

海岸砂丘の長期的な地形変動特性とその再現

有 働 恵 子*・武 若 聡**

1. はじめに

海岸管理を行う上で、広域の後浜地形や飛砂量に関する情報は重要な基礎資料であるが、沿岸域における地形変動の研究は前浜に限られたものが多く、後浜に関する知見は十分に得られていない。海岸砂丘は、砂丘林とともに後浜から内陸部への飛砂を防いでおり、砂浜の安定化のためにも重要な役割を担っている。海岸砂丘は不安定で、日本各地で砂丘の侵食が見られることが報告されている。例えば、西ら (2000) は鹿児島県吹上浜海岸における砂丘風食地形の空間分布特性について述べているが、例えば、長期的な変動特性や植生と地形変動の関係など、不明な点が多い。

本研究では、航空写真解析により鹿島灘の複数海岸の長期的な砂丘地形の変動特性を調べ、また、植生の影響を考慮した数値モデルによる砂丘の地形変動計算法について検討する。

2. 長期的な砂丘地形の変動特性

2.1 調査地の概要

鹿島灘沿岸は、かつては砂浜幅が 100 m を越える遠浅の海岸であったが、昭和 50 年代頃から顕著に侵食されるようになった。調査地は、茨城県鹿島灘に面する角折、下津、豊ヶ浜海岸である (図-1)。航空写真測量による角折海岸の概況を図-2 に示す。前浜の陸側には通常波が作用しない平坦な部分 (後浜) があり、これに比高約 5~7 m の小砂丘が沿岸方向に複数並んで続いている。海岸植生は、砂丘海側の平坦な部分ではパッチ状に、砂丘部分では密に連続的に繁茂している。これらの海岸では、飛砂防止のために沿岸方向に連続した砂丘が人為的に造成されたが、これらは造成後徐々に変形し、小砂丘に分裂している。一旦小砂丘に分裂すると、小砂丘間のギャップを通じて砂丘の陸側と海側の砂の行き来がより活発になる。鹿島灘沿岸では主に N~ENE 方向からの風 (海風) が卓越しているため、このギャップを通じて後浜から陸側へ砂が流出していた。

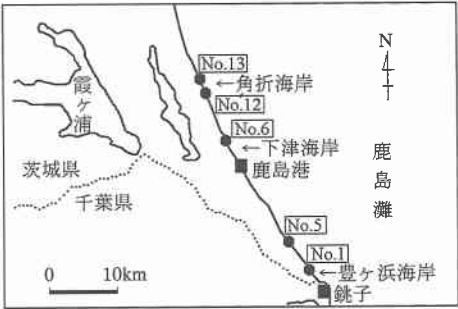


図-1 調査地の位置 (●: ヘッドランドの位置)

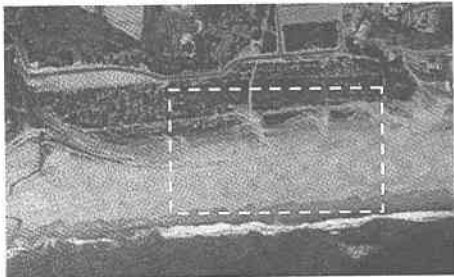


写真-1 角折海岸の航空写真 (1984 年)
破線枠 (約 300 m×175 m): 図-2 参照

2.2 航空写真測量の概要

茨城県土木部河川課は、1984 年以降 3 年毎に茨城県的全沿岸の航空写真 (縮尺約 1/8000) を撮影しており、これに国土地理院が撮影した航空写真を加えて写真測量・判読を行った。写真-1 は航空写真の例である。航空写真測量とは、立体視の原理を利用する図化機を用い、2 枚の航空写真より対象物の空間位置を求めることである。写真測量の標定誤差は、水平方向 0.35 m 程度、鉛直方向 0.7 m 程度である。

