

# 後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の数値計算

栗山善昭\*・上堂蘭孝一\*\*

## 1. はじめに

後浜から砂丘にかけての領域は、背後地を波から守るための緩衝地帯としての役割を果たしており、防災上、重要な空間であるとともに、生態系の上でも砂浜と背後の陸地とをつなぐ貴重な空間である。栗山・望月 (1997) や加藤・佐藤 (1998) は、現地海岸において地形測量と植生調査を行い、コウボウムギやハマニンニクなどの砂草が飛砂の捕捉や飛砂発生を抑止に効果があることを見出した。今後は、後浜から砂丘にかけての領域が海岸整備でも積極的に考慮されるようになり、砂草や防風林などの植生の影響を含んだ地形変化予測が行われるようになると考えられる。

飛砂による地形変化予測手法としては、今までに、飛砂量計算の基になる風速場を解析的に求める方法 (例えば Stam, 1997) や風速場を数値モデルによって求める方法 (宮田ら, 1993) が提案されている。Stam (1997) は、砂丘周辺の鉛直二次元の風速場を解析的に求め、急勾配斜面のすべりをも考慮した砂丘の変形計算を行った。一方、宮田ら (1993) は、植生内外の風速場を予測する神田・日野 (1990) の数値モデルの再現性を鉛直二次元の実験室データで検証した後、このモデルより求めた風速場から飛砂量を計算し、防風林内外の飛砂の堆積特性を検討した。このように飛砂量の予測モデルは今までにいくつか提案されてきているものの、これらのモデルが砂草の生える後浜から砂丘にかけての領域の飛砂量計算にどの程度有効であるかは調べられていない。

そこで、本研究では、まず、砂草を考慮した飛砂量計算数値モデルを作成し、続いて、このモデルの現地再現性を植生がある場合と無い場合の飛砂量の現地実測値を基に検討した。

## 2. 現地調査

本論文では数値モデルの検証を鹿島灘に面する波崎海洋研究施設 (略称 HORS, 図-1 参照) より 100 m ほど北の海岸で得られたデータを基に行う。栗山・望月

(1997) に述べられているように、この海岸では、図-2 に示す調査領域の 3 測線において、1 月に約 1 回の割合で植生調査と地形測定が行われている。図-3 は中央の測線 II の断面図を示したもので、沖方向距離 -65 m 地点付近から砂丘根元までの領域では、春から秋にかけてコウボウムギ (高さ約 10 cm) やハマヒルガオ (約 3 cm), ハマニンニク (約 20 cm) が繁茂する。地形調査では、岸沖方向 5 m ごとに地盤高さを測定し、植生調査では岸沖方向 10 m 毎に 1 m 四方内の植物の種類, 高さ, 分布面積

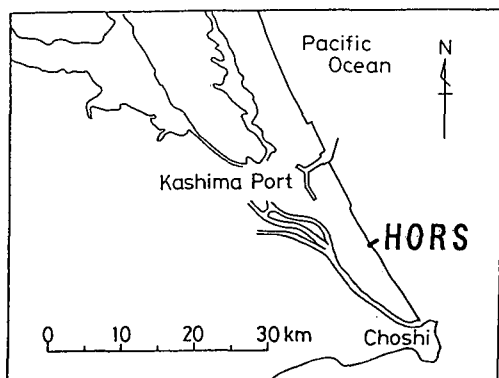


図-1 波崎海洋研究施設の位置

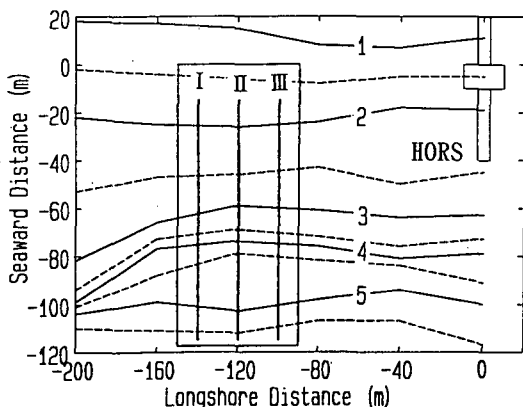


図-2 調査領域の地形 (1996年11月, L. W. L. 基準)

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部 漂砂研究室長  
\*\* (株)エコー 環境水理部

