

砂丘風食と飛砂に関する基礎的研究

西 隆 一 郎*・水 川 隆 太**

1. 既往の研究

砂丘は、海浜背後に風の営力で形成された地形である。この砂丘は、津波や高潮、高波に対し国土を守る自然の防波堤として重要である。特に、欧州のオランダ、デンマーク、ドイツ等では自然砂丘の強化および人口砂丘の造成により沿岸域が強大な流体力から守られている。また、米国においては、沿岸域およびバリアー・アイランド上の砂丘地帯に不動産を求める高所得層も多く、不動産に対する洪水保険 (Flood insurance) を購入するためにも、ハリケーンやノース・イースター等による流体力に対して、砂丘がどの程度侵食するか予測する必要性があり、砂丘侵食の研究が進んだ背景がある。

日本国内では、江戸時代から安定化が進められた砂丘を構造改善事業による農地開発や、国土開発の名目の下で掘り込み港湾用地として利用した経緯がある。そのために飛砂で砂丘がどのように形成されるのかという問題ではなく、局所的な飛砂量を算定する事に主眼が置かれたようである (最近では例えば、佐藤ら, 1999)。砂丘安定化のために、植生の及ぼす効果に関する研究が、栗山・上堂園 (1999)、辻本・西澤 (1999) により行われている。また、Bagnold (1941) に代表される国外での飛砂量に関する研究は、Coastal Engineering Manual (Veri-Tech, 2000) に詳述されている。従来、飛砂による砂丘地形変化は、外崎ら (1993)、西ら (2000) を除きあまり問題にされておらず、そのために、一旦植生で安定化された砂丘地帯の飛砂による地形変化に関する知見は十分でない。

本研究は、高波浪による砂丘侵食 (写真-1 参照) の研究や冬季季節風時の飛砂観測等とは異なり、海風に対し鉛直障害物となる浜崖が存在する砂丘海岸で、強風により発生すると考えられる砂丘風食孔 (blow-out-hollow) 地形 (写真-2 参照) と、風食孔の成長に引き続く飛砂地形の発生・発達に関する基礎的研究を行ったものである。なお、ここで取り扱う風食孔地形は、安息角よりかなり急勾配の斜面である浜崖が形成されている第一砂



写真-1 構造物前面の砂丘侵食



写真-2 浜崖背後の風食孔および飛砂

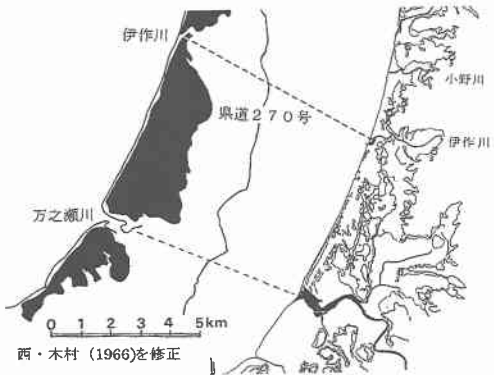


図-1 吹上浜海岸

丘の、頂部周辺に発生している。しかし、風食孔地形の発生要因及び地形特性等については未だ不明確である。

* 正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 海洋土木工学科
** (株) 大進

したがって、砂丘風食孔およびその飛砂地形の特徴を調べた上で、発生機構について考察する。

2. 調査の概要

吹上浜海岸は、鹿児島県薩摩半島西部に位置し、東シナ海に面した南北約 40 km の砂丘海岸であり、吹上浜ないし、吹上砂丘と呼ばれている。図-1 に吹上浜砂丘の等高線および砂丘域図を示す。砂丘の発達したこの海岸で、風食・飛砂地形の発生・発達過程を調べるために、①風食孔および飛砂地形の測量、②砂丘底質特性の解析、③風速測定および風の数値計算、④風食孔と飛砂地形の空中写真解析、⑤砂丘年輪の測定と飛砂量の推定等の検討を行った。

