

掃流砂れきの saltation に関する実験

矢野勝正・土屋義人・青山俊樹

SOME BASIC EXPERIMENTS ON THE SALTATION OF SAND PARTICLES IN A STREAM

By *Katsumasa YANO, Yoshito TSUCHIYA*
and *Toshiki AOYAMA*

Synopsis

The mechanism of saltation of sand particles moving in a stream is considered experimentally in this paper. The saltation of sand particles was photographed with a high speed camera and the films were analyzed with a film motion analyzer. Some basic phenomena of the saltation and the mutual relationships between the phenomena and the character of flow are disclosed. Characteristics of the height and distance of saltating sand particles and the collision between moving particles and bed ones are described in detail.

1. 緒 言

砂れきが流体中を移動する現象は、河川や海岸における流砂や漂砂のような水中での運動と、砂丘などで見られる飛砂のような空気中での移動現象に大別でき、従来から数多くの研究が、主として工学的見地からなされてきた。すなわち、流砂現象においては、その機構に確率的概念を導入した Einstein^{1),2)} の研究や、流水の作用による砂れきの運動機構を考察した Kalinske³⁾ の研究には、注目すべきものがある。また、わが国でも建設省土木研究所において、詳細な流砂実験に基づいたいわゆる佐藤・吉川・芦田公式⁴⁾ が提案され、実際上においてその適用がなされている。これらの公式は、今日もっとも妥当なものとされており、工学上の諸問題に応用されてかなりの成果をあげてきた。しかしながら、これら砂れきの移動現象に関する研究は、ある流量のもとでいかなる量の砂れきが流送されるかという観点に立つてのみ進められ、現象の内部に立入った考察はほとんど省略し、次元解析の手法や大胆な仮定を基礎として実験値や観測値を説明しようとしたものであるといってもよいであろう。したがって、その成果をほかの条件にまで拡張したり、砂漣や蛇行などの諸問題を解析する際の基礎とすることは、一般にかなり困難と思われる。一方、飛砂現象においては、Bagnold⁵⁾ が、精密な実験によって砂れきの軌跡をとらえ、空気による砂れきの移動においては saltation と呼ばれる跳躍運動が支配的である事実を示して、以後の研究の方向を示唆した業績は高く評価される。さらに、最近 Owen⁶⁾ は、飛砂現象による風速分布の変化を考慮して飛砂量を求める試みをなし、またわが国では河村⁷⁾ がきわめて興味ある手法で飛砂力学に関する研究をすすめてきた。彼は、流体の抵抗則としては Stokes の法則を用いて砂れきの運動方程式を立て、分布特性をも考慮した飛砂理論を導いている。その分布特性の理論的根拠や単位時間当りに飛び出る砂れきの量の評価などの問題点は残るが、分布特性をも導入して力学法則を確立しようとしたことは、今後の研究の大きな指針になると言えよう。しかし、これらの研究は、ともに流体中での砂れきの運動をとり扱っているにもかかわらず、流体の物理的特性や観察される状態が異なるという理由だけで、たがいに独立な現象のように考えられて、それぞれの立場からの

みなされ、これら両現象の関連性を考察したものは、Kadib⁹⁾、Yalin⁹⁾ およびわが国では土屋、渡戸および青山¹⁰⁾らの研究があるに過ぎず、今後の流砂・飛砂現象を統一的に究明しようとする研究において、大きな問題点として残されていると考えられる。

以上の観点に立って、本研究では、砂れきが掃流状態で流送される現象の内部機構を、飛砂現象との関連をふまえながら、可能なかぎり詳細に解析して、分布特性をも考慮した運動法則を実験的に見出すことに主眼を置き、流体中の砂れきの運動を統一された基盤のもとで論じようと試みた研究の一部を報告したい。すなわち、砂れきが集団として流体中を移動する機構における7つの基本的現象を観察によってみつけ出し、それらの現象の相互関係について論じるとともに、それらの現象を特徴づける因子について、主として実験的に考察しようとするものである。

2. 掃流砂れきの saltation に関する実験

(1) 実験装置および方法

実験に用いた砂れきは、2種類のほぼ均一砂で、Fig. 1 に示す粒度特性を有し、その中央粒径 d_{50} (以後ただ d とあらわす) はそれぞれ 0.168 cm および 0.360 cm であり、また比重は 2.63 および 2.57 である。これらの砂れきが Fig. 2 に示したような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全長約 20 m の循環式閉管路中で移動する状態を 16 mm 撮影機または高速度カメラで写真撮影し、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た。撮影速度は 64~400コマ/sec で、照明はスリットで集光させ、砂れきが集団として移動する際の運動を明確に撮影できるように考慮した。

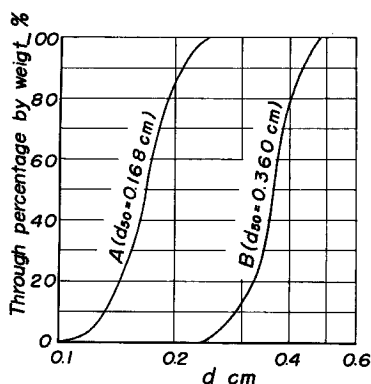


Fig. 1 Sieve analysis curves of sand used in experiments.

