

京都大学防災研究所 正会員 矢野 勝正
 京都大学工学部 正会員 土屋 義人
 京都大学大学院 学生会員 O青山 俊樹

〔1〕 緒 言

砂れきの掃流現象は、移動砂れきと河床砂れきとのめきあうしい交擦によって特徴づけられ、一般にその現象は河床面近くに限定されている。ここでは、掃流砂れきの運動を *Saltaion* と考え、それらが集団として運動する場合の流砂機構を考察する。とくに、解析にあたっては、従来ほとんど考慮を払われていなかった流砂間衝突の現象を明らかにするように努めた。すなわち、本研究では、粒径 0.40 cm の砂れきが、アクリライト板製の幅 20 cm 、高さ 15 cm の長方形断面を有する循環式閉水路中で移動する状態を 16 mm 撮影機で写真撮影し、その運動をフィルムモーションアナライザーで詳細に読みとって、流砂現象の姿態を究明しようとしたものである。なお、図-1は砂れきの運動軌跡を示したものの一例である。

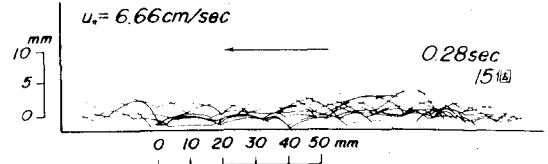


図-1 砂れきの運動軌跡

〔2〕 *Saltaion* の機構

まず、撮影されたフィルムによって流砂現象を観察した結果、掃流砂れきの運動機構に、つぎの7つの基本的な現象があることが見出された。

(1) 静止(A)；砂れきの静止状態をいい、振幅のまわりの小さな振動を行なっている砂れきの状態も含む。(図-2:A 参照)

(2) 流体力による移動開始(B)；流体力によって移動を始める砂れきは、下流側の砂れき上を転動し、それを乗り越えて跳躍に移行するように観察されるが、その跳躍開始の位置は下流側の砂れきとの相対位置も流体力の作用によって変わる。(図-2:B 参照)

(3) 衝突による移動開始(C)；図-2:C に示されるように、跳躍してきた砂れきが、静止している砂れきに衝突し、これを乗り越えさせる現象で、跳躍してきた砂れきが停止する場合と、そのままの跳躍に移行する場合の2つが考えられるが、一般に後者の数値割合ははるかに大きい。

(4) 跳躍(D)；(図-2:D 参照)，(5) 移動砂れき間の衝突(E)；(図-2:E 参照)

(6) 反発(F)；(図-2:F 参照)，(7) 停止(G)；(図-2:G 参照)

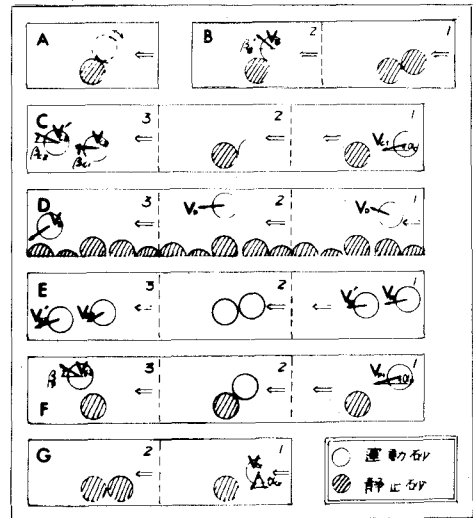


図-2 砂れきとの運動形式

これら7つの現象にもとづいて、砂れきの掃流機構の模式図を作ると、図-3のように示されるであろう。図中、 R 、 R' および R'' 、 R''' はそれぞれの現象への移行確率であり、この場合 R 、 R' は静止砂れき、また R'' 、 R''' は移動砂れきを対象としている。こうした基本的な現象が明らかにされ、かつ河床および流体条件を表わす適切な因子とその分布特性を与えて、現象間の相互の移行確率が理論的に花のられるようになってはじめて、掃流現象の機構が解明されるよう。

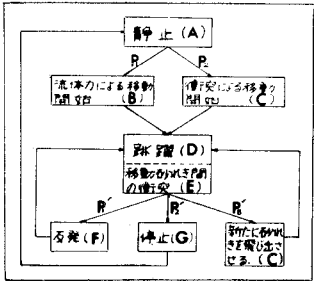


図-3 砂れきの掃流機構の模式図

2-1 砂れきの跳躍特性

図-4, 5は、それぞれ砂れきの跳躍高さおよび距離の平均値と標準偏差およびその分布を示したものである。図中の曲線は、土屋、渡戸の、単一砂れきの運動に関する考察結果をそのまま移動床における砂れきのsalutationに適用したものであるが、実験値とかなりよく一致している。さらに、図-6は、移動砂れきの鉛直方向の粒子密度を表わしたもので、基準値 C_0 は河床付近における最大密度を用いた。以下、図-4, 5, 6から見とれる事項はつぎのとおりである。

