

水流による砂粒の運動機構に関する実験

土 屋 義 人・角 野 稔

EXPERIMENTS ON THE MECHANISM OF MOVEMENT OF A SPHERICAL SAND PARTICLE ON A GRANULAR BED IN TURBULENT STREAMS

By *Yoshito TSUCHIYA* and *Minoru SUMINO*

Synopsis

It is one of the most important problems in sediment hydraulics to establish the mechanics of movement of a sand particle in a turbulent stream. Some experiments on the motion of a spherical sand particle were carried out with a stroboscope to make clear the hydrodynamic behaviour. It is concluded from the results of the experiments that there are two types in the motion of a particle, rolling and saltation, and that the uplift force acting on a particle would be not so great as Yalin and Kishi used in their theories of sand transport. An equation of motion for rolling of a particle in a turbulent stream is established and the result is in good agreement with the experimental ones. And some characteristics of rolling and saltation of a particle are considered.

1. 緒 言

わが国の河川は、一般に急勾配で、洪水のたびに多量の土砂を流下させ、局所的あるいは河川全体にわたって河床変動を誘起し、大きな災害の原因になっている。また、多目的ダムが築造されても多量の流出土砂のために、その機能を長期間十分に果すことなく、埋没してしまう例が少なくない。このように出水にともなう多量の土砂流出のため、流路の維持・管理上種々の問題を生じている。この現象の本質を究明するためには、流砂の機構を解明し、流送土砂量の推定法を確立することが必要である。とくに砂礫の流送機構に関する研究は、古くから多くの研究者によって重要視され、すでにかなりの実験や理論的考察がなされ、各種の実験公式が提案されてきた。なかでも、流砂機構に確率的概念を導入して、流砂理論を展開した Einstein の研究は著名であり、今日實際面に適用されていることは周知のとおりである。また、わが国では、建設省土木研究所において、詳細な流砂実験を実施するとともに、Einstein と同様な手法によって流砂理論の確立を試みて、いわゆる佐藤・吉川・芦田公式が提案された。これらの流砂量公式は実験結果とかなりよく適合し、実際上においてもその適用性が確認されており、現段階ではもっとも妥当な公式の1つとされている。しかしながら、流水の作用による砂粒の運動機構そのものは Kalinske の単純な考察のほかは、ほとんど解明されておらず、流砂理論の確立における最大の問題点をここに見出すことができると思われる。しかし、最近砂粒の運動機構に関する研究が活発になり、すでにかなりの実験やその運動機構に関する考察がなされている。すなわち、Yalin¹⁾ は飛砂の現象と流砂現象との類似性に着目して、(1) 砂粒の移動開始の条件は主として砂粒に働く揚力によること、および(2) 河床を離れると砂粒に働く揚力は急激に減少し、その代りに流れによる水平方向の速度が与えられて砂粒は流下する、などを解析の根拠に、流水による河床付近における砂粒の運動機構を放物体と類似の現象であるとして、その運動方程式を求め流砂理論を展

開し, Gilbert らの実験結果に適合させて実験定数を決定した新しい流砂量公式を導いている。また, わが国でも, 岸ら²⁾が実験的に河床付近における単一砂粒の跳躍運動を写真撮影して, 主として Yalin の理論と比較検討している。そして, その理論的考察においては, Yalin が砂粒の仮想質量力を無視しているのに対し, これを考慮したほかは, 河床付近における揚力の是認とその表示に対する仮定も同一であって, 大きな進歩は見られないように思われる。ただ, 以上の方針によって理論的に導かれた砂粒の運動軌跡を実験結果と比較し, その理論の中に含まれる実験定数を決定して両者のよい一致を示しているが, この比較においては若干の問題があるように思われる。これらの表面付近における砂粒の運動に対する理論において, 第1に問題となるのは, 砂粒の運動開始が前述したような揚力のみであらわされるかということである。この点に関しては, 限界掃流力に関する岩垣の理論によると, この種の揚力の効果は, 砂粒に働く水平方向の流体抵抗に比べるとかなり小さいことが示されており, Yalin の理論において取扱われているような揚力の存在については多くの問題を残しているものと考えられる。以上のように, 砂粒の運動機構について不明な点が多く, また統一した見解も確立されていないのが現状である。このことから, 著者らは単一の球状砂粒の床面付近における運動機構を主として実験的に究明し, その運動の法則を見出すために若干の実験を行ってきたので, その結果について述べる。

