

国土交通省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT

VOL.40

NO.1

Mar.2001

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第 40 卷 第 1 号 (Vol. 40, No. 1), 2001年3月 (Mar. 2001)

目 次 (CONTENTS)

1. ブシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発
.....平山克也・平石哲也 3
(Development of partial reflection boundary with porous layer for Boussinesq type wave model
..... Katsuya HIRAYAMA and Tetsuya HIRAIISHI)
2. 砂漣内の浸透流について
..... 鈴木高二朗 31
(Seepage Flow in Ripples
..... Kojiro Suzuki)
3. 後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に関する現地観測と
植生を考慮した飛砂量の数値計算
..... 栗山善昭・中島 剛・上堂藺孝一・望月徳雄 47
(Field Measurements of the Effect of Vegetation on Beach Profile Change in the Region
from a Backshore to the Foot of the Foredune and Modeling of Aeolian Sand Transport
with Consideration of Vegetation
..... Yoshiaki KURIYAMA, Tsuyoshi NAKASHIMA, Koichi KAMIDOZONO
and Norio MOCHIZUKI)
4. 分割法円弧すべり解析における新しい計算法
.....土田 孝・引屋敷英人・水野健太・福原哲夫 81
(New Slip Circle Method for Analysis of Slope Stability and Bearing Capacity
..... Takashi Tsuchida, Hideto Hikiyashiki, Kenta Mizuno and Tetsuo Fukuhara)
5. 震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用
..... 野津 厚・井合 進・Wilfred D. IWAN107
(A Study on Predominant Direction of Near-source Ground Motion and It's Application
..... Atsushi NOZU, Susumu IAI and Wilfred D. IWAN)

後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に 関する現地観測と植生を考慮した飛砂量の数値計算

栗山善昭*・中島 剛**・上堂菌孝一***・望月徳雄****

要 旨

後浜から砂丘前面にかけての領域の地形変化と植生との関係を現地観測結果を基に検討した。その結果、高さ10cm程度の植生が後浜から砂丘前面にかけての地形変化に影響を与えることが明らかとなった。すなわち、植物が繁茂しているときには、植生の海側限界点から砂丘根元にかけての領域の海側で飛砂による堆積が起こっていたのに対して、植物が枯れているときには、砂丘側で堆積が起こっていた。これは、植生による飛砂の捕捉ならびに飛砂発生抑制の有無が原因であると推察された。続いて、植生を考慮した飛砂量計算シミュレーションモデルを作成した。モデルの有効性を飛砂量の実測値を基に検討した結果、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表すことが明らかとなった。

キーワード：飛砂，地形変化，植生，後浜，砂丘，現地観測，シミュレーションモデル

* 海洋環境部 漂砂研究室長

** 海洋環境部 漂砂研究室

*** (株)エコー 環境水理部

**** 元 漂砂研究室(現 望月農園)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5012 Fax：0468-41-9812 E-mail：kuriyama@cc.phri.go.jp

Field Measurements of the Effect of Vegetation on Beach Profile Change in the Region from a Backshore to the Foot of the Foredune and Modeling of Aeolian Sand Transport with Consideration of Vegetation

Yoshiaki KURIYAMA*
Tsuyoshi NAKASHIMA**
Koichi KAMIDOZONO***
Norio MOCHIZUKI****

Synopsis

Field measurements on beach profile and vegetation were conducted in the region from a backshore to the foot of the foredune. The measurements showed that beach grasses influenced the beach profile changes. When the grasses grew, the sediment blown by wind was accumulated in the seaward side of the region. When the grasses were absent, on the other hand, the blown sediment was accumulated in the landward side, near the foot of the foredune.

A simulation model for aeolian sand transport in the region was developed and compared with the measurements in the field. The comparisons showed that the model qualitatively reproduced cross-shore distributions of the aeolian sand transport rate with and without vegetation.

Key Words: aeolian sand transport, beach profile change, vegetation, backshore, foredune
field measurement, simulation model

* Chief of Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division

** Member of Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division

*** Echo Ltd.

**** Former member of Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division
Nagase 3-1-1, Yokosuka, Kanagawa 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5012 Fax : +81-468-41-9812 E-mail : kuriyama@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	47
1.はじめに	61
2.現地観測	61
2.1 観測方法	61
2.2 地形変化特性	62
2.3 植生特性	63
2.4 粒径特性	64
2.5 飛砂量の岸沖分布と植生との関係	66
3.飛砂量の数値計算	67
3.1 風速計算	67
3.2 飛砂量計算	71
4.おわりに	75
謝辞	76
参考文献	76
付録	77



写真-1 調査領域の全景 (1997年5月29日撮影)



写真-2 コウボウムギ (1997年5月29日撮影)



写真-3 ハマニンニク (1997年5月29日撮影)

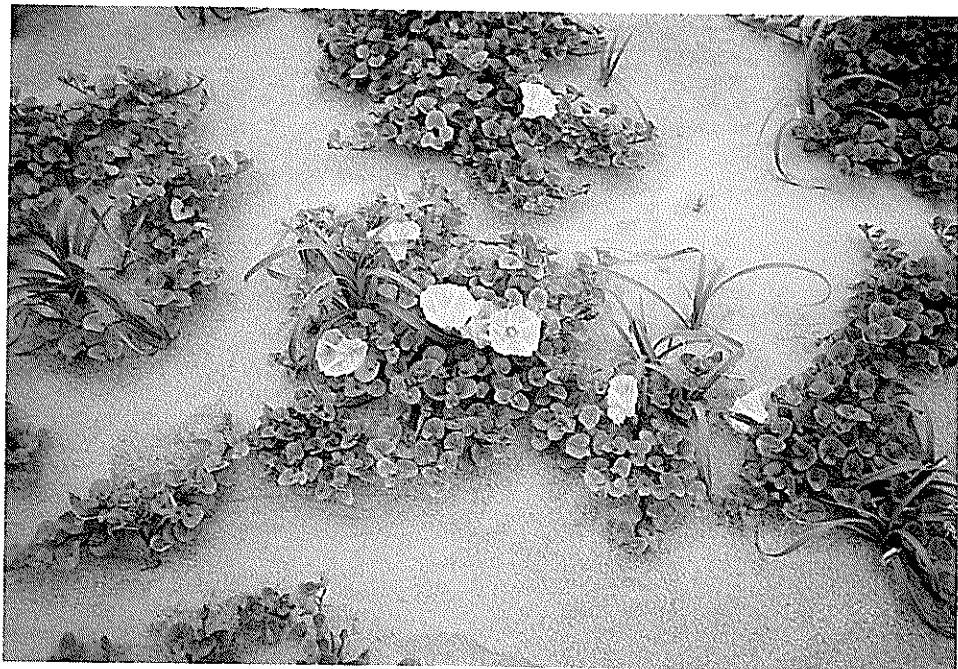
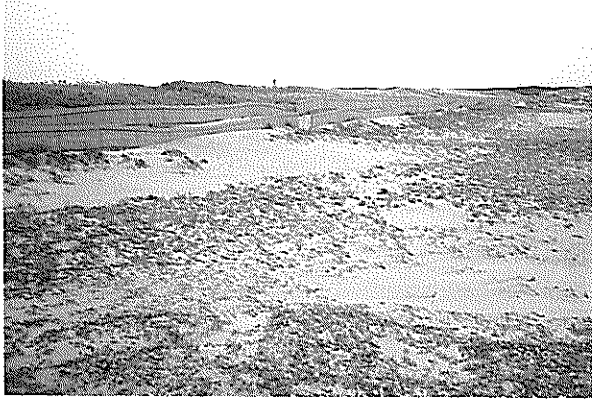


写真-4 ハマヒルガオ (1997年5月29日撮影)



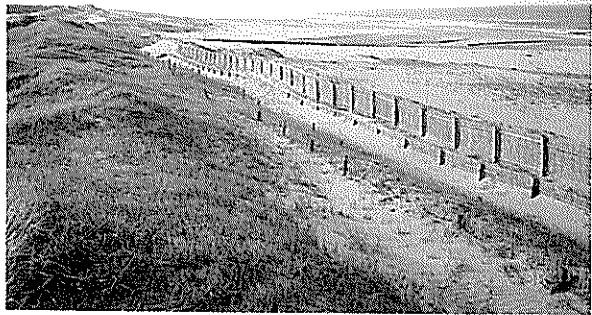
(1) 堆砂垣の様子 (1997年5月29日撮影)



(4) 堆砂垣の様子 (1998年4月22日)



(2) 堆砂垣の様子 (1997年9月4日撮影)



(5) 堆砂垣および砂丘の様子 (1998年4月22日撮影)



(3) 堆砂垣の様子 (1998年4月22日撮影)

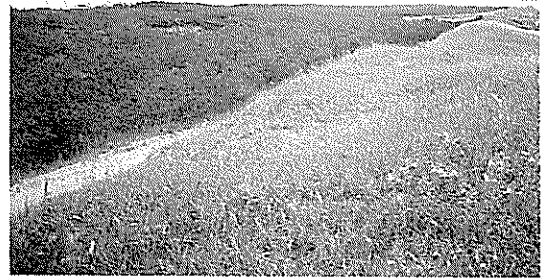


(6) 砂丘および砂丘背後の様子 (1997年6月30日撮影)

写真-5(1)~(6) 砂丘根元の堆砂垣と砂丘の様子



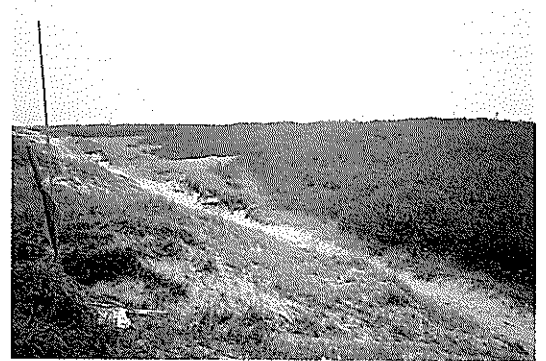
(7) チガヤ (1996年6月24日撮影)



(9) 砂丘背後の様子 (1996年6月24日撮影)

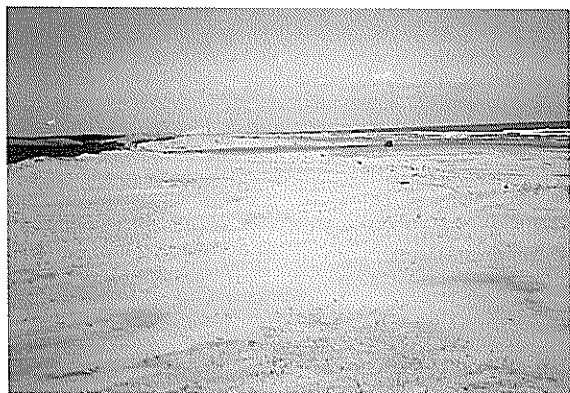


(8) チガヤ (1996年6月24日撮影)



(10) 砂丘背後の様子 (1996年6月24日撮影)

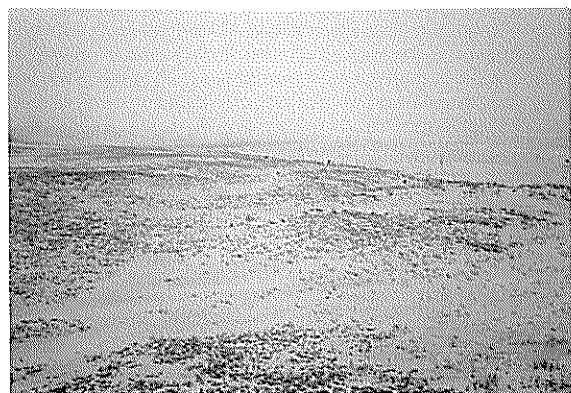
写真-5(7)~(10) 砂丘根元の堆砂垣と砂丘の様子



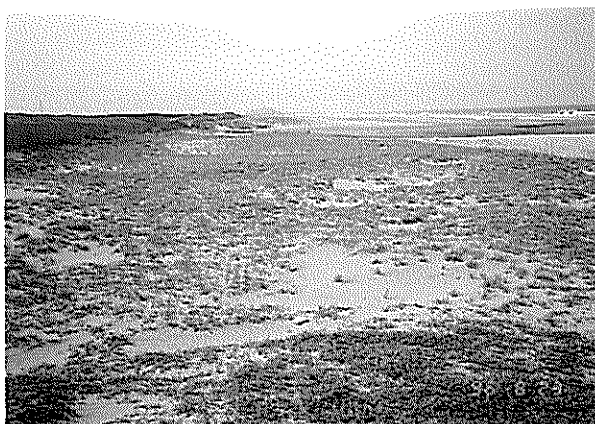
(1) 1996年4月3日



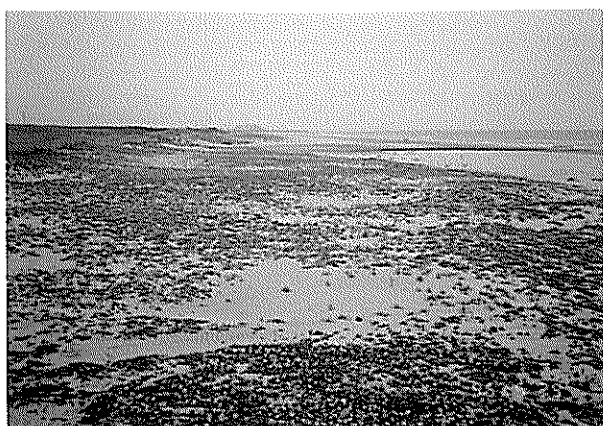
(4) 1996年6月24日



(2) 1996年4月26日



(5) 1996年8月23日

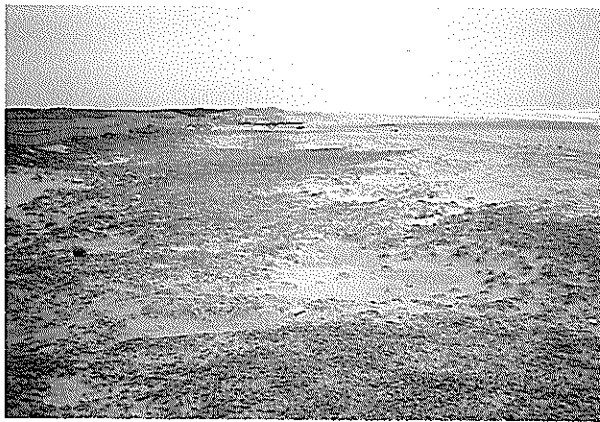


(3) 1996年5月29日



(6) 1996年9月25日

写真-6(1)~(6) 調査領域における植生の繁茂の様子(春から秋)



