

後浜の地形変動に関する研究

有働恵子¹・武若聡²

¹学生会員 工修 筑波大学大学院 工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

²正会員 工博 筑波大学助教授 機能工学系 (同上)

茨城県鹿島灘に面する角折海岸で後浜の現地調査を行い、詳細な地形変動、植生の分布状況、風況等の相互の関係を検討した。さらに、航空写真を用い、茨城県鹿島灘沿岸における複数海岸の後浜地形の長期的な変動を調べた。現地調査の結果には、植生の表覆度と後浜の地盤高変化の間に正の相関関係があることが見られた。航空写真測量の結果には、人為的に造成された連続砂丘に約10年で切れ目が入り、沿岸方向に並ぶ複数の小砂丘に分裂することが見られた。連続砂丘が分裂した後、海岸線の海側に新たな砂丘が形成されるまでの間、砂浜面積が減少するとともに、海岸林面積も減少していた。1984年～1999年の期間、角折海岸の砂丘土砂量は増減を繰り返しながら一定の値に収束する傾向にあった。

Key Words : coastal morphology, backshore, dune, field survey, remote sensing

1. はじめに

砂浜海岸の侵食は数十年来の問題となっており、その対策を考える上で、沿岸域の地形変動特性を明らかにすることは重要である。砂浜は、平均干潮汀線から平均満潮汀線付近までの前浜と、前浜の陸側で砂丘帯までの後浜から成っている。前浜に比して、後浜の地形変動に関する研究成果の蓄積は少ないようである。例えば、栗山・望月¹⁾、加藤・佐藤²⁾は現地調査を行い、砂草と地形変動の関係等を議論しているが、短期間の調査結果に基づく考察にとどまり、長期的な地形変動を議論するには至っていない。

本研究では、鹿島灘沿岸の海岸において継続的に後浜の現地調査を行い、短期的な地形変動を調べるとともに、航空写真の判読と測量に基づいて、長期的な地形変動も調査した。これらを総合することにより、後浜の地形変動特性を検討する。

2. 現地調査に基づく短期的な後浜地形変動特性の検討

本節では、1998年10月から2000年6月まで、約2～3ヶ月に1回の割合で計9回行われた調査結果について述べる。また、アメダスデータを用いて推定した調査地の風況と

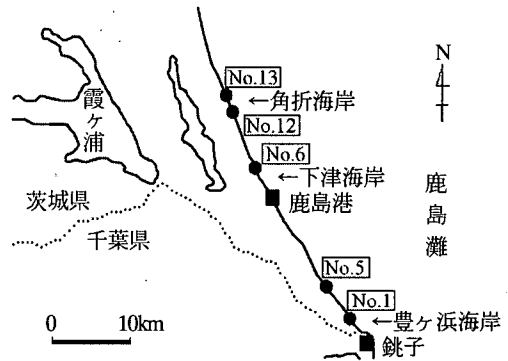


図-1 調査地の位置

●: ヘッドランドの位置

地形変動の関連性等について検討する。

(1) 調査地の概要

鹿島灘沿岸は、かつては利根川などからの土砂流出によって、砂浜幅が100mを越える遠浅の海岸であったが、昭和50年代に入る頃から顕著に海岸が侵食されるようになった。自然の土砂供給が期待できないため、茨城県では全国に先駆けて自然の原理を応用したヘッドランド工法を採用し(1985年～1993年に設置)、海岸侵食間

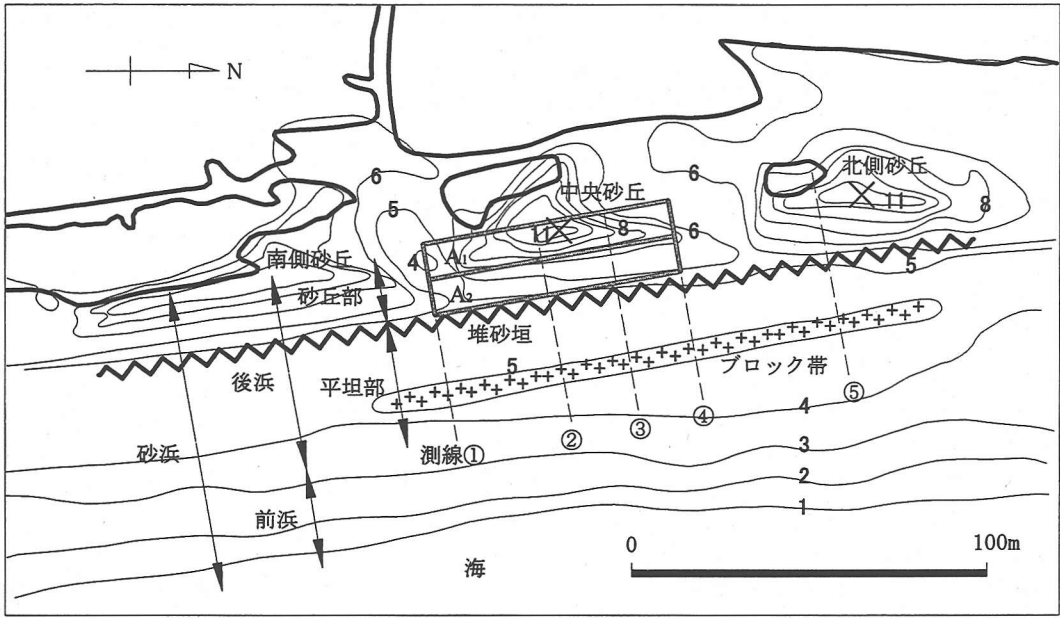


図-2 調査地の概況 (1996年航空写真測量結果を基に作成)
 太線：海岸林輪郭, 細線：等高線 (T.P.0m基準, 1m間隔, 単位[m]),
 ×：1996年時点の小砂丘頂部位置
 ブロック帯の設置時期：1979年～1981年, 堆砂垣の設置時期：1990年～1993年,
 領域A1, A2：3章に示す土砂量算定領域



写真-1 中央砂丘頂部から見た北北東方向の眺望

題に取り組んでいる³⁾。

調査地は、鹿島灘に面し、ヘッドランドNo.12とNo.13の間に位置する鹿嶋市の角折海岸（鹿島港より北方約13kmの地点）である（図-1）。

図-2に調査地周辺の概況を示す。航空写真測量については後述する。調査地の砂浜幅は約85mで、前浜の背後には通常波が作用しない平坦な部分があり、これに比高約7mの小砂丘が沿岸方向に複数並んで続いている。後

浜にはブロックが沿岸方向に帯状に設置され、後浜の平坦な部分と小砂丘の間には堆砂垣がある。現在のブロックの露出部分の高さは約0.5m、形状は六角柱で、ブロック周辺には顕著に砂が堆積している。過去約10年間で0.5m程度堆砂していると推定される。堆砂垣の高さは約0.5m、目合いの大きさは約0.03mであり、堆砂垣周辺でも堆砂が進んでいる。また、地形変動量の大きい部分では堆砂垣が崩壊している場合が多い。堆砂垣を挟んで陸側を砂丘部、海側を平坦部と定義する。海岸植生は、後浜の平坦部ではパッチ状に、その背後の砂丘部では密に連続的に繁茂している。砂丘部の陸側には、飛砂を防止する海岸林が植栽されているが、砂浜から小砂丘間の陸側への飛砂によって木々が砂に埋没し、局所的に海岸林の海側限界が後退している。調査域は、ブロック帯より海側に5m程の位置から小砂丘頂部にかけてである。

