

飛砂における砂粒の運動機構(2)

—— 砂粒の Saltation の特性について ——

土 屋 義 人・河 田 恵 昭

MECHANISM OF MOTION OF SAND GRAINS BY WIND (2)

—— On the Characteristics of Saltation of Sand Grains ——

By Yoshito TSUCHIYA and Yoshiaki KAWATA

Synopsis

In studying the sand transport by wind, the mechanics of motion of sand grains should be established. For this, it is necessary to make clear the characteristics of trajectory of sand grains in the sand transport. The trajectory was photographed with a high speed camera and the films were analyzed with a film motion analyzer. In this paper, the motion of sand grains is considered as saltation and then the various characteristics, which are saltation height, distance and others, are experimentally made clear. The result of experiments is discussed with the theory of the first and the successive saltation in sand movement in a turbulent stream. It was concluded that the relation between the saltation of sand grains both in air and in water can be explained with the theory.

1. 結 言

飛砂における砂粒の運動の大きな特徴は、砂粒が浮遊しないほど十分大きい場合、それが粒径程度の凹凸のつねに存在する床面と間けつ的な接触を保ちつつ運動することである。さらに最近の研究によって、これらの過程において衝突、反発、停止および飛び出しなどの複雑な現象の生ずることが次第に明らかになってきた。このような飛砂現象を解明するためには、砂粒の運動機構を詳細に検討する必要があると思われる。

本論文では、風によって移動を開始した砂粒は一般に、転動および滑動の後に跳躍するが、このような一連の砂粒の運動を saltation ということにし、この saltation の機構を明らかにするため、第1報¹⁾で発表した砂粒の移動限界についての考察にひきつづいて、高速度カメラによる写真撮影によって砂粒の saltation における種々の力学的特性を主として実験的に考察しようとしたものである。さらに、saltation の機構についての実験結果を解析するために、これまでの著者らによって示されてきた主として流砂における掃流砂れきの saltation に関する研究成果^{2), 3), 4), 5)}を飛砂の場合に適用することを試みた。すなわち、砂粒の first saltation および successive saltation の理論によって、どの程度飛砂における砂粒の運動を説明できるかを検討し、この結果から飛砂および流砂の両現象の関係をできるだけ同じ力学的な考察によって解明するようつとめたつもりである。ただし、これら両現象にはかなり本質的に相違する点も実験的に見出されてきたので、飛砂における砂粒の saltation の理論については、次報において1つの試みを示したいと考えている。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の詳細については第1報に報告したとおりである。ただし、風洞の送風機関係を改造したので、

風速は無段変速器によって、風洞断面中央部で約 2 m/sec から 24 m/sec まで連続的に変化させることが可能となった。

2.2 実験条件

飛砂における砂粒の saltation の運動を解析するために用いた粒子は、固定床についての実験では、3 種類の砂粒と 2 種類の種子であり、移動床における実験では、3 種類の砂粒が用いられた。それぞれの粒子の特性およびそれらを使った実験における種々の条件、すなわち中央粒径、比重、密度比、摩擦速度および無次元掃流力の値を、固定床の実験のものについては Table 1 に、移動床の実験のものについては Table 2 にまとめて示した。

Table 1 Experimental conditions carried out for the fixed bed.

No.	Dimeter of grains d cm	Kind of grains	Specific gravity σ/ρ_0	Density ratio σ/ρ	Shear velocity u_* cm/sec	Dimensionless tractive force (flow intensity) $u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$
1	0.225	sand grains	2.624	2235	97.9	0.0204
2	"	"	"	"	105.7	0.0227
3	"	"	"	"	119.0	0.0287
4	0.184	"	2.523	2120	102.1	0.0273
5	"	"	"	"	114.8	0.0345
6	"	"	"	"	120.2	0.0378
7	"	seeds	1.155	969	69.9	0.0280
8	"	"	"	"	83.3	0.0398
9	"	"	"	981	67.8	0.0260
10	"	"	"	"	73.4	0.0305
11	"	"	"	"	82.4	0.0384
12	0.144	sand grains	2.474	2081	105.9	0.0382
13	"	"	"	"	122.0	0.0507
14	"	seeds	1.155	981	76.9	0.0428
15	"	"	"	"	98.8	0.0706

Table 2 Experimental conditions carried out for the movable bed.

No.	d cm	σ/ρ_0	σ/ρ	u_* cm/sec	$u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$
1	0.225	2.528	2172	112.2	0.0262
2	"	"	"	113.0	0.0267
3	"	"	"	116.5	0.0286
4	0.184	2.550	"	101.7	0.0266
5	"	"	"	105.9	0.0287
6	"	"	"	113.0	0.0326
7	0.144	2.528	2158	90.2	0.0267
8	"	"	"	96.6	0.0307
9	"	"	"	104.3	0.0358

2.3 実験方法

固定床における単一粒子の saltation の実験においては、対象とした粒径の砂粒を床面に幅約 50 cm、長さ 4.5 m にわたってニスづけした。風洞上流端から約 3 m の位置に置かれた着色粒子が、所定の風速のもと

で定常となる約 15~20 sec 後に、逐次移動を始め saltation を行なう状態をミリケンの高速度カメラで写真撮影した。これら撮影したフィルムはフィルムモーションアナライザーで詳細に解析した。移動床の実験においては、saltation 層が確実に定常状態に達していると考えられる風洞の下流部の約 8 m の位置において、上記と同じ方法によって砂粒の運動を写真撮影して解析を行なった。この場合、床面形態はできるだけ flat regime を対象としたが、実験開始後砂粒の saltation 層がほぼ定常になった段階においても顕著な砂れんは発生しなかった。Saltation 層内における砂粒の密度分布の実験は、つぎのようにして行なった。移動床の実験においてその saltation の対象とすべき砂粒が運動する場の均一な砂粒は黒色に着色したが、これに対して写真撮影の対象とした範囲に対しては、床面の中央部の 10 cm の砂粒は白色にした。撮影したフィルムの解析では、1 コマの中のある単位幅について床面からの高さごとにその範囲にある砂粒の数を読みとった。この操作を 5 コマごとに繰り返し、約 8 sec 間の平均値によって、高さ方向の砂粒の密度分布を求めた。撮影速度はいずれの場合も 64 コマ/sec であった。

3. Saltation の特性

3.1 運動軌跡

ここでは、撮影されたフィルムの 1 コマ 1 コマごとの解析から得られた粒子の軌跡を示す。**Fig. 1** は固定床における単一砂粒の運動軌跡であり、また **Fig. 2** は同じく種子の場合の運動軌跡を示している。**Fig. 3** は移動床において多数個の砂粒が運動する saltation 層内での単一砂粒の運動軌跡を解析したものである。

