

砂丘風食地形に関する基礎的研究

西 隆一郎* ・宇 多 高明**・佐 藤 道 郎***
牟田神宗征****・中 村 俊 ―*****

1. 砂丘侵食研究の概要

わが国の海岸砂丘の多くは、主に冬季季節風時の飛砂により形成されるので、太平洋側に比べて日本海側でより規模の大きな砂丘の発達が見られる。海岸砂丘は、一般に内陸側の第二砂丘が十分発達し植生や植栽で固定化されると、第一砂丘の成長と植生による安定化が生じる。第一砂丘がある程度成長すると、植生で被覆された第一砂丘フロントに飛砂がトラップされやすくなり、砂丘フロントは徐々に海側に前進する。第一砂丘の海側への成長に伴い、飛砂を供給するドライビーチ（後浜）幅は時間とともに狭まる。このような砂丘海岸では汀線位置は安定していても、飛砂により第一砂丘フロントが海側に前進する結果として砂浜幅が狭まり、場合によっては波による汀線後退（海岸侵食）と誤認識される。このような砂丘上での植栽による砂丘安定化については日本各地で先人の長い苦闘の歴史があり、例えば、赤木（1991）や昌山（1998）に述べられている。また飛砂の実際的な安定化工法については、CERC（1984）などに詳述されている。第一砂丘が前進し相対的に砂浜幅が狭くなると、高波浪時の遡上波が砂丘フロントに作用し易くなるために、浜崖形成を伴う砂丘侵食が生じ易くなる。一方、砂丘は侵食されながらも高波浪に対する自然の防波堤としての機能に加えて、砂丘侵食時には海浜へ砂を供給するという“土砂の貯留および供給機能”も有している。砂丘から供給された砂は海浜安定化に寄与し、その後再度飛砂として砂丘に運ばれる。砂丘海岸の管理では、このような海浜と砂丘相互の砂移動に関する知見が必要とされる。

従来、砂丘侵食に関しては、平均水位の上昇を伴う高波浪時の砂丘侵食や浜崖の形成に関する研究が多かった。また、砂丘上の飛砂発生に関しても、一定風速の風が吹く場合に発生する局所飛砂量予測に関する研究は行われているが、飛砂や風食による砂丘海岸のダイナミッ



写真-1 浜崖背後の風食孔

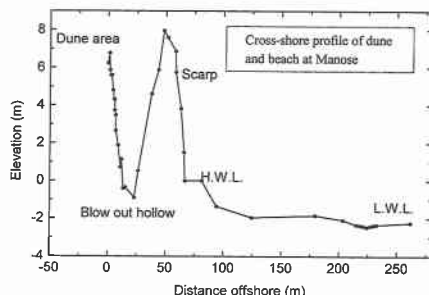


図-1 砂丘風食孔と海浜断面

クな地形変化に関するものは少ない。さらに、飛砂観測も冬季季節風を対象にしたものが多く、台風のような強風時の飛砂に関する観測ならびに知見は少ない。

本研究は、従来の波による砂丘侵食や冬季の飛砂研究とは異なり、海からの風に対し鉛直障害構造物となる浜崖が第一砂丘フロントに存在する砂丘海岸で、台風等の強風により発生すると考えられる砂丘風食孔地形（blow out hollow）と、風食孔の成長に引き続く飛砂発生に関する基礎的調査を行ったものである。ここで取り扱う砂丘風食（写真-1、図-1 参照）は、浜崖が形成されている第一砂丘の頂部周辺に発生し、発生初期にはほぼ同心円状の地形で、その後成長を続け風食孔の海側境界が切れると、海浜から風食孔内に直接吹き込む風により飛砂が卓越するようになり、最終的には飛砂の卓越方向に形状を歪ませ成長する。風食地形の概要はCarter（1993）、Nordstrom et al.（1990）等により述べられているが、風食孔地形の発生要因および地形特性等については未だ不

* 正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学専攻

** 正会員 工 博 建設省土木研究所河川部長

*** 正会員 工 博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

**** 鹿児島県庁土木部河川課長

***** 鹿児島県庁土木部防災海岸係長

明確である。

写真に示すような風食孔は、砂丘前面の砂浜を踏査してもその存在には気付かず、風食孔の海側境界が切れて初めてその存在に気が付きがちである。このような風食孔は、新たな飛砂発生領域となるために、砂丘植生や砂丘林に被害を及ぼすことになる。砂丘風食孔地形の発生と2次的飛砂領域の発生、ならびに風食による砂丘フロントの破壊機構に関する知見は従来得られていないので、まず砂丘風食孔の地形的特徴を調べた上で発生機構について考察することにした。