2. 実験装置及び実験方法

2. 1. 実験装置

実験に用いた水路は, 巾 50cm, 深さ 20cm および長さ約 16.3m の鋳製のもので, その中央部の長さ 1.3m をアクリライト板でつくり, その部分で砂粒の運動が撮影できるようにした。床面は粒径 0.375cm の一様な砂粒をニスづけして粗面とし, また水路勾配は 0.00875 とした。掃流力は限界掃流力の約10倍程度までとし, その間で数回実施した。砂粒運動の撮影には, ストロボ装置を用いた。このストロボ装置は, 発振周波数 5c/s~300c/s の範囲で変速可能であるが, 便宜上 50c/s および 100c/s を用いた。砂粒運動の撮影には, Canon FX 35mm を使用し, 砂粒の静止時からの移動開始状況を撮影するために, 床面に電磁石を設置した。また, この実験に使用した球状砂粒は, ナイロン球に鉄粉を被覆したものおよびアスファルトに鉄粉をまぜ球状とし, 塗料をぬって撮影しやすいようにつくったものである。その形状はほとんど球形である。転動および跳躍特性に関する実験においては, 粒径 0.382cm, 0.593cm および 0.853cm の3種類を用いたが, その比重はそれぞれ1.502, 1.343 および 1.234である。また, 移動開始直後における砂粒の移動機構とくにその移動方向に関する実験においては, 粒径 0.380cm で, その比重をそれぞれ1.229, 1.515, 1.677, 1.881, および2.004 に変化させた5種類の砂粒を用いた。

2. 2. 実験方法

まず, 砂粒を床面上に磁力によって固定させ, カメラのシャッターと同時に磁力を切り, 砂粒の軌跡を撮影した。この場合, 静止時からの砂粒運動において, 数回の跳躍までを対象として, 写真撮影した。このような操作を同一水理条件において約100回くりかえし, その際, 砂粒をおく位置を任意に変化させて, 砂粒運動の統計的特性の処理が十分可能であるように考慮した。また, 移動開始直後における砂粒の移動機構とくにその移動方向に関する実験においては, 床面上に砂粒径程度の小さな真ちゆう板または鉄板をとりつけ, 一定の角度から砂粒が移動開始できるようにした。

3. 実験結果とその考察

前述した方法によって, 砂粒の運動軌跡を写真撮影した結果の数例が **Photo. 1** であるが, これから床面上におかれた砂粒は, 必ずしも静止時から直ちに跳躍するとは限らず, 一般にある距離だけ転動することが認められるので, 静止の状態から最初の跳躍に移までの区間が存在する砂粒運動の場合には, それまでを転動運動として跳躍運動と区別することにした。しかし, いったん跳躍した砂粒が第2あるいは第3の運動

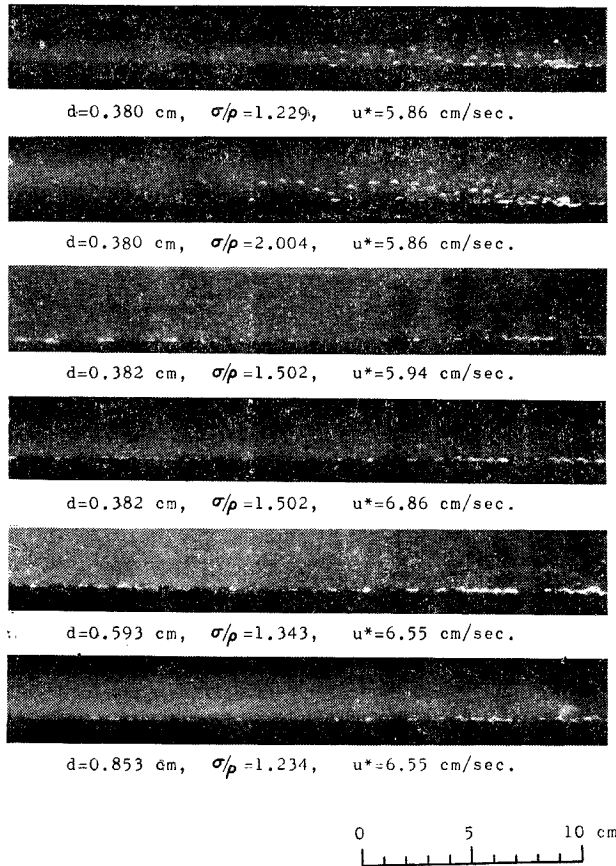


Photo. 1 Photographs of saltation of a particle.

