

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——

土 屋 義 人・河 田 恵 昭

MECHANISM OF MOTION OF SAND GRAINS BY WIND (1)

——Experiments on the Initiation for Movement of Sand Grains——

By Yoshito TSUCHIYA and Yoshiaki KAWATA

Synopsis

In studying the mechanism of sand storm, it is necessary to make clear the mechanics of motion of sand grains by wind in relation to the mechanics of motion of sand grains by water. As the first report, this paper deals with the initiation for movement of sand grains by wind with the aid of detailed experiments. It was found that there is a wide difference in the dimensionless expression between the dimensionless tractive force, so-called flow intensity and the Reynolds number of sand grain for the initiation for movement of sand grains by water and by wind. Using some kinds of grains with various specific gravities, the effect of specific gravity of grains on the initiation for movement was considered in a laboratory experiment. It was found that the value of dimensionless critical tractive force decreases with the increase of the relative density of grains to fluid if the Reynolds number of grain is constant, and would approach to a constant when the relative density becomes very large.

1. 緒 言

風による砂粒の輸送現象は通常飛砂として海浜変形の主要な現象であり、海岸工学の問題として、また砂浜地の利用面からは農業工学の問題として、各種の立場からその機構の解明とそれに基づく災害の防止対策について研究がなされてきた。海岸工学の立場からは、たとえば国際海岸工学会議の講演集にも1963年に2編、1964年に2編、また1968年に4編の論文が発表されてきた。また、わが国においては、1950年頃東大の河田研究室¹⁾や京大の石原研究室²⁾において、広範囲な観測とともに飛砂現象に関する基礎的な研究がなされてきたが、最近ではどちらかといえば、あまりこの方面の研究はなされていないようである。

一方、飛砂は水流による砂粒の輸送現象すなわち流砂と類似なものであり、これら両者の統一的な力学過程の解明こそ、飛砂および流砂力学の確立であるといつてよく³⁾、これと同様な現象は飛雪⁴⁾においてもいえることである。本研究ではこの観点に立って、風による砂粒の移動限界に関する詳細な実験を実施して、水流による砂粒の移動限界すなわち限界掃流力との関連において、両者の相違とその機構を主として実験的に考察しようとするものである。

2. 風による砂粒の移動限界に関する従来の実験結果の考察

従来風による砂粒の移動限界に関しては、Bagnold⁵⁾をはじめとして、Chepil⁶⁾、千種⁷⁾ および秋葉⁸⁾ ら

によって詳細な観測や実験が実施されたが、最近ではあまり行なわれていないようである。この問題についての理論的な考察は Bagnold にはじまり、1949年内田⁹⁾ および 1952年石原および岩垣²⁾ によって試みられ、つぎのような考え方が示されている。いま、石原らにしたがって概説すれば、つぎのとおりである。

1) 衝力論的な方法 砂面上の1つの砂粒に働く流体抵抗とその砂粒の摩擦抵抗とがつり合ったときを移動限界とするもので、静的なつり合い関係から次式が成立すると仮定する。

$$(\pi/6)d^3(\sigma-\rho)g(\tan\varphi\cos\alpha+\sin\alpha)=(\pi/8)\rho C_D d^2u_1^2 \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに、 d : 砂粒の大きさ、 σ : 砂粒の密度、 ρ : 空気密度、 u_1 : 砂粒の近傍における風速、 C_D : 砂粒の抵抗係数、 g : 重力の加速度、 φ : 砂粒の静止摩擦角、および α : 砂面の傾斜角、である。(1)式中の u_1 として、砂面の近傍における風速であることから、近似的に摩擦速度 u^* を用いて $u_1 \approx Ar u^*$ として、(1)式を変形すれば、つぎのようにあらわされる。

$$u_c^* = A \{ \sin(\varphi+\alpha)/\cos\varphi \}^{1/2} \sqrt{(\sigma/\rho-1)gd} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに、 u_c^* : 限界摩擦速度、 Ar および A はともに定数であって、前者は約 8.5 程度の値である。この関係は古く Bagnold の示した関係に対応するものであって、摩擦角や砂面の傾斜角の影響を省略すれば、全く同一である。

2) 掃流力論的な方法 これは砂面に作用する掃流力のうち1つの砂粒がうける力が砂粒の摩擦抵抗に釣り合うとするものであって、同様に静的なつり合い関係から次式によってあらわされる。

$$\begin{aligned} \rho u_c^{*2}/n &= \rho(\pi/6\lambda)^{2/3} d^2 u_c^{*2} \\ &= (\pi/6)d^3(\sigma-\rho)g(\tan\varphi\cos\alpha+\sin\alpha) \quad \cdots\cdots(3) \end{aligned}$$

したがって、これから

$$u_c^* = A' \{ \sin(\varphi+\alpha)/\cos\varphi \}^{1/2} \sqrt{(\sigma/\rho-1)gd} \quad \cdots\cdots(4)$$

となって、(2)式と同じ関係がえられる。

3) 乱れによる揚力論的な方法 内田⁹⁾ によって示されたもので、風の乱れによる鉛直方向の圧力変動によって砂粒がとび出るとするものであって、次式による。

$$(1/4)\pi d^2(\partial p'/\partial z) = (\pi/6)d^3(\sigma-\rho)g \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに、 p' : 変動圧力および z : 砂面に垂直方向の座標、である。乱流理論を用いて上式中の $(\partial p'/\partial z)$ を計算し、若干の変形をして、(2)および(4)式に対応したつぎの関係であらわした。砂粒が大きい場合すなわち $(\kappa/l_0) \gg 1$ および $(\beta/\lambda_0)d \gg 1$ のときには、

$$u_c^* = A'' \sqrt{(\sigma/\rho-1)gd} \quad \cdots\cdots(6)$$

であり、また砂粒が小さい場合すなわち $(\kappa/l_0)d \ll 1$ および $(\beta/\lambda_0)d \ll 1$ のときには、

$$u_c^* = A''' \sqrt{(6/\rho-1)g(l_0/\sqrt{d})} \quad \cdots\cdots(7)$$

で近似される。ここに、 A'' : κ , ε および β の関数で、ほぼ定数と考えられるもの、 A''' : ε の関数であって定数と考えられるもの、 κ : Kármán 定数に対応し、ほぼ 0.4、 ε および β : それぞれ鉛直方向の混合距離および最小渦の直径に関する比例定数であって、1および2程度の値、 l_0 および λ_0 : それぞれ床面における混合距離および最小渦の直径、である。この方法によると、砂粒が大きい場合には、前2者と同じ関係となって、Bagnold の式に対応するが、粒径が小さくなると限界摩擦速度はむしろ増加することになる。しかし、この方法では砂面の傾斜角の影響を導入することはできない。

