮遊砂が発生すると、砂粒の発生・非発生が限界付近にも単列砂粒と複列砂粒の形成限界付近にも顕著な変化が認められる。単列砂粒の形成可能河幅・水深比の範囲が拡大する。現在のところ本解析結果の妥当性を直接検証できるような水路実験の資料は存在しない。今後は実験的検討とともに実河川の資料の集積と計り妥当性を明らかにしてゆく必要がある。

- 1) 黒木 昇：二次流を考慮した中規模河床形態の領域図、37回年報概要集、1982
- 2) 森倉 昇：Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, Jan., HY-8, 1980
- 3) 黒木 昇：沖積河道の流路形態の領域区分に関する研究、筑波回水講演文集、1982

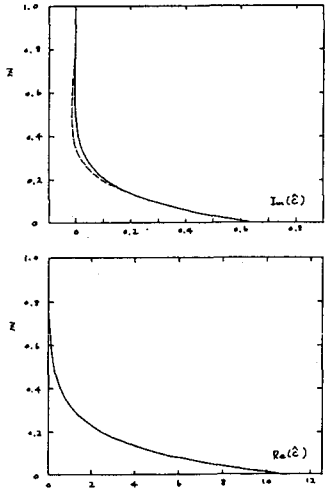


図-1. $\tilde{C}(x)$ の分布形 ($Te_0 = 2.0, I_0 = 0.001, d = 0.5 \text{ mm}, k = 0.0113, l = 0.0 b$)

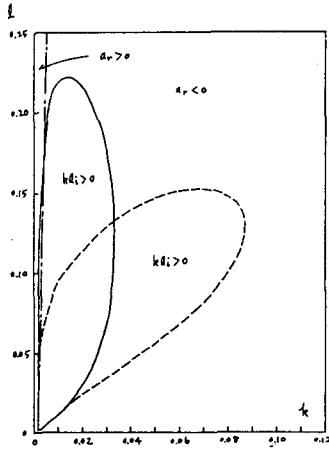


図-2. 不安定領域の変化 ($Te_0 = 2.0, I_0 = 0.001, d = 0.5 \text{ mm}$)

