

砂れきの掃流機構に関する考察

京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学大学院 学生員 辻本 哲郎
 京都大学大学院 学生員 ○宮本 博司

1 まえがき さまざまな移動床現象を統一的にしかも合理的に説明するためには 個個の砂れきの運動機構を明確にしておかねばならない。しかも運動機構を力学的に扱おうとすれば対象とする砂れき個数も多く、また現象に関係する確率的要素も多く、統計的な手法を持ち込む必要がある。本論文はこれに鑑み、砂れきの掃流過程における特性量をいま一度検討し、とくに砂れきの移動速度とその分布を測定した結果について若干の考察を加えたものである。

2 掃流過程の特性量 砂れきの掃流の基本的性質は、間けつな運動をすることと、河床と絶えず接触して河床砂との交換を繰り返すことである。Einstein¹⁾はこのような性質に注目し図-1に示されるようなモデルで砂の挙動を表現した。これにもとづく stochastic model はかなり現象に忠実なモデルと言え、掃流の特性量が step length と rest period の逆数である pick-up rate p_g であることがわかる。著者らはすでに砂の移動機構の考察からこれらを比較的合理的に推定するモデルを提案したが²⁾、図-1を見てわかるように砂の挙動を厳密に表示するには、砂の運動時間すなわち砂れきの移動速度も必要なパラメータである。ところで、個個の砂れきの移動特性から河床の変形過程を説明するには流砂の連続式を加味しなければならず、この場合砂粒が河床から飛び出す割合の他に河床に落ち着く砂粒の個数の評価も必要である。図-2を参考にすると、時間 $(t, t+dt)$ に領域IIから離脱し、 $(t, t+dt)$ に領域Iに落ち着く砂れき個数は、

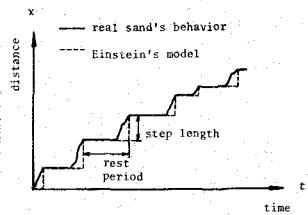


図-1 砂移動のモデル

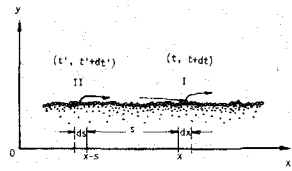


図-2 記号図

$(ds/A_2d^2) \cdot p_g(x-s) dt' \times \text{prob}\{t-t' < T_m < t-t'+dt, s < X < s+ds\}$ であり、ここに T_m 、 X は運動時間および step length である。このうち、 $\text{prob}\{\dots\}$ は、step length、移動砂れきの速度の分布の確率密度関数をそれぞれ $f_X(s)$ 、 $f_g(u_g)$ とすると、若干の式の変形を経て、次のようにかける。

$$\{s/(t-t')^2\} \cdot f_X(s) \cdot f_g(s/t-t') \cdot dt' ds$$

すなわち、pick-up rate、step length の他に 移動砂れきの速度およびその分布の評価も必要である。これらのことから、以下まず実験によって移動砂れきの速度の測定を行なった。

3 移動砂れきの速度について

(1) 実験 実験は長さ 9m 幅 33cm の水路において、中央粒径 0.14, 0.098 cm の2種類の砂で行なわれた。水路の真上から移動砂れきを 16 mm 撮影 (2秒ずつ 10秒間隔で 5分間、24コマ/sec) し、フィルムモーションアナライザーを用いて解析した。今回の結果は、一撮影時間のものから任意に標本抽出し、砂粒の移動速度 u_g (1/8秒間の移動距離から求めたもの) と平均移動確率 n_g とを求めた。なお実験はほぼ平坦河床で行なわれ、また同様の測定を固定床上の砂移動についても行なった。

(2) 結果 移動床での移動砂れきの平均速度 \bar{u}_g の測定結果は図-3に示される。図中には室田ら³⁾の実験結果も併示し

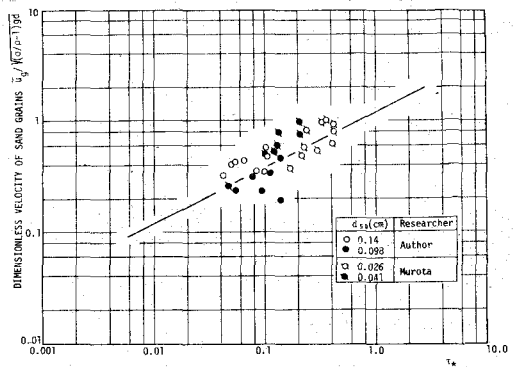


図-3 砂れきの移動速度 (移動床)