本研究では、伊作川左岸から万之瀬川右岸に渡る約 6.3 km 区間の中で、風食孔が同心円状に発達している万之瀬川右岸約 50 m 地点と、風食孔が飛砂地形に遷移している伊作川左岸約 1300 m 地点で地形測量を行った。地形測量は、DGPS を用いて行った。また、風食孔地形と飛砂地形の侵食中心部を通るように測線を設け、縦断測量をトランシットを用いて行った。図-2、3 は万之瀬川右岸域の風食孔地形、図-4、5 は伊作川左岸域の飛砂地形を示したものである。風食孔は同心円状に洗掘され、その上手側に洗掘された飛砂が堆積した砂丘の高まりが見える。等深線が密になっている砂丘フロント直後の第

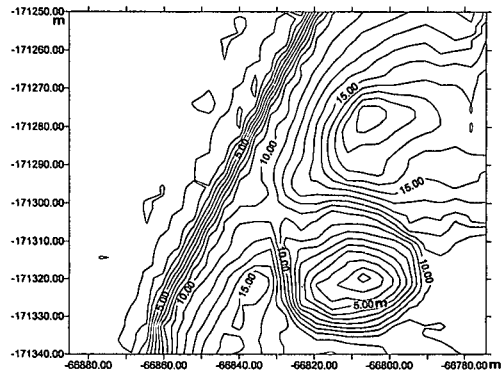


図-2 風食孔平面図 (万之瀬川側)

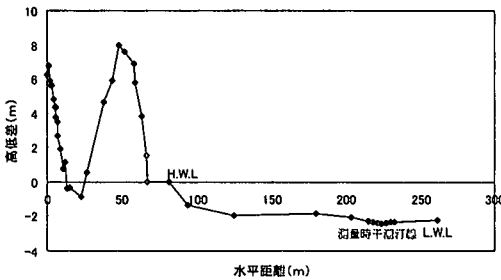


図-3 風食孔縦断形状

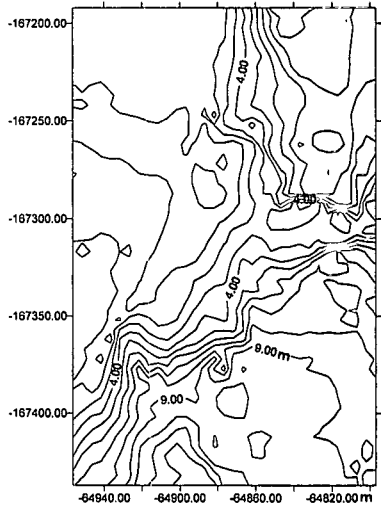


図-4 飛砂領域平面図 (伊作川側)

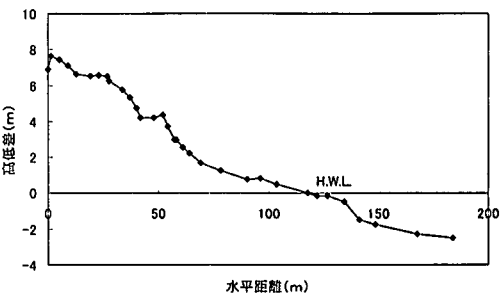


図-5 飛砂領域縦断図 (伊作川側)

1 砂丘の背後に形成されていることもわかる。しかもほぼ M.W.L. のレベルまで洗掘されている。

飛砂領域では等深線が図中央付近で内陸側に湾曲し、第一砂丘が沿岸方向に数百 m、完全に消失している事が分かる。図-5 に示す縦断形状だけを見ると、緩勾配の砂丘が H.W.L. 背後に繋がっているように見えるが、実際は、図-3 に示した様な風食孔の海側境界が、風あるいは高波浪の遡上波の作用で消失した地形である。

