

飛砂の非平衡状態について

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

1. まえがき

海岸環境整備を行っていく上で飛砂問題が再びクローズアップされてきている。しかしこれを制御するにあたっては、侵入防止策として考えられる灌木群や防砂柵などの効果を検討するときに、これまで著者らが行ってきた飛砂と風の相互作用の平衡状態のみでの議論¹⁾では補えなくなってくる。そこで本論文では、非平衡状態における飛砂と風の相互作用を検討する簡単な近似モデルを作り、風洞実験の結果を考慮しながら比較検討を行った。

2. 風洞実験

風洞は金沢大学工学部に設置されたゲッチンゲン型風洞を用いた。実験区間は高さ80cm幅80cmで上流端にはアクリル板に粗度付けした厚さ2.0cmの固定床を0.9mにわたり設置し、その下流に十分乾いた砂（石川県松任海浜公園で採取した中央粒径がほぼ0.3mmの均一砂）を用いた移動床を厚さ2.0cm、長さ3.0mにわたって敷いた。流下方向を x 方向とし、移動床上流端を $x=0$ cmとしたときの $x=-20$ cm, 60cm, 100cm, 200cm, 300cmの5点を測定点とし（図1参照、 $x=-20$ cmでは風速のみ測定）、風速の鉛直方向分布をTr式微風速計（RION社製）を用いてサンプル周波数0.5Hzで1成分測定した。また同じ位置で、幅20cm、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り板の厚さは2mm）を用い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、各セクションにたまった砂量の測定によって飛砂の鉛直方向分布 $q_{ss}(y)$ 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で表示）。

図2は風速分布を示したもののだが、上流端から離れるに従って底面付近の風速は減速していき、Zingg²⁾の観測によって指摘されたfocal pointを通る分布に近づくことがわかる。図3は飛砂量 $q_{ss}(y)$ の鉛直分布を示したものであるが、上流端から離れるに従って増加する傾向が良く見られる。

3. 非平衡状態における飛砂と風の解析

まず存在確率密度は平衡状態のプロファイルのまま流下方向に同じ分布をしていると仮定、また平衡状態で期待される平均飛砂移動速度も流下方向に変化しないものと仮定し、これらと流下方向に変化する飛砂量から、非平衡状態における飛砂数密度 $v_B(x)$ を見積った。更に dv_B/dx より単位面積、単位時間当たりの砂面からの離脱個数 $N_e(x)$ を推定し、これらを第一近似として非平衡状態における飛砂と風の相互作用を考慮した解析を行い、更新された存在確率密度、平均移動速度、飛砂量等を求めて第一近似との比較検討を行う。

風速によって基準化された高さ y における飛砂の平均移動速度を $\phi_1(y) (=u_{pm}(y)/U(y))$ とする。存在確率密度を $f_{B1}(y)$ 、流下方向に変化する飛砂量を $q_{s1}(x)$ とすると、第一近似の非平衡飛砂数密度 $v_{B1}(x)$ は次式によって求められる。

$$v_{B1}(x) = \frac{q_{s1}(x)}{\sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_{B1}(y) \phi(y) U(y) dy} \quad (1)$$

河田³⁾によれば平衡距離は粒径の20000倍程度といわれているが、今回は非平衡状態の飛砂量 $q_{s1}(x)$ がこの付近で平衡飛砂量の99%を満たすように指数関数的に増加していくものと考えた。 $q_{s1}(x)$ は平衡状態の飛砂量を q_{se} としたとき次式で与えられる。

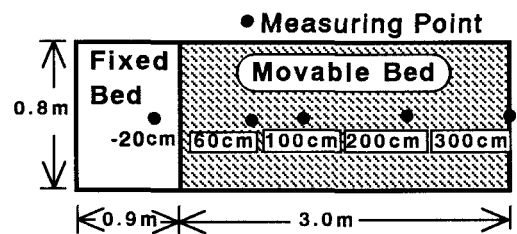


図1 実験概略図

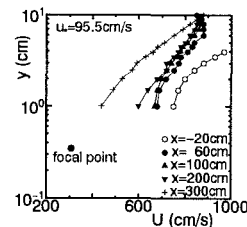


図2 風速分布

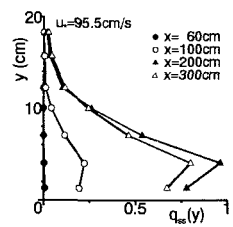


図3 飛砂量の鉛直分布

$$q_{s1}(x) = q_{se} \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{A}\right) \right) \quad (2)$$

ここで A は定数である。また単位面積、単位時間当たりの砂粒子の離脱個数 $N_{el}(x)$ は次式によって求められる。

$$N_{el}(x) = \frac{\partial v_{B1}}{\partial x} \quad (3)$$

粒子1個あたりに作用する抗力は、第一近似においては流下方向のみ作用するとして次式で表される。

$$D_{1x} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 U^2 (1 - \phi)^2 \quad (4)$$