(7) 1996年11月5日



(10) 1997年2月17日



(8) 1996年12月10日



(11) 1997年3月25日

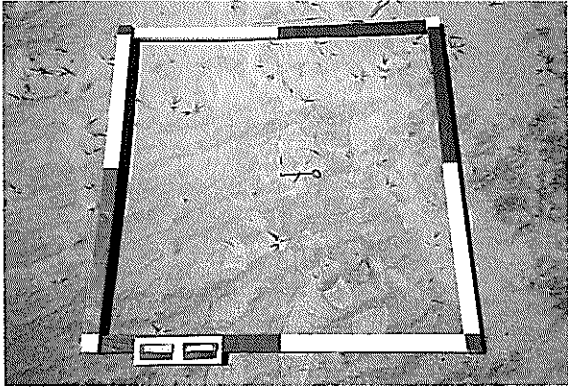


(9) 1997年1月14日

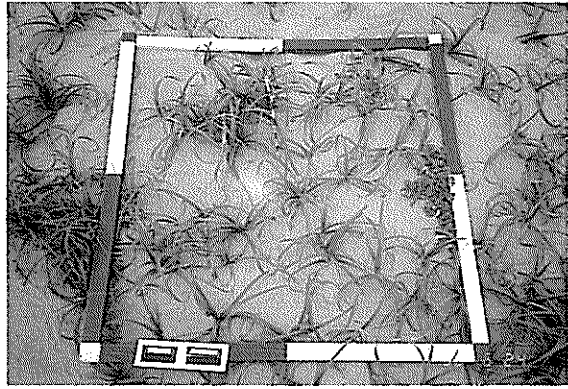


(12) 1997年4月28日

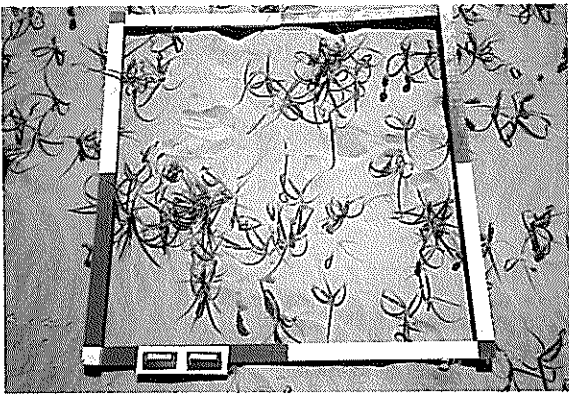
写真-6(7)~(12) 調査領域における植生の繁茂の様子(秋から春)



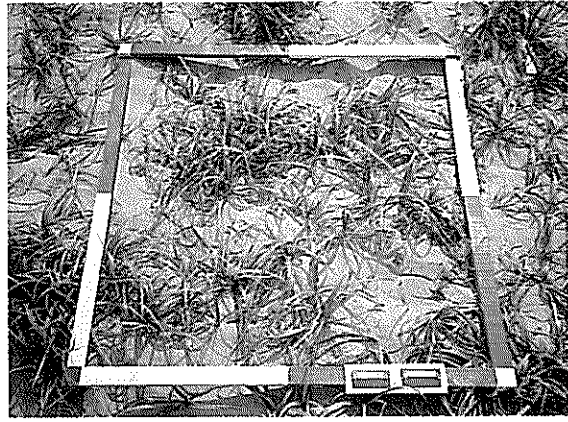
(1) 1996年4月3日



(4) 1996年6月24日



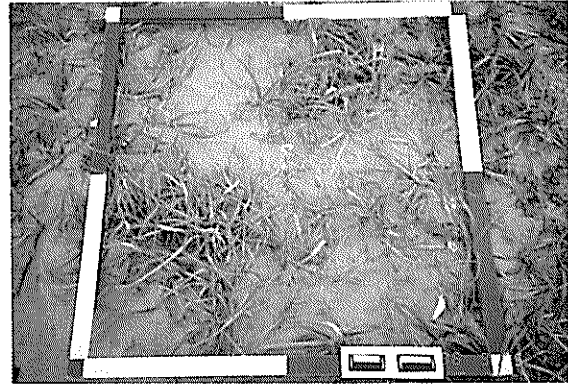
(2) 1996年4月26日



(5) 1996年8月23日

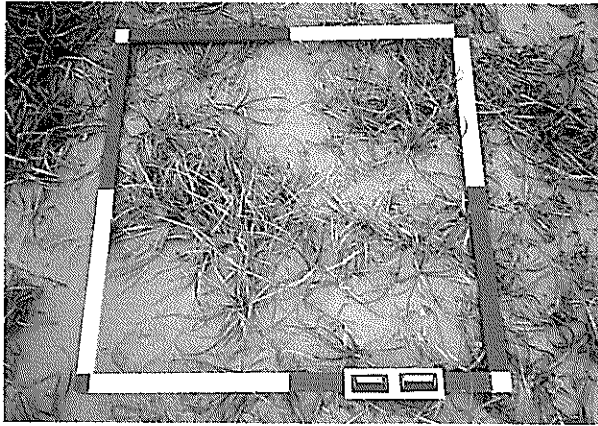


(3) 1996年5月29日

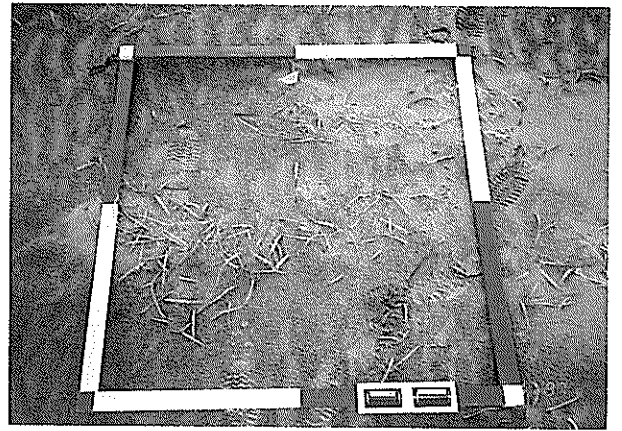


(6) 1996年9月25日

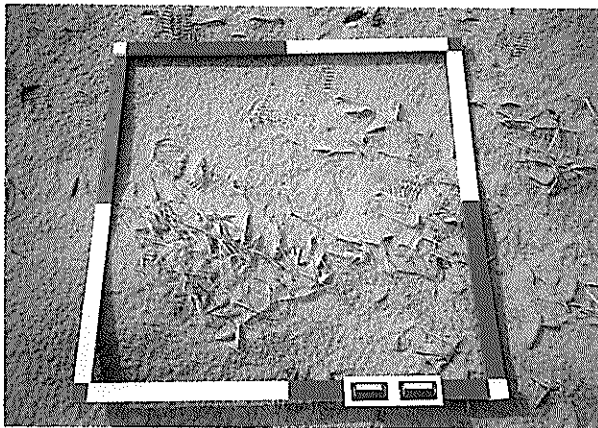
写真-7 (1)~(6) 測線II, 沖方向距離-90m 地点における植生の繁茂の様子 (春から秋)



(7) 1996年11月5日



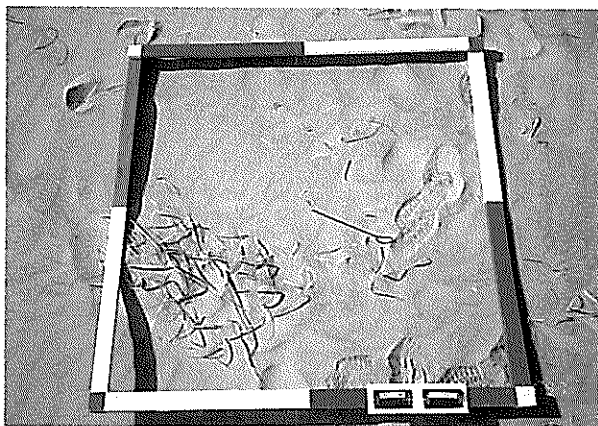
(10) 1997年2月17日



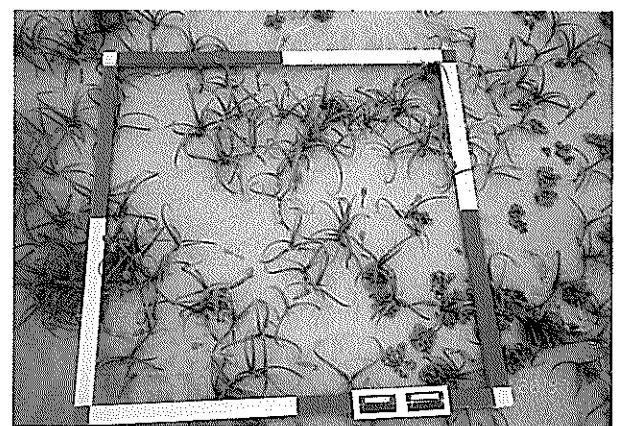
(8) 1996年12月10日



(11) 1997年3月25日

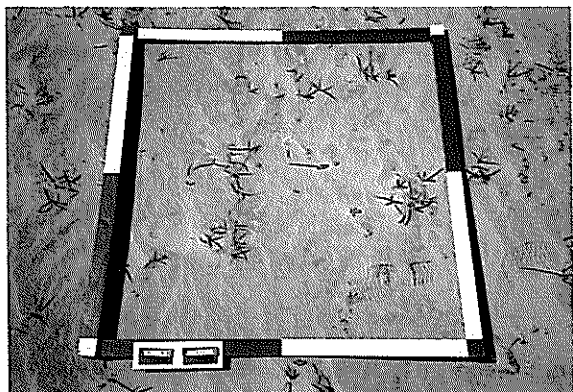


(9) 1997年1月14日

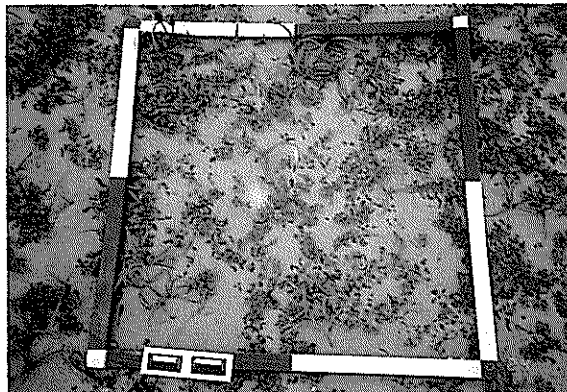


(12) 1997年4月28日

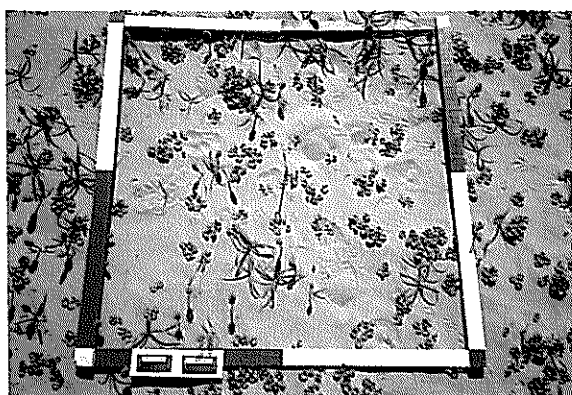
写真-7 (7)~(12) 測線II, 沖方向距離-90m 地点における植生の繁茂の様子 (秋から春)



(1) 1996年4月3日



(4) 1996年6月24日



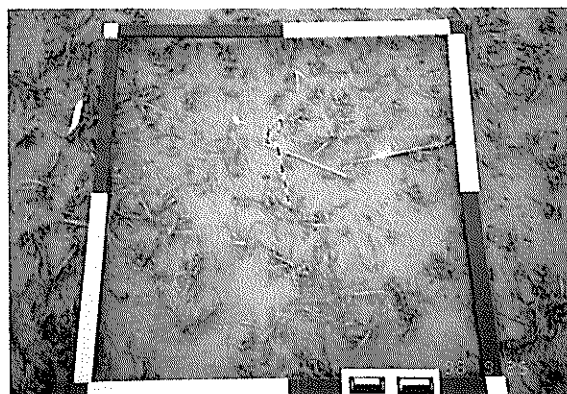
(2) 1996年4月26日



(5) 1996年8月23日

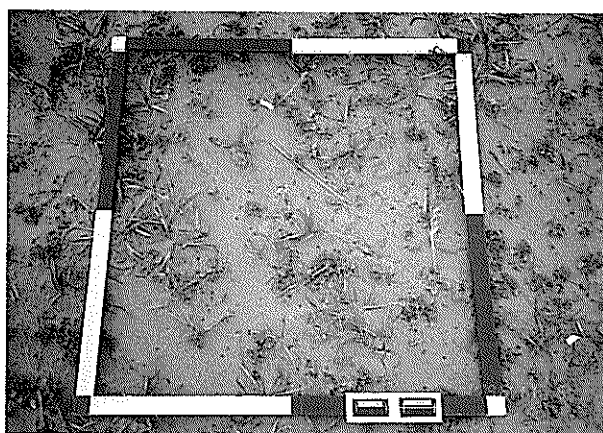


(3) 1996年5月29日

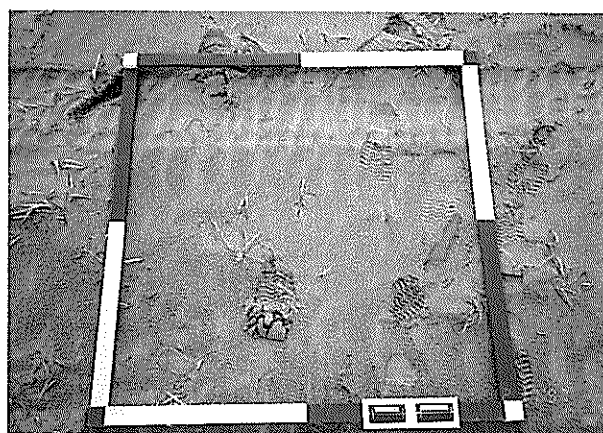


(6) 1996年9月25日

写真-8(1)~(6) 測線II, 沖方向距離-100m 地点における植生の繁茂の様子(春から秋)