において転動する場合には、一般にその区別が明確とはいえないことおよび跳躍運動として取扱ってもその割合はあまり大きくないし、またそれらの分布特性において考察できるものとしてあえて両者を区別せず、すべて跳躍運動として扱うことにした。このようにして実験結果を整理し、その砂粒の転動機構と跳躍運動とに分けて考察すれば、つぎのようである。

3. 1. 砂粒の転動機構に関する考察

(1) 砂粒に作用する揚力についての考察：砂粒の移動開始の問題や砂粒の運動機構を力学的に扱う場合には、砂粒に働く力についての十分な知識を必要とする。従来、砂粒に働く力については、2つの考え方があるように思われる。すなわち、それらの考え方の本質的な相違点は、砂粒に働く揚力に関してであって、第1の考え方は半球状の砂粒に働く揚力を測定した Einstein および Samni²⁾ あるいは Chepil⁴⁾ の結果にもとづいて、流れ方向の流体抵抗と同程度の揚力が存在するものとする考え方であって、その妥当性はいつに上記の実験結果の解釈にかかっているといつてよい。これに反して、第2の考え方は限界掃流力の流体力学的な解釈を主眼とする岩垣³⁾ の理論的取扱いであり、また同様な手法が土屋⁵⁾、7) によって種々の問題に適用された考え方であって、乱流理論にもとづいて計算した砂粒に働く揚力は、流れ方向の流体抵抗に比べてかなり小さいと結論している。このように、砂粒に働く流体抵抗については種々の論議があって、砂粒の運動機構の確立に対して1つの重要な問題となっている。

以上のことから、静止時からの砂粒の運動方向をできるだけ詳細に測定して、砂粒に働く力関係を実験的に検討しようとしたわけであるが、いうまでもなく砂粒の運動方向は砂粒に作用する流体抵抗の時間的変動が問題となることから、流れ方向の流体抵抗と揚力との相関などが問題となって、厳密にはきわめてむずかしい。しかしながら、そのような砂粒の運動方向についての実験を数多く実施し、その平均的な運動方向を議論することにして、流れ方向の流体抵抗と揚力との大きさに関する若干の実験結果を見出すことはかなり意義深いと思われる。このような主旨で実験した結果について考察すれば、つぎのようである。

Fig. 1 は前述した方法で測定された静止時からの砂粒の運動方向すなわち水平となす角 θ のひん度分布

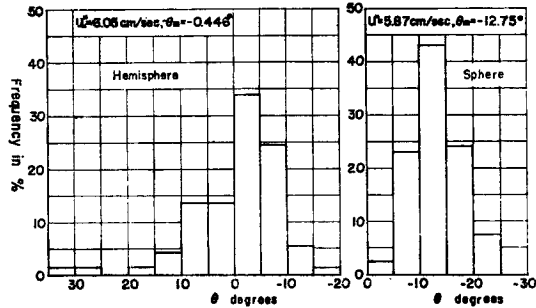


Fig. 1 Frequency distributions of angles of movement of a particle with the horizontal at beginning.

の一例を示したものであって、後述するように、比較のために半球状の砂粒に対する実験結果も示しておいた。この頻度分布は、一般に正規分布にしたがうことが確認されたが、半球状の砂粒の場合は若干その特性が相違するようと思われる。つぎに、前述した角度の平均値と砂粒の比重との関係について考察することにするが、いま限界掃流力に関する岩垣の理論にもとづいて、砂粒に働く流れ方向の流体抵抗、揚力および重力との関係から、近似的に砂粒のとび出し角度を求めると、掃流力の無次元表示の関数として表示することができるので、実験結果をこのように整理したものが Fig. 2 である。この結果および Fig. 1 に示した結果から明らかなように、球状の砂粒のとび出し角度は一般に負であって、掃流力の無次元表示とともに増加することがわかる。図中に示した曲線は、前述した考えにもとづいて砂粒の静止摩擦係数の2種類の値に対して、砂粒の抵抗係数の種々の値について計算したものである。ここに示した実験値のほとんどは $C_D \approx 0.4$ であるが、前述したような理由からもちろん両者の一致は期待することはできない。しかし、静止の状態におかれた砂粒は飛砂の場合と相違して揚力によって上向きにとび出すのではなく、ほとんどの場合下向き

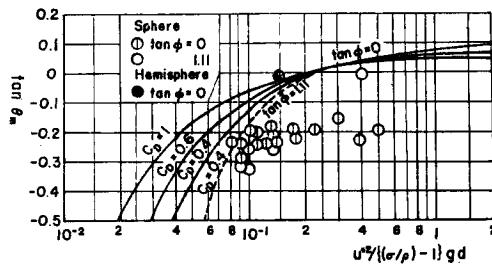


Fig. 2 Relation between mean values of angle of movement of a particle at beginning and dimensionless tractive force.

