

京都大学 防災研究所 正会員 土屋 義人

正会員 〇河田 恵昭

1. 緒言 掃流形式で輸送される砂粒の saltation 機構に関する著者らのこれまでの考察から、流砂では砂粒の運動が定常跳躍として近似できるのに対し、飛砂では継続跳躍における第1回目の跳躍から定常跳躍に至るまでの各跳躍ごとの平均飛距離などが大きく相違するため、前者のような平均的な取り扱いが困難であることがわかってきた。本研究は、変分原理を用いて、saltation 層内の運動砂粒と静止砂粒との衝突における saltation としての砂粒の運動の配分則を考察し、前報で誘導した平衡状態の流砂および飛砂量式を統一的に表示しようとしたものである。

2. 砂粒の運動の配分則 いま、流体のエネルギーを E_0 、砂粒の運動エネルギーを E_s 、および流体と床面との境界面における損失エネルギーを E_L とすれば、流砂を含む定常、等流の二相流に関して次式が成立すると仮定する。 $E_0 = E_s + E_L$ —— (1) 著者らの saltation 機構に関する考察から、 $(3/2)C_0(\bar{u} - \bar{u}_{oi})\bar{w}_{oi} \tau_* \ll 1$ では第 i 回目の跳躍の水平方向初速度 $\bar{u}_{oi}$ および飛距離 $\bar{L}_i$ は等比数列として近似的につぎのように表わされる。

$\bar{u}_{oi} = r^{i-1} \bar{u}_{o1}$, $\bar{L}_i = 2(\sigma/\rho + 1/2) \bar{u}_{oi}^2 (\tan \beta) \tau_*$ —— (2) ここに、 $\bar{u} \approx Ar$, $\bar{w}_{oi} = \bar{u}_{oi} \tan \beta$, $\bar{u}_{oi} = U_{oi}/u_*$, $\bar{L}_i = L/d$, d : 粒径, u_* : 摩擦速度, σ および ρ : それぞれ砂粒と流体の密度, β : 飛び出し角度, $\tau_* = u_*^2 / (\sigma/\rho - 1)gd$, $r = e \{1 + (3/2)C_0 Ar^2 (\tan \beta) \tau_*\}$, C_0 : 抗力係数および e : 砂粒の反発係数である。saltation 層内に運動砂粒が N 個あるとし、そのうち第 i 回目の跳躍をする砂粒が n_i 個あるとすれば、 E_s は (2) 式を用いるとつぎのように表わされる。 $E_s = (1/2)m \bar{u}_{o1}^2 (1 + \tan^2 \beta) \sum_{i=1}^N n_i r^{2(i-1)}$, $N = \sum_{i=1}^N n_i$ —— (3)

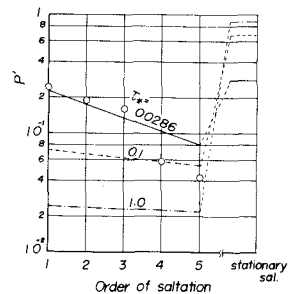
ここに、 m : 砂粒1個の質量である。いま、単位時間、単位面積当り N 個の砂粒が移動を開始し、継続確率 P で跳躍を繰り返すと考え、第 i 回目の跳躍で停止する砂粒の数 n_i' は $n_i' = N' p^{i-1} (1-p)$ —— (4) となる。

(3) および (4) 式において、 $n_i/N = n_i'/N'$ と仮定すれば、 E_s は次式で表わされる。 $E_s = (1/2)m \bar{u}_{o1}^2 (1 + \tan^2 \beta) N (1-p) \{1 - (pr)^N\} / (1-pr)$ —— (5) E_0 が一定で、砂粒の運動エネルギー E_s が最大となる最大の流砂量を保持する場合に流砂現象が起こるものとするれば、 $\partial E_s / \partial p = 0$ から近似的に $p \approx 1 - 1/r^2$ —— (6)

となる。図-1 は飛砂における停止確率 p' を計算したものであって、6回目以上の跳躍を近似的に定常跳躍とした。図中の点は高速度カメラによる $d = 0.225$ cm, $\tau_* = 0.0286$ の著者らの実験値であり、実線で示した計算結果と傾向がよく一致している。また、 $\tau_* \gg \tau_{oc}$ (移動限界) では、saltation 層内の大部分の砂粒は近似的に定常跳躍していることがわかり、この領域で定常跳躍の力学的な関係が成立すると考えられる。つぎに、以上の結果を用いて、砂粒の平均飛距離は次のように表わされる。すなわち、saltation 層には第1回目の跳躍砂粒から無限回の跳躍を継続している砂粒が含まれるが、数回の跳躍を繰り返すといわゆる定常跳躍に近づくことから、全運動砂粒が、第1、2回目およびそれ以上の継続跳躍を近似的に定常跳躍とする (図-1) 砂粒の停止確率

