

非平衡状態の飛砂と風の特性～飛砂量の減少過程と増加過程の比較～

金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎
金沢大学大学院 学生員 〇渡辺治久

1. まえがき

近年、離岸堤設置の効果等により海岸砂浜が蘇り、海浜公園の整備などが図られているが、砂浜の発達により自転車道、駐車場などへの飛砂の侵入が問題になりつつあり、飛砂防止工の工夫が期待されている。こうした状況下で、非平衡状態を含む飛砂過程、灌木群やネット等の透過性構造物の存在する場での飛砂過程と地形変化過程の研究を進める必要がある。本報は、飛砂の遷移過程である非平衡状態の飛砂量変化に着目し、その増加及び減少過程を数値解析により比較し、底面掃流力の変化について考察する。

2. 計算条件

従来の研究より飛砂のほとんどがsaltation（継続跳躍）運動で移動することがわかっていることから、saltation運動をしている砂粒子に限定して議論する。解析を進める上で、以下の条件を与える。(1)球状で均一な粒径の乾燥砂粒で形成された平坦砂面を想定する。(2)その上の風は粗面乱流とする。(3)跳躍中の粒子間の相互干渉は無視する。このとき、既知のパラメータは砂の粒径 d 、密度 σ 、空気密度 ρ 、及び飛砂の無い状態で砂面に働く全せん断力 τ_0 とする。

3. 飛砂の平衡状態

砂面からの粒子の飛び出しにより、飛砂層は発達してゆく。一旦飛び出した砂粒子は風の運動量を奪い続けて、停止することなく移動し続ける。飛砂層の発達は空気中の粒子数が飽和状態に達すると止まる。これを平衡状態と呼ぶ。平衡状態の数値解析は(1)個々のsaltationの解析、(2)平衡条件、(3)飛砂を含む風の解析、の順に計算を進め、解が安定するまで繰り返し計算する¹⁾。その結果、風速分布や、砂粒子平均移動速度 u_p 、存在確率密度 f_B 等を得る。砂粒子は砂面と衝突すると、反発してランダムな上向き速度を得るが、計算では簡単のためにその速度を鉛直方向のみとし、ある期待値の周りに分布する確率変数とした。その期待値は河村のモデル²⁾で用いられている次式で与えた。

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

平衡状態では底面掃流力が移動限界に達していると考えられるので、平衡飛砂数密度 v_{Be} を次式で求めることができ、さらに平衡飛砂量 q_{se} を求めることができる。

$$v_{Be}(x) = (\tau_0 - \tau_c) / \int_0^\infty \{f_B(y) D_x(y)\} dy \quad ; \quad q_{se} = v_{Be} A_3 d^3 \int_0^\infty f_B(y) u_p(y) dy$$

ここで、 τ_c ：移動限界での底面せん断応力値、 D_x ：粒子1個当たりの抗力、 A_3 ：3次元形状係数である。

飛砂層での風の解析には空間平均された $k-\varepsilon$ モデルを用い、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。

4. 飛砂の非平衡状態

飛砂が平衡状態に達するまでの遷移過程を非平衡状態と呼ぶ。非平衡状態の数値解析は飛砂の特性値や風速値を逐次更新する逐次近似法で行う。この方法では第0次近似として u_p 、 f_B が平衡状態の分布型のまま流下方向に相似分布するとし、さらに飛砂量の分布型を仮定することで近似された飛砂数密度が求められ、それらの値で解が安定するまで繰り返し近似計算する。飛砂量は底面掃流力の変化を見るため、流下方向に単調増加、単調減少の2種類を仮定する。前者は徐々に飛砂が発達し平衡状態に漸近してゆく分布型、即ち不飽和飛砂過程とする。後者は一気に飛砂が発達して平衡飛砂量を大幅に上回り、その後徐々に平衡飛砂量に漸近してゆく分布型、即ち過飽和飛砂過程とする。

5. 不飽和飛砂過程

風速の流入値は対数則で与え、不飽和飛砂量分布を次式で仮定する。

$$q_s(x) = q_{se}(1 - \exp(-x/\Lambda))$$

河田³⁾によると平衡距離は粒径の約2万倍なので、6.0mで q_s が q_{se} の99%となるように $\Lambda = 100 \text{ cm}$ とした。図1が飛砂量の仮定値と更新値である。 q_s は一旦仮定値を上回るが徐々に減少し、平衡飛砂量に収束してい

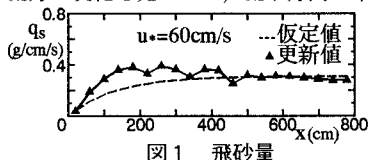


図1 飛砂量

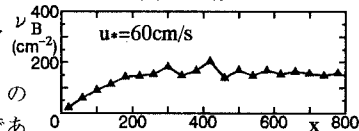


図2 飛砂数密度

る。図2は飛砂数密度分布である。飛砂数密度は単位面積中に存在する粒子数を表しており、この場合平衡仮定距離 $x=600\text{cm}$ において約 150cm^2 の粒子が存在していることになる。図3は風速分布の変化である。上流境界条件として与えられた対数則分布から、飛砂層の発達にともない風が飛砂に運動量を奪われ減速してゆく様子が現れている。図4はレイノルズ応力分布の変化である。飛砂が少ない $x=60\text{cm}$ では底面付近の欠損は小さいが飛砂の発達にともない底面値が移動限界に近づいてゆくのが解る。