にとび出すようであり、したがって前述したような仮定が許されるならば、砂粒に働く揚力は流れ方向の流体抵抗に比べてかなり小さいものと推定されるであろう。

なお、Einstein らや Chepil の実験には、半球状の砂粒を用いていることから、いわゆる半球としての揚力が含まれていることが考えられる。この点について二、三検討すれば、つぎのようである。この観点に立つと、球状の砂粒に比べて半球のそれはこの揚力の効果はかなり大きいことが想像される。Fig. 1 には半球状の砂粒についての実験結果を示してあるが、これから球状の砂粒と相違して、上向きに 30° にも及んでとび出す場合があることがわかり、またとび出し角度の平均値も Fig. 2 に示すようにかなり大きいことがわかる。この事実は球状の砂粒と半球状の砂粒との本質的な相違であると考えられるので Einstein らの実験結果の解釈について、若干検討すればつぎのようである。まず、一様な流れの中におかれた半球の抗力および揚力について考察したいのであるが、適当な実験結果がみあたらないので、球体面上の圧力分布を測定した結果から、近似的に推定した結果では、Reynolds 数が 10^5 程度で揚力係数は約 0.37、抗力係数は約 0.5 程度となって、両者の比は約 0.7 である。一方、Chepil の実験結果によると、床面上におかれた半球の揚力および抗力の比約 0.68 となっており、両者はかなり近い。また同じ実験の結果から半球の近傍における流速の平均値を推定し、上記の推定値に対応する揚力係数を求めると、ほぼ同程度の値になることがわかる。この点を考慮すれば、床面の近傍における揚力に関する Einstein らの実験結果は、つぎのように解釈すべきものと考えられる。すなわち、この実験の結果には、半球としてのいわゆる揚力と床面付近における速度こう配をもつ粘性流としての揚力の 2 つが含まれておいて、この両者のうち前者が実験値の大部分に相当している。したがって、Einstein らおよびその後この結果を砂粒の運動方程式の中に導入した Yalin や岸らのような均一な揚力の場としての取り扱いには、大きな問題があるように考えられる。

著者らは、以上の観点に立って床面付近における砂粒の運動機構の考察においては、かような意味での揚力の存在は考えないことにし、つぎに床面上における砂粒の転動機構について考察することにしよう。

(2) 砂粒の転動特性：Fig. 3 は粒径 0.382cm, 0.593cm および 0.853cm の球状砂粒の転動距離のひ

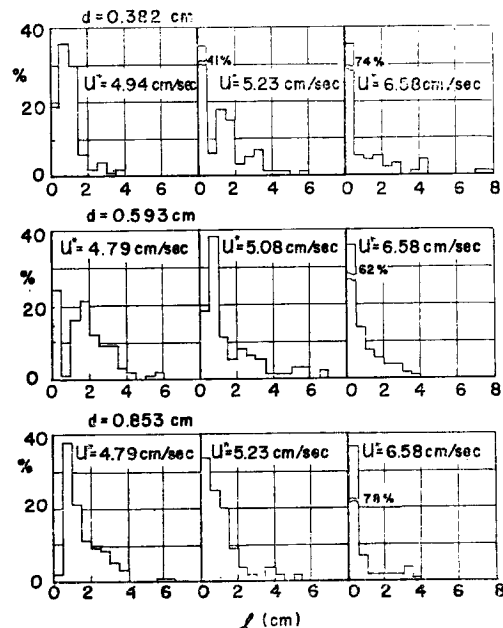


Fig. 3 Frequency distributions of length of rolling of a particle.

ん度分布を示したものである。これらによれば、少なくとも床面におかれた単一の砂粒は Yalin や岸らがいうように、必ずしも静止の状態から直ちに跳躍するのではなく、ある距離だけ転動する確率を有していることがわかる。また Fig. 4 はこの砂粒の平均転動距離を粒径との比であらわし、摩擦速度と限界摩擦速度

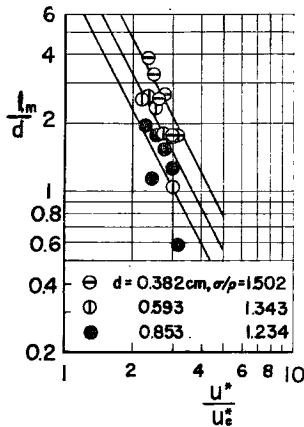


Fig. 4 Relation between relative length of rolling of a particle and ratio of shear velocity to critical one

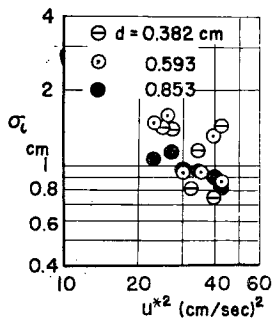


Fig. 5 Relation between standard deviation in frequency distributions of length of rolling of a particle and shear velocity.