対象とした河床形態はできるだけ transition または flat bed に近い状態としたが、多くの場合実験開始後数分してかなり形状の整った砂鏈が発生したので、掃流力が大きい場合にはつぎのような方法を採用した。まず、実験開始前にできるだけ床面を平らにし、しかる後ポンプを駆動して、流れがほぼ定常になる約 20 sec 後から撮影を開始し、実験の範囲をできるだけ flat bed に限定するように心がけた。その撮影と同時に管路の2点間における損失水頭をマンメーターによって読み取り、またベンチュリー管の差圧の読み取りを行なった。掃流力は粒径 0.168 cm および 0.360 cm の砂れきに対して、それぞれ限界掃流力付近からその約8倍および3倍程度まで変化させた。なお、床面における掃流力を推定するためには、上・下流の2点間の損失水頭から管路全断面の平均の掃流力を求め、しかるのち管路断面の上面および側面の影響を除去し、あらかじめ

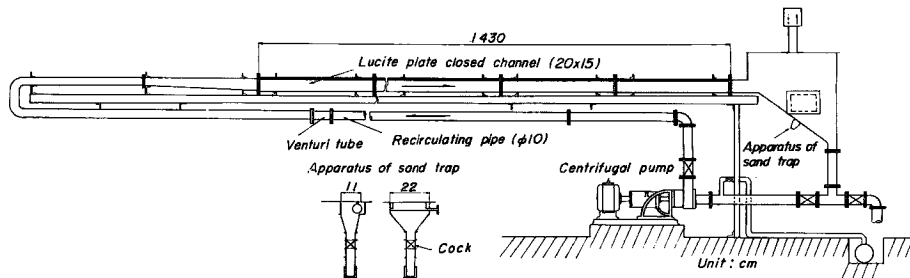


Fig. 2 Experimental closed channel used.

全断面滑面の場合に対して行なった実験結果をもとにして、床面の摩擦速度を推定した。その結果はいわゆる Einstein の方法で上面および側面の影響を取り除いて、床面の摩擦速度を求めた結果とも比較して妥当な値であることを確認した。なお、フィルムモーション・アナライザーで撮影されたフィルムを解析する場合には、一般にきわめて多くの労力を要するので、ここでは掃流現象を約 10 sec から 80 sec の間撮影したフィルムのうちで、できるだけこの間の平均的な現象をあらわしていると思われる範囲に限定して解析することにした。

Table 1 に種々の実験条件における中央粒径、流量、損失水頭、摩擦速度、掃流力の無次元表示および動粘性係数の値を一括して表示した。

Table 1 Experimental conditions carried out.

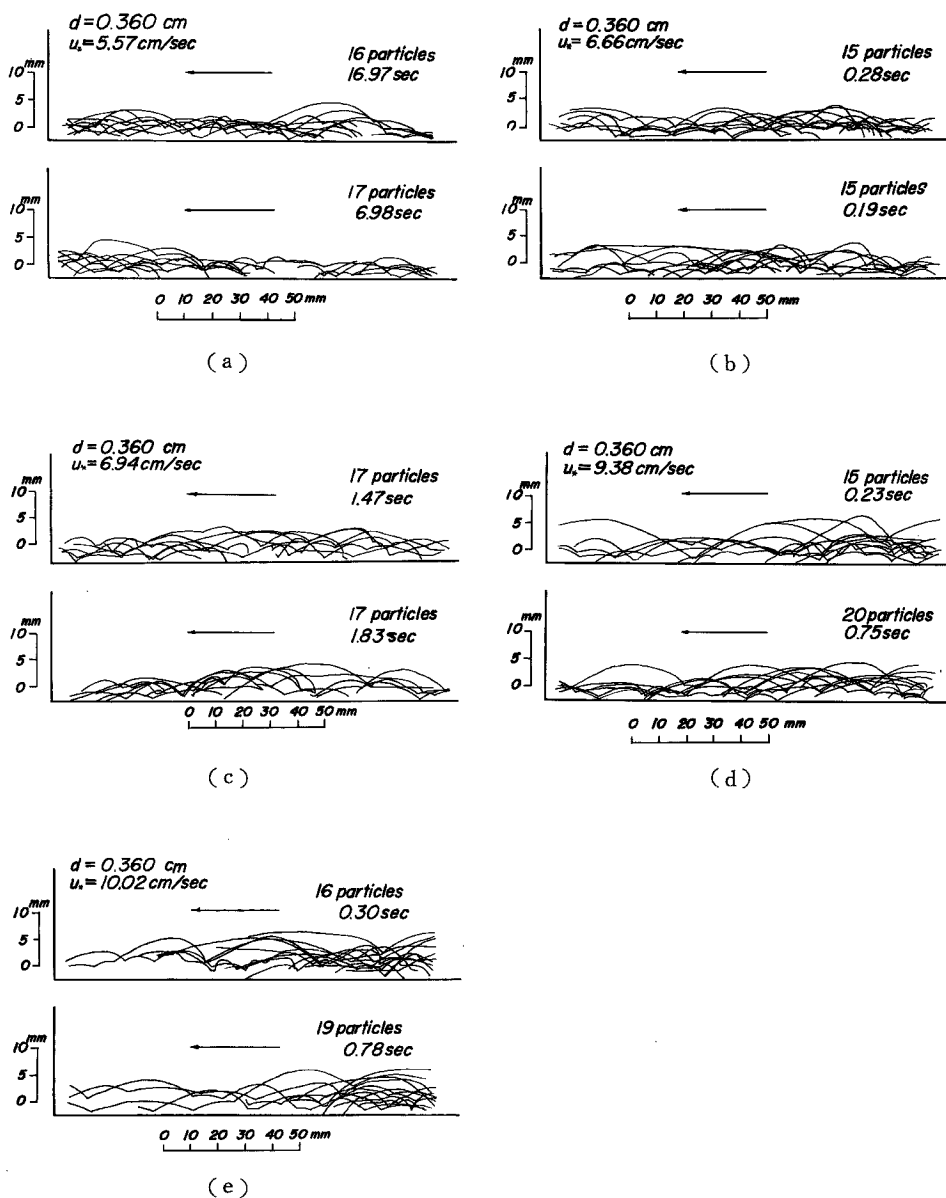
Run	Diameter d cm	Discharge Q l/sec	Head loss h_f cm	Shear velocity u_* cm/sec	Dimensionless tractive force $u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$	Kinematic viscosity $\nu \cdot 10^3$ cm ² /sec
1	0.360	12.4	3.00	5.57	0.056	—
2	"	13.3	3.85	6.66	0.080	—
3	"	14.3	4.30	6.94	0.087	1.37
4	"	15.2	6.25	9.38	0.159	1.39
5	"	16.3	7.10	10.02	0.181	1.36
6	0.168	7.4	1.14	4.00	0.060	1.03
7	"	9.2	2.23	5.91	0.130	1.02
8	"	18.9	5.40	7.84	0.229	0.99

