

砂丘付近における風向風速特性と飛砂フラックスの関係

東北大学 工学部 岡村 慧視
 東北大学 災害科学国際研究所 有働 恵子
 東北大学 大学院 工学研究科 満塩 将太
 東北大学 災害科学国際研究所 真野 明

1. 緒言

海岸砂丘から発生する飛砂は、周辺農地への塩害や道路への堆砂など、深刻な被害をもたらしている。効率的な飛砂対策を行うためには、現地で発生する飛砂と風場の関係を明らかにする必要がある。しかし今までの飛砂に関する現地計測は、その多くが平坦な場所（有働, 2007）や沿岸方向に一様な勾配をもつ場所（有働ら, 2010）で行われてきたため、砂丘のような3次元性の高い地形についてのデータは少ない。

本研究では、超音波式風向風速計および4方向飛砂センサーを用いて、瞬間風向風速および飛砂フラックスを調べることにより、砂丘付近における風向風速特性と飛砂フラックスとの関係について明らかにすることを目的とする。

2. 現地観測の概要

現地観測は、大型低気圧が通過した2012年11月20日に山形県庄内砂丘で、また同様に大型低気圧が通過した2012年12月5~6日に鳥取県鳥取砂丘を行った。瞬間風向風速は、超音波式風向風速計（Delta OHM社、HD2003）を用いて、サンプリング周波数1Hzで砂面からの高さ1.5mにおいて計測した。風向はN方向を0度として時計回りに正とした。飛砂フラックスは、4方向飛砂センサーを用いてサンプリング周波数1Hzで砂面からの高さ0.05mにおいて計測した。

(1) 庄内砂丘

庄内砂丘は、山形県庄内海岸にある砂丘地帯である（図-1）。この庄内砂丘内にある平均汀線より約160m陸側の直径5m程度の砂丘前面と砂丘背面における瞬間風向風速および飛砂フラックスの計測を行った。計測期間は、2012年11月20日12:30~15:29で、天候は雨時々曇であった。計測期間中の卓越風向（西北西）に沿って砂丘の海側（前面）、陸側（背面）に機器を設置した（図-2）。計測期間中の中央粒径 D_{50} は0.60mm程度で、含水比は5.6%であった。

(2) 鳥取砂丘

鳥取砂丘は、鳥取県にある広大な砂丘地帯である（図-3）。庄内砂丘と同様に、瞬間風向風速及び飛砂フラックスの計測を行った。計測期間は大型低気圧が通過した2012年12月5日20:25~12月6日5:18で、天候は雨時々曇であった。鳥取砂丘における風速10m/s以上の場合の卓越風向は北西である（満塩ら, 2012）。卓越風向を考慮し、「馬の背」と呼ばれる高さ50mの大きな砂丘列の海側（測点A）と陸側（測点B）を計測点に設定したものの、本計測期間中の卓越風向は南南西（12月5日20:25~12月6日1:39、時間帯①）、西南西（同日1:39~5:18、時間帯②）で2測点間を結ぶ方向と一致しないため、本研究では時間帯①における測点A、B

Relationship between wind characteristic and sand flux over dunes by Keishi Okamura, Keiko Udo,
 Shota Mitsushio, and Akira Mano

