

北海道大学大学院    学生員    山本    徹

北海道大学工学部    正会員    森    明巨

北海道大学工学部    正会員    岸    力

1. はじめに

開水路において粒子が Saltation 運動を継続する場合、落下粒子の再離脱機構を粒子に働く揚圧力による  
とする考えと、衝突時の反発力によるとする考えがある。

移動床では、衝突による反発は非常に小さいことから、岸ら(1)は、揚圧力による離脱を考えた。また Abbot  
& Francis(2)らは水流中を移動する単一粒子を連続写真で撮影し、複数のコマ数にわたって河床粒子に接触  
していることから流体力によって Saltation 運動が継続すると考えた。Gordon, Carmichael & Isackson(3)  
らは限界掃流力よりわずかに大きい流れで、粒子の Saltation 運動を観察し、落下粒子が停止粒子に衝突後、  
その回りを Rollingし、その間に加速されて再離脱することを示した。

一方、Chepil(4)は揚圧力が砂レキの Saltation 運動の主要因となるには小さすぎることを実験的に示し、  
Chepilの指摘をもとに土屋ら(5)は継続跳躍の機構を反発力によるとして理論を展開し実験により反発係数を  
求めた。また、Coleman(6)や Watters & Rao(7)らは水流中の静止球に対する揚力を測定し、 $Re_* < 100$ では揚  
力係数  $CL < 0$ であることを示した。

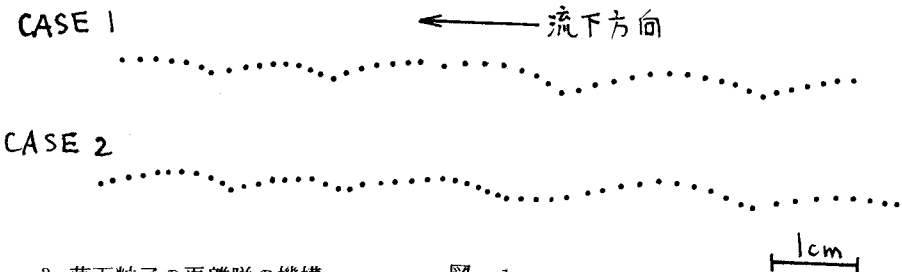
これらの一連の研究をみると、いずれの立場についても決定的な説得力が不足しているように思われる。  
そこで、本研究では水路床に反発係数 0 の鉛玉を敷いて高速度カメラで粒子運動を撮影し、落下粒子の再離  
脱機構を調べた。

2. 実験

実験は幅 10 cm、長さ 8 m の水路で行った。実験条件は以下に示すとうりである。

|       | 運動砂粒 |       | 河床粒径  | 流量         | 勾配    | 水深    | 摩擦速度 / 沈降速度 | 撮影速度       |
|-------|------|-------|-------|------------|-------|-------|-------------|------------|
|       | 比重   | 直径    |       | Q          | I     | h     | $U_* / W$   |            |
| CASE1 | 2.21 | 2.1mm | 2.0mm | 4.08 l/sec | 1/208 | 7.8cm | 0.36        | 375cycle/s |
| CASE2 | 1.12 | 2.7mm | 4.0mm | 1.93 l/sec | 1/435 | 4.5cm | 0.50        | 190cycle/s |

図-1 に粒子軌跡の測定例を示した。図は  $e = 0$  でも継続した Saltation がおこることを示している。こ  
の事実から土屋らの主張は否定されるものと思われる。土屋らの理論によれば反発係数  $e = 0$  では、Salta  
tionは継続しない。従って、本実験の場合、反発力に代わる力を考えなければならないが、それは流体力以  
外に考えられない。



3. 落下粒子の再離脱の機構 図-1

図-2 に示すように衝突前後の速度をそれぞれ  $V_2, V_1$ 、衝突点における接面となす角度を  $\alpha, \beta$ 、とおく。  
(1) 式で定義される  $E$  が  $E > 1$  のとき衝突前後の運動量保存の式は (2) (3) 式で与えられる。

$$E = 2 \cdot \frac{\cos \alpha}{7\mu \sin \alpha (1+e)} \quad \mu: \text{動摩擦係数} \quad (1)$$

$$V_1 \sin \beta = e V_2 \sin \alpha \quad (2)$$

$$V_1 \cos \beta = V_2 \cos \alpha - (1+e)\mu V_2 \sin \alpha \quad (3)$$

$$\alpha + \beta + \theta = \pi \quad \text{又, } V_1/V_2 = \lambda \text{ とおく。}$$