たが、これらより平均的に次式が認められた。

$$\bar{u}_g^* \equiv \bar{u}_g / u_* = 1.2 \quad (\text{const.})$$

次に、 u_g の変動係数は 図-4 からわかるようにほぼ一定で約 0.7 である。移動砂れきの速度の分布を、この変動係数を有する Gamma 分布に適合させると、 u_g^* $\equiv u_g / \bar{u}_g$ の確率密度関数 $f_g(u_g^*)$ は次式で与えられる。

$$f_g(u_g^*) = 4 \Gamma(2) u_g^* \exp(-2u_g^*)$$

図-5 は実験によって得られた u_g^* の累積確率と上式から得られる計算値とを比較したもので、上式が十分な適合性を有することが認められた。一方、固定床においては、図-6 に示されるように u_g^* は 5~8 と移動床の結果に比べ大きく、また底面せん断力とともに増加する傾向がみられる。また、 u_g の分布形は 図-7 に示されるように移動床の結果と若干異なっている。図中の破線は変動係数が 0.4 の Gamma 分布を示している。

(3) 考察 移動床における砂粒の運動に対しては次式が成立するものと考えられる。

$$\tau = \tau_b + \nu_g \frac{1}{2} \rho_D (u_g - u_d)^2 A_2 d^2$$

ここに、 τ_b は砂面に働くせん断力で、移動床ではほぼ限界掃流力に近い値であると予想される。また、 ν_g : 単位面積あたりの移動砂粒数、 ρ_D : 抗力係数、 A_2 : 面積に関する形状係数、 u_d : 局所代表流速である。上式において未知数は ν_g と u_g でこれらを決定するには更にエネルギー効率を与える式が必要でこのことは更に詳細な機構を解明しなければならないことを示している。また、掃流砂量は、 ν_g と u_g とを用いて簡単に表わされるが、今回測定された移動確率 n_x から $\nu_g = n_x / A_2 d^2$ として求められたものから計算したものは、実測値の 1~2.5 倍となり、 ν_g の正確な測定法を検討中である。一方、固定床上の単一粒子の運動は、 τ_b がある程度大きくなると step length が相当大きくなり²⁾測定された u_g が u_d 程度にまでなることが予想される。なお、著者らの実験は、 ν_g が無視できない程大きく、 u_g は他の実験者の結果^{4), 5)}に比べ小さくなっている。今後固定床実験で ν_g と u_g との関係を見出し、その相互作用を探る必要があると考える。

4 あとがき 以上、掃流過程において移動砂れきの速度も重要な量であることに注目し、実験によりその特性を調べたが、流送時の ν_g と u_g との関係、 u_g の分布の物理的意味など掃流のメカニズムはほとんど明確でない。今後基礎的な実験を通してこれらを明らかにしていきたいと考える。

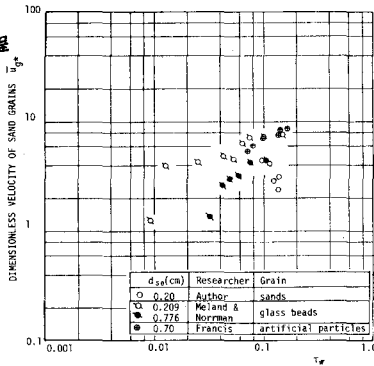


図-6 砂れきの移動速度 (固定床)

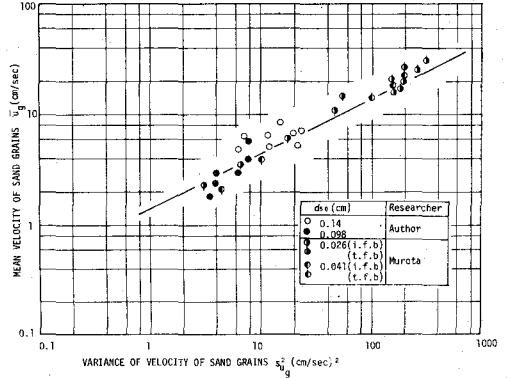


図-4 砂れきの移動速度とその分散との関係

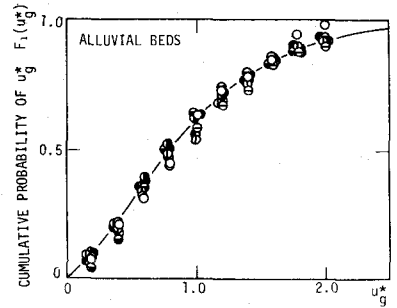


図-5 移動砂れきの速度分布 (移動床)

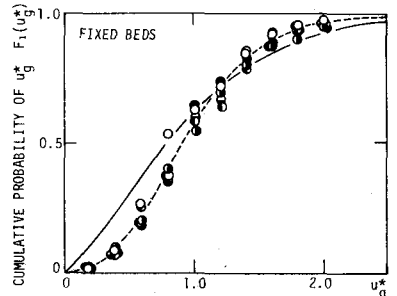


図-7 移動砂れきの速度分布 (固定床)

参考文献 1) Einstein:

Verlag Rascher, 1937. 2) 中川・辻本:土木学会論文報告集, 第244号, 1975. 3) 室田・多田・平田:第19回水理講演会論文集, 1975. 4) Meland et al.:Geografiska Annaler, 48A, 1966. 5) Francis:Proc. Roy. Socl. London, A332, 1973.