写真-1は、中央砂丘（図-2）頂部から見た北北東方向の眺望である。砂丘部の海側には複数列の堆砂垣が設置されており、その海側にはブロックが帯状に設置されている。ブロック帯、堆砂垣、砂丘部では特に植生が繁茂している。

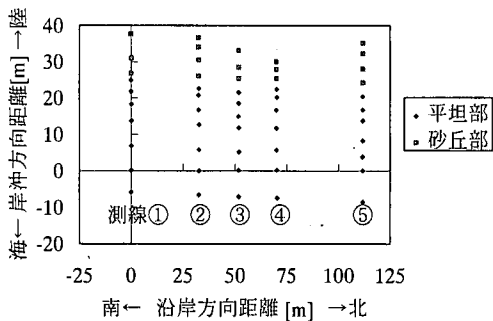


図-3 調査点の位置

(2) 調査項目と調査方法

調査域には、ブロック帯と直交する5つの測線を設定し(図-2)、各測線に沿ってそれぞれ10点前後の調査点を設けた(図-3)。ここで、測線②上のブロックの位置と高さを調査結果表示の際の原点とした。5つの測線は、砂丘列に対しておおよそ直交し、測線②、⑤は中央、北側砂丘頂部を、測線①、④は小砂丘間を、測線③は中央砂丘の北側を通っている(1998年10月時点)。調査日は、1998年10月27日、12月11日、1999年3月11日、5月18日、7月22日、9月7日、12月9日、2000年3月2日、6月1日である。

a) 海岸断面地形の測量

トータルステーション(光波測距機)を用い、各調査点の地盤高を測量した。

b) 植生分布調査

調査は、測線①～⑤の平坦部にある調査点(35点)と、植生の繁茂が著しい測線②の砂丘部にある調査点(4点)で行った。調査点に1m²四方のコドラートを設置して地表の写真を撮り、表覆度(コドラート内で植物が地上投影で占める割合)⁹⁾を調べた。なお、表覆度の定義は付録³⁾に示す。

c) 地表面の砂の粒度分布測定

1999年3月以降、測線①、②、④上の調査点の表面の砂を採取し、粒度試験を行った。粒度試験は土質工学会基準(JSF T 131-1990)⁹⁾に準拠する。ここでは、呼び寸法[μm]、74、110、250、420、840、2000、4760のふるいを用い、ふるい分析を行った。粒径加積曲線から、通過質量百分率50%に対する粒径D₅₀を読み取った。

d) 調査地における風況の推定

調査地から最も近いアメダス観測所「鹿島」で取得された風速・風向データ(1998年10月～2000年3月)を用い、ある調査日から次の調査日までの期間の調査地における風況を次の手順で推定した。

アメダス観測所「鹿島」で測定された風速データ u_A よ

り、調査地における摩擦速度 u_f を推定し、これが砂の移動開始摩擦風速 u_c 以上のとき、風速 u_A を風向別に積算した。調査が行われた間隔が異なるため、得られた積算値は1ヶ月分の値に換算した。これを推定風配と定義し、単位は[(m/s)・hour/month]である。以上の手順の詳細は付録³⁾に説明する。

降雨の取り扱いに関しては、栗山・望月⁹⁾と同様に、10mm/hour以上の降雨があった場合、その時点から24時間は砂の移動が起こらないものとし、アメダス観測所の風速を $u_A=0$ m/sとした。

(3) 調査結果

a) 海岸断面地形の変化

測線①～⑤に沿った地盤の高さの測定結果を図-4に示す。ここでは、変化を見やすくするため、1998年10月と2000年6月の時点の結果を示す。

平坦部では特にブロック帯(岸沖方向距離0m地点)と堆砂垣付近で地盤が局所的に高くなっており、これらの構造物は少なくとも長期的には砂の堆積を促進している。

1998年10月から2000年6月までの約1年7ヶ月の間に、平坦部では、いずれの測線においてもわずかではあるが地盤高が上昇していた。砂丘部では、測線②、③、⑤に沿った地盤高は上昇しているのに対して、測線①、④に沿った地盤高は下降していた。

b) 植生分布

調査地では、表-1に示した12種の植物が見られた。平坦部では、ハマニガナ、ハマヒルガオ、コウボウムギ、ハマグルマが見られた。砂丘部では、チガヤ、コウボウムギが多く見られ、シロヨモギも確認された。

コウボウムギ、ケカモノハシ、ハマグルマは、群落をつくって繁茂し、砂を捕捉していた。チガヤ、コウボウムギ、ケカモノハシ、ハマグルマは、冬期には枯れるものの、この間も地中で根を深く張って砂を捕捉しており、侵食を防ぐ効果があると考えられる。

コウボウムギの地中の様子を調べたところ、飛砂による堆砂量が多い地点では、根と葉の間の地下茎が50cm程度の長さまで伸びているものがあつた。地下茎の長さや堆砂量との間には、相関関係があると考えられる⁹⁾。

各測線に沿った1998年10月～2000年6月の平均表覆度と標準偏差を図-5に示す。標準偏差は最大18.6%、平均7.2%で、表覆度を求める際の誤差は最大5%程度である。表覆度を求める際に枯れた植生も含めてカウントしたため、季節変化は小さい。植生は、特にブロック帯(岸沖方向距離0m地点)付近や砂丘部で多く見られた。これに対して、侵食が進んでいる小砂丘間には、植生はほとんど見られなかった。

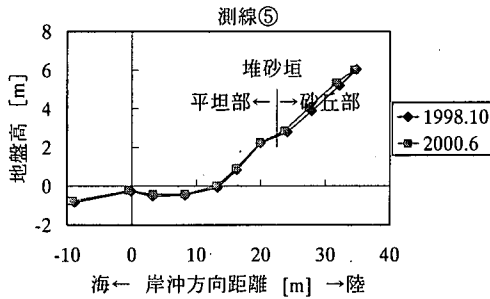
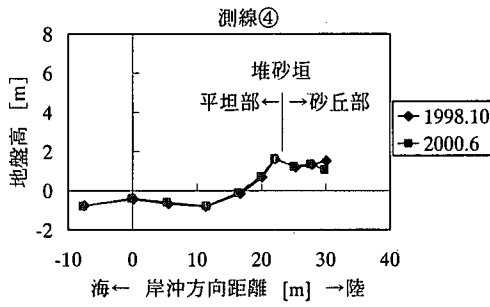
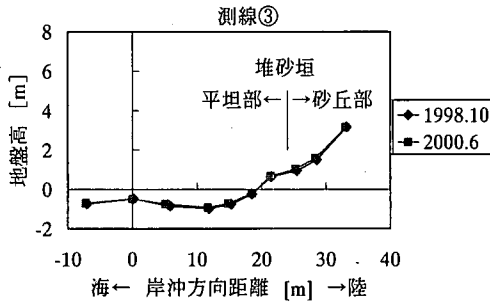
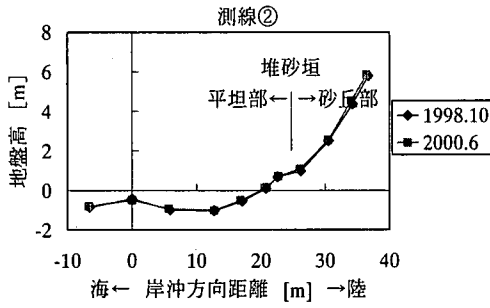
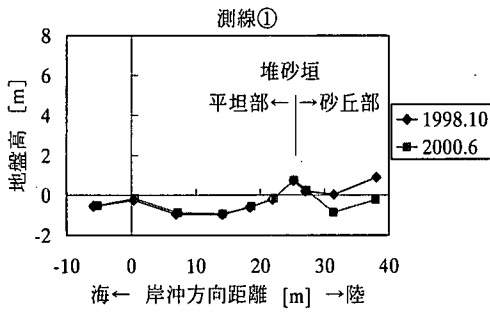


