

飛砂における砂粒の saltation の特性について

土屋 義人*・河田 恵昭**

1. 緒 言

風による砂粒の輸送現象は飛砂と呼ばれ、海浜変形の主要な要因の一つである。飛砂における砂粒の運動の大きな特徴は、砂粒が風によって浮遊しないほど十分大きい場合には、移動を始めた砂粒は転動および滑動の後に跳躍を開始し、粒径程度の凹凸がつねに存在する床面と間けつな接触を保ちつつ運動することである。さらに、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現象が起こることが最近の研究によって次第に明らかになってきた¹⁾。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、上述した一連の砂粒の運動を saltation であるとして、その機構を明らかにするために、高速度カメラによる写真撮影によって砂粒の saltation の軌跡を明らかにし、そ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¹⁾²⁾を飛砂の場合に適用することを試みる。すなわち、砂粒の first saltation と successive saltation および初速度が定常速度に達した場合に成立する stationary saltation の理論によって、どの程度飛砂における砂粒の saltation を説明できるかを検討する。

2. 実験装置および実験方法

実験は、高さ 39 cm、幅 75 cm、長さ 11 m の一部ガラス製の鋼製風洞を用いて行なった。この風洞の上流端より 4.5 m の床面は全断面滑面であり、それより下流部は実験砂を敷くために 10 cm 低くなっている。風速は無段変速器によって、風洞断面中央部で約 2.0 m/sec から 24 m/sec まで連続的に変化させることができ、その測定には熟練風速計を使用した。実験に用いた粒子の特性ならびに諸条件は固定床の実験に対して表-1に、また移動床に対しては表-2にそれぞれ示した。

固定床における単一粒子の saltation の実験では、床

表-1 固定床における実験条件

d (cm)	Kind of grains	σ (g/cm ³)	σ/ρ	u_* (cm/sec)	$u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$
0.225	sand	2.624	2,235	97.9	0.0204
				105.7	0.0227
				119.0	0.0287
0.184	sand	2.523	2,120	102.1	0.0273
				114.8	0.0345
				120.2	0.0378
0.184	seed	1.155	969.0	69.9	0.0280
				83.3	0.0398
0.184	seed	1.155	981.3	67.8	0.0260
				73.4	0.0305
				82.4	0.0384
0.144	sand	2.474	2,081	105.9	0.0382
				122.0	0.0507
0.144	seed	1.155	980.5	76.9	0.0428
				98.8	0.0706

表-2 移動床における実験条件

d (cm)	Kind of grains	σ (g/cm ³)	σ/ρ	u_* (cm/sec)	$u_*^2/(\sigma/\rho-1)gd$
0.225	sand	2.528	2,172	112	0.0262
				113	0.0267
				117	0.0286
0.184	sand	2.550	2,172	113	0.0326
				102	0.0266
				106	0.0287
0.144	sand	2.528	2,158	96.6	0.0307
				104.3	0.0358
				90.2	0.0267

面に対象とする粒子を長さ 4.5 m にわたって一様にニスづけし、風洞上流端から約 3 m の位置に置かれた着色粒子が逐次 saltation を行なう状態を Milliken の高速度カメラを用いて撮影した。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下流部約 8 m の位置において、固定床の場合と同様の撮影を行なった。Saltation 層内の砂粒の密度分布の測定は、撮影フィルムの 1 コマの中の単位幅について、床面からの高さごとに存在する砂粒の数をフィルムモーションアナライザーで詳細に読み取った。この操作を 5 コマごとに行ない、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。

3. Saltation の特性

(1) 運動軌跡

ここでは、撮影されたフィルムの 1 コマごとの解析から得られた粒子の軌跡を示す。図-1 は移動床において

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科

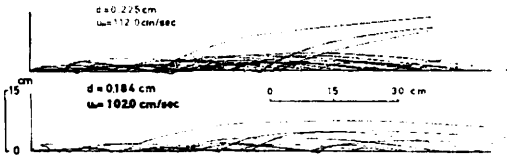


図-1 砂粒の運動軌跡

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の一例を示したものである。図-1 から、飛砂の場合移動を開始した砂粒は、いわゆる saltation と呼ばれる跳躍運動をすることがはっきりわかる。また、フィルムの解析によって、すでに著者らによって指摘された掃流砂れきの 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。

