

# 海浜植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究

辻本 哲郎\*・西澤 謙二\*\*

## 1. まえがき

近年, 海岸浸食対策としての離岸堤の設置や養浜などにより砂浜幅が回復し, 一方では砂浜に隣接したコミュニティ施設が開発され, より制度の良い飛砂制御が要請されている。飛砂防止柵などの人工構造物が時間の経過と共に老朽化して効果を失うのに対し, 海浜固有植生はその繁殖形態から飛砂の堆積により生長し強固になるため, 飛砂制御に有効であると考えられる。本研究では, まず海浜植生をモデル化した風洞実験により植生モデル周辺の飛砂現象を観測する。次に, 風と飛砂を合理的に扱った理論的な研究(辻本・赤城, 1993, 1994, 1995)に基づき, 植生の存在する飛砂の非平衡状態での運動機構を明らかにする。飛砂は植生, 地形といった多くの要因が絡む現象であるので, 植生領域での飛砂の抑止による地形変化は各要因の果たす役割を不明確にする。そこで, はじめに平坦砂面を仮定して植生の飛砂制御能力について検討し, 次に地形変化を考慮して植生領域内の地形変化過程について検討するという手順をとった。また理論は実験によって検証する。

## 2. 風洞実験

海浜植生を想定し, 竹ひごを格子状に配置した植生モデルを用いて風洞実験を行った。

風洞は金沢大学工学部に設置された回流型のゲッチング型風洞(図-1 参照)を用いた。計測区間は高さ 80 cm, 幅 80 cm である。上流端にはアクリル版に粗度付けした厚さ 3.0 cm の固定床を 80 cm に亘り設置した。その固定床に続けて充分乾燥した砂を厚さ 3.0 cm, 長さ 3.2 m に亘り敷いて移動床とした。この砂は石川県松任海浜公園で採取したもので, ふるいわけ試験により中央粒径が約 0.35 mm であることが確認されている。汀線から飛砂が徐々に発達し植生領域に侵入する場面を想定して, 移動床上流端より 2.0 m の地点に長さ 1.0 m に亘って植生モデルを設置する(図-2 参照)。流入風速  $U_0$ (cm/s), 植生モデルの密生度  $\lambda$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) と植生高  $h_0$ (cm) を

変化させ, 植生領域内外と境界の風速分布を計測し, 送風後に植生モデル周辺の飛砂の堆積高さと, 風洞最下流端の飛砂量  $q_s$ (g/s/cm) を測定した。実験条件を表-1 に示す。

図-3 に風速分布の測定結果例を植生モデル上流端を  $x=0$  として示す。植生モデル導入とともに植生モデル層内で風速が減衰している。このため図-4 に示した植生モデル周辺の堆積高さの結果から, 風速の減衰に伴い植生領域前端から飛砂が堆積をはじめることがわかる。図-5 は風洞最下流端の飛砂量を植生条件の違いにより示した。密生度が大きいほど飛砂量が小さく植生の飛砂捕捉能力が高いことがわかる。

## 3. 植生の飛砂制御能力

### (1) シミュレーション

風洞実験により植生は飛砂制御に有効であることが推測された。そこで次に, 植生が飛砂に与える影響を明らかにするため平坦砂面を仮定し, 数値解析により飛砂現

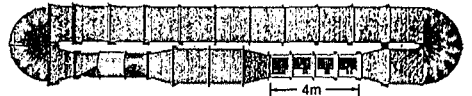


図-1 実験に用いたゲッチング型風洞

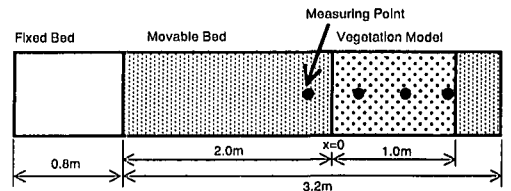


図-2 風洞内の砂面と植生モデルの設置

表-1 実験条件

RUN	$h_0$ (cm)	$\lambda$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$U_0$ (cm/s)	time
BA 1	11.6	0.092	939	13
BB 1	11.6	0.041	956	2
GB 1	8.6	0.041	970	2
DB 1	5.6	0.041	950	2

