

II-137

非平衡流砂過程に関する検討

京都大学大学院 学生員 後藤 仁志

京都大学工学部 正 員 中川 博次

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

1. まえがき 移動床現象においては砂粒子の確率的かつ離散的な運動が本質的な特性であり、これが流砂の非平衡性を産みだすことを考えると、bed material load の流送過程として、掃流砂・浮遊砂を便宜的に区別することなく、河床構成材料、掃流砂、浮遊砂の各相間の遷移を考慮しつつ1個の砂粒子の連続的な運動としてとらえ、統一的な取り扱いをすることが重要であると考えられる。ところで、こうした流砂運動の本質的特性を取り込んだモデルとして、いわゆる掃流砂に対する Euler 的に理解された stochastic model が挙げられ、本研究ではこのモデルの基本的なフレームワークを掃流砂と浮遊砂とが混在する場に拡張・適用を図るものである。

2. 非平衡流砂過程のモデル化 本研究では掃流砂を saltation に代表される確定論的運動軌跡からのずれのほとんどないもの、浮遊砂を乱れの効果により確定論的軌跡からずれて、乱れによるランダム運動性状を示すものに至ったものと定義する。こうした定義に従うと、各相間の力学的区分規準が明確となり、bed material load の流送過程を、ある相からある相への各々の生起・遷移と、ある相の流送特性によって表現できる。河床粒子から掃流砂への遷移(生起)確率密度が pick-up rate であり、掃流砂としての流送(運動)特性は step length の確率特性によって表される。浮遊砂への遷移としては河床粒子からの直接的な生起と掃流砂からの遷移が考えられるが、従来、掃流砂を中心に考えられてきた非平衡流砂現象に及ぼす浮遊砂の存在の効果を明らかにしようとする、後者の立場よりのモデル化のほうが有利と考えられる。また、非平衡状態にある浮遊砂の場合、その水深方向の濃度分布型も重要であるが、簡単のため本研究では浮遊砂量のみを扱うこととする。図-1を参考にすると、掃流砂から浮遊砂への遷移またその逆の遷移を考慮した局所掃流砂量式及び局所浮遊砂量式は次式で与えられる。

$$q_B(x) = (A_3 d / A_2) \int_{x_0}^x \{p_s(x-\xi) + p_{ds}(x-\xi)\} G_{XB}(\xi) \cdot F_{TR}(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_{ds}(x) = (A_2 / d A_3) \int_x^\infty [q_B(x-\xi) / u_g(x-\xi)] \cdot \bar{p}_t(x-\xi) \cdot f_{XS}(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$q_S(x) = \int_0^{x-x_0} [q_B(x-\xi) / u_g(x-\xi)] \cdot \bar{p}_t(x-\xi) \cdot G_{XS}(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A_2, A_3 = 砂の 2, 3 次元の形状係数; $G_{XB}(\xi), G_{XS}(\xi)$ = 掃流砂の step length 及び浮遊砂の travelling distance が ξ 以上である超過確率であり、 $G_{XB}(\xi) = \int_\xi^\infty f_{XB}(s) ds$, $G_{XS}(\xi) = \int_\xi^\infty f_{XS}(s) ds$ と表され、 $f_{XB}(s), f_{XS}(s)$ はそれぞれの確率密度関数; $F_{TR}(\xi)$ = 河床から離脱した砂粒が水平距離 ξ だけ移動する間に遷移しない確率; $p_{ds}(x)$ = 浮遊砂から掃流砂に逆戻り(遷移)する単位時間当りの確率密度; u_g = 砂粒の移動速度; $\bar{p}_t(x)$ = 各断面での水深方向に平均化された浮遊砂への単位時間当りの確率密度; x_0 = 流砂の原点である。後述する実験において最も基本的な非平衡流砂過程である固定床・移動床接続部における流砂現象に対して本モデルの適用性が検討されるが、先ず本モデルの基本的な特徴を明らかにするためこの状況下での平衡状態に対する検討を行う。等流状態を仮定すると、流下方向に $p_s, \bar{p}_t, u_g$ は一定とみなせ、さらに、掃流砂の step length 及び浮遊砂の travelling distance がそれぞれ平均値 Λ_B, Λ_S の指数分布に従うものとする。掃流砂から浮遊砂への遷移はランダム事象と考えられるから、 $F_{TR}(\xi)$ は $F_{TR}(\xi) = \exp[-(\bar{p}_t / u_g) \xi]$ と近似できる。流砂の原点より十分離れた下流($x \rightarrow \infty$)では、 $q_B \rightarrow q_{Be}$, $p_{ds} \rightarrow p_{dse}$, $q_S \rightarrow q_{Se}$ であることを考慮すると、前述の仮定と式(1)~(3)より、平衡状態での値として次式が得られる。

$$q_{Be} = (A_3 d / A_2) p_s \Lambda_B ; \quad p_{dse} = (A_2 / A_3 d) (\bar{p}_t / u_g) \cdot q_{Be} ; \quad q_{Se} = (\bar{p}_t \Lambda_S / u_g) \cdot q_{Be} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は平衡状態では掃流砂量は浮遊砂量と独立して定まり、また掃流砂への逆戻りの遷移確率 p_{dse} も $\bar{p}_t$ (