(2) 実験結果

ここでは、撮影されたフィルムによって流砂現象を観察した結果から見出された基本的現象をとりあげ、それらの事項について略述する。砂れきが集団として移動する際の軌跡は、Fig. 3 のようになる。図中に示した u_* は摩擦速度であり、また記入してある時間はフィルムモーション・アナライザーで読みとった時間をあらわし、またそのときに対象となった saltation をしている砂れきの個数も記入してある。なお、Fig. 3 (1) の (d) および (e) と (2) の $u_*=7.84$ cm/sec の場合は、運動している砂れきの数が多すぎて、読みとりが困難であったので、ある特定の断面を通過した砂れきを追跡した結果を示している。これから、飛砂現象において Bagnold⁵⁾ によって見出された saltation と呼ばれる跳躍現象が、その跳躍高さこそ小さいが、流砂現象においても確実に存在することが見出される。さらに、saltation の内部機構の観察から、この現象中につきの 7 つの基本的な現象のあることが明らかになった。Fig. 4 はこれらの現象に対する説明図であって、以下これに基づいてそれぞれ考察することにしよう。

(i) 静止 (現象 S_s): 砂れきの静止状態を言い、一般にはに Fig. 4 みられるように、振幅の小さな振動を行なっている砂れきの状態をも含む。従来からこの現象は、静的なモデルによって説明され、限界掃流力の解析などにおける根拠とされてきたが、実際現象においては、微小な振動を行ないながらも、その位置が粒径以上は変化しない砂れきも数多く見られ、この現象をどう評価するかということが、水中と空気中における限界掃流力の相違をはじめとして、流体中の砂れきの移動現象を解析する際の重要な問題になると考えられる。

(ii) 流体力による移動の開始 (現象 B_a): 砂れきに働く流体力としては、一般に水平方向の抗力と鉛直方向の揚力とが考えられる。Fig. 4 に示したように、観察の結果、流体力によって移動を始める砂れきは、抗力の作用のもとに下流側の砂れきの上を転動し、それを乗り越えて跳躍に移行することが多く、それゆえに Einstein^{1),2)}, Yalin⁹⁾ あるいは Yalin と全く同様な仮定を設けた岸ら¹¹⁾ の移動開始の条件として揚力の作用を主体とする解析は、この観点からすれば再検討する必要があると思われる。さらに、下流側の砂れ



(1) $d = 0.360 \text{ cm}$

Fig. 3 Paths of saltation of sand particles.

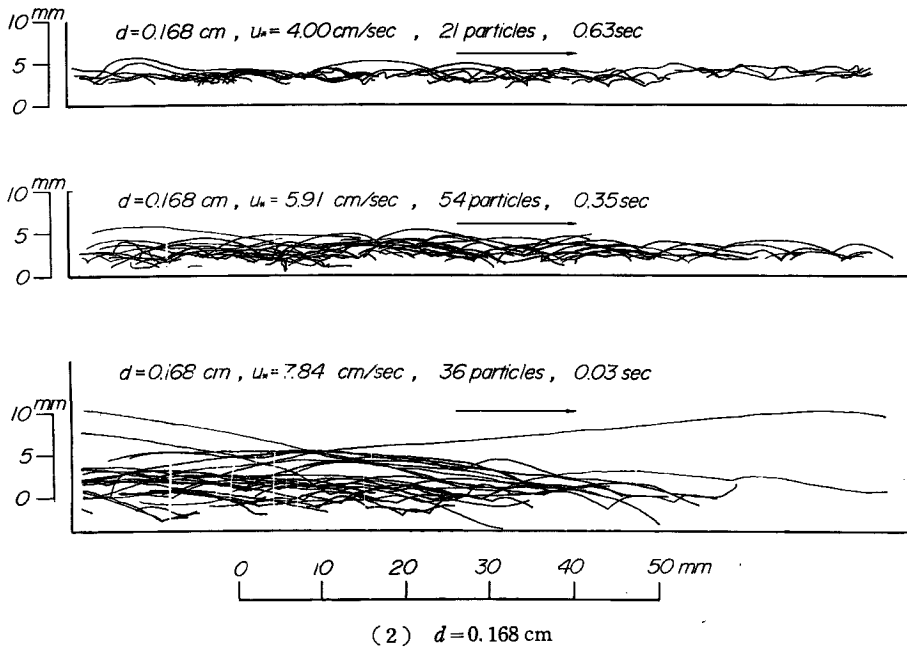


Fig. 3 Paths of saltation of sand particles.