以上の考察からわかるように、いずれの方法で砂粒の移動限界を考察しても、3) の場合の粒径の小さいときを除いて、つぎの関係が成立する。

$$u_c^* = A_0 \sqrt{(\sigma/\rho-1)gd} \quad \cdots\cdots(8)$$

ここに、 A_0 は実験定数である。Fig. 1 は砂粒の比重が 2.6 前後と思われる従来の実験値を整理し、粒径に

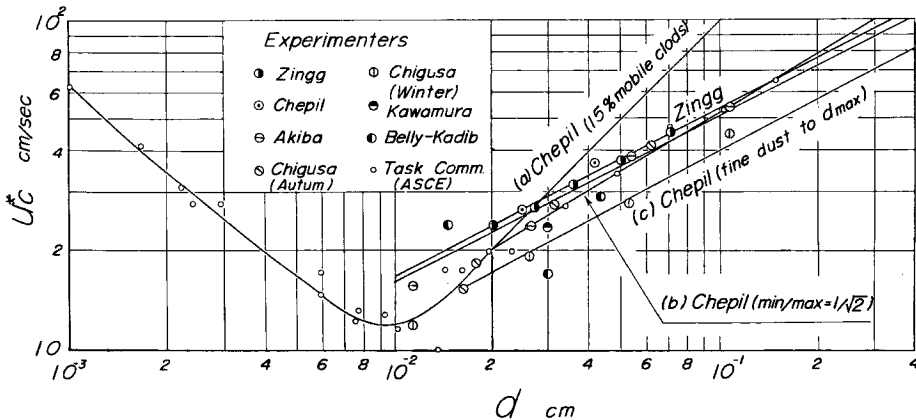


Fig. 1 Variation of critical shear velocity with size of sand grains.

よる限界摩擦速度の変化としてあらわしたものである。図中には、比較のために Chepil⁹⁾ および Zingg¹⁰⁾ らによる実験式を示してある¹¹⁾。これらのうち、直線 (a) で示される Chepil の関係は 15% は移動しないような土砂に対する関係であって、ここで取扱う砂粒の場合とはかなり条件が相違する。直線 (b) は最小および最大粒径の比が $1/\sqrt{2}$ である比較的一様な砂粒の場合であって、ここで対象とする移動限界そのものであり、また、直線 (c) は混合した砂粒の場合のものである。これらの結果からわかることは、粒径が約 0.02 cm 以上になると、実験値のかなりのばらつきはあるが、比較的 (8) 式の関係が成立するようであり、その場合 Chepil および Zingg の実験式はいずれも大差なくこの関係をあらわしている。しかしながら、粒径 0.01 cm 付近において限界摩擦速度は最小となり、これよりさらに粒径が小さくなると、かえって増加することがわかる。この事実は一般に粒径が細くなると、粒子相互間に粘着性が存在するようになるために、限界摩擦速度がむしろ大きくなるのではないかと説明されているが、明らかでなく、また前述した内田⁹⁾ の理論的考察の結果によって説明されるかも知れない。乾燥砂によるこの粒径範囲についての詳細な実験的研究を必要とするものと考えられる。

一方、水流による砂れきの移動限界は限界掃流力としてたとえば栗原¹²⁾ および岩垣¹³⁾ らによって詳細な理論的研究がなされているが、その考え方においては、前者は前述した掃流論的な方法により、また後者は衝力論的な方法に基礎をおいている。いまここでは考察の簡単な後者の方法によることにすれば、水流および風のいずれによる場合も、その移動限界が砂粒に働く流体力などに対する静的なつり合い条件が適用されるものとすれば、それは

$$u_*^2/(\sigma\rho-1)gd \tan \phi = 1/\epsilon \psi(u_*^*d/\nu) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\psi: u_*^*d/\nu$ のみの関数、 ν : 流体の動粘性係数および ϵ : シャヘイ係数といわれ、この理論的考察における唯一の実験定数であって、物理的にはつぎのように説明されるものである。すなわち、この方法では砂面上の 1 つの砂粒の移動限界を取扱っているが、実際には多数の砂粒が砂面にあって、それらが互にしやへいし合い、したがってその砂粒の流れからうける抵抗は実際には理論値よりかなり減少しているものと考えられる。このために水流による砂粒の移動限界に関する実験値に一致するように ϵ の値を定めると 0.4 となり、この結果は Fig. 2 に示すように、多数の実験値とよく一致するし、また、Shields¹⁴⁾ の実験曲線ともよい対応を示す。

Fig. 3 は同様な考えのもとに、(9) 式によって従来の実験値を再整理した結果であるが、図中には Chepil による比重が 1.55 および 1.91 の粒子の実験値も図示してある。また、比較のために (9) 式であらわされる岩垣の理論曲線を $\epsilon=1$ および 0.4 に対して示しておいたが、これらからつぎのことがわかるであろう。すなわち、Figs. 2 および 3 から、これら両者においては非常に大きな相違があり、 u_*^*d/ν の

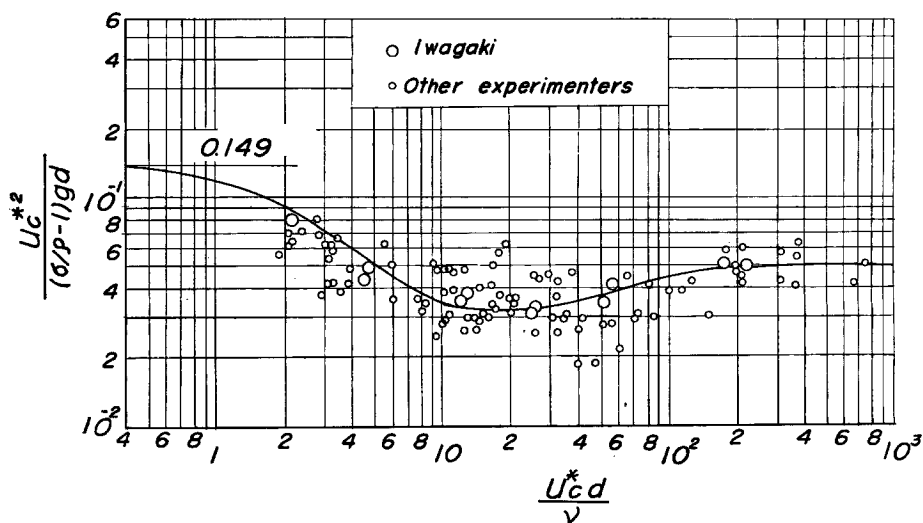


Fig. 2 A dimensionless expression of initiation for movement of sand grains by water, so-called dimensionless critical tractive force.

