

飛砂濃度分布と風速分布（風洞実験と数値解析）

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 ○渡辺 治久

1. まえがき

飛砂の問題は海岸環境整備とともに改めて重要になってきた問題で、単に飛砂量を推定するだけでなく、飛砂の侵入防止策などと関連して飛砂の制御といった観点から、飛砂と風の相互作用に関わる研究が必要となっている。著者らは、相互作用をモデル化して風と飛砂の運動を同時に解析する方法を研究してきたが¹⁾、本報ではその中から1つの数値解析モデルについて説明、今回実施した結果との比較を行なう。

2. 飛砂とそれを伴う風の数値解析

本論文では以下次のような条件で議論を進める。(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 （さらにその2、3次元形状係数 A_2, A_3 ）、空気密度 ρ 及び砂面に働く全せん断応力 τ_0 であるとする。飛砂運動と風の相互作用は次のサブシステムの融合といったフレームワークからなる。(i) 個々のsaltationの解析、(ii) 砂面との衝突・反発過程、(iii) 飛砂層を伴う風の解析、(iv) 平衡条件。以上の各サブシステムを解析する際与えられるべき量は他のサブシステムからアウトプットされるので、相互の関係した系を直接解くことは難しいが、まず風速分布を飛砂を含まない（対数則）と仮定して計算をスタートさせ、解が安定するまで繰り返し計算を行なうという方法を用いる。

個々のsaltationの支配方程式は次のようである。

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} = D_x; \quad \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_p}{dt} = D_y - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g$$

$$D_x(y) = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \left(U - u_p \right) \sqrt{\left(U - u_p \right)^2 + \left(V - v_p \right)^2}; \quad D_y(y) = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 \left(V - v_p \right) \sqrt{\left(U - u_p \right)^2 + \left(V - v_p \right)^2}$$

と書け、ここに (U, V) : 風速の流下方向(x)及び鉛直方向(y)成分、 (u_p, v_p) : 粒子速度の流下方向及び鉛直方向成分、 (D_x, D_y) : 粒子速度のx方向及びy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。風速分布と粒子の初速度を与えると上式によって、ひとつのsaltation運動を数値的に追跡できる。

ひとつのsaltationは粒子が砂面に衝突するところで終了するが、実際には反発し次のsaltation運動の初速度(u_{p0}, v_{p0})を決定する。これは砂面凹凸の不規則性のために確率変数となる。反発機構のモデル化も可能である¹⁾が、ここでは簡単のため、観察によって指摘されているようにsaltation粒子の砂面からの飛び出しはほぼ真上であることに着目し、ここでは鉛直初速度 v_{p0} のみを所定の期待値の周りに分布する確率変数として与えることとした。初速度の期待値 $E[v_{p0}]$ は次の河村式²⁾で与え、shape parameterが2.0のガンマ分布にしたがう初速度を乱数で与えた。

$$E[v_{p0}] = K_0 (u_{*0} + u_{*c}) \quad \text{ここで、} u_{*0} = \tau_0 / \rho, \quad u_{*c}: \text{移動限界での摩擦速度, } K_0: \text{実験定数である。}$$

飛砂層での風の解析には粒子の周辺の充分大きな空間で平均された支配方程式を用い、粒子の存在は実体でなく形状抵抗に置き換えて考慮する。この付加項を導入した流れの基礎方程式は次のとおりである（連続式は省略）。

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(v_t + v) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v_t + v) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} - \frac{v_B f_B D_x}{\rho}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (v_t + v) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(v_t + v) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - \frac{v_B f_B D_y}{\rho}$$

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \varepsilon + \frac{C_{fk} v_B f_B}{\rho} (D_x U + D_y V)$$

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_1 \left\{ P_k + \frac{C_{fk} v_B f_B}{\rho} (D_x U + D_y V) \right\} - C_2 \varepsilon \right]$$

ここに、 P : 圧力偏差、 k : 乱れエネルギー、 ε, P_k : 乱れエネルギーの散逸率及び生成率、 v : 動粘性係数、 $v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$: 渦動粘性係数である。モデル定数については、 $C_{fk}, C_{f\varepsilon}$ 以外については標準推奨値を用いた。すなわち、 $C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。 $C_{fk}, C_{f\varepsilon}$ については植生を伴う流れの計算と水路実験の比較³⁾ から

$C_{fk}=1.0$, $C_{fe}=1.3$ と決めた。

ところで飛砂層では砂粒子に作用する形状抵抗分だけReynolds応力分布に欠損が現われる。飛砂の平衡状態ではもはや新たな砂の移動開始がないから、砂面でのReynolds応力は飛砂の移動限界 $\tau_c = \rho u_{*c}^2$ に等しいと考えられ、この条件から平衡飛砂数密度 v_B を次式で求めることができ、さらに飛砂量を求めることができる。

$$v_B = (\tau_0 - \tau_c) / \int_0^{y_E} \{f_B(y) D_x(y)\} dy \quad ; \quad q_s = v_B \sigma A_3 d^3 \int_0^{y_E} f_B(y) u_{pm}(y) dy$$

