

掃流砂から浮遊砂への遷移について

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

京都大学工学部 正 員 村上 正吾

東京電力(株) 正 員 小藪 仁

飛島建設(株) 重金 治彦

1. まえがき 従来、は全く別の考え方に基ずくモデルで表現されてきた。しかし、浮遊砂の供給源はあくまでも河床であり(wash load と異なる)、掃流砂から遷移して浮遊砂に移行する砂粒子が数多く観察される事実から、掃流砂と浮遊砂とを一つのモデルで取扱うのがより合理的であると考えられる。こうした観点から、掃流砂と浮遊砂を統一的に取扱うことを試み、簡単なモデルの提案とその妥当性の検討を行った。

2. モデルの概要 浮遊砂濃度分布を掃流砂濃度分布から直接求めようとするものである。いま、saltation に代表される掃流砂運動により y_B の高さまで持ち上げられた砂粒子が、水流の乱れ作用により浮遊砂に遷移する確率を $p_{BS}(y_B)$ で与えられるものとする。この浮遊砂に遷移した砂子が y (水深) 方向にランダムな運動をし、その後高さ y に存在する確率を $f_S(y | y_B)$ とすれば、浮遊砂濃度 $C(y)$ は、掃流砂濃度 $C_B(y)$ を用いて式(1)のように表される。ここで、 $f_B(y)$ は掃流砂の存在確率密度関数である。本モデルのフレームワークは既に前報¹⁾で発表しているが、ここでは y_B における掃流から浮遊への遷移確率を加味し、また従来の実験結果との比較・検討を充実させた。

3. 諸関数の検討 式(1)における諸関数は、次ぎのように定めた。まず掃流砂濃度 $C_B(y)$ は式(2)で(ここで、 v_g : 掃流砂の移動砂粒密度、 A_3 : 砂の形状係数、 d : 粒径)、このうち砂密度については式(3)の関係(q_{B*} : 無次元掃流砂量、 τ_* : 無次元掃流力、 $\Phi_* = u_g/u_*$: 無次元の砂移動速度、 u_* : 摩擦速度)を用い掃流砂量 q_{B*} をスイス公式で、砂移動速度 u_g を対数則で与えられる saltation 粒子の平均存在高さ $E[y]$ での局所流速とした。対数則中の Karman 定数は例えば Kennedy ら²⁾の提案式を用いて計算される。 $E[y]$ ($\Psi_* = E[y]/d$) は、irregular successive saltation のシミュレーション¹⁾によって与えられた結果を近似する式(4)で計算される(C_D : 抗力係数、 C_M : 付加質量係数)とした。さらに掃流砂の鉛直存在確率密度は式(5)で近似される。ここで、 $\xi = y/E[y]$ 、 $\alpha_y^2 = \text{Var}[y]/E^2[y]$ で、 α_y の値はほぼ 0.65 である。また、 $f_*(\xi) \cdot d\xi = f_B(y) dy$ であることを用いて、結局 $C_B(y)$ は式(6)で与えられる。一方、式(1)中の $f_S(y|y_B)$ は、 y_B を出発した粒子が y の位置に遷移する確率であり、確率過程モデルからも求められるが、ここでは Rouse 式を代用し、式(7)を与えた。

さて観察によると、掃流砂から浮遊砂への遷移は、いわゆる bursting 現象に大きく影響されているようである。いま、saltation 粒子が bursting を生じている領域内に存在している確率を $p_b(y)$ とする。bursting 領域内での salta-

$$C(y) = \int_0^h C_B(y_B) p_{BS}(y_B) \bar{f}_S(y|y_B) f_B(y_B) dy_B \quad (1)$$

$$\bar{f}_S(y|y_B) = f_S(y|y_B) / f_S(y_B|y_B) \quad (1')$$

$$C_B(y) = v_g A_3 d^3 f_B(y) \quad (2)$$

$$v_g A_3 d^3 = q_{B*} d / (\sqrt{\tau_*} \Phi_*) \quad (3)$$

$$E[y]/d = \frac{1}{2} \tau_*^{0.7} \{ 2A_3(\alpha/\rho + C_M)/A_2 C_D \} \quad (4)$$

$$f_*(\xi) = K_0(\xi) / \int_0^{\infty} K_0(\xi) d\xi \quad (5)$$

$$K_0(\xi) = \exp\left[-\frac{(\xi-1)^2}{2\alpha_y^2}\right] + \exp\left[-\frac{(\xi+1)^2}{2\alpha_y^2}\right] \quad (5')$$

$$C_B(y) = [q_{B*} / (\Phi_* \sqrt{\tau_*} \Phi_*)] \cdot f_*(y/\Psi_* d) \quad (6)$$

$$f_S(y|y_B) = \{[(h-y)/y](y_B/(h-y_B))\}^Z \quad (7)$$

$$Z = w_0/B\kappa u_* \quad (w_0 : \text{fall velocity}) \quad (7')$$

tion粒子の浮遊への遷移確率を $f_b(y)$ 、非bursting領域内のそれを $f_n(y)$ とすれば、 $p_{BS}(y)$ は式(8)のように与えられよう。実験による観察にもとづき、簡単のため、 $f_n(y) = 0$ 、 $f_b(y) = 1$ とおくことにする。また、 $p_b(y)$ は、ある高さ y における x - z 平面(x :流下方向、 z :横断方向)を考え、この平面をbursting渦が切る面積で与えることにする。burstingの発生間隔を λ_x 、 λ_y 、burstingの渦径を L_x 、 L_z とし、 y_B の有為な領域でこれらの y 方向の変化が無視できるとする。このとき式(9)が得られ、ここにおいてこれらのburstingの各スケールを中