2.2 砂丘底質特性

図-3、5 に示す縦断面に沿い、万之瀬川右岸 10 箇所、

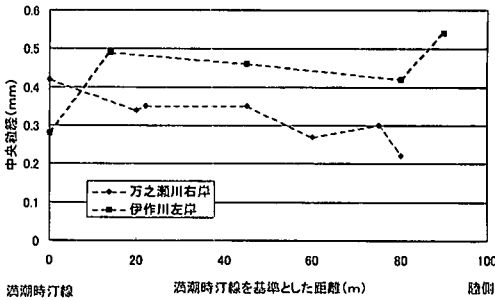


図-6 風食孔・飛砂域での中央粒径分布

伊作川左岸 8 箇所 で砂を採取し、粒度試験を行った。中央粒径を、図-6 に示す。

万之瀬川右岸の中央粒径は平均 0.33 mm、伊作川左岸の中央粒径は平均 0.44 mm で、比較的淘汰も良かった。図中、横軸は満潮時汀線からの距離を示す。伊作川左岸の底質粒径が、万之瀬川右岸の底質粒径と比較して大きくなっているのは、伊作川左岸の風食孔の海側境界線が切れ、砂丘が大きく消滅しているため、卓越風向に飛砂が生じ、粒径の大きい砂がアーマ・コート状に残ったためでないかと考えられる。後述するが、砂丘フロントの勾配により、砂丘周辺で形成される風場が渦を巻き回り巻かなかったりする場合があり、これが砂表面の底質分布に大きく寄与しているようである。

2.3 風速測定分布

風速測定を図-7 に示す個所で平成 12 年 12 月 26 日に行った。伊作川左岸では、満潮時汀線、旧浜崖頂部付近および侵食中央部の 3 箇所（図-8）、万之瀬川右岸では、満潮時汀線、浜崖頂部、風食孔中央部および風食孔陸側縁辺部の 4 箇所（図-9）である。風速測定器を地上 0.3 m、0.6 m、1.2 m、2.4 m、4.8 m に設置し、平均風速と最大風速を観測した。

飛砂域では、式(1)に図-8 に示す 4.8 m 地点の平均風速と最大風速を適用した風速分布が、実測の風速分布に比較的適合していた。

$$\frac{U}{U_*} = 5.5 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U は風速、 U_* は摩擦速度、 κ は Karman 定数 (0.4)、 y は高度、 ν は動粘性係数である。

万之瀬川右岸は、鉛直障害物となっている浜崖が存在しているため、風食孔内の渦の影響を特に受ける C 点と D 点で、対数側から大きく外れている。特に、風食孔内部で、主風と逆向の風速で、しかも、風食孔中央部の地上 0.5~1.5 m の範囲で風速が大きく、上方に向かうに連れて主風側へ速度が減少している。測定は地上 5 m 高さまで行ったが、さらに上方では、主風方向に風が吹いてい