3つの集団に分けられる場合、平均飛距離 $\bar{L}_m$ は次式のようになる。 $\bar{L}_m = 2(\sigma/\rho + 1/2) [\bar{u}_{o1}^2 \tan \beta + (A/4) Ar^2 \{(1+e) - (1-e)\sqrt{1+8/13(1-e)AC_0 Ar^2 \tau_*}\}^2 (1-1/r^2)] \tau_*$ —— (7) あるいは、第4回目以上の跳躍を定常跳躍として運動砂粒を4つの集団に分けた場合はつぎのようになる。 $\bar{L}_m = 2(\sigma/\rho + 1/2) [\bar{u}_{o1}^2 (\tan \beta) \{1 + r^2 (1-1/r^2)\} + (A/4) Ar^2 \{(1+e) - (1-e)\sqrt{1+8/13(1-e)AC_0 Ar^2 \tau_*}\}^2 (1-1/r^2)] \tau_*$ —— (8)

3. 流砂・飛砂量則 著者らは前報において、流砂を含む二相流に対し運動量の保存則を適用して、いわゆる plane bed の床面形態を対象とした流砂の基礎式を誘導した。この結果、等流の平衡状態では流砂および飛砂量



式はすべての砂粒が近似的に定常跳躍すると仮定すればつぎのように表わされた。 $q_* = \bar{G}_0 \bar{L}_m = e \tan \beta / (1-e) \{1 + (1/2)(\sigma/\rho)\} Ar \left[\frac{(1+e) - (1-e)\sqrt{1 + 8/3(1-e)\lambda C_0 Ar^2}}{2} \right] (\tau_* - \tau_{*c})$ —— (9) ニこに、 $\bar{G}_0 = G_0/\sigma u_*$, $q_* = q_b/u_* d$, $\lambda = 4Hm/Lm$ および τ_{*c} : 限界掃流力である。いま、砂面に衝突した砂粒によって静止砂粒が砂面上を滑動して、初速度 U_3 で surface creep を始めるとすれば、運動方程式はつぎのようになる。 $(1/2)m U_3^2 = (\pi/6)d^3(\sigma/\rho)\mu_f q_* L_{sc}$ —— (10) ニこに、 L_{sc} :

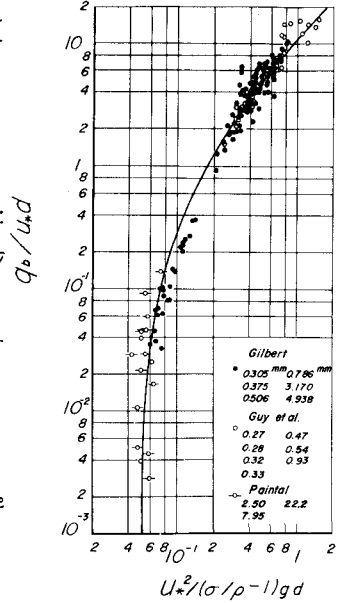
surface creep の移動距離, μ_f : 摩擦係数である。一方、平衡状態では衝突は砂面上で G_0/m 回起こるが、surface creep は定常跳躍をする砂粒の衝突によって生ずるとすれば、その衝突の回数 N_s はつぎのようになる。 $N_s = G_0 P_s / m$ —— (11) ニこに、 P_s は定常跳躍をする砂粒の確率であって、(6) 式から求められる。(6), (10) および (11) 式から surface creep による砂粒の移動量 q_{sc*} はつぎのようになる。 $q_{sc*} = \bar{G}_0 P_s \bar{L}_{scm}$ —— (12) ニこに、 $q_{sc*} = q_{sc} / u_* d$, $\bar{L}_{scm} = L_{sc} / d$ である。(11)~(12) 式によって、砂粒の輸送量 q_* は跳躍による輸送量 q_{s*} と surface creep による輸送量 q_{sc*} によって以下のように表わされる。(i) 運動砂粒を第 1, 2 および定常跳躍の 3 つに分ける場合 $q_* = q_{s*} + q_{sc*} = A_1 [1 + A_2 (1 - 1/r^2)^2] \sqrt{A_3 + A_4 \{ (1+e) - (1-e)\sqrt{1 + 8/3(1-e)\lambda C_0 Ar^2} \}^2 (1 - 1/r^2)^2} (\tau_* - \tau_{*c})$ —— (13)