流れの解析は $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて行う。このとき流れの基礎方程式に導入する付加項は、第一近似では流下方向のみだから次式になる。

$$F_x = f_{B1}(y) v_{B1}(x) D_{1x} \quad (5)$$

図4は第一近似として用いた諸量を図に示したものである。基準化された粒子の平均移動速度 $\phi_1(y)$ は平衡状態で解析すると図のようになり、これより $\phi_1(y) = 0.1\sqrt{y}$ と近似した。存在確率密度 $f_{B1}(y)$ はこの分布形が流下方向に変化しないと近似して与えた。結局(1)式によって非平衡状態における飛砂数密度 $v_{B1}(x)$ を求め流下方向に対してプロットすると図のようになる。これらを第一近似として砂粒子と風の相互作用を考慮した流れの解析を行い、

非平衡状態における風速 $U(x, y)$ を求めた。この風速下で先に求められた離脱個数 $N_{el}(x)$ に従って継続 saltation の計算を行い、統計処理をした結果非平衡状態における平均移動速度 $u_{pm}(x, y)$ 、存在確率密度 $f_B(x, y)$ が求められる。結局次式によって飛砂量 $q_s(x)$ は更新される。

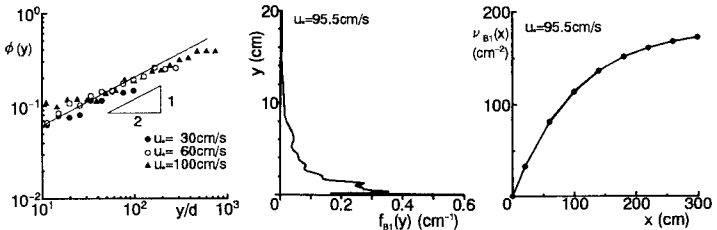


図4 第一近似に用いた平均移動速度、存在確率密度、飛砂数密度

$$q_s(x) = \sigma A_3 d^3 v_{B1}(x) \int_0^\infty f_B(x, y) u_{pm}(x, y) dy$$

図5、図6に解析結果を示す。図5は風速分布で、風洞実験の結果を白抜きで併示した。計算値を見てみると、移動床上流端から離れるに従い実験では計測不能だった飛砂層内で、速度勾配が移動限界に近づいていくことがわかる。基準化された砂粒子の平均移動速度 $\phi(x, y)$ は、移動床上流端から離れるに従って第一近似の分布に近づいていく傾向にある。存在確率密度 $f_B(x, y)$ の分布は上流端から離れるに従い飛砂層が厚くなり、結局流下方向で分布が異なっていることがわかる。(6)式によって更新された飛砂量 $q_s(x)$ の流下方向に対する変化を第一近似で与えた飛砂量と併示してみると、1回の更新計算でもそれほど大きな違いは出ないことがわかった。

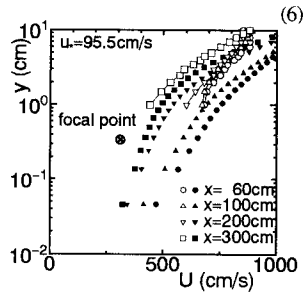


図5 風速分布

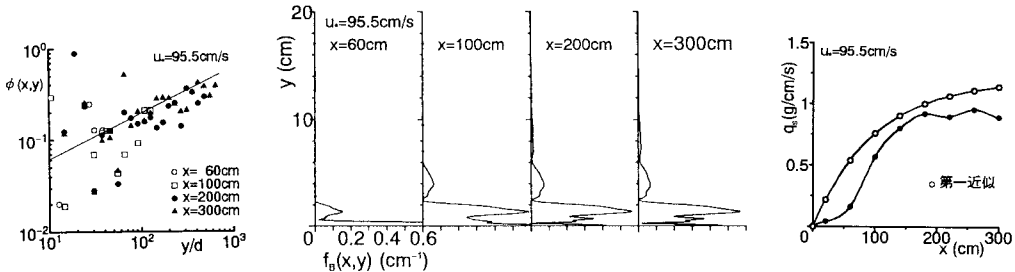


図6 非平衡状態における平均移動速度、存在確率密度、飛砂量の流下方向分布

4. あとがき

風洞実験を行った結果、移動床上流端から離れるに従い飛砂量は増加し、風速分布は従来言われていた focal point を通るような移動限界に近づくことがわかった。また非平衡状態の流れの数値解析が簡単な近似モデルである程度再現可能であることがわかった。今後は更に繰り返し計算を行って精度を高めていきたい。

参考文献：1) 辻本・赤城：海岸工学論文集，第41巻，1994，2) Zingg, A.W.: Action Eoliennes, 1953, 3) 河田：京大学位論文，1976。