との比 u^*/u_{*c}^* との関係として図示したものである。ただし、この実験においては、砂粒の比重が小さく、したがってその限界の判定と水深の測定誤差がかなり大きいことが考えられるので、限界摩擦速度は砂面上におかれた礫の限界掃流力に関する岩垣ら⁹⁾の理論結果を用いて整理したものである。この結果によれば、砂粒の平均転動距離はほぼ摩擦速度の2乗に比例して減少することがわかるが、このことは摩擦速度が大きくなればなるほど直ちに砂粒は跳躍運動に移行することを示すものと考えられる。しかし、前述したように砂粒に働く揚力は省略しうる程度のものであるから、この転動から跳躍への移行過程には、床面上の他の砂粒との衝突や砂粒自身の回転運動などによる上向きの力の存在を考える必要がある。

つぎに、砂粒の転動距離の分布におけるばらつきについて考察すれば、つぎのようである。Fig. 5 は転動距離の標準偏差と摩擦速度との関係を示したものであって、これから明らかなように標準偏差 σ_l は摩擦速度のほぼ2乗に比例して減少することがわかるが、この事実はおそらく摩擦速度が小さくて転動距離が比較的長い場合には、砂粒が跳躍運動に移行するための条件が転動速度との関係で規定されるのに反し、摩擦速度が大きくなると、Fig. 4 から明らかなように粒径程度も転動しない間で跳躍に移行することになり、したがってその程度の転動距離の範囲で、跳躍運動を起こすのに足る上向きの力をうることになるから、砂粒の運動に対して跳躍運動が主体となるためと考えられる。

(3) 砂粒の転動機構：前述したように、静止の状態からの砂粒の運動においては、一般に多かれ少なかれ転動による砂粒の運動が見られる。この転動による運動は跳躍による場合と相違して、砂粒と床面との摩擦力が働くという点において大きく相違する。また、砂粒が極端に大きくない場合を除いて、この運動は床面付近における流速に、したがって摩擦速度によって特性づけられる。いま、床面の凹凸による摩擦力の不均一をすべて無視し、一様な摩擦力の場における砂粒運動を対象とすれば、Mugnus 効果⁹⁾ および Basset 項の影響を無視して、速度の2乗に比例する流体抵抗を考えると、つぎの運動方程式がえられる。

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{\bar{\mu}g(\sigma/\rho - 1)}{(\sigma/\rho + 1/2)} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C_D}{(\sigma/\rho + 1/2)} (u_1 - U)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 U ：砂粒の転動速度、 g ：重力の加速度、 σ/ρ ：砂粒の比重、 t ：時間、 $\bar{\mu}$ ：砂粒と床面との動摩擦係数、 u_1 ：砂粒の転動運動に関係する代表流速および C_D ：砂粒の抵抗係数であって Reynolds 数 $(u_1 - U)d/\nu$ の関数である。いま、 $u_1 \approx A_T u^*$ とし、 $t=0$ で $U=0$ として(1)式の解を求めると、つぎのようになる。ここに、 A_T は定数であって、完全粗面水流の場合には $A_T \approx 8.5$ である。

$$\frac{U}{u^*} = \frac{(F^2 - A_r^2)\{1 - e^{(3/4)\tau}\}}{(F + A_r)e^{(3/4)\tau} + (F - A_r)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } \tau &= \{C_D/(\sigma/\rho + 1/2)\} \cdot (u^*t/d) \\ F^2 &= \frac{4}{3} \frac{\bar{\mu}(\sigma/\rho - 1)gd}{C_D u^{*2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

つぎに、上記の関係式と実験結果との比較について述べよう。Fig. 6 は砂粒の転動運動に関する実験結果と理論曲線とを比較したものである。この場合、前節でのべたように、かなりのばらつきをもってある分布をしているので、つぎの方法によって実験結果を整理した。実験結果において、転動距離がほぼ等しい数

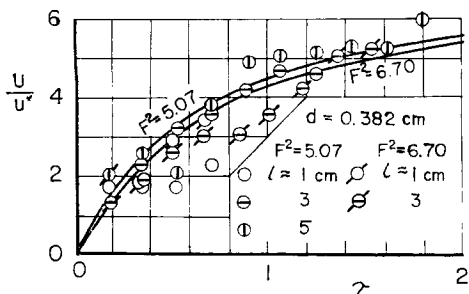


Fig. 6 (a) Comparisons between theoretical curves of rolling of a particle and experimental values in case of a particle of 0.382cm.

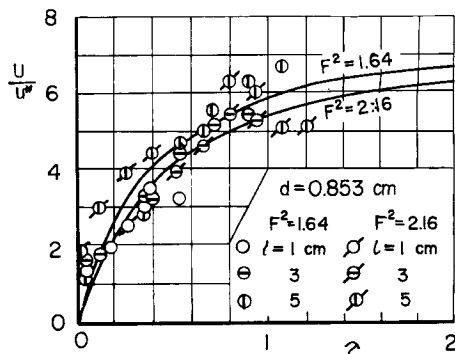


Fig. 6 (b) Comparisons between theoretical curves of rolling of a particle and experimental values in case of a particle of 0.853cm.