\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科地圏環境工学専攻  
 \*\* 正会員 工修 東京コンサルタンツ(株)

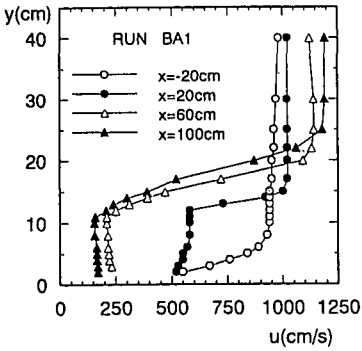


図-3 風速分布の測定結果

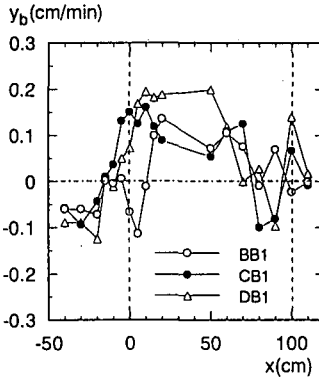


図-4 堆積高さの測定結果

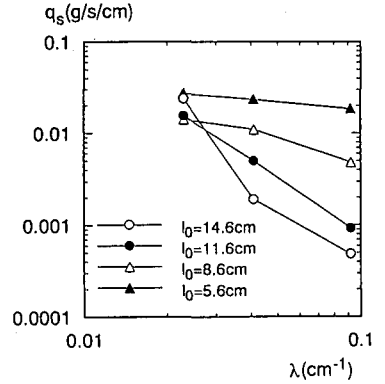


図-5 飛砂量の測定結果

象を再現，植生の飛砂制御能力について検討する。

解析を行うにあたり，飛砂の運動をサルテーション運動する砂粒子に限定して議論を進める。飛砂層内での砂粒子と風の相互作用をモデル化して，個々のサルテーションの解析と飛砂を含む風の解析を繰り返し計算する。個々のサルテーションの砂面との反発は，簡単のため砂粒子の初速度を鉛直方向  $v_{p0}$  のみとし，ある期待値の周りに分布する確率変数として，その期待値は河村のモデル (1951) で用いられている次式で与える。

$$E[v_{p0}] = K_0(u_{*0} + u_{*c}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで， $u_{*0} = \sqrt{\tau_0/\rho}$ ， $u_{*c}$ ：移動限界での摩擦速度， $\rho$ ：空気の密度， $K_0$ ：実験定数である。

飛砂層内での風の解析では粒子の周辺の充分大きな空間で平均された  $k-\epsilon$  乱流モデルを用い，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。飛砂による  $x$  方向， $y$  方向の付加項を， $F_x$ ， $F_y$  としたとき次式で表される。

$$F_x = \nu_B f_B D_x / \rho; F_y = \nu_B f_B D_y / \rho \dots\dots\dots (2)$$

ここで， $\nu_B$ ：単位面積当たりの飛砂数密度 ( $\text{cm}^{-2}$ )， $f_B$ ：粒子の存在確率密度 ( $\text{cm}^{-1}$ )， $D_x$ ， $D_y$ ：粒子 1 個に作用する抗力である。

また，植生領域内ではその繁殖状態を数値化して表す必要がある。そこで植生の繁殖状態を密生度で表現し付加項として乱流モデルに導入する。植生による  $x$  方向， $y$  方向の付加項を， $G_x$ ， $G_y$  としたとき次式で表される。

$$G_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \lambda U \sqrt{U^2 + V^2}; G_y = \frac{1}{2} C_{Dy} \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで， $U$ ， $V$ ： $x$  方向， $y$  方向風速である。

以上より，飛砂と植生の両方の抗力を考慮した付加項を加えた流れの基礎方程式は以下のようになる (連続式は省略)。

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(\nu_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\nu_t + \nu) \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} - (F_x + G_x) \dots\dots\dots (4)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\nu_t + \nu) \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(\nu_t + \nu) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - (F_y + G_y) \dots\dots\dots (5)$$