本実験では  $e = 0$  であるから (2) 式から  $\beta = 0$ 、(3) 式から  $\lambda = \cos \alpha - \mu \sin \alpha$  (4)

この場合、 $V_2 = 1$  とおいたときの衝突前後の様子を図-3に示した。なお本実験の解析結果では全て  $E > 1$  となった。図-4に (4) 式において  $\mu = 0$  とおいたときの  $\lambda$  の計算値 (●印) と実測値 (横軸) の比較を示した。図によれば衝突後の粒子速度は、衝突前の粒子速度の  $D-D'$  方向成分よりも小さくなっている。そこで、 $\mu = 0.26$  とした場合の計算値を図中に○印で示し、対応する●印との間をCASE1は実線でCASE2は点線で結んだ。図からわかる様に摩擦力を考慮すると計算値は実測値に近くなるが、 $\lambda$  の小さい所では計算値のほうがまだ大きい。これは、横断方向に運動量が分配されるためであろう。

ところで著者ら(8)は、粒子は河床を離脱直後に強い流体力を受けて上昇することを示した。そうすると、saltation 粒子の離脱機構は、落下粒子が河床粒子に衝突、 $D-D'$  方向成分 (一部を失う) を持って離脱後、流体力によってさらに上昇するものと考えられる。

#### 4. みかけの反発係数

(2)~(4)式から  $\alpha, \beta$  を消去して  $e$  について解くと

$$e = \lambda \cdot \frac{\lambda + \cos \theta + \mu \sin \theta}{1 + \lambda \cos \theta - \lambda \mu \sin \theta} \quad (5)$$

(5) 式からわかるように  $\mu = 0$  として計算すると  $e$  は過小評価となる。本研究の場合、 $e = 0$  であるから (5) 式の分子は 0。また  $\mu \sin \theta > 0$  であるから  $\lambda + \cos \theta < 0$ 。従って  $\mu$  を無視すると  $e < 0$ 。実際、実測値を代入するとほとんどの場合  $e < 0$  となった。このときの  $e$  の散らばりは 0.15~0.6 であった。 $\mu$  の大きさは移動床より固定床の方が大きいだろうから、固定床はより過小に見積もられるであろう。

5. 結論 衝突による反発がなくても Saltation 運動は継続する。saltation 粒子は河床粒子に衝突後接線方向成分の運動量の一部を持って離脱し、流体力により上昇力を得て跳躍を継続する。 $\mu$  を無視すると  $e$  を過小に評価することになる。

参考文献: (1)岸、鈴木、黒木: 24th年講 (2)Abbott&Francis W. R. 1972 (3)Isackson&W. R. R. Vol. 8No. 2 1972 (4)Çepil: SSS, 1961、(5)土屋s44京大防災研年報 (6)Coleman, I. A. H. R1967 (7)W&Rao A. S. C. E1971 (8)山本、森、岸: 第29回水講

謝辞 本研究の遂行にあたり当時本学学生、柴野正一君の熱心な協力を得た。記して感謝の意を表する。

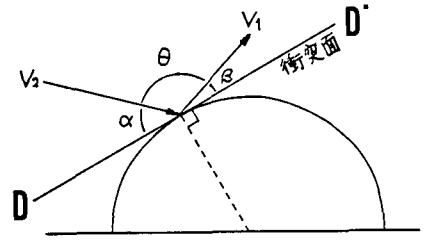


図-2

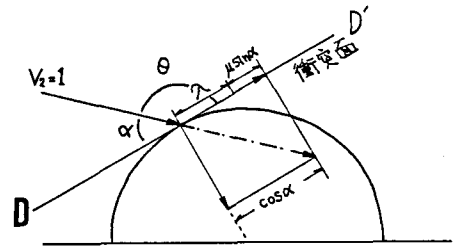


図-3

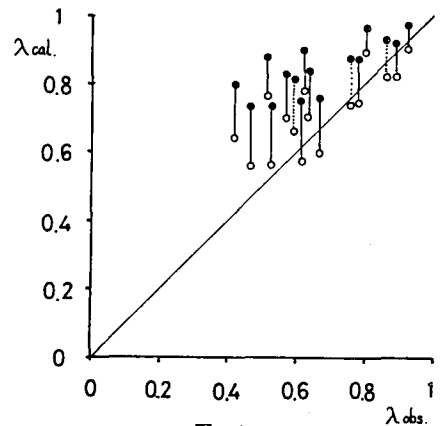


図-4