

掃流砂れきの運動における不規則性状について

京 都 大 学 工 学 部	正 員	中 川 博 次
京 都 大 学 工 学 部	正 員	辻 本 哲 郎
運 輸 省	正 員	○ 細 川 泰 康
京 都 大 学 大 学 院	学 生 員	村 上 正 吾

1. まえがき 砂の移動によって生じる様々な移動床現象は個々の砂れきの運動に内在する固有の特性にもとづいて統一的かつ合理的に説明されるべきであると考えられる。しかしながら、掃流砂れきの運動は水流と河床形状の両者に支配され、しかも確率的特性の強い複雑な現象であるために最も簡単な平堰河床の場合でさえその力学的機構に基づいた砂移動モデルは確立されているとはいえない。こうした点に鑑み、本研究では移動床水路での砂れきの運動（実験砂の中央粒径：0.185, 0.276 cm）を16mm高速度カメラを用いて詳細に観察し、砂れきの移動速度の場所的・時間的变化に着目した検討からこうした粒子運動過程に基づいた流砂モデルを確立するための基礎的知見を得る。

2. 掃流砂れきの運動特性 (1) 掃流砂れきの不規則運動性状：撮影された16mmフィルムはダイナミックフレームによって1コマずつ解析され、砂れきの移動開始からの移動速度の時間的・場所的な変化を調べた。こうした運動解析結果の一例が、移動速度 v と時間 t の関係については図-1に、また距離 x との関係が図-2に示されている。これより、移動速度は時間的にも場所的にも不規則に大きく変動していることが理解され、この変動の原因として (a) 流体力の変動、(b) 移動砂れき同志の相互干渉作用、(c) 河床砂れきとの衝突等が考えられる。先の図に見られた速度変動のうち、鋭いピークは砂れきの運動に直接作用する河床砂れきとの衝突によって移動速度が激減することによるものと考えられる。またピーク間の小さな変動は流体を介した間接的效果によるものと考えるのが妥当である。すなわち、砂れきの流送過程は床面の突起との衝突過程と突起間での衝突がない運動過程から構成されていると考えて良い。そこでまず、このような砂れきの速度変化に効果的な突起（有効突起）の特性（突起間隔、突起高さ）について検討する。

(2) 有効突起に関する検討：図-1あるいは図-2においてピーク間の時間 t と距離 x を読み取りその統計的性質を調べることから有効突起間距離または突起間の衝突時間間隔の平均値及び変動係数について次式を得た。 $\bar{x}/d = 6.0 \sim 7.0$, $\alpha_x = 0.6 \sim 0.7$ (1)

$\bar{t}u_* / d = 2.0 \sim 3.0$, $\alpha_t = 0.4 \sim 0.5$ (2) また分布形として次式で表わされる gamma 分布 (平均値で標準化されている) を仮定すると図-3または図-4に示されるようにその適合性は良好である。