一般に、移動床の実験において、運動する砂粒を撮影したフィルムの解析は非常に困難であった。とくに **Fig. 3(b)** の場合はきわめて多数個の砂粒によって saltation 層が構成されるために、移動開始から saltation を繰り返す単一砂粒を追跡することは不可能であった。ここではその中からランダムに抽出した 1 回の saltation の軌跡を示している。

これらの図から、飛砂の場合移動を開始した粒子はいわゆる saltation と呼ばれる跳躍運動をしていることがはっきりわかる。また、フィルムの解析によって、掃流砂れきの saltation の場合に認められた 7 つの基本的な現象が飛砂の場合にも存在することが確認できた。すなわちそれらは、(1) 静止、(2) 流体力による移動開始、(3) 衝突による移動開始、(4) 跳躍、(5) 移動砂粒間の衝突、(6) 反発および (7) 停止の 7 つの現象である。

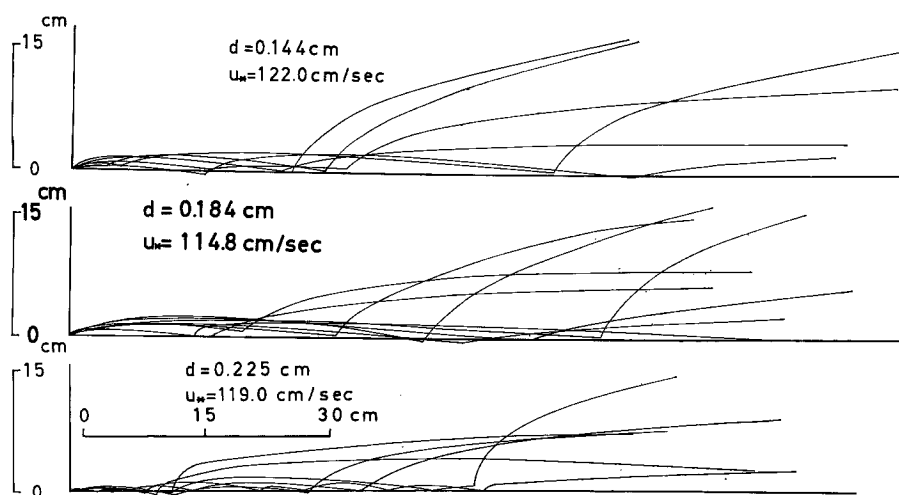


Fig. 1 Trajectories of saltation of sand grains on fixed bed.

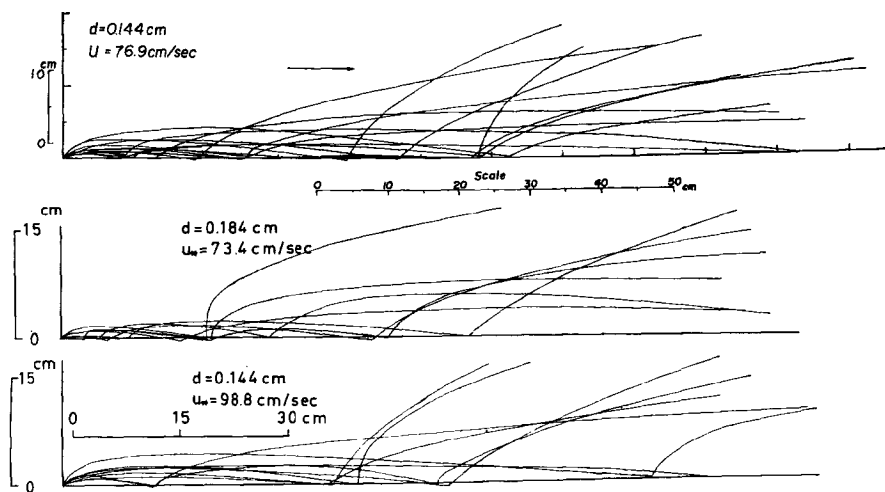
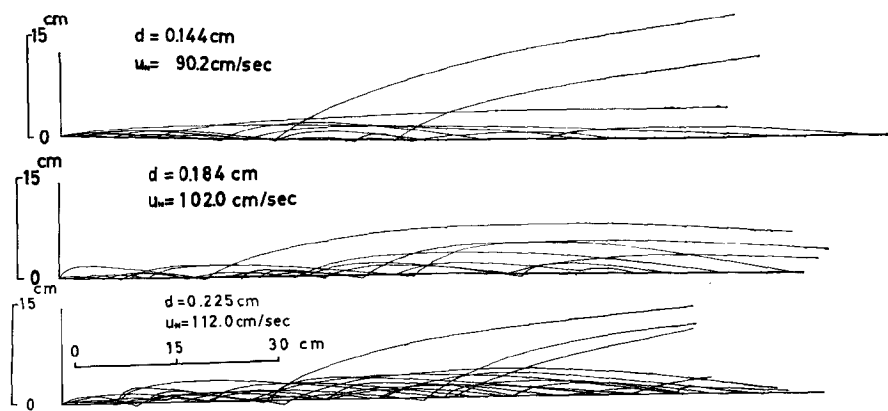
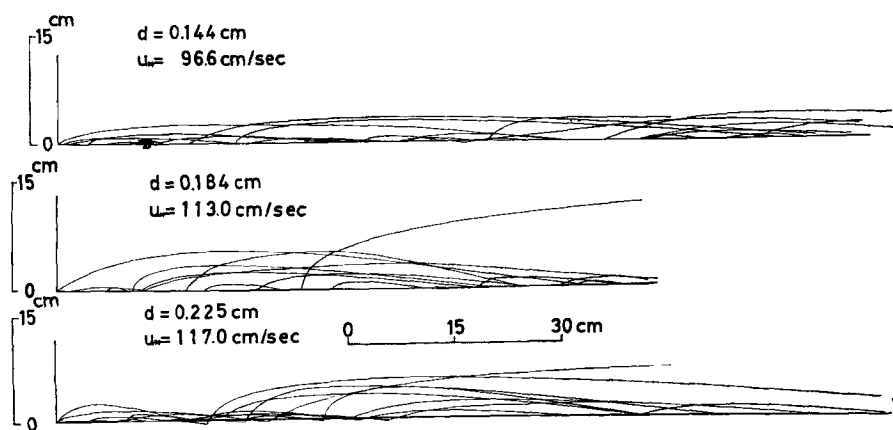


Fig. 2 Trajectories of saltation of seeds on fixed bed.



