

非平衡状態の飛砂量分布と風速分布

辻 本 哲 郎*・赤 城 里 至**

1. ま え が き

離岸堤や養浜によって海岸砂浜幅が増加し、また砂浜に隣接したリゾート区域の発展により、これまでよりもエレガントな飛砂の制御が要請されるようになった。たとえば既往植生群落を用いた風・飛砂制御などが考えられよう。こうした背景で、海岸の風や飛砂についてより精細な知見が必要とされている。海岸水際から飛砂層が発達する過程、また植生層などで飛砂が抑止される現象においては飛砂は非平衡状態にあり、従来の平衡状態で導かれた飛砂量式の適用による現象の記述・予測は不合理と考えられる。本研究は、飛砂の粒子運動と風の乱流運動の相互作用についての著者らのこれまでの平衡状態における研究(辻本・赤城, 1993, 1994)を非平衡状態にとりこんだ解析を行ない、飛砂の非平衡状態での力学機構を明らかにしようとするものである。こうした理論的取り扱いとともに、風洞実験も行ない、非平衡状態における飛砂量分布、風速分布を実測、論理の構成の一助とするとともに、理論の検証にも利用する。

非平衡状態は様々な条件で出現するが、ここでは固定床に接続する一様な移動床において、飛砂が平衡状態に至る過程を対象とする。

2. 飛砂の非平衡状態についての風洞実験

図-1に示すような供用区間が幅80 cm、高さ80 cm、長さ4 mのゲッチング風洞に、固定床砂面に続く乾燥砂移動床を、石川県松任海岸で採取された中央粒径(d)が0.3 mmのほぼ均一粒径砂で作成し(図-2)、非平衡飛砂過程の実験を行なった。すなわち、固定床から移動床への接続部での飛砂と風の特性の流下方向変化を調べた。移動床の厚さは2.0 cmとした。

飛砂量は図-3に示すように高さ(y)方向に分割した捕砂箱を試作して測定した。実験にあたっては、測定開始時に捕砂箱前面の遮蔽板を除去、決められた時間(5分程度)のあいだ捕砂し、各部分で捕捉された砂の重量を測定して、各高さでの飛砂量 $q_{ss}(y)$ (単位時間・単位断

面積あたりの通過質量)、飛砂量 q_s (単位時間・単位幅あたり通過する飛砂の質量)を求めた。

また、風については、熱線風速計(RION社Tr式)による風速分布 $U(y)$ (時間平均)の測定を行なった。プローブの大きさから、最低測定位置は砂面から1 cmのところとした。

測定は、移動床上流端を $x=0$ として、 $x=-20, 60, 100, 300$ cmの5断面で、飛砂量、風速の鉛直方向分布を調べた。実験は、測定項目、測定断面を変えて繰り返して行なった。繰り返しにあたっては、 $x=300$ cm(実験区間の下流端)で砂面からの高さ(y)が40 cmの位置での風速 U_0 を基準風速とし、これを一定とするようにした。

図-4は実験によって得られた風速分布の流下方向変化である。 $x=-20$ cmの断面では境界層の発達が不十分である一方、風洞による断面の拘束の影響が見られるが、 $x>0$ では飛砂の発達とともに変化する風速分布が測定