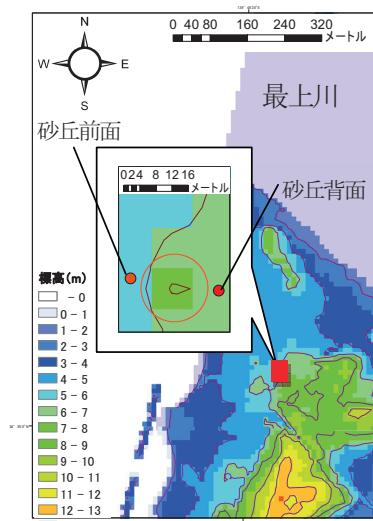


図-1 庄内砂丘での
計測点の位置



図-2 超音波式風向風速計及び4方向飛砂センサーの
砂丘前面（左）と砂丘背面（右）の設置状況

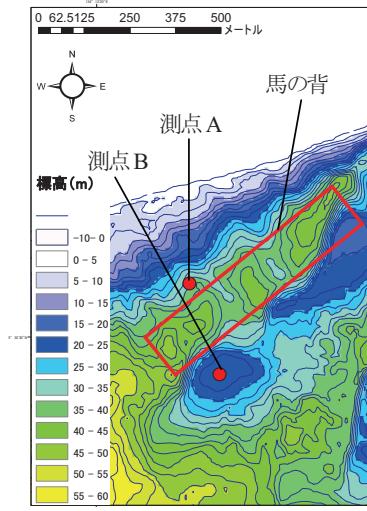


図-3 鳥取砂丘での
測点A, Bの位置

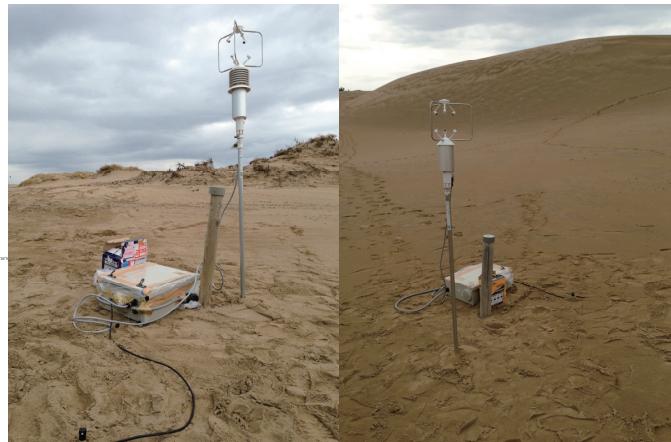


図-4 超音波式風向風速計及び4方向飛砂センサーの
測点A（左）と測点B（右）の設置状況

のデータをそれぞれA1, B1, 時間帯②における測点A, BのデータをそれぞれA2, B2とし, 各々について議論を進める。測点Aは西南西方向の緩い勾配上にあり, 測点Bは砂丘列に囲まれた平坦な地形であった。超音波式風向風速計および4方向飛砂センサーの設置状況を図4に示す。計測期間中の中央粒径 D_{50} は0.25mm程度であった。

表-1 計測期間中の平均風速、風速の標準偏差、平均風向、風向の標準偏差

地点	$\bar{u}(m/s)$	$u_{sd}(m/s)$	$\bar{\alpha}(\text{deg})$	$\alpha_{sd}(\text{deg})$
庄内砂丘前面	9.03	2.15	286	13.3
庄内砂丘背面	6.14	2.73	285	18.0
鳥取砂丘 A1	8.68	2.50	184	15.9
鳥取砂丘 B1	5.95	2.06	186	23.7
鳥取砂丘 A2	10.9	2.65	249	11.1
鳥取砂丘 B2	6.91	1.85	242	12.8