個の実験値について、静止時からの砂粒の速度の変化を求め、その平均値を求めて理論曲線と比較した。Fig. 6(a) は粒径 0.382cm の場合の結果であって、この場合 C_D の値は各実験に対応した球の抵抗係数を用いた。また、動摩擦係数の値は実験値に一致するように決定した結果 $\bar{\mu} = 0.3$ となった。一方 Fig. 6 (b) は粒径 0.853cm の場合の同様な結果であって、この場合には $\bar{\mu} = 0.1$ 程度の値となって理論曲線は実験値にかなりよく一致することがわかった。しかし、大きな加速度の場合における砂粒の運動においては、一般に Basset 項の影響が問題となるといわれているので^{10), 11), 12)}、この点についてはさらに詳細に検討する必要があると思われる。

このようにして、砂粒の転動運動がいちおう説明されることになると、砂粒の転動にともなって床面上の他の砂粒に衝突する機構をある程度説明できそうに思えるが、いまのところそれらの特性について実験的に検討したところであるので、つぎの機会に述べたいと考えている。

3. 2. 砂粒の跳躍運動に関する実験結果

(1) 砂粒の跳躍距離：Fig. 7 は砂粒の跳躍距離 L の分布を示したものであって、図中にはそれぞれの場合の摩擦速度の値を記入してある。これから明らかなように、跳躍距離の分布はいちおう正規分布に近いことがわかるが、実験結果に対する詳細な検討によれば、砂粒が小さい場合はその運動が床面付近にのみ限定されるので、正規分布にしたがうが、これに反して、砂粒が大きい場合には、その比重が小さいために運動範囲が床面近傍に限定されないために、跳躍距離が大きい範囲において正規分布からはずれることがわかった。つぎに、これらの分布における平均値 L_m および標準偏差 σ_L と摩擦速度との関係について考察することにしよう。Fig. 8 は砂粒の跳躍距離の平均値と粒径との比 L_m/d と掃流力の無次元表示との関係を各粒径に対して示したものであって、図中には砂粒の第1、第2および第3の跳躍における関係を区別して

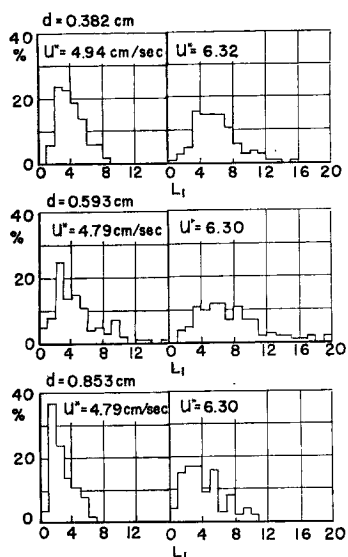


Fig. 7 Frequency distributions of skipping lengths of particle.

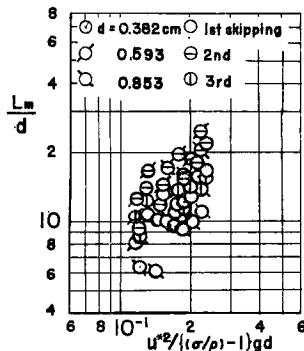


Fig. 8 Relation between ratio of mean skipping lengths to particle size and dimensionless tractive force.

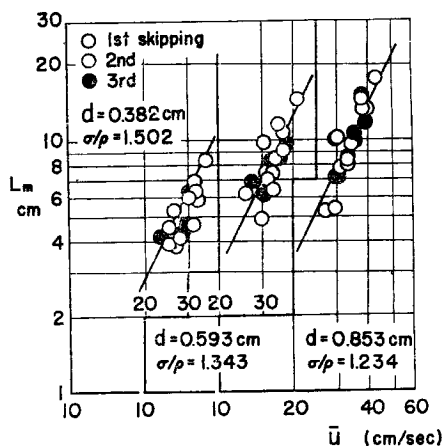


Fig. 9 Relation between mean skipping length of particle and mean velocity within saltation region.