図-4 測線①～⑤に沿った断面地形位置と高さの基準：測線②上のブロック

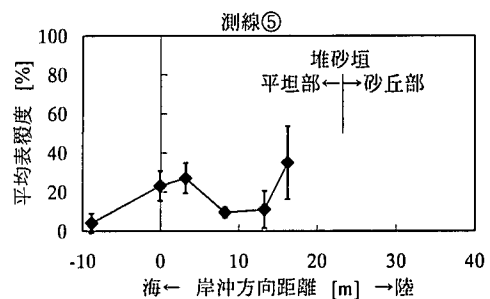
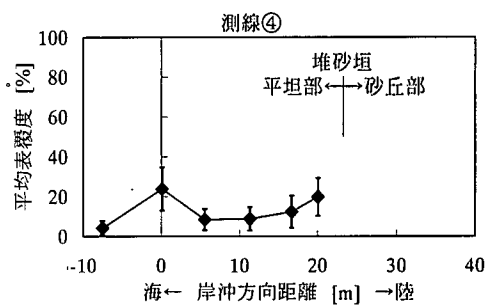
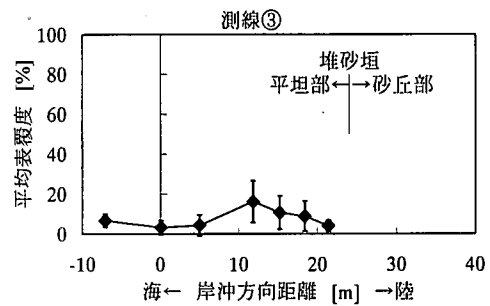
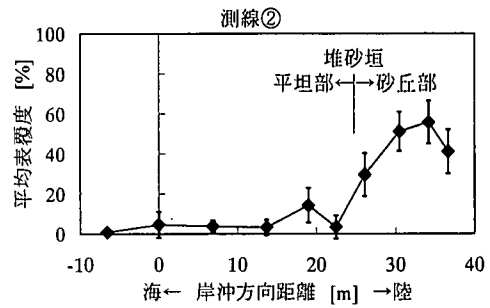
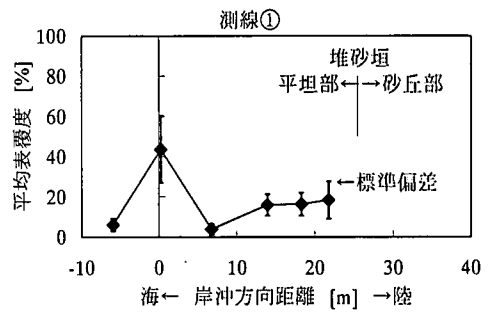


図-5 測線①～⑤に沿った平均表覆度と標準偏差

表-1 調査地で見られた植物

科名	種名
アカザ	オカヒジキ
アカバナ	アレチマツヨイグサ, コマツヨイグサ
イネ	オニシバ, ケカモノハシ, チガヤ
カヤツリグサ	コウボウムギ
キク	シロヨモギ, ハマグルマ, ハマニガナ
ゴマノハグサ	ウンラン
ツルナ	ツルナ

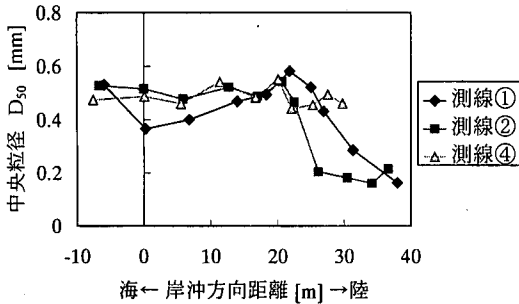


図-6 測線①, ②, ④に沿った砂の平均中央粒径

c) 粒度分布

測線①, ②, ④に沿った1999年3月～2000年6月の砂の平均中央粒径 D_{50} の分布を図-6に示す。これらの平坦部の平均値は約0.49mm, 砂丘部の平均値は測線①上では約0.29mm, 測線②上では約0.19mm, 測線④上では約0.47mmであった。全般に、地盤高が高い地点では D_{50} が小さく、低い地点では D_{50} が大きくなる傾向にあり、ふるいわけの効果が見られた。しかし、顕著に侵食が進んでいる測線①の砂丘部では、測線④の砂丘部と比較して地盤高が低いにもかかわらず、 D_{50} が小さい。これは、観察したところ、侵食によって中央砂丘の南側斜面の勾配が安息角を越え、粒径が小さい測線②上の小砂丘頂部の砂が測線①の砂丘部に滑り落ちる現象が起こったためであると説明される。

d) 調査地における風況の推定結果

調査期間中の角折海岸における推定風配を図-7に示す。風配のパターンは、主にN～ENE方向成分が卓越している期間(A), (B), (F), (G), N～ENEとESE～SE方向成分が卓越している期間(C), (D), ESE～SE方向が卓越している期間(E), の3つに大別される。全体的には、主にN～ENE方向成分が卓越し、春から夏にかけてESE～SE方向が卓越していた。なお、各期間の定義は図-7の説明に示した。図-8に推定風配の各風向成分をその出現回数で

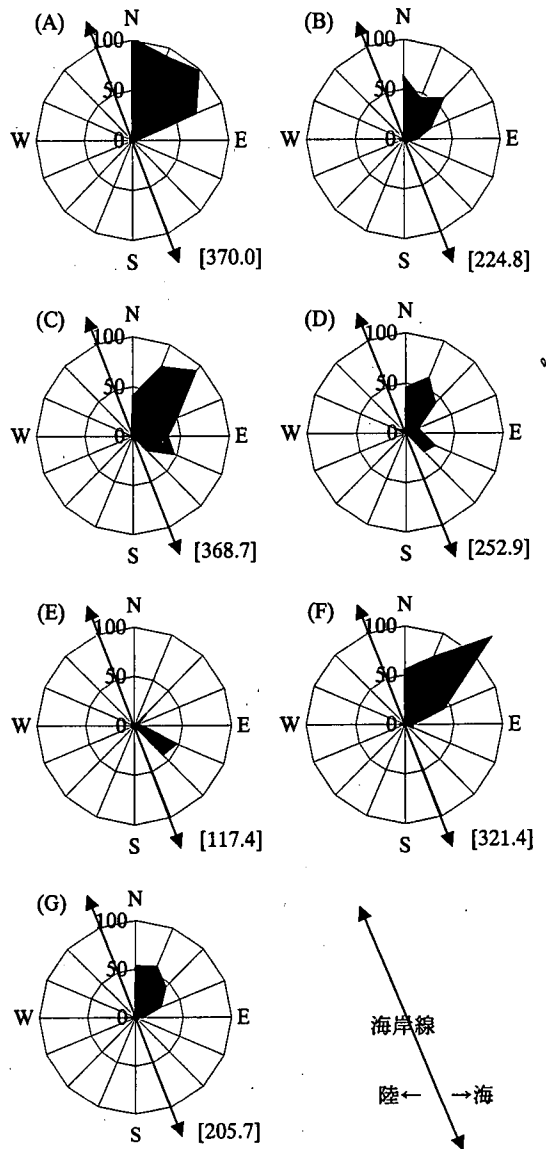


図-7 角折海岸における期間別の推定風配
[]内数字：推定風配の全風向別成分の合計値
[(m/s)・hour/month]