(a)



(b)

Fig. 3 Trajectories of sand grains in saltation layer in case of movable bed.

3.2 飛び出し角度，落下角度および反発係数

飛砂において，運動する砂粒と床面の砂粒との衝突の結果，その反発によって再び saltation を継続する現象が非常にしばしば観察される。この砂粒間の衝突の現象は，saltation の運動機構を支配する非常に重要なものである。ここでは，衝突の際に見られる砂粒の運動特性について述べる。

Fig. 4 は粒子の飛び出し角度 β と無次元掃流力との関係を図示したものである。図中の記号 B_d は流体力による飛び出しの現象をあらわし，記号 R は衝突による飛び出しの現象を意味している。観察結果によると移動を開始した砂粒は大部分，直ちに saltation に移行するようであり，したがって現象 B_d と現象 R を区別することは困難であり，また精度上かなり問題があるので，飛び出し角度について詳しく議論することはできない。この図から，現象 B_d における飛び出し角度は現象 R における飛び出し角度より一般に，小さいことがわかる。現象 R の場合，飛び出し角度の平均値は固定床の種子において約 48° ，同じく砂粒

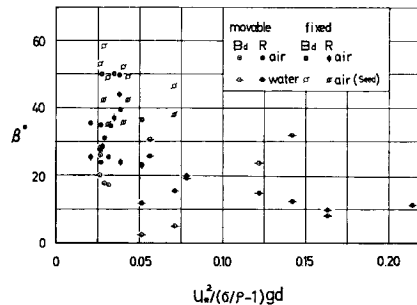


Fig. 4 Angle of departure, β , of sand grains and seeds both in air and in water.

において約 33° および移動床の砂粒において約 28° であり，いずれも流砂の場合の移動床の砂粒における平均値である約 15° に比べてはるかに大きい。また，それらの飛び出し角度の大きさの順序とつぎに述べる反発係数との関係が成り立つことから考えて，飛び出し角度と反発係数は非常に密接な関係にあると言える。無次元掃流力と飛び出し角度の関係については，著者らの行なった今回の実験範囲では正確に判断することはできないが，流砂の場合にほとんど変化しないことから考えて，飛砂の場合もほとんど変化しないものと思われる。上述したことから，従来，飛砂における砂粒の飛び出し角度はほぼ直角であると考えられてきたが，今回の実験結果によれば，平均して約 30° である。

Fig. 5 は粒子の落下角度 α と無次元掃流力の関係を求めて図示したものである。これから，無次元掃流力の増加とともに飛砂においては落下角度が若干減少する傾向が見られる。さらに，それぞれの粒子の反発係数の大小に関係なく，飛砂および流砂のどちらの場合も落下角度は約 $8^\circ \sim 10^\circ$ の値をとることがわかる。

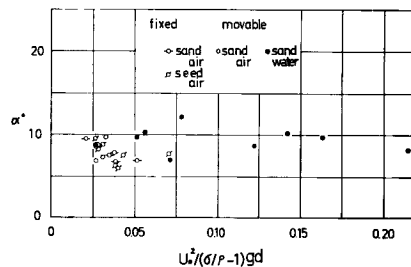


Fig. 5 Angle of falling, α , of sand grains and seeds both in air and in water.

このように落下角度がほとんど同じであるにもかかわらず、Fig. 4 に見られるように飛砂および流砂の飛び出し角度が大きく相違するのは、反発係数などの床面条件が大きな影響を及ぼすためと推定される。

砂粒間の衝突点で接線方向および法線方向の運動量が保存されると仮定すると、みかけの砂粒の反発係数はつぎのようにあらわされる。

$$e = \frac{\{(V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \beta) V_2 \cos \beta - (V_1 \sin \alpha + V_2 \sin \beta) V_2 \sin \beta\}}{\{(V_1 \cos \alpha - V_2 \cos \beta) V_1 \cos \alpha + (V_1 \sin \alpha + V_2 \sin \beta) V_1 \sin \alpha\}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V_1 および V_2 ; それぞれ砂粒の衝突前後の速度である。(1) 式によって固定床および移動床における粒子の反発係数の値を求めた結果を Fig. 6 に示す。この図から、固定床の種子の反発係数 0.97, 砂粒で

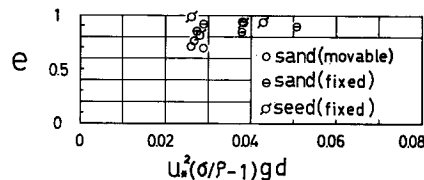


Fig. 6 Variations of rebound coefficient of saltating sand grains and seeds on sand bed with dimensionless tractive force.

は 0.91 および移動床における砂粒では 0.72 となる。これらはいずれも流砂の移動床における砂粒の反発係数の平均値 0.55 と比較してかなり大きいことがわかる。したがって、砂粒の saltation に及ぼす衝突時の反発の効果は、飛砂の方が流砂の場合よりも大きくなると考えられる。この観点から、飛砂において落下砂粒の衝突の効果を考えようとした Kadib⁶⁾ らの研究における考え方を基本的な面で認めることができよう。著者らの実験値の範囲では、無次元掃流力の変化に関係なく反発係数がほぼ一定値をとるが、これについては saltation の回数との関係でつぎに述べる。

Fig. 7 は移動床におけるおのおのの saltation ごとの反発係数の値を示したものであって、図中には同時に床面条件をあらわす 1 つの定数として理論に導入された飛高と飛距離との比に対応する定数である λ および飛び出し角度も示してある。ここに λ は理論結果との比較のところで後述するように successive saltation の理論において示されるつぎの関係式を用いて計算した。

$$\lambda = 4(\bar{H}_m / \bar{L}_m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\bar{H}_m$ および $\bar{L}_m$; 砂粒が定常な跳躍運動を行なう場合における平均飛高および飛距離を砂粒の粒径で割った無次元量である。この図から、saltation の継続回数が多くなるにしたがって、 λ は少しずつ増加し逆に反発係数は減少することがわかる。飛び出し角度はかなりのバラツキはあるが、全体的に増加していると思われる。この原因について簡単に考察すれば、つぎのようになる。飛砂の場合には、Fig. 9 で示すように saltation の回数の増加とともに飛高および飛距離は急激に大きくなり、しかもそれらの増加の割合は減少しない。みかけ上の反発係数が小さくなることは、運動する砂粒と床面の砂粒との衝突の瞬間、前者の持つ水平および鉛直方向の運動量が摩擦などのために減少しやすくなることを意味している。さらに、飛び出し角度が増加するのは衝突の際に、床面の砂粒が移動して水平方向の運動量の減少が鉛直方向のそれと比べて顕著になるためと推定される。