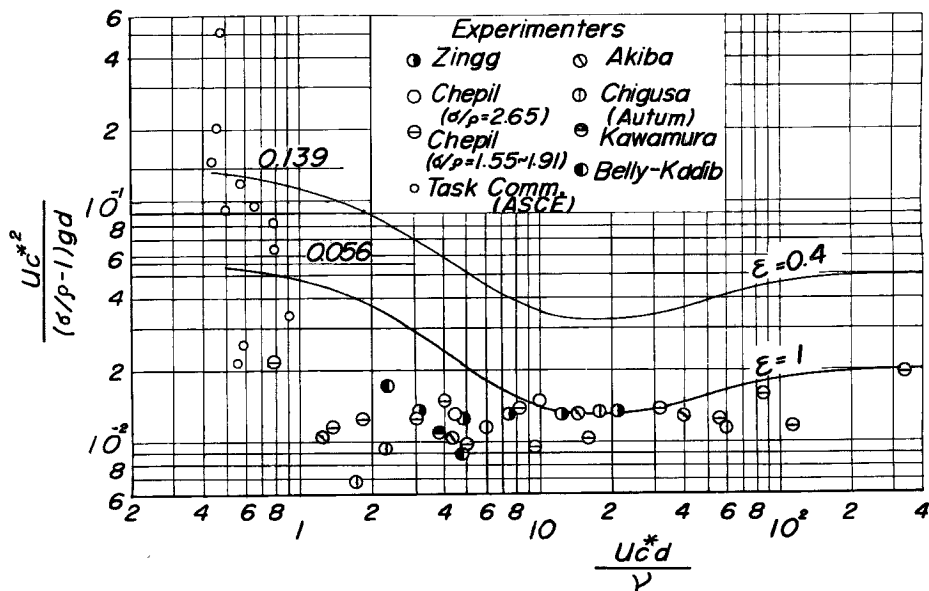


Fig. 3 A dimensionless expression of initiation for movement of sand grains by wind.

値が大きい範囲では、飛砂の場合には水流のそれに比べて無次元化した限界掃流力 $u_{c*}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ は平均的に約 1/2 程度以下であることがわかる。また u_{c*}^*d/ν の値が小さい範囲では、その傾向が両者で非常に相違する。とくに Fig. 3 によれば、 $u_{c*}^*d/\nu \approx 1$ 付近までは $u_{c*}^{*2}(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値はほとんど一定であるが、これより小さい範囲においては、 $u_{c*}^*d/\nu \approx 1$ を限界としてこの値の減少とともに急激に増加し、この範囲では実験値が非常に散乱することがわかる。床面の近傍における流れの特性が水流と空気の流れの場合において、本質的には相違するものは見出されないが、ただ大きく相違すると考えられるのは、その流体に対する砂粒の相対密度であって、前者の場合には、2～3程度の値であるのに反して、後者では2000程度の値になることである。しかし、前述したように、砂粒に働く流体力などに対する静的なつり合い条件においては、この影響は見出すことはできない。一方、限界掃流力の実験においてもそうであるように、砂粒の移動限界としてどのような状態のときをとるかということが大切であって、Fig. 3 に示した実験値が非常に散乱しているのも、1つはこの理由によるものと考えられる。

以上のように、水流と空気の流れの場合に存在するこのきわめて大きな相違を明らかにすることは、いうまでもなく飛砂と流砂現象の統一化においてきわめて重要であるので、本研究においてはつぎのことを考慮して実験的に検討することにする。すなわち、その一つは砂粒の移動限界の判定基準であって、当然これを一定にしておかないとこの相違点を究明することはできない。いま一つは、前述したように両者の間における砂粒の相対密度における相違を明らかにすべく、各種の比重をもつ粒子を用いて実験を行なって、移動限界に及ぼすこの影響を見出す必要があることである。

3. 実験装置および実験方法

1) 実験装置

実験に用いた風洞は、防災研究所宇治川水理実験所にある風洞水槽を改造したものであって、その大きさは高さ 39 cm、幅 75 cm および長さ 11 m であり、側面はガラス板、上面はアクリライト板、床面は鋼板からできている。さらに、床面においては上流より 4.5 m は全断面滑面であり、それより下流側は砂粒を敷くために約 10 cm 低くなっている。

風速は無段変速器による操作によって、断面中央部で約 6.5 m/sec から 17 m/sec まで連続的に変えることができ、その測定は上流より 3.9 m のところに設置した熱線風速計によって行なった。

2) 実験に用いた粒子の特性

Table 1 Properties of grains used.

No.	Grain Size d cm	Kind of grains	Specific gravity σ/ρ_0	Friction coefficient $\tan \varphi$	Shape factor b/a
1	0.102 (0.119 ~0.0840)	Sand grains	2.564	1.217	0.762
2	0.0715(0.0840~0.0590)	"	2.605	1.223	0.733
3	0.0505(0.0590~0.0420)	"	2.618	1.204 (Rough bed)	0.685
3'	" "	"	"	0.426 (Smooth bed)	"
4	0.0359(0.0420~0.0297)	"	2.637	1.273	0.717
5	0.0254(0.0297~0.0210)	"	2.538	1.143 (Rough bed)	0.673
5'	" "	"	"	0.394 (Smooth bed)	"
6	0.144 (0.168 ~0.119)	Seeds	1.216	0.962	0.909
7	0.0715(0.0840~0.0590)	"	1.076	1.110	0.743
8	0.102 (0.119 ~0.0840)	Lightweight aggregate	1.716	1.174	0.736
9	" "	Nylon grains	1.370	1.148	0.837
10	0.0715(0.0840~0.0590)	"	"	1.096	0.872
11	0.0505(0.0590~0.0420)	"	"	1.046	0.777

前述したように砂粒の移動限界に及ぼす相対密度の効果を調べるために使用した粒子は砂粒5種類、ナイロン粒子3種類、軽量骨材1種類および種子が2種類であり、それらの特性は **Table 1** に示すとおりである。この場合、粒子の粒径はなるべく一樣になるようにフルイ目の大きさのそれぞれの平均値を採用したが、**Table 1** には用いたフルイ目の大きさを示してある。**Photo. 1** はこれらの粒子の写真であるが、軽量骨材の粒子を除いてかなり球状に近いものであることがわかる。また表中の粒子の静止摩擦角は、水流による砂粒の移動限界に関する実験において用いた著者らの方法と同様に、粒子をガラス板にニスづけし、その上に同じ粒子をのせて、静かにその板を傾斜させ、粒子が落下するときの角度を測定して求めた結果である。ただし、**Table 1** において No. 3' および 5' はいづれも滑面における特性を示す。なお **Table 1** には **Photo. 1** に示した結果から粒子の最大および最小の大きさ a および b を測定し、その比として定義される形状係数の平均値も示しておいた。