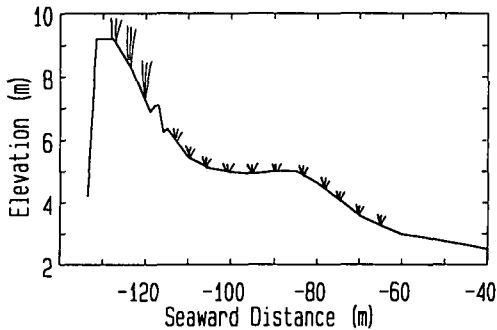


図-3 測線IIの断面図 (1996年11月, L.W.L.基準)

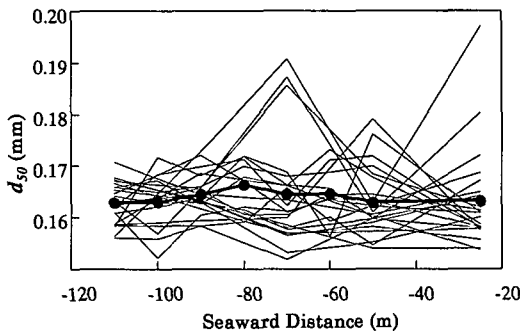


図-4 底質の中央粒径の岸沖分布

を観察している。また、汀線より約400mほど沖のHORS先端ではD.L.(工事基準面, L.W.L.と同じ高さ)上約10mの地点で風向・風速を1時間間隔で10分間測定し、汀線近傍のHORS観測室上では1時間間隔で雨量を測定している。

今回は、これらの調査に加えて、後浜における風速観測と底質粒径調査、砂草の葉面積密度調査を行った。風速観測では、測線IIとIIIとの間(沿岸方向距離-140m)において、沖方向距離-65m, -90m, -105mの3地点、鉛直方向には砂面上50cm~2mの範囲の2, 3カ所で岸沖方向の風速を測定した。これに加え、HORS上では沖方向距離30mのD.L.上約8mの地点で岸沖方向風速を観測した。

底質粒径調査では、測線IIの地形測量地点における砂面表層の砂を地形測量時にそれぞれ30gほど採取し、自動砂ふるい器を用いて中央粒径等を調べた。図-4は1997年3月以降の底質の中央粒径  $d_{50}$  の岸沖分布を重ね合わせたものであり、図中の太い実線は各地点毎の平均の砂の中央粒径を示している。季節によって変動はあるものの、調査領域における時間平均の砂の中央粒径は岸沖方向にほぼ一様で、0.16mmである。

葉面積密度調査では、砂草がまだ繁茂している秋(1997年10月23日)に、調査領域内において平均的な密度で繁

茂していると思われるコウボウムギ、ハマヒルガオ、ハマニンニクをそれぞれ約20cm四方の範囲で切り取り、その葉の面積を調べた。その結果、砂草の種類による葉面積密度の差は小さく、いずれも  $20 \text{ m}^2/\text{m}^3$  程度であった。

### 3. 飛砂量計算数値モデル

本モデルは、風速場を計算するモデルと風速場から求まる摩擦速度を基に飛砂量を計算するモデルより構成されている。砂草の影響は風速モデルではなく、飛砂量モデルで考慮する。

#### 3.1 風速モデル

沿岸方向に一樣な場の風速場を、岸沖方向風速と沿岸方向風速とを別々に計算することにより求める。

岸沖方向風速場は、以下の2次元のナビエ・ストークス方程式と連続式を基に求める。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $y$ は沖向き正の岸沖方向座標、 $z$ は上向き正の鉛直方向座標、 $v$ は沖方向風速、 $w$ は鉛直方向風速、 $p$ は圧力、 $\rho_a$ は空気密度、 $g$ は重力加速度である。運動量拡散係数  $K_y$ 、 $K_z$ は、宮田ら(1993)を参考に以下の式で定義した。

$$K_y = K_z = \lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|, \quad \lambda = \kappa(z - z_0) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\lambda$ は混合距離で、 $\kappa$ はカルマン係数、 $z_0$ は地盤高さである。

上記方程式(1)~(3)をMAC法を用いて解いた。計算格子としてはスタッガード格子を用いるとともに、現地地形に対しても境界条件を容易に与えることのできる境界適合格子を用いるために、基礎方程式を一般座標系に変換した(中橋, 1992)。