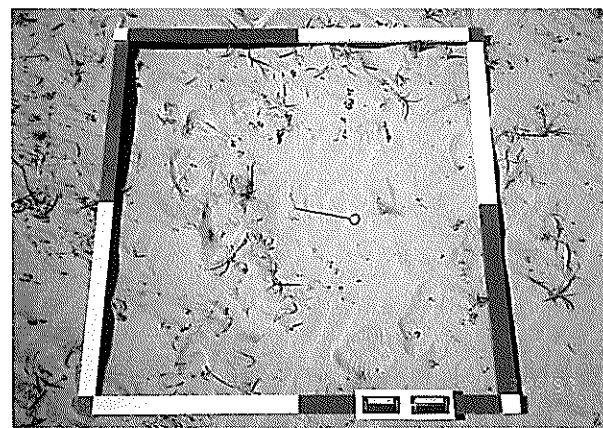
(7) 1996年11月5日



(10) 1997年2月17日



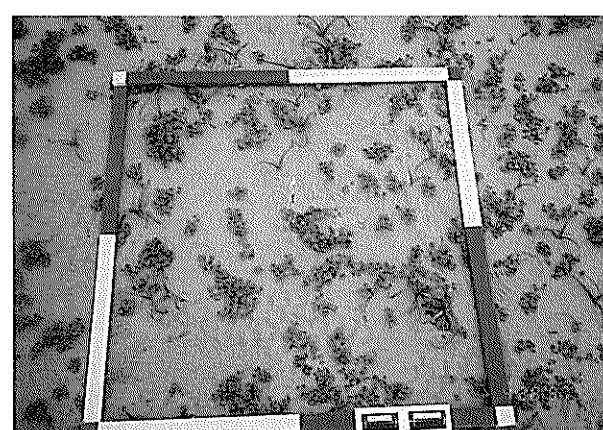
(8) 1996年12月10日



(11) 1997年3月25日



(9) 1997年1月14日



(12) 1997年4月28日

写真-8(7)~(12) 測線II, 沖方向距離-100m地点における植生の繁茂の様子(秋から春)

1. はじめに

波の影響を受けて常に変形している前浜の背後には変形の比較的小さい後浜と砂丘が存在する。変化の激しい前浜や空間スケールの大きい砂丘の変動特性は従来の研究で調べられてきているものの、後浜から砂丘前面にかけての地形変化が検討されることはあまりなかった。しかし、この領域は、前浜が侵食されたとき、あるいは波が前浜を越えたときに、背後地を波から守る第2次防護施設としての機能を有しており、防災上、重要な空間である。今後は、災害に強い海岸をより環境と調和した形で再生・保全するため後浜や砂丘にも考慮した広範囲の海岸管理を行っていく必要があり、そのためには、後浜から砂丘前面にかけての変形特性を把握しておかなければいけない。また、砂草や防風林などの植生の影響を含んだ地形変化予測手法を確立しておく必要もある。

後浜から砂丘前面にかけての地形変形特性を検討するには、この領域に通常生息する海岸植物の影響を考慮する必要がある。というのは、植物には飛砂の発生を抑制したり、飛砂を捕捉する機能があると考えられるからである。実際、砂丘の形成・安定に植生が用いられている例がある (Woodhouse, 1978)。Bressolier and Thaomas (1977) は植生が風速場に与える影響を調べるために植生上の風速を測定し、風速が0になる点が植生の密度と高さの影響を受けることを明らかにした。Hesp (1981) は植生の背後に形成される堆積域を調べ、堆積域の高さおよび長さや植生の幅、風速との関係を検討した。Niedoroda et al. (1991) は様々な底質、風速、植生の条件の元での飛砂量を計算し、仲座ら (1991) や成瀬ら (1992) は植生と断面地形との関係を検討した。さらに、Davidson-Arnott and Law (1990) は植生がある海岸での地形変化から求める飛砂量と風速との関係調べた。最近では、加藤ら (1997)、加藤・佐藤 (1998) が、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の抑制に効果があることを示した。このように、植生と地形変化に関するいくつかの研究があるものの、植生と地形変化との関係に関する知見は未だ十分とは言えない。

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; 辻本・西澤, 1999) 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。辻本・西澤 (1999) は、 $k-\epsilon$ モデルを用いて植生の存在する飛砂層内での風速場を計算するモデルならびにその結果を用いてサルテーション運動状態の飛砂量を計算するモデルを開発し、実験データによってモデルの妥当性を確認した。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、現地調査結果を基に、植生に注目して後浜から砂丘前面にかけての地形変化特性を検討した。続いて、砂草を考慮した現地の地形にも適用可能な飛砂量計算数値モデルを作成し、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。なお、本論文は栗山・望月 (1997)、Kuriyama and Mochizuki (1999)、栗山・上堂 (1999) の成果に新たな知見を加えて取りまとめたものである。

2. 現地観測

2.1 観測方法

現地調査は鹿島灘に面する波崎海洋研究施設 (略称 HORS, 図-1 参照) より 100m ほど北の砂浜海岸で行った。図-2 の長方形で囲んだ調査領域に沿岸方向 20m 間隔で3測線設定し、1995年6月より約1ヶ月に1回の割合で、後浜から砂丘前面にかけて地形測定と植生調査を行った。図-2 から明らかな様に調査領域は沿岸方

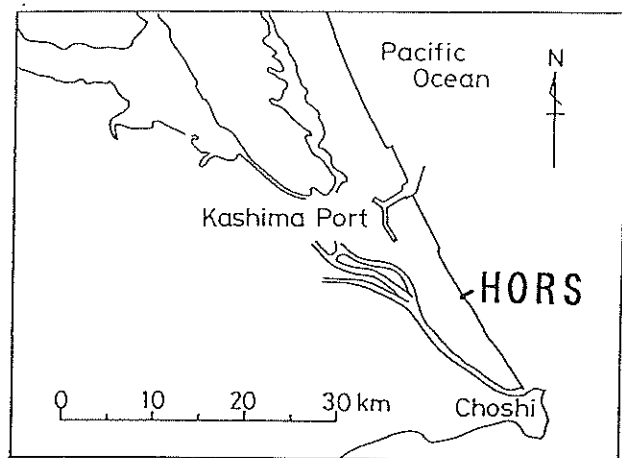


図-1 波崎海洋研究施設の位置

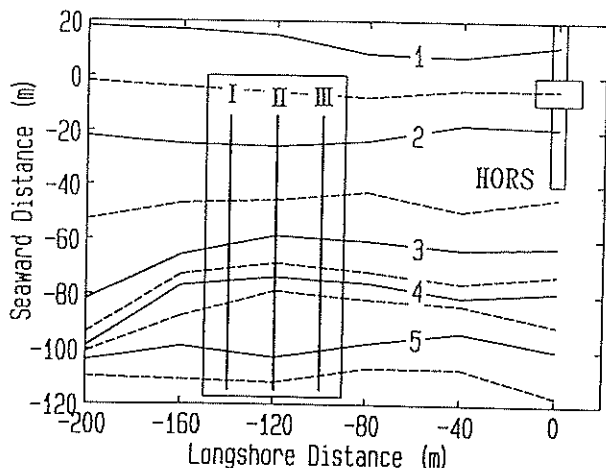


図-2 調査領域周辺の地形 (1996年11月11日測量, D.L.基準, コンター線の単位はm)

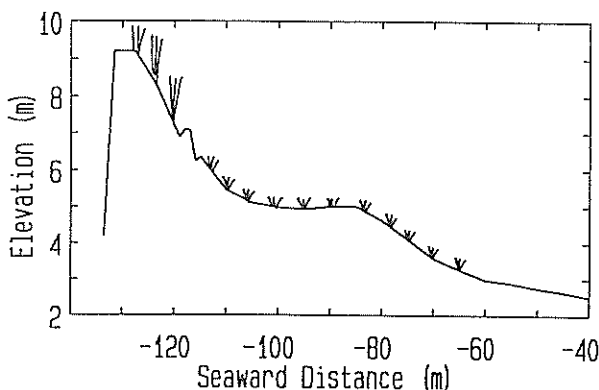


図-3 測線IIの断面図 (1996年11月5日測量, D.L.基準)

向にほぼ一様な地形となっており、沿岸方向の地形の不均一が地形変化に及ぼす影響は小さいと考えられる。なお、波崎海岸における高さの基準は波崎港工事基準面 (T.P. -0.687m, 以下 D.L.) とする。波崎海岸における朔望平均満潮位, 平均潮位, 朔望平均干潮位はそれぞれ 1.252m, 0.651m, -0.196m である。写真-1 は調査領域の全景を写したもので、図-3 は、測線IIにおける後浜と砂丘の断面を示したものである。沖方向距離-65m 地点付近から砂丘根元までコウボウムギ (*Carex kobomugi*, 写真-2) やハマニンニク (*Elymus mollis*, 写真-3), ハマヒルガオ (*Calystegia soldanella*, 写真-4) が生えている。沖方向距離-116m 地点と-120m 地点には高さ 1 m ほどの堆砂垣があり (写真-5 (1)~(6)), それより上方には主としてチガヤ (*Imperata cylindrica*, 写真-5 (7), (8)) が生えている。本研究における調査範囲は沖方向距離-115m 地点よりも海側で、植生調査では沼

田 (1978) を参考に岸沖方向 10m 間隔で設定した調査点を中心とした 1 m 四方内の植物の種類, 高さ, 分布面積を観察し (写真-7, 8), 地形測定では 5m 間隔で地盤高さを測定した。さらに, 1997 年 3 月からは月 1 回の頻度で後浜における底質粒径調査を (2.4 で詳述), 1997 年 10 月には砂草の葉面積密度調査を行った。汀線より約 400m ほど沖の HORS 先端では, HORS 建設後の 1986 年から D.L.上約 10m の地点で風向・風速を 1 時間間隔で 10 分間測定している。1995 年 6 月から約 1 年間は, 1 日 1 回, ごみの分布等から波の遡上端の位置を調べた。

2.2 地形変化特性

沖方向距離-65m 地点から-115m 地点までの範囲を 4 つの領域に分け, それぞれの領域における初期断面からの平均地形変化量の経時変化を図-4 に示した。図の上段には測定日間の陸向きの平均風速を示した。なお, 1996 年 5 月 24 日~1997 年 6 月 24 日と 1998 年 1 月 8 日~11 月 24 日にかけての期間では HORS 先端での風向・風速観測が正常に行えなかったため, この期間の風向・風速値は銚子地方気象台の風のデータより付録 A に述べる方法によって推定した。

本調査領域では, 海から陸に向かう風が卓越することにより, 後浜から砂丘前面にかけて年間約 15cm の堆積が生じていた。もう少し詳細に見ると, -65m 地点から-90m 地点までの範囲では主として夏から秋にかけて堆積が起こっているのに対して, それより陸側の-95m 地点から-115m 地点の範囲では秋から冬にかけて堆積が起こっている。これを確認するために, 3 測線の平均断

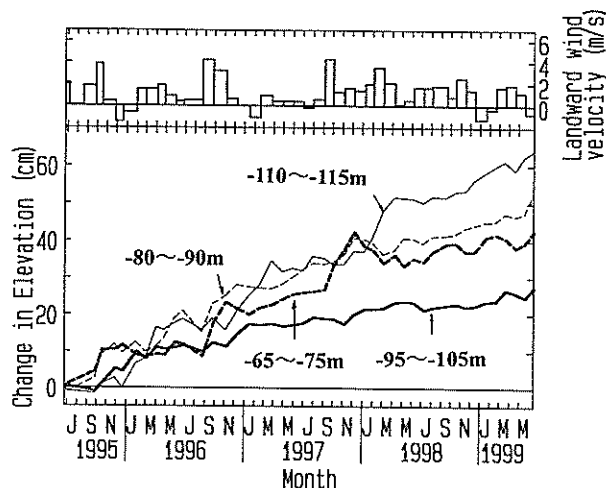


図-4 各領域における平均地形変化量と岸向平均風速

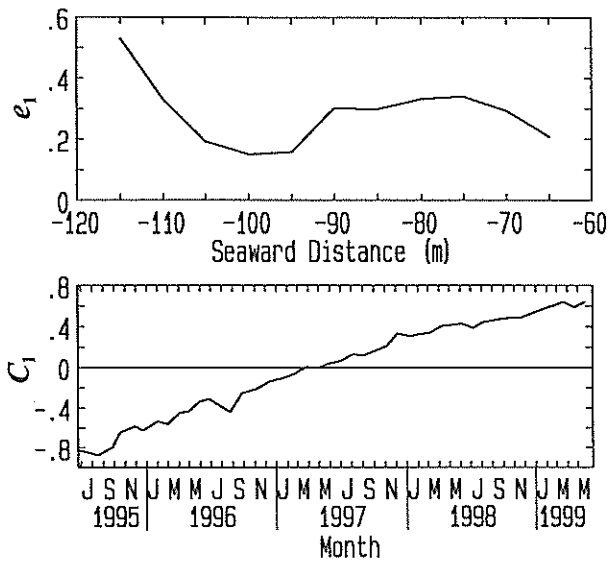


図-5(1) モード1の固有関数 C_1 と時間関数 e_1

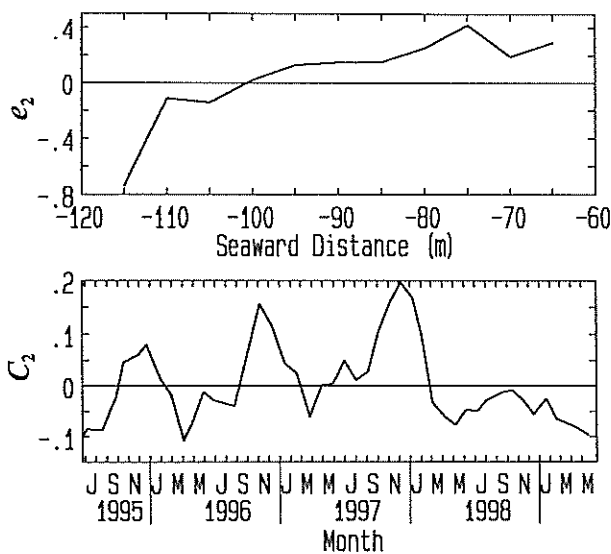


図-5(2) モード2の固有関数 C_2 と時間関数 e_2

面の経時変化データに対して経験的固有関数法を適用した。

経験的固有関数法は Winant et al. (1975), Aubey (1979), 橋本・宇多 (1981), 加藤ら (1981), 加藤・吉松 (1984), Birkemeir (1984), Wijnberg and Terwindt (1995) などによって地形変化解析に用いられた統計解析手法であり、地形変化を場所の関数である固有関数と時間関数との積の和で表す(式(1))。

$$Z(X, \tau) = \sum_n e_n(X) c_n(\tau) \quad (1)$$

ここで、 $Z(X, \tau)$ は地点 X , 時間 τ の地盤高さを、 $e_n(X)$, $c_n(\tau)$

はそれぞれモード n の固有関数と時間関数を表している。本検討では鉛直上向きを正としているので、 e_n と c_n との積が正の時には堆積が生じていることを、逆に負の時には侵食が生じていることを表している。

図-5(1), (2)はモード1, 2の固有関数と時間関数を示したものである。それぞれのモードの寄与率は94.9%と2.6%である。モード1では、図-4からも明らかな後浜から砂丘前面にかけてのほぼ一方的な堆積が示されており、特に後浜陸側領域の緩い斜面の頂部付近にあたる沖方向距離-75m~-90mの領域と堆砂垣前面の沖方向距離-110m~-115mの領域で堆積量が大きい(図-5(1))。