Fig. 8 は λ の平均値と無次元掃流力との関係を示したものである。流砂の場合と同じく掃流力の変化に関係なく、固定床の λ は 0.23 であり、移動床の λ は 0.26 である。Fig. 7 に示したように、固定床における λ は first saltation および second saltation の値を平均したものであるが、両者における λ の値が移動床での λ にほぼ一致していることから考えると、saltation を何回も継続した場合の λ の値は固定床および移動床のどちらにおいても 0.26 になるとと思われる。これは流砂の場合の λ が 0.4 になると比較してかなり

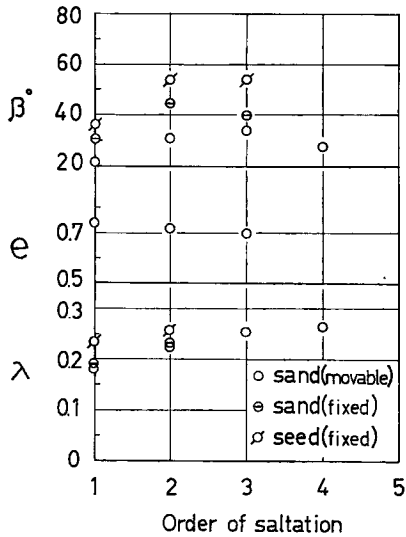


Fig. 7 Changes of parameters characterized sand bed condition with order of saltation.

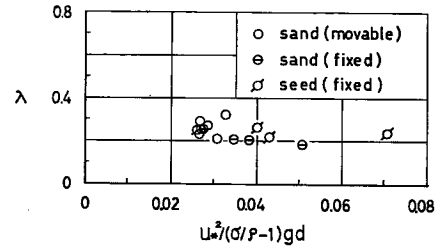


Fig. 8 Relation between λ and dimensionless tractive force.

小さく、飛砂と流砂の saltation の軌跡が相違することがわかる。

3.3 飛高、飛距離およびそれらの分布特性

Fig. 9 は saltation の回数と無次元飛高および飛距離との関係を示したものである。この図から飛高および飛距離は saltation の回数の増加とともに急激に大きくなることがわかる。またその傾向は、移動床に比べて反発係数の大きい固定床においてとくに顕著に認められる。水流による掃流砂れきの場合、saltation の回数の増加とともに、飛高および飛距離があまり大きくならずほぼ一定値となるが、飛砂の場合は saltation の回数とともに増加する傾向を示す。原因の 1 つは、3.2 で述べたように空気中および水中における粒子の反発係数の値における相違が大きく関係すると考えられる。この図からわかるように、無次元掃流力がほとんど同一であるにもかかわらず、飛高および飛距離は反発係数の大きなものから順番に大きくなっている。飛砂の場合には、砂粒の反発係数が大きいので、無次元飛高は 3 回程度の saltation において約 100 にも達する。このため、跳躍中の砂粒は摩擦速度の約 20 倍の風速によって大きく加速される。反発係数が大きいことおよび砂粒の落下直前の速度が大きくなるので、衝突後運動する砂粒の飛高と飛距離は、衝突前の saltation のそれらに比べて、さらに大きくなるものと思われる。

Fig. 10 は first saltation における反発係数と無次元飛高との関係を示したものである。実験条件は固定床および移動床について無次元掃流力がほぼ 0.03 である。この図から、反発係数の大きな固定床の場合には砂粒の無次元飛高は移動床の場合より大きく、このことから飛砂においては saltation の開始にあたり、反発係数が砂粒の運動を支配する非常に重要なパラメーターであることがわかる。

Fig. 11 は first saltation における無次元掃流力と無次元飛高との関係を示している。第 1 報¹⁾で述べたように、無次元掃流力が 0.02 付近は本実験で対象とした砂粒のほぼ移動限界であり、後述する first saltation の理論曲線が図中に示されている。この図から、無次元掃流力の増加とともに、無次元飛高が直線的に変化することがわかる。

つぎに、移動床において多数個の砂粒が運動する saltation 層内における砂粒の飛高および飛距離の分布特性について考察したい。

Fig. 12 は砂粒の無次元飛高および飛距離の分布を示す。無次元飛高および飛距離の平均値がそれぞれ約

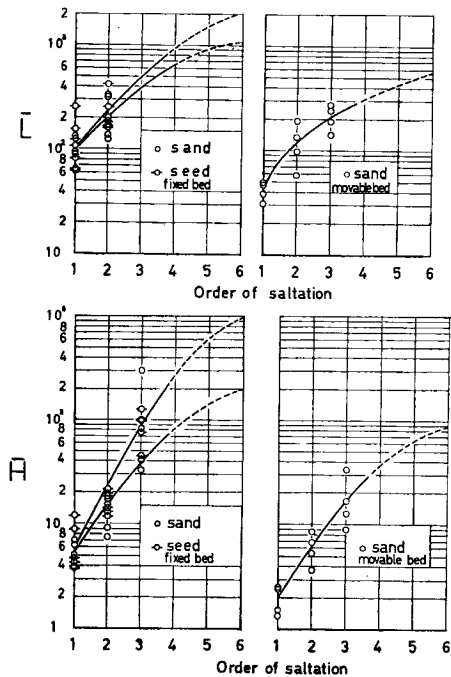


Fig. 9 Changes of saltation height and distance with order of saltation.

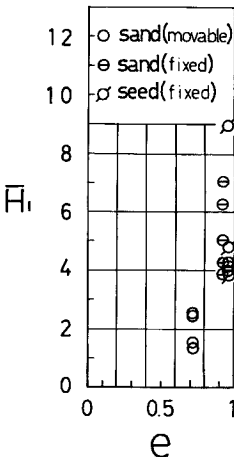


Fig. 10 Relation between first saltation height and rebound coefficient.

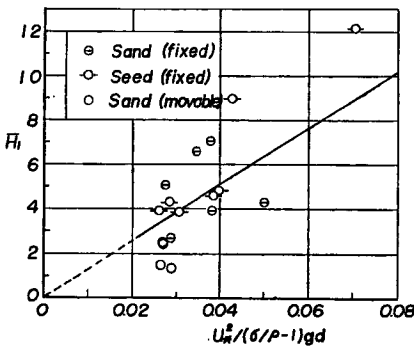


Fig. 11 Comparison between theoretical first saltation height and experimental ones.