(2) 飛び出し角度、落下角度および反発係数

飛砂において、移動する砂粒と床面の砂粒との衝突の現象は非常にしばしば観察され、これはまた saltation の運動機構を支配する重要なものである。図-2 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。飛砂の場合、観察結果によれば、移動を開始した大部分の砂粒は、ほとんどただちに saltation に移行するようであり、現象 B_d と現象 R を正確に区別することは困難であるが、この図から前者の場合の飛び出し角度が後者のそれよりも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° 、同じく砂粒において約 33° 、および移動床の砂粒において約 28° である。また、飛び出し角度と次に述べる反発係数の間には明確な相関関係が見られることから、これら両者は非常に密接な関係にあると言えよう。無次元掃流力による飛び出し角度の変化については、実験範囲が限定されているため正確に判断できないが、顕著な変化はみられないようである。従来、Bagnold³⁾ らによって飛び出し角度はほぼ 90° 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° 程度である。図-3 は粒子の落下角度 α について同様な関係を示したものである。この図から、無次元掃流力の増加とともに落下角度が若干減少する傾向が見られる。さらに粒子の反発係数の大きさに関係なく、飛砂および流砂のどちらの場合にも、落下角度が約 $8\sim 10^\circ$ の値をとることがわかる。このことから、図-2 に示した両者の飛び出し角度が相違するのは、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。

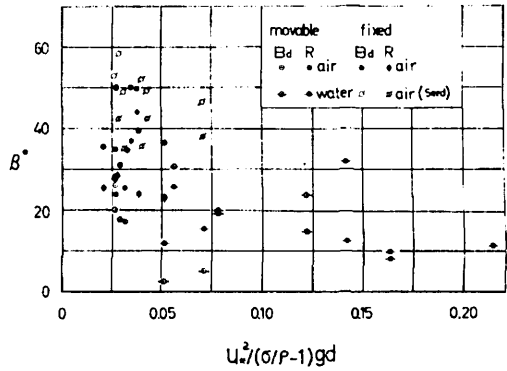


図-2 飛び出し角度と掃流力の関係

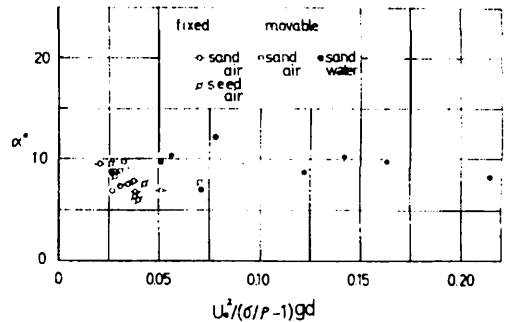


図-3 落下角度と掃流力の関係

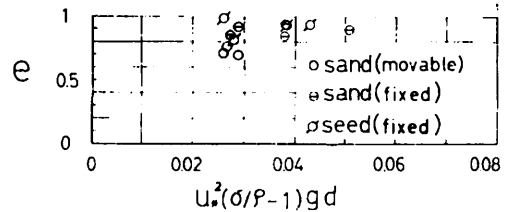


図-4 反発係数と掃流力の関係

粒子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、みかけの反発係数 e は次のようにならわされる。

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

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。式 (1) によって反発係数を求めた結果を図-4 に示す。この図から、固定床における種子の反発係数は約 0.97、砂粒では約 0.91 および移動床における砂粒では約 0.72 である。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。したがって、飛砂の場合には、砂粒の saltation に及ぼす反発の効果は流砂の場合よりも大きくなるものと考えられる。今回の実験範囲では、無次元

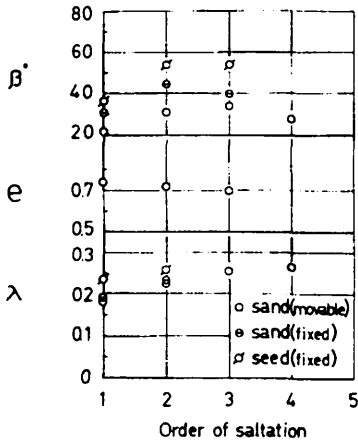


図-5 Saltation の回数による床面条件の変化

掃流力の変化に関係なく反発係数がほぼ一定値をとるようであるが、このことについては saltation の回数との関係で次に考察する。

図-5 は移動床における反発係数と saltation の回数との関係を示したものであって、図中には床面条件をあらわすものとして、理論に導入された飛高と飛距離との比に対応した定数 λ および飛び出し角度も示してある。ここに λ は後述する stationary saltation の理論において定義されるものであるが、ここでは次の関係式を用いて計算した。