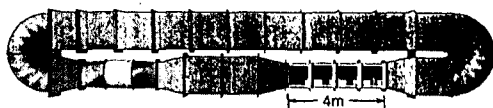


図-1 ゲッチング風洞

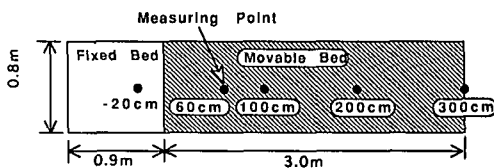


図-2 風洞内測定位置

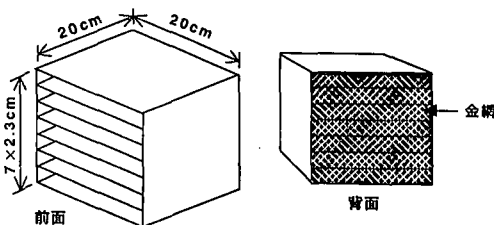


図-3 捕砂箱

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

** 正会員 工修 (株)東京電力 群馬支店

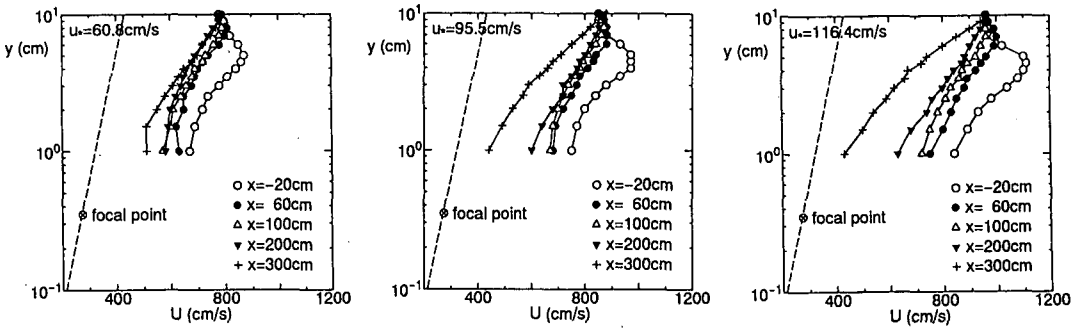


図-4 風速分布の変化についての実験結果

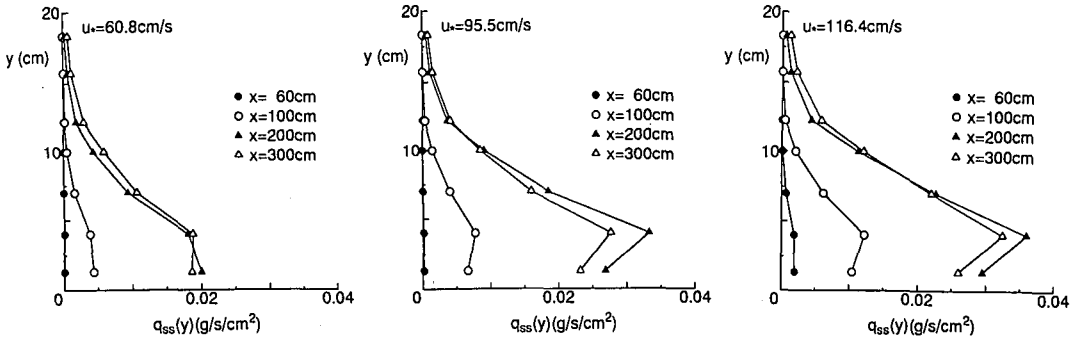


図-5 飛砂量鉛直分布の流下方向変化についての実験結果

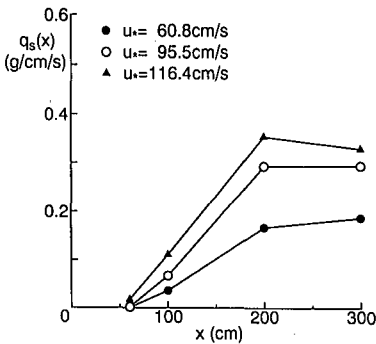


図-6 飛砂量の流下方向変化についての実験結果

$q_{ss}(y)$ の流下方向変化である。実験結果を見ると底面近傍で飛砂量の減少が見られるが、実験時の観察（捕砂箱直前の洗掘などによる捕捉率の低下）や平衡状態での従来の実験結果（土屋・河田，1971）や理論的解析ではこうした傾向は認められないので、最下点での測定値はその上方2点での測定値を用いた指数関数による外挿で補正することとした。図-6はその飛砂層上縁までの積分によって求められた飛砂量の流下方向変化 $q_s(x)$ である。本実験での最下流端での流砂量は従来の経験式（河村，1951）や著者ら（1993）の計算値より小さく、捕砂箱の効率の問題がある上、3.0 m 程度では平衡状態に達していないものと推測される。