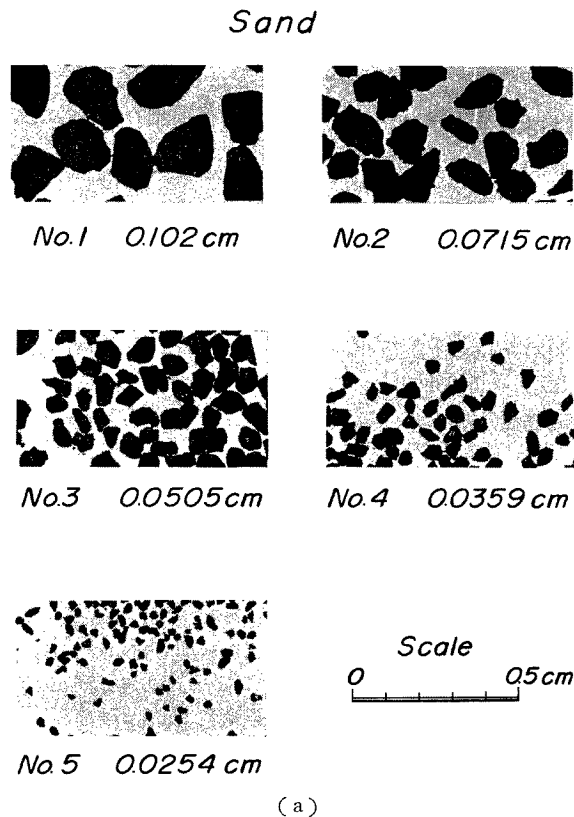
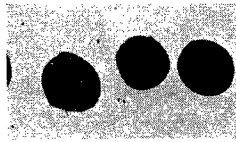
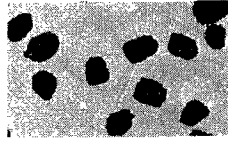


Photo. 1 Photographs of grains used.

Seed

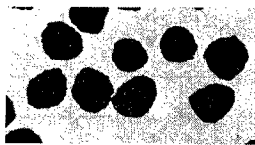
No.6 0.144 cm



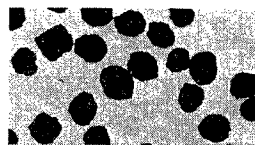
No.7 0.0715 cm

Lightweight aggregate

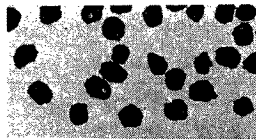
No.8 0.102 cm

Nylon

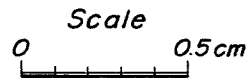
No.9 0.102 cm



No.10 0.0715 cm



No.11 0.0505 cm



(b)

Photo. 1 Photographs of grains used.

3) 実験方法

限界掃流力の測定は、床面に対象とする粒子を一様にニスづけし、風洞の流入口より約 4.2 m の下流に対象とする粒子を約 300 個から 600 個できるだけランダムに置き、所定の風速で定常状態になったのち、単位時間当りの粒子の移動数を測定して求めた。それと同時に風速の測定を上記の熱線風速計によって断面中央部で行ない、この結果より摩擦速度を決定した。粗面における風速分布は一般に、

$$u/u^* = A_r + 5.75 \log_{10}(z/d) \dots\dots\dots(10)$$

であらわされるので、本実験においては u^*d/ν の値が約 199 以上の場合には A_r の値が 8.5 前後の値となることを考慮して、この関係を測定された風速分布に適用して求めた。また、実験ごとに気温を測定し、これから空気の動粘性係数および密度を求めた。このような方法で、1つの粒子に対して風速を4～5ケース

変化させて、単位時間当りの粒子の移動数と摩擦速度との関係を求めることにした。

4. 実験結果とその考察

1) 実験結果と考察

それぞれの粒径に対する風速の $p_0=0.5\%/sec$ の付近における測定結果の数例は Fig. 4 に示される。ここで問題となるのは座標 z の値の原点の位置であるが、これは u と $\log_{10}(z/d)$ とが直線関係となることおよび前述したように $A_r \approx 8.5$ となることを考慮して定めた。

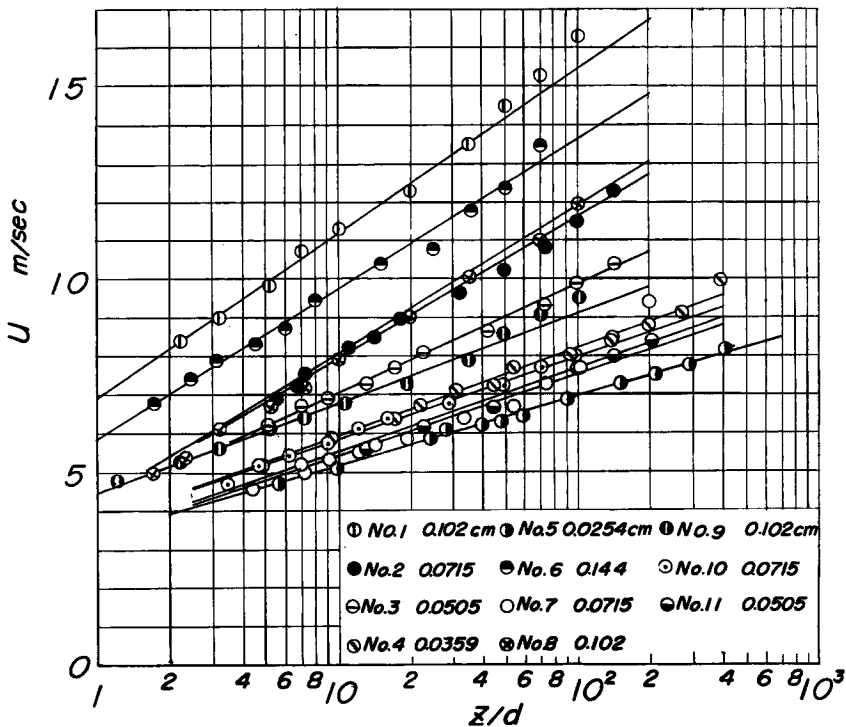


Fig. 4 Some examples of velocity profiles near initiation for movement of grains by wind.

また、単位時間、単位面積当りの移動数は、単位面積当りに露出している粒子の数で割った値 $p_0\%/sec$ であらわすことにした。この表示法は著者の一人土屋¹⁵⁾によって提案されたものであって、粒径に関係なく粒子の移動限界を規定できるものと考えられる。このようにして求めた粒子の移動割合 $p_0\%/sec$ と摩擦速度 u^* との関係を示すと Fig. 5 のとおりである。これらの結果のうち、No.3' および 5' は粒径が小さくなってこのような測定が困難であったので、滑面の床面での移動限界について同様な方法によって測定した結果である。床面付近における風速分布はこの程度の小さい u^*d/ν の値の範囲においては、粗面との相違はなく、ただ $\tan \phi$ の値のみが小さくなるので、粗面の場合と同様に考えてよいだろう。

さて、粒子の移動限界としてどのような状態をとるかは前述したようにきわめて重要であるので、ここではつぎの2つの場合について考えることにする。その第1はすでに水流の場合に対して定められた $p_0=0.5\%/sec$ を移動限界とすることであって、この値は土屋によって種々の流れに対する砂れきの移動限界に適用して詳細に検討されている^{16), 17)}。いま1つは粒子の移動量が存在しなくなる時の摩擦速度である。