- 期間(A)：1998年10月～1998年12月
- 期間(B)：1998年12月～1999年3月
- 期間(C)：1999年3月～1999年5月
- 期間(D)：1999年5月～1999年7月
- 期間(E)：1999年7月～1999年9月
- 期間(F)：1999年9月～1999年12月
- 期間(G)：1999年12月～2000年3月

除した値(平均風速)を示す。平均風速は、各風向、各期間とも約3～4m/sであった。

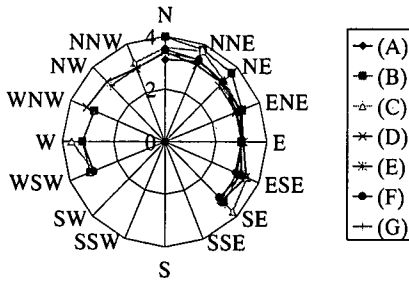


図-8 平均風速 [(m/s)·hour/month]

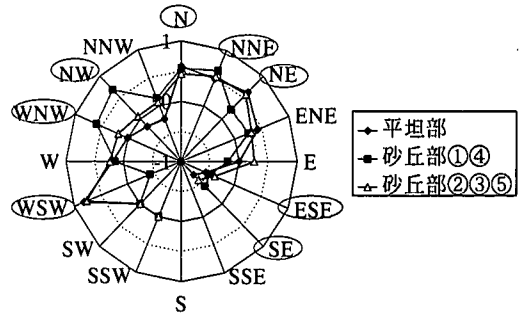


図-10 地盤高変化と推定風配の各風向成分の相関関係
内側実線円外：正の相関
内側実線円内：負の相関

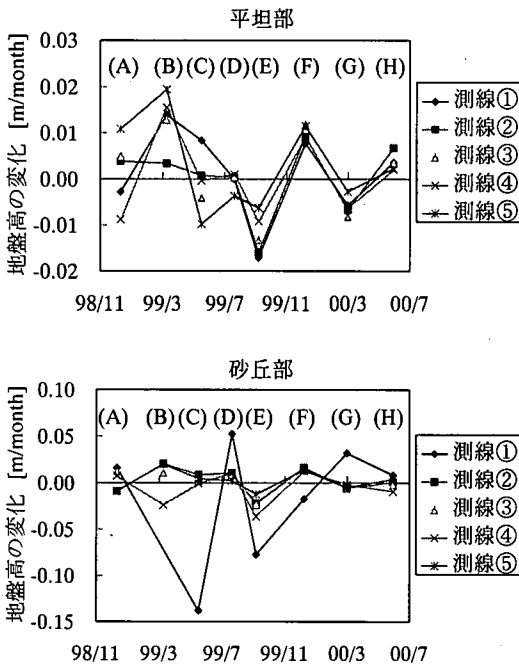


図-9 地盤高変化の経時変化

- 期間(A)：1998年10月～1998年12月
- 期間(B)：1998年12月～1999年3月
- 期間(C)：1999年3月～1999年5月
- 期間(D)：1999年5月～1999年7月
- 期間(E)：1999年7月～1999年9月
- 期間(F)：1999年9月～1999年12月
- 期間(G)：1999年12月～2000年3月
- 期間(H)：2000年3月～2000年6月

(4) 考察

a) 海岸断面地形の変化の特徴

平坦部では、いずれの測線においても地盤高は上昇する傾向にあった。1998年10月から2000年6月にかけて

の全平坦部調査点の地盤高変化の平均は0.03m/year（標準偏差：±0.02m/year）であった。

砂丘部では、測線によって変化傾向が異なっていた。小砂丘上を通る測線②，③，⑤上では同期間で平均して約0.05m/year（標準偏差：±0.04m/year）の割合で上昇傾向にあった。これは平坦部の地盤高変化と比較すると約2倍である。原因としては、砂丘部は表覆度が大きく植生による飛砂の捕捉・抑制効果が大いこと、小砂丘自身が障害物となって飛砂を捕捉していること、等が考えられる。これに対して小砂丘間を通る測線①と④上では、地盤高が大きく変動する傾向にあった。特にその傾向が顕著にみられる測線①では、平均して約0.41m/year（標準偏差：±0.33m/year）の割合で地盤高が下降していた。この原因として、小砂丘間には植生がほとんど存在していないため、飛砂が捕捉・抑制されず地形が不安定であること、小砂丘間のギャップでは風速が局所的に大きいため、地形変動量が大いことが考えられる。

図-9は、測線別、平坦部・砂丘部別に平均した地盤高変化の経時変化を示したものである。図中に記した(A)～(F)は図-7の説明にある期間(A)～(F)と同一である。なお、ここでは各期間の地盤高変化を1ヶ月分の変化に換算して表示した。

期間(A)～(H)の、平坦部、砂丘部における地盤高変化と推定風配の各風向成分との相関分析結果を図-10に示す。砂丘部については、侵食傾向にある測線①，④（以下、砂丘部①④と記す）とそれ以外の測線②，③，⑤（以下、砂丘部②③⑤と記す）に分けて結果を表示した。図中の外側実線円は相関係数+1、円グラフの中心は相関係数-1である。調査期間中、推定風配のSSE，S方向成分は0であった。

図より、推定風配のN～NE方向成分と地盤高変化の間には、平坦部、砂丘部①④、砂丘部②③⑤とも正の

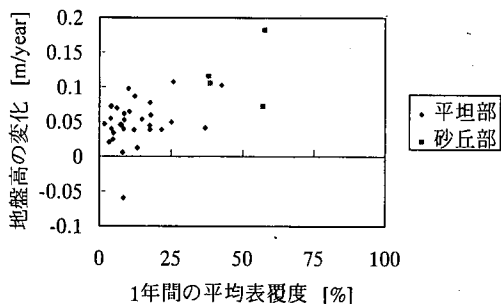


図-11 1998年12月～1999年12月の平均表覆度と地盤高変化の関係

相関関係が認められ、N～NE方向からの風が卓越するとき地盤高は上昇する傾向にあった。一方ESE～SE方向成分については、平坦部、砂丘部①④、砂丘部②③⑤とも地盤高変化との間に負の相関関係が認められ、ESE～SE方向からの風が卓越するとき地盤高は下降する傾向にあった。N～NE、ESE～SE方向からの風は、ともに海風であるが、地盤高変化の傾向が異なっており、この原因については明らかではない。

WSW方向成分（陸風）と平坦部、砂丘部②③⑤における地盤高変化の間には正の相関関係、砂丘部①④における地盤高変化の間には負の相関関係が認められる。WSW方向成分が大きい期間では、小砂丘間から平坦部へ砂が供給されていると考えられる。

WNW～NW方向成分と砂丘部①④における地盤高変化の間には正の相関関係が認められるが、これについては現在のところ合理的に説明できない。

b) 植生分布と地盤高変化の関係

平坦部と測線②上の砂丘部の各調査点における、1998年12月～1999年12月の平均表覆度と地盤高の変化の関係を図-11に示す。約1年間の変化を調べることで、風の季節変化の影響を排除した。表覆度が小さい部分ではばらつきがやや大きいものの、全体としては正の相関関係、すなわち、植生の表覆度が大きいほど地盤高が上昇するという関係が見られる。

3. 航空写真測量に基づく長期的な後浜地形変動特性の検討

本節では、航空写真の判読、航空写真測量を行い、後浜の長期的な地形変動特性を調べる。また、砂丘部の陸側にある海岸林の面積を求め、汀線の前進、後退による砂浜面積の変化（以下、砂浜面積の変化と定義）との関係を検討する。