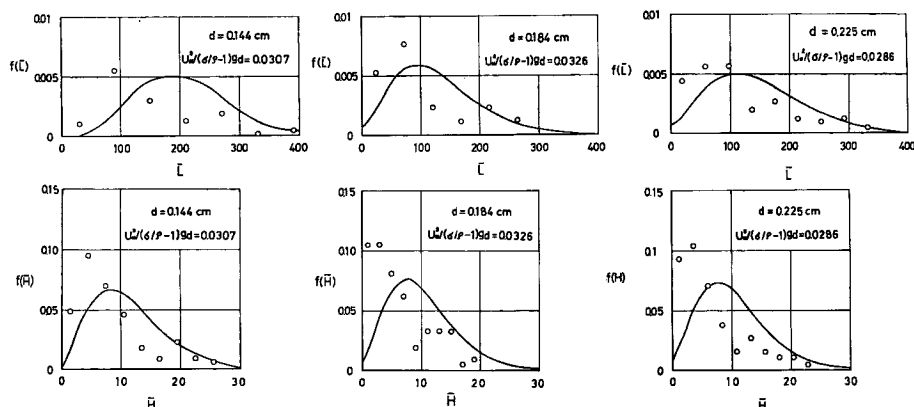


Fig. 12 Comparison between theoretical curves of frequency distribution of saltation height and distance of successive saltation and experimental ones.

10 および 100 にも及ぶこれらの分布はいずれも正規分布ではなく、左右非対称であってかなり歪んでいる。この分布特性を流砂の場合のこれまで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、流砂の実験結果では、飛高および飛距離の分布は正規分布ではなく左右非対称であるが、飛砂にくらべその歪みは小さい。この相違が何に原因しているかを考えてみると、飛砂の場合 **Figs. 9** および **11** から first saltation と数回後の saltation との飛高および飛距離は 10 倍以上も異なっていることがわかる。したがって、それらの平均値は頻度の一番大きい first saltation の値よりもかなり大きくなると推定される。一方、流砂の場合、飛高および飛距離は saltation の回数が増えるごとに顕著に変化せず、ほぼ一定になるためと思われる。この結果から、飛砂における飛高および飛距離の分布特性の考察においては、各 saltation ごとの分布特性を検討した後に全体の分布特性について議論しなければならないことがわかる。

上述したことから、飛高および飛距離の分布特性を考察する 1 つの方法として、実験結果から求めたものが **Fig. 13** である。横軸は saltation の回数を示し、縦軸は saltation を開始した砂粒が saltation を継続する割合を表わしている。移動床の実験では無次元掃流力の値がほぼ 0.03 で一定であったために、これによる継続割合の変化はわからなかった。**Fig. 13** から、4~5 回程度の saltation を継続するものは全体の約 1/3 であることがわかる。すなわち、saltation 層内において、第 1 回、第 2 回および第 3 回の saltation

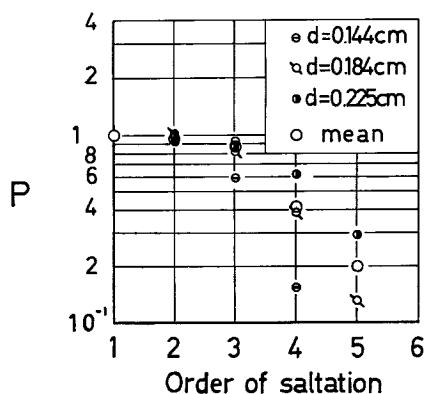


Fig. 13 Ratio of succession with order of saltation.

をとるものが非常に多いことを示している。この原因としてつぎのことが考えられる。すなわち、3回程度の saltation を継続した砂粒はすでに大きな運動量を持っており、床面の静止砂粒との衝突の瞬間にそれらを新しく飛び出させることになる。その結果、落下してきた砂粒は急激に運動量を失い飛高が減少することになり、また極端な場合には静止すると思われるからである。これらの現象は今回の撮影フィルムの解析においてもかなり頻繁に見られた事実である。流砂の場合、掃流力の小さい範囲での砂粒の運動においては、反発と跳躍を交互に繰り返しながら定常な状態で運動している砂粒の占める割合は約30%であると報告されているが、さらに詳細にこれら両現象の砂粒の衝突による交換の現象を検討する必要がある。

3.4 Saltation 層における密度分布

掃流力が移動限界を越えてさらに大きくなると、多数の砂粒の運動する層が形成される。これは saltation 層と呼ばれる。ここでは saltation 層における砂粒の密度分布について考察したい。

Fig. 14 は砂粒の密度分布についての実験結果を示したものである。砂粒の密度 c の基準値 c_s としては、床面から高さ $10d$ における密度を用いた。この図から、床面から高さ z における密度は高さの増加とともに指数的に減少せず、その減少の割合いがかかなり小さいことがわかる。流砂のこれまでの実験結果と比較す

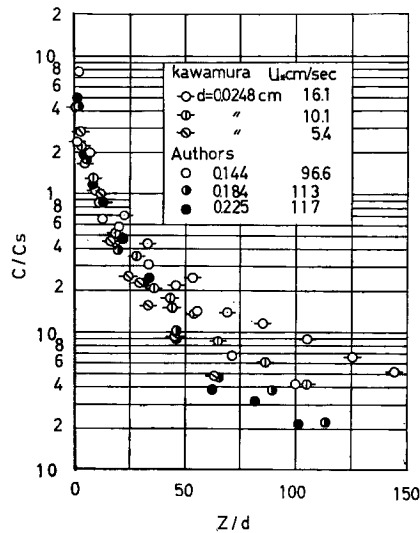


Fig. 14 Vertical density distribution of saltating sand grains in saltation layer.