ら標準偏差は砂粒の大きさに関係なく摩擦速度のほぼ2乗に比例することおよび砂粒の跳躍回数によってあまり変化しないことなどが見出される。

(2) 砂粒の跳躍高さ: Fig. 11 は粒径 0.382cm の砂粒の跳躍高さ H の頻度分布を示したものの一例であって、図中にはそれぞれ摩擦速度の値が示してある。この結果によると、その分布特性は Fig. 7 に示した跳躍距離の分布ときわめて類似し、正規分布に近いことがわかる。一方、この分布において、第2および第3の跳躍ではほとんど砂粒が跳躍しない頻度も存在するが、これはいうまでもなく転動運動として、または

図示してある。この結果によると、実験値は非常に散乱しているが、平均的には摩擦速度の2乗に比例することがわかる。そして、第1、第2および第3の跳躍のそれぞれに対して、若干実験結果の傾向が相違していることがわかるが、とくに粒径が大きくなると、跳躍回数が増すにしたがって若干跳躍距離が増加するようである。また、実験結果が大きく散乱している大きな理由の1つとして、つぎのことが考えられる。われわれが実験に使用した砂粒の比重はかなり小さく、したがって砂粒の運動が必ずしも床面近傍に限定されないためと考えられる。この事実は砂粒が大きいほど著しいようである。したがって、前述した摩擦速度との関係に対応して、砂粒の運動が行なわれる領域での平均流速を測定した流速分布から求め、これを代表流速 $\bar{u}$ として Fig. 8 に示した結果を整理しなおしたものが Fig. 9 である。この結果によると、平均の砂粒の跳躍距離はこの代表流速の2乗に確実に比例することがわかり、この意味において飛砂にみられる砂粒の運動特性との類似性を見出すことができよう。つぎに、この跳躍距離の分布における標準偏差 σL と摩擦速度 u^* との関係を示したものが Fig. 10であって、この場合は便宜上前述した代表流速との関係は省略したが、これか

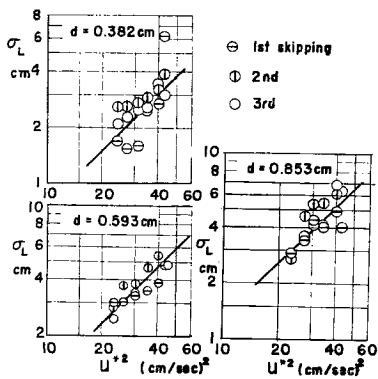


Fig. 10 Relation between standard deviation in frequency distributions of skipping lengths of particle and shear velocity.

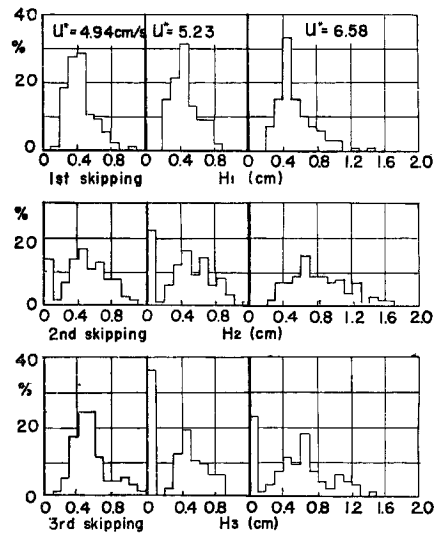


Fig. 11 Frequency distributions of skipping heights of particle of 0.382cm in diameter.

それに近い運動として砂粒が運動した場合を示している。そして、その頻度に対してある一定の傾向を見出すことはできないように思われる。つぎに、この分布における平均跳躍高さ H_m および標準偏差 σ_H について考察しよう。

Fig. 12 は砂粒の平均跳躍高さ と粒径との比 H_m/d と掃流力の無次元表示との関係を示したものであって、粒径が小さい場合に対しては、前述した Fig. 8 の場合と同様に摩擦速度の 2 乗にほぼ比例することがわかるが、粒径が大きくなり跳躍高さが大きくなると、必ずしもその関係を見出すことはできない。Fig. 13 は Fig. 9 の場合と全く同様に実験結果を整理し直したものであって、前述した場合と同様に代表流速の 2 乗に確実に比例することがわかる。この事実、最近発表された岸らの実験結果の場合にもいえることであ

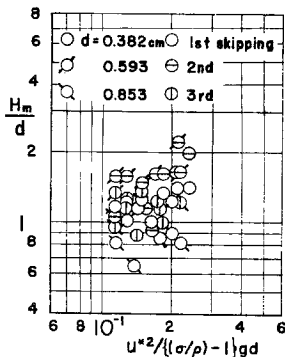


Fig. 12 Relation between ratio of mean skipping heights to particle size and dimensionless tractive force.

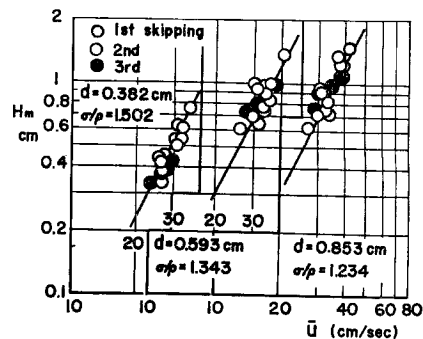


Fig. 13 Relation between mean skipping heights of particle and mean velocity within saltation region.