2.3 測量結果

いずれの海岸でも、連続した砂丘には造成後約 10 年間で切れ目が入り、沿岸方向に並ぶ波長約 100 m の孤立した砂丘に分裂していた。このような砂丘の分裂に関して、Bagnold (1941) は、卓越風向に対して直角に存在する長い横列砂丘の不安定性を指摘している。連続した砂丘の頂部に小さなギャップができると、そのギャップを通過

* 学生会員 工修 筑波大学大学院工学研究科
** 正 会 員 工博 筑波大学助教授 機能工学系

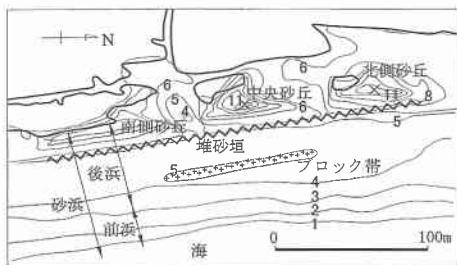


図-2 角折海岸の概況 (1996年)

× : 1996年時点の小砂丘頂部位置, 太線 : 海岸林輪郭, 細線 : 等高線 (T.P. 0 m 基準, 1 m 間隔, 単位 [m])

する風速は、局所的に増大する。その結果としてギャップが拡大し、砂丘は分裂するが、分裂した部分の風下に砂が堆積し、新たな砂丘が作られる。調査地においても同様の変動現象が見られることから、連続した海岸砂丘の分裂のメカニズムは、横列砂丘の不安定性に類似したものである可能性が高い。

アメダス観測所「鹿島」の風向・風速データより推定した1990～1996年の角折海岸の主な卓越風向はN～ENE方向(図-3, 風向①)であるが、春から夏にかけてはESE～SE方向(同図, 風向②)も卓越する。写真-1に示した砂丘林内への砂の侵入状況から判断すると、連続砂丘の分裂は主に風向①の風によってもたらされたと考えられる(有働・武若, 2001)。

連続砂丘が小砂丘に分裂した後の小砂丘の地形変動特性を説明する。角折海岸の中央砂丘(図-2)の1984～1999年における地形変動を図-3に示す。図より、角折海岸では連続砂丘が小砂丘に分裂した後、パルハン(三日月型)状の砂丘が形成されていた。Line A, Line B, Line Cに沿った砂丘断面の変化を図-4に示す。地盤高は、標高7mを基準としたときの高さである。Line Aに沿っての断面地形を見ると、風向①の風によってRegion II部分は侵食傾向にRegion I部分は堆砂傾向にあることが捉えられている。Line Bに沿っては、砂丘の後縁方向(B₂方向)への発達の様子が捉えられている。これは風向②の風の作用によるものと考えられる。Line Cに沿っては大きな変化は見られないが、詳細に見るとC₂側(北側)はほとんど変化していないのに対して、C₁側(南側)の変化が目立つ。図-3の1993～1999年の地形変化を見ると、Region III部分が風向②の方向に沿って侵食されており、C₁付近の侵食傾向は主に風向②の風の作用によるものと考えられる。

このように、砂丘の場所によって地形変動の傾向が異なる原因については、海岸植生の影響もあわせて考慮する必要がある。これまで、栗山・望月(1997)、加藤・佐藤(1998)によって地形変動には海岸植生が影響を与え