(1) 調査地の概要

茨城県土木部河川課は、1984年以降、3年毎に茨城県の全沿岸の航空写真（縮尺約1/8000）を撮影している。ここでは、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を行う。調査地は、鹿島灘沿岸に位置する、角折海岸、鹿島港北側の下津海岸、銚子北側の豊ヶ浜海岸の各海岸に設定した（図-1）。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への砂の行き来が可能になる。2. (3) d) で示したように、鹿島灘沿岸では主にN～ENE方向（海側）からの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。

(2) 調査項目と調査方法

航空写真測量とは、2枚の航空写真より立体視の原理を利用して対象物の空間位置を求めることである。写真測量は、図化機、1984年～1999年の3年毎の航空写真（茨城県土木部河川課撮影、縮尺約1/8000）、縮尺1/2500の都市計画図（鹿嶋市役所発行）を用いて行った。標定誤差は、水平方向0.35m程度、鉛直方向0.7m程度である。

角折海岸については、1974年（縮尺約1/3200）と1982年（縮尺約1/4000）の航空写真（国土地理院撮影）も入手し、写真判読を行った。

a) 後浜の地形変動

各調査地について、写真判読により地形変動の特徴を調べた。また、現地調査を行っている角折海岸の測線②における長期的な海岸断面形状の変化を調べ、現地調査の結果と比較して、航空写真測量データの信頼性を確認した。

角折海岸については、図-2に示すように、岸沖方向距離10m×沿岸方向距離70mの大きさの2つの調査領域 A_1 、 A_2 を設定し、長期的な土砂量の変化を調べた。領域 A_1 は、前章で示した測線①～④上にある砂丘部領域、領域 A_2 は、領域 A_1 の海側に位置する堆砂垣周辺の平坦部領域である。堆砂垣は1990年～1993年の間に設置されている。なお、現地調査の調査点が多数存在する領域 A_1 については、短期的な土砂量の変化も求めた。

b) 汀線変化と海岸林の関係

角折海岸の主な卓越風向が、N～ENE方向（海側）であることは前述したが、海側からの砂の供給能を示す指標として砂浜面積の変化、内陸側への砂の移動量を示す指標として海岸林面積の変化を用い、両者の関係を調べた。

砂浜面積の変化は、「平成8年度 茨城県海岸線変化量解析報告書」⁷⁾に記されている、1984～1996年の各調査

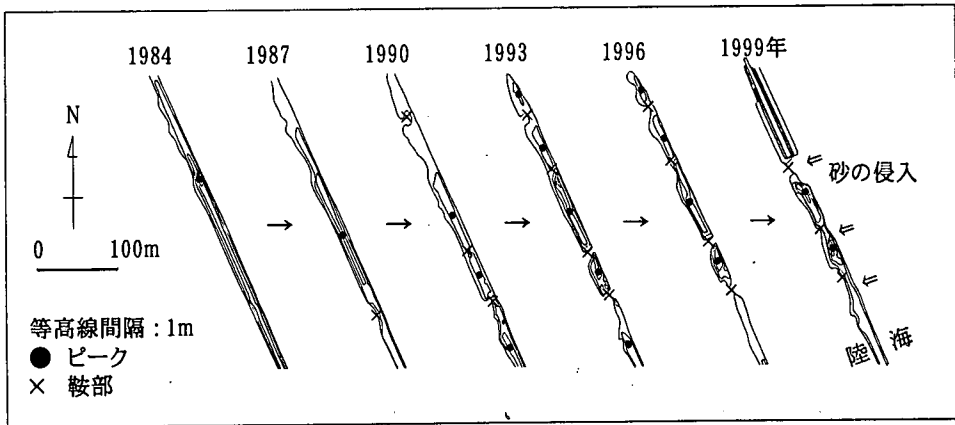


図-12 1984～1999年の下津海岸砂丘部の変動

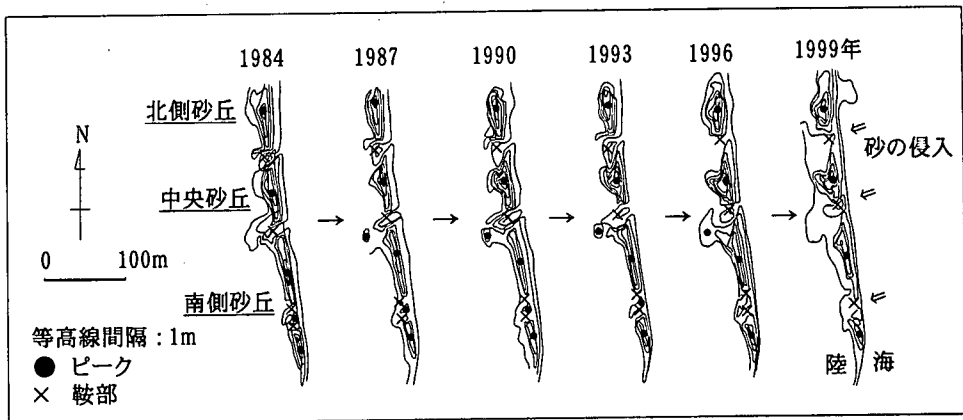


図-13 1984～1999年の角折海岸砂丘部の変動

域の汀線変化量に調査域の沿岸方向の長さをかけて求めた。各調査域の沿岸方向の長さは約400～500mである。海岸林面積は写真測量結果より求めた。

c) 角折海岸における風況の推定

航空写真が撮影された時期が1984年12月以降3年毎であることを考慮し、(I) 1985年1月～1987年12月、(II) 1988年1月～1990年12月、(III) 1991年1月～1993年12月、(IV) 1994年1月～1996年12月、(V) 1997年1月～1999年12月の各期間毎の角折海岸の風況を、2. (2) d) で述べた方法により推定した。

(3) 調査結果

a) 後浜の地形変動

角折海岸では1974年以前、下津海岸では1984年以前、豊ヶ浜海岸の一部では1987年～1990年の間に、連続した砂丘の造成工事が行われている。

写真判読によれば、角折海岸、下津海岸では、連続的に整地された砂丘が、10年程の間に砂丘部での侵食が顕著に進み、沿岸方向に並ぶ長さおおよそ100mの小砂

丘に分裂していた。侵食域は、主な卓越風向(N～ENE方向)の風下方向に広がっていた。また、小砂丘間の植生は、地形の侵食が進むにつれて減少していた。

図-12および13に、下津海岸、角折海岸の砂丘部の変動を示す。

図-12には、連続した砂丘が徐々に小砂丘へ分裂していく様子が捉えられている。1999年には、砂丘の一部(北側)で、連続した砂丘の造成が行われている。

角折海岸では、1974年以前に連続した砂丘が造成され、1982年時点ですでに小砂丘に分裂していた。図-13には、分裂後の変形過程が捉えられている。2章に説明した調査は、北側～中央砂丘の周辺で行われている。小砂丘間のギャップ背後では、後浜からの飛砂が海岸林に遮断されて海岸林の海側に堆積し、新たな砂丘を形成していた。南側砂丘中程の部分でも、1996年の時点で2ヶ所のギャップでの侵食が進んでおり、1996年～1999年の間に南側砂丘は2つの小砂丘に分裂していた。