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

ここに、 \bar{H}_m および \bar{L}_m : 砂粒が stationary saltation をする場合の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 は若干増加する傾向を示すが、反発係数は反対に若干減少することがわかる。飛び出し角度の実験値はかなりのバラツキはあるが、全体的には継続回数とともに若干増加する傾向があると思われる。この原因について簡単に考察すれば、次のようにな

る。

飛砂の場合には、図-6 に示すように 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、実験の範囲では後述するような stationary saltation への移行は明らかでない。みかけ上の反発係数が小さくなるのは、運動する砂粒と床面の砂粒との衝突の瞬間、前者のもつ水平および鉛直方向の運動量が摩擦や床面の砂粒を運動させることなどによって減少するためであろうと考えられる。さらに、衝突の際に床面の砂粒が移動して水平方向の運動量が減少するが、これは、鉛直方向に比べて顕著になると考えられるので、飛び出し角度は、saltation とともに増加するのであろう。

(3) 飛高、飛距離およびそれらの分布特性

図-6 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。飛砂の場合には、反発係数が大きく、3 回程度の saltation において、飛高は粒径の約 100 倍以上にも達する。このために、跳躍している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。反発係数が大きく、また砂粒の落下直前の速度が大きくなるので、床面砂粒と衝突して跳躍する砂粒の飛高および飛距離は、次第に大きくなるものと思われる。これは流砂の場合、反発係数が小さく飛高が粒径程度であり、飛距離が粒径の 10 倍程度であることと比較して非常に相違する点であるといえよう。図-7 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。この場合の実験条件は、固定床および移動床について無次元掃流力がいずれも約 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、砂粒の飛高は移動床の場合よりも大きいことから、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

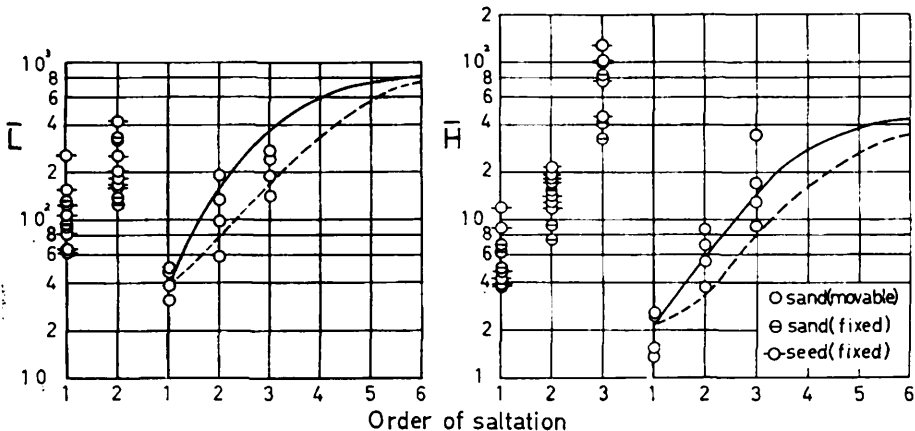


図-6 Saltation の回数と飛高および飛距離の関係

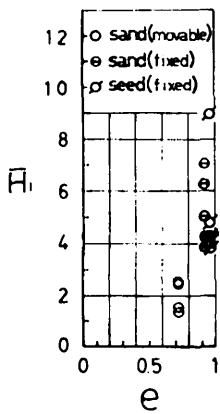


図-7 First saltation の飛高と反発係数の関係

ることがわかる。図-8 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。著者らの研究¹⁾によれば、本実験で対象とした砂粒の移動限界は無次元掃流力で0.02付近である。図-8 から、無次元飛高の無次元掃流力による変化は、図中のプロットでほぼ直線的であることがわかる。