あるいは $\overline{p_i}/u_g$)さえ評価すれば、掃流砂量に依存し求められることを示している。さらに浮遊砂量は掃流砂量に依存し、 p_i 及び Λ_B さえ評価できれば決まり、従来のモデルと違い、規準面濃度を媒介せずに浮遊砂量が決まるという特徴を持っている。従って、 p_i 及び浮遊砂のtravelling distance の確率特性の評価が本モデルでは重要であることが理解される。

3. 実験的検討 実験は図-2に示すような長さ8m、幅12cmの可変勾配水路に設置された固定床粗面に接続する移動床での流砂過程を側方よりの8mmビデオ解析によって検討した。使用粒子は比重 $\sigma/\rho=1.03$, 平均粒径 $d=0.128\text{cm}$ の一様なABS粒子であり、実験条件は表-1に示されている。またビデオ解析による検討のため、水路幅を狭めているため固定床上で流速分布及び乱れ強度分布を測定した例が図-3に示されている。掃流砂の平均 step lengthは平衡流砂量式より $\Lambda_B=(A_3 d/A_2) p_s/q_B$ として逆算した。ただし、流砂量公式としては、Bagnold 式を用いた。また、 u_g はirregular successive saltationのsimulationより得られた掃流砂の平均存在高さにおける流速で代用した。一方、 p_i 及び浮遊砂のtravelling distance については著者らによって検討されており、 p_i については本実験の水理量に対しては図-4のようである。一方、 Λ_s の τ_* に対する変化は図-5に示されている。浮遊砂量の流下方向変化の実験値と本モデルによる計算値とを比較した例が図-6であり、両者の対応は比較的良好である。

4. あとがき 本研究では掃流砂に対するstochastic modelの拡張を試みたが、遷移確率及び浮遊砂のtravelling distance に対する力学的検討をさらに進めモデルの改良に努めるとともに、様々な非平衡流砂現象への適用を図りたいと考えている。なお、本研究の実験・解析に当っては、八杉隆君（当時京都大学大学院、現阪急電鉄株）の協力を得たことを記して謝意を表する。

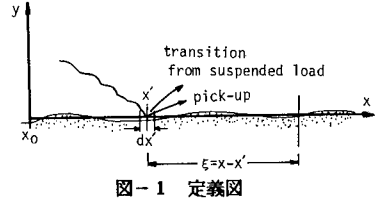


図-1 定義図

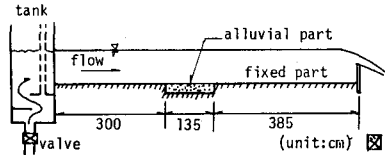


図-2 実験水路図

RUN	i_b	i_w	i_e	$U(\text{cm/s})$	$h(\text{cm})$	$u_* (\text{cm/s})$	w_0/u_*	τ_*	Re_*	Fr
1	0.001	0.00055	0.00056	10.8	6.25	1.80	0.65	0.86	23.0	0.14
2	0.001	0.0009	0.0009	15.1	7.00	2.35	0.50	1.46	30.1	0.18
3	0.001	0.001	0.001	18.5	7.90	2.57	0.46	1.75	32.9	0.21

表-1 実験条件

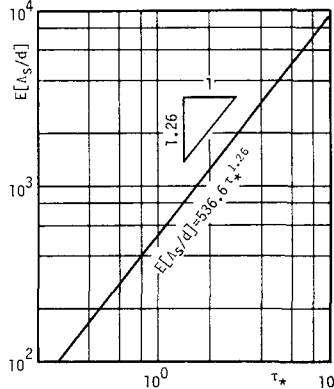


図-5 $E[\Lambda_s/d] \sim \tau_*$

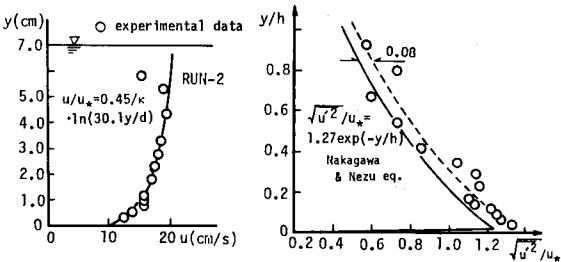


図-3(a) 流速分布（実験例） 図-3(b) 乱れ強度分布（実験例）

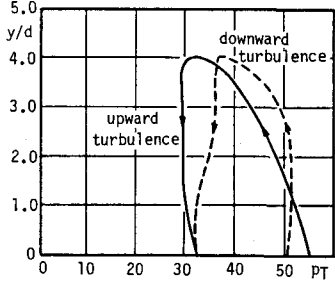


図-4 $y/d \sim p_i$

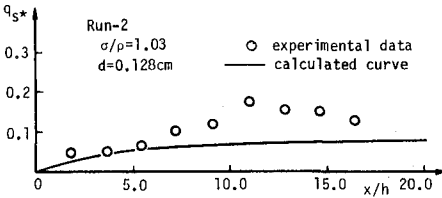


図-6 浮遊砂量の流下方向変化（実験値と計算値の比較）