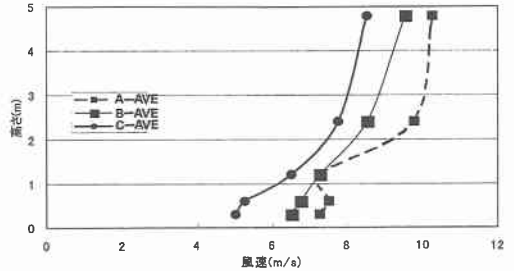


図-8 平均風速分布（飛砂領域）

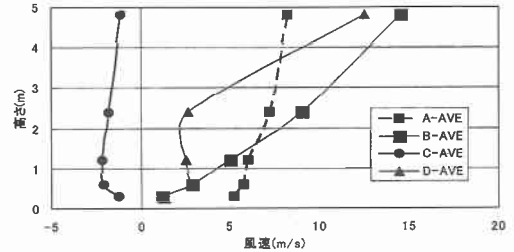


図-9 平均風速分布（風食孔周辺）

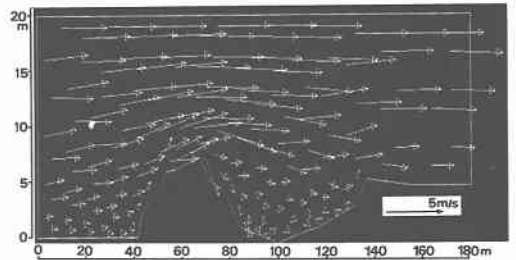


図-10 風食孔周辺の風況（数値計算）

ると考えられる。このように、浜崖背後には強い渦が励起されることが分かる。このような強い渦が、植生で被覆された砂丘面にダウンバースト状に作用し、植生を破壊することで、風食孔が発生するという仮説が考えられる。次に、万之瀬川右岸の風速データと地形データを用いて、風食孔周辺での風速ベクトルを求めた数値解析例を、図-10 に示す。

2.4 空中写真による風食孔発達の判読

伊作川と万之瀬川の間に離散的に存在する風食地形群から代表的な 9 箇所を選び、風食孔地形の発達過程を調べた。風食孔発達の判読には、1964 年 2 月、1988 年 6 月、1992 年 6 月、1996 年 4 月、1999 年 12 月撮影の空中写真を用いた。ただし、表-1 中では冬季卓越風の風下側を X 軸の正とし、X 軸に直交する向きを Y 軸とした。

写真判読の結果、風食地形が 3 つの発達ステージに分かれ成長することが分かった。第 1 ステージでは、直径約 30~40 m まで風食孔が同心円状を保ちながら成長する。第 2 ステージでは、X 軸方向にあまり変化せず Y 軸

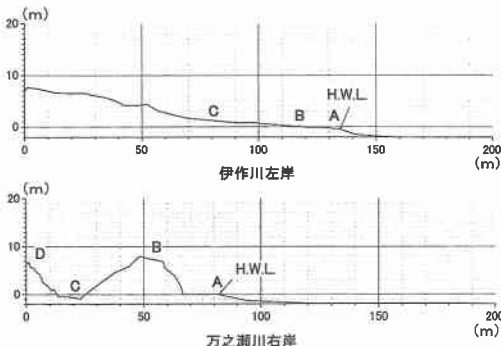
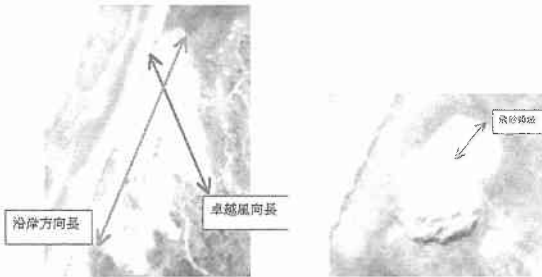


図-7 風速測定位置

表一1 風食孔・飛砂領域の発達速度

	X軸 (m/yr)	Y軸 (m/yr)
No. 1	-1.45	1.68
No. 2	0.19	1.57
No. 3	0.58	1.04
No. 4	0.05	0.05
No. 5	0.18	1.36
No. 6	0.31	1.13
No. 7	0.20	2.06
No. 8	0.55	-0.99
No. 9	0.32	0.32
平均	0.10	0.91



写真一3 風食孔と飛砂領域周辺の堆砂（飛砂）

る飛砂領域の判読を行った。写真一3に示すような空中写真は、飛砂領域が明瞭に判読できる1996年4月撮影のものである。

卓越風向長は約33～195 mの範囲であり、その平均距離は約96 mであった。風食孔の岸沖方向の平均直径が約33 mであることから、飛砂領域は風食孔の規模の約1～6倍である。風食孔も含めた飛砂域の発生間隔は、約50～250 mで頻度が高く、その平均間隔は約184 mである。したがって調査区域では、平均的に約184 m毎に約33 m幅と96 mの長さを持つ飛砂域が、沿岸方向に離散的に存在していることになる。

1996年4月撮影の空中写真を使用し、代表的な5箇所の風食孔地形で渦のために主風向とは逆側に砂が堆積している領域の判読を行った。ここでの砂の堆積領域は、風食孔縁辺部から堆積した砂と砂丘植生の境界までとした。5箇所の砂の堆積長は、7.5～28.5 mの範囲で、平均が17.1 mであった。