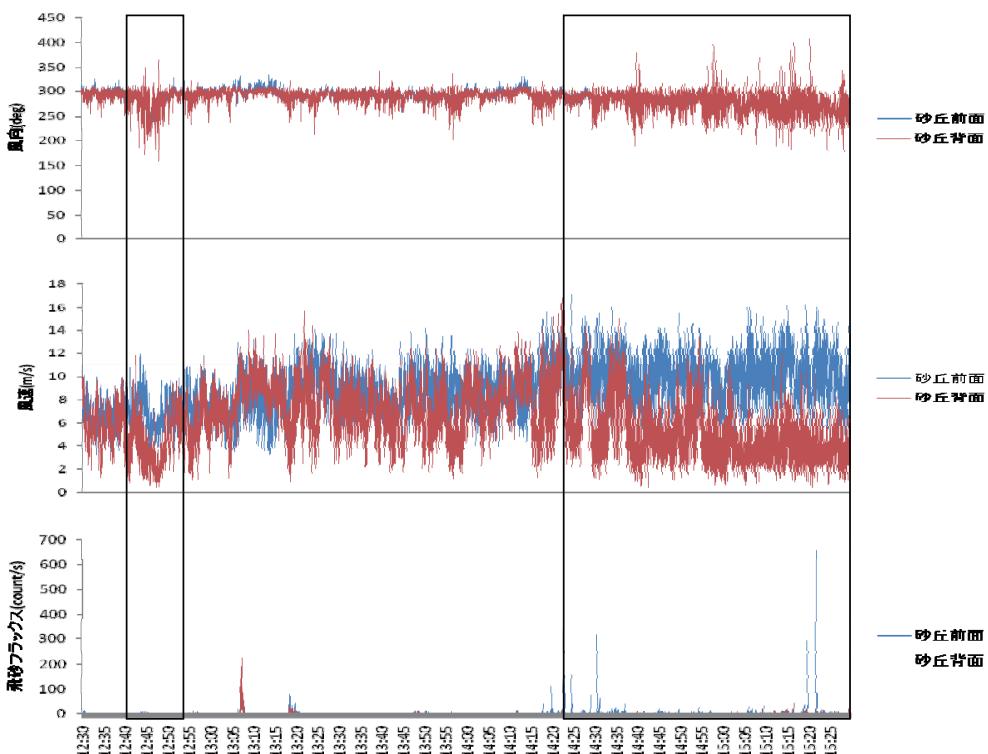


図-5 庄内砂丘の風向と風速、飛砂フラックスの時系列データ

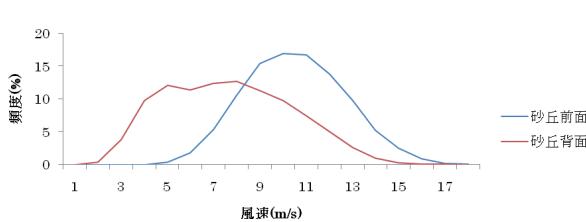


図-6 庄内砂丘の風速ヒストグラム

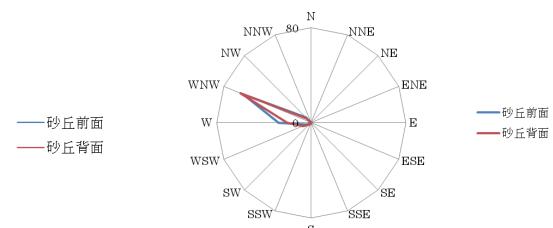


図-7 庄内砂丘の風向ヒストグラム

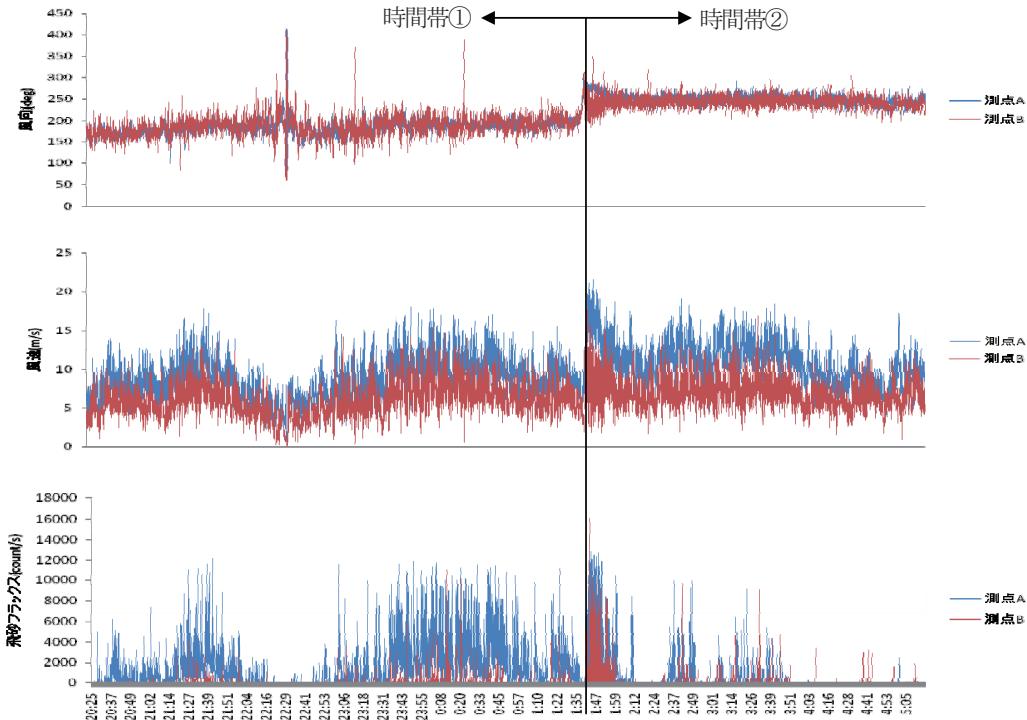


図-8 鳥取砂丘の風向と風速、飛砂フラックスの時系列データ

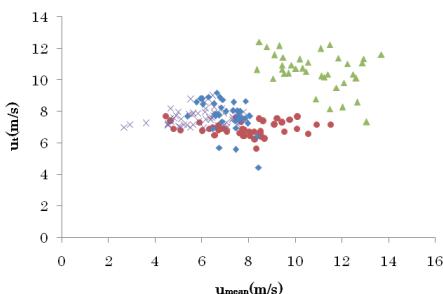


図-9 鳥取砂丘 5 分間の平均風速と限界風速の関係

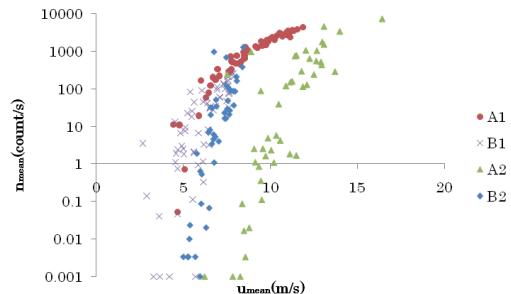


図-10 鳥取砂丘 5 分間の平均風速と平均飛砂フラックスの関係

3. 觀測結果

(1) 庄内砂丘

風向と風速、飛砂フラックスの時系列データを図-5に示す。風速については、平均風速が砂丘前面で 9.03m/s、砂丘背面では 6.14m/s と大きな違いが見られた（表1、図-6）。また、風速の標準偏差は砂丘前面で 2.15m/s、砂丘背面で 2.73m/s であり、砂丘背面で風速に大きな乱れが生じていた。風向については、砂丘前面から砂丘背面にかけて風速の減少が大きい時間帯では砂丘背面における風向の乱れも大きくなかった。平均風向は砂丘前面で 286° 、砂丘背面で 285° と変化が小さいのに対し、標準偏差は砂丘前面で 13.3° 、砂丘背面で 18.0° と



図-11 12月6日9時頃におけるA(左), B(右)の4方向飛砂センサーの様子(矢印は北方向)

