

建設省土木研究所 正 土屋昭彦

建設省淀川工事事務所 # ○星畑国松

筆者らは、非定常時の浮遊砂の運動機構について差分モデルを設定し、前報において沈降時の実験結果との比較を試みてきたが、ここでは浮上過程について実験し、平衡に達するに要する流下距離、舞上り高さ等について検討し、提案したモデルとの比較を試みた。

1. 浮遊砂運動のモデル

浮遊砂の輸送現象について、前報においては最も簡単な

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + W_0 \frac{\partial c}{\partial z} \quad \begin{array}{l} U: \text{流れ方向の流速} \quad c: \text{各位置の濃度} \quad W_0: \text{沈降速度} \\ \epsilon: \text{渦動拡散係数} \quad x, z: \text{流れおよび深さ方向の位置} \end{array} \quad (1)$$

を差分したモデルを沈降過程に応用し、実験結果と良好な適合をみたがここでも同一のモデルを用いて浮上過程について検討する。

浮遊砂の問題としては、浮遊砂量、濃度分布等種々扱われているが、通常濃度分布と量の問題は別別に扱われる場合が多い。(1)式も流れ方向の濃度変化をとり扱ったものである。しかし、浮遊砂濃度が変化していく非平衡状態においては、濃度変化は河床からの舞上りまたは河床へ沈降する現象を式中に導入してとらえなければならない。このとらえ方として、(1)式を差分化した後に河床からの舞上り量を濃度の形で導入した(2)~(4)式を前報において導入した。

河床において

$$C_i^2 = C_i^1 (1+K) \cdot M + C_i^0 (1-M-M \cdot K) + C_{so} \quad (2)$$

中間点において

$$C_j^2 = C_k^1 (1+K) \cdot M + C_j^1 (1-2 \cdot M-M \cdot K) + C_i^1 \cdot M + C_{sj} \quad (3)$$

水面において

$$C_{jN}^2 = C_{jN-1}^2 (C_{jN-1}^1 / C_{jN}^1) \quad (4)$$

図-1 差分メッシュ

ここに、 $M = U \cdot \Delta Z^2 / \epsilon$ 、 $K = \Delta Z \cdot W_0 / \epsilon$ 、 JN : 深さ方向のメッシュの数である。

(2)、(3)式の C_{so} 、 C_{sj} は河床からの舞上り量を表わすものであり、純堆積時には 0 である。前報においてはこの状態について実験との比較を試みた。

さて、浮遊砂の濃度分布については、河床からある点 a の濃度 C_a が求められれば、その上方の濃度は平衡時の濃度分布形から明らかになり、流速分布形をかければ流砂量も求められるという事から、 C_{so} を求める研究が古くから実施されている。

それらの研究の代表例としては、Lane および Kalinske および Einstein があげられる。

前者は、河床材料から渦乱によって粒子が拾いあげられる割合は、渦乱によって生ずる流速の垂直方向の成分に比例すると考え、理論的考察を加え、米国河川の実測値と比較して半理論的に河床濃度

を求めている。後者は、掃流層内の濃度に接続するとしている。

土木研究所においては、浮遊砂が発生する状況を U_*/W_0 が 1 ~ 4 程度にわたって観察を実施してきたが、その中でつぎのようなことがいえる。

- (1) 掃流運動がさかんにになると saltation がみられるが、saltation 運動として河床から舞上った粒子は短い距離でもって河床にもどる。
- (2) 河床附近の流速が早くなってくると、砂れんをとびこえた saltation 粒子は次の砂れんをこすものも発生する。

しかし、河床から大きく舞上り、量的にも大きいものは、

- (3) 砂れんが生じ、特に三次元的な砂れんが発生すると、ねじれ流れが認められ、これが河床につきあつたところで河床砂が多量に舞い上げられる。この舞上り高さは 20 ~ 30 cm 程度の水深において数割に達する。

以上のような予備観察と(2)~(4)式の差分モデルによる予備計算により、平衡時においては浮遊砂中から河床へ沈降する量と河床から浮上する量の間にバランスが存在し、 C_s といったものも存在するが、河床から舞上る浮上砂についていえば直接的には平衡時の濃度 C_s とは関係なく、蓄積過程として存在するにいたると考えるにいたった。そのように考えると、浮上量をどのようにとらえるかということが重要になる。上述(3)の砂れんの後にできる二次流を浮遊砂の発生に最も関係するものととらえると、この渦による垂直方向成分を求めていけば河床砂にかかる力を正しく評価でき、河床からの浮上量を求める基礎を明らかにできるものと考えられる。しかし、筆者らは、この力および発生する浮上量を求める前に、浮遊砂が河床から舞い上げられて、平衡にいたるマクロな傾向をまず明らかにし、しかる後に河床附近の力学関係にたちもどるという研究態度をとることとし、次のように河床からの浮上量をとらえた。いま、河床からの浮上量を単位面積、単位時間当り q_s とする。河川が平衡状態にあるものとする、河床から浮遊砂を舞い上げる量は、流水中から沈降する量と等しくなければならないから、