2. 調査地域の概要

図-2に、吹上浜海岸の等高線図および西・木村(1966)による砂丘域図を示す。吹上浜海岸は、鹿児島県薩摩半島の西部に位置し、東シナ海に面した全長約40kmの砂浜海岸であり、吹上浜ないしは吹上砂丘と呼ばれる。この海岸は、北部の鹿児島県串木野市から、南部の大浦町にまたがる約40kmの延長を持ち、地元では日本三大砂丘の一つと言われている。吹上浜の漂砂系は地形図から判断すると、ほぼ羽島崎～長崎鼻、長崎鼻～戸崎、戸崎～大浦に3区分される。このうち、戸崎～大浦の長さ約30kmの海岸が、一般に吹上砂丘として地域住民に親しまれている。当海岸の長期的な汀線変動については田中・小笹(1974)、あるいは植生変動や砂丘林変動については西等(1998)の研究がある。また、砂丘地形や砂丘



図-2 吹上浜海岸の海岸性状

上での風に関する調査は、これまで西・木村(1966)により行われた例がある。吹上砂丘は永吉川河口付近から発達し始め、小野川付近で砂丘幅が顕著に増大し、さらに南向きに砂丘幅が増大しながら万之瀬川河口付近で約2.7kmと最も広がっている。砂丘地の地質特性については、火砕流堆積物(シラス)が主なものである(理科年表読本, 1996)。

3. データ解析

現在、吹上浜海岸のほぼ全域で、浜崖と砂丘風食孔の形成が見られるが、浜崖背後の砂丘風食孔の発生機構を巨視的に把握するために、まず万ノ瀬川河口右岸から伊作川河口左岸にかけての約6.3km区間で砂丘風食孔の発生位置・規模、および風食孔と対応する飛砂発生域の位置と規模等に関し、写真判読を行った。画像解析では、写真-2～4に示す1997年3月撮影の1/10,000空中写真をスキャナーで読み込んだ後、パソコン上で画像を約1/5,000に拡大して判読を行った。

写真には、形成初期と思われる小さな風食孔、発達中と思われる風食孔、第一砂丘フロントとの境界が一部切れて飛砂が発生し始めた風食孔、そして風食孔の海側境界が完全にオープンになり大規模な飛砂が発生し始めたものが見られる。また、一部の飛砂発生域は、砂丘を超えて砂浜へ進入する経路で発生している。人の侵入により砂丘被覆植生が破壊されれば、飛砂が発生するだけでなく集中的な雨水流出などにより地盤高が低下し、さら



写真-2 解析に用いた空中写真(万ノ瀬川右岸)



写真-3 解析に用いた空中写真(中間領域)



写真-4 解析に用いた空中写真(伊作川左岸)



写真-5 海側境界が切れた風食孔の例



写真-6 飛砂が卓越する風食孔の例

に海風が集中して通り抜けることになる。なお、空撮写真から風食孔の発生位置を読み取る場合に、岸沖方向の基準線としては浜崖を連ねる線を用い、浜崖の消失個所では、隣接した浜崖の位置を内挿して基準線を設定した。これは、台風等の強風が海から内陸側に吹く時に、海浜背後に存在する浜崖が風に対する鉛直障害構造物として

作用するために、浜崖背後で強い渦を励起し、この強い渦が植生で被覆された砂丘面に作用することで、砂丘風食孔が発生するという仮説に基づくためである。なお、今後この仮説は検証の必要がある。上述した砂丘風食孔は第一砂丘周辺に形成されているために、砂浜踏査時には、写真-1や図-1に示すような砂丘風食孔の存在に気付き難い。そのために、第一砂丘フロントと風食孔との境界領域が高波浪時の遡上波あるいは強い風食で決壊すると、異常波浪による侵食と誤解しがちとなる。このような事例を写真-5と6に示す。

3.1 風食孔の発生位置とその規模

風食地形は吹上浜海岸全域に散在しているが、ここでは万ノ瀬川右岸から伊作川左岸の砂丘領域で、風食孔の調査を行った。図-3に風食孔の発生位置を示す。沿岸距離の原点は、万ノ瀬川右岸に、岸沖距離の基準は浜崖頂部に設定した。