豊ヶ浜海岸においても、下津、角折海岸と同様に連続した砂丘が小砂丘に分裂していた。

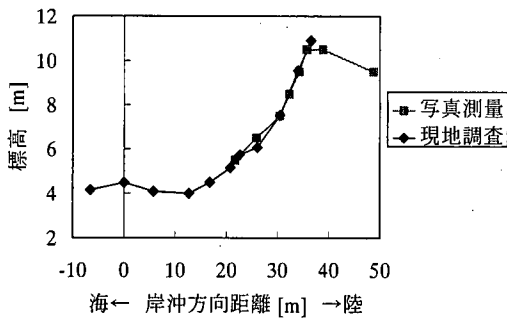


図-14 現地調査と航空写真測量による角折海岸の海岸断面（後浜）の比較（1999年12月）

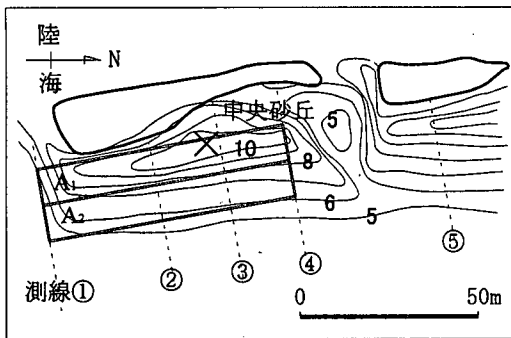


図-15 1984年の角折海岸砂丘部周辺
太線：海岸林輪郭
細線：等高線（1m間隔，単位[m]）
×：1984年時点の小砂丘頂部
A₁：砂丘部領域
A₂：堆砂垣周辺の平坦部領域

現地調査で角折海岸に設定している測線②に沿った1999年12月の海岸断面形状を、航空写真測量データから読み取った結果を図-14に示す。同図には1999年12月の現地調査結果も示した。現地調査結果を標高に換算する際、航空写真測量結果と比較し、現地調査で原点としている位置の標高を5mとした。写真測量と実測による海岸断面の形状は測量誤差範囲内（水平方向：0.35m程度、鉛直方向：0.7m程度）ではほぼ一致しているとみなせる。

1984年12月の角折海岸の砂丘部周辺における等高線の標定結果を図-15に示す。1996年12月の結果（図-2）と比較すると、測線②は、1996年12月の時点では小砂丘頂部の南側約5m程の位置を通過しているのに対し、1984年12月の時点では小砂丘頂部の南側20m程の位置を通過している。これは、小砂丘間で卓越風向（N～ENE方向）の風下へ侵食域が拡大した結果、小砂丘の北側が侵食され、

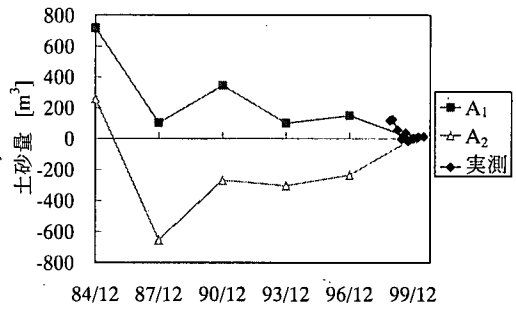


図-16 1999年12月を基準とした土砂量の経時変化
実測：1998年10月～2000年6月の現地調査結果

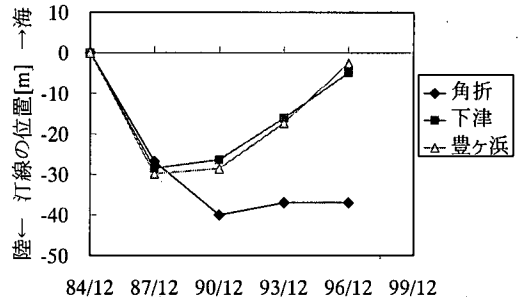


図-17 1984年12月を基準とした汀線位置の経時変化

結果として頂部が南側へ移動したことを示している。

1999年12月を基準とした、砂丘部（A₁）と堆砂垣周辺（A₂）における土砂量の3年毎の相対的な変化を図-16に示す。図中には、現地調査の結果から求めた領域A₁の土砂量変化もあわせて表示する。領域A₁の土砂量は、1984年～1987年にかけて減少しているが、それ以降は比較的变化が小さく、増減を繰り返しながら、長期的には一定値に収束していく傾向を示している。領域A₂の土砂量は、1984年～1990年にかけて、砂丘部と同様に土砂量が減少しているが、1993年以降は増加する傾向に転じている。

b) 汀線変化と海岸林の関係

図-17は、「平成8年度 茨城県海岸線変化量解析報告書」⁷⁾に記述された各調査域の汀線の位置を、1984年12月を基準として示したものである。鹿島港の北側に位置する下津海岸、銚子港の北側に位置する豊ヶ浜海岸では、1987年12月以降、汀線が海側に移動する傾向にある。角折海岸では、1990年12月以降、汀線の位置はほとんど変化していない。これは、1985～1993年にかけてのヘッドランド設置の効果であると考えられる。

海岸林面積の経時変化を図-18に示す。海岸林の境界の読み取り誤差、標定誤差から判断すると、求められた海岸林面積には±1000m²程度の誤差が含まれている。現

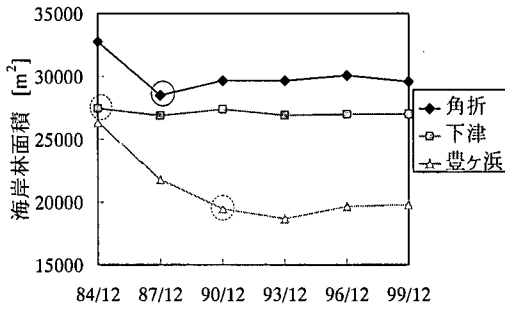


図-18 海岸林面積の経時変化

実線円：海岸林海側に新たな砂丘が形成された時期
 点線円：連続砂丘の造成工事が実施された時期
 (豊ヶ浜海岸においては一部のみ)

地観察結果から判断すると、海岸林面積の減少する原因は、主にギャップ背後への堆砂、すなわち海岸林海側への局所的な堆砂によって海岸林の海側境界が陸側へ後退することに因るものと考えられる。

下津海岸、豊ヶ浜海岸ともに連続した砂丘の造成が行われた1984年、1990年頃以降は、海岸林面積がほとんど変化していない。角折海岸では、1982年以前に小砂丘に分裂して以降、1987年頃まで海岸林面積は減少しているが、それ以降はほとんど変化していない。

c) 角折海岸における風況の推定結果

2. (2)d)の手順で求めた1984~1999年の角折海岸における推定風配を図-19に示す。主な卓越風向(N~ENE方向)は東寄りに変化している。

(4) 考察

a) 後浜の地形変動

写真測量の結果、当初連続していた砂丘が沿岸方向長さおおよそ100mの小砂丘に分裂している様子が認められた。このような砂丘の分裂に関して、バグノルド®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。前述したように、角折海岸においても同様の変動現象が起こっていることから、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。