図-4に見られた季節による堆積領域の違いはモード2に現れている(図-5(2))。時間関数 C_2 は夏から秋にかけて大きく増加し、秋から冬にかけて大きく減少している。これは、夏から秋にかけては沖方向距離-65m~-90mの領域で堆積が生じ、秋から冬にかけては沖方向距離-105m~-115mの領域で堆積が生じていることを示している。この地形変化の原因は2.5で検討する。

2.3 植生特性

調査領域で観察されたコウボウムギ、ハマニンニク、ハマヒルガオの被度(占有面積)の経時変化を図-6に、それぞれの植物の平均高さの経時変化を図-7に示す。調査領域では全域において夏に10cm近くまで発達するコウボウムギが優占種となっており、調査領域の約20%を占めている。コウボウムギに次いで優占種となっているのはハマヒルガオで、これは主に調査区域の砂丘に近い領域に生息しており、夏には高さが3cm近くになる。ハマニンニクは、それとは逆に主として調査領域の海側、すなわち、植生の海側限界点寄りの領域に生息しており、夏には20cm近くまで発達する。

ここで、植生の繁茂を示す指標として、調査面積平均の植生の高さ、すなわち植生の調査区域内で観察された植生の容積(高さ x 面積)を調査面積(1m²)で割った値の-70m地点から-110m地点までの平均値を考える。図-8はその経時変化を示したもので、この図から、砂草が4月から6月にかけて急激に繁茂し、9月から11月にかけての枯れていく様子(写真-6~8)が植生の繁茂指数によってよく表されていることがわかる。植生の繁茂の程度を調べる植生調査とは別に、葉面積密度調査を砂草がまだ繁茂している秋(1997年10月23日)に行った。調査領域内において比較的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

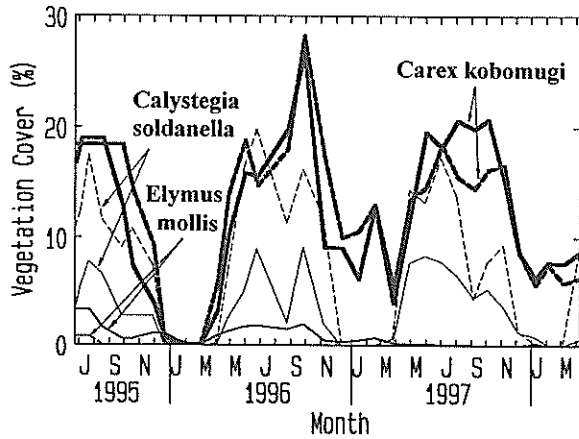


図-6 各植物の被度(占有面積)の経時変化(実線は沖方向距離-70m地点から-80m地点までの値を、破線は-90m地点から-110m地点までの値を示している。)

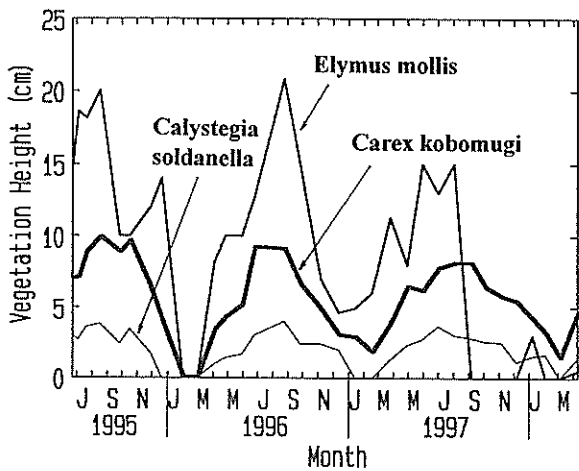


図-7 各植物の平均高さの経時変化

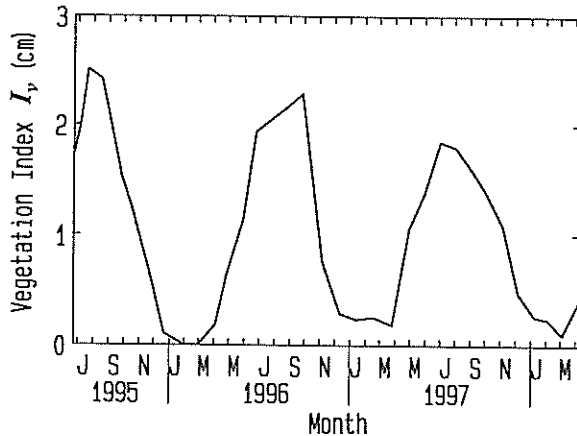


図-8 植物の繁茂指数 I_v の経時変化

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。本結果は、植生が風速の鉛直分布に与える影響に関する検討(3.2(1))で用いる。

2.4 粒径特性

1997年3月より始めた底質粒径調査では、地形測量時に測線IIの沖方向距離-25mの地点と、沖方向距離-50m~-110mの領域において10m間隔で(1998年5月までは20m間隔で)砂面表層の砂をそれぞれ30gほど採取し、自動ふるい器を用いて中央粒径等を調べた。ふるいの目は以下の通りである: 500, 300, 212, 180, 150, 125, 106, 75 μm 。

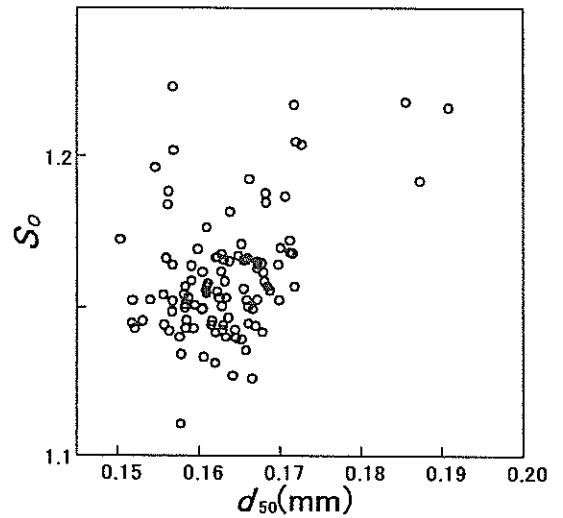


図-9(1) 中央粒径 d_{50} とふるいわけ係数 S_0 との相関

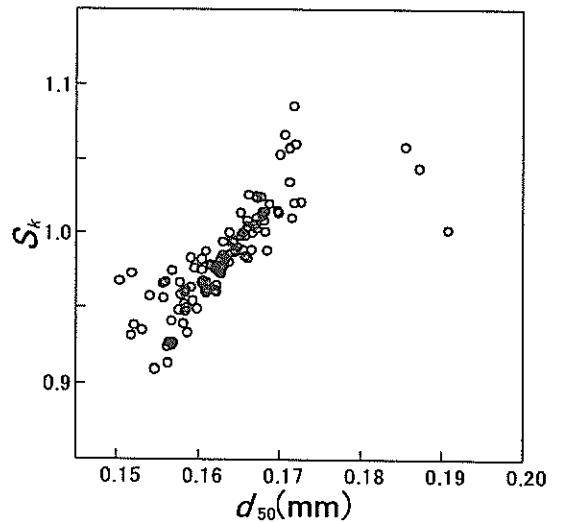


図-9(2) 中央粒径 d_{50} と偏り度 S_k との相関

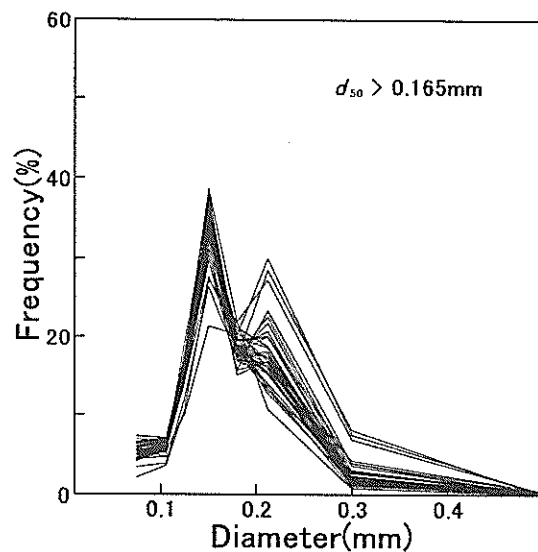
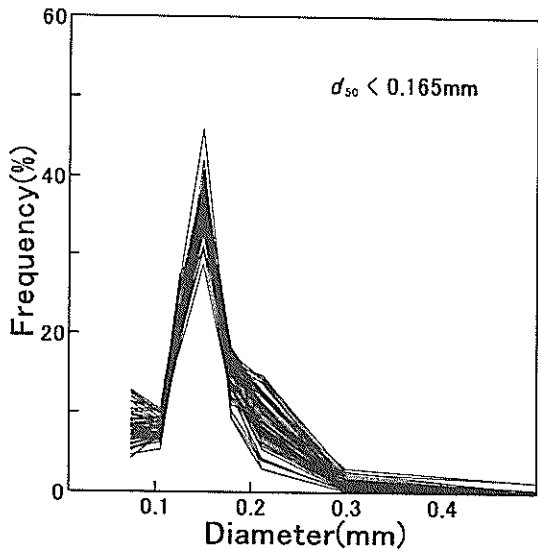


図-10 粒径分布曲線の重ね合わせ

図-9(1),(2)は中央粒径 d_{50} と次式で定義されるふるいわけ係数 S_0 、偏り度 S_k との関係を示したものであり、図-10は d_{50} が 0.165mm 以上の場合と以下の場合の粒径分布曲線を重ね合わせたものである。

$$S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}} \quad (2)$$

$$S_k = (d_{75} \times d_{25}) / d_{50}^2 \quad (3)$$

ここで、 d_{25} 、 d_{50} 、 d_{75} はそれぞれ粒度加積曲線で累加百分率が 25%、50%、75%に対応する粒径である。

まず、 d_{50} と S_0 との関係を見てみると、今回の調査では、同海岸における水深約 5m の地点から砂丘前面までの粒径を調べた加藤ら (1990) が示した $d_{50} < 0.3\text{mm}$ の

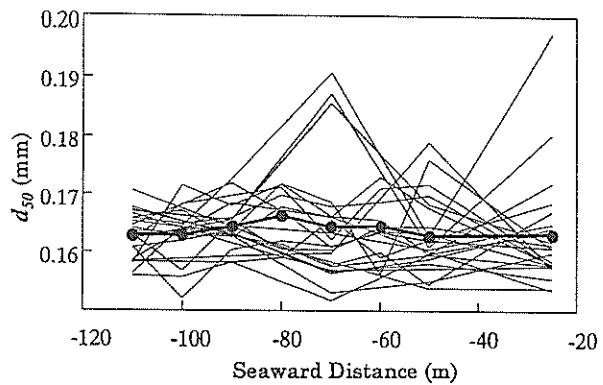


図-11 中央粒径 d_{50} の岸沖分布

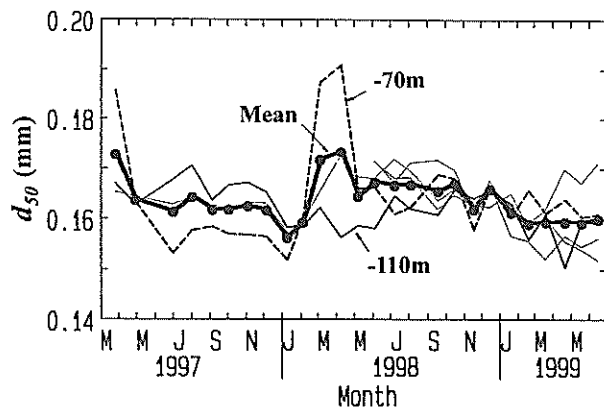


図-12 中央粒径 d_{50} の経時変化

範囲では d_{50} が大きくなるほど S_0 が大きくなるという関係は見られなかった。

一方、 d_{50} と S_k との間には、加藤ら (1990) が示した $d_{50} < 0.2\text{mm}$ の範囲では d_{50} が大きくなるほど S_k が大きくなるという関係が見られた。これは、 d_{50} が大きくなると図-10に見られるように、粒径 0.212mm の成分が増加するためであると考えられる。

図-11は底質の中央粒径 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中央粒径を示している。データのばらつきはややあるものの、調査領域における時間平均の底質の中央粒径は岸沖方向にほぼ一様で、0.16mm である。

また、図-12は沖方向距離-70m~-110m までの領域の底質の中央粒径の季節変動を示したものである。1997、1998年には沖方向距離-70mの地点で2、3月に粒径が大きくなったけれども、調査期間を通じての明確な季節変動は見られなかった。2月、3月における粒径の変化の原因は不明である。

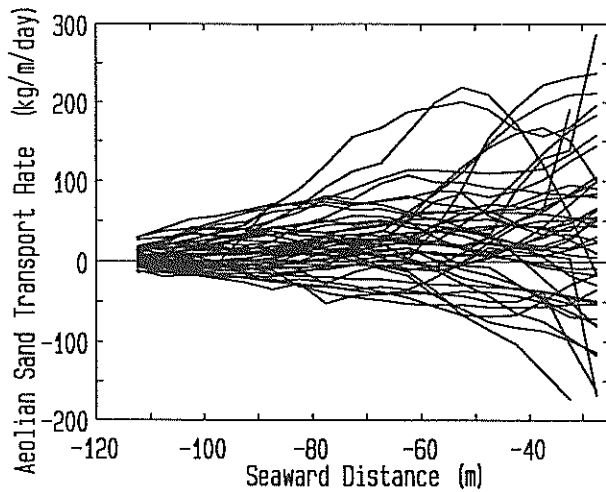


図-13 飛砂量の岸沖分布の重ね合わせ

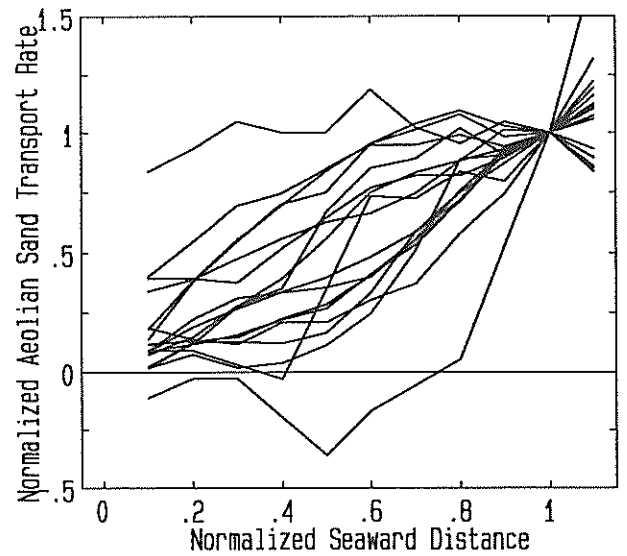


図-15 無次元飛砂量の岸沖分布の重ね合わせ

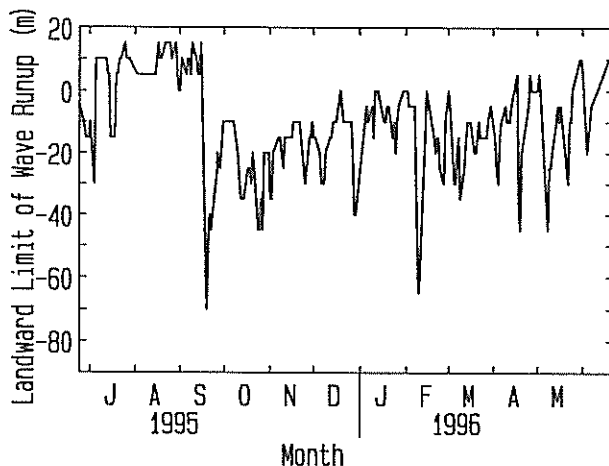


図-14 波の遡上端の経時変化

2.5 飛砂量の岸沖分布と植生との関係

後浜から砂丘前面における地形変化特性 (2.2) の原因を検討するために、地形変化を引き起こしている飛砂の岸沖分布を検討した。飛砂量の岸沖分布を、(a) 砂丘根元の-117.5m 地点における飛砂量が0であり、(b) 沿岸方向の飛砂が地形変化に寄与しないと仮定して実測の地形変化より求めた。なお、空隙率は堀川ら (1981) と同様に 0.38 とした。図-13 はそのようにして求めた飛砂量の岸沖分布を重ね合わせたものである。飛砂量は、砂丘根元から海に向かって次第に増大し、-80m 地点付近から急激に増大したり減少したり大きく変動している。ただし、図-3 の断面図からもわかるように、-60m 地点より海側は、-110m 地点から-80m 地点にかけての比較的平らな領域よりも 1.8m 以上低いことから、波の遡