ると、後者の場合、密度は河床からの高さの増加とともにほぼ指数的に減少しており、これら飛砂および流砂における密度分布の傾向の相違する原因を砂粒の運動機構の特性との関係で考察しなければならないと思われる。

4. Saltation に関する理論結果との比較

流体中を運動する砂粒の saltation 機構に関する著者らの理論を用いて、飛砂の実験結果との比較検討を行ない、飛砂における砂粒の運動の2, 3の特性について考察したい。

4.1 Saltation の理論^{3), 5)}

a) 運動方程式：飛砂の場合、静止状態から移動を始めた砂粒は床面の砂粒との衝突の結果、その反発によって鉛直方向の速度成分が与えられ、これが主な原因となって saltation が開始すると考えられる⁷⁾。Saltation を開始した砂粒は一般に、かなり早い速度で風下方向に運動するため、そのときの Reynolds 数

は 100 以上になる。したがって、砂粒に働く流体抵抗は Reynolds 数が 1 より十分小さい場合に成立する Stokes の抵抗則は適用できなくなり、相対速度の 2 乗に比例すると仮定される。著者らの実験の範囲では、風の乱れが砂粒の運動に与える影響については、河村の現地観測と風洞実験の結果⁸⁾ からほとんど無視できるものと思われる。

上記のことから、砂粒を同体積の球とみなし Basset 項が省略できるものとすれば、鉛直方向および水平方向の砂粒の運動方程式はつぎのようにあらわされる。

$$dW/dt = \mp(3/4)C_D W^2/(\sigma/\rho + 1/2)d - (\sigma/\rho - 1)g/(\sigma/\rho + 1/2) \dots\dots\dots (3)$$

$$dU/dt = (3/4)C_D(u - U)^2/(\sigma/\rho + 1/2)d \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 W および U ; それぞれ砂粒の鉛直および水平方向の速度成分、 C_D ; 砂粒の抗力係数、 σ および ρ ; それぞれ砂粒と流体の密度、および g ; 重力の加速度である。また、 u は砂粒の跳躍運動における代表流速である。

(3) および (4) 式を摩擦速度 u_* および d を基準量として無次元化するために、つぎのような諸量を定義する。

$$\begin{aligned} \bar{U} &= U/u_*, \bar{W} = W/u_*, K^2 = (4/3)\{(\sigma/\rho - 1)gd/u_*^2\}(1/C_D), \\ \tau &= (3/4)\{C_D/(\sigma/\rho + 1/2)\}(u_*t/d) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

この表示によって (3) および (4) 式はそれぞれつぎのようにあらわされる。

$$d\bar{W}/d\tau = \mp W^2 - K^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$d\bar{U}/d\tau = (\bar{u} - \bar{U})^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\eta = z/d$ および $\xi = x/d$ として (6) および (7) 式を解いた結果は以下のようにあらわされる。まず砂粒の鉛直方向の運動において、その上昇時には (6) 式を $\tau=0$ において $\bar{W} = \bar{W}_0$ という初期条件で解くと、最大飛高 $\bar{H}$ はつぎのようにあらわされる。

$$\bar{H} = (2/3)\{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\} \log\{1 + (\bar{W}_0/K)^2\} \dots\dots\dots (8)$$

さらに、 $(\bar{W}_0/K) \ll 1$ の範囲では近似されてつぎのようになる。

$$\bar{H} = (2/3)\{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\}(\bar{W}_0/K)^2 \dots\dots\dots (9)$$

一方、砂粒の水平方向の運動においては、流砂現象においてみられるように、砂粒の飛高があまり大きくなく、流速分布の影響が省略されると仮定して、(7) 式を $\tau=0$ において $\bar{U} = \bar{U}_0$ という初期条件を与えて積分し砂粒の飛距離を求めれば、次式がえられる。

$$\begin{aligned} \bar{L} &= (4/3)\{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\} [\bar{u} \{\tan^{-1}(\bar{W}_0/K) + \cosh^{-1}(1 + (\bar{W}_0/K)^2)^{1/2}\}/K - \log|(\bar{u} - \bar{U}_0) \\ &\quad \times \{\tan^{-1}(\bar{W}_0/K) + \cosh^{-1}(1 + (\bar{W}_0/K)^2)^{1/2}\}/K + 1|] \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 $u = A_* u_*$ であって A_* は完全粗面乱流の場合、約 8.5 の値をとる定数である。なお、 $(\bar{W}_0/K) \ll 1$ として近似すると、

$$\bar{L} = (4/3)\{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\} \{2\bar{u}\bar{W}_0/K^2 - \log|2(\bar{u} - \bar{U}_0)\bar{W}_0/K^2 + 1|\} \dots\dots\dots (11)$$

となるが、さらに $(\bar{u} - \bar{U}_0)\bar{W}_0/K^2 \ll 1$ として近似すれば、

$$\bar{L} = (8/3)\{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\}(\bar{U}_0\bar{W}_0/K^2) \dots\dots\dots (12)$$

となる。

b) First saltation: 飛砂においては、流体力の作用によって移動を始めた砂粒は、saltation を開始するまでの間、転動していると仮定し、観察の結果からこの転動距離が非常に小さいと考える。さらに、砂粒の転動速度 $\bar{U}_0'$ と saltation の鉛直方向の初速度は、 $\bar{W}_0 = \tan \beta \bar{U}_0'$ であらわされるものと仮定する。また、この場合には床面の discrete な性質のために砂粒に摩擦力が作用せず、砂粒近傍の流速とくにその時間的変動に大きく関係するものと考えて、砂粒の転動速度の距離的变化をあらわす関係を求めると、近似的につぎのようにあらわされる。

$$\bar{U}_0' = \bar{u}\sqrt{2(x/d)N}/\{1 + \sqrt{2(x/d)N}\} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $N = (3/4)\{C_D/(\sigma/\rho + 1/2)\}$ である。転動距離が粒径程度である場合には、これらの関係を (9) 式に

代入すれば、つぎの関係が得られる。

$$\bar{H}_1 = (1/2) \tan^2 \beta A_r^2 (\sigma/\rho + 1/2) \{2N(1 + \sqrt{2N})^2\} \{u_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd\} \quad (14)$$

c) Stationary saltation: ここでは、b) の first saltation に引き続く第 2 および第 3 の saltation から、さらに継続した場合の saltation について成立する successive saltation の理論結果を示す。

いま、床面で反発と跳躍を交互に繰り返しながら運動する saltation の現象を考えると、砂粒の衝突前後の速度は、近似的に次式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_0 &= e \bar{U}_1 \\ \bar{W}_0 &= e(b_1 \bar{U}_1 + b_2 \bar{W}_1) / \{b_3 + b_1(\bar{W}_1 / \bar{U}_1)\} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに、 $b_1 = (1+e) \tan \gamma$ 、 $b_2 = 1 - e \tan^2 \gamma$ および $b_3 = \tan^2 \gamma - e$ であり、さらに γ は反発砂粒と静止砂粒の中心間を結んだ直線が水平軸となす角であって、いわば床面の凹凸をあらわす特性量と考えられる。

Fig. 15 は砂粒の継続跳躍の運動において前述した諸式や砂粒の運動に対する関係を用いて saltation を開始した砂粒の初速度を逐次計算した結果を示している。ここで、反発係数および $\tan \gamma$ の値は実験結果か

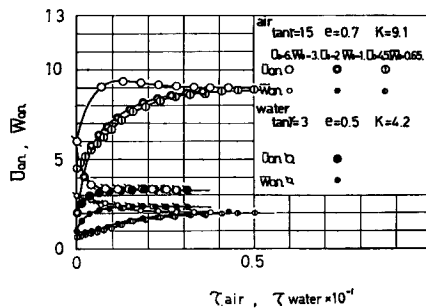


Fig. 15 Changes of sand grain velocity with dimensionless time in successive saltation.

