II-151 浮遊砂による貯水池の堆砂過程

九大 正員 平野宗夫
〃 ○正員 金子新
〃 学生員 武正治

1. まえがき

貯水池に浮遊砂が流入する時の堆砂過程に関しては，芦田等[1]，椿，平野等[2]，杉尾，岡部[3]等により研究されているが，いずれも多くの仮定を含み現象を厳密に説明するまでに至っていない。

本報告では，堆積の進む浮遊砂層の上を掃流砂が段丘を形成しながら進行するというモデルを設定し解析を行い，実測値と比較している。

2. 解析

1) Bottom-set bed 上の河床濃度について

図-1に示すように水平下流方向にx軸，鉛直上向きにy軸をとり，x，y方向の流速をそれぞれu，vとする。C，w_p，E_p をそれぞれ砂粒子の濃度，沈降速度及び拡散係数とする。

非定常二次元拡散方程式は，

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + (v - w_p)\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(E_p \frac{\partial C}{\partial y}\right) \qquad (1)$$

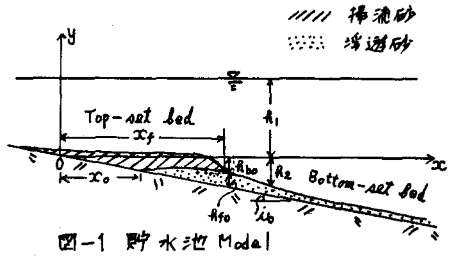


図-1 貯水池 Model

となる。段丘肩の位置を$x_f(t)$とし，$\xi = x - x_f(t)$なる座標変換を行えば，

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(u - \frac{dx_f}{dt}\right)\frac{\partial C}{\partial \xi} + (v - w_p)\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(E_p \frac{\partial C}{\partial y}\right) \qquad (2)$$

となる。$u \gg dx_f/dt$であり，段丘肩に乗った座標ξからみれば濃度は近似的に定常を保つと仮定すれば(2)式は，

$$u\frac{\partial C}{\partial \xi} + (v - w_p)\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(E_p \frac{\partial C}{\partial y}\right) \qquad (3)$$

となる。(3)式をyに関して$-h_2$からh_1まで積分し，連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (4)$$

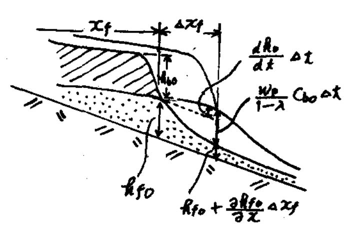


図-2 段丘の進行 Model

を使用し，水表面及び河床の境界条件

$$y = h_1 \quad : \quad E_p\frac{\partial C}{\partial y} + w_p C = 0$$
$$y = -h_2 \quad : \quad E_p\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \qquad (5)$$

を適用すれば(3)式は，

$$\frac{d}{d\xi}\left(\int_{-h_2}^{h_1} C u \, dy\right) + w_p C_b = 0 \qquad (6)$$