近似法として基本的には時間微分に対しては1次の風下差分、空間微分に対しては2次の中央差分を用いた。ただし、ナビエ・ストークス方程式の移流項の計算では、1次の風上差分を用いた。これは、一般的には3次の風上差分を用いた方が計算は安定するとされているけれども、今回のように境界付近で格子間隔がかなり歪んでいる格子形に対して高次の差分式を用いると実際の現象と

違ってくる可能性があると考えたためである。

境界条件としては、風上端で風速の対数鉛直分布を仮定し、圧力の一階微分が0となるようにするとともに、風下端で風速と圧力の一階微分が0となるようにした。また、上端では風速に対しては滑りあり、圧力に対しては1階微分が0の条件を与えるとともに、地表面で風速に対しては滑りなし、圧力に対してはノイマン条件を与えた。計算の安定化をはかるため、風上端では風速を所定の値に徐々に近づけるようにした。入力条件である風上端以外では風速と圧力の初期値を0とし、解がほぼ定常に達するまで計算を行った。

沿岸方向風速は、計算領域全域にわたってD.L.上12mにおける沿岸風速が入力条件である海側境界のD.L.上12mの沿岸風速に等しく、かつ、それより下方では対数分布が成立すると仮定して求めた。

3.2 飛砂量モデル

前述の風速モデルによって求めた岸沖方向風速より岸沖方向の摩擦速度  $u_*$  を求める。摩擦速度の算定にあたっては、宮田ら (1993) にならない底面上50cmの風速値  $v_{50}$  を用いることとし、それより下方では対数分布が成立すると仮定して以下の式で摩擦速度を求めた。

$$u_* = \frac{v_{50}}{|v_{50}|} \frac{|v_{50}| - v'}{5.75 \log_{10}(500/z')}, \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$v' = 8.94 d \text{ (m/s)}, \quad z' = 10 d \text{ (mm)}$$

ここで、 $d$  は砂の粒径で式 (5) では mm で与える。

沿岸方向の摩擦速度  $u_*$  (沖を見て右向きを正とする) の算定においては、前述したように計算領域全域でD.L.上12mの地点の沿岸方向風速が等しく、それより下方では対数分布が成立すると仮定しているため、D.L.上12mの風速値から直接  $u_*$  を求めた。

飛砂量の計算では、平衡状態と非平衡状態の二つ状態の飛砂量を求める。風の進行方向の平衡状態の飛砂量  $q_e$  は、以下の河村公式 (堀田, 1985) を用いて計算する。

$$q_e = K(\rho_a/g)(U_* + U_{*c})^2(U_* - U_{*c}), \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$U_{*c} = \sqrt{u_*^2 + v_*^2}$$

ここで、 $K$  は無次元係数で、栗山・望月 (1997) と同様に0.8とした。 $U_{*c}$  は流動開始摩擦速度であり、無次元係数  $A$  を0.1とおいた次式より求める (堀田, 1985)。

$$U_{*c} = A\sqrt{gd(\rho_s - \rho_a)/\rho_a} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$\rho_s$  は砂粒子の密度である。

風の進行方向の非平衡状態の飛砂量  $q_{ne}$  は、辻本ら (1989) にならない以下の式で求める。

$$\frac{dq_{ne}}{dl} = E(l) - D(l) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $l$  は飛砂の移動方向の距離であり、 $E(l)$ 、 $D(l)$  は

それぞれ砂の舞い上がり量と沈降量である。

沈降量  $D(l)$  は砂粒子の跳躍距離  $\Lambda$  より以下の式で表される (辻本ら, 1989)。

$$D(l) = q_{ne}/\Lambda \quad \dots\dots\dots (9)$$

跳躍距離  $\Lambda$  は堀田 (1985) より無次元係数  $K_3$  を用いて以下の式で求める。

$$\Lambda = K_3(U_* + U_{*c})^2/g \quad \dots\dots\dots (10)$$

一方、砂の舞い上がり量  $E(l)$  は  $l=0$  において  $dq_{ne}/dl=0$ 、 $q_{ne}=q_e$  となることを考慮して以下の式で求める。

$$E(l) = (K/K_3)\rho_a(U_* - U_{*c}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

無次元係数  $K_3$  については、辻村・赤城 (1993) によって示された底面せん断力と跳躍距離との関係を基に  $K_3$  を求めたところ0.4~0.6となったので、本計算では  $K_3=0.5$  とした。