上による漂砂の影響を受けている可能性がある。そこで、波の遡上端のデータを基に波による漂砂の影響を検討する。

図-14 は、ごみの分布などから得られた波の遡上端の経時変化を示したものである。1995年6月から1年間に、植生の海側限界点である沖方向距離-65m 地点に達した遡上波の回数は2回である。よって、-65m 地点より陸側での地形変化は波の影響をほとんど受けなかったと言える。

続いて、後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生との関係を検討するために、後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の岸沖分布と 2.3 で検討した植生の繁茂指数との関係を調べた。

地形変化より得られた飛砂量の岸沖分布のうち、植生の海側限界点よりやや陸側の-67.5m 地点における飛砂量が 50kg/m/day 以上のケースについて、-67.5m 地点における飛砂量で無次元化した飛砂量 q' の岸沖分布を図-15 に示した。横軸は-117.5m 地点から-67.5m 地点までの距離で無次元化した沖方向距離 y' (-117.5m 地点を基準) を表している。この図から飛砂量の分布形が凸型と凹型とに大別されることがわかる。

そこで、これらの分布形を

$$q' = ay'^2 + (1-a)y' \quad (4)$$

で近似し、この係数 a と植生の繁茂指数との関係を調べ、両者の相関を図-16 に示した。

植生の繁茂指数と係数 a との間には正の相関があり、

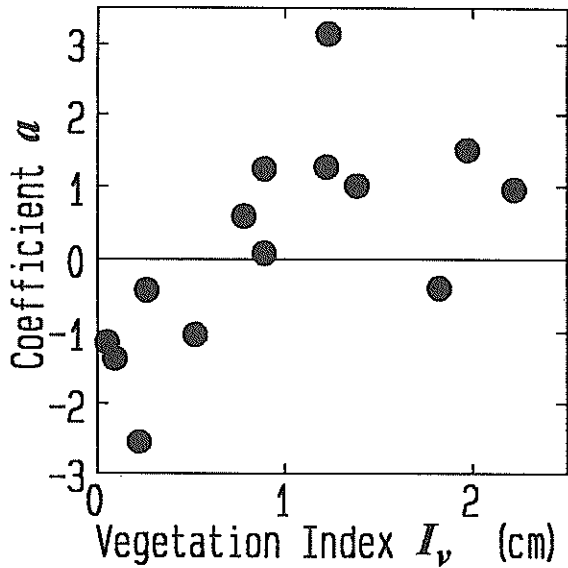


図-16 砂草の繁茂指数 I_v の係数 a との関係

植生が繁茂しているときには係数 a の値がプラス側で、凹型の飛砂量分布形、すなわち、-67.5m 地点から陸にかけて飛砂量が急激に減少するのに対して、植物がほとんど生えていないときには係数 a の値がマイナス側で凸型の飛砂量分布形、すなわち、飛砂量が-67.5m 地点よりも陸側で増加している。これは、植物が繁茂しているときには、海からの風によって運ばれた飛砂が植生によって捕捉されるとともに飛砂量の発生が押さえられるため飛砂量が植生の海側限界点から急激に減少し、一方、植物が枯れているときには植生による飛砂の捕捉ならびに飛砂発生の抑制が無いため植生の海側限界点を過ぎても飛砂量がなかなか減少しなかったことによると考えられる。飛砂は地表面から高さ十数 cm までの間に集中しているため(堀田, 1985)、高さが 10 cm 程度の砂草であっても飛砂量減少に寄与したと考えられる。図-4に見られた季節による堆積位置の違いは、この飛砂量分布形の違いが原因であると考えられる。

3. 飛砂量の数値計算

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 風速計算

(1) モデルの概要

沿岸方向に一様な場における定常状態の風速場を、風の進行方向に座標軸を設定して、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。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

ここで、 y は沖向きを正としたときの風の進行方向に平行な水平方向座標、 z は上向きを正としたときの鉛直方向座標、 v は沖向きを正としたときの水平方向風速、 w は鉛直方向風速、 p は圧力、 ρ_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。

$$K_y = K_z = \lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|, \quad \lambda = \kappa(z - z_s) \quad (8)$$

ここで、 λ は混合距離で、 κ はカルマン係数、 z_s は地盤高さである。

式(8)を式(5)、(6)に代入すると次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \lambda^2}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial v}{\partial y} \\ & + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial v}{\partial y} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda^2}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \\ & + 2\lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - g - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \lambda^2}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial y} \\ & + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial y} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda^2}{\partial z} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial z} \\ & + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial z} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

上記方程式 (7), (9), (10) を MAC 法のアルゴリズムを用いて解く。運動方程式 (9), (10) を変形した上で、乱れ成分に関する項と $(\partial v / \partial y + \partial w / \partial z)$ の y と z に関する微分の項を省くと圧力に関するポアソン式 (式 (11)) が導かれる。

$$\frac{1}{\rho_a} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \left[\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (11)$$

計算では、 $n-1$ ステップの p, v, w を式 (9), (10) に代入することにより求めた n ステップでの v, w をポアソン式 (11) に代入して n ステップでの p を求める。これらを式 (9), (10) に代入して $n+1$ のステップの v, w を求めていく。

ポアソン式中の圧力は反復法的一种である逐次緩和法によって求めた。格子点 (i, j) における式 (11) を

$$p_{i,j}^{v+1} = p_{i,j}^v + \left(A_{i,j}^v - p_{i,j}^v \right) \quad (12)$$

と変形した上で、右辺の第 2 項と第 3 項をまとめて、次式のように変形する。

$$p_{i,j}^{v+1} = p_{i,j}^v + C_r \left(A_{i,j}^v - p_{i,j}^v \right) \quad (13)$$

ここで、 v はステップの回数を表しており、 C_r は緩和係数と呼ばれる定数である。右辺の $A_{i,j}^v$ 内の p に対しては最新の (すなわち、 $v+1$ ステップの値が求めた p に対しては $v+1$ ステップの) p を代入することによって $v+1$ ステップの $p_{i,j}$ を求めていく。なお、緩和係数は試行錯誤の上、0.8 とした。

計算格子としては図-17 に示すスタッガード格子を用いた。本モデルでは現地の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、以下の式を用いて基礎方程式をデカルト座標系 (y, z) から一般座標系 (ξ, η) に変換した (中橋, 1992)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial y} &= \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial f}{\partial \eta} \right) / J, \\ \frac{\partial f}{\partial z} &= \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial f}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) / J, \\ J &= \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial z}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 f は y, z の関数を示す。

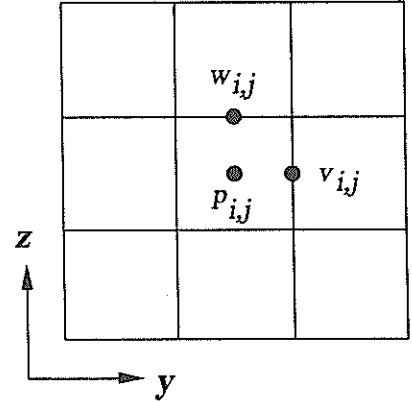


図-17 計算に用いたスタッガード格子

鉛直方向の格子間隔は地表面で密になるようにし、格子位置 $z(i, j)$ は指数関数を用いた次式で決定した。

$$z(i, j) = z_s(i) + \xi(j) \cdot (z_s(i) - z_s(i)), \quad (15)$$

$$\xi(j) = \left(\exp(c_1 \cdot j) - 1 \right) / \left(\exp(c_1 \cdot jed) - 1 \right)$$

ここで、 $z_s(i)$ は地盤高さ、 $z_s(i)$ は計算範囲の上端の高さ、 jed は計算範囲の上端の格子番号、 c_1 は定数で、ここでは 0.05 とした。

水平方向の格子間隔に関しては、風上端と風下端の水平方向の格子間隔を指定するとこの間の格子間隔が滑らかに分布するよう式 (17) ~ (19) を用いて格子位置 y_i を決定した (中橋, 1992)。

両端の格子幅を $\Delta y_1 (= y_2 - y_1)$ 、 $\Delta y_{ied-1} (= y_{ied} - y_{ied-1})$ とし、 $L_1 = y_{ied} - y_1$ とする。さらに、

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 1 / \left[(ied - 1) \Delta y_1 \right], \quad \sigma_1 = 1 / \left[(ied - 1) \Delta y_{ied-1} \right], \\ \alpha_1 &= \sqrt{\sigma_0 / \sigma_1}, \quad \alpha_2 = \sqrt{\sigma_0 / \sigma_1}, \quad \beta_i = (i - 1) / (ied - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

とすると、

1) $\alpha_1 < 1$ のとき

$$y_i = \frac{L_1 \tan(\beta_i \Delta \gamma)}{\alpha_2 \sin \Delta \gamma + (1 - \alpha_2 \cos \Delta \gamma) \tan(\beta_i \Delta \gamma)}, \quad (17)$$

$$\sin \Delta \gamma / \Delta \gamma = \alpha_1$$

2) $\alpha_1 > 1$ のとき

$$y_i = \frac{L_1 \tanh(\beta_i \Delta \gamma)}{\alpha_2 \sinh \Delta \gamma + (1 - \alpha_2 \cosh \Delta \gamma) \tanh(\beta_i \Delta \gamma)}, \quad (18)$$

$$\sinh \Delta \gamma / \Delta \gamma = \alpha_1$$

3) $\alpha_1=1$ のとき

$$\begin{aligned} y_i &= L_1 \delta_i / [\alpha_2 + (1 - \alpha_2) \beta_i] \\ \delta_i &= \beta_i \left[1 + 2(\alpha_1 - 1)(\beta_i - 0.5)(1 - \beta_i) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式(9), (10), (11)に適用する近似法としては基本的には時間微分に対しては1次の前進差分, 空間微分に対しては中央差分を用いた。移流項の計算では, 一般的には3次の風上差分を用いた方が計算精度が高くなるけれども(里深, 1992), ここでは計算の安定性を考えて1次の風上差分を用いた。

移流項の差分式の例として, $v > 0, w > 0$ の時の差分式を以下に示す。

・式(9)中の $v(\partial v / \partial y), w(\partial v / \partial z)$ に対して

$$\begin{aligned} v \frac{\partial v}{\partial y} &= v_{i,j} (z_\eta \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{\Delta \xi} \\ &\quad - z_\xi \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta \eta}) / J \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial v}{\partial z} &= w_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} (y_\xi \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{\Delta \eta} \\ &\quad - y_\eta \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2\Delta \xi}) / J, \\ w_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} &= (w_{i,j} + w_{i+1,j} + w_{i+1,j-1} + w_{i,j-1}) / 4 \end{aligned} \quad (21)$$

・式(10)中の $v(\partial w / \partial y), w(\partial w / \partial z)$ に対して

$$\begin{aligned} v \frac{\partial w}{\partial y} &= v_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} (z_\eta \frac{w_{i,j} - w_{i-1,j}}{\Delta \xi} \\ &\quad - z_\xi \frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta \eta}) / J, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} &= (v_{i,j} + v_{i,j+1} + v_{i-1,j+1} + v_{i-1,j}) / 4 \\ w \frac{\partial w}{\partial z} &= w_{i,j} (y_\xi \frac{w_{i,j} - w_{i,j-1}}{\Delta \eta} \\ &\quad - y_\eta \frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta \xi}) / J \end{aligned} \quad (23)$$

境界条件としては, 風上端で圧力の一階微分が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。風上端における風速は入力条件である。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, 圧力に対しては式(24)を与え

た。式(24)は, 式(9), (10)に地表面での境界条件 $v=w=0$ を代入して得られたものである。

$$\begin{aligned} p_{1,j} &= p_{2,j} - \rho (y_\eta A_1 + z_\eta A_2 - z_\eta g)_{i,1} \\ A_1 &= \frac{\partial \lambda^2}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial v}{\partial y} \\ &\quad + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial v}{\partial y} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda^2}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \\ &\quad + 2\lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ A_2 &= \frac{\partial \lambda^2}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial y} \\ &\quad + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial y} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \lambda^2}{\partial z} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial z} \\ &\quad + \lambda^2 \left(\frac{\partial}{\partial z} \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial w}{\partial z} + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

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, 500回で所定の風速分布に達するようにした。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。

定常状態の風速を求めるための繰り返し計算の収束条件としては(n+1)ステップとnステップでの速度の差が全ての格子点で $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以下となることとした。

ポアソン式(11)の繰り返し計算の収束条件としては, (v+1)ステップとvステップでの圧力の差の全格子点における二乗和が $1 \times 10^{-5} \text{ N}^2/\text{m}^4$ となることとした。ただし, ポアソン式の繰り返し計算において計算の繰り返し回数が100回を越えた場合には(風速の繰り返し計算の回数が10回以内の場合には1000回を越えた場合には), 誤差が収束条件を満たしていなくても計算を打ち切ることとした。

(2) モデルの検証

本風速モデルの検証を千葉県幕張が浜での風速観測結果(灘岡ら, 1996)と前章で示した現地調査領域(波崎海岸)で実施した風速観測結果とを用いて行った。以下にその結果を示す。なお, 水平床上や斜面付き断面上の風速の鉛直分布の理論解を用いての本風速モデルの検証も行っており, その結果は付録Bに示す。