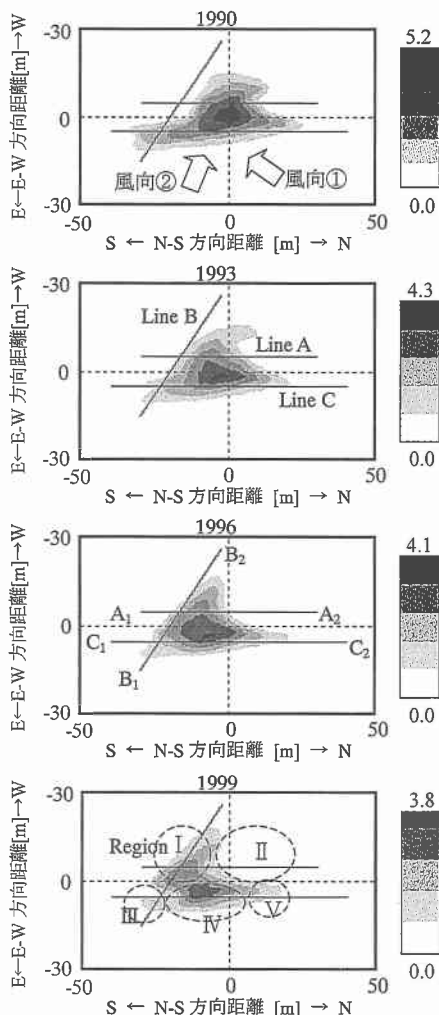
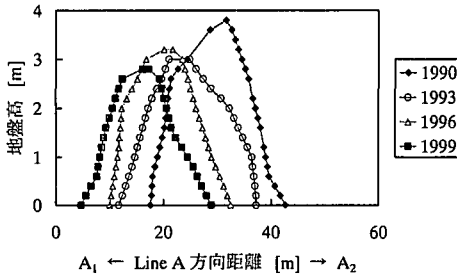


図-3 角折海岸の中央砂丘の地形変動 (図-2 参照)

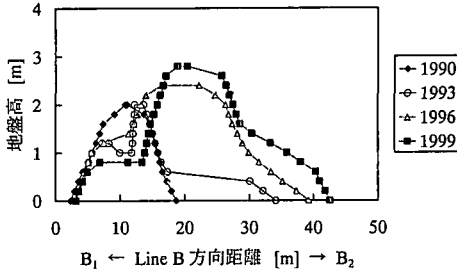
ていること、さらに、有働・武若(2001)によって海岸植生の飛砂捕捉能力には限界があり、植生が繁茂できないほど地形変動が大きい部分では植生による飛砂の捕捉が期待できないこと等が報告されている。

植生繁茂状況を調べたところ、Region I, II部分のように地形の変動が大きい部分にはほとんど植生が存在しておらず、Region III, IV, V部分には植生が見られた。しかし、Region III, V部分は連続砂丘の切れ目付近であるためRegion IV部分と比較すると、植生の繁茂量は少ない。

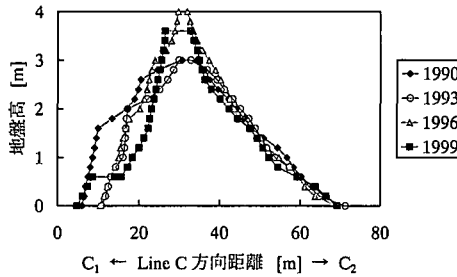
Line A と Line B に沿った変動については、植生の繁茂量が少ない部分ほど地形変動が顕著になっており、これは植生の繁茂状況を考慮することでおおよその説明がつく。Line C に沿っての地形変動は、単純に植生の繁茂量を考えるだけでは説明できない。Region III, V部分は



(a) 砂丘頂部の風下方向への移動



(b) 砂丘の後縁方向への発達



(c) 砂丘海側断面の変動

図-4 中央砂丘断面の変化

砂丘切れ目付近にあたるが、Region IIIは風向②の風に対して小砂丘の風上側に位置していることから、主に風向②の風の影響を受けて地形が変動し、Region Vはその位置関係から風向①の風の影響を受けて地形が変動すると考えられる。風向①、②の風はともに海風で、年間では風向①の風が風向②の風より卓越しているにもかかわらず、Region III部分の風向②の風による地形変動量の方がRegion V部分の風向①の風によるそれより大きい。これより、主な卓越風向の風上からの飛砂に対する植生の捕捉能力は大きい、それ以外の風向に対しては比較的小さいと推察される。