らえられたものを用いた。ただし、飛砂においては Fig. 9 に示したように飛高が粒径に比べて非常に大きいため、(10) 式を求める場合に用いた仮定は成立しない。ここでは代表風速として飛高が粒径の 100 倍の位置における $\bar{u}$ の値である 20 を用いて計算した。この図から、飛砂の場合においても初速度の大小に関係なく鉛直方向の速度 $\bar{W}$ と水平方向の速度 $\bar{U}$ に一定の収束値が存在し、いわゆる定常速度が存在することがわかる。さらに、定常速度に到達するまでに必要な saltation の継続回数は、砂粒の水平および鉛直方向の初速度 $\bar{U}_0$ および $\bar{W}_0$ が定常速度に近いものほど少なく、大体 6~10 回程度である。これは流砂の場合、定常速度に到達するまでに必要な saltation の継続回数が 4~5 回であるのに比較して、ほぼ 2 倍である。この相違が生ずる原因として、両現象における砂粒の反発係数などの違いが考えられる。最後に、両現象において初速度が同じであるにもかかわらず定常速度が異なることから、床面条件と掃流力が定常速度を規定していることが明らかになる。

Stationary saltation においては、砂粒の水平および鉛直方向の定常速度は、つぎのようにあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s &= [(1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + 2(1-e)/\{\lambda(\bar{u}/K)^2\}}] \bar{u}/2 \\ \bar{W}_s &= \lambda \bar{U}_s \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここに、 λ は前述したように床面条件のみによって規定される定数であって (2) 式であらわされる。(16) 式から定常速度が 0 となる場合は、次式で示される。

$$u_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd = (2/3)(1/C_D)\{(1-e)/e\lambda\bar{u}^2\} \quad (17)$$

以上の結果を用いて、砂粒が stationary saltation に達した場合の飛高および飛距離の平均値はつぎのよう

にあらわされる。

$$\bar{H}_m = (1/6) \{ (\sigma/\rho + 1/2)/C_D \} \lambda^2 [(1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + 2(1-e)/\{\lambda(\bar{u}/K)^2\}}]^2 (\bar{u}/K)^2 \} \dots\dots\dots (18)$$

$$\bar{L}_m = 4(\bar{H}_m/\lambda)$$

つぎに、砂粒が定常な跳躍運動をする場合、飛高および飛距離の確率密度関数 $f_1(\bar{H})$ および $f_2(\bar{L})$ はつぎのようになる。すなわち、砂粒の衝突時の速度分布が Gauss 分布に従うと仮定すると、saltation の水平方向の初速度 $\bar{U}$ の確率密度関数は次式であらわされる。

$$f(\bar{U}) = (1/\sqrt{2\pi}) (1/\sigma_{\bar{U}}) \exp\{-(\bar{U} - \bar{U}_s)^2/2\sigma_{\bar{U}}^2\} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $\sigma_{\bar{U}}$ は $\bar{U}$ の標準偏差であって、

$$\sigma_{\bar{U}} = \epsilon \bar{U}_s, \epsilon = \text{const.} \dots\dots\dots (20)$$

と仮定する。以上の仮定にもとづいて、飛高および飛距離の確率密度関数は、それぞれ次式であらわされる。

$$f_1(\bar{H}) = (1/2\sqrt{2\pi}) (1/\epsilon\sqrt{\bar{H}\bar{H}_m}) \exp\{-(\sqrt{\bar{H}} - \sqrt{\bar{H}_m})^2/2\epsilon^2\bar{H}_m\} \dots\dots\dots (21)$$

$$f_2(\bar{L}) = (1/2\sqrt{2\pi}) (1/\epsilon\sqrt{\bar{L}\bar{L}_m}) \exp\{-(\sqrt{\bar{L}} - \sqrt{\bar{L}_m})^2/2\epsilon^2\bar{L}_m\} \dots\dots\dots (22)$$

4.2 理論結果との比較

前述した saltation に関する理論結果と実験結果を比較して、飛砂における砂粒の saltation の特性を考察すれば、つぎのようである。

Fig. 11 において、図中の直線は (14) 式を計算したものであって、 $\tan \beta$ の値として 0.92 を用いた。

この図から、固定床の実験値は理論曲線とその傾向が一致していることがわかる。移動床の実験値は掃流力がほぼ同じであるために、この傾向の有無を検討することはできないが、固定床の場合より $\tan \beta$ の値を小さくする必要がある、このことは **Fig. 4** の事実と一致している。これから、飛砂の場合移動床および固定床のどちらにおいても、砂粒は移動を始めた直後に、粒径程度も転動せず直ちに saltation に移行するものと考えてよいであろう。つぎに **Fig. 16** は前述した stationary saltation の理論との比較のために無次元飛高および飛距離と無次元掃流力に比例する無次元量 $\lambda C_D (\bar{u} u_*^2)/(\sigma/\rho - 1)gd$ との関係を示したものである。図中に示した各曲線は (17) 式で与えられる掃流力よりも大きい範囲において、反発係数をパラメーターとして (18) 式を計算したものである。反発係数が 0.95 および 0.5 として示した曲線は、それぞれ空気中および水中を砂粒が saltation をする場合にとりうる最大および最小値に相当するものと考えられる。これら両者の曲線では、飛高および飛距離が約 10 倍以上相違し、反発係数のこれら両者に及ぼす影響の大きいことがわかるし、また同様なことは実験結果からも明らかにされる。すなわち、反発係数の大きい種子は反発係数の小さい砂粒よりも飛高はかなり大きく、より理論曲線に近づいており、砂粒については反発係数の大きい固定床の方が移動床よりも大きい。飛砂の場合、**Fig. 13** から、全体の砂粒のうちわずかな部分は 6~10 回の saltation によって、定常跳躍に達するものと考えられる。**Fig. 9** から考えて、そのときの飛高および飛距離の値は理論曲線にかなり近づくものと思われる。しかし、ここに示したように saltation についての全体的な平均値として図に表わした実験値では、前述したようにすべての砂粒が必ずしも stationary saltation をしていないので、直接的な比較は困難となるわけであって、これが飛砂と流砂現象の 1 つの相違点とも考えられる。しかしながら、stationary saltation をしている砂粒のみを取り出すことができれば、ここで示された従来の流砂の実験結果とともに考察することができ、飛砂および流砂の両現象において砂粒が定常跳躍に達したときの飛高および飛距離は、反発係数をパラメーターとしてある程度統一できるものと考えられる。