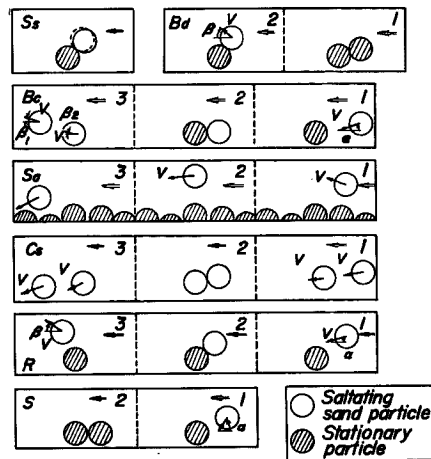


Fig. 4 Schematic diagram for collision of saltating particles.

き上を転動した後の跳躍開始の位置は、砂れき間の相対位置や流体力の作用によって変わることも見出された。

(iii) 衝突による移動の開始 (現象 **Bc**) : **Fig. 4** に示されているように、跳躍してきた砂れきが静止している砂れきに衝突し、これを飛び出させる現象で、跳躍してきた砂れきが停止する場合と、そのままつぎの跳躍に移行する場合の2つが考えられるが、一般に後者の起こる割合はるかに大きく、前者の方は無視できると思われる。今日まで、飛砂現象においては、移動開始時における砂れき間の衝突現象が重視されてきたのに反して、流砂現象においては、その効果が無視されるとみなされてきた。しかしながら、著者らの観察によると、この衝突現象はかなりひんばんに見られ、流体力の作用のもとで微妙な平衡状態を保って静止している砂れきが飛び出す際の重要な役割を果たすものと考えられる。

(iv) 跳躍 (現象 **Sa**) : 一般に、掃流砂れきの運動形式は、滑動、転動および跳躍の3つに区別されてとり扱われているが、その境界は不明確である。このことは、河床が連続的な平面ではなく、粒径程度の凹凸を持っていることに起因すると考えられる。すなわち、この凹凸のため、掃流状態で移動する砂れきは、河床から不連続な摩擦抵抗を受ける。この摩擦抵抗をどのように評価するかで、便宜上滑動、転動および跳躍というように分類されている。この場合、著者らのさきの研究¹⁰⁾のように砂れきの滑動および転動と跳躍とを区別して取り扱うこともできるが、一方転動および滑動という現象も本質的には粒径の数分の1程度の跳躍がある範囲について連続したものと考えて、跳躍の中に含めることもできると思われるので、ここでは説明の便宜上それらの運動を saltation として一緒にして考察したい。

(v) 移動砂れき間の衝突 (現象 **Ca**) : 観察によると、移動砂れき間の衝突現象には、つぎの現象が見出される。すなわち、**Fig. 4** に示すように、a) 移動中の砂れきの上を他の砂れきが反撥する場合、および b) 移動中の砂れきに他の砂れきが追突する場合の2つである。

(vi) 反撥 (現象 **R**) : **Fig. 4** に示したように、跳躍してきた砂れきが河床面に落下して、再び跳躍に移る現象であって数多く観察された。

(vii) 停止 (現象 **S**) : **Fig. 4** に示すように、跳躍してきた砂れきが停止する現象は、一般に流体力の場所的および時間的な不均一性や河床の凹凸の影響を受けるが、観察によると、河床に静止している砂れきに衝突したときに受ける抵抗が主体となって生じるように見受けられた。

3. Saltation の機構に関する考察

前述した7つの基本的現象の関連性は、つぎのように説明される。すなわち、任意の時刻に静止している砂れきは、流体力によって下流側の砂れき上を転動するか、または河床に落下してきた砂れきとの衝突によって跳躍に移行する。跳躍した砂れきは、他の跳躍砂れきとの衝突を行なう場合もあり、さらに河床に落下すると、反撥したり他の砂れきを飛び出させたりする衝突現象を経て、跳躍を継続するか、または停止してもとの静止の状態に戻る。このような関係の系統図を示したものが **Fig. 5** である。図中の P_1 , P_2 , P_1' , P_2' および P_3' はそれぞれの現象への移行確率で、この場合 P_1 および P_2 はともに静止砂れきに対するものであり、また P_1' , P_2' および P_3' は同様に移動砂れきを対象としている。河床および流体の特性を表わす適切な因子とその分布特性を与えて、前章で述べた基本的現象が明らかにされ、現象間の相互の移行確率が理論的に求められるようになってはじめて、掃流現象における砂れきの流送機構が解明されよう。このような考察に基づき、本章では第1節において、砂れきの跳躍特性を表わす跳躍高さおよび距離に関して、その分布形と平均値および標準偏差に関して考察し、さらに跳躍高さの分布と密接な関連を有する鉛直方向の砂れきの密度分布についても言及する。また、第2節においては、砂れきの衝突現象に関与する因子として、跳躍砂れきの落下角度および跳躍に移行する砂れきの飛び出し角度をとりあげ、さらに反撥現象 (現象 **R**) における見かけ上の反撥係数についての実験結果を述べる。また床面を除く水中での衝突 (現象 **Ca**) の生起回数と掃流力および粒子密度間の関係についても簡単な考察をつけ加えるつもりである。