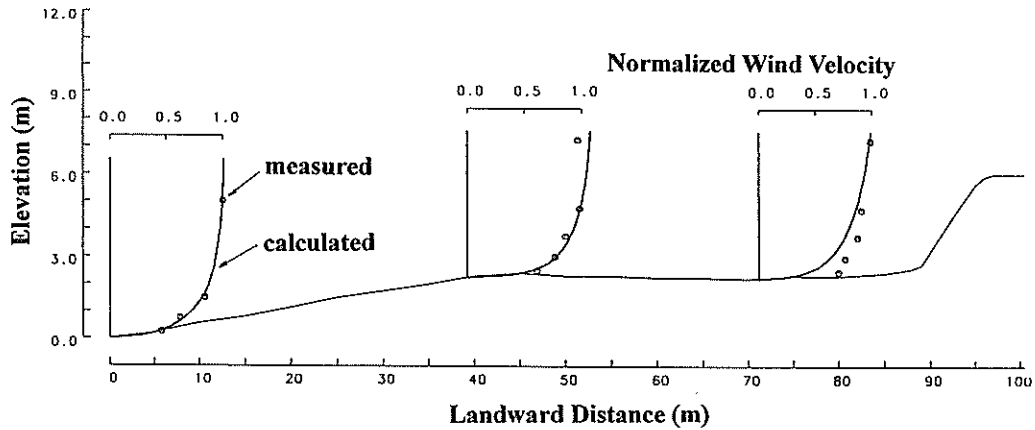


図-18 現地における風速の観測結果と計算値との比較（風速は上流端における砂面から5mの地点の風速で無次元化されている）

a) 幕張が浜での観測結果との比較

まず、灘岡ら (1996) による千葉県幕張が浜での風速の実測値と本モデルによる計算値とを比較した。入力条件である上流端の風速の鉛直分布としては、砂面からの高さ $z_r=5m$ において実測値の $v=6.5m/s$ となる対数分布を与えた。

地表上の定常状態の風速の鉛直分布は対数則に従うとされている (堀田, 1985)。ただし、その鉛直分布は飛砂が存在しない場合と存在する場合で異なる。飛砂が存在しない場合には粗度高さで風速が0になり、風速の鉛直分布は以下の式で表される (堀田, 1985)。

$$v = 5.75v_* \log_{10}(z_r / z_0), \quad (25)$$

$$z_0 = 0.08 \log_{10}(d / 0.18)$$

ここで、 v_* は摩擦速度、 z_r は砂面からの高さ、 z_0 は粗度高さ、 d は粒径である。

一方、飛砂が存在する場合には、摩擦速度に係わらず、風速は focal point と呼ばれる砂面上のある点である風速を取る。この地点の高さ z' と風速値 v' は粒径の関数となっており、その関数ならびに飛砂がある場合の風速の鉛直分布は以下の式で表される (堀田, 1985)。

$$v = 5.75v_* \log_{10}(z_r / z') + v', \quad (26)$$

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

本検証では、粒径を 0.2 mm とするとともに、飛砂が生じている場合の式 (26) で上流端の風速分布を計算した。水平方向の格子間隔は 0.7~5m、鉛直方向の格子間隔は 0.05~0.7m で、計算の時間ステップは 0.001s である。なお、本計算では、背後地の護岸を護岸の天端高さを持つ水平床として扱った。

図-18 は両者の比較を示したもので、護岸近くの砂面近傍で計算値のほうが実測値よりも小さくなっているけれども、計算値は実測値をよく再現している。

b) 波崎海岸での観測結果との比較

続いて、前章の現地調査領域で実施した風速観測の結果と計算値とを比較した。風速観測では、測線IIとIIIとの間 (沿岸方向距離-140m、図-2) 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、沿岸方向風速を観測した。

計算対象領域は沖方向距離-25m~-140m、鉛直方向には砂面から D.L.上 14m 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 8m の地点の風速が、HORS 上の沖方向距離 30m の D.L.上 8m の地点で得られた風速と等しいとおいた。一方、陸風の場合には、海側境界の D.L.上 8m の地点の風速が HORS 上の沖方向距離 30m 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-19(1)は植生がない状態で海風が吹いた場合 (1997年1月8日)の岸沖方向風速の計算値と実測値との比較結果を示しており、図-19(2)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。それぞれの入力条件は表-1の通りである。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。

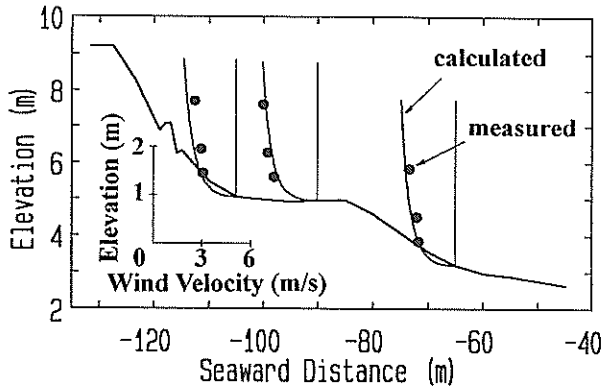


図-19(1) 波崎海岸における岸沖方向風速の観測値と計算値との比較 (海風の場合)

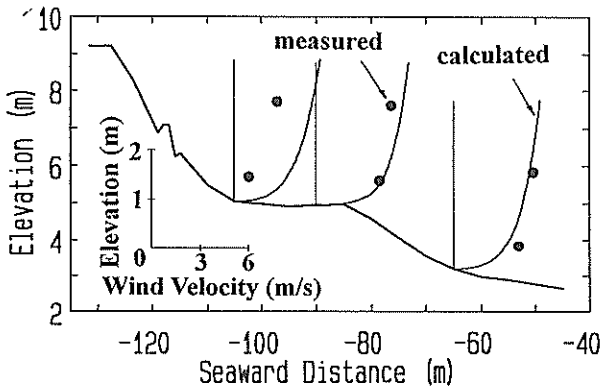


図-19(2) 波崎海岸における岸沖方向風速の観測値と計算値との比較 (陸風の場合)

表-1 海側境界における風の条件 (風向は HORS 沿長上沖からの風の向きを 0 とし、時計回りを正とする.)

	風速 (m/s)	風向 (°)
1997年1月8日	5.8	52
1997年1月21日	6.0	180

3.2 飛砂量計算

(1) モデルの概要

まず、前述の風速モデルによって求めた風速場より風の進行方向の摩擦速度 v_* を求める。摩擦速度の算定にあたっては、宮田ら (1993) にならい底面上 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。

$$v_* = \frac{v_{50}}{\left| \frac{v_{50}}{5.75 \log_{10}(500/z')} - v' \right|} \quad (27)$$

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

ここで、 d は砂の粒径で式 (27) では mm で与える。

このようにして求めた摩擦速度 v_* を用いて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。

$$q_e = K(\rho_a/g)(v_* + v_{*c})^2 (v_* - v_{*c}) \quad (28)$$

ここで、 K は無次元係数で、ここでは 1.0 とした。 v_{*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)。

$$v_{*c} = A\sqrt{gd(\rho_s - \rho_a)/\rho_a} \quad (29)$$

ρ_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) にならい以下の式で求める。

$$\frac{dq_{ne}}{dl} = E(l) - D(l) \quad (30)$$

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 Λ より以下の式で表される (辻本ら, 1989)。

$$D(l) = q_{ne} / \Lambda \quad (31)$$

跳躍距離 Λ 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。

$$\Lambda = K_3(v_* + v_{*c})^2/g \quad (32)$$

一方、砂の舞い上がり量 $E(l)$ は $l \rightarrow \infty$ 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。

$$E(l) = (K/K_3)\rho_a(v_* - v_{*c}) \quad (33)$$

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

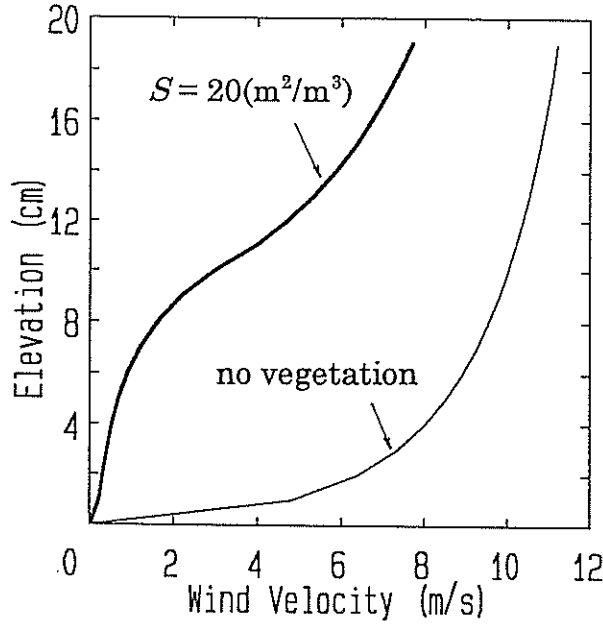


図-20 植生がある場合と無い場合の砂面近傍の岸沖方向風速の鉛直分布

定常状態における風速の鉛直分布（鉛直1次元の風速分布）を神田・日野（1990）を参考に次式で計算する。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - C_m S |v| v = 0 \quad (34)$$

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 λ は次式で与えた（神田・日野，1990）。

$$\lambda = \frac{2\kappa^2}{C_m S} \quad (35)$$

図-20 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5cm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 $S=20\text{m}^2/\text{m}^3$ の場合の摩擦速度は 0.02m/s であり、粒径 0.16mm の砂の流動開始摩擦速度 0.18m/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_{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。

$$\Lambda = R_{bold} K_3 (v_* + v_{*c})^2 / g \quad (36)$$

$$E(l) = R_{bold} (K/K_3) \rho_a (v_* - v_{*c}) \quad (37)$$

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

$$q_e = R_{bold}^2 K (\rho_a / g) (v_* + v_{*c})^2 (v_* - v_{*c}) \quad (38)$$

(2) モデルの検証

a) 平衡状態での飛砂量

平衡状態の飛砂量推定式である河村公式（式（28））の現地適用性を検討するために、沖方向距離-67.5 m 地点における岸沖方向飛砂量の実測値と計算値とを比較する。沖方向距離-67.5m 地点は、2.5の検討の結果、波と植生の影響をほとんど受けなかったと考えられる植生の海側限界点（沖方向距離-65m 地点）よりやや陸側に位置している。図-14 によると、1995 年9月以降、平均の遡上位置は-20m 付近であり、そこから-67.5m 地点までは 40m 以上離れている。Hotta（1988）によると浜幅が 10m 以上であれば飛砂は平衡状態に達し河村公式が適用可能なので、-67.5m 地点における飛砂量を河村公式で推定することは妥当であると言える。実測値は 2.5 と同様に地形変化から求めた。

汀線から沖方向距離-67.5m 地点まではほぼ一様な地形となっているので（図-2），風速の鉛直分布として対数分布を仮定する。すると、風の進行方向の摩擦速度 v_* は HORS 先端での風速（砂面上の高さ $z=7\text{m}$ ）より式（26）から求まる。この v_* を式（28）に代入し、風向きを α_w （HORS 延長上沖からの風を 0° とし反時計回りを正とする）を考慮して $q_e = q_e \cos \alpha_w$ より岸沖飛砂量 q_e を求める。

降雨があった場合には砂表面の含水比が増加し、飛砂量は減少する（堀田，1985）。本モデルでは、地面が濡り始める降雨強度である 1mm/hr 以上の雨が合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。雨量データとしては、銚子地方気象台と鹿島港湾工事事務所（運輸省）での値の平均値を用いた。なお、降雨後の飛砂量の取り扱いの目安とした降雨後の砂浜上の含水比に関する観測結果を付録Cに示す。

図-21 は飛砂量の実測値と砂の粒径を 0.16mm とし求めた計算値とを比較したものである。○印は測測の間隔である約1ヶ月平均の飛砂量であり、▲印は1年平均の漂砂量である。○印から伸びている水平方向の直線は、測測誤差による地形変化量の誤差が $\pm 5\text{mm}$ である

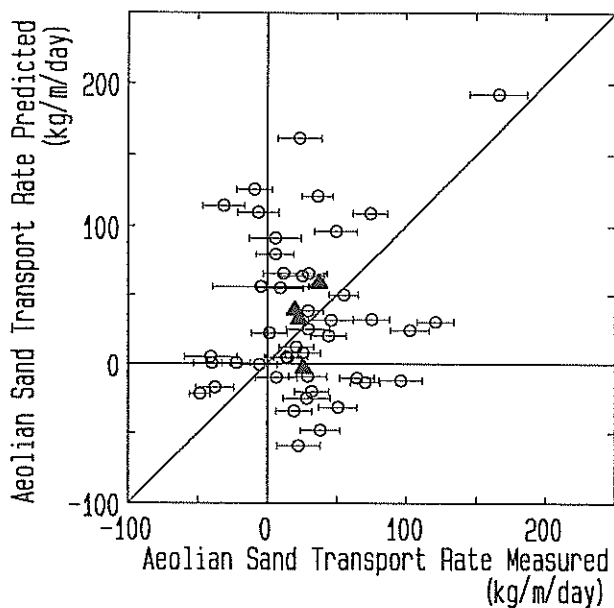


図-21 沖方向距離-67.5m 地点における飛砂量の実測値と計算値との比較

と仮定したときの岸沖漂砂量の実測値の誤差を示している。まず、1ヶ月平均の飛砂量を見てみると、両者のばらつきが大きく、相関係数は0.2であった。一方、1年平均の飛砂量を見てみると、データ数は少ないものの計算値は実測値に一致する傾向を示した。

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(28)の係数 K が変動することがHorikawaら(1984)によって報告されている。図-21に示された結果は、風速の不規則変動による係数 K の変動は1年平均をとると均されるものの、1ヶ月平均では残ってしまうことを示していると思われる。

また、1ヶ月平均の飛砂量の実測値と計算値との誤差が大きくなった原因の一つとして、降雨後の含水比の取り扱いが考えられる。降雨後の含水比の変化は日射量や気温、湿度、風速などの影響を受けると考えられる。しかし、本モデルではそれらとは無関係に1mm/hr以上の雨が合った場合にはその時点から24時間後までは含水比が高いことにより飛砂が発生しない(飛砂量=0)と仮定した。この仮定も1ヶ月平均の飛砂量の実測値と計算値との誤差が大きくなった一つの原因と考えられる。

b) 非平衡状態における飛砂量の岸沖分布

植生がない期間(1996年2月28日~1996年4月3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と本モデルによる計算値とを比較する。