6. 過飽和と飛砂過程

飛砂量が平衡値の2倍に急増し、その後平衡値に減少する場合を想定する。飛砂が発達した状態からの増加と考え、風速の流入値として平衡解を用いる。そして、過飽和と飛砂量分布を次式で仮定した。

$q_s(x) = q_{se}(1 + \alpha \exp(-x/\Lambda))$; α : 定数であり、 q_{se} の2倍の流入条件を想定して1.0とした。ここでも $\Lambda = 100\text{cm}$ とした。図5は飛砂量の流下方向分布である。 q_s は不飽和のときは逆に一旦平衡値を下回った後、漸近してゆく。図6は飛砂数密度の分布である。不飽和と同じくほぼ 150cm^2 に収束している。図7は風速分布である。平衡値の2倍の飛砂量を与えたため、平衡値からさらに減速が進み最大で約 280cm/s まで落ちている。一旦減速した風速は飛砂量が平衡値に減少するのに伴い平衡値に回復するはずなのだが、 $x=780\text{cm}$ でも完全に回復していない。図8はレイノルズ応力分布である。不飽和の結果と異なる点は初期の飛砂量の多さによって $x=60\text{cm}$ での欠損が大きくなっていることと、全体的に大きい値をとっていることである。 $x=780\text{cm}$ において飛砂数密度が不飽和のときとほぼ同じ値 150cm^2 をとっているにも関わらず風速やレイノルズ応力に差があることが問題点である。

図9は底面掃流力 τ_b の変化である。不飽和のとき、底面掃流力は徐々に移動限界に収束してゆく。また、過飽和のときには底面掃流力は砂の密度過多により一旦移動限界を下回るが徐々に回復して再び移動限界に近づいてゆく。飛砂を取り込もうとする不飽和飛砂過程の特性と、飛砂を落とそうとする過飽和飛砂過程の特性が現れている。

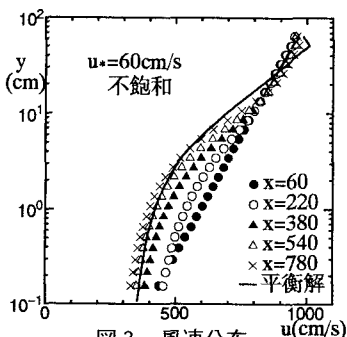


図3 風速分布

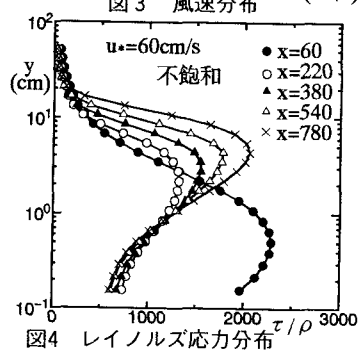


図4 レイノルズ応力分布

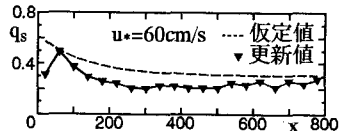


図5 飛砂量

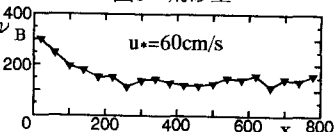


図6 飛砂数密度

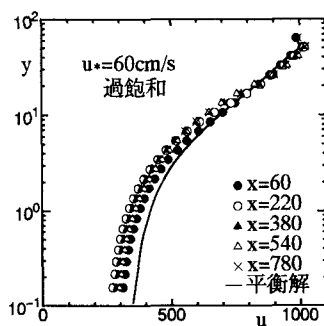


図7 風速分布

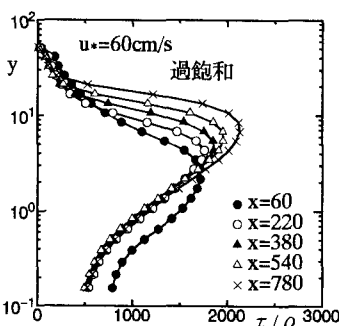


図8 レイノルズ応力分布

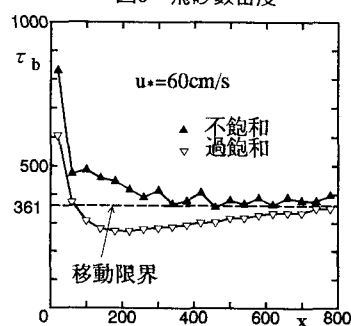


図9 底面掃流力

7. あとがき

非平衡状態における飛砂量の増加及び減少過程の特徴を、数値解析によって底面掃流力の変化を知ることによって把握出来た。今後、植生等による飛砂制御に関する研究も進めてゆかねばならない。

参考文献: 1)辻本・赤城: 飛砂層におけるサルテーション運動と風速分布, 水工学論文集, 第38巻, 1994, 2)河村: 東大理工学研報, 5巻, 1951, 3)河田: 飛砂・流砂における砂粒の流送機構に関する基礎的研究, 1971