ここで τ_0 ：飛砂を含まない場合のReynolds応力分布の砂面外挿値、 y_E ：飛砂層外縁、 $u_{pm}(y)$ ：高さ y での平均飛砂移動速度である。計算は飛砂の運動、風の解析を繰り返し、 v_B を取束判定に用いて混相流としての解を得る。

3. 風洞実験

金沢大学工学部に設置されたゲッチンゲン風洞（測定区間3.9m、断面80cm×80cm）において風速分布と飛砂量の鉛直分布を測定した。測定区間に充分乾燥した砂（石川県松任海岸で採取したもので中央粒径0.3mmのほぼ均一砂）を厚さ2cm、3.0mの区間にわたって敷き（その上流は同じ高さに調整された粗面固定床、図1参照）、移動床上流端から3mの位置で熱線風速計を用い風速の鉛直方向分布を測定（各点において0.5Hz

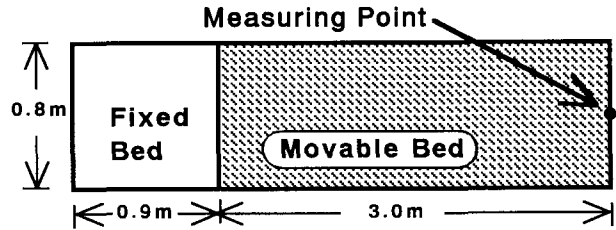


図1 実験概略図

で0.5分間測定）、また鉛直方向に2.3cm刻みで7クラスに分けた採砂箱（各セクションの仕切板の厚さは2mm、幅20cmで、下流側には金網がはられている）を設置して、飛砂量の鉛直方向分布を測定した。採砂時間は5分とし、各セクションに溜まった砂量の測定によって飛砂量の鉛直方向分布 $q_{ss}(y)$ を求めた（ y は各セクションの開口部の砂

面からの平均高さで表示、 $q_s = \int_0^{y_E} q_{ss}(y) dy$ ）。

図2は飛砂量の鉛直分布 $q_{ss}(y)$ で、上記の数値解析の計算結果も併示した。今回の測定では砂面付近の飛砂量が極端に少ないが、これは採砂箱の構造上の問題で今後改良が必要である。図3は鉛直方向に積分した飛砂量と無次元掃流力（ $\tau_* = \tau_0 / [(\sigma - \rho) g d]$ ）の関係について今回の実験値、従来の風洞実験値⁴⁾、河村式²⁾及び計算結果を示す。計算値は実験値より大きい。これについては実験精度を向上させて再検討したい。さらに図4には風速分布について、実験結果と計算結果を比較している。図にはZingg⁵⁾が観測結果より指摘したfocal point及び移動限界での風速についても併示したが、実験値、計算値とも従来から指摘されている飛砂を含む風の特徴を良く表している。採砂箱の効率は特に一番下方のセクションで充分でなく（採砂箱手前の洗掘などの影響）、今後改良を要する。一つの方法は、理論的に求められた飛砂量の鉛直分布のプロファイルが検証されれば、砂面よりやや上方で採砂し、そのデータから全量を類推するのが好ましいと考えられる。

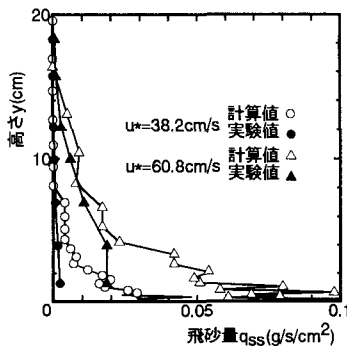


図2 飛砂量の鉛直分布

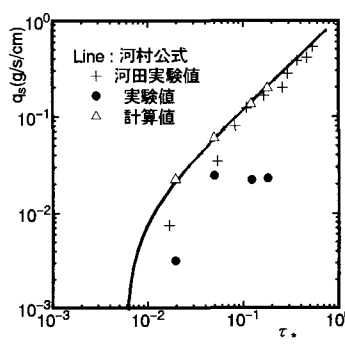


図3 飛砂量と無次元掃流力の関係

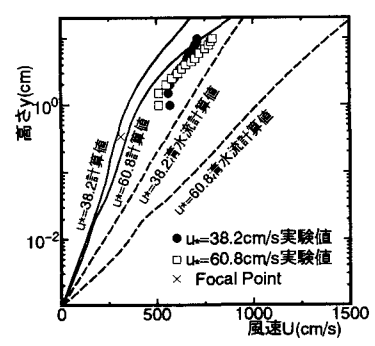


図4 飛砂を含む風の風速分布

4. あとがき

本報では、平衡状態の飛砂について簡便な床面反発モデルを用いた解析と風洞実験でかなりよくアプローチすることがわかった。この結果、今後、非平衡状態での飛砂や植生等による飛砂制御についての研究がこの線上で進めていけるものと期待できる。

参考文献：1）辻本・赤城：海岸工学論文集，第41巻，1994，2）河村：東大理工学部報，第5巻，1951，3）清水・辻本・中川：土木学会論文集，No.477/II-19，1992，4）河田：京大学位論文，1976，5）Zingg, A.W. : Actions Eoliennes, 1953.