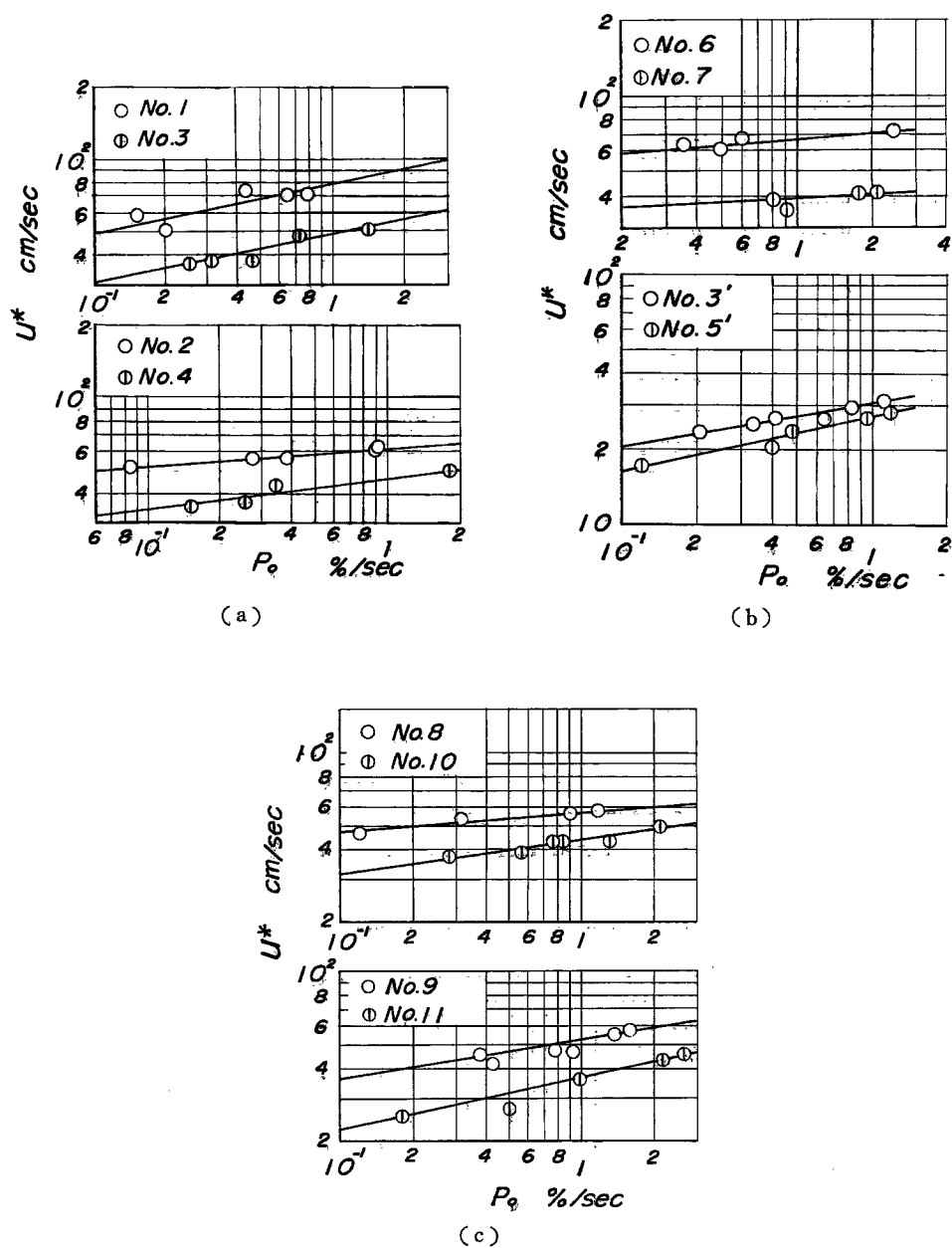


Fig. 5 Variation of rate of movement of grains with shear velocity by wind.

Table 2 Experimental results of initiation for movement of grains by wind, calculated by first criterion $p_0=0.5\%/sec$.

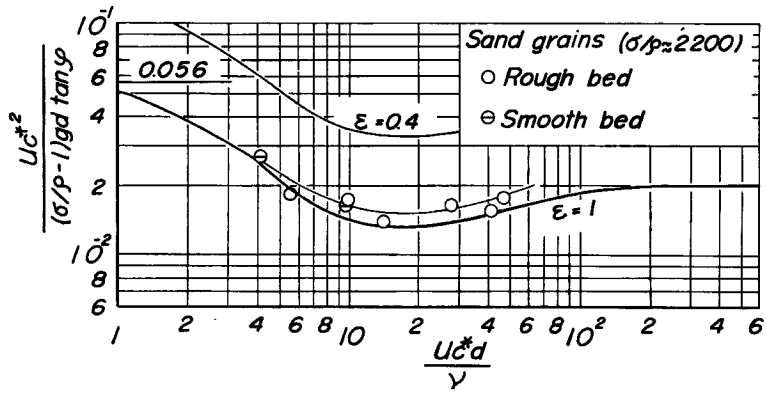
No.	d cm	ν cm ² /sec	u_c^* cm/sec	σ/ρ	$u_c^* d/\nu$	$u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$
1	0.102	0.1490	68.3	2123	46.8	0.0181
2	0.0715	0.1517	58.0	2178	27.3	0.0180
3	0.0505	0.1576	43.0	2232	13.8	0.0189
4	0.0359	0.1531	41.8	2208	9.85	0.0177
5	0.0254	0.1519	33.2	2124	5.55	0.0182
6	0.144	0.1517	63.0	1015	59.8	0.0288
7	0.0715	0.1519	36.5	901	17.2	0.0190
8	0.102	0.1395	55.0	1372	40.7	0.0188
9	0.102	0.1494	45.2	1137	30.9	0.0157
10	0.0715	0.1511	40.1	1142	19.0	0.0183
11	0.0505	0.1576	32.0	1168	10.3	0.0169
3'	0.0505	0.1436	27.4	2130	9.64	0.0168
5'	0.0254	0.1394	22.8	2030	4.09	0.0267

Table 2 は第1の移動限界すなわち $p_0=0.5\%/sec$ を適用して、これに対応した摩擦速度 u_c^* を Fig. 5 から求め、Reynolds 数 $u_c^* d/\nu$ の関数として無次元化された限界掃流力 $u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ を計算した結果であるが、前述したような理由からそれぞれに対する相対密度 σ/ρ の値も付記してある。ただし、No.5 の測定値は観察によって移動限界を判定した結果である。Fig. 6 は相対密度 σ/ρ の値の適当な範囲ごとに、Table 2 の結果を図示したものであって、図中には $\varepsilon=1$ および 0.4 に対応した限界掃流力に関する理論曲線が考察のために示されている。