$$q_s = C_{s0} \cdot W_0 \quad (5)$$

と表わされる。浮上量 q_s は、このように平衡時の濃度と結びつけられるが、舞い上げる例からは河床から舞い上げられた q_s の浮遊砂量は水中 z 地点の濃度が $C_s(z)$ となるものとする。さきにあげた(2)~(4)式に対応する各差分区分で論じると、毎差分区分 Δx に舞い上げられる浮上量は

$$\Delta x \cdot \int_0^h C_s(z) dz$$

となり、これは(5)式の q_s に差分区分 Δx および差分時間 $\Delta T = \Delta x / U$ をかけたものと等しいから

$$\Delta x \cdot \int_0^h C_s(z) dz = q_s \cdot \Delta x^2 / U = C_{s0} \cdot W_0 \cdot \Delta x^2 / U \quad (6)$$

と示される。(6)式を用いることによって、分布形がわかれば平衡時の濃度を求めることができる。

2. 浮上過程に関する実験の概要

実験は、水路巾 0.6 m、深さ 0.70 m、延長 24 m の鋼製（内中央 10 m 区間ガラス張）の勾配可変水路および水路巾 0.3 m、深さ 0.50 m、延長 150 m の鋼製水路を用いて実施した。

前者の水路においては、ガラス張区間の約 8 m 間に珪砂（平均粒径 0.21 mm）およびアンバーライト（平均粒径 0.57 mm）を敷き上流からの補給は実施せず、通水後河床上にほぼ一様な砂れんが生起

した時点で採水を実施し、流下方向の濃度分布の変化を測定し、また、上流端附近で舞上り高さを測定した。長大水路においては、珪砂を 50 m 区間に敷き、同様に給砂を実施せずに、浮遊砂濃度が増加し、平衡状態への移行状態を確認した。

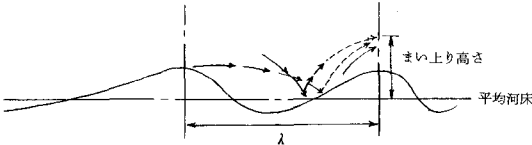
2.1 舞上り高さの測定

砂れんが発生し、特に三次元的な砂れんが発生してくると、ねじれ流れが発生し、鉛直上方に向う速度成分が卓越し浮遊砂の舞上りが顕著になる。この舞上り高を測定する方法については、実験観察を通して種々検討し、今回は以下のような方法をとった。即ち、流水中にもちこまれた浮遊砂はほぼ水平方向に流れているが、河床からまきあげられた砂は上方むきの成分が強いのこっており、両者の

表－1 舞上り高さ一覧表

位置 メース	上流から 0.5 m			上流から 1.5 m			上流から 2.5 m			流 量 δ/s	水 深 cm	備 要
	砂れ ん長	砂れ ん高	まい 上り 高	砂れ ん長	砂れ ん高	まい 上り 高	砂れ ん長	砂れ ん高	まい 上り 高			
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm			
1	30	2.0	5	25	2.0	8	20	2.0	8	72	20	嵐1～嵐6までは 珪砂、嵐7～嵐14 はアンバーライト
2	20	2.8	7	20	2.5	8	20	2.5	10	72	20	
3	—	—	5	30	3.5	9	25	3.5	7	63	15	
4	25	2.8	3	30	3.0	3.5	25	3.8	6	36	15	
5	30	3.0	3	30	3.5	6	20	2.3	5	45	15	
6	20	2.0	5	25	4.3	9	50	4.0	14	54	15	
7	60	2.3	2.5	25	2.7	6	20	2.0	3	24	20	
8	40	1.1	2	30	3.9	6	50	3.4	7	30	20	
9	40	2.0	4	50	6.0	4	50	4.0	9	36	20	
10	30	1.7	4	25	4.0	6	50	4.5	8	48	30	
11	30	2.6	2	30	1.3	4	30	2.2	4	42	30	
12	50	3.8	3	35	3.6	5	20	2.3	6	36	30	
13	50	1.1	5	30	2.6	4	25	3.3	6	72	40	
14	40	3.2	4	40	4.5	4	25	3.0	4	40	40	