$$f(\xi) = \{r/\Gamma(r)\} (r\xi)^{r-1} \exp(-r\xi) \quad (3)$$

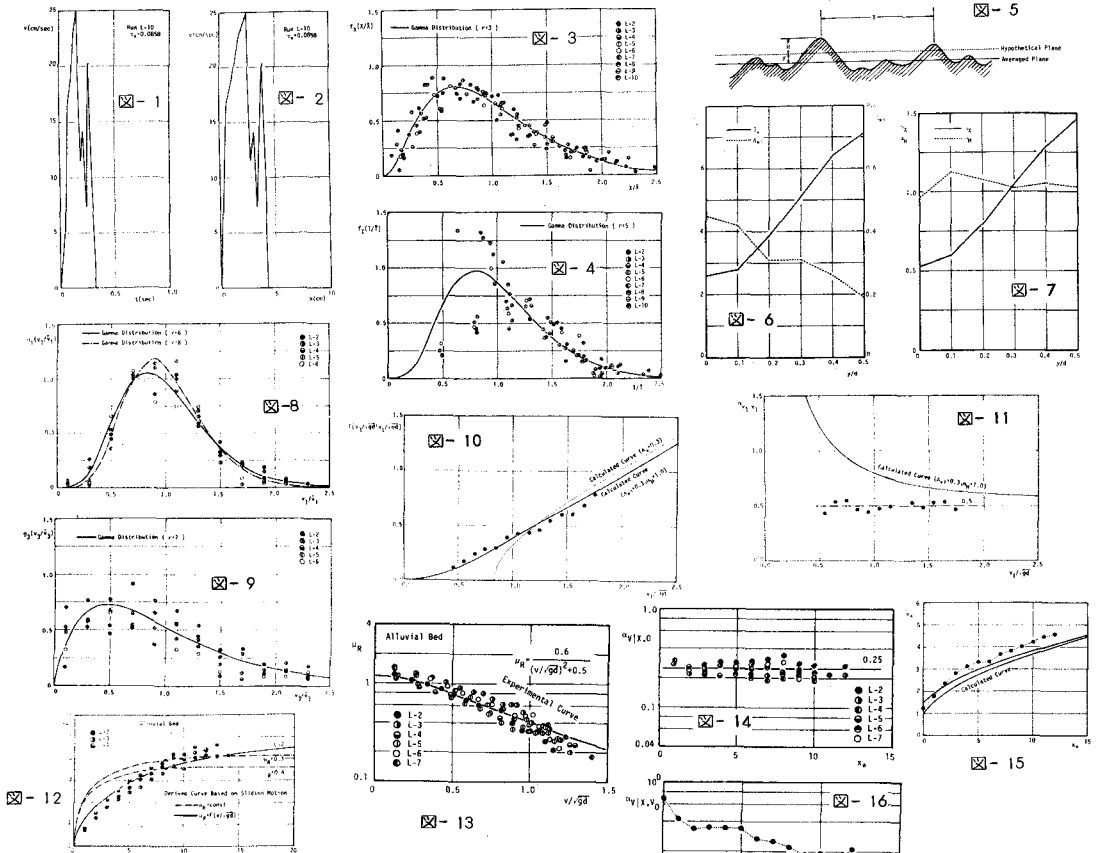
ここで $\Gamma(\cdot)$ は gamma 関数、 r は shape parameter である。次に突起高さについては実際の移動床砂面高さをポイントゲージで直接測定することにより検討した。図-5に示すような砂面形状に対して、砂れきは必ずしも床面の凹凸に沿って運動するわけではないことを考慮して運動面を平均河床面から y だけ上方の平行な平面と仮定し、これより上方にある突出部の高さ H あるいはその間隔 X についてその統計的性質を y と関係つけて調べた。この結果が図-6と図-7に示されており、これより運動面を平均河床面から粒径の0.3~0.4倍程度上方に想定すると突起間隔の平均値については先の間接的推定値と良く対応する（しかし変動係数については運動面を平面と仮定したために倍程度の値となっている）。この時、突起高さについては変動係数がほぼ1程度と見なせることから概ね指数分布に従うことが推定され、その平均値は粒径の約0.3倍程度である。

(3) 衝突過程に関する検討：次に突起との衝突前後の砂れき速度について検討する。すなわち、図-1あるいは図-2においてピークでの値は突起との衝突直前の速度(v_1)と考えられ、また谷の部分は衝突直後の速度(v_3)と考えられる。各ケース毎にこれらの値を読み取り、その統計的性質を調べたような結果を得た。 $\bar{v}_1/u_* = 3.20$, $\alpha_{v_1} = 0.40$ (4) $\bar{v}_3/u_* = 1.20$, $\alpha_{v_3} = 0.70$ (5)