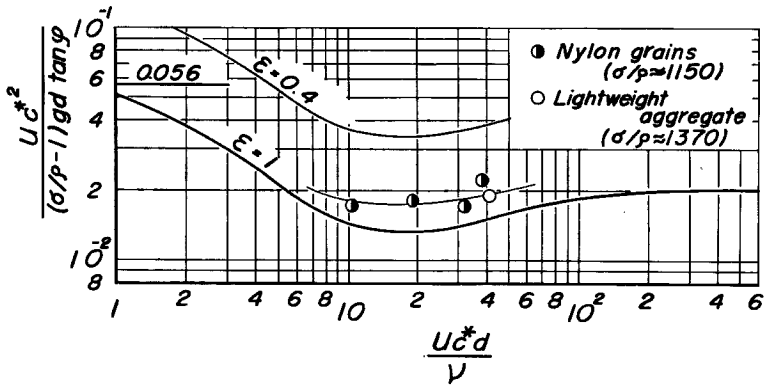
一方、前述した第2の基準は p_0 の値が存在しなくなる摩擦速度の値を推定することであって、ここでは Fig. 5 に示した結果を Fig. 7 のように図示しかえて、 $p_0 \approx 0\%/sec$ となる摩擦速度 u_{c0}^* を図中に示したような曲線で実験値から外挿して求めた。ただし、この推定において実験値の数が少なく十分正確に推定できないものも若干あった。このようにして求められた限界摩擦速度を用いて、 $u_{c0}^* d/\nu$ および $u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ を計算して一括表示したものが Table 3 である。さらに、Fig. 8 は Fig. 6 と同様にこの

Table 3 Experimental results of initiation for movement of grains by wind, calculated by second criterion $p_0=0\%/sec$.

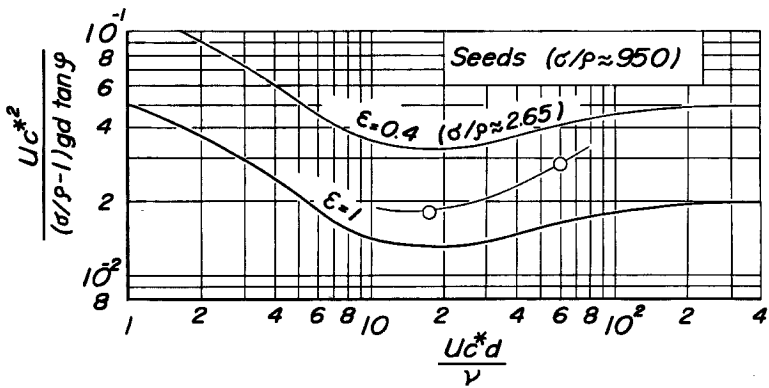
No.	d cm	ν cm ² /sec	u_{c0}^* cm/sec	σ/ρ	$u_{c0}^* d/\nu$	$u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$
1	0.102	0.1490	54.7	2123	37.4	0.0117
2	0.0715	0.1517	49.8	2178	23.4	0.0133
3	0.0505	0.1576	34.0	2232	10.1	0.0118
4	0.0359	0.1531	32.8	2208	7.69	0.0109
6	0.144	0.1517	59.8	1015	56.8	0.0259
7	0.0715	0.1519	33.8	901	15.9	0.0162
8	0.102	0.1395	46.2	1372	33.8	0.0133
9	0.102	0.1494	39.5	1137	27.0	0.0120
10	0.0715	0.1511	35.5	1142	16.8	0.0143
11	0.0505	0.1576	24.4	1168	7.81	0.00982
3'	0.0505	0.1436	23.4	2130	8.23	0.0122
5'	0.0254	0.1394	16.4	2030	2.94	0.0137



(a)



(b)



(c)

 Fig. 6 Dimensionless expression of initiation for movement of grains by wind, calculated by first criterion $p_0 = 0.5$ %/sec.

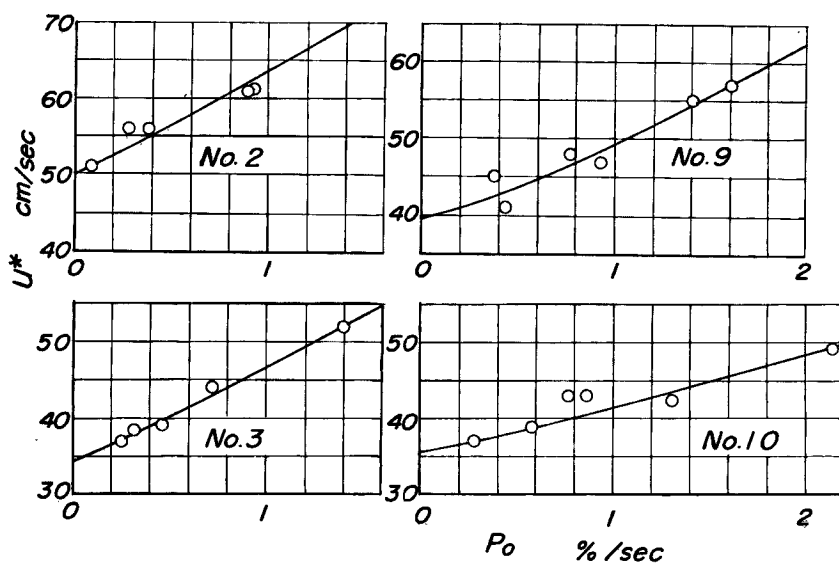


Fig. 7 Method for estimating critical shear velocity by second criterion $p_0=0.5\%/sec$.

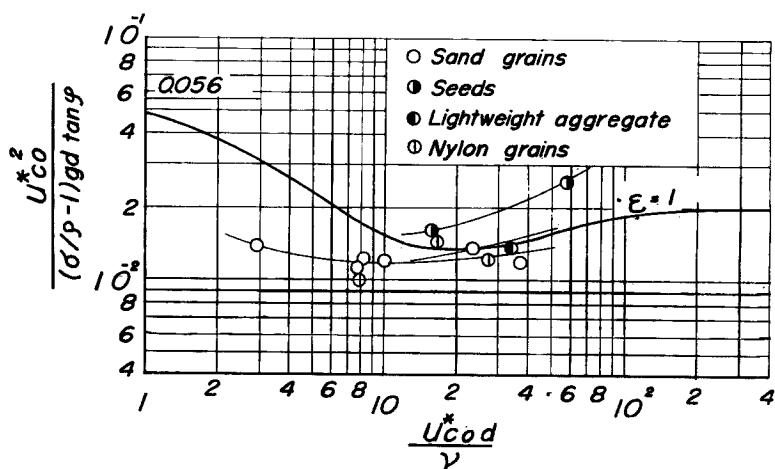


Fig. 8 Dimensionless expression of initiation for movement of grains by wind, calculated by second criterion $p_0=0\%/sec$.