3. 理論的アプローチ

(1) 非平衡状態のイメージ

固定床から移動床に向かって風が吹いているとき、砂は固定床との接続部から順次移動開始し飽和状態に向かう。すなわち飛砂量は下流に向かって増加し一定値に近づくが、このように風の性質と飛砂の状態が一對一に対応していない状況を非平衡という。様々な非平衡状態が想定できるが、本研究では上記のような固定床から一様な移動床に接続した場合の非平衡飛砂を考える。仮に、風速分布が流下方向に変化しないとしても、飛砂密度は

されているものと思われる。飛砂層内での風速が測定されていない難点があるが、流下とともに、風速分布がいわゆる飛砂を含む流れに特徴的な focal point (Zingg, 1953) を通るものに変化していく様子が認められている。飛砂層より上では片対数紙上での速度勾配はほぼ一定である（流下とともに若干増加してくるのは、風洞では大気境界層と異なり拘束された断面内流量が一定のため、飛砂層で風速が低減してくるとともに上層の風速が増すため）。

図-5は捕砂箱によって測定された飛砂量の鉛直分布

砂面から移動を開始した砂が累積して増加するが、実際には飛砂密度や飛砂層厚の増加は、飛砂が風に対して相対速度を持ち、抗力が作用（粒子を加速）しているかぎり、風は減速され、風速分布もまた流下方向に変化することを余儀なくされる。水流による流砂では粒子と流体の密度に飛砂ほどの差がないため、この粒子による流体減速については議論しなくて済まされているが（例えば、Nakagawa & Tsujimoto, 1980）、飛砂では粒子の相対密度は水流による流砂の約1,000倍でこの効果を無視できない。こうした相互作用は、平衡状態の風と飛砂を論じるにあたって著者ら（1993）が巧みに取り込んだが、ここでは非平衡状態を対象として相互作用を取り込む工夫をする。

本研究の枠組みでは飛砂については数密度 $\nu_B(x)$ 、存在高さの確率密度 $f_B(y|x)$ 、飛砂の運動速度 ($u_B(y|x)$, $v_B(y|x)$)、風については風速 ($U(y|x)$, $V(y|x)$) が主たる構成要素である。飛砂量 $q_{ss}(x)$ は数密度、存在確率密度、飛砂速度の積 ($q_{ss}(y|x)$) の飛砂層にわたっての積分によって与えられ、流下方向距離の関数である。

理論的取り扱いでは、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 で代表できる。

(2) 飛砂の運動・風の支配方程式

個々の saltation 運動は次の方程式に支配される。

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} &= D_x; \\ \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_p}{dt} &= D_y - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

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

ここに (u_p , v_p): 粒子速度, (D_x , D_y): 粒子1個に作用する抗力, C_D : 抵抗力係数, C_M : 付加質量係数, (U , V): 風速, g : 重力加速度である。粒子の位置を (x_p , y_p) と表すと (u_p , v_p) = (dx_p/dt , dy_p/dt) である。風速分布と粒子の初速度を与えると式 (1), (2) は数値的に解くことができ、ひとつの saltation 運動を追跡できる。 y 座標の原点は砂面とし初期条件は $t=0$ で $x_p=0$, $y_p=0.5d$, $v_p=v_{p0}$, $u_p=0$ とした。ひとつの saltation は y_p が再び $0.5d$ となる (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 運動にはいる。

不規則継続跳躍については辻本・中川 (1984) の反発モデルを飛砂に適用して検討した結果 (1994)、個々の

saltation が次式で与えられる平均値 $E[v_{p0}]$ まわりで shape parameter が 2.0 程度のガンマ分布にしたがう鉛直上向き初速度 $\{v_{p0}\}$ を次々に与えることによって充分模擬できることがわかっているため、この方法によった。

$$E[v_{p0}] = K_0(u_{*0} + u_{*c}) \cdots \cdots \cdots (3)$$

上式は河村 (1951) の経験式をもとにしたもので、 u_{*0} : 摩擦速度, u_{*c} : 移動限界摩擦速度, K_0 : 実験定数である。

流れ場が与えられれば、路床に沿う継続跳躍を上記モデルでラグランジュ的に追跡でき、充分な個数の標本粒子についての計算から各断面での粒子運動のアンサンブル平均特性を推定できる。この方法では砂面から移動開始後、何番目の跳躍であるかは区別していない。また個々の粒子運動は他の粒子の存在に直接影響されないものとしている (粒子密度に応じた流れ場の変化は考慮する)。