区別をすることができる。しかし、浮遊砂としての舞い上りは、砂れんの後流によるところが多いといったが、その場所は一ヶ所と限ることはできない。したがって、一つ一つの舞い上りをおっかけることをせず、一つの砂れん全体での舞上り高を測定するという考えから、次の砂れんの山をこえる地点における舞上り高さを平均河床から測定し、これを舞上り高さとした。模式的にかくと図－2の通りである。測定は、舞い上り高さとともに、砂れん長、砂れん高も測定したが、これらの結果は表－1の通りである。本結果によると、舞い上り高さは少ないもので1割程度、高いものでは5割以上におよんでいるものがある。これらの舞い上り高さには、砂れんの形状、二次流の構造等河床附近の水利量に支配されるものと考



図－2 まい上りの模式図

2.2 平衡状態までの濃度変化の実測

浮遊砂濃度 0 から平衡状態への変化については、24 m 水路および 150 m 水路の両者で実験した。24 m 水路における実験結果においては、7 m から 10 m 附近の濃度がほぼ等しく、時には逆転してお

い。

り、平衡状態に近いことを想定させるが水路長が短いため確認ができなかった。150 m水路実験においては、水深約 20 cm、流量 24 l/s、勾配 1/730 の等流条件において 2 回実験を実施した。結果は、個々の濃度については差があるが全体の傾向としてはほぼ妥当なものと認められた。

第 2 回実験について述べると、結果は図-2 の通りである。上流から 1 m、2 m、10 m までは徐々に増加していき、10 m から 50 m の間の結果を比較すると、下流側で逆に濃度が低下しているものがあり、10 m 程度の地点でほぼ平衡に近いものと考えることができる。

3. 実験結果への浮上理論の適用

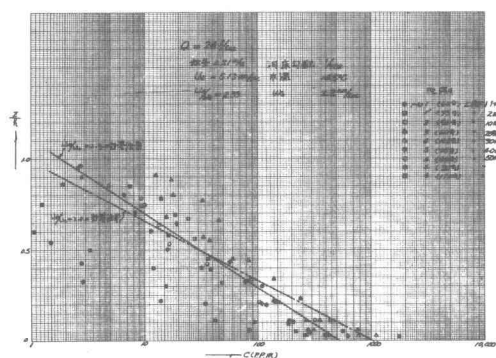


図-3

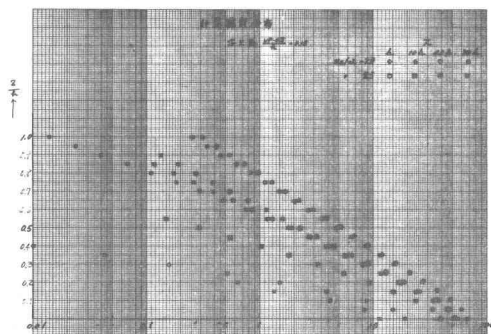


図-4

1 の理論を用いて 2 の実験結果との比較を試みる。このためには U_* / W_0 と浮上濃度 $O_s(z)$ の深さ方向の分布を与えなければならない。ここでは、浮上濃度の型としては、三角形分布とし、舞い上がり高さとしては、表-1 の結果を参考に水深の 1.5 割程度とした。△z は水深の 1/40 をとった。

U_* / W_0 は、実験においては 2.3 程度であるが、計算においては、2.0 と 2.5 の両者について実施し、両方から比較することとした。

これらの結果は、図-4 にまとめて図示した。計算結果をみると、上流から下流にむけて濃度増加が生じ、特に、河床附近から上方にむけて濃度が増していくことがわかる。特に、初期の濃度変化は大きい。流下距離が水深の 40 倍

程度以上になれば、濃度変化が非常に小さいことがわかる。さて、本計算結果を図-3 と比較するわけであるが、本計算においては、最初に浮上砂量を与えずに、三角形の面積が△z となるように与え、後に O_{00} が明らかになれば(6)式より求めるという風に考えた。それ故、本計算結果の河床附近の値をフリーにして、実験結果とかさねて勾配が合致すればよいが、このような意味で図-4 の平衡時の濃度分布を図-3 中に挿入すると、図の如くほぼ対応することがわかる。また、実験結果においてほぼ平衡に達するのが水深の 50 倍程度であり、この数値も計算結果と対応しているため本差分モデルにより浮遊砂が河床から舞い上げられて平衡状態に移行していく状況を表わしうるものと考えられる。

4. 以上(2)~(4)式の差分式によってある程度浮遊砂の運動が表わせるようであるが、浮上砂の濃度分布等解明しなければならない多くの問題が残されており、今後更に研究を進めたい。