数メートル程度までの小規模砂丘に関しては、バルハン(三日月型)砂丘®の変形過程、分裂している砂丘の結合特性®等、多くの研究が報告されている。しかし、

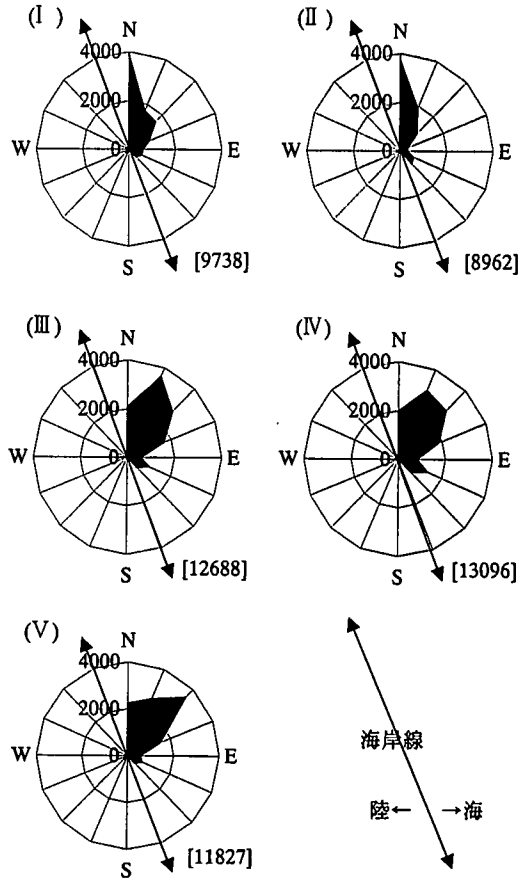


図-19 角折海岸における推定風配(1984-1996)

[]内数値：推定風配の全風向成分の合計値
 [(m/s)・hour/3year]

- 期間(I)：1984年12月~1987年12月
- 期間(II)：1987年12月~1990年12月
- 期間(III)：1990年12月~1993年12月
- 期間(IV)：1993年12月~1996年12月
- 期間(V)：1996年12月~1999年12月

連続した砂丘の分裂特性に関する研究や、植生の効果を考慮した研究はほとんどなされていないため、今後、海岸砂丘の変形問題に適用する際には、バルハン砂丘等の変形過程の横列砂丘分裂過程への応用や、植生による飛砂の捕捉・抑制効果の検討が必要である。

2. (4b)では、植生によって砂が捕捉されていることを示したが、連続した砂丘が小砂丘に分裂した後は、小砂丘間で侵食が顕著に進み、植生が激減していた。このことより、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程地形変化の激しい所では、植生による飛砂の捕捉が期待できない。

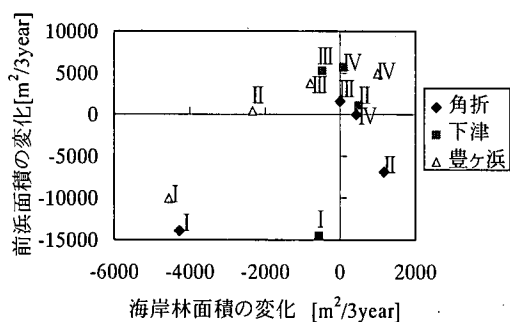


図-20 砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の関係

- I : 1984年12月～1987年12月
- II : 1987年12月～1990年12月
- III : 1990年12月～1993年12月
- IV : 1993年12月～1996年12月

図-16に示したように、角折海岸の砂丘部 (A_1) では1984年～1987年にかけて、土砂量が減少していた。また、同時期に図-17および18より、汀線は後退し、海岸林面積は減少していたことがわかる。汀線が後退すると、後浜での吹送距離が短くなり、砂丘部に砂を供給する後浜の面積が減少し、供給量が減少すると考えられる。以上から判断すると、この期間の砂丘部の土砂量の減少は、砂丘部から海岸林部への飛砂量が、後浜から砂丘部への飛砂量を上回っていたためであると考えられる。これに対して、1987年以降の土砂量の変化は比較的小さい。同様に考察すると、汀線は1987年以前より後退した状態にあるため、後浜から砂丘部への砂の供給量は1987年以前より減少していたと考えられる。このことから、1987年以降は、砂丘部から陸側への飛砂が減少していたか、もしくは、海岸林海側の堆砂域(砂丘部の陸側)から砂丘部への飛砂が増加していた可能性がある。砂丘部から陸側への飛砂が減少する原因としては、植生の生長や堆砂垣の設置による飛砂の捕捉・抑制効果、海岸林海側の堆砂域から砂丘部への飛砂が増加する原因としては、2. (4)a)に示したように推定風配内のWSW方向成分(陸風)の効果が考えられる。1993年以降、堆砂垣周辺 (A_2)の土砂量は、砂丘部 (A_1)とは異なり増加する傾向にあった。これは1990年～1993年の間に堆砂垣が設置され、堆砂垣によって飛砂が捕捉されていたためである。

b) 汀線変化と海岸林面積の関係

1974年以前に角折海岸で造成された連続砂丘は、1982年の時点では小砂丘に分裂していた。この海岸の海岸林面積は、1984年から1987年にかけて減少していたが(図-18)、これは連続砂丘が小砂丘へ分裂したことにより、後浜から海岸林部への飛砂が増加したためである

と考えられる。すなわち、砂丘の分裂以前は、砂丘部の陸側への飛砂が砂丘によって抑制されていたと考えられる。これに対して、1987年以降は、海岸林面積にほとんど変化が見られない。これは、分裂した砂丘間の陸側、すなわち海岸林の海側に形成された新たな砂丘が、後浜からの飛砂を捕捉していたためと考えられる。下津海岸、豊ヶ浜海岸ともに連続した砂丘の造成が行われた1984年、1990年頃以降は、海岸林面積がほとんど変化していないが、これは連続した砂丘によって飛砂が捕捉・抑制されていたためである。

3年毎の砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の関係を図-20に示す。図より、豊ヶ浜海岸については、砂浜面積が減少するとともに海岸林面積も減少するという正の相関関係が見られるものの、他の2つの海岸では明確な相関は見られなかった。各海岸の連続砂丘造成工事の時期、海岸林海側に新たに砂丘が形成された時期等から判断すると、砂丘の分裂が生じてから海岸林の海側に新たな砂丘が形成されるまでの間、砂浜面積の変化と海岸林面積の変化の間には正の相関関係が見られる。吹上浜海岸(鹿児島県)においても類似の現象、すなわち、海岸林の海側限界位置の変動と汀線変動の間に相関関係があることが報告されている¹⁰⁾。

4. 結論

以下に本論の主要な結論をまとめる。

現地調査の結果より、

- (1) 植生の表覆度と後浜の地盤高変化の間には、表覆度が大きいほど地盤高も上昇する、という正の相関関係が認められた。
- (2) 角折海岸の後浜の地盤高は、N～NE方向からの風(海風)が卓越するとき上昇し、ESE～SE方向からの風(海風)が卓越するとき下降していた。一方、WSW方向からの風(陸風)が卓越するとき、小砂丘間の地盤高は下降し、平坦部の地盤高は上昇していた。

航空写真測量の結果より、

- (1) 連続砂丘は、約10年で長さおおよそ100mの小砂丘に分裂した。この後、侵食域が卓越風向の風下方向へ拡大するにつれて、小砂丘頂部位置は南側へ移動していた。
- (2) 連続砂丘を造成することにより、陸側への飛砂が抑制されていた。連続砂丘が分裂してから海岸林の海側に新たな砂丘が形成されるまでの間、砂浜面積が減少するとともに海岸林面積も減少していた。
- (3) 角折海岸では、砂丘部の土砂量が一定値に収束する傾向にあった。また、堆砂垣が設置された1990年以降、

堆砂垣周辺の土砂量は増加した。

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、現地調査、植生に関して御指導頂いた群馬大学石川真一講師、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、また調査を手伝って頂いた筑波大学水工研究室の方々に深く感謝の意を表します。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。