となる。ここに，C_bは河床濃度である。

流速及び濃度分布形を次式のように仮定する。

$$u(\xi, y) = U_m(\xi) f(\eta) \qquad C(\xi, y) = C_b(\xi) g(\eta) \qquad (7)$$

ここに，$\eta = (y + h_2)/(h_1 + h_2)$ U_m：平均流速

（7）式を（6）式に代入すれば，

$$\alpha q \frac{dC_b}{d\xi} + w_p C_b = 0 \qquad (8)$$

ここに，$\alpha = \int_0^1 f \cdot g \, d\eta$　　$q = u_m (h_1 + h_2)$　；単位幅流量

（8）式を解けば，

$$C_b(\xi) = C_{bo} \, e^{-\frac{w_p}{\alpha q} \xi} \qquad (9)$$

を得る。　　ここに，C_{bo} は段丘肩 $\xi = x - x_f = 0$ における河床濃度

2）段丘の進行について

浮遊砂を含む場合にも，近似的に段丘肩は水平に進行し，段丘肩における掃流砂量 q_{bo} 及び河床濃度 C_{bo} はほぼ一定を保つことはよく知られている。

図－2に示すような記号を用い，微小時間 Δt の後に段丘肩が Δx_f 進行したとすれば次の各式を得る。

$$\frac{dh_{bo}}{dt} + \frac{dh_{fo}}{dt} = i_b \frac{dx_f}{dt} \qquad (10)$$

$$h_{bo} \frac{dx_f}{dt} = \frac{q_{bo}}{1-\lambda} \qquad (11)$$

$$\frac{dh_{fo}}{dt} = \frac{w_p C_{bo}}{1-\lambda} + \left.\frac{\partial h_{fo}}{\partial x}\right|_{x=x_f} \cdot \frac{dx_f}{dt} = \frac{w_p C_{bo}}{1-\lambda} + \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} \cdot \left.\frac{\partial h_{fo}}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} \qquad (12)$$

（10）（11）（12）式より dh_{bo}/dt，dh_{fo}/dt，dx_f/dt を求めれば，

$$\frac{dh_{bo}}{dt} = \left(i_b - \left.\frac{\partial h_{fo}}{\partial \xi}\right|_{\xi=0}\right) \cdot \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} - \frac{C_{bo} w_p}{1-\lambda} \qquad (13)$$

$$\frac{dh_{fo}}{dt} = \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} \cdot \left.\frac{\partial h_{fo}}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} + \frac{C_{bo} w_p}{1-\lambda} \qquad (14)$$

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} \qquad (15)$$

を得る。Bottom－set bed における堆積厚を h_f とすれば（9）式より

$$\frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{w_p}{1-\lambda} C_b = \frac{C_{bo} w_p}{1-\lambda} e^{-\frac{w_p}{\alpha q}(x - x_f)}$$

となる。これを t で積分し，$x = x_f$ で $h_f = h_{fo}$ なる条件を用いれば，

$$h_f = h_{fo} \, e^{-\frac{w_p}{\alpha q} \cdot (x - x_f)} \qquad (16)$$

となる。（16）式を（13）（14）式に代入すれば，それぞれ

$$\frac{dh_{bo}}{dt} = \left(i_b + \frac{w_p}{\alpha q} h_{fo}\right) \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} - \frac{C_{bo} w_p}{1-\lambda} \qquad (13)'$$

$$\frac{dh_{fo}}{dt} = -\frac{w_p}{\alpha q} h_{fo} \frac{q_{bo}}{(1-\lambda)h_{bo}} + \frac{C_{bo} w_p}{1-\lambda} \qquad (14)'$$

となる。ここで，関係諸量を次のように無次元化する。

$$H_{bo} = h_{bo}/h_o \qquad H_{fo} = h_{fo}/h_o \qquad H_f = h_f/h_o$$

$$X_f = x_f/h_o \qquad X = x/h_o \qquad T = q_{bo} t/(1-\lambda) h_o^2 \qquad (17)$$

$$\theta = C_{bo} w_p h_o / q_{bo} \qquad \mu = w_p h_o / \alpha \cdot q$$

ここに，h_o は初期堆砂厚である。

（17）式を（13）′（14）′（15）（16）に代入すればそれぞれ

$$\frac{dH_{bo}}{dT} = (i_b + \mu H_{fo}) \frac{1}{H_{bo}} - \theta \qquad (18)$$

$$\frac{dH_{fo}}{dT} = -\mu \frac{H_{fo}}{H_{bo}} + \theta \qquad (19)$$

$$\frac{dX_f}{dT} = \frac{1}{H_{bo}} \qquad (20)$$

$$H_f = H_{fo}\, e^{-\mu(x - x_f)} \qquad (21)$$

となる。次に示す初期条件より数値計算を行う。

$$T = 0 \quad : \quad H_{bo} = 1 \quad H_{fo} = 0 \qquad (22)$$
$$X_f = x_o/h_o \quad H_f = 0$$