本調査領域には46個所の風食孔が、平均で約137mに一箇所ある。また、図-4から風食孔の浜崖頂部からの平均距離は28mであり、ほとんどの風食孔が沿岸方向の位置に関係なく、浜崖頂部からほぼ10mから40mの範囲に発生している。また、内陸側に別の顕著な風食孔

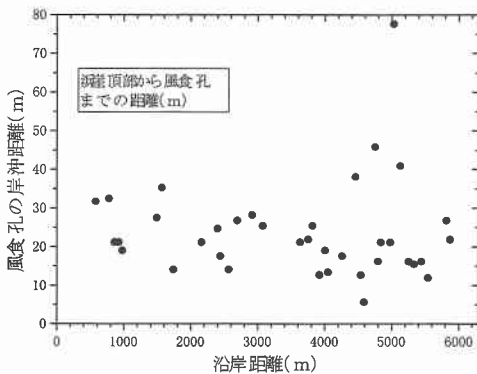


図-3 砂丘風食孔の発生位置

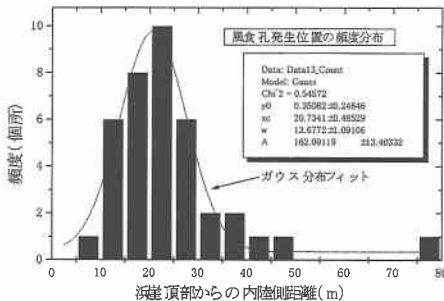


図-4 風食孔発生位置の頻度分布

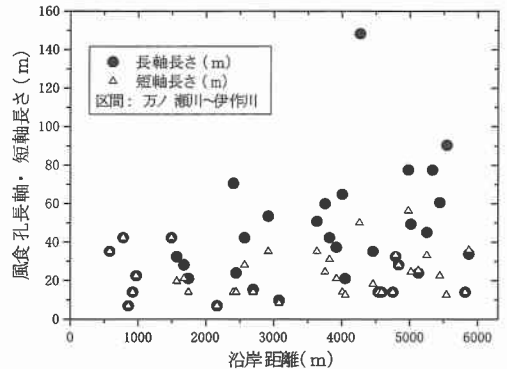


図-5 風食孔の規模

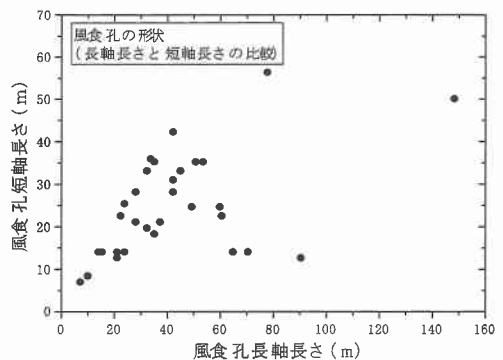


図-6 砂丘風食孔の長軸長さと短軸長さの相関

は発生していない。

図-5には砂丘風食孔の規模を見るために、風食孔の長軸長さ l_x と短軸長さ l_y をそれぞれ●印と△印で示した。図より沿岸距離約2,400 mまでは長軸長さ l_x と短軸長さ l_y がほぼ等しく、それ以降は、長軸長さの方が長い風食孔が増えることが分かる。長軸長さの平均は40 m、短軸長さの平均は29 mである。これは、風食孔発生位置が浜崖頂部より約30 mの所にある事から考えると、風食孔と浜崖面の間に平均で約10 mの砂丘帯が残されていることになる。ただし、風食孔が発達するにつれて風食孔と浜崖を連ねる線の間の幅が短くなり、風食孔によってはこの幅が完全にゼロになっている。風食孔が成長するとある時点で海側境界が切れ風食孔自体の成長が抑制されるために、長軸長さは一箇所を除き約90 mを最大としている。

風食孔は、第一砂丘背後に発生する局地的な強い渦により植生表面が破壊され、その下部の砂層が吹き飛ばされた結果生じるとすると、初期ステージでは比較的同心円状になるはずである。風食孔形状に関し、もし長軸長さ l_x と短軸長さ l_y がほぼ同じならば矩形ではなく同心円状の形になることが空中写真の目視の結果分かっているため、風食形状を調べるために、図-6に長軸長さ l_x と短軸長さ l_y の相関を示した。図からも、風食孔の長軸長さ l_x と短軸長さ l_y が約40数mまでは良い相関を持っており、風食孔がこの程度の大きさまでは同心円状に拡大していく可能性が高い。また、長軸・短軸長さは以下の式で表される。

$$l_y = 0.64 l_x + 4.47 \dots \dots \dots (1)$$

そして、40数m以上の大きさでは、長軸と短軸長さが異なることから同心円状の地形を保持していないことが分かる。これ以上の大きさになると風食孔と海浜の間にある第一砂丘が切れてしまい、海側から直接風が風食孔内に吹き込み飛砂を発生させ形状を歪ませるか、あるいは風食孔が充分大きくなったために風食孔が切れていなく