3. 数値モデルによる砂丘の地形変動の計算

3.1 数値モデルの概要

初期地形として、航空写真測量より得られた角折海岸

中央砂丘 (1990 年) の地形データを与え、1990 年から 1993 年にかけての砂丘の変動を再現することを試みる。計算領域は、沿岸方向 90 m × 岸沖方向 45 m の領域である (後に示す図-6 参照)。計算領域に 1 m × 1 m の正格子を設定し、各格子に地盤の高さを代表する変数 $h(i, j)$ を配置する。各格子について風を外力とする砂の移動を考え、斜面の傾斜が安息角を越えた場合には斜面に沿って砂が滑り落ちるように砂を移動させる。風のデータとしては、地形変動の影響を考慮せず、初期地形上で求めた風向・風速別の風場を与える。砂丘列方向 (N-S 方向、図-2 参照) には周期境界条件を適用した。

砂粒子の飛行距離 $L[m]$ および単位時間・単位面積に着地する砂の量 $q[m^3/m^2s]$ は、地盤の局所的傾き $\nabla h(i, j)$ の影響を受けるものとして、次式のように与えた (Nishimori・Yamasaki, 1998)。

$$L(i, j) = L_0(\tanh(\nabla h(i, j)) + 1) \quad [m] \cdots \cdots (1)$$

$$q(i, j) = q_0(\tanh(\nabla h(i, j)) + 1) \quad [m^3/m^2s] \cdots \cdots (2)$$

$\nabla h(i, j) = 0$ のときの $L = L_0$ 、 $q = q_0$ は河村公式 (堀田, 1985) より与えた。

$$L_0 = (1 - c_v) \times (k_a/g)(u_* + u_{*c})^2 \quad [m] \cdots \cdots (3)$$

$$q_0 = (1 - c_v) \times k_p(\rho_a/\rho_s)(u_* - u_{*c}) \quad [m^3/m^2s] \cdots \cdots (4)$$

ここで、 u_* は砂丘表面の摩擦速度 $[m/s]$ 、 u_{*c} は移動開始摩擦速度 $[m/s]$ 、 ρ_a は空気密度 ($=1.226 \text{ kg/m}^3$)、 ρ_s は砂の密度 ($=2.65 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)、 g は重力加速度 ($=9.81 \text{ m/s}^2$) である。 $k(=k_a k_p)$ は、栗山・上堂 (1999) の研究を参考にして、それぞれ 0.8、0.5 で与え、 $k_p=1.6$ とした。 c_v は植生の飛砂捕捉能力を示すパラメータで、 c_v が風向により異なること、植生の繁茂状況が空間的に異なることを考慮し、 $0 \leq c_v \leq 1$ の範囲で分布をもたせた。 $c_v=0$ のときは裸地、 $c_v=1$ のとき地面は植生で密に覆われている。本研究では、栗山・上堂 (1999) の扱いと同様に、この L_0 および q_0 が $(1 - c_v)$ と比例関係にあるものとした。調査地の平均地盤高における摩擦風速 u_{*a} は有働・武若 (2001) の扱いと同様にアメダスデータを用いて対数則より求めた。この u_{*a} が、砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} を超えたとき、3次元流体解析ソフト

表-1 α-FLOW による風場解析の計算

基礎方程式	3次元非圧縮性流れの N-S 方程式、連続の式
境界条件	砂丘表面で対数則を使用
乱流モデル	k-ε モデル
座標系	デカルト座標系
対流項の扱い	3次精度の風上差分

α -FLOW（富士総合研究所）を用いて初期地形周りの風場の計算を行い、砂丘表面の摩擦速度 u_* を求めた。なお、これに先立ち、 α -FLOW の精度は、土屋ら（1995）

の実験結果の再現計算を行うことにより確認した。

風場の計算領域は平面領域 $90\text{ m} \times 45\text{ m} \times$ 高さ 10 m の領域である。風場計算の際の計算について表-1 にまとめた。初期地形としては、等高線間隔 1 m のデータを 0.2 m 間隔に線形補間したデータを与えた。以上により得られた砂丘表面における摩擦速度の計算結果の一例を図-5 に示す。計算結果には、砂丘頂部付近で風速が増加する等、風場の想定される特徴が再現されている。