次に、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

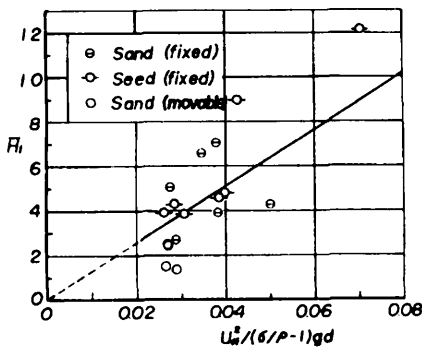


図-8 First saltation の飛高と掃流力の関係

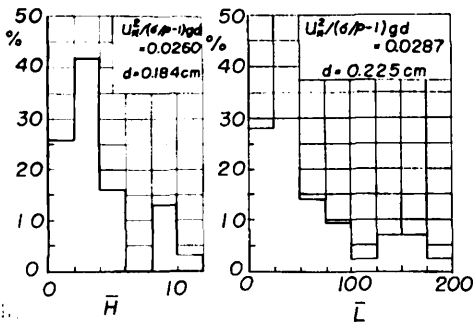


図-9 砂粒の飛高と飛距離の分布

ついて考察したい。図-9 は砂粒の無次元飛高および飛距離の分布の1例を示す。これらの分布は対称でなく、いずれも正規分布よりかなりひずんでおり、この傾向は流砂の場合に比べてかなり顕著である。飛砂の場合には図-6 から first saltation と数回後の saltation の飛高および飛距離を比べてみると、両者とも約10倍以上も大きいので、それらの平均値は頻度の一番大きい first saltation での値よりもかなり大きくなると推定される。したがって、飛砂における飛高および飛距離の分布特性

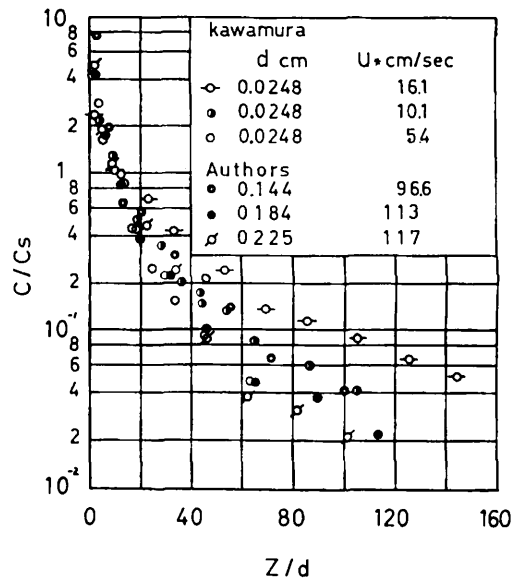


図-10 砂粒の密度分布

の考察においては、各 saltation ごとの分布特性を検討して、全体の分布特性を明らかにしなければならないと思われる。

(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、多数の砂粒が運動する層が形成され、これは Owen²⁾ によって saltation 層 (saltation layer) と呼ばれた。図-10 はこの層内における砂粒の密度分布の実験結果を示したものである。この場合、砂粒の密度 c の基準値 c_s としては、床面からの高さが粒径の10倍の高さにおける値を用いた。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は減少せず、その減少の割合がかなり小さいことがわかるが、これは流砂の場合、砂粒の密度が高さの増加とともにほぼ指数的に減少するのに比べて⁴⁾、かなり相違するといえよう。

4. Saltation の理論と実験結果との比較

(1) 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、これが主要原因となって saltation を開始すると与えられる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に、砂粒の Reynolds 数は100以上になる。したがって、砂粒に働く流体抵抗は相対速度の2乗に比例すると仮定される。著者らの実験範囲内では、風の乱れが砂粒の運動に与える影響は、河村⁹⁾の研究から判断すればほとんど無視できると思われる。以上のことから、砂粒と同体積の球を考えれば、鉛直方向および水平方向の運動方程式

は、 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, g ; 重力の加速度, および u ; 砂粒の跳躍運動における代表風速とし, さらに, 摩擦速度 u_* および粒径 d を基準量として無次元量

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

を定義すれば, それぞれ次のようにあらわされる。

$$d\bar{W}/d\tau = \mp \bar{W}^2 - K^2, \quad d\bar{U}/d\tau = (\bar{u} - \bar{U})^2 \dots\dots\dots(4)$$

まず, 砂粒の鉛直方向の運動は $\tau=0$ において $\bar{W} = \bar{W}_0$ という初期条件で解くと, $(\bar{W}_0/K) \ll 1$ の範囲で無次元最大飛高は, 近似的に次式であらわされる。

$$\bar{H} \approx (2/3) \{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\} (\bar{W}_0/K)^2 \dots\dots\dots(5)$$

また, 床面への落下直前の無次元鉛直速度 \bar{W}_1 は,

$$\bar{W}_1 \approx -\bar{W}_0 \dots\dots\dots(6)$$

となる。一方, 砂粒の水平方向の運動は, 砂粒の飛高があまり大きくなく, 風速分布の影響が省略されると仮定して, $\bar{u} = u/u_*$ とし, さらに $u = A_r u_*$ とすれば, $(\bar{W}_0/K) \ll 1$ の範囲で落下直前の無次元水平速度 \bar{U}_1 は, 次式であらわされる。

$$\bar{U}_1 \approx \bar{u} - (\bar{u} - \bar{U}_0) / \{1 + 2(\bar{u} - \bar{U}_0) \bar{W}_0 / K^2\} \dots\dots\dots(7)$$