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用した。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: 14m/s以上, 14~10m/s, 10~6m/s, 6~2m/s, 2~-2m/s, -2~-6m/s, -6~-10m/s, -10~-14m/s, -14m/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、岸沖方向風速、沿岸方向風速の各階級の中央値(14m/s以上と-14m/s以下の階級はそれぞれ16m/s, -16m/s)をベクトル合成することにより、各組み合わせ毎の風向と風速を求める。例えば、岸沖方向風速が6~2m/s(中央値4m/s)に属し、沿岸方向風速が10~6m/s(中央値8m/s)に属している場合には、風向き63.4°, 風速8.9mとなる。この風が、上流端のD.L.上12mの地点で吹くものとし、対数則分布を仮定して上流端の風速の鉛直分布を求め、入力条件とする。風速場の計算に引き続き飛砂量の計算を行い、最後に、各組み合わせの計算値を、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、3.2(2)a)と同様に、1mm/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。表-2は降雨を考慮したときの各計算対象期間の岸沖風速、沿岸風速の組み合わせの発生頻度を示したものである。裸地の割合 R_{bark} は、植生調査結果を基に0.6とした。

なお、計算に時間のかかる風速場の計算回数をできるだけ少なくするために、植生のある場合もない場合も飛砂量の計算は今回の二つの計算対象期間の中間にあたる1995年12月20日の測線IIの断面に対してのみ行った。ただし、計算値と比較を行う実測値としては、測量誤差や沿岸方向飛砂の影響などによる岸沖方向飛砂量の誤差を小さくするために3測線(図-2)での平均値を用いた。測線IIにおける飛砂量の計算値と3測線での飛砂量の計算値の平均値との差が小さいこと、ならびに対象期間初期の測線IIの断面に対しての計算値と今回計算に用いた1995年12月20日の測線IIの断面に対しての計算値との差が小さいことは代表的な風を用いての計算で確認しており、その結果は付録Dに示す。

図-22(1),(2)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状態の計算値とほぼ同じ値となっており、2種

表-2 計算対象期間における風速の頻度分布

植生なし, 2/28/96-4/3/96 (%)

		沿岸方向 m/s				
		0~2	2~6	6~10	10~14	14~
岸沖方向 m/s	~-14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-14~-10	0.00	0.13	0.25	0.00	0.00
	-10~-6	0.13	0.13	0.88	0.00	0.00
	-6~-2	1.89	5.16	2.64	0.25	0.00
	-2~2	10.71	12.22	5.16	1.64	0.00
	2~6	6.55	9.70	3.40	2.02	0.13
	6~10	5.29	5.67	0.76	0.13	0.00
	10~14	1.39	1.39	0.25	0.25	0.00
14~	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	

植生あり, 8/16/95-9/25/95 (%)

		沿岸方向 m/s				
		0~2	2~6	6~10	10~14	14~
岸沖方向 m/s	~-14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-14~-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-10~-6	0.61	1.43	0.00	0.00	0.00
	-6~-2	6.15	11.37	1.64	0.00	0.00
	-2~2	15.37	11.68	1.95	0.00	0.00
	2~6	12.70	10.14	0.61	0.10	0.00
	6~10	4.41	2.77	2.25	0.31	0.00
	10~14	0.41	1.23	1.95	0.20	0.00
	14~	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00

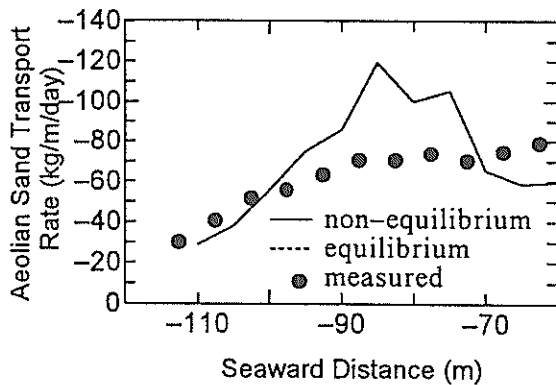


図-22(1) 岸沖方向飛砂量の実測値と計算値との比較 (植生なし)

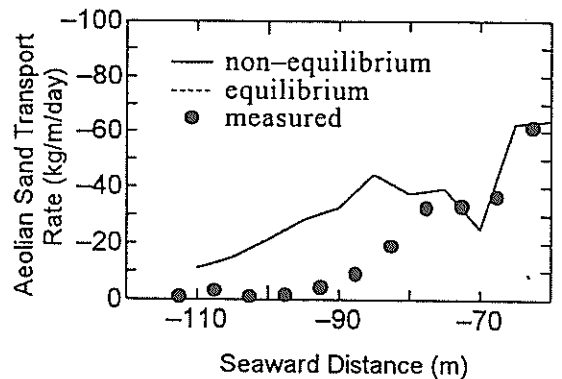


図-22(2) 岸沖方向飛砂量の実測値と計算値との比較 (植生有り)

類の計算値はほぼ1本の線で表されている。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大き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-70m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やや強調した形で表している。植生がある期間では、やはり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

していると言える。

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再現しているけれども、定量的には大きいところで誤差が 50kg/m/day ほどある。3.2 (2) a) でも述べたように、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漂砂量公式 (26) の係数 K が変動する (Horikawa et al, 1984)。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。

最後に、より簡便な方法で飛砂量を計算する方法を検討する。本計算法では風速場の計算を数多く行う必要がある。しかし、風速場の計算には時間がかかるため、その回数をできるだけ少なくしたい。そこで、風速場を岸沖方向と沿岸方向とに分け、岸沖方向の風速場は数値的に求めるけれども、沿岸方向の風速場は解析的に求め、その後両者を合成して全体の風速場を求める方法を試みた。

岸沖方向風速は風の進行方向を岸向き（あるいは沖向き）に取り、前述の方法で求める。沿岸方向の風速は、D.L.上 12m の地点の風速が場全域において上流端での入力条件に等しく、それより下方では対数分布が成立すると仮定して求める。飛砂を計算する際の摩擦速度は、まず、岸沖方向、沿岸方向それぞれに摩擦速度を求め、後にそれらをベクトル合成することによって求める。このようにして求めた摩擦速度を式 (38) に代入し、飛砂量を求める。なお、本方法では、岸沖方向風速と沿岸方向風速とを別々に求めるため、風向は計算領域全域で一定ではなく格子点毎に変化する。

図-23(1)、(2)はこの方法によって計算された岸沖方向飛砂量と前述の方法による計算値および実測値とを比較したものである。簡便な本方法による計算値と前述の方法による計算値との差は小さく、飛砂量の計算が簡便な方法でも推定できることが明らかとなった。

4. おわりに

海から陸にかけての風が卓越する海岸における現地観測の結果、高さ 10cm 程度の植生が後浜から砂丘前面にかけての地形変化に影響を与えることが明らかとなった。すなわち、植物が繁茂しているときには、植生の海側境界点から砂丘根元にかけての領域の海側で飛砂による堆積が起こっていたのに対して、植物が枯れているときには、砂丘側で堆積が起こっていた。これは、植生による飛砂の捕捉ならびに飛砂発生抑制の有無が原因である

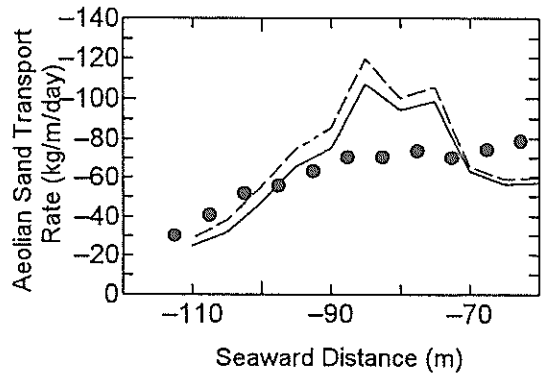


図-23(1) 岸沖方向飛砂量の簡便な方法による計算値（破線）と風を斜めに入射させたときの計算値（実線）、実測値（●印）との比較（植生なし）

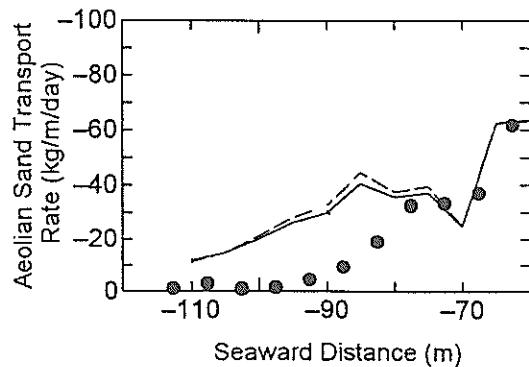


図-23(2) 岸沖方向飛砂量の簡便な方法による計算値（破線）と風を斜めに入射させたときの計算値（実線）、実測値（●印）との比較（植生有り）

と推察された。

続いて、後浜から砂丘前面にかけての領域に適用可能な砂草を考慮した飛砂量計算数値モデルを作成した。そのモデルの有効性を飛砂量の実測値を基に検討した結果、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。

なお、本研究における各執筆者の担当は以下の通りである。中島は粒径特性の検討、HORS と銚子地方気象台の風の相関の検討を担当した。上堂蘭は飛砂量の数値シミュレーションモデルの作成および検証を担当した。望月は現地観測システムの構築、ならびに 1995 年度の地

形、植生データの解析、波の遡上端の検討、含水比変化の検討を担当した。栗山は全体計画の作成と研究の取りまとめ、論文の執筆を行った。

(2000年11月14日受付)

謝辞

本研究の現地観測ならびにデータ解析では、柳嶋慎一主任研究官、中村聡志主任研究官、中官利之氏、内山雄介研究官、大島佳代子氏、増田みゆき氏、時田氏に手伝っていただいた。また、本論文の作成に当たっては、細川恭史海洋環境部長、内山雄介研究官、上岡智志研究官より有益な助言をいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

なお、本研究は平成7年度(1995年度)の港湾技術研究所シーズ研究に選ばれたことに始まる。本研究をシーズ研究に採択して下さった当時の野田節夫所長、堀江毅次長、片岡真二企画部長にも感謝の意を表します。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠(1990): 砕波帯内の底質粒度の変動特性—波崎海洋研究施設における現地調査—, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp.37-61.
- 加藤一正, 田中則男, 灘岡和夫(1981): 前浜の二次元的地形変化と潮位・波について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.207-211.
- 加藤一正, 吉松 晃(1984): 三次元の経験的固有関数法による深浅区解析法, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp.27-47.
- 加藤史訓・佐藤慎司・田中茂信・笠井雅弘(1997): 砂浜海岸における植生の地形変化に及ぼす影響に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1151-1155.
- 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.
- 栗山善昭・上堂蘭孝一(1999): 後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.501-505.

- 里深信行(1992): 差分法(I)非圧縮性流れ, 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.15-48.
- 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.
- 辻本哲郎・西澤謙二(1999): 海浜植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.506-510.
- 仲座栄三・津嘉山正光・砂川勇二・大山幸徳(1991): 捕砂・留砂機能を有する植生による砂浜の維持システムに関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.336-340.
- 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.
- 灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘(1996): 海岸空間アメニティ構成要素としての微気象および温熱環境の解析, 土木学会論文集, 第34巻, pp.193-204.
- 成瀬敏郎・福本 紘・中西弘樹(1992): 日本の海浜に見られる植生帯と地形断面形および堆積物の関係, 地形, 第13巻, 第3号, pp.203-216.
- 沼田 真(1978): 植物生態の観察と研究, 東海大学出版会, 275p.
- 橋本 宏, 宇多高明(1981): 経験的固有関数法による海浜地形変化の解析, 土木学会論文報告集, 第305号, pp.59-71.
- 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・針貝聰一(1981): 海岸における飛砂について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.574-578.
- 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.
- Aubrey, D.G. (1979): Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No.C10, pp.6347-6354.
- Birkemeier, W.A. (1984): Time scales of nearshore profile

changes, *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.1507-1521, 1984.

Bressolier, C. and Thomas, Y.F. (1976) : Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes, *J. Sedimentary Petrology*, Vol.47, No.1, pp.331-338.

Davidson-Arnott, R.G.D. and Law, M.N. (1990) : Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie, *Coastal Dunes: Form and Process* edited by Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. and Carter, R.W.G., John Wiley & Sons Ltd, pp.177-200.

Hesp, P.A. (1981) : The formation of shadow dunes, *J. Sedimentary Petrology*, Vol.51, No.1, pp.101-112.

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.

Hotta, S. (1988) : Sand transport by wind, *Nearshore Dynamics and Coastal Processes -Theory, Measurement, and Predictive Models-* edited by Horikawa, K., University of Tokyo Press, pp.218-238.

Kuriyama, Y. and Mochizuki, N. (1999) : Aeolian sand transport and vegetation in front of a foredune, *Coastal Sediments '99*, ASCE, pp. 2597-2608.

Niederoda, A.W., Sheppard D.M. and Devereaux, A.B. (1991) : The effect of beach vegetation on aeolian sand transport, *Proc. Coastal Sediments '91*, ASCE, pp.246-260.

Stam, J.M.T. (1997) : On the modelling of two-dimensional aeolian dunes, *Sedimentology*, 44, pp.127-141.

Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. (1995) : Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, *Marine Geology*, 126, pp.301-330.

Winant, D.C., Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. (1975) : Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986.