卓越風より発生した飛砂が卓越風向側に飛ばされ堆積した飛砂地形と、風食孔内部で発生する渦により発生した飛砂が卓越風向とは逆側に堆積した地形のうち、前者は冬季季節風によってある程度長い時間をかけて飛砂が移動した痕跡で、後者は台風などの強風により発生した渦で飛砂が卓越風向の逆側に堆積した比較的時間ス

方向にだけ成長する。そのため、卓越風向に直交する方向へ形状を歪ませる。この第2ステージまでは、風食孔内に形成される風の渦により、卓越風向の風上側に多量の飛砂が発生する。更に第3ステージでは、風食孔の海側境界が消失する結果、第1砂丘周辺で風が渦を巻かなくなる。そのために、飛砂が卓越風向風下へ発生し、風食孔地形から飛砂地形に移行していく。

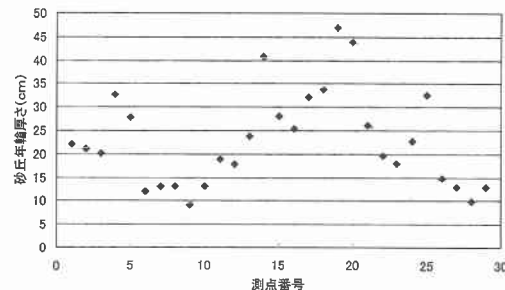
1964年から1999年にかけての経時変化から、風食孔・飛砂地形の発達速度を計算し、表一1に示す。ただし、拡大速度を正とし、縮小速度を負とする。X軸の平均発達速度は約0.1 m/yrであり、Y軸の平均発達速度は約0.9 m/yrである。表中No. 4とNo. 9の風食孔のように同心円状に成長している箇所は、X軸とY軸の成長速度がほぼ等しい。一方、No. 2, No. 3, No. 5, No. 6, No. 7のように風食孔地形が歪んでいる箇所では、X軸よりY軸側の成長速度が数倍大きい事が分かる。

2.5 風食孔内の渦による飛砂の堆積

海側から卓越風が吹いても風食孔内では、風が渦を巻きやすく、海岸域の卓越風向とは逆向きに飛砂が溜まることが多い。しかし、風食孔がある程度成長すると、風食孔縁辺部で海風の卓越風向（内陸側）に飛砂が発生しやすくなることが、空中写真や現地踏査から分かっている。そこで、始めに海風の卓越風向側に砂が移動してい



写真一4 砂丘堆積層（砂丘年輪）



図一11 砂丘年輪厚の分布

ケールの地形である可能性もあるが、これについては、今後、風と飛砂の詳細な現地観測を行う必要がある。

3. 飛砂量の推定

砂丘が高波浪で侵食されると、浜崖が出来る。この浜崖表面を観察すると、写真-4のような砂丘年輪（堆積層）が見られる。砂丘年輪は、冬季の飛砂により造成され、夏季の植生被覆により安定化される砂丘造成機構で形成され、この砂丘にどの程度の飛砂が1年毎に堆積し、砂丘を成長させているかを意味している。この砂丘年輪の厚さを6箇所、計29層で測定した。その結果を図-11に示す。

図-11では砂丘年輪厚が、約0.09 m～0.47 mの範囲に分布しており、平均厚さが約0.22 mであることが分かる。また、層中間と層端部の粒度試験を行った結果、層中間の底質が若干細かった。