またこの場合も gamma 分布を適合させると図-8と図-9に示されるようにほぼ良好であると判断される。ここで v_3 の変動係数が v_1 のその倍程度にまで増加しているのが注目すべき点で、これは突起高さの不規則性が加わったためである。ところで衝突過程を表示するには、 v_1 と v_3 の両者とも確率変数であるために推移確率 $h(v_3|v_1)$ として表わすのが妥当である。したがって条件付確率変数 $\{v_3|v_1\}$ について検討する必要がある、図-10と図-11にそれぞれ平均値と変動係数について実験結果を示した。この推移確率は突起との衝突機構に基づいて導くことができ、ここでは球の突起への衝突モデル¹⁾から算定する。したがって、突起乗り越し前後の速度の関係は次式で与えられる。

$$v_3/\sqrt{gd} = \sqrt{\{(1+4k^2/d^2 - 2\Delta_*)/(1+4k^2/d^2)\} v_1^2 / gd - 2\Delta_* B_*} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta_* = H/d$ k : 球の回転二次半径、 $B_* = (\sigma/\rho - 1) / \{ (\sigma/\rho + C_M)(1 + 4k^2/d^2) \}$ である。上式において突起高さの確率密度を $f_H(\Delta_*)$ とすれば、推移確率は次式で与えられる。 $h(v_3^*|v_1^*) = f_H(\Delta_*) |\partial \Delta_* / \partial v_3^*|$ (7) ここに、 $v_1^* = v_1/\sqrt{gd}$, $v_3^* = v_3/\sqrt{gd}$ であり、 Δ_* は式(6)に Δ_* について解いたものである。(1)での検討から Δ_* は平均値が 0.3 の指数分布に従うことが示されており、この時の式(7)の計算曲線が図-10と図-11に実線で示されている。このような衝突モデルで衝突過程の平均特性は良く説明することができるが、変動特性までは説明し得ない。これは先の衝突モデルには衝突時の砂れきのずれ動き、あるいは流体力の効果等が考



慮されていないためと考えられる。なお、図-10の点線は Δ_* を確定量として扱った時の計算曲線であり、この場合は現象の平均的挙動でさえ説明し得ず、これは現象の特性量を確率変数で扱うことの意義が示された好例の一つである。以上の考察から推移確率の平均値、変動係数として次式が得られた。

$$E[v_3^*|v_1^*] = 0.08v_1^{*2} + 0.3v_1^*, \quad \alpha_{v_1|v_3} = 0.5 \quad (8)$$

(4) 運動過程に関する検討: まず移動開始後最初の突起に衝突するまでの砂れきの運動特性について検討した。図-12は移動速度のアンサンブル平均と距離の関係を示したものである。図中の一点鎖線は砂れきの運動を滑動形式で表示した場合の計算曲線であるが、これより摩擦力を一定とした扱いでは現象を説明できず、摩擦力が移動速度に依存するとした取扱いが必要であることが推察された。そこで、各状態での摩擦係数 μ_R を、その運動軌跡から推定し μ_R の $v/\sqrt{gd}$ に対する関係を示したのが図-13である。なお、図中の実験曲線に基づく計算曲線が図-12に実線で示されている。また変動係数についての実験結果が図-14に示されており、これは場所的に一定で約0.25程度の値を取ることがわかる。次に突起間について検討した結果が平均値については図-15に、変動係数については図-16に示されており、この場合も平均値は先の滑動形式による表示で充分であることがわかる。また変動係数は(2)で検討した衝突直後の速度の変動係数(約0.7)から減少してゆき、粒径の6倍程度(突起間の平均距離)では約0.4であり、最終的には0.2程度の値の収束していることが認められる。すなわち、移動床での砂れきの移動速度の変動係数は突起との衝突がなければ約0.25程度であるが突起との衝突によって変動特性が増大し、任意の断面を通過する砂れきについては約0.5²⁾となっている。

参考文献

- 1) 中川・辻本: 土木学会論文報告集, 244号, 1975,
- 2) 中川・辻本・宮本: 京大防災研年報第21号B, 1978.