(1) 砂れきの跳躍特性

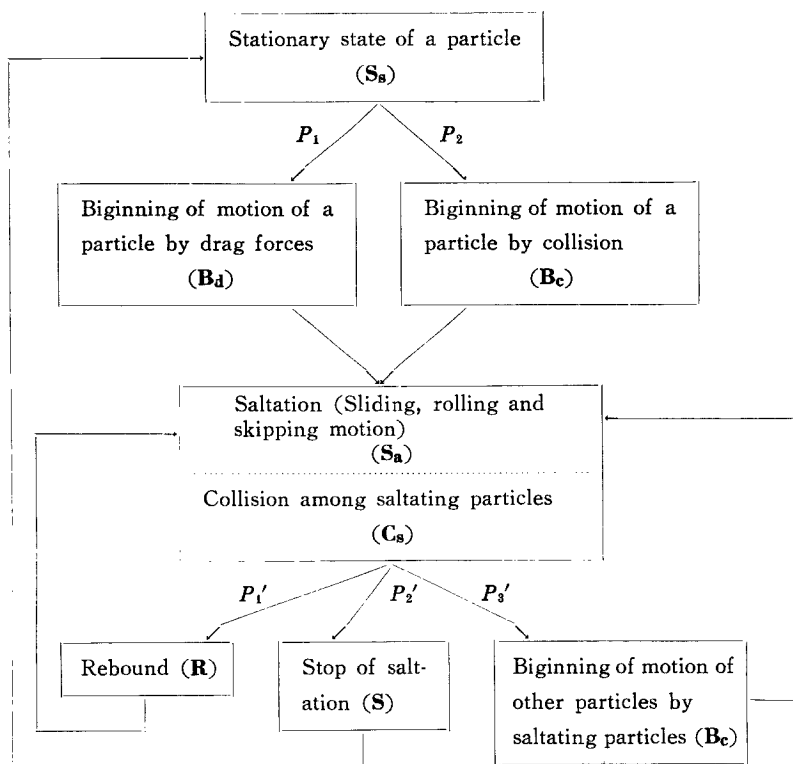


Fig. 5 System of saltation of sand particles in streams.

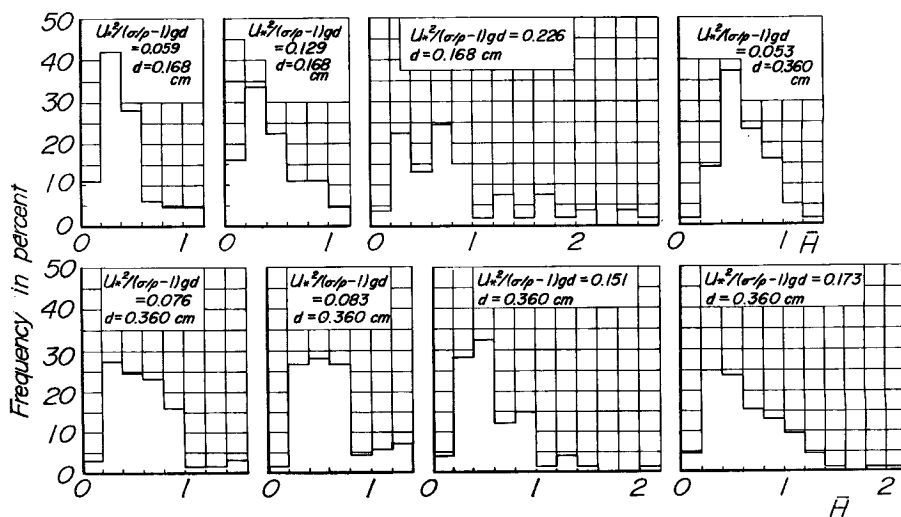


Fig. 6 Frequency distributions of saltation height of sand particles in streams.

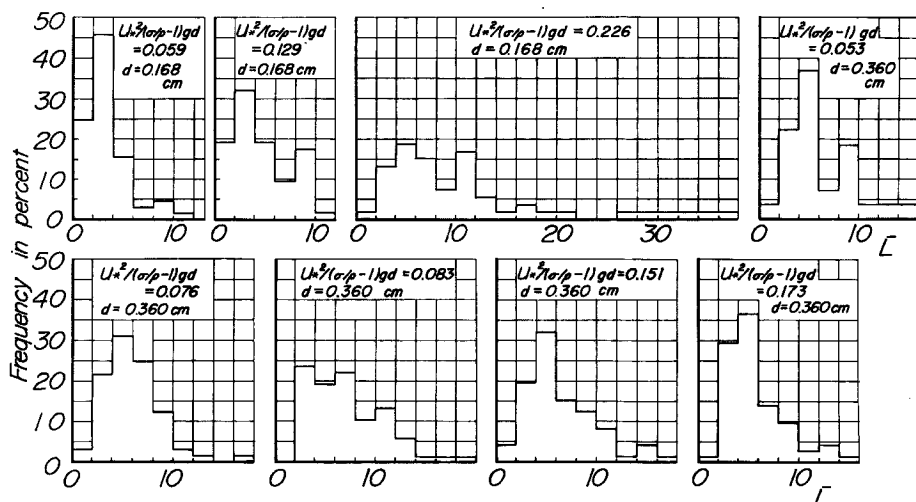


Fig. 7 Frequency distributions of saltation distance of sand particles in streams.

