

流砂の運動形態に関する実験的考察

京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
 大成建設 正員 ○加賀田 健司

流砂現象は一般に掃流砂と浮遊砂に分けて扱われる。しかしながら、これらの区分基準は必ずしも明確でないし、それぞれの理論(モデル)が現状では接続され得ないということから流砂理論の進展を阻んでいる一つの原因であるように思える。著者らはこれまで掃流現象を一般的に記述するモデルを提案し、主として運動形態が不規則凹凸面上の滑動で表わされる状況についての解析を進めるとともに、掃流力が大きい場合には運動形態が"saltation, suspension"となるであろうがモデルのフレームワークは普通のものと考えてきた。しかし掃流力を相対的に大きくても自然砂で顕著な saltation を観察(または 16mm フィルムによる計測)することはほとんどです(砂粒速度が早く、粒子表面が高く、saltation 高は小さい)。掃流力の大きい場合でも不規則凹凸面性状が卓越することが実験によって知られた。しかしながら無次元掃流力の増加に従っていずれは suspension の形式になることになることを考えれば、滑動に代わる掃流砂と浮遊砂の間に saltation 形式の存在を認めることは先に述べた掃流砂理論と浮遊砂理論の接続を画策する上で有利である。本報告はこうした観点からの研究の第1歩として saltation 粒子の運動機構に着目した。これについてはすでに我国でも岸・福岡³⁾、土屋⁴⁾の先駆的研究があるが、当時に比べ粒子追跡技術は向上しており、移動床におけるより詳細な計測が可能となっている。但し著者の実験や²⁾こうした従来の研究でもやはりように固定床に比べ移動床での saltation は自然砂の場合抽出し得るに充分顕著なものとしては出現せず、ここでは石炭粒子(比重 1.29、粒径 0.395 mm)を用いて「強引に」移動床上 saltation を具現した。このような軽量粒子を用いると、比較的大きな粒子について速い流速で saltation が出現するのでフィルム解析に適している。

実験は長さ 9m 幅 33cm の可変勾配水路中に、幅 10cm、長さ 3m の移動床部(残りの部分はほぼ同一粗度の固定床粗面仕上げ)を設け、側方から 16mm フィルムで砂粒運動を撮影した(24~36コマ/秒)。実験は無次元掃流力 $\tau_b = (u_b^2 / (\rho_f - \rho_s) g d)$ が 0.04 から 0.188 まで行い(このときの砂粒 Reynolds 数は 87~180 程度)、フィルム解析により明確な saltation 現象を各実験ケースごと 100 以上サンプリングし、これをもとに運動特性量を調べた。

(1) 単一 saltation 粒子の鉛直方向の運動 乱流の効果、揚力、Magnus 効果を無視したときの saltation 粒子の鉛直方向の運動方程式は次のように書ける。

$$dV/dt = \mp \hat{V}^2 - 1 \quad \text{①} \quad (\text{複号は一が上昇時、+が下降時を表す})$$

$$\text{ただし } \hat{V} \equiv \sqrt{C_D A_2 / 2 A_3} \cdot V_g / \sqrt{(\rho_f - \rho_s) g d}, \quad \hat{t} \equiv \{ (C_D A_2 / 2 A_3) / (\rho_f + C_H) \} t \sqrt{(\rho_f - \rho_s) g / d}$$

V_g : 粒子の鉛直方向速度成分, C_D : 抗力係数, C_H : 付加質量係数, ρ_f : 比重,

d : 粒径, A_2, A_3 : 粒径の 2, 3 次元形状係数である。式①を $t=0$ で $V_g = V_{g0}$, $y=0$ を初期条件として解くと、

$$\hat{V} = \begin{cases} (\hat{V}_0 - \tan \hat{t}) / (1 + \hat{V}_0 \tan \hat{t}) & (\hat{t} \leq \hat{t}_p) \\ -\tanh(\hat{t} - \hat{t}_p) & (\hat{t} > \hat{t}_p) \end{cases} \quad \text{②} \quad \hat{y} = \begin{cases} \ln |\sec \hat{t}| & (\hat{t} \leq \hat{t}_p) \\ \hat{H}_s - \ln |\cosh(\hat{t} - \hat{t}_p)| & (\hat{t} > \hat{t}_p) \end{cases} \quad \text{③}$$

ただし $\hat{y} \equiv \{ (C_D A_2 / 2 A_3) / (\rho_f + C_H) \} \cdot (\hat{y} / d)$ であり、また $\hat{t} = \hat{t}_p$ で saltation 粒子は最高高さ $\hat{H}_s$ に達する。

$$\hat{t}_p = \arctan \hat{V}_0 \quad \text{④}, \quad \hat{H}_s = -\ln |\cos \hat{t}_p| \quad \text{⑤} \quad (\text{ハの付いた記号はすべて無次元量})$$

saltation period $\hat{T}_s$, 河床へ着地する際の鉛直方向速度 $\hat{V}_s$ は次式によって与えられることがわかる。

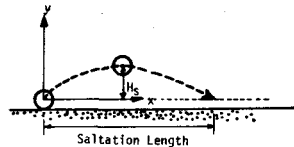


図-1 記号図

$$\hat{\eta}_s = \hat{\eta}_p + \ln |\sec \hat{\eta}_p + \tan \hat{\eta}_p| \quad \text{⑥}$$

$$\hat{\eta}_s = -\tanh \{ \ln |\sec \hat{\eta}_p + \tan \hat{\eta}_p| \} \quad \text{⑦}$$