ても有意な強さを持つ風が風食孔風下側の砂を移動させるようになり形状が歪むなどの現象がこの原因と考えられる。これらの点については、経時的に風食孔の発生・成長が論議できるような空中写真を用いて今後判読する必要がある。

3.2 砂丘上での飛砂の発生

風食孔は植生で被覆された砂丘上で発生することから、冬季の季節風に比べて大きな強度を持つ台風等の風がその発生要因と考えられる。実際、海側から卓越風が吹いても風食孔内では風が渦を巻き易く、海岸域の卓越風向とは逆の海側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）に飛砂を発生し易くなることが空中写真の判読や現地踏査から分かっている。そこで、本研究では、海風の卓越風向側（陸側）に砂が移動している箇所を飛砂領域として定義した。

一旦固定化された砂丘上の砂が再び移動し始めると、再度飛砂災害が生じる可能性があるため、風食孔の発生箇所と隣接する区域での飛砂の発生状況について、風食孔と同じような手法で写真判読を行った結果を、図-7に示す。図中、飛砂の発生位置は、個々の飛砂領域の重心位置を示している。図より、飛砂領域の重心位置は、浜崖頂部から平均で約36 mの位置にあるので、風食孔

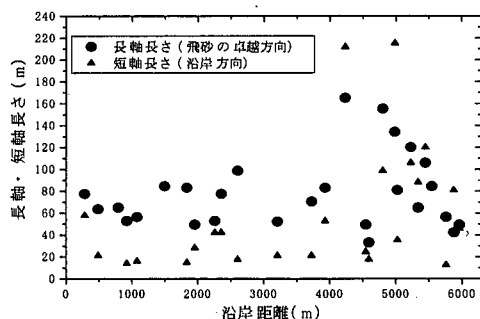


図-8 飛砂発生域の長軸・短軸長さ

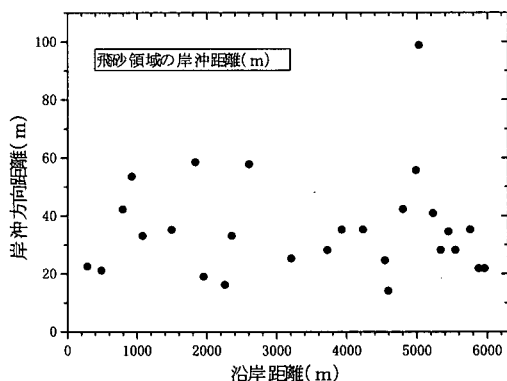


図-7 飛砂の発生位置

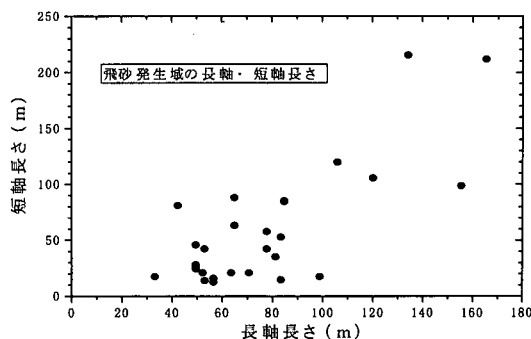


図-9 飛砂領域の長軸長さ l_x と短軸長さ l_y の相関

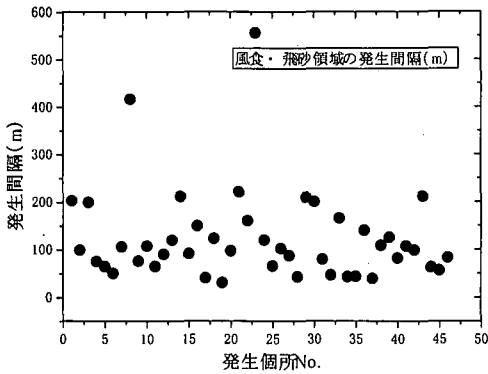


図-10 風食・飛砂領域の発生間隔 (m)