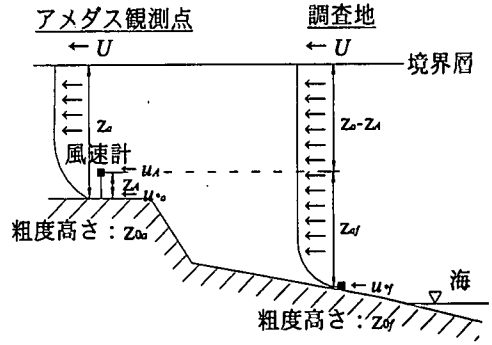


図-付1 風場内の概況

付録

1) 表覆度の定義：1m×1mのコドラート内を10×10の柵に分割し、各柵内の植物が占める面積割合を求め、これらを合計した値を調査点における表覆度とする。各柵内の面積割合は、100, 75, 50, 25, 20, 13, 6, 5, 3, 2, 0%を用いて評価した。これは、100%を1とした場合の1, 3/4, 2/4, 1/4, 3/16, 2/16, 1/16, 3/64, 2/64, 1/64, 0に相当する。

2) 風配の推定法：本研究では、調査対象海岸（平坦部）で飛砂が発生していたと推測されるとき風の風速値を、風向別に積算して推定風配を求めた。

この際、角折海岸とアメダス観測所「鹿島」（以下、アメダス観測点と記す）は同じ風場内にある、大気下層の風速分布は対数則で近似できる、と仮定した。アメダス観測点で観測された風速値 u_A から境界層外の風速 U を推定する。次に、対数則が成り立つとして、 U を用いて角折海岸における摩擦風速 u_{*f} を推定した（図-付1参照）。この u_{*f} が、砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} 以上のとき、 u_A を風向別に積算して推定風配を求めた。以下にその手順について説明する。

a) 移動開始摩擦風速

砂の移動開始摩擦風速 u_{*c} は次式で与えられる¹¹⁾。

$$u_{*c} = A \sqrt{gd(\rho_s - \rho_a) / \rho_a} \quad (1)$$

ここで、

A ：無次元係数 (=0.1)

g ：重力加速度 (=9.81m/s²)

d ：砂の粒径 [mm]

ρ_a ：空気の密度 (=1.226×10³g/m³)

ρ_s ：砂の密度 (=2.65×10⁶g/m³)

であり、 d は、調査地で採取された砂サンプルの最小の D_{50} (0.19mm) とした。

b) 移動開始風速

アメダス観測点と調査地が同一の風場内にあり、対数則が適用可能であると仮定すると、アメダス観測点の風速 u_A 、調査点の摩擦風速 u_{*f} には、次の関係式が成立する（図-付1参照）。

アメダス観測点においては、

$$U = \frac{u_{*a}}{\kappa} \log(z_a / z_{0a}) \quad (2)$$

$$u_{*a} = \kappa u_A / \log(z_A / z_{0a}) \quad (3)$$

調査地においては、

$$U = \frac{u_{*f}}{\kappa} \log((z_a - z_A + z_{0f}) / z_{0f}) \quad (4)$$

という関係がある。ここで、

u_{*a} ：アメダス観測点における摩擦速度 [m/s]

u_{*f} ：調査域における摩擦速度 [m/s]

z_a ：アメダス観測点における境界層外縁の高さ [m]

z_{0f} ：(アメダス観測点の標高) - (調査域の標高) [m]

z_{0a} ：アメダス観測点における地表面粗度高さ [m]

z_{0f} ：調査域における地表面粗度高さ [m]

z_A ：アメダス観測点の地表面からの高さ [m] (=6.5m)

κ ：カルマン係数 (=0.41)

z_a は、海洋上を吹送してきた風が陸に上陸し、その際発達する内部境界層が到達しないと考えられるアメダス観測点の地表面からの高さである。海風の場合には、

$z_0 = (\text{アメダス観測点から風上方向の陸上吹送距離}) \times (1/7)$, 陸風の場合には, $z_0 = z_A$ とした. z_{0f} は d と同値とした. 調査域の標高は, 現地調査の結果より得られた平坦部における調査点の地盤高の平均 (0.2m) を標高に換算し, 4.8m とした (3. (3)a 参照). アメダス観測点の標高は 37m であり, 風向別の地表面粗度 z_{0a} は桑形・近藤¹²⁾ の提案する値を用いた. 式(2)~(4)より u_y を求め, $u_y \geq u_{Ac}$ を満たす最小の u_A を各風向別の移動開始風速 u_{Ac} とする.

c) 推定風配の求め方

以上の手順より, 調査地において砂が移動を開始すると推定される, アメダス観測点の最小の風速 u_{Ac} を求めたところ, N~SE方向, つまり海風のときは $u_{Ac} = 3\text{m/s}$, SSE~NNW方向, つまり陸風のときは $u_{Ac} = 7\text{m/s}$ となった. $u_A \geq u_{Ac}$ のときに, 各風向別に u_A を積算して推定風配を求めた. なお, アメダス観測点で, 海側からの風速が 3m/s のときと陸側からの風速が 7m/s のときに, 調査地における地表近傍の風速が同じになり, 砂が移動を開始することから, 陸風の場合には, u_A の積算値に 3/7 を乗じた.

参考文献

- 1) 栗山善昭, 望月徳雄: 後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生の地形変化に及ぼす影響に関する現地調査, 海岸工学講演会論文集, 第44巻, pp.681-685, 1997.
- 2) 加藤史訓, 佐藤慎司: 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現

- 地調査, 海岸工学講演会論文集, 第45巻, pp.666-670, 1998.
- 3) 住谷勉夫, 園部武正, 宇多高明, 伊藤隆, 猿田正則, 横田喜一郎: 鹿島灘沿岸におけるヘッドランドの建設による海浜の安定化, 海岸工学講演会論文集, 第35巻, pp.437-441, 1988.
- 4) 佐藤慎司, 加藤史訓: 海岸の植生, 海岸, Vol.38, No.1, pp.20-25, 1998.
- 5) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 地盤工学会編, 1990.
- 6) 矢野悟道: 群落の地下構造と機能, 伊藤秀三編, 朝倉書店, 1977.
- 7) 茨城県高萩土木事務所, 朝日航洋株式会社: 平成8年度 茨城県海岸線変化量解析 報告書, 1997.
- 8) R.A.バグノルド: 飛砂と砂丘の理論, 創造社, 1963.
- 9) Hatano, Y. and Hatano, N.: Dune morphology and sand transport, Forma (印刷中).
- 10) 西隆一郎, 宇多高明, 佐藤道郎, 西原幸雄, 井之上由人: 吹上浜海岸における汀線と海岸植生および砂丘林境界の長期変動特性, 海岸工学講演会論文集, 第45巻, pp.661-665, 1998.
- 11) 堀田新太郎: 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, 1985.
- 12) 桑形恒男, 近藤純正: 東北部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 日本気象学会, 天気, 第37巻3号, pp.197-201, 1990.

(2000. 9. 14 受付)

MORPHOLOGICAL CHANGE OF BACKSHORE DUNES AT KASHIMA COASTS, JAPAN

Keiko UDO and Satoshi TAKEWAKA

Results of field and aerial photograph surveys are described on the behavior of backshore dunes during the period from 1984 to 1999 at three coasts facing the Kashima Sea, Japan. Data obtained through the field survey shows that the change in backshore height has positive correlation with the ground covering ratio due to vegetation. The aerial photograph survey shows that continuous longshore dunes are split into small dunes roughly 100m in length during a period of around 10 years, and backshore sands are blown into land-side coastal forest through gaps between small dunes. As found from both the surveys, total sand volume around the dunes in the Tsuno-ore area gradually decreased until 1987. However, it remained unchanged since then, as the shoreline was stabilized.