通常、飛砂量の計算にはBagnold式等を用いる。しかし、砂丘が数 km も沿岸方向・内陸方向に発達した海岸で、砂丘表面に地形的な凹凸もあり、植生で被覆される場合には、Bagnold 式に必要な風速算定が難しく、実質的に飛砂量推定には困難が伴う。そこで、海側では砂丘年輪層の堆積厚さを持ち、内陸側には上述した飛砂堆積長（飛砂領域と風食域）の範囲で堆積し、堆積形状がほぼ三角形形状であると仮定し、当海岸での単位年・単位汀線長あたりの平均的な飛砂量を簡便に算定した。堆積形状は、放物型である可能性もあるが、一次近似としてはオーダー的に適合すると考えられる。

$$\Delta V = \Delta h \times L_{wd} \times \frac{1}{2} \times L_{us} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔV =単位汀線長あたりの年間平均飛砂堆積量、 Δh =砂丘年輪厚さ、 L_{wd} =卓越風向の飛砂有効堆積長、 L_{us} =沿岸方向単位長さである。調査領域内で約189 m 毎に存在する飛砂域の平均幅は、約99 m であるので、調査区間全体での年間平均飛砂量は、(2)式で求まる飛砂量に、沿岸方向の飛砂区間長約1100 m を掛ければよい。

砂丘年輪の平均厚さは0.22 m、飛砂領域の有効卓越風向長は約33～195 m、平均96 m であるので、調査領域での飛砂堆積量は、約3.6～21.5 m³/m/yr、平均約10.6 m³/m/yr と推定できる。この値は、新潟海岸での飛砂量測定結果の約9～13 m³/m/yr（佐藤ら、1999）や栃木県阿字ヶ浦海岸での飛砂量の25 m³/m/yr（宇多、1997）と類似の値になっている。また調査区間全域では、約12,000 m³/yr の飛砂が生じていることになる。

次に、風食孔周辺において卓越風向とは逆側に堆積した飛砂量の推定を行う。この場合における飛砂領域は、

風食孔縁辺部から砂と植生の境界である。砂丘年輪厚は、平均0.22 m、飛砂堆積長は7.5～28.5 m、平均17.1 m であるので、渦による飛砂量は、0.34～6.7 m³/m/yr、平均1.88 m³/m/yr となる。

4. あとがき

研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1. 風食孔の発生過程は、3ステージに分類できる。第1ステージは、風食孔の直径が約40 m までは同心円状の成長を続ける。第2ステージは、風食孔の卓越風向直径はあまり変化しないが、それに直交する軸の直径は、著しく成長を続け、卓越風向に直交する楕円形状に発達する。第3ステージは、風食孔の海側境界線が切れ、卓越風が風食孔内部にダイレクトに吹き込み、卓越風向に飛砂が発生するため、風食孔から飛砂地形に遷移する。

2. 風食孔周辺の砂の中央粒径は0.3～0.4 mm である。これに対し、飛砂域では、0.4～0.5 mm と粒径が粗く、一種のアーマーコートになっている。

3. 風食孔地形における風速の数値解析および現地踏査から、風食孔の内部では渦が発生し、卓越風向とは逆向きに風が吹いている。また、浜崖背後では、強い渦が励起されていることが分かった。

4. 風食孔の経時変化から、風食孔の卓越風向直径の成長速度は0.1 m/yr であり、それに直交する直径は0.9 m/yr である。

5. 調査領域での砂丘年輪厚さは、平均約0.22 m で最大約0.47 m であった。砂丘上の有効飛砂堆積長さ約33 m～195 m であり、年間当たり平均飛砂量は9～13 m³/m/yr である。したがって、渦による飛砂を除くと、調査区域全体では飛砂が約12,000 m³/yr 発生していることになる。

参 考 文 献

- 栗山善昭・上堂園孝一（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.
- 佐藤慎司・大谷靖郎・橋本 新・堀口敬洋（1999）：新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能，海岸工学論文集，第46巻，pp. 496-500.
- 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.
- 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.
- 外崎公知・宇多高明・五十嵐康之・岩崎福久・畑中達也（1993）：阿字ヶ浦海岸における砂丘の発達と変形，海岸工学論文集，第40巻，pp. 286-290.
- Bagnold, R. A. (1941): The physics of blown sand and desert dunes, Morrow, New York.
- Veri-Tech, Inc. (2000): Coastal Engineering Manual (CD-ROM 版).