アンサンブル平均された粒子運動特性、すなわち飛砂濃度 $\nu_B(x)f_B(y|x)$ 、粒子速度 ($u_B(y|x)$, $v_B(y|x)$) の場所的変化が知られているときの風の運動 (鉛直2次元) の支配方程式は次のようである (連続式を省略)。

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(\nu_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\nu_t + \nu) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} - \frac{\nu_B f_B D_x}{\rho} \end{aligned} \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu_t + \nu) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(\nu_t + \nu) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - \frac{\nu_B f_B D_y}{\rho} \end{aligned} \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} \\ &+ P_k - \varepsilon + \frac{C_{fk} \nu_B f_B}{\rho} (D_x U + D_y V) \end{aligned} \cdots \cdots \cdots (6)$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \\ &\cdot \left[C_{\varepsilon 1} \left\{ P_k + \frac{C_{fk} \nu_B f_B}{\rho} (D_x U + D_y V) \right\} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] \end{aligned} \cdots \cdots \cdots (7)$$

すなわち、運動量方程式に空間平均された抗力を、それ

による仕事に見合う乱れエネルギーの生成と散逸を付加したものである。式中,

$$P_k = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (9)$$

であり, また P : 圧力偏差, k : 乱れエネルギー, ε : 乱れエネルギーの散逸率, P_k : 空間平均された風速分布に起因する乱れエネルギーの生成率, ν : 動粘性係数, ν_t : 渦動粘性係数である。モデル定数については平衡状態の解析 (辻本・赤城, 1994) で決めた値をそのまま用いる。

境界条件として, 砂面で粗面対数則と乱れエネルギーの局所平衡性を仮定した。また風洞実験との対応を考えて計算領域を設定し, 上壁で滑面境界条件を課し, 上流端から対数則に従う流れを流入させ, 下流は自由とした。

(3) 非平衡状態の数値解析の方法

平衡状態では砂面での摩擦速度が移動限界での値に等しく新たな砂粒子の移動開始はないが, 非平衡状態では両摩擦速度の差に応じた新たな砂の移動開始がある。この量と摩擦速度の関係が未だ確立されていないのが非平衡状態を記述・予測するうえでの第1の難点となっている。そこで繰り返し計算で収束的に解を求めることを前提に, まず飛砂量の流下方向変化を仮定する ($q_{s0}(x)$: 第

0次近似)。徐々に平衡状態に向かう様子を適当な式で近似すればよい。次に平衡状態での粒子の存在高さの確率密度分布 $f_{Be}(y)$, 粒子速度分布 $u_{pe}(y)$ を計算, 飛砂数密度変化の第0次近似を次式によって求めた。

$$\nu_{s0}(x) = \frac{q_{s0}(x)}{\sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_{Be}(y) u_{pe}(y) dy} \quad \dots\dots\dots (10)$$

第0次近似での粒子の運動状態を仮定して風の解析をして得られるものが風速分布 $U(y|x)$ の第1次近似であり, このような流れ場において個々の粒子の運動を追跡することによって存在高さの確率密度分布 $f_b(y|x)$, 粒子速度分布 $u_p(y|x)$ (これらはもはや流下方向に変化する) を更新する (第1次近似)。これらと飛砂数密度分布の第0次近似から飛砂量の流下方向変化の第1次近似 $q_{s1}(x)$ が得られる。また第1次近似の飛砂状態を想定して風の解析を行なうと, 風速分布が更新されこうした場での粒子運動の解析から存在確率, 粒子速度の第2次近似が得られ, $q_{s1}(x)$ の第1次近似とこれらより式 (10) と同じ計算によって飛砂数密度の第2次近似を得ることができる。存在確率, 粒子速度の第2次近似と数密度変化の第2次近似で表現される粒子運動状態を仮定して再度流れが更新され, 粒子運動の追跡へと進むことが出来, さらにこれらの繰り返しによって, 諸量の近似度をあげていくことができる。計算は数回の繰り返しで実用上収束す