飛砂量に与える砂草の影響は以下の方法で考慮する。前述した現地調査結果によると後浜に繁茂する砂草の葉面積密度は約  $20 \text{ m}^2/\text{m}^3$  である。いまここで、底面上5mで15m/sの風が吹いているときの、砂草がない場合と葉面積密度  $20 \text{ m}^2/\text{m}^3$  で高さ10cmの砂草が生えている場合の風速の鉛直分布を神田・日野 (1990) を参考に次式で計算する。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - C_m S |v| v = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $C_m$  は運動量交換係数、 $S$  は葉面積密度である。運動量交換係数  $C_m$  は宮田ら (1993) と同様に0.5とし、植生のある領域での混合距離  $\lambda$  は次式で与えた (神田・日野, 1990)。

$$\lambda = \frac{2\kappa^2}{C_m S} \quad \dots\dots\dots (13)$$

図-5は植生のない場合と  $S=20 \text{ m}^2/\text{m}^3$  の場合の計算結果を示したものである。この計算結果から、底面上5

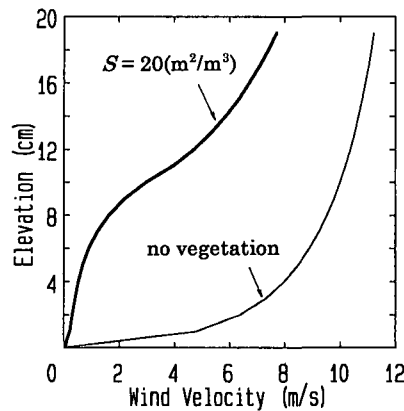


図-5 岸沖風速の鉛直分布

cmの風速値を用い、それより下方では対数分布が成り立つと仮定して求めた  $S=20 \text{ m}^3/\text{m}^3$  の場合の摩擦速度は  $0.02 \text{ m/s}$  であり、粒径  $0.16 \text{ mm}$  の砂の流動開始摩擦速度  $0.18 \text{ m/s}$  よりもはるかに小さい。このことは、かなりの強風が吹いても砂草の生えているところでは飛砂はほとんど生じないことを示している。ただし、植生はパッチ状に存在するので、植生のないところでは飛砂が発生する。そこで、砂草が繁茂している時の砂の舞上がり量ならびに跳躍距離は、砂草のない時の値に裸地の割合(植生で被われていない面積の割合)  $R_{\text{bold}}$  を乗じたものに等しいと考え、以下の式を用いて算定する。

$$A = R_{\text{bold}} K_3 (U_* + U_{*c})^2 / g \dots\dots\dots (14)$$

$$E(l) = R_{\text{bold}} (K/K_3) \rho_a (U_* - U_{*c}) \dots\dots\dots (15)$$

砂草がある場合の平衡状態の飛砂量は、 $l=\infty$  において  $dq_{ne}/dl=0$ ,  $q_{ne}=q_e$  となることを考慮して以下の式で求める。

$$q_e = R_{\text{bold}}^2 K (\rho_a / g) (U_* + U_{*c})^2 (U_* - U_{*c}) \dots\dots (16)$$

4. 現地調査結果と計算結果との比較

4.1 岸沖方向風速の計算値と実測値との比較

岸沖方向風速計算モデルを検証するために、前述の風速観測結果と計算結果との比較を行う。計算対象領域は沖方向距離  $-25 \text{ m} \sim -140 \text{ m}$ 、鉛直方向には砂面から D.L.上  $14 \text{ m}$  までの範囲で、砂丘頂部より陸側は水平な砂面とした。入力条件としては、海風の場合には、海側境界の D.L.上  $8 \text{ m}$  の地点の風速が、HORS 上の沖方向距離  $30 \text{ m}$  の D.L.上  $8 \text{ m}$  の地点で得られた風速と等しいとおい。一方、陸風の場合には、海側境界の D.L.上  $8 \text{ m}$  の地点の風速が HORS 上の沖方向距離  $30 \text{ m}$  の地点で得られた風速と等しくなるように陸側境界の風速を調整して決定した。

図-6 は植生がない状態で海風が吹いた場合 (1997年1月8日) の計算値と実測値との比較結果を示しており、図-7 は、植生のない状態で陸風が吹いた場合 (1997年1月21日) の比較結果を示している。陸風の場合に、砂丘よりすぐ海側でモデルは風速を過大評価しているもの、それ以外では本モデルは現地における岸沖方向風速場を良く再現していると言える。

