

飛砂層の濃度分布と風速分布

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎
 金沢大学大学院 学生員 赤城 里至
 金沢大学工学部 ○西山 浩一

1. まえがき 近年、離岸堤設置などの効果で砂浜が復活し、CCZ (coastal community zone) などとして利用が図られているが、砂浜の拡大は飛砂の増加を促し、サイクリングロード、パーキングエリアへの砂の堆積に対する対策に迫られるようになってきている。著者ら¹⁾はsaltation運動の解析にもとづいて飛砂量と風速分布を同時に解析する方法を提案したが、そのモデルでは個々のが独立であるとして、河村の実験式で与えられる初速度を平均値とする独立な確率変数としてsuccessive saltationのシミュレーションが行なわれた。本研究では個々のsaltationの初速度を反発機構^{2), 3)}を取り込んで物理的合理性をもって継続させた。

2. モデルの概要 本論文では次の仮定のもとに議論を進める。(1) 球状で均一な粒径の充分乾いた砂粒からなる平坦砂面で、(2) その上の風は粗面乱流で、(3) 跳躍中の粒子間の相互干渉は無視でき、さらに(4) 飛砂の運動形態はsaltationで代表でき、(5) 飛砂量は平衡状態にある。このとき既知のパラメータは砂の径 d 、密度 σ 、形状係数 A_2 、 A_3 、空気密度 ρ 及び砂面に働くせん断応力 τ_0 であるとする。saltation運動の支配方程式は、

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} = D_x \quad D_x(y) \equiv \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \{ U(y) - u_p(y) \} \sqrt{\{ U(y) - u_p(y) \}^2 + \{ v_p(y) \}^2} \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_p}{dt} = -D_y - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g \quad D_y(y) \equiv \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 v_p(y) \sqrt{\{ U(y) - u_p(y) \}^2 + \{ v_p(y) \}^2} \quad (2)$$

で、ここに (u_p, v_p) : 粒子速度の流下及び鉛直方向成分、 C_D : 抵抗力係数、 C_M : 付加質量係数、 U : 風速、 g : 重力加速度である。粒子の位置を (x_p, y_p) と書くと $(u_p, v_p) = (dx_p/dt, dy_p/dt)$ である。 y 座標の原点は砂面とし初期条件は $t=0$ で $x_p=0, y_p=0.5d, (u_p, v_p) = (u_{p0}, v_{p0})$ とした。風速分布と初速度 (u_{p0}, v_{p0}) が与えられると、式(1), (2)は数値的に解くことができ、一つのsaltation運動を追跡できる。saltationは y_p が再び $0.5d$ となる (砂面に衝突) ところで終了するが、実際には反発し次のsaltation運動にはいる。床面での反発前後の粒子速度 $(u_{pd}, v_{pd}), (u_{p0}, v_{p0})$ の間の関係は次式で与えられる^{2), 3)}。

$$\begin{bmatrix} u_{p0} \\ v_{p0} \end{bmatrix} = \Xi_0 \begin{bmatrix} u_{pd} \\ v_{pd} \end{bmatrix} \quad \Xi_0 \equiv \begin{bmatrix} e \cos^2 \alpha - f \sin^2 \alpha & (e+f) \cos \alpha \sin \alpha \\ (e+f) \cos \alpha \sin \alpha & e \sin^2 \alpha - f \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 e, f : 砂面での反発係数であり、仮想反発面傾斜角 α は、入射角 $\theta_{in} = u_{pd}/v_{pd}$ が与えられたとき、

$$\alpha = \arcsin \{ (1 - \xi_0) \sin \theta_{in} - 1 \} - \theta_{in} + \frac{\pi}{2} \quad \alpha = \arcsin \left\{ \left(\frac{1}{2} - \xi_0 \right) \sin \theta_{in} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_{in} \right\} - \theta_{in} + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

で与えられる。上の第1式は $\theta_{in} < \pi/6$ の場合、第2式は $\theta_{in} \geq \pi/6$ の場合に適用される。 $\{\xi_0\}$ は $[0, 1]$ の一様乱数である。

風速分布が与えられていると、上記の計算によって継続跳躍 (successive saltation) が記述され、計算の微小時間刻み Δt ごとに粒子の存在位置 (x_p, y_p) 、速度 (u_p, v_p) が求められ、また粒子の存在確率密度 $f_B(y)$ 、飛砂の各高さでの平均移動速度 $u_{pm}(y)$ が求められる。