3.2 計算結果

初期地形として 1990 年 12 月の地形（図-6(a)）を与えたことを考慮し、風場を計算する際には 1991 年 1 月～1993 年 12 月の風向・風速データを与えた。1993 年時点の計算結果と 1993 年の航空写真測量の結果を図-6 (b), (c) にそれぞれ示す。1990～1999 年にかけての地形変動の特徴である図中 Region A の堆砂傾向、Region C

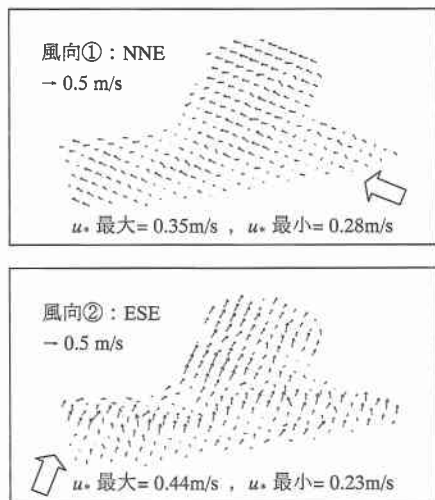
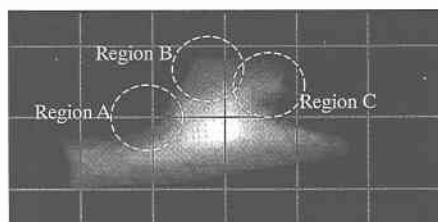
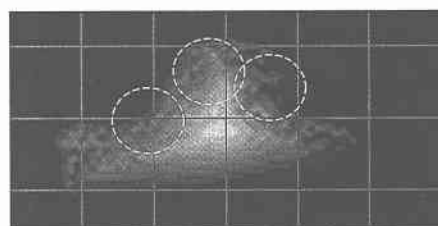


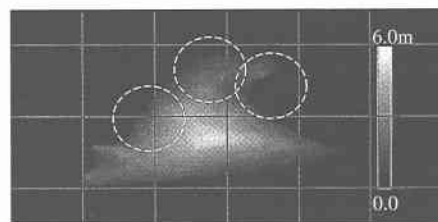
図-5 砂丘表面の摩擦速度の分布
(地形：1990 年の角折海岸中央砂丘，図-3 参照)



(a) 1990 年，初期地形

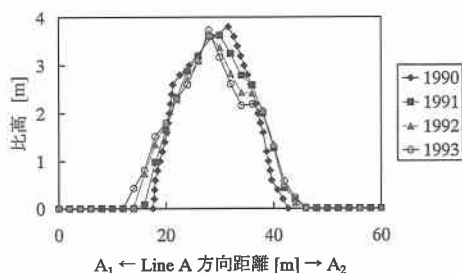


(b) 1993 年，計算結果

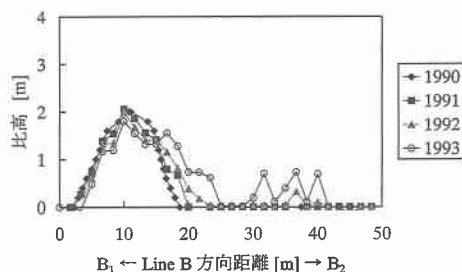


(c) 1993 年，航空写真測量結果

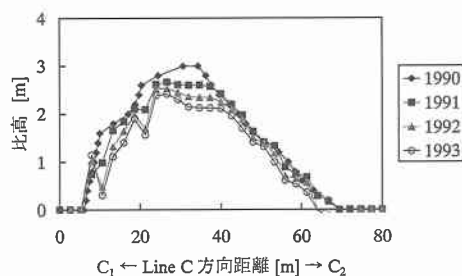
図-6 航空写真測量結果と計算結果の比較
図中の格子間隔：15 m，地盤高：標高 7.0 m を基準とした高さ