(ii) 第 1, 2, 3 および定常跳躍の 4 つに分ける場合 $q_* = A_1 [1 + A_2 (1 - 1/r^2)^2] \sqrt{A_3 \{ 1 + r^2 (1 - 1/r^2) \} + A_4 \{ (1+e) - (1-e)\sqrt{1 + 8/3(1-e)\lambda C_0 Ar^2} \}^2 (1 - 1/r^2)^2} (\tau_* - \tau_{*c})$ —— (14) ニこに、 $A_1 = (\tan \beta) X (2 + \sigma/\rho) (e_m / (1 - e_m)) / \sqrt{\lambda}$, $A_2 = (1 + e^2) (\sigma/\rho - 1) (1 - e'/e)^2 / 4 (\tan \beta) \mu_f (1 - \sigma/\rho) (\sigma/\rho + 1/2)$, $A_3 = \bar{U}_0^2 \tan \beta$, $A_4 = \lambda Ar^2 / 4$, e : 標準偏差, $e' = e / \{1 + (3/2) C_0 Ar^2 (1 - C)^2 \tan \beta\}$, e および e' : 固定床と移動床の反発係数, C : 比例定数および $\bar{U}_3 = (1 - e'/e) \bar{U}_s$ である。流砂の場合、着着らの saltation の実験結果から、 e および e' が近似的に成立すると考えられるので、surface creep による砂粒の輸送量はなくなる。

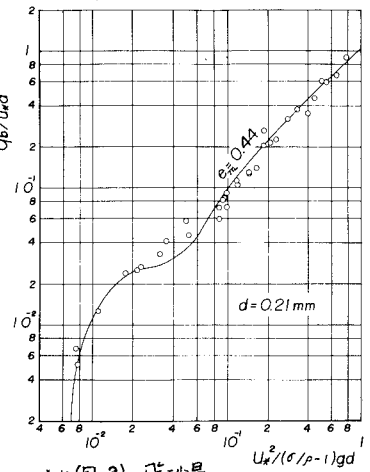
4. 実験結果との比較 図-2 は plane bed 領域の流砂量の実験値を示し、図中の曲線は着着らの saltation の実験結果から $e = 0.62$, $\lambda = 0.4$, $\tan \beta = 0.577$, $\tau_{*c} = 0.05$, $\sigma/\rho = 2.65$ および $Ar \approx 8.5$ として (13) 式を計算したものである。(9), (13) および (14) 式によって与えられる流砂量が反発係数の若干の修正によって、いづれ(図-3) 飛砂量

も従来の実験結果とよく一致することから、流砂では砂粒の運動を近似的に定常跳躍として取り換えることがわかる。図-3 は最近行なった着着らの飛砂量の実験値との比較であり、図中の曲線は、飛砂の saltation の実験結果から $e = 0.91$, $\lambda = 0.26$, $\tan \beta = 1.5$ および反発係数の平均値 $e_m = 0.44$ を用い、 $\tau_{*c} = 0.0065$ として (13) 式を計算したものである。また、図-4 は surface creep などによる砂粒の輸送量と飛砂量との比を示した。これらの図から、実験値と計算値が掃流力全般範囲にわたってかなりよく一致し、移動限界近傍では first saltation などの初期跳躍によって砂粒が輸送され、掃流力が大きくなるにしたがって、surface creep の形式で飛砂量の約 20% 程度輸送されることがわかる。以上のことから、飛砂においては、流砂の場合のように運動砂粒のすべてを定常跳躍として近似的に取り扱うことができず、上述したような取り扱いが必要であると考えられる。

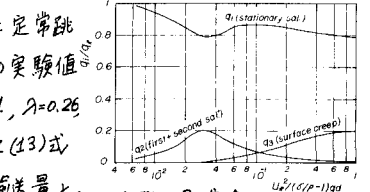
5. 結 語 以上、流砂・飛砂量則の統一の一つの試みを示したが、今後さらに流延分布などの考察を加えて、検討していきたいと考えている。(参考文献) 土屋河田: Saltation に基づく流砂の基礎方程式, 土研第 28 回年次学術講演会講演要録集, II-141, 昭 48.



(図-2) 流砂量



(図-3) 飛砂量



(図-4) 飛砂量の割合