Fig. 12 には (21) および (22) 式によって与えられる確率密度関数の理論曲線が示されている。ここでは標準偏差として 0.3 を用いた。この図から、流砂において比較的实验値とよく一致すると考えて用いられた標準偏差が 0.3 理論曲線は飛砂の実験値と一致しないことがわかる。この原因としてつぎのことが考えられる。すなわち、飛砂の場合運動している砂粒のうち、いわゆる定常跳躍に達しているものはきわめて少な

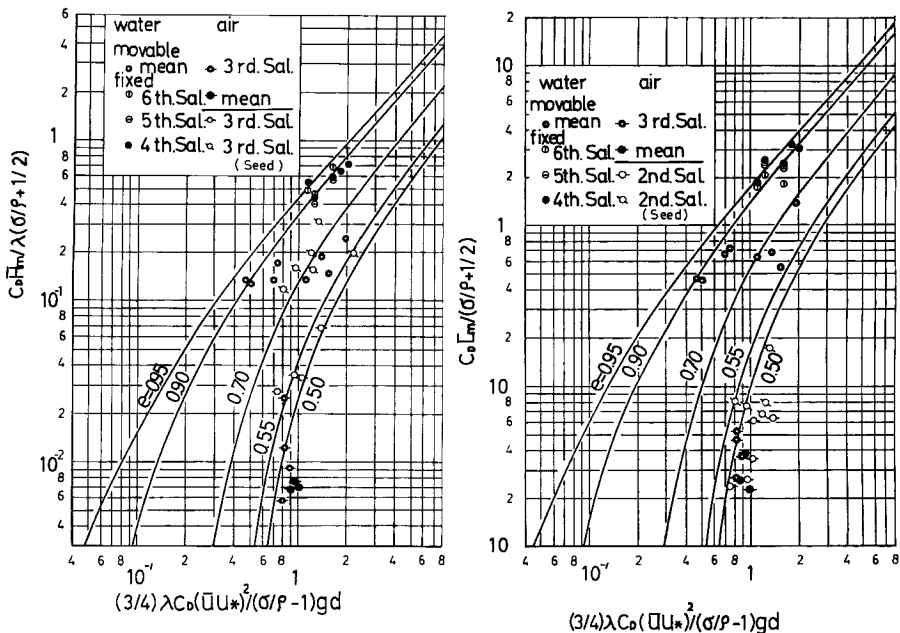


Fig. 16 Comparison between theoretical curves of saltation height and distance of successive saltation and experimental ones.

く、さらに前述したように、各 saltation ごとに飛高および飛距離が大きく相違するため、それらの分布特性がそれぞれ異なるからであると考えられる。

以上の考察において stationary saltation に達した場合に成立する successive saltation の理論を用いて、実験結果を検討したが、今後飛砂における saltation の機構を考察するためには各 saltation について運動特性を解析する必要があると思われる。また、Fig. 13 などから、運動砂粒と床面の砂粒との激しい交換の現象が見られるので、トレーサーによる実験にもとづいた流砂機構の確率モデルとの関係で衝突時の力学条件を考察しなければならないだろう。

5. 結 語

以上、飛砂における砂粒の saltation に関する実験を行ない、その結果を用いて種々の saltation の特性について考察した。さらに、first saltation および successive saltation の理論を飛砂における砂粒の saltation に適用し、その機構について検討を加えたが、本研究で得られた成果のうち主なものは、つぎのようである。

- 1) 反発係数と飛高、飛距離およびそれらの分布特性ならびに密度分布についての実験結果から、飛砂における砂粒の saltation の現象が詳細に把握された。
- 2) First saltation に関する考察から、移動を開始した砂粒は粒径程度も転動せずに床面の静止砂粒と衝突の後、直ちに saltation に移行すると考えられる。
- 3) Saltation を繰り返す回数が増加すれば、飛高および飛距離は粒径に比べて非常に大きくなる。したがって、砂粒の saltation の機構を考察する場合、流砂におけるように流速が摩擦速度に比例するという仮定は成立しない。
- 4) 飛砂においても、砂粒は床面での反発と跳躍を充実に繰り返した後に、掃流力と床面条件に規定される定常速度に到達するが、この定常跳躍を行なう砂粒は全体の砂粒のごく一部であることが実験結果から明

らかになった。

5) Successive saltation の理論を用いて、飛高、飛距離およびそれらの分布特性について考察し、ある程度この理論は飛砂の場合に適用できると思われる。さらに、密度分布についての実験結果の検討から、定常跳躍に達していない saltation の運動機構や風速分布の影響を考えなければならないことがわかった。

今後、上述した考察の結果をさらに検討するとともに、saltation 層内において運動する砂粒と床面の砂粒との交換の機構を解析し、飛砂における saltation の機構を考えていきたい。本研究を行なうにあたり、図面の整理に協力していただいた芝野照夫助手に感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・河田恵昭：飛砂における砂粒の運動機構（1）—砂粒の移動限界に関する実験—，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，昭 45，pp. 217-232.
- 2) 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 9 号 B，昭 41，pp. 97-107.
- 3) 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 B，昭 44，pp. 475-490.
- 4) 矢野勝正・土屋義人・青山俊樹：掃流砂れきの saltation に関する実験，京都大学防災研究所年報，第 12 号 B，昭 44，pp. 491-502.
- 5) 土屋義人・青山俊樹：水流による saltation の機構（2）— Successive Saltation の理論について—，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，昭 45，pp. 199-216.
- 6) Kadib, A. A.: Mechanism of Sand Movement on Coastal Dunes, Proc. ASCE, WW2, 1966, pp. 27-44.
- 7) 土屋義人・河田恵昭：砂粒の Saltation の開始についての一考察，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭 46，II-36.
- 8) 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.