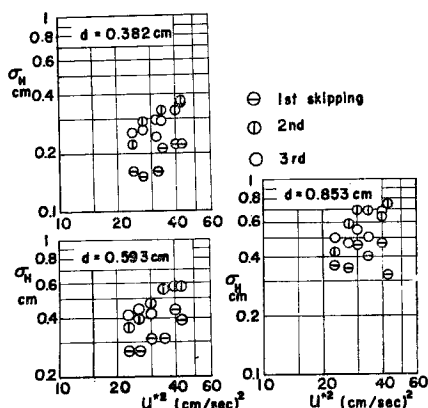


Fig. 14 Relation between standard deviation in frequency distributions of skipping heights of particle and shear velocity.

て実験的に考察した結果について述べた。すなわち、静止の状態からの単一の砂粒の運動は、一般にある距離だけ転動して、しかる後跳躍する確率がかなり大きく、その転動距離は摩擦速度のほぼ2乗に比例して減少することがわかった。このことは、また砂粒に作用する揚力に関する Einstein らの実験結果の解釈について1つの見解を提起することになり、Yalin および岸らのような揚力に対する仮定には、大きな問題のあることを推論した。また、砂粒の転動機構について考察し、その速度の時間的変化をあらわす関係を近似的に求めたが、実験の範囲内ではかなりよい一致を示した。そのほか、砂粒の跳躍運動の特性について実験結果をもとにして考察したが、これらは床面付近における砂粒の運動機構の解明に役立つものと考えている。今後砂粒の転動から跳躍への移行過程と跳躍機構について流体力学的な検討を加えるとともに、それらの現象の分布特性についても考察していきたいと考えている。さらに、単一な砂粒の場合に限らず、流砂現象の写真撮影を試みて、砂粒群の運動法則の確立につとめていきたい。

最後に本研究を行なうにあたり御指導いただいた矢野勝正教授および岩垣雄一教授に深く謝意を表明するとともに、研究上種々討議に加わっていただいた道上正規助手および実験に熱心に協力していただいた谷田部穰君の労に謝意を表わしたい。なお、本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Yalin, M.S.: An Expression for Bed-Load Transportation, Proc. A.S.C.E., Vol.89, HY 3, 1963, pp.221—250.
- 2) 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22号, 昭41, pp.113—120.
- 3) Einstein, H.A. and El-Samni, El-Sayed A.: Hydrodynamic Forces on a Rough Wall, Reviews of Modern Physics, Vol.21, No.3, 1939, pp.520—524.
- 4) Chepil, W.S.: The Use of Evenly Spaced Hemispheres to Evaluate Aerodynamic Forces on a Soil Surface, Trans. AGU, Vol.39, No.3, 1958, pp.397—404.
- 5) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, 昭31, pp.1—21.
- 6) 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.

って、彼らの実験結果の場合も必ずしも砂粒の跳躍高さが水深に対して十分小さくなく、したがって砂粒の跳躍距離および高さや摩擦速度との関係が、明確な関係として見出されていないことから推論されよう。

つぎに、Fig. 14 は砂粒の跳躍高さの標準偏差と摩擦速度との関係を示したものであって、どの砂粒の場合においても、標準偏差は摩擦速度の2乗にほぼ比例することがわかるが、実験結果は非常に散乱している。また、この場合は Fig. 10 と相違して第1回の跳躍における標準偏差は第2および第3回の場合に比較して若干小さくなっていることがわかるが、その理由は明確ではない。

4. 結 語

以上、水流による砂粒の運動機構を究明する第1歩として、床面付近における単一の砂粒の運動をストロボ装置を用いて写真撮影し、その運動の特性を主として

- 7) 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.
- 8) 岩垣雄一，土屋義人：砂面上におかれた礫の限界掃流力について，土木学会論文集，第41号，昭31，pp.22—38.
- 9) Oshima, N.: Motion of Particles in Stream, Proc. 7th Japan National Congress for Applied Mechanics, 1957, pp.219—223.
- 10) Odar, F. and Hamilton, W.S.: Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid, Jour. Fluid Mech., Vol.18, 1964, pp.302—314.
- 11) Odar, F.: Verification of the Proposed Equation for Calculation of the Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid, Jour. Fluid Mech., Vol.25, 1966, pp.591—592.
- 12) Brush, L.M., Hau-Wong Ho and Ben-Chie Yen: Accelerated Motion of a Sphere in a Viscous Fluid, Proc. A.S.C.E., Vol.90, HY 1, 1964, pp.149—160.