Figs. 6 および **7** はそれぞれ砂れきの跳躍高さおよび距離の分布を示す。図中の $\bar{H}$ および $\bar{L}$ はそれぞれ砂れきの跳躍高さおよび跳躍距離を砂れきの中央粒径で割った無次元量である。これらの分布は、いずれも平均値の近くでその頻度が高くなりかつ左右非対称という特性を有している。この分布特性を、単一粒子の水流中における saltation を解析した岸および福岡¹¹⁾や土屋および角野¹²⁾の研究結果と比較して考察すると、つぎのことが言える。すなわち、土屋らの実験結果では、その分布は左右非対称であり本実験の結果と同じ傾向を示しているが、これに反して岸らの実験値は跳躍高さおよび距離ともに正規分布をするとされている。この相違がなにに原因しているかは、実験値の整理方法が明確でないため判断が不可能であるが、砂れきの跳躍機構が複雑な跳躍開始時の条件の支配を受けることを考えても、簡単に正規分布で近似することには若干疑問があるように思われる。たとえば、砂れきの掃流現象の観察によれば、集団として移動する砂れきが跳躍を開始するのはつぎの4つの場合がみられる。

i) 新たに跳躍を始める場合

- a. 現象 **Ba** のように流体力によって跳躍を開始するもの
- b. 現象 **Be** のように跳躍してきた砂れきに衝突されて跳躍を開始するもの

ii) 2回目以降の跳躍を始める場合

- a. 現象 **R** のように反撥によって再び跳躍に移行するもの
- b. 現象 **Be** のように河床にある砂れきを飛び出させた後、自らも跳躍に移行するもの

これら4つの場合に対して、それぞれ移動開始時の条件が異なることが考えられ、その結果として跳躍高さおよび跳躍距離の分布特性も異なってくると思われる。したがって、さらに厳密な解析を進める際には、前述したおのおの場合について、その分布特性を考察し、それらを総括したものが **Figs. 6** および **7** に示される分布となるものと考えらる必要がある。

同様のことが **Fig. 8** に示される砂れきの跳躍高さおよび跳躍距離の平均値およびそれらの標準偏差と掃流力との関係についても言える。ここに $\bar{H}_m$ および σ_H はそれぞれ $\bar{H}$ に対する平均値および標準偏差であり、また $\bar{L}_m$ および σ_L はそれぞれ $\bar{L}$ に対する平均値および標準偏差である。実験結果が十分でなく明確なことはわからないが、これらの結果から、砂れきの跳躍高さおよび距離の平均値や標準偏差はともに掃流力の増加にしたがって全体的傾向としては増大するようであるが、その増大の仕方には、若干の相違が認められる。すなわち、標準偏差が掃流力の増加とともにほぼ一様に増大するのに反して、平均値の方はある掃

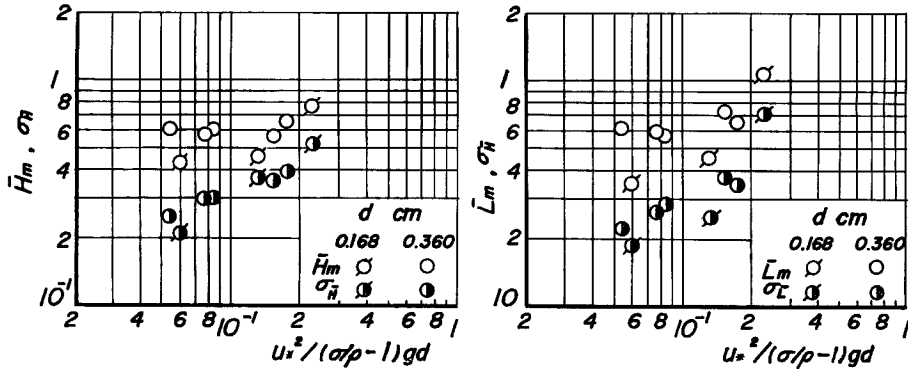


Fig. 8 Variations of mean value and standard deviation of height and distance of saltating sand particles in streams with dimensionless tractive force.

流力まではその増加は著しくなく、むしろほぼ一定値をとるようであるが、ある掃流力の値を越えると、急激に増加する顕著な特徴を示し、またこの傾向は砂れきの粒径の差異によっても若干その傾向が異なるように思われる。このことに関しては、さらに詳細な実験を行ない、その結果を積み重ねて普遍的な傾向を見出す必要があると考える。しかしながら、土屋ら^{10),12)}による単一砂れきの saltation に関する実験結果や砂れき相互間の衝突現象を考慮した理論的考察においても同様な傾向を見出すことができるが、この現象は saltation の本質にも関係するので、きわめて重要であるといえよう。

また Fig. 9 は、掃流状態で移動する砂れきの鉛直方向の粒子密度をあらわしたもので、基準値 C_{max} としては河床付近における最大密度を用いた。この図から、河床からの高さ z における粒子密度 c は、床面からの距離の増加とともに、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ことが認められる。なお、 $z=0$ の位置より下方にも粒子密度が存在するのは、河床に粒径程度の凹凸があるためであり、飛砂現象のように、砂れきの跳躍高さが大きく、それに比して床面の凹凸が無視されうる現象と異なり、掃流砂れきの運動機構を考察する際には、この床面の凹凸をいかに評価するかが、1つの問題点となるであろう。

(2) 砂れきの衝突特性

Fig. 10 は、跳躍砂れきが河床に落下する際の角度と河床から跳躍に移行する砂れきをとる飛び出し角度と無次元化した掃流力との関係を示したものである。まず、砂れきの落下角度 α は、砂れきが現象 S, R および Bc をとる場合の順に小さくなっており、その値はそれぞれ約 24° , 10° および 7° 程度である。この明確な差異は、Fig. 11 を用いてつぎのように説明されるであろう。図中斜線を施した砂れきは、河床の静止砂れきであり、 α は砂れきの速度ベクトルが水平軸となす角度で、 γ は砂れきの中心間を結んだ直線と水平軸となす角度である。さらに V を落下砂れきの速度ベクトル、 V_n および V_t をそれぞれ速度ベクトルの法線成分および接線成分とすれば、Fig. 11