風向の乱れが大きく表れた(図-7). これらの原因としては、風が砂丘の地形に沿って流れ剥離したことで地形乱流が起こった結果、風速が小さくなり、風速および風向の乱れも大きくなつたと考えられる。

飛砂フラックスについては、風速が10m/sを越える頻度が多かつたにも関わらず、既存の研究(有働ら, 2010)と比べ、カウント数は極めて少なかつた。これは計測日の天候が雨で砂が水を含み飛びにくい状況にあつたことに起因する。

(2) 鳥取砂丘

風向と風速、飛砂フラックスの時系列データを図-8に示す。風向の時系列データを見てみると、大型低気圧の影響で12月6日1:39頃に卓越風向が南南西から西南西へと大きく変わつてゐるのがわかる。また、12月6日2:00以降に飛砂フラックスが少なくなつたことも見てとれる。

各々の飛砂フラックス特性を調べるため、平均風速と限界風速、平均飛砂フラックスの関係をそれぞれ図-9、10に示した。限界風速の算定にはStout・Zobeck(1997)が提案したTime Fraction Equivalence Method(TFEM)を用いた。TFEMは風速が変動することを前提とした算定法であり、現地計測結果を用いたTFEMによる飛砂の限界摩擦速度の推定は妥当であるといふ結果が得られている(有働, 2007)。単位時間 T_0 のうち風速 u が限界風速 u_c より大きくなる時間 $T(u > u_c)$ の割合 $\gamma_u (= T(u > u_c)/T_0)$ は、 T_0 のうち飛砂が発生している時間 $T(n > 0)$ の割合 $\gamma (= T(n > 0)/T_0)$ と等しいと仮定する。瞬間風速および飛砂フラックスデータを用いて、 $\gamma_u = \gamma$ となるように u_c を定める。本研究では、有働(2007)と同様に、5分間隔に区切つた風速および飛砂フラックスデータにTFEMを適用して限界風速 u_c を求めた。