実験結果を図示したものであり、比較のために前述したと同様な理論曲線も示されている。

これらの移動限界に関する実験結果と Fig. 3 に示した結果とを比較して、つぎのことがわかるであろう。まず、第1に Fig. 6 によれば $p_0=0.5\%/sec$ として求めた結果であるにもかかわらず、Fig. 2 に示した水流の場合の結果より、非常に小さくあらわれていることであり、この事実はすでに従来の実験値について指摘したとおりであって、この移動限界の基準においても明らかにされる。また、全体的な実験値の u_c^*d/ν による変化は、水流の場合のそれに類似しているが、とくに相対密度の影響はかなり大きいようである。この点については詳細に後述するつもりである。第2の点は Fig. 3 の結果と比較して、この基準による実験値は、水流の場合にはよく一致するけれども、風による場合にはかなり大きくあらわれることであり、とくに u_c^*d/ν の値が小さい範囲においては顕著である。つぎに、Fig. 8 の結果によれば、 $\tan \varphi$ として $p_0=0.5\%/sec$ のときに用いたと同じ値を用いたけれども、砂粒による実験値は Fig. 3 に示した従来の実験結果とよく一致していることがわかる。そして u_{c0}^*d/ν の値が小さくなくても、 $u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値はあまり変化せず、Fig. 3 の結果の傾向とよく一致していることがわかる。すなわち、この事実から判断すると、風による砂粒の移動限界の判定は水流による場合と相違して、砂粒が若干移動すると考えられるいわゆる限界掃流力よりかなり小さく、飛砂量が存在しない限界の摩擦速度をあらわしていることがわかる。この事実は、Fig. 3 に示した実験値のうち、河村、Belly および Kadib¹⁹⁾ の結果は飛砂量が存在しない限界として求められたものであるが、この実験値はそのほかのものとはよく調和していることから明らかにされる。さらにまた、 $p_0=0.5\%/sec$ の規準による場合とほぼ同様に、相対密度の影響がかなり存在することも見出されるであろう。

しかしながら、以上に述べた実験結果では粒径のきわめて小さい範囲の実験値がないので、 u_c^*d/ν あるいは u_{c0}^*d/ν の値が小さくなった場合に、 $u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ または $u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値が増大する傾向を確かめることはできない。いずれ機会をみてこの範囲についての実験を追加して詳細に検討したいと考えている。

なお、Fig. 9 は水流の場合に対して土屋¹⁷⁾が Fig. 5 と同様な関係を求めた実験結果から、Fig. 7 と同じ方法によって流砂が存在しない限界摩擦速度を推定したものである。Fig. 8 の結果と比較して、相対密度の影響をさらに明らかに知ることができよう。

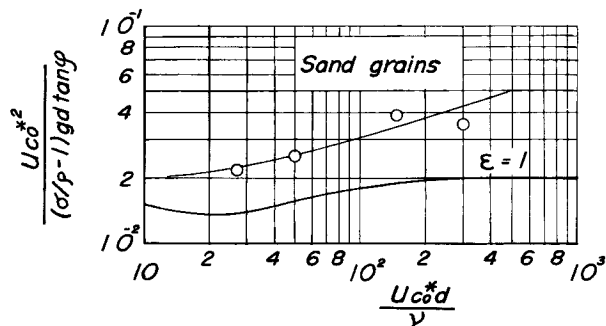


Fig. 9 Dimensionless expression of critical tractive force, calculated by second criterion $p_0=0\%/sec$.

2) 砂粒の移動限界に及ぼす相対密度の影響

いま、一様な砂粒床面における流れによる砂粒の移動限界を Shields¹⁴⁾ にならって次元解析的に考察することにすれば、一般的につぎの関係が得られる。

$$F_1\{u_c^{*2}/gd, u_c^*d/\nu, \sigma/\rho, \tan \varphi\} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

さらに、前述した限界掃流力についての考察のように、流体力に対する砂粒の静的なつり合い条件を考える

ことにすると, (11) 式は

$$F_2 \{u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi, u_c^*d/\nu, \sigma/\rho, \tan \varphi\} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

とあらわされる。すなわち (9) および (12) 式からもわかるように, 砂粒の移動限界の考察においては, 式中の第1および第2の無次元量がとりあげられてきたわけであるが, もし砂粒の移動限界が流体力の変動に対して動的なつり合条件によって規定されと考えることにすると, 第3の無次元量 σ/ρ も重要な要素となるであろう。いいかえると実験的な観察の結果によれば, 砂粒はその移動限界において乱れによって微小な揺動をしているので, このような動的な挙動においては, 一般に仮想質量力が重要となり, 相対密度を1つの無次元量としてとりあげるべきことになる。これに対して, 第4の無次元量は静的または動的なつり合条件に対しても第1の無次元量に付加されと考えられるので, この無次元量は独立にはあまり重要ではないであろう。

以上の考え方によって, まず Fig. 6 に示した実験結果において, u_c^*d/ν の値を一定として, $u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ と σ/ρ との関係を示すと, Fig. 10 のようにあらわされる。ただし, $\sigma/\rho \approx 2.65$ の場合は Fig. 1 に示した水流による場合の値であって, それ以外は Fig. 6 に示した実験値より推定したものである。これから明らかなことは, u_c^*/ν を一定とすると, $u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値は σ/ρ の増加とともに減少し, かなり急激に減少する。砂粒の移動限界の問題はこれまで飛砂の場合と流砂の場合とについて別々に検討されてきたために, この事実は見出されていなかったが, この実験結果によると, 相対密度の影響はかなり大きいことがわかる。なお, Fig. 10 において σ/ρ の値が大きくなると, $u_c^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値が一定値に近づく傾向を示すが, この点については理論的な考察によって明らかにされるべきであろう。図中には, 参考までに限界掃流力に関する岩垣の理論曲線 ($\varepsilon=1$ とした場合) の示す値を付記しておいた。

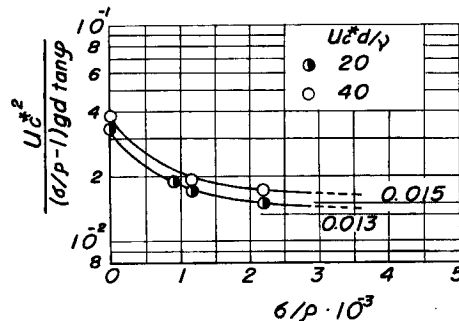


Fig. 10 Influence of relative density of grains to fluid on initiation for movement of grains by wind and by water, calculated by first criterion $p_0=0.5\%/sec$.