ここに, A_r は完全粗面乱流の場合, 約 8.5 の値をとる定数である。さらに, $2(\bar{u} - \bar{U}_0) \bar{W}_0 / K^2 \ll 1$ として, 無次元飛距離 \bar{L} は, 近似的に次のようになる。

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

(2) First saltation²⁾

流体力的作用によって移動を始めた砂粒は, saltation を開始するまで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}' と first saltation の鉛直方向の初速度は $\bar{W}_0 = \tan \beta \bar{U}'$ であらわされるものとする。砂粒の転動距離と時間との関係から, 後者の値が十分小さいとして, 転動速度の距離的变化をあらわす関係は近似的に次のようになる。

$$\bar{U}' \approx \bar{u} \sqrt{2(x/d)N} / \{1 + \sqrt{2(x/d)N}\} \dots\dots(9)$$

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は, これらの関係を式 (5) に代入すれば, 次の関係がえられる。

$$\bar{H}_1 \approx (1/2) \tan^2 \beta A_r^2 (\sigma/\rho + 1/2) \{2N / (1 + \sqrt{2N})^2\} \{u_*^2 / (\sigma/\rho - 1)gd\} \dots\dots\dots(10)$$

図-8 における直線は式 (10) を計算したものであり, $\tan \beta$ 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直線とその傾向がほぼ一致していることがわかる。移動床の実験値では, 無次元掃流力がほぼ同じであるために同様な傾向の有無を検討することは

できないが, 固定床の場合よりも $\tan \beta$ の値をかなり小さくとる必要があり, これは 図-2 の事実と一致している。したがって, 飛砂の場合, 移動床および固定床のいずれにおいても, 砂粒は粒径程度も転動せずただちに saltation に移行するものと考えてよく, この first saltation によってえられる床面の衝突速度が次の saltation の初速度として与えられ, (3) で述べる関係に接続するものとするのである。

(3) Successive saltation¹⁾

First saltation から始まって, 床面で反発と跳躍とを交互にくり返ししながら風下方向に移動する successive saltation の現象を考えると, 運動する砂粒と床面の砂粒との衝突前後の速度は, 近似的に次式であらわされる。

$$\bar{U}_0 \approx e \bar{U}, \quad \bar{W}_0 \approx e (b_1 \bar{U}_1 + b_2 \bar{W}_1) / \{b_3 + b_1 (\bar{W}_1 / \bar{U}_1)\} \dots\dots\dots(11)$$

ここに, $b_1 = (1+e) \tan \tau$, $b_2 = 1-e \tan^2 \tau$ および $b_3 = \tan^2 \tau - e$ であり, τ は反発して継続運動をする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ている。

跳躍する砂粒の鉛直および水平方向の初速度を与えれば, 式 (5) および (8) によってそのときの飛高と飛距離が求められ, また式 (6) および (7) から床面への落下直前の鉛直および水平方向の速度が求められる。さらに, 後者は反発運動に関する式 (11) を用いて, 次の saltation の初速度を与える。この操作を各 saltation ごとに繰り返すことによって, successive saltation における砂粒の初速度と飛高および飛距離の変化を求めることができる。すでに著者らは, saltation を開始した砂粒が 6~10 回程度の saltation によって, first saltation の初速度の大小に関係なく, 鉛直方向の速度と水平方向の速度に対して, 床面条件および掃流力に規定される定常速度が存在することを示した。Stationary saltation においては砂粒の水平および鉛直方向の速度は, 近似的にそれぞれ次のようにあらわされる。

$$\bar{U}_S \approx [(1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + 2(1-e)/\lambda(\bar{u}/K)^2}] \cdot \bar{u} / 2, \quad \bar{W} \approx \lambda \bar{U}_S \dots\dots\dots(12)$$

式 (12) から定常速度が 0 になる条件は, 次式で示される。

$$u_*^2 / (\sigma/\rho - 1)gd = (2/3) (1/C_D) \{ (1-e) / e \lambda \bar{u}^2 \} \dots\dots\dots(13)$$