式③⑥をフルム解析結果の数値と比較したのが図-2, 3であり式④⑦でその関係を検討した一部を図-4, 5に示す。なお計算に当っては沈降実験結果をも考慮し $C_D=1.0$, $C_H=0.5$, $A_2=\frac{\pi}{4}$, $A_3=\frac{\pi}{4}$ とした。図2~5より単-saltation粒子についての理論が個々の粒子について判明できると判断されるが、実験値は理論値に比べて時間スケールで大きく、 $\hat{\eta}_s$ については小さ目となっており、理論の定式について再検討が望ましい。

(2) Saltation運動特性量の分布性

の分布性 ところで、saltation現象は確率的で、ランダムなsaltationの確率的集合が現実には現れており、その分布性を知ることが有意義

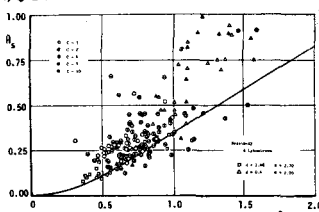


図-4 H_s と U_b の関係

と思われる。いま sampling に際して「明確にsaltationと見せるもの」と限ったため実験結果は「真の分布性」を表していない場合がある。すなわち何をもってsaltationと定義するかに係る。たとえばかなりrollingに近い($H_s \rightarrow 0$)やsuspensionに近いものも含める場合もあり得よう。こうした場合にも意味のあるのは諸量の分布間の関係であり、

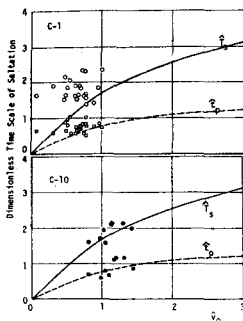


図-5 H_s と U_b の関係

これについて検討した。ここでは U_b の分布とこれときの $H_s, \hat{\eta}_p, \hat{\eta}_s, |\hat{v}_s|$ の分布を検討しているが、将来 U_b の分布は初期移動機構または反移機構のモデルから与えられる。規格化した U_b の分布を $q_0(\xi)$ とすると $E=f(\hat{v}_0)$ の規格化した密度関数 $h(\eta)$ ($\eta=E/E[E]$) は $h(\eta)=q_0(\xi) \cdot \{E[E]/E[\hat{v}_0]\} / | \frac{df}{d\hat{v}_0} | \dots \text{⑧}$ で与えられ、 $E[\hat{v}_0]$, $q_0(\xi)$ と与えられこれらについて規格密度関数から得られる(図-6)。

これより、確率的性状が「決定論的」に導かれたことになる。

(3) その他 次は流下方向の運動、saltationの継続性について検討した。前者については流率 H による加速状況、鉛直方向の分布を運動方程式と比較検討し、後者については図-9を得ている。

これらをもとにした流石モデルの構成 図-7 saltation粒子の流下方向の加速状況

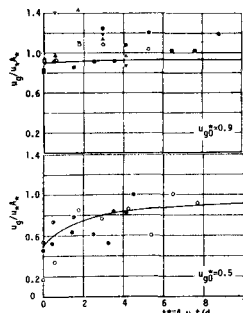


図-7 saltation粒子の流下方向の加速状況

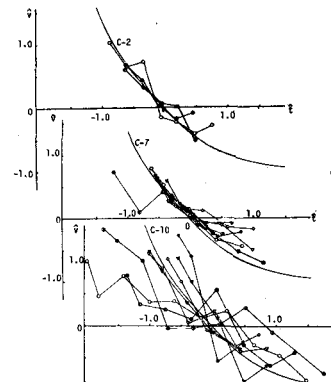


図-2 鉛直速度の変化

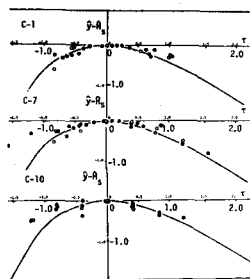


図-3 saltation粒子の存在する時間的変化

(ただし $\hat{\eta}_s = \hat{\eta}_p - \hat{\eta}_s$)

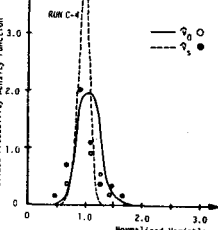
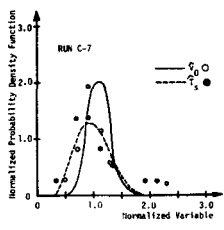
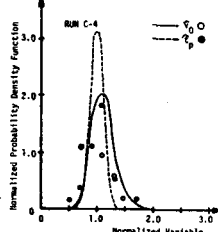
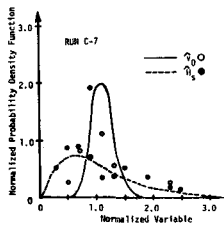


図-6 saltation諸量の分布性 (U_b の分布は実験によって決めた gamma 分布)

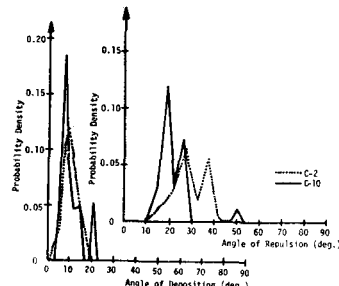


図-8 saltation粒子の流下方向速度の鉛直分布

図-9 河床からの噴出(反移)角及び河床への入射角の分布

(参考文献) 1) Nakagawa et al. : Proc. 3rd ISSH, 1980
2) 中川・辻・村上 : 第6回年報, 1981
3) 岸・福田 : カ10回水理講演会講演集, 1986.
4) 土屋 : 京大防災研究所年報第12, 13号, 1969, 1970.