つぎに, 移動限界について第2の基準 $p_0=0\%/sec$ を適用した場合について考察しよう。Fig. 11 は Fig. 8 に示した実験値を, 図に示すような相対密度ごとに実験値の示す平均的な曲線を入れ, これから u_{c0}^*d/ν の値を20および40の一定値に対して, $u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ の値を推定し, Fig. 10と同様に図示したものである。実験値は Fig. 10よりは散乱しているが, 全く同様な傾向が見出される。すなわち, u_{c0}^*d/ν の一定値に対して, $u_{c0}^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd \tan \varphi$ は相対密度 σ/ρ の増加とともに減少することがわかるが, 一定値に漸近するかどうかは明らかでない。しかしながら, u_{c0}^*d/ν の大きな範囲においては σ/ρ の影響はかなり大きい。これに反して, u_{c0}^*d/ν の小さな範囲ではこの影響はあまり大きくないと考えられるが, σ/ρ の値の小さい粒子についてはさらに実験を追加すべきであろう。

3) 砂粒の移動限界に関する考察

以上述べたように, 砂粒の移動限界には, 相対密度がかなり大きな影響を及ぼすことがわかったが, これ

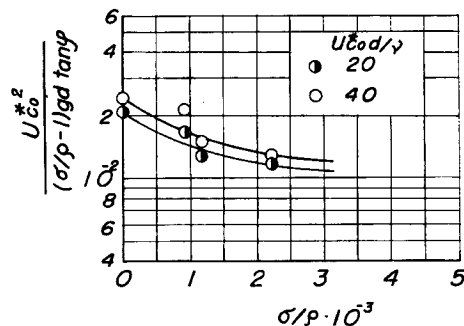


Fig. 11 Influence of relative density of grains to fluid on initiation for movement of grains by wind and by water, calculated by second criterion $p_0=0\%/sec$.

は観察の結果と関連させて考えると、砂粒の移動限界に対しては、流れの中での砂粒の微小な揺動の挙動を理論的に解析する必要があるものと考えられる。しかし、このような砂粒の動的な平衡条件から乱れの統計的特性との関係において移動限界を定義すべきであろうと考えられる。これに加えて、 $u_c^* d/\nu$ の小さい範囲においては、乱れの影響はさほど大きくないはずであるから、この範囲においては砂粒の揺動はむしろ起こらないものと考えられる。したがって、この範囲における水流の場合との相違は、移動限界の判定基準の相違と、すでに説明したように、粒子が微小になると粒子間に粘着性が発生するという点であるが、いずれにしても乾燥砂による詳細な実験を追加すべきであろう。

5. 結 語

以上、風による砂粒の移動限界に関する比較的詳細な実験を行なって、水流による場合のいわゆる限界掃流力との関連において考察して、つぎのことが明らかにされた。

1) すでに、岩垣ら¹⁸⁾によって指摘されているように、風による砂粒の移動限界について、水流による場合すなわち、限界掃流力と同様に従来の実験結果を表示すると、両者は非常に相違し、統一的に表示することはできない。

2) 無次元量 $u_c^2/(\sigma/\rho - 1)gd \tan \varphi$ の値は $u_c^* d/\nu$ の値の小さい範囲においては、両者の傾向は非常に相違し、 $u_c^* d/\nu$ の値が小さくなると、急激に増大し、実験値の散乱も著しい。

3) 砂粒の移動限界を単位時間、単位面積当りに移動する砂粒の個数を床面に露出する砂粒の数で割った値であらわした移動割合 $p_0\%/sec$ の値を $0.5\%/sec$ として、水流の場合と同一にすると、無次元化した限界掃流力の値は従来の実験値とかなり相違し、 $u_c^* d/\nu$ の小さい範囲ではとくに著しい。これに対して、 $p_0 \approx 0\%/sec$ とした場合、いいかえると砂粒の移動量が存在しない場合の値は従来の実験値とよく一致する。このことから、風による砂粒の移動限界は限界掃流力の場合と相違して、移動量の存在しない場合に対応していることがわかった。

4) 風および水流による砂粒の移動限界の統一的な説明をあたえるために、相対密度 σ/ρ の相違する各種の粒子を用いて実験した結果、無次元化した限界掃流力の値は Reynolds 数 $u_c^* d/\nu$ を一定にすると相対密度 σ/ρ の増加とともに減少することがわかった。この事実は $u_c^* d/\nu$ の値が大きい場合に対しては、移動限界の基準として $p_0 = 0.5\%/sec$ および $0\%/sec$ としたいいずれの場合においても見出された。

今後これらの実験結果と移動限界時における砂粒の挙動に関する観察の結果をもとにして、砂粒の揺動機構を解析して、風および水流による砂粒の移動限界の統一的な説明を試みるつもりである。

最後に、本研究を行なうにあたって協力していただいた海岸災害研究部門の諸氏とくに図面の整理に熱心に助力いただいた芝野技官に厚く謝意を表明したい。

参 考 文 献

- 1) 河田三治：防災林に関する調査報告，治山事業参考資料第Ⅱ輯，林造庁，昭25，pp.1～22.
- 2) Ishihara T. and, Y. Iwagaki: On the Effect of Sand Storm in Controlling the Mouth of the Kiku River, Bulletin of the Disaster Prevention Reserch Institute, Kyoto Univ., No.2, 1952, pp.1～32.
- 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.475～470.
- 4) 大浦浩文・小林大二・小林俊一：低い地ふぶきにおける飛雪の運動，低温科学，物理篇，第25輯，昭42，pp.89～97.
- 5) Bagnold: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Mathuen & Co. Ltd., 1954.
- 6) Chepil, W. S.: Dynamics of Wind Erosion, II, Initiation of Soil Movement, Soil Science, Vol. 60, 1945, pp.397～411.
- 7) 千種虎正・秋葉満寿次：砂浜開墾地の砂粒子と風速との関係 (予報)，農業土木研究，第1巻，第1号，昭4，pp.31～40.
- 8) 秋葉満寿次：砂粒子の大きさと飛砂限界風速 (続)，農業土木研究，第6巻，第1号，昭9，pp.53～60.
- 9) 内田茂男：砂粒の飛出し風速に関する一つの解析，治山事業参考資料第1輯，林野局，昭24，pp.45～56.
- 10) Zingg, A. W.: Wind-Tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material, Proc. 5th Hyd. Conf., State Univ. of Iowa, Bull. 34, 1952, pp.111～135.
- 11) Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual: Sediment Transportation Mechanics, Wind Erosion and Transportation, Proc. ASCE, Vol. 91, HY2, 1965, pp.267～287.
- 12) 栗原道徳：限界掃流力に就いて，九州大学流体力学研究所報告，第4巻，第3号，昭23，pp.1～26.
- 13) 岩垣雄一：限界掃流力に関する流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，昭31，pp.1～21.
- 14) Rouse, H.: Engineering Hydraulics, John Wiley & Sons, 1950, p.789.
- 15) 土屋義人：滑面水路床の下流端における洗掘限界，土木学会論文集，第80号，昭37，pp.18～29.
- 16) 土屋義人：水門下流部における洗掘限界に関する研究，土木学会論文集，第82号，昭37，pp.21～51.
- 17) 土屋義人：混合砂れきの限界掃流力に関する研究，京都大学防災研究所年報，第6号，昭38，pp.228～253.
- 18) 佐伯正治：掃流力について，京都大学卒業論文，昭28.
- 19) Belly, P. Y.: Sand Movement by Wind, Dept. Army, Corps of Eng., Tech. Memo. No.1, 1964.