以上の結果を用いて, 砂粒が stationary saltation に達した場合の平均飛高および飛距離は式 (12) を式 (5) および (8) に適用して, 次のようにあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{H}_m &= (1/6) \{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D\} \lambda^2 \{ (1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + 2(1-e)/\lambda(\bar{u}/K)^2} \}^2 (\bar{u}/K)^2 \\ \bar{L}_m &= 4 \bar{H}_m / \lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

図-6における曲線は、first saltation より与えられる初期条件および実験結果から求められた床面条件を与えて、前述した方法で計算した successive saltation の理論曲線である。実線は無次元代表風速 \bar{u} を 20 とし、破線は実験値から求められる飛高に対応した代表風速を対数則を用いて計算したものである。この図から、実験値と理論値の傾向がかなりよく一致していることがわかる。ただし、この計算において、水平方向の抵抗係数は鉛直方向の抵抗係数に等しいと仮定したが、水平方向の Reynolds 数が saltation の継続回数の増加とともに約 10^2 から 10^3 まで変化するのに対し、鉛直方向の Reynolds 数の変化はそれに比べて小さいので、抵抗係数が Reynolds 数とともに変化する範囲では、今後、若干の修正が必要とされよう。次に、図-11 は stationary saltation の理論との比較のために、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。図中の各曲線は式(13)で与えられる無次元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式(14)を計算したものである。反発係数が 0.5 および 0.95 とした曲線は、それぞれ水中および空气中で砂粒が stationary saltation として運動する場合の関係を示し、これらの条件における最小および最大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、反発係数の影響がきわめて大きいことがわかり、このことは、実験結果からも明らかにされている。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および飛距離はかなり大きく、前者は後者より理論曲線に近づいている。飛砂の場合、6~10 回までの saltation を継続し stationary saltation に漸近すれば、そのときの飛高および飛距離は理論曲線にかなり近づくものと思われる。

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 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 に適用して若干の検討を加えた。本研究でえられた成果のうち主なものは、次のようである。

(1) 砂粒の飛び出し角度、落下角度、反発係数、飛高、飛距離および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 現象を詳細に考察した。

(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砂粒と衝突し

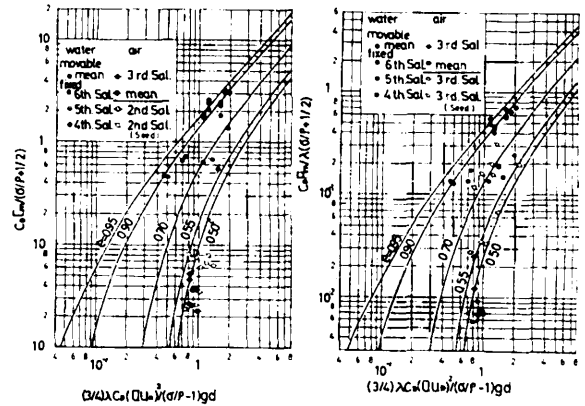


図-11 飛高および飛距離と掃流力の関係

ただちに saltation に移行すると考えられる。

(3) Successive saltation における飛高および飛距離の変化は、理論結果とかなりよく一致する。ただし、数回の saltation で飛高が粒径に比べて非常に大きくなり、代表風速が摩擦速度に比例するという仮定は成立しないので、風速分布を考慮した計算も必要である。

(4) Stationary saltation の理論を用いて飛高および飛距離について考察した結果、この理論は飛砂の場合にかなり適用でき、流砂との関係で統一的に表示できそうであるが、今後さらに successive saltation について同様に検討する必要がある。

本研究を行なうにあたり、図面の整理に熱心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・青山俊樹：水流による砂れきの saltation の機構(2) - successive saltation の理論について - , 京大防災研年報, 第13号B, 1970, pp. 199~216.
- 2) 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), 京大防災研年報, 第12号B, 1969, pp. 491~502.
- 3) Bagnold, R.A.: The physics of blown sand and desert dunes, Mathuen & Co. Ltd., London, 1954.
- 4) 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 - , 京大防災研年報, 第13号B, 1970, pp. 217~232.
- 5) Owen, P.R.: Saltation of uniform grains in air, Jour. Fluid Mech., Vol. 20, 1964, pp. 225~242.
- 6) 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, 京大防災研年報, 第12号B, 1969, pp. 491~502.
- 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, 1971. II-36.
- 8) 河村竜馬：飛砂の研究, 東大理工学研報告, 第5巻, 1950, pp. 95~112.