(a) 砂丘頂部の風下方向への移動



(b) 砂丘の後縁方向への発達



(c) 砂丘海側断面の変動

図-7 砂丘断面の変化（1990 年の初期地形から 1993 年にかけての計算結果，図-6 参照）

の侵食傾向、砂丘の後縁方向への発達 (Region B) などが再現されていた。式 (1), (2) で示される地形勾配の効果を無視して計算したところ、ほとんど同じ結果が得られた。しかしながら、地形勾配の効果を考慮しない結果を考慮した場合に比べると、砂丘風上側斜面の侵食傾向、風下側の堆砂傾向が、大きく見積もられる傾向にあった。風場の計算を数値モデルに導入することで、砂丘頂部の移動、Region A の堆砂傾向、Region B の砂丘の後縁方向への発達など砂丘全体の形状変化の再現が可能となり、また、植生の効果を考慮することで Region C の侵食傾向などの局所の変動をより良好に再現することが可能となる。

計算結果から求めた、図-4 と同じ砂丘断面についての地形変化を図-7 に示す。航空写真測量結果より得られた、砂丘頂部の風下への移動、砂丘の後縁方向への成長等、バルハン状の砂丘の変形特性が定性的に再現されている。

地形変動計算の結果には現実には観察されない凹凸が見られる (図-6(b), 図-7)。この主な原因は、計算の過程で地形が変化しているにもかかわらず、風場の変化を考慮していない点にあると考えている。本来ならば、地形の変化とともに風場の計算を行わなければならないが、計算格子の自動生成プロセスに制約があり、ステップ毎に地形変動を与えて風場計算を行うことは現時点で困難である。また、本論の試みでは、地形変化に伴う植生繁茂状況の変化を考慮していないこと、斜面上の飛砂の取り扱い等、にも問題が残されている。しかしながら、平坦な地形上の平衡状態にある場の飛砂量公式である河村公式を用い、簡略化された形式で地盤の傾斜、植生の影響を考慮することで、定性的には小砂丘の変形過程を再現することが可能であることを示した。

4. 結 論

本研究をまとめると以下ようになる。

- 1) 角折海岸の連続砂丘は小砂丘に分裂し、その後、バルハン状の砂丘に変形していた。
- 2) 砂丘の地形変動量は風向により異なっていたことから、角折海岸の植生の飛砂捕捉能力は風向により異なっていると見られる。
- 3) 既存の飛砂量公式に地盤の傾斜、植生の影響を考慮した数値計算を行い、バルハン状の砂丘の形成を定性的に再現した。

謝辞：航空写真の複写を許可して頂いた茨城県土木部河川課、研究全般にわたり貴重なアドバイスを頂いた筑波大学西村仁嗣教授に感謝の意を表する。本研究の一部は(財)住友財団の研究助成金の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 有働恵子・武若 聡 (2001): 後浜の地形変動に関する研究, 土木学会論文集, No. 677, II-55, pp. 175-187.
- 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.
- 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.
- 土屋 学・近藤宏二・眞田早敏 (1999): 設計風速に及ぼす局所地形の影響—種々の形状の地形周りにおける風速増幅特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 119-122.
- 西 隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・牟田神宗征・中村俊一 (2000): 砂丘風食地形に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 581-585.
- 富士総合研究所: 汎用 3 次元流体解析システム FUJITSU/α-FLOW, URL: <http://www.fuji-ric.co.jp/ccse/service/alfafLOW/> (2001 年 5 月現在)。
- 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.
- Bagnold, R. A. (1963): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265 p.
- Nishimori, H. and M. Yamasaki (1998): A Simple Model for the Various Pattern Dynamics of Dunes, International Journal of Modern Physics B, Vol. 12, No. 3, pp. 257-272.