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \epsilon + C_{fk} \{ (F_x + G_x) U + (F_y + G_y) V \} \dots\dots\dots (6)$$

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\epsilon}{k} [C_{1\epsilon} [P_k + C_{f\epsilon} \{ (F_x + G_x) U + (F_y + G_y) V \}] - C_{2\epsilon}] \dots\dots\dots (7)$$

ここに， $P$ ：圧力偏差， $k$ ：乱れエネルギー， $P_k$ ， $\epsilon$ ：乱れエネルギーの生成率および逸散率， $\nu$ ：動粘性係数， $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ ：渦動粘性係数である。また，モデル定数については  $C_{fk}$ ， $C_{f\epsilon}$  以外については Launder・Spalding (1974) の標準推奨値を用いた。 $C_{fk}$ ， $C_{f\epsilon}$  については植生を伴う流れの計算と水路実験の比較 (清水・辻本・中川，1992) から  $C_{fk} = 1.0$ ， $C_{f\epsilon} = 1.3$  と決めた。

飛砂の平衡状態においては底面掃流力が限界掃流力に等しいという条件のもとで，飛砂の付加項に用いられる

飛砂数密度  $\nu_b$  を求めることができる。しかし、植生と飛砂を伴う流れ場などに代表される飛砂の非平衡状態においては、底面掃流力が限界掃流力を上回る地点では飛砂が発生し、下回る地点では飛砂が停止するため、飛砂数密度を確定することが困難である。そこで、あらたに単位時間・単位面積あたりの飛砂数密度の変化量  $N_e(X)$  を考慮する。固定床に接続する一様な移動床において、飛砂が平衡に至るまでの遷移過程を逐次近似法 (辻本・赤城, 1995) により計算する。図-6 は、このときの無次元化した底面掃流力  $\tau_{*b}$  と限界掃流力  $\tau_{*c}$  の差に対する単位時間・単位面積あたりの飛砂数密度の変化量を示している。これより、飛砂数密度変化量は次式のような関数で記述できる。

$$N_e(x) = K(\tau_{*b} - \tau_{*c}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $K$  は定数であり、図-6 の勾配より 4.26 とした。

シミュレーションの手順は、まず飛砂を含まない流れ場を  $k-\epsilon$  モデルより求め底面掃流力を評価し、式 (8) より飛砂数密度を見積もる。得られた風速下でサルテーションを追跡し、これを統計処理して飛砂の特性値を見積もり付加項を評価する。飛砂と植生を考慮した風の計

算と砂粒子の計算を繰り返し行い、飛砂量の変化が落ち着いた時点を取束状態とみなす。計算取束後に得られた飛砂量から、次式の流砂の連続式をもとに堆積高さ  $y_b$  を計算する。

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\rho_0} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial q_s}{\partial x} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\rho_0$  : 砂の空隙率、 $q_s$  : 飛砂量 (g/s/cm)、 $\sigma$  : 砂の密度 (g/cm<sup>3</sup>) である。飛砂の堆積による地形変化を考慮せず、平坦砂面を仮定して計算をしている。

(2) 実験値との比較と考察

図-7 に風速分布の実験値と計算値を併示する。植生領域流入前において、底面付近で計算値は実験値ほど飛砂による減速が見られないが、植生領域流入後は、計算値も植生層内で減速する様子が再現されている。図-8 の堆積高さにおいても、植生領域内で実験値と計算値の分布形状は類似しており、地形変化の影響が少ない短時間の飛砂現象においては、底面層流力から飛砂数密度を見積もる計算方法に再現性があることが確認された。