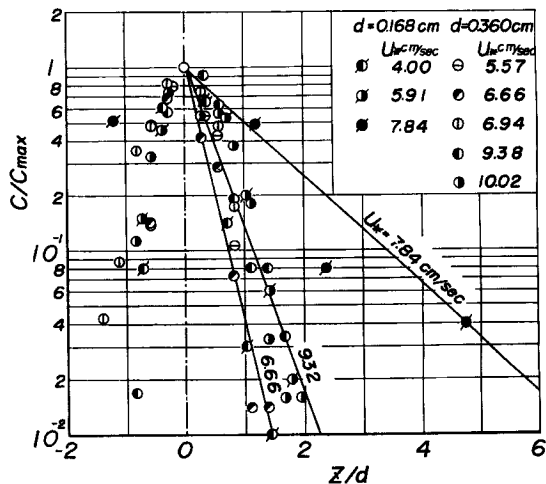


Fig. 9 Vertical density distributions of saltating particles in streams.

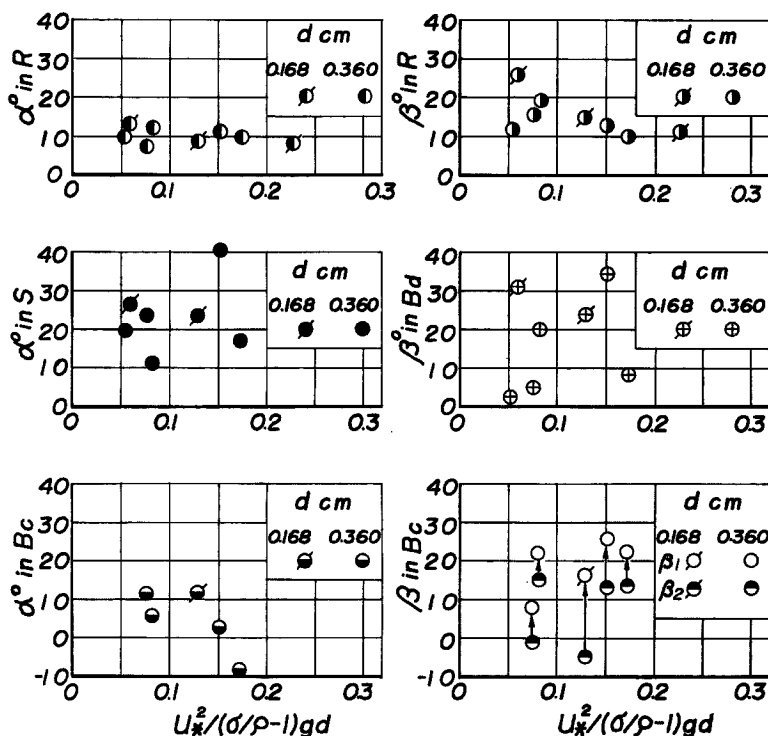


Fig. 10 Variations of collision characteristics of sand particles with dimensionless tractive force.

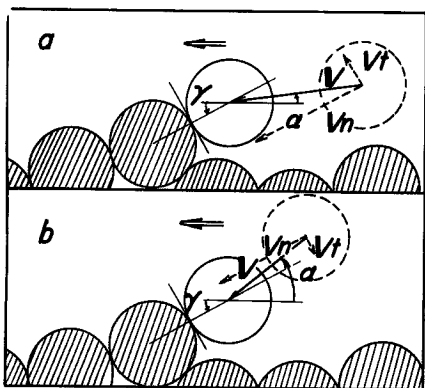


Fig. 11 Schematic diagram for collision of sand particles.

止し易くなり、小さくなれば静止中の砂れきを飛び出させ易くなるという傾向は、ある程度説明できると思われる。

つぎに、Fig. 10 に示した結果で、砂れきの落下角度 α と飛び出し角度 β とを比較して考察すれば、つぎのようなことが見出される。

(i) 跳躍してきた砂れきの大部分がその運動形式をとる現象 R の場合の落下角度は、ほぼ 10° 前後で

あり、またこのときの飛び出し角度は、落下角度よりも大きい。この2つのことは、飛砂現象において Bagnold⁵⁾ が観察した結果とかなりよい一致を示しており、飛砂現象との関連性を求める際の1つの足がかりになると思われる。

(ii) 現象 **Bc** における飛び出し角度においては、飛び出された砂れきとの角度 β_1 の方が衝突した砂れき自身をとる角度 β_2 よりもつねに大きい。このことは、この現象においては、落下砂れきが河床に静止している砂れきのもとにもぐり込もうとするような現象をとる場合が多いためであろう。

なお、参考のために、流体力によって砂れきが跳躍に移行する場合の飛び出し角度をも示してあるが、実験値が非常にばらついており、明確な傾向は見出されない。このことは、この現象の実験値が比較的少ないので、精度上問題があると考えられるが、一方このときの飛び出し角度が、現象 **Bd** をとる砂れきが下流側の砂れき上を転動し、そのどの位置から跳躍を開始するかという点に大きく左右されるために、ばらつくとも考えられる。

また、現象 **R** における反撥係数 e は、

(i) 砂れきは球体であり、かつ衝突前後にそれ自身の回転運動はしない。

(ii) 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2つの仮定のもとに導かれた次式によって求めた。その結果は **Fig. 12** に示されている。

$$e = \frac{(V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \beta) V_2 \cos \beta - (V_1 \sin \alpha + V_2 \sin \beta) V_3 \sin \beta}{(V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \beta) V_1 \cos \alpha + (V_1 \sin \alpha + V_2 \sin \beta) V_1 \sin \alpha}$$