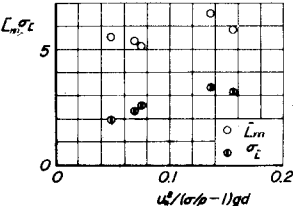
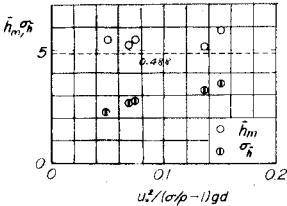


図-4 砂れきの跳躍高さおよび距離の平均値と標準偏差

(1) 跳躍高さおよび距離の平均値は、実験の範囲内では掃流力の増加に対してほぼ一定であるが、その標準偏差は若干増加する傾向が認められる。

(2) 跳躍高さの分布形は、理論値と実験値の両者とも単一砂れきの場合と同じく左右非対称であり、正規分布とは言えない。

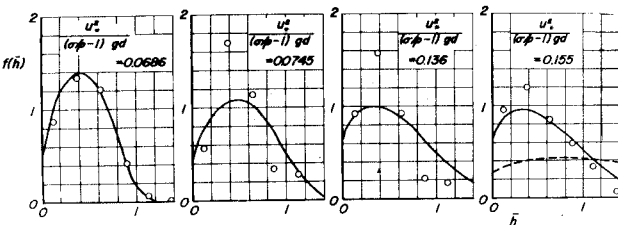


図-5 砂れきの跳躍高さの分布

(3) 河床からの高さ z における掃流砂れきの粒子密度 C は、床面からの距離 z の増加とともに、ほぼ指数的に減少し、その減少割合は掃流力が小さくなるほど大きい。

2-2 砂れきの衝突機構

図-7, 8には、それぞれ床面に落下する砂れきと新たに静止から跳躍に移る砂れきとの運動形式の割合を示し、図-9, 10には、砂れきの落下角度、飛び出し角度を、図-11には現象(F)における反発係数 e を、また図-12には移動砂

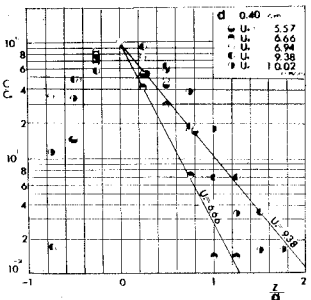


図-6 砂れきの粒子密度

れき間の衝突回数と粒子密度との関係を示した。これらの図から得られた事項を、図-2.3中の記号を用いて列記すると、つぎの通りである。

(1) 砂れきが流体力と衝突によって静止から跳躍に移行する割合は、限界掃流力付近を除いてほぼ等しく、 $P_1 \approx P_2$ である。したがって、流砂現象において床面からの砂れきの移動開始は流体力によるもののみでなく、砂れきの衝突によるものも考慮しなければならないことがわかる。また、床面に落下する砂れきの運動においては、現象(F)の割合が最も多く、ついで(G)、(C)の順になっている($P'_1 > P'_2 > P'_3$)。

なお、現象(G)における停止の確率 P_2 を用いて、砂れきが静止から移動を開始し、再び静止するまでの長さ(1 stepの長さ)を求めることができる。すなわち、砂れきが1回のstepでとる長さを l 、1回の跳躍長さを L とすると $l = L/P_2$ であるから、図-4および7に示した実験結果より見とれる $L_m \approx 5.5d$ および $P_2 \approx 0.25$ という値から l の平均値は約22 d となり、Einsteinらの言う100 d という値よりは小さくなる。実験値が少なく詳しい議論はできないが、今後砂れきの流送過程を確率過程としてとらえる立場との関連を考える上で興味深い。

(2) 砂れきの落下角度は、現象(G)、(F)、(C)の順に小さくなっていく($\alpha_G > \alpha_F > \alpha_C$)。とくに、跳躍してきた砂れきの60%近くがその運動形式をとる現象(F)の場合の落下角度は約10°前後であり、これは飛砂現象においてBagnoldが観察している値12°にほぼ等しい。また現象(F)における飛び出し角度は、落下角度よりも小さくなっており($\alpha_F < \beta_F$)、現象(C)においても掃流力A大きい場合には同様の傾向($\beta_{C2}, \beta_{C1} > \alpha_C$)が見られる。

(3) 現象(F)における発散係数 e は、① 砂れきは球体であり、かつ衝突前後の回転はない ② 衝突時において、接線方向には外力が働かず運動量が保存される という仮定で導かれた次式により求めた。