単位面積当たりの飛砂の数密度を v_B とする
 と等流状態での力の釣り合い式は、

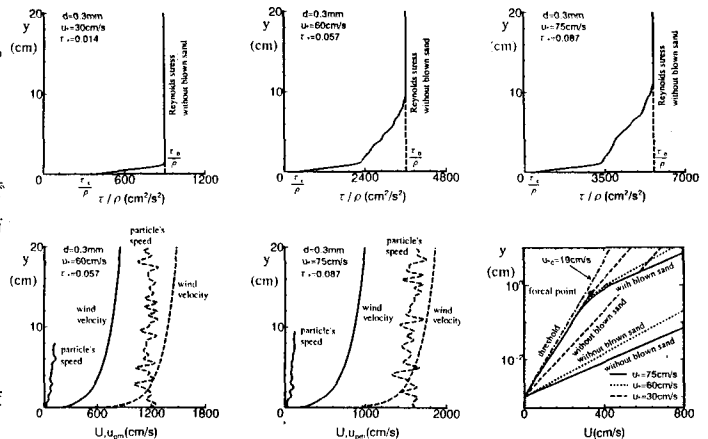
$$\frac{d\tau}{dy} - v_B D(y) = 0 \quad (5)$$

であり、境界層外縁 (saltation層上縁) で $\tau = \tau_0$ を境界条件として次のReynolds応力分布が得られる。

$$\tau(y) = \tau_0 - v_B \Delta \tau(y) \quad (6)$$

$$\Delta \tau(y) \equiv \int_y^\infty D(y) dy \quad (7)$$

乱流モデルとして混合距離モデルをそのまま用いると、式(6)で与えられるReynolds応力



分布を用いて次式の積分によって風速分布が求められる。

$$U(y) = \int_{y_0}^y \sqrt{\frac{\tau(y)}{\rho}} \frac{dy}{\kappa y} \quad (8)$$

ただし、 $y=y_0$ で $U=0$ とし、 $l=\kappa y$ (l : 混合距離、 κ : Karman定数、 $\kappa=0.4$)を仮定した。粗面乱流の領域を対象とすると、 $y_0=d/30.1$ で、飛砂を含まない場合、風速分布は粗面対数則にしたがう。

砂面でのReynolds応力 $\tau(0)$ が新たな砂の砂面からの離脱を促すが、飛砂の場合平衡状態では個々のsaltationはほとんど停止せず継続するのもはや新たな砂の移動開始ではなく、この値が移動限界値 τ_c に等しいと考えられる。このことから、平衡状態での飛砂数密度 v_B は次式で与えられる。

$$v_B = \frac{\tau_0 - \tau_c}{\Delta \tau(0)} \quad (9)$$

平衡状態の飛砂数密度が評価されれば、その状態でのReynolds応力分布が決定され、それに対応して風速分布が求められる。

風速分布が砂粒運動を支配するので、saltationの解析は更新されねばならない。平衡飛砂数密度が収束する状況で、混相流として整合性のとれた粒子運動、風速についての解が得られることが期待される。

平衡状態が得られれば、平衡飛砂量 q_s は次式で与えられる。

$$q_s = \sigma v_B A_3 d^3 \int_0^\infty f_B(y) u_{pm}(y) dy \quad (10)$$

3. 解析方法と結果 実際の解析ではまず飛砂を含まない流れに対してsaltationの解析を行ない、その結果から数密度を推定し、また砂の運動特性量を考慮して流れの解析を行なう。流れ場が変化すると、saltationの解析を更新しなければならず、計算手順を繰り返す。流れ(風)と飛砂の運動の整合のとれたところで平衡飛砂を含む流れと飛砂運動が解けたことになるが、その収束判定は飛砂数密度で行なう。

シミュレーションに当たっては、次のように諸量を設定した。 $\rho=0.00123\text{g/cm}^3$, $\sigma=2.65\text{g/cm}^3$, $C_D=0.4$, $C_M=0.5$, $A_2=\pi/4$, $A_3=\pi/6$, $g=980\text{cm/s}^2$, $e=f=0.75$ 。また、砂粒の粒径(d)が 0.3mm のものを対象として計算を行なった。これは従来の飛砂の実験や観測例がほとんどこの程度の粒径を対象としていることによる。以下に計算結果としてえられたsaltation特性(砂粒速度分布、存在高さの確率密度分布、saltationの飛距離、飛高、平衡飛砂量)、飛砂を含む風の風速分布を示すが、従来の実験・観測結果を良く表している。

4. あとがき 今後は、非平衡状態から平衡状態への遷移、防砂策としての柵、スクリーン、灌木群を含む場での議論へ進めたいと考えている。

参考文献 1) 辻本・赤城: サルテーションモデルによる飛砂層の解析と飛砂量式, 海岸工学論文集, 40, 1993. 2) 辻本・中川: 掃流粒子のSaltationの確率過程論的解析, 土木学会論文集, 345/II-1, 1984. 3) 後藤・辻本・中川: PSI-セルモデルによるSaltation層の解析, 海岸工学論文集, 39, 1993. 4) 清水・辻本・中川: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, 447/II-19, 1992.