次に、植生条件による諸量の違いを計算結果より検討する。図-9、図-10 は植生領域内の平均風速で無次元化

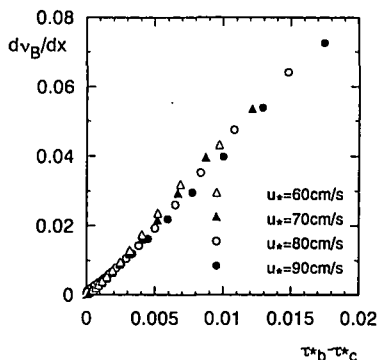


図-6 底面掃流力に対する飛砂数密度変化量

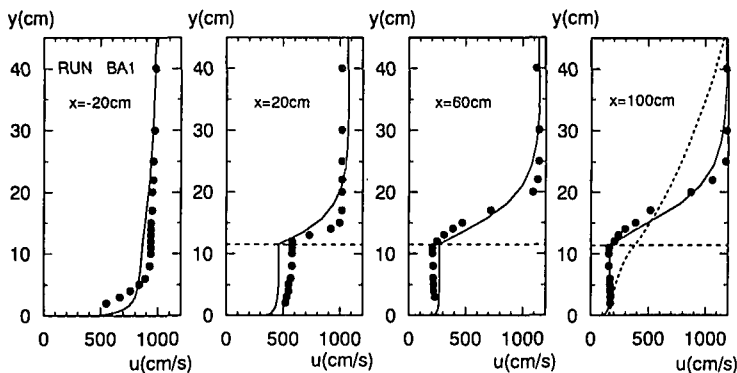


図-7 風速分布の比較

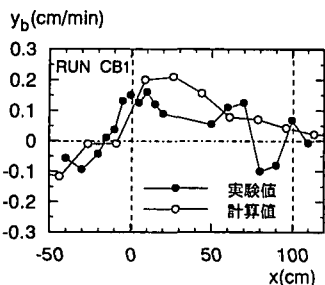


図-8 平坦砂面を仮定した時の堆積高さの比較

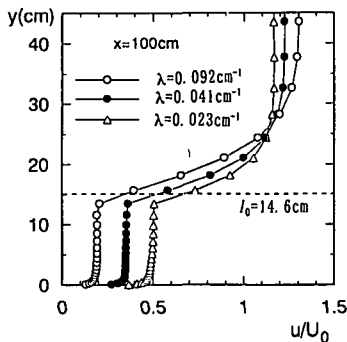


図-9 植生領域内の風速分布の密生度による違い

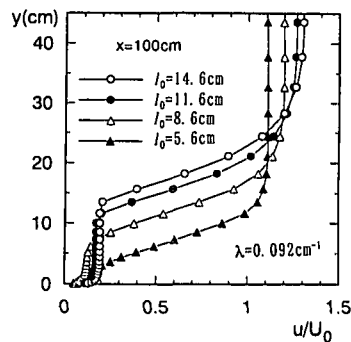


図-10 植生領域内の風速分布の植生高による違い

した風速分布である。密生度が大きく植生高が小さいほど植生層内での減速が大きい。植生層内の減速が小さいと底面近傍で飛砂による減衰が大きくなる。図-11は植生領域内の飛砂量分布である。植生領域流入前の最大飛砂量で基準化し片対数表示してある。植生領域内の飛砂量は指数関数的に減少していくことがわかる。密生度が大きい方が、植生領域内において傾きが大きく、飛砂を堆積させやすいと考えられる。また、わずかではあるが植生高が小さいほど傾きが大きくなることも確認された。

以上より、密生度が大きく植生高が小さいほど飛砂を堆積させやすいため、植生領域が小さくてもすべての飛砂を捕捉できると考えられる。しかし、植生高が小さいと短期間で飛砂の堆積により植生が埋没しその効果を失う。逆に、植生が埋没するまでの時間を長くするために、密生度を小さく植生高を大きくすると、飛砂量の植生領域内での傾きが小さくなるため、すべての飛砂を捕捉す

るためには植生領域を限りなく大きくしなければならぬ。

#### 4. 植生領域内の地形変化

以上のように風洞実験とシミュレーションにより、植生には飛砂を制御する能力があり、植生条件ごとにその特徴が異なることが確認できた。しかし、長期間の飛砂制御を考えると飛砂の堆積による地形変化と植生高の変化を考慮しなければならない。そこで次に、地形が飛砂に与える影響を把握し、植生領域内の地形変化過程について検討する。