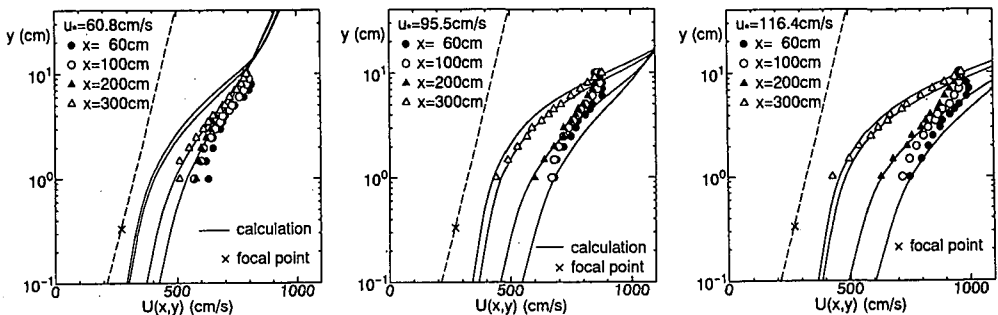


図-7 計算された風速分布の変化

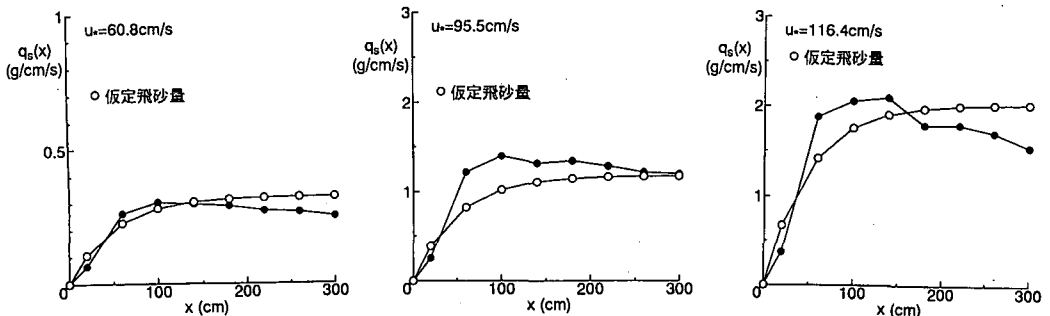


図-8 非平衡状態での飛砂量の変化についての計算結果

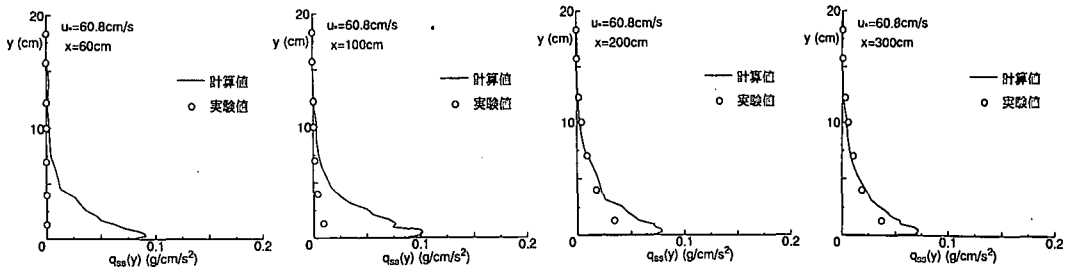


図-9 飛砂量鉛直分布の計算例と実験結果の比較

る。

(4) 計算結果と実験結果の比較及び考察

風洞実験の章でも述べたとおり、今回の実験では流下方向変化が必ずしも正確にとらえられていない恐れもあり、第0次近似飛砂量変化を次のように想定した。

$$q_{ss}(x) = q_{se} \left(1 - \exp \left(-\frac{x}{\Lambda} \right) \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここで平衡飛砂量 q_{se} は著者らの方法(辻本・赤城, 1994)で理論的に与えられる値とし、緩和距離 Λ については従来の知見より固定床から移動床に接続している場合の粒径の1000倍を想定した。