川らの研究成果³⁾にもとづいて式(10)のように表すことにすれば、式(1)は結局式(11)のようになる。

4. 基準面濃度 ここに提案したモデルでは、いわゆる基準面濃度をとりたてて推定する必要はないのだが、他の研究者による従来の実験値と比較すること、また他の研究者の提案する簡単な表示式の相対濃度式を便宜上用いることをも考えて、 $a = 0.05h$ (h :水深)の高さで定義される基準面濃度を今回提案したモデルから求め、実験値との比較・検討を行なう。基準面濃度 C_a は式(11)より式(12)のように与えられる。図-1は道上⁴⁾の実験値と本モデルの計算結果を比較したものである。実験は中央粒径が $0.008 \sim 0.016$ cm、勾配が $1/170 \sim 1/427$ で行われており、Karman定数として実験値 0.37 を用いると実験値と理論曲線の対応は比較的良好である。次に、Vanoniの実験値⁵⁾は $d = 0.01$ cm、 $I = 1/400$ に対するものであり、Karman定数の実験結果は不明であるが、一定値 0.37 としたものと、Kennedyら²⁾の提案式を用いた二つの計算曲線の間にデータが集っている(図-2)。図-3には板倉⁶⁾の実験値を示した。これらはKarman定数を 0.4 として計算した理論曲線と良く一致している。さらに、図-4には実河川における計測データであるLane-Kalinskeら⁷⁾の結果を、Kennedyら²⁾の式を用いてKarman定数を与えた理論と比較している。理論曲線群から推定すると、粒径が 0.02 cm、勾配が $1/500$ 程度で得られたものと推定される。以上、実験値と本モデルの対応は概ね良好であることが認められた。

$$p_{BS}(y) = f_B(y) \cdot p_B(y) - f_n(y) \cdot (1 - p_0(y)) \quad (8)$$

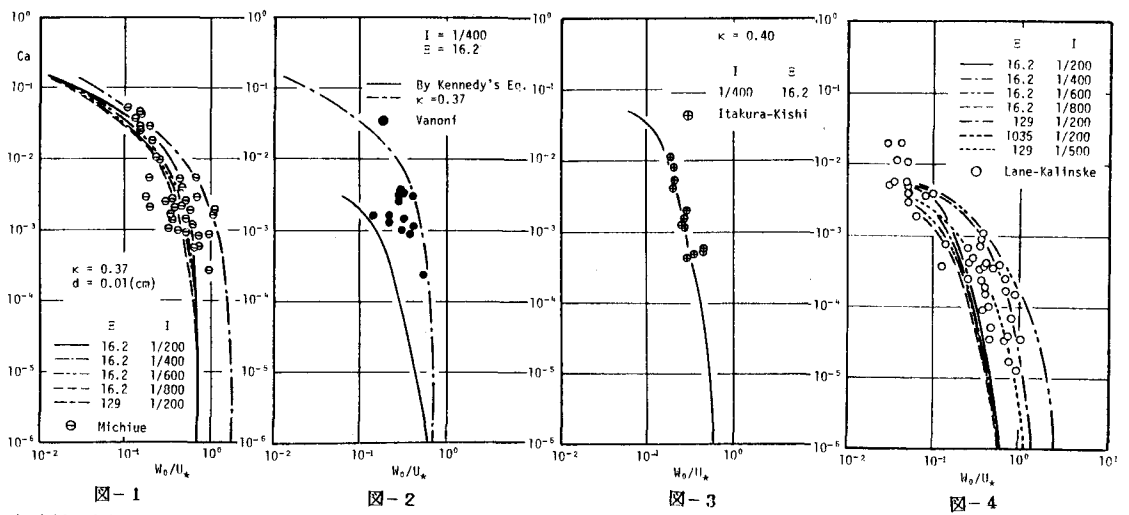
$$p_{BS} = (\pi/4) \cdot L_x \cdot L_z / (\lambda_x \cdot \lambda_y) \quad (9)$$

$$\lambda_x/h = 2, \lambda_z u_* / \nu = 100, L_x/h = 0.31, L_z/h = 0.08 \quad (10)$$

$$C(y) = (p_0/d) \int_0^h (f_B(y_B/\psi_* d))^2 \left(\frac{h-y}{h-y_B} \right)^2 dy_B \quad (11)$$

$$p_0 = 1.0 \times 10^{-4} hu_* q_{B_*} / (\sqrt{\tau_*} \cdot \psi_*^2 \cdot \phi_* \cdot \nu) \quad (11')$$

$$C_a = p_0 \int_0^h (f_B(\frac{y_B}{\psi_* d}))^2 \left[\frac{19n_B}{1-n_B} \right]^2 dn_B \quad (12)$$



1) 中川・辻本: 第28回水理講演会論文集 1983, pp.685-670 2) Karim, M.F. and J.F. Kennedy: Proc. 2nd ISRS, Nanjing, China, 1983
 3) 中川・弥津: 公害研所報告, 第19号, 1981 4) 芦田・道上: 防災研究所年報, 第13号B, 1970
 5) Vanoni, V.A.: Trans. ASCE, Vol. 111, 1946, pp. 67-133 7) Lane, F.M. and Kalinske, A.A.: Trans. AGU, Vol. 22, 1941, pp. 603-607
 6) Itakura, T. and Kishi, T.: Proc. ASCE, Vol. 106, NO. HY8, 1980, pp. 1325-1343