流れ場の解析には植生と飛砂の両方の抗力を考慮した付加項を加えた  $k-\epsilon$  モデルを用いる。地形変化に伴い個々のサルテーションの反発位置を変更、飛砂の堆積、侵食による計算格子の固体壁か流れ場かの判定を行う。

シミュレーションの手順は、植生と飛砂を考慮した流れ場の計算から飛砂数密度を評価したあと、個々のサルテーションの計算を行い飛砂量を見積もる。そして、地形変動計算を行い、流れ場の計算格子の判定をしてから、地形を考慮した流れ場の計算を行う。地形変動計算と飛砂を含む風の計算を繰り返し行い、任意時間計算する。

図-12は風洞実験値との比較図である。平坦砂面を仮定した計算値も併示している。平坦砂面においては植生領域前端で飛砂の堆積が見られたが、時間の経過と共に堆積領域が植生領域後部に移動していることがわかる。また、地形変化を考慮した計算のほうが実験値をよく説明しているといえる。

次に、地形変化が飛砂に与える影響について計算により検討していく。平坦砂面での風速分布と30分後の凹凸が生じた地形での風速分布の流下方向変化を図-13に示す。地形に凹凸が生じるため底面粗度が増加し、底面近傍の風速が平坦砂面の場合と比較して減衰する。植生領域内では飛砂の堆積により植生高が変化しているため風速値に違いが見られる。また、風速が底面付近で減衰