4.2 岸沖方向飛砂量の計算値と実測値との比較

植生がない期間 (1995年11月27日~1996年1月30日) と植生がある期間 (1995年8月16日~1995年9月25日) の岸沖方向飛砂量の実測値 (栗山・望月, 1997) と本モデルによる計算値とを比較する。漂砂量の実測値は、砂丘根元の沖方向距離  $-117.5 \text{ m}$  における飛砂量を  $0$  と仮定して地形変化から求めたものである。

飛砂量の計算にあたっては、HORS 先端で測定されている1時間毎の風速・風向データを入力データとして利

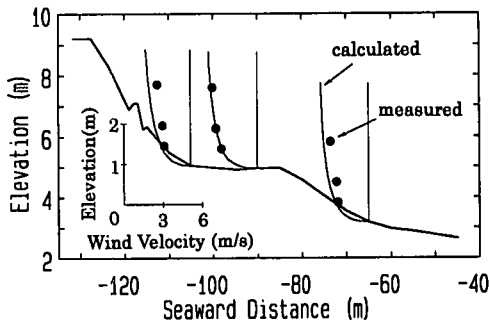


図-6 岸沖風速の計算値と実測値との比較 (海風の場合)

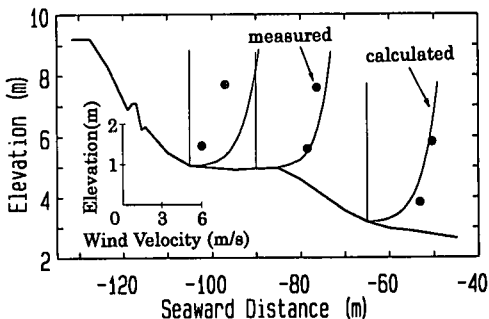


図-7 岸沖風速の計算値と実測値との比較 (陸風の場合)

用する。まず、岸沖方向、沿岸方向の風速をそれぞれ以下の9階級に分ける： $14 \text{ m/s}$  以上、 $14 \sim 10 \text{ m/s}$ 、 $10 \sim 6 \text{ m/s}$ 、 $6 \sim 2 \text{ m/s}$ 、 $2 \sim -2 \text{ m/s}$ 、 $-2 \sim -6 \text{ m/s}$ 、 $-6 \sim -10 \text{ m/s}$ 、 $-10 \sim -14 \text{ m/s}$ 、 $-14 \text{ m/s}$  以下。次に、岸沖方向風速と沿岸方向風速とを組み合わせた81通りの組み合わせそれぞれにおいて、各階級の中央値 ( $14 \text{ m/s}$  以上と  $-14 \text{ m/s}$  以下の階級はそれぞれ  $16 \text{ m/s}$ 、 $-16 \text{ m/s}$ ) を用いて岸沖飛砂量を求める。岸沖方向飛砂量の計算値は、式 (8)、(16) で求める風の進行方向の飛砂量の岸沖方向成分を取ったものである。風速の入力方法は、基本的には4.1で述べた方法と同様であるが、対象を D.L.上  $8 \text{ m}$  の地点ではなく D.L.上  $12 \text{ m}$  の地点としている。最後に、それぞれの計算値を、計算対象期間中のそれぞれの組み合わせの発生頻度で重み付けし、平均の岸沖方向飛砂量を求める。

降雨の取り扱いに関しては、栗山・望月 (1997) と同様に、 $10 \text{ mm/hr}$  以上の降雨があった場合にはその時点から24時間後までの飛砂量を  $0$  とした。裸地の割合  $R_{\text{bold}}$  は、栗山・望月 (1997) の植生調査結果を基に  $0.6$  とした。

図-8, 9 はそれぞれ植生がない期間と植生がある期間の岸沖方向飛砂量の計算値と実測値とを比較したものである (沖方向を正としているので岸向きの飛砂量はマイナスとなる)。両ケースともに非平衡状態の計算値は平衡