付録A HORSおよび銚子地方気象台における風速データの関係

本文中にも述べたように、1996年5月24日～1997年6月24日と1998年1月8日～11月24日にかけてHORS先端での風向・風速観測が正常に行えなかった。そこで、HORS先端の風向・風速を銚子地方気象台の風のデータより推定する方法を検討した。

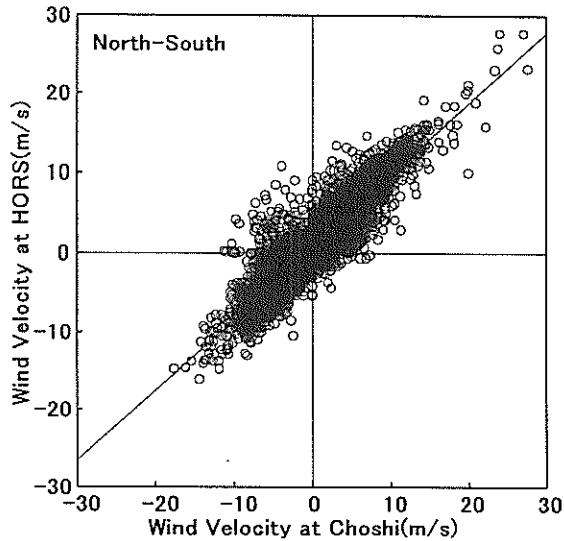


図-A.1(1) HORSと銚子地方気象台における風速の比較（南北成分）

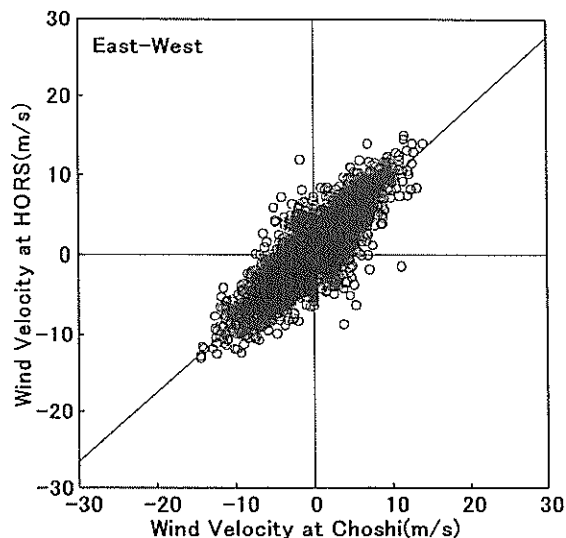


図-A.1(2) HORSと銚子地方気象台における風速の比較（東西成分）

検討に用いたデータは、1995年1月1日1時～12月31日24時までのHORS先端と銚子地方気象台（HORSより20kmほど南）の1時間間隔の風データである。

銚子地方気象台の背後にあたる南側には山があることから、南北方向と東西方向とにわけて両者の相関を求めた。すると、図-A.1(1),(2)に示す結果と、以下の相関式が得られた（北からの風と東からの風を正とする）。

$$v_{SN,HORS} = 0.9065v_{SN,choshi} + 0.6022 \quad (A.1)$$

$$v_{EW,HORS} = 0.9018v_{EW,choshi} + 0.4440 \quad (A.2)$$

ここで、SN, EW はそれぞれ南北, 東西成分であることを, HORS, choshi はそれぞれ HORS 先端の値, 銚子地方気象台の値であることを示している。

相関式は最小自乗法によって求めたものであり, 誤差の2乗平均値は南北方向には 1.99m/s, 東西方向には 1.87m/s であった。本文中の解析において HORS 先端での風データが無い場合には, 銚子地方気象台の風データを基に式 (A.1), (A.2) で HORS 先端での風向・風速を推定した。

付録B 風速モデルの検証

(1) 水平床

長さ 125m の水平床において, 以下の3種類の風速分布を上流端で与えたときの風速場を計算した: a) 粒径 0.2mm, 飛砂なし, b) 粒径 0.0037mm, 飛砂なし, c) 粒径 0.2mm, 飛砂あり。いずれのケースも上流端の風速分布として対数則分布を仮定しており, 砂面からの高さ

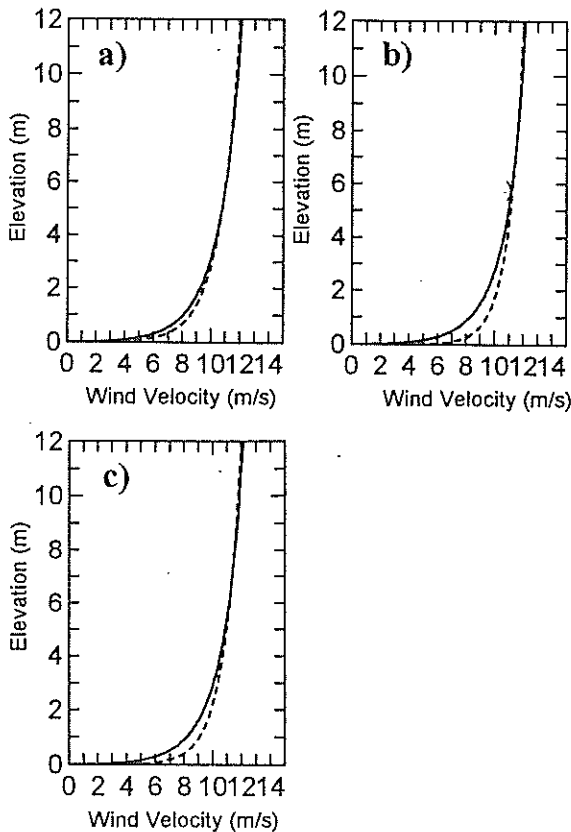


図-B.1 上流端における入力風速(破線)と下流端における風速の計算結果(実線)との比較

$z_r=12m$ で $v=12m/s$ とした。飛砂が無い場合には式 (25) で上流端の風速分布を計算し, 飛砂がある場合には式 (26) で計算した。水平方向の格子間隔は 2~5m で, 鉛直方向の格子間隔は 0.03~0.7m, 計算の時間ステップは 0.0008s である。

図-B.1 は上流端と下流端における風速の鉛直分布を比較したものである。下流端における計算値は上流端の風速に比べて砂面近傍でやや小さくなるものの, 風の進行方向にほぼ様な風速場が計算できていると言える。

(2) 斜面つき断面

続いて, 図-B.2 に示す3種類の斜面つきの断面上の風速場を計算した。上流端における風速の鉛直分布は, 粒径 0.2mm, 飛砂ありの仮定のもと, a)の断面では砂面からの高さ $z_r=5.0m$ で $v=8.0m/s$ とし, b)とc)の断面では $z_r=4.0m$ で $v=7.8m/s$ として式 (26) で与えた。水平方向の格子間隔は 0.2~0.6m, 鉛直方向の格子間隔は 0.02~0.3m で, 計算の時間ステップは 0.001s (断面 a)), 0.0001s (断面 b), c)) である。

図-B.3 は下流端における計算結果と理論値とを比較したものである。理論値は, 地表面から地表面上 25m までの範囲で風量が保存されると仮定した上で, 飛砂が

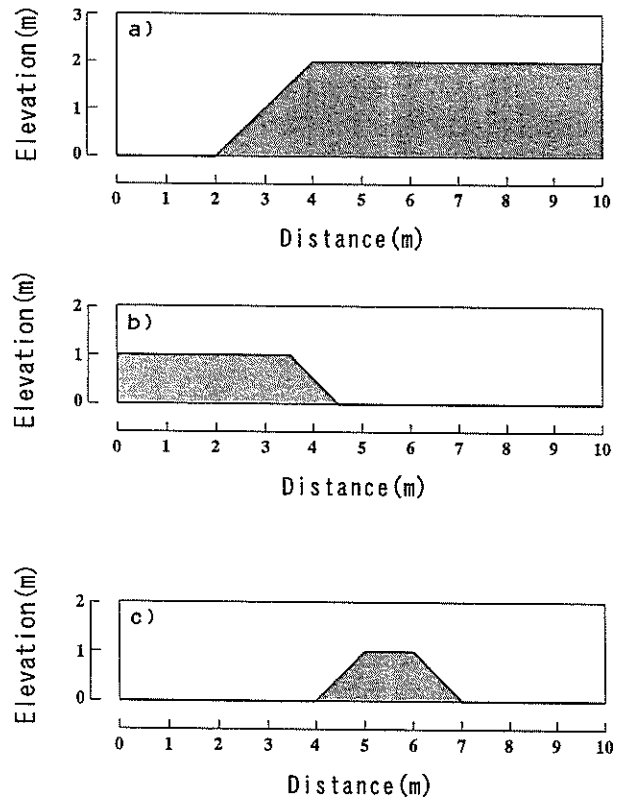


図-B.2 計算断面

ある場合の風速の対数則分布を示す式 (26) (粒径 0.2 mm) より求めた。水平床上での計算結果同様、計算値は理論値に比べて底面近傍でやや小さくなるものの、計算値は理論値にほぼ一致していると言える。

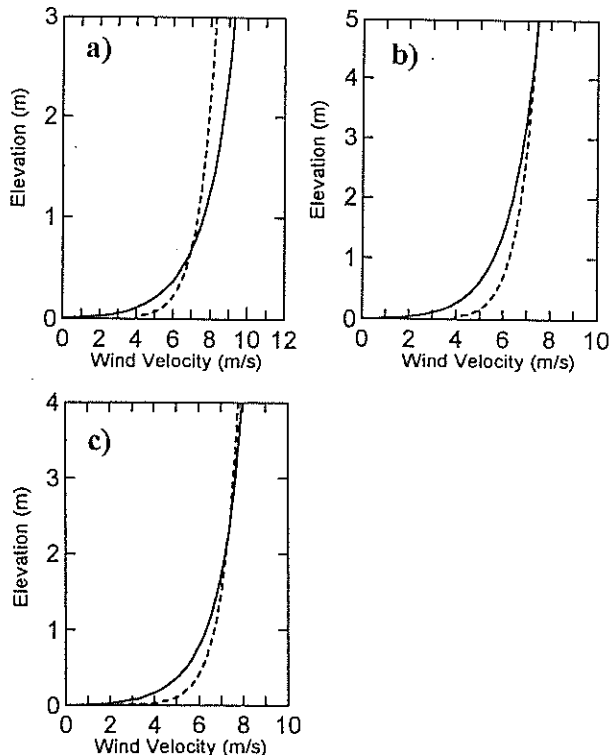


図-B.3 下流端における風速の理論解(破線)と計算結果(実線)との比較

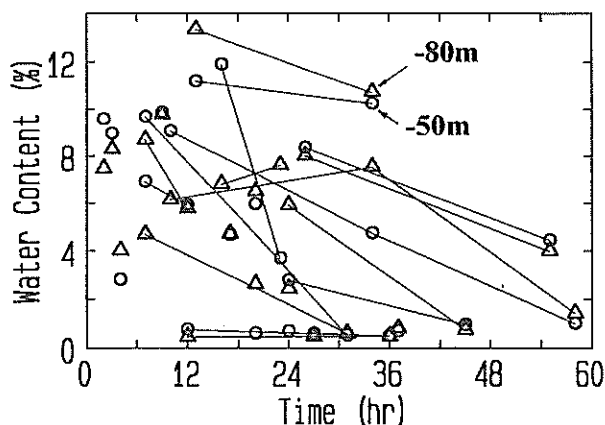


図-C.1 含水比の変化

付録C 降雨後の含水比の変化

降雨後の含水比の変化を図-2の調査領域で調べた。測線II上の沖方向距離-50mと-80mの地点において表面の砂を約60g採取し、湿潤重量 w_w と乾燥重量 w_d より含水比 $(w_w - w_d) / w_d$ を求めた。

図-C.1はその結果をまとめたもので、横軸は降雨終了後からの時間を示している。本結果には夏のデータも冬のデータも混在しているため、当然のことながら含水比の変動には大きなばらつきがある。しかしながら、ここでは降雨を季節とは無関係に一律に取り扱うこととし、含水比が飛砂量に及ぼす影響の堀田(1985)による検討結果を基にすると含水比が2%以下になると含水比の影響がほとんどなくなることを考慮して、1mm/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。

付録D 1995年12月20日の測線IIの断面を用いての飛砂量計算の妥当性について

植生のない期間とある期間の飛砂量の計算を1995年12月20日の測線IIの断面に対して行ったことの妥当性を検討するために、岸沖方向風速12m/s、沿岸方向風速0m/sの風を用いて、1995年12月20日の測線I, II, IIIの断面と1995年8月16日(植生がない期間)と1996年2月28日(植生がない期間)の測線IIの断面に対する飛砂量を植生無しと仮定して計算した。

図-D.1(1)は1995年12月20日の測線I, II, IIIの断面に対しての飛砂量を比較したもので、図-D.1(2)

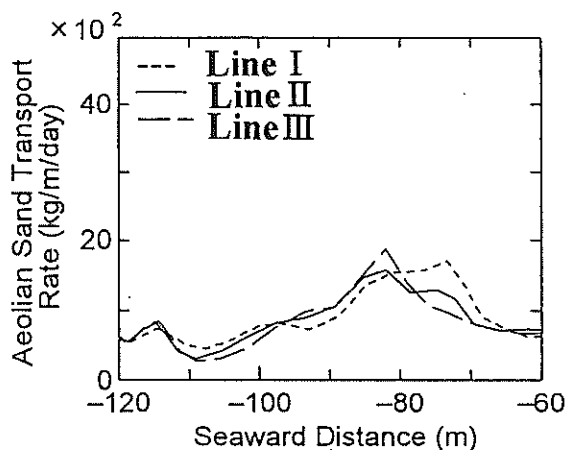


図-D.1(1) 断面I, II, III(1995年12月20日)における岸沖方向飛砂量の計算値の比較

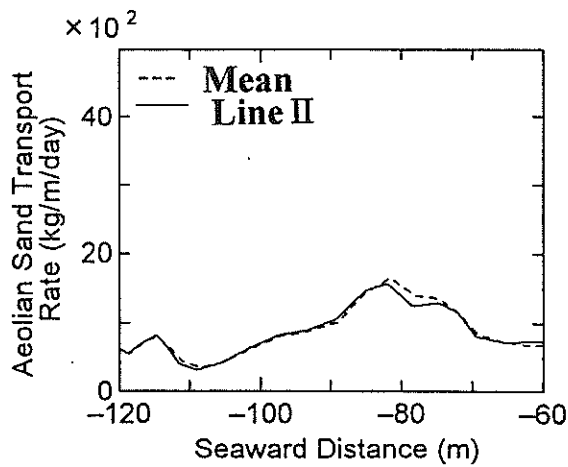


図-D.1(2) 断面II (1995年12月20日)における岸
沖方向飛砂量の計算値と3断面の計算値の
平均との比較

は1995年12月20日の測線IIの断面に対しての飛砂量
と3断面に対しての飛砂量の平均とを比較したものであ
る。これらの図から、測線IIの断面に対する飛砂量が平
均の飛砂量にほぼ等しいことがわかる。

一方、図-D.2は3期間の測線IIの断面に対する飛砂
量を比較したものである。1995年12月20日から1996

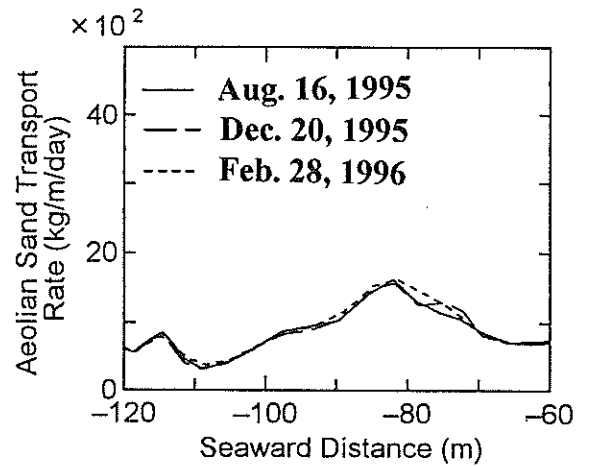


図-D.2 断面IIに対する3期間の岸沖方向飛砂量の計
算値の比較

年2月28日までの間の地形変化量が小さいことから3
期間の断面に対する飛砂量の差は小さい。

以上の検討より、植生のない期間とある期間の飛砂量
の計算を1995年12月20日の測線IIの断面に対して行
ったこと妥当であると言える。