図-9を見ると、A2の限界風速値が他に比べ比較的大きい値を示してゐる。比較のため、各々の線形近似式から対数則

$$u_c = \frac{u_{*t}}{\kappa} \ln(z/z_0) \dots \dots \dots \quad (1)$$

に代入し移動開始限界摩擦速度を求めるとき、A1, B1, B2でそれぞれ0.23m/s, 0.23m/s, 0.29m/sなどのに対し、A2では0.37m/sと他に比べ大きい値を示した。ここで、 κ :カルマン係数($=0.4$)、 z :風速計の高さ($=1.5m$)、 z_0 :粗度長($=d/30 = 8.3 \times 10^{-6}m$)である。また、計算値として飛砂の限界摩擦速度の算定に多く用いられるBagnold(1941)の式

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} gd \dots \dots \dots \quad (2)$$

を用いて移動開始摩擦速度 u_{*t} を算定すると、 $u_{*t} = 0.23$ となつた。ここで、 A :実験係数($=0.1$)、 ρ_s :砂の密度($=2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 ρ :空気の密度($=1.226 \text{ kg/m}^3$)、 g :重力加速度($=9.81 \text{ m/s}^2$)、 d :砂の粒径(0.25

$\times 10^3$ m) である。計算値と比較すると、A2, B2 で比較的大きな違いが見られた。この理由として 2 つ考えられる。1 つは、4 方向飛砂センサーが風向方向に砂に埋もれていたため、飛砂フラックスの測定に誤差が出た可能性があること(図-11)、もう 1 つは、A が時間帯②において風向方向(西南西)に勾配のある地形であったため、平坦な地形に比べ飛砂が発生しにくい状況にあったと考えられる。このことから、起伏の大きい地形であっても限界風速とそれに伴う飛砂フラックスは局所的な地形の影響を受けやすいということが推測できる。

4. 結論

本研究では、庄内砂丘と鳥取砂丘という規模の異なる 2 つの砂丘付近における瞬間風向風速と飛砂フラックスを計測することによって、砂丘付近の風向風速特性と飛砂フラックスとの関係性を調べた。

庄内砂丘において、砂丘背面での風向の乱れが大きくなり、風速が小さくなつた。これは、風が地形に沿つて流れ剥離したことによる地形乱流が起つたことが一因として考えられる。

鳥取砂丘においては、観測値と時間帯によって限界風速とそれに伴う飛砂フラックスに大きな違いが見られた。特に A2 では風向方向(西南西)に勾配のある地形であったため飛砂が発生しにくい状況にあったことから、限界風速が他に比べ大きくなつたと考えられる。

本研究では現地計測による局所的な結果が得られたが、砂丘付近における風場は空間的に複雑な流れが生じており、これを局所的な結果のみで解明するのは困難である。今後は 3 次元性の高い砂丘付近の複雑な風場を計算し、定量的に風場と飛砂フラックスとの関係性を明らかにすることが必要とされる。

謝辞:鳥取砂丘の現地観測においては、鳥取砂丘事務所の方々にご協力頂いた。本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B) 23760452、代表者:有働恵子)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 (2007) : 飛砂の限界摩擦速度に関する現地観測、土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 54 卷, pp. 536-540
- 有働恵子・満塙将太・Junaidi・青木伸一・加藤茂・真野明 (2010) : 砂丘斜面上の飛砂に関する現地観測、土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 66 卷, pp.466-470
- 満塙将太・有働恵子・永松大・松原雄平・真野明 (2012) : 経験的固有関数法を用いた鳥取砂丘の地形変化特性の解析、土木学会論文集 G (環境), 第 68 卷, pp.249-254
- Stout, J. E. and T. M. Zobeck (1997) : Intermittent saltation, Sedimentology, vol. 44, pp. 959-970
- Bagnold, R. A. (1941) : The physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265p.