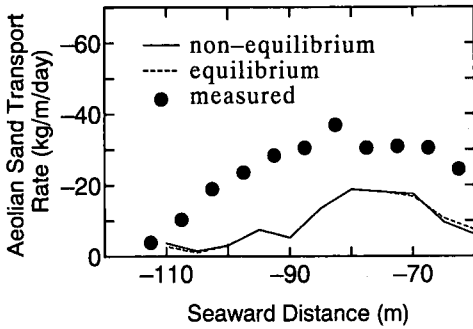


図-8 岸沖方向飛砂量の計算値と実測値との比較 (植生無し)

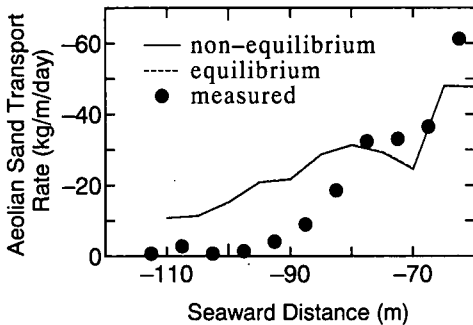


図-9 岸沖方向飛砂量の計算値と実測値との比較 (植生有り)

状態の計算値とはほぼ同じ値となっている。堀川ら(1983)の現地観測結果によると、乾いた砂面上では5mほどで飛砂量が平衡状態に達しており、今回の計算結果は植生がない場合もある場合もこの現地観測結果と同様の結果となった。

計算値と実測値とを比較してみると、植生がない期間では、計算値は実測値に比べて小さめとなっているものの、計算値は植生がないときの現地飛砂量の特徴である沖方向距離-60mから-80mにかけての斜面上で飛砂量がやや増大しその後平坦部において飛砂量が減少するという特徴を表している。一方、植生がある期間では逆に計算値の方が実測値よりもやや大きめとなっているけれども、植生の存在によって砂丘に近づくにつれて飛砂量が徐々に減少する現地の傾向を計算値は表わしている。

このように、計算値は現地の飛砂量の岸沖分布を定性的に良く再現しているけれども、定量的には誤差が10

kg/m/dayほどある。10分間平均の風速値を用いて現地の飛砂量を解析すると風速の不規則変動によって式(6)の係数 $K$ の変動することがHorikawaら(1984)によって報告されている。今後、飛砂量の予測精度を向上させるためには、このような風速の不規則変動性を考慮するとともに、降雨後の砂表面の含水比の変化も取り込む必要があると思われる。

## 5. おわりに

本研究では、後浜から砂丘前面にかけての領域に適用可能な飛砂量予測手法の確立を目指して、砂草を考慮した飛砂量計算数値モデルを作成し、そのモデルの有効性を後浜から砂丘にかけての地形変化から求める飛砂量の実測値を基に検討した。その結果、本モデルは植生のある場合とない場合の飛砂量の岸沖分布を定性的に良く表すことが明らかとなった。今後、飛砂量予測モデルの精度を高めるためには、風速変動の不規則性や砂表面の含水比の変化を取り込む必要があると考えられる。

最後に、本研究を手伝ってくださった当所の柳嶋慎一氏、中宮利之氏、内山雄介氏、中島剛氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 加藤史訓・佐藤慎司(1998): 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 666-670.
- 神田 学・日野幹雄(1990): 大気-植生-土壌系モデル(NEO SPAM)によるシミュレーション(2)植生の気候緩和効果の数値実験, 水文・水資源学会誌, 第3巻, 3号, pp. 47-55.
- 栗山善昭・望月徳雄(1997): 後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 681-685.
- 辻本哲郎・森 明巨・岡部健士・大本照憲(1989): 流砂の非平衡の論理とその応用, 第33回水理講演会論文集, pp. 445-461.
- 辻本哲郎・赤城里史(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.
- 中橋和博(1992): 格子形成法, 保原 充, 大宮司久明編 数値流体力学 基礎と応用, 東京大学出版会, pp. 167-195.
- 堀田新太郎(1985): 飛砂, 本間仁監修/堀川清司編 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 191-209.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和(1983): トレンチトラップによる飛砂量の現地観測, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 303-307.
- 宮田正史・池田駿介・武若聡(1993): 防風林の機能に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 556-560.
- Stam, J. M. T. (1997): On the modelling of two-dimensional aeolian dunes, *Sedimentology*, 44, pp. 127-141.
- Horikawa, K., Hotta, S., Kubota, S., and Katori, S. (1984): Field measurement of blown sand transport rate by trench trap, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 27, pp. 125-144.