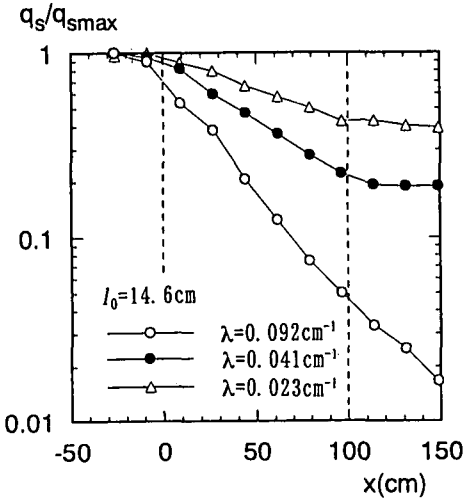


図-11 植生領域内の飛砂量分布

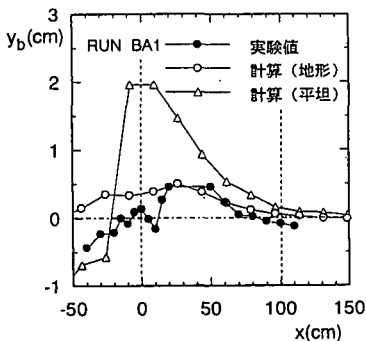


図-12 堆積高さの比較

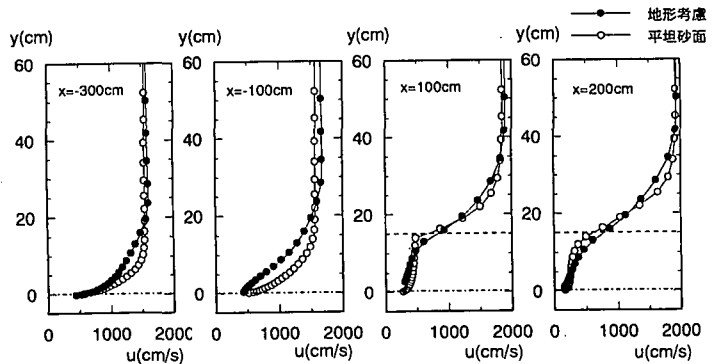


図-13 風速分布の流下方向変化の比較

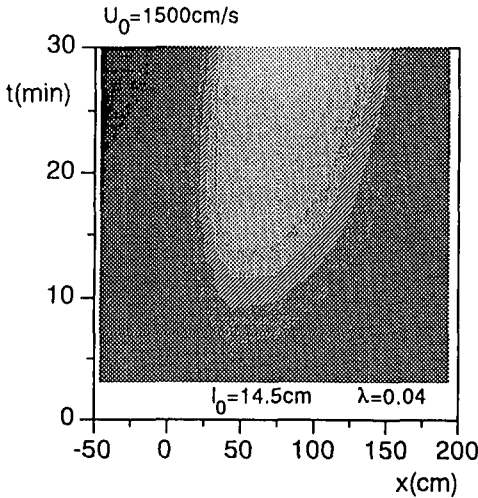


図-14 植生領域内堆積高さの時間変化

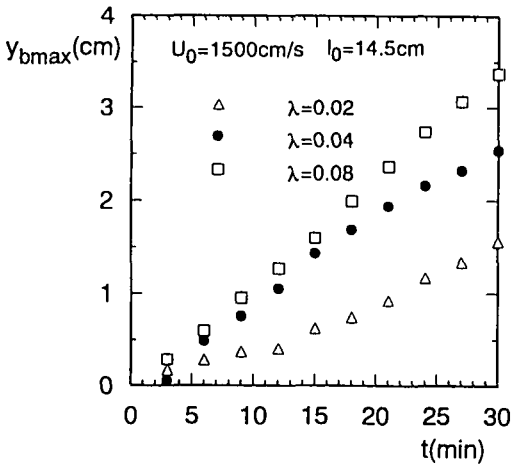


図-15 植生領域内最大堆積高さの時間変化

するため植生領域前の飛砂量が時間の経過と共に徐々に減少していくことが推測できる。また、飛砂堆積により植生高が減少し風に対する抵抗を失うため、図-14に示すように時間の経過と共に植生領域内部に飛砂が侵入していることがわかる。

飛砂量が時間の経過と共に減少することから、図-15に示すように植生領域内の最大堆積高さは指数関数的増加傾向にあり、植生領域内で植生条件ごとに最大限界堆

積高さが存在しそうである。また、密生度が大きく植生高が小さいほど飛砂を堆積させやすいため、植生領域内では最大限界堆積高さまで飛砂が堆積し、鉛直方向への飛砂堆積が平衡になりやすいと考えられる。植生領域内で飛砂堆積が平衡になった後は流下方向に侵入し飛砂堆積領域を拡大していくことが推測できる。飛砂の堆積侵入速度を検討して飛砂制御を進める必要がある。

## 5. あとがき

植生周辺などの飛砂の非平衡状態においては、飛砂の発生と停止が考えられるため、単位面積・単位時間当たりの飛砂の移動量を考慮した解析方法を提案した。植生モデルを用いた風洞実験との比較より、実現象をよく再現することが確認された。

この解析方法と風洞実験により植生の飛砂制御能力と植生領域内の地形変化過程について検討した。植生条件ごとに飛砂制御能力は異なるが、植生が飛砂制御に有効であることが確認できた。地形変化を考慮した計算からは植生領域内の飛砂堆積の拡大過程を推測した。飛砂制御に海浜植生を用いる際には、飛砂制御期間、海浜幅等の環境条件や海浜景観を考慮して植生領域を決定する必要がある。また、飛砂の堆積が植生の生長に与える影響を捉え、海浜の生態系を破壊しないような植生条件を考慮したうえで、海浜植生を用いた飛砂制御を検討することが今後期待される。

## 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.
- 清水義彦・辻本哲郎・中川博次 (1992): 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, No. 477/11-19, pp. 35-44.
- 辻本哲郎・赤城里至 (1993): サルテーションモデルによる飛砂の解析と飛砂量式, 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・赤城里至 (1995): 非平衡状態の飛砂量分布と風速分布, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 466-470.
- Lauder, B. E. and D. B. Spalding (1974): The numerical computation of turbulent flow, Computer Method in Applied Mech. & Eng., Vol. 3, p. 269.