図-7は風速分布の流下方向変化過程について実験結果と計算結果を比較した例で、実線が4つの測定断面に対応する計算結果で、変化特性を概ね表現できている。

図-8は非平衡状態で飛砂量の流下方向変化の計算結果で、式で仮定される第0次近似と収束解とを示している。指数関数的漸近性状に比べると、一旦平衡飛砂量を上回ったあと、減少して平衡状態に近づく性状を呈しているのが特徴と言える。図-9には飛砂量の鉛直分布についても計算結果と実験結果の比較例を示した。

こうした結果は平衡飛砂量や緩和距離がここで仮定したものと大幅に異なる実験結果とは比較出来ない。とくに実験結果において固定床との接続部からの飛砂量の増加の仕方が実験で緩やかすぎる点については、実験・計測技術の改良などを通して検討すべきである。また、計算については収束解の第0次近似依存性について検証すべきであり、saltationの力学については移動開始後の転動に近いものやそれに続く小さな saltation の効果を考慮してない点などについて検討を要する。

非平衡状態の合理的解析のためには、本章第3節で述べたように砂面に働く摩擦速度と単位面積・単位時間あたりの砂面からの移動開始砂粒数の関係の確立が重要である。今回の解析で流れと飛砂量変化についての整合性のとれた解が得られているので、この計算結果より上記関係を見だし、それを説明する力学的背景を探るアプローチが有効であると考えられる。

4. あとがき

本研究では、今後の繊細な飛砂制御に向けて必要と考えられる非平衡状態の飛砂についての知見を充実することを目的とし、まず固定床に接続する移動床での飛砂の発達過程を対象として、風洞実験、数値解析の両面からの検討を行なった。

風洞実験では固定床から移動床に接続する場における非平衡飛砂過程が飛砂量と風速の鉛直分布の流下方向変化として把握され、平衡状態の特徴ある分布(たとえば風速分布における focal point の存在)へ至る過程が観察されたが、とくに捕砂箱による飛砂量の測定に大きな誤差を伴っていることが推測され、今後改良する必要がある。

数値解析では、飛砂の運動と風の乱流運動の相互作用を飛砂に作用する抗力の反力とそれによる仕事量に見合う乱れエネルギーの生成・散逸で考慮した。ここでは飛砂の運動と風の相互作用項が未定であるが、飛砂の解析と風の解析を繰り返して収束解を得る方法で克服した。

今後、これらの成果を様々な非平衡飛砂過程の合理的解析へ生かしていく工夫をしていきたいと考える。

参考文献

- 河村龍馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第5巻, pp. 95-112.
- 土屋義人・河田恵昭 (1971): 飛砂における砂粒の運動機構(2)一砂粒の saltation の機構について, 京都大学防災研究所年報, 第14号B, pp. 311-325.
- 辻本哲郎・赤城里至 (1993): 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, 第40巻, pp. 276-280.
- 辻本哲郎・赤城里至 (1994): 不規則跳躍モデルと $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた飛砂の運動と風の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 386-390.
- 辻本哲郎・中川博次 (1984): 掃流粒子の Saltation の確率過程論的解析, 土木学会論文集, No. 345/II-1, pp. 83-90.
- Nakagawa, H. and T. Tsujimoto (1980): Sand bed instability due to bed load motion, Jour. Hydraul. Div., ASCE, Vol. 106, HY12, pp. 1029-1051.
- Zingg, A. W. (1953): Some characteristics of eolian sand movement by saltation process, Actions Eoliennes, Cent. Nat. de Rech. Sci., Coll. Int., Vol. 35, pp. 197-208.