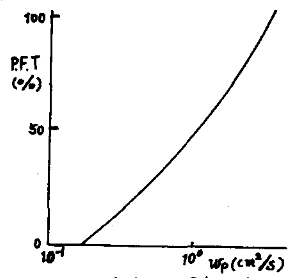


図-3 供給砂沈降速度分析結果

3．実験と解析の比較

実験には，長さ 11^m，幅 40^{cm}，深さ 30^{cm} の片面アクリル製の可変勾配水路を使用した。上流端には，給砂装置が設けられ傾斜板を経て水路幅一様に供給砂（硅砂）が拡がるようにしてある。流速は，プロペラ流速計により測定し，浮遊砂濃度はサイフォンで直接抽出し秤量した。表－1は，実験諸元を与え，それには芦田等[1]による実験も同時に示している。図－3は，供給砂の沈降速度分析結果を与える。

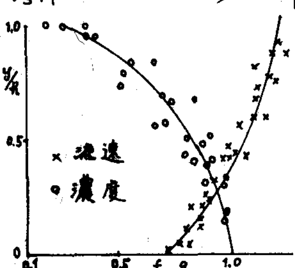
	q [cm²/s]	単位巾当給砂量 q_s [cm²/s]	q_{bo} [cm²/s]	C_{bo} [ppm]	浮遊砂 w_p [cm/s]	i_b	α	V_s [cm/s]	H [cm]
著者等の実験	225	0.114	0.04	562	0.5	1/50	0.75	0.016	4.1
芦田等の実験	250	0.569	——	——	0.4	1/30.8	0.7	0.027	——

表—1 実験諸元

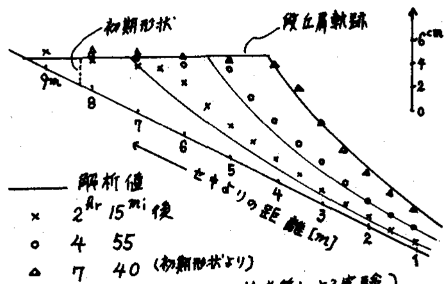
段丘肩を越える掃流砂量 q_{bo} は，段丘進行速度 V_s，Top-set bed における河床波の平均波高Hより次式で求める。

$$q_{bo} = (1-\lambda) V_s H \qquad (23)$$

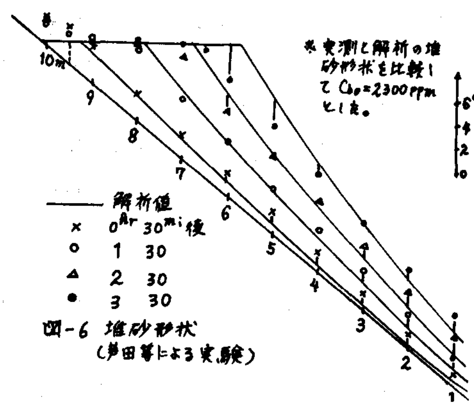
ここに，堆砂の空隙率 $\lambda=0.4$ とした。芦田等の実験では，Hが明らかでないので篠原，椿公式により $q_{bo}=0.047 cm^2/s$ を決定した。図－4は，Bottom-set bed 上の流速及び浮遊砂濃度分布の著者等による実測例を示す。実測値はかなりばらついているが，近似的に図の実線のような分布形を仮定し α を決定した。芦田等の実験に対しても同様である。図－5，図－6は，それぞれ著者等及び芦田等による堆砂形状の実測値と解析値を比較している。Fore-set bed の形状は，近似的に(21)式を $x<x_f$ まで拡張して決定した。どちらも，実測と解析はほぼ一致し，以上のような解析で浮遊砂をも含む貯水池の堆砂を議論できることが判った。実験に絶ゆまぬ援助をして頂いたパシフィックコンサルタント谷口直隆氏に謝意を表します。なお，数値計算には，九州大学計数施設 Facom 230-45S を使用したことを付記する。



図－4 流速及濃度分布



図－5 堆砂形状（著者等による実験）



図－6 堆砂形状（芦田等による実験）

参考文献：1)矢野，芦田，大同，前田"浮遊流砂による貯水池の堆砂に関する研究"京大防災研年報 第7号 昭.39.3 P.348

2)椿，平野，上浜"浮流砂の流入による貯水池の堆砂過程"第24回年次学術講演会概要集 昭.44.10 P.267

3)杉尾，岡部"浮遊土砂による貯水池の堆砂について"第29回年次学術講演会概要集 昭.49.10 P.247