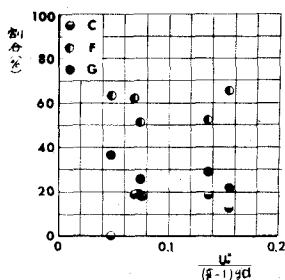


図-7 落下砂れきのとる運動形式の割合

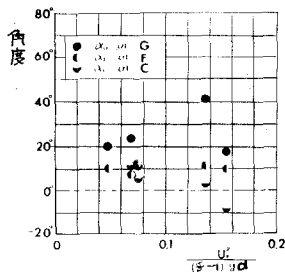


図-9 砂れきの落下角度

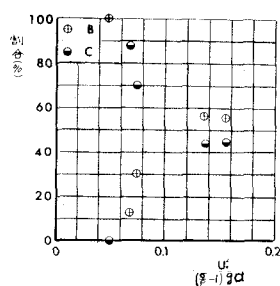


図-8 新たに飛び出す砂れきのとる運動形式の割合

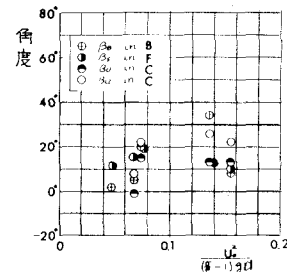


図-10 砂れきの飛び出し角度

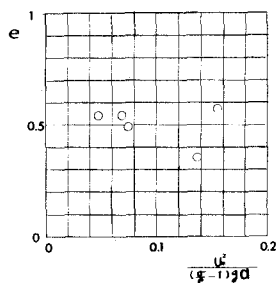


図-11 発散係数

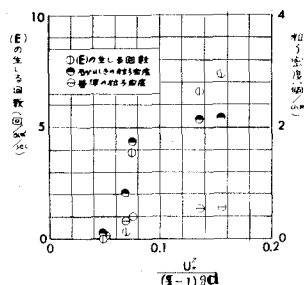


図-12 現象(E)の発生回数と粒子密度との関係

$$e = \frac{\{(V_{F1} \cos \alpha_F - V_{F2} \cos \beta_F) V_{F2} \cos \beta_F - (V_{F2} \sin \beta_F + V_{F1} \sin \alpha_F) V_{F2} \sin \beta_F\}}{\{(V_{F1} \cos \alpha_F - V_{F2} \cos \beta_F) V_{F1} \cos \alpha_F + (V_{F2} \sin \beta_F + V_{F1} \sin \alpha_F) V_{F1} \sin \alpha_F\}}$$

この摩擦係数 e には、衝突時における砂れきの非定常運動や、Loose な河床砂れきへの衝突であるための影響などが含まれているが、この結果によると掃流力による系統的な変化は見られずほぼ 0.5 程度である。

(4) 移動砂れきの個数が増加すると、移動砂れき間の衝突回数は急激に増加する。このことは、今後掃流力大きな場合には、流砂層内における流速分布などの検討においてこの衝突の影響を考慮することが必要であることを示唆している。

以上、掃流砂の運動機構を究明するために掃流砂現象を写真撮影して、その現象を詳細に把握しよう努めたが、今後さらに種々の条件に対して実験を行なうとともに、飛砂現象についても同様な実験的研究を進めて、流砂・飛砂現象における砂粒の Sallation の機構の統一的な解明に努力していきたいと考えている。最後に、本研究を行なうにあたり、種々の討議に加わっていただいた防災研究所の高橋保助教授、道上正樹助手、角野稔助手および大阪府土木部の渡戸健介氏と、資料整理に協力していただいた穂積徹氏に謝意を表明するとともに、本研究の一部は京都府特定研究費によるものであることを付記する。

本文中に用いた記号の説明

V_B, β_B ; 現象(B)における砂れきの飛出し速度、
角度
 V_{C1}, α_C ; 現象(C)における砂れきの落下速度、角度
 V_{C2}, β_{C1} ; 現象(C)における衝突した砂れきの飛び
出し速度および角度
 V_{C2}, β_{C2} ; 現象(C)における衝突された砂れきの
飛び出し速度および角度
 V_D ; 現象(D)における砂れきの速度
 V_{E1}, V_{E1} ; 現象(E)における砂れきの衝突前の速度
 V_{E2}, V_{E2} ; 現象(E)における砂れきの衝突後の速度
 V_{F1}, α_F ; 現象(F)における砂れきの落下速度、角度
 V_{F2}, β_F ; 現象(F)における砂れきの飛び出し速度、角度
 V_G, α_G ; 現象(G)における砂れきの落下速度、角度
 P_1 ; 現象(A)から(B)への移行確率
 P_2 ; 現象(A)から(C)への移行確率
 P_3 ; 現象(D)から(F)への移行確率
 P_4 ; 現象(D)から(G)への移行確率
 P_5 ; 現象(D)から(C)への移行確率

U_0 ; 摩擦速度
 σ ; 砂れきの密度
 ρ ; 流体(水)の密度
 g ; 重力加速度
 d ; 砂れきの粒径
 h ; 砂れきの跳躍高さ
 $\bar{h}$; h/d
 L ; 砂れきの跳躍距離
 $\bar{L}$; L/d
 $\bar{h}_n, \bar{L}_n$; $\bar{h}, \bar{L}$ の平均値
 $\sigma_{\bar{h}}, \sigma_{\bar{L}}$; $\bar{h}, \bar{L}$ の標準偏差
 $f(\bar{h})$; $\bar{h}$ の石確率密度関数
 C ; 鉛直方向の粒子密度
 C_a ; 粒子密度の基準値
 Z ; 河床からの高さ
 l ; 砂れきが1回の step とする長さ
 L_m ; L の平均値
 e ; 摩擦係数