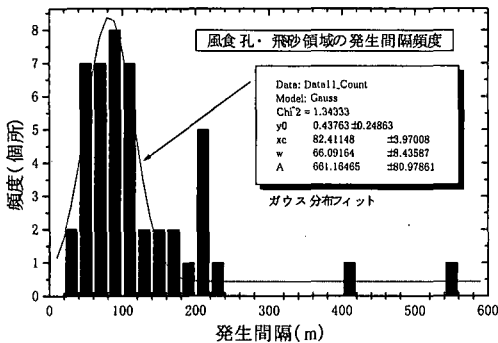


図-11 発生間隔の頻度分布

の重心位置より約 10 m 内陸側によっていることが分かる。また、伊作川以南で飛砂発生域の密度が若干増加していることが分かる。

図-8 には飛砂発生領域の長軸長さとし短軸長さを示す。ただし、本研究では、飛砂の卓越方向長さを長軸長さ、そして、沿岸方向の長さを短軸長さとしたので、沿岸方向に対し約 30 度の角度で卓越する飛砂領域形状を厳密に再現するものではないが、平均的な特性を把握できるはずである。長軸長さ・短軸長さ平均は、それぞれ約 78 m, 60 m である。また、図中に▲印で示した短軸長さのうち約 220 m の 2 箇所は、複数の風食孔が連結した飛砂領域である可能性が高いので、この 2 点を除外して考えれば、伊作川左岸領域を除き、飛砂の卓越方向の長さが平均的により長いことを示している。伊作川左岸付近では、飛砂の卓越方向の長さ(長軸長さ)よりも沿岸方向の長さ(短軸長さ)が長く、風食孔発生、飛砂発生の一連の過程のより最終ステージであると考えられる。

さらに、飛砂発生域の形状の概要を知るために、長軸長さとし短軸長さの相関を図-9 に示す。図より、飛砂領域は飛砂の卓越方向に成長をある程度してから沿岸方向に

も広がることが予測される。長軸長さとし短軸長さとし線形フィットを行うと、次式で表される。ここで、 y が飛砂領域の短軸長さ、 x が飛砂発生域の長軸長さである。また、相関係数 R は 0.76 となる。

$$y = 1.24x - 36.38 \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-10 に、風食孔と飛砂領域の発生間隔の沿岸方向分布を示す。横軸は、座標原点から数えた風食・飛砂領域の番号である。この図を見ると、その発生間隔はほぼ 50 から 200 m の範囲に集中し、その平均間隔は 123.4 m である。また図-11 には、飛砂領域発生間隔の頻度分布を示す。

4. あとがき

本研究をまとめると以下ようになる。

- 1) 風食孔の規模と飛砂領域規模の沿岸方向分布図に基づけば、平均的には万ノ瀬川河口右岸側よりも伊作川河口左岸側で、風食孔および飛砂領域の規模が大きい。
- 2) 風食孔は、主に第一砂丘周辺の約 10 m から 50 m の帯状の領域に形成されており、内陸側には別の顕著な風食孔は見られない。
- 3) 風食孔は長軸方向に約 50 m 弱までは同心円状の成長を続けるが、それ以上になると風食孔の海側境界が切れて砂浜から直接吹き込む風による飛砂が卓越するようになる。写真判読から、伊作川側では風食孔の海側境界が切れ、しかも複数の風食孔が連結している。

- 4) 風食・飛砂領域の沿岸方向の平均発生間隔は、約 113.4 m である。

参 考 文 献

- 赤木三郎 (1991): 砂丘の秘密, p. 170, 青木書店。
- 田中則男・小笹博昭 (1974): 海浜変形調査資料(第2報)一航空写真による汀線変化の解析一, 港湾技研資料, No. 192, 106 p.
- 西 力造・木村 (1966): 吹上浜砂丘地帯における前砂丘造成による安定法の研究, 財団法人九州治山協会理科年表読本 (1996): 日本列島の地質。工業技術院地質調査所監修, 丸善(株) p. 139.
- 西 隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・西原幸男・井ノ上由人 (1998): 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的変動特性, 海岸工学論文集, Vol. 44, pp. 661-665.
- 畠山義郎(1998): 松に聞け一海岸砂防林の話一, p. 145, (株)日本経済評論社発行。
- Carter, R. W. G. (1993): Coastal Environments, Blowouts, Academic Press, London, pp. 318-320.
- CERC (1984): Shore protection manual, Volume II, sand dunes, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, pp. 6-37~6-53.
- Nordstrom, K. F., N. Psuty and B. Carter (Editor) (1990): Coastal dunes forms and process, Blowouts, John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 231-246.