この反撥係数 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のかかなり広い範囲にわたってその値はほぼ 0.4 から 0.6 程度の値を示し、系統的な変化はみられない。このことは、今後砂れきの反撥現象から saltation を究明する際の重要な手がかりになると思われる。

最後に、移動砂れき間の衝突現象 **Cs** の発生回数および粒子密度と掃流力との関係について考察する。前述したような実験方法によって、現象 **Cs** の生起回数、全粒子密度 C_t およびその基準値 C_{max} を評価するためには、撮影されたフィルムからどの程度の奥行きまでの現象を読みとっているかが問題となるが、ここではカメラの焦点深度と実際撮影されたフィルムの状態から判断して、16 mm 撮影機で撮影した中央粒径

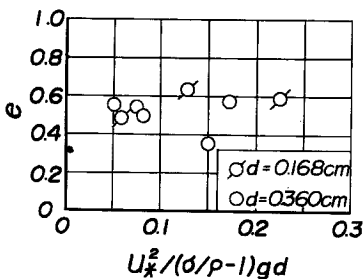


Fig. 12 Variations of rebound coefficient of saltating sand particle on bed one with dimensionless tractive force.

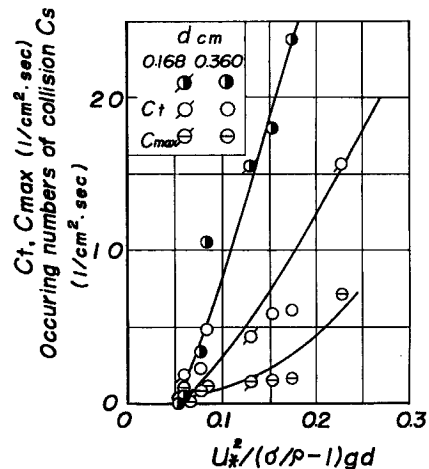


Fig. 13 Variations of number of collision of saltating particles, particle concentration and nominal concentration of sand particles with dimensionless tractive force.

0.360 cm の砂れきに関しては1粒径とし、また高速度カメラで撮影した 0.168 cm の砂れきの場合には2粒径の奥行きまで読みとったものとした。Fig. 13 からわかるように、水中衝突の回数、移動砂れきの密度およびその基準値は、掃流力の増加とともに増大する。とくに現象 C_s の生起回数と全粒子密度 c_t とは、掃流力とほぼ直線関係にあることが見出され、このことは、今後掃流力の大きな場合の流砂層内の流速分布などを検討する際に、現象 C_s 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。

4. 結 語

以上、集団として水流中を移動する砂れきの saltation の機構を究明する第1歩として、砂れきが掃流状態で移動する現象を 16 mm 撮影機および高速度カメラで撮影し、その特性を実験的に考察した結果について述べた。すなわち、流体中を運動する砂れきのとる基本的現象を抽出して、それらの相互の関連性に関して概説するとともに、現象を特徴づける因子として、砂れきの跳躍高さおよび距離、鉛直方向の粒子密度、砂れきの落下角度および飛び出し角度、砂れきの衝突現象における反撥係数および移動砂れき間の衝突現象と粒子密度との関係などをとりあげて考察し、その現象を詳細に把握するように努めてきたが、これらは掃流砂れきの運動機構を解明し、さらには流砂および飛砂現象を1つの統一基盤に立って考察する際の基礎資料となることと考える。

今後、ここにとり出した各現象の力学的機構を明らかにして、砂れきの跳躍高さおよび距離に関する理論的考察を進め、砂れきの濃度分布や流砂現象にともなう流速分布ひいては流砂量に対する解析にまで発展させていきたい。

最後に、本研究を行なうにあたり、種々討議に加わっていただいた高橋保助教授、道上正規助手、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砂防部門の諸氏に謝意を表明するとともに、本研究は文部省特定研究費による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Einstein, H. A.: The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Bull. No.1025, 1950, pp.1—71.
- 2) Einstein, H. A. and E. L. Sammi.: Hydrodynamic Forces on a Rough Wall, Reviews of Modern Physics, Vol. 21, No. 3, 1949, pp.520—524.
- 3) Kalinske, A. A.: Movement of Sediment as Bed Load in Rivers, Trans. A. G. U., Vol. 28, No. 4, 1947, pp.615—620.
- 4) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男: 河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1), 土木研究所報告, 第98号の2, 昭32, pp.13—30.
- 5) Bagnold, R. A.: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Mathuen & Co. Ltd., London, 1954.
- 6) Owen, P. R.: Saltation of Uniform Grains in Air, Jour. Fluid Mech., Vol. 20, Part 2, 1964, pp. 225—242.
- 7) 河村龍馬: 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第5巻, 昭26, pp.95—112.
- 8) Kadib, A.: Mechanism of Sand Movement on Coastal Dunes, Proc. ASCE, WW 2, 1966, pp. 27—44.
- 9) Yalin, M. S.: An Expression for Bed-Load Transportation, Proc. ASCE, Vol. 89, HY 3, 1963, pp. 221—250.
- 10) 土屋義人・渡戸健介・青山俊樹: 水流による砂れきの saltation の機構(1), 京都大学防災研究所年報, 第12号, 昭44, pp. 475—490.
- 11) 岸 力・福岡捷二: 河床粒子の saltation の機構と流砂量, 土木技術資料, 土木学会北海道支部, 第23号, 昭41, pp. 113—120.
- 12) 土屋義人・角野 稔: 水流による砂粒の運動機構に関する実験, 京都大学防災研究所年報, 第10号 B, 昭41, pp. 97—107.