短い平坦砂面上の飛砂量に関する風洞実験

Wind-tunnel Study for Blown Sand on the Short Sand Surface

保坂幸一¹・久保田 進²・香取完和³

Koichi HOSAKA, Susumu KUBOTA and Sadakazu KATORI

For understanding the distance over which the sand transport rate by wind will be in equilibrium, large scaled wind-tunnel experiments for two kinds of sand size were carried out varying the sand layer lengths. Results from the vertical distributions of wind speed, blown sand speed, and sand transport rates suggested that the equilibrium distance was 8-10m to the fine sand($d_{50}=0.25\text{mm}$) when the shear velocity was under 1.3m/s ., however it was 15m or more to the coarse sand($d_{50}=0.52\text{mm}$).

1. 研究の目的

長い平坦砂面上での飛砂量は、風の摩擦速度の累乗に比例することが分かっており（Bagnold, 1936；河村, 1951）、沿岸方向の土砂収支として飛砂量を見積もることなどは可能となっている。一方、砂浜から内陸方向へ移動する飛砂量は内陸への飛砂害をもたらすためにその制御が望まれるが、このための研究は不十分であり、飛砂が汀線付近から内陸へ流出する間において、飛砂量は変化するものと考えられることから、岸沖方向の砂面長さが短い砂浜に長い平坦砂浜上の飛砂量式を適用することは必ずしもできないと考えられる。

そこで、このための研究の手始めとして、砂面境界から風下に向かう過程において、飛砂の外力である風の分布の変化や発生した飛砂がどのように増大してどのくらいの砂面長さで平衡状態（飽和状態）に達するかを知るための風洞実験を行った。ここでいう平衡状態とは、ある砂面に対して鉛直な断面において、流入する飛砂量と流出する飛砂量が近似的に平衡であることを指す。

飛砂量が平衡状態に達する距離についての既往の研究結果は表-1の通りである。表-1は堀田（2012）に示されたものに本実験結果を加筆したものである。多くは風洞実験や現地観測によって得られた結果であり、0.3mm以下の細砂を対象に実施されたものが多い。平衡距離は、飛砂量がほぼ平衡となる距離から判断しており、1.2m～20mの範囲である。数値計算により平衡距離を判断した例は、岩垣（1950）のみであり飛砂量の平衡距離を5mとして、理論と数値実験と現地データから砂粒子の飛行距離を7mとしているが、実験や現地観測による十分な検証はなされていない。結局、既往の研究成果は、検証データがない、風洞規模が小さい、実験または観測ケー

表-1 既往の研究結果との比較

出典	砂面状態	対象砂粒径 (mm)	判断基準	平衡距離 (m)	研究手段
河村 (1951)	乾燥砂面	0.25	飛砂量平衡	1.2	理論と風洞実験
岩垣 (1950)	乾燥砂面	0.20-0.25	飛砂量平衡 砂粒子の飛行距離の安定	5 7	理論と数値計算
堀川ら (1983)	乾燥砂面 4%湿潤砂面	0.3	飛砂量平衡	5 10	現地観測
堀田ら (2004)	乾燥砂面	0.15	飛砂量平衡	10	風洞実験
Bagnold (1954)	乾燥砂面 乾燥砂面	0.24 1	飛砂量平衡	7 >10	風洞実験
Svasek and Terwin dt (1974)	乾燥砂面	0.25	飛砂量平衡	10～20	現地観測
Dong et al. (2004)	乾燥砂面	0.18	飛砂量平衡	10～16	風洞実験
andretti et al. (2010)	乾燥砂面	0.12	砂面低下量から推定した飛砂量平衡	2	風洞実験
本実験	乾燥砂面	0.25	風速分布(摩擦速度)の安定	2	風洞実験
			境界層厚さの安定	8	
			砂面上5～25cmの飛砂量平衡	8～10	
		0.52	風速分布(摩擦速度)の安定	4	
			境界層厚さの安定 砂面上5～25cmの飛砂量平衡	≥15 ≥15	

スが少なく等の難点がある。

後述する本研究の成果によれば、粒径0.25mmの場合には従来の多くの場合と類似し8～10mであるが、0.52mmの場合については細砂に対する研究結果は適用できない。粗砂に対しては、新たな現地観測や実験が必要と考えられる。

2. 実験方法

(1) 実験内容

実験は大型風洞装置を用いて行った。実験内容は、風下に向かう過程における風速分布、境界層厚さ、飛砂の水平速度、飛砂量の変化を調べるために砂層を敷設する長さを

1 修(工) (株)クレアリア事業本部海岸水工部
2 正会員 工博 日本大学教授理工学部土木工学科
3 正会員 (有)ラボコスタ

図-1 本実験内容の説明図

図-2 風洞装置

図-3 実験砂の粒径加積曲線

変え、それぞれの砂面長の場合の風下端において風速、飛砂水平速度、および飛砂量の鉛直分布を測定した（図-1）。

実験に用いた吐き出し型風洞は、測定部の断面幅1.0m、高さ1.1m、長さ20mであり、3～30m/sの風速を起こすることができる（図-2）。実験砂には鹿島海岸の砂を粒度調整して均一化した2種類の砂を用いた。これらの砂の中央粒径は0.25mm及び0.52mmである（以下ではD25、D52と記す）。図-3に粒径加積曲線を示す。

(2) 実験ケース

2種類の実験砂D25、D52に関して以下の実験を行った。吐き出し型風洞の測定部内において、砂面長を0m（固定床）、1m、2m、4m、8m、15mの6種類（以下、L0、L1、L2、L4、L8、L15と記す）に変化させた。各砂面長に対して3種類の風速条件（砂面上の高さ50cmの平均風速 U_{50} が11m/s、15m/s、19m/s）で実験を行った。これらの風は15mの砂面端位置において摩擦速度が約0.9m/s、約1.3m/s、約1.9m/sの風であり、対数則によって現地平坦海浜上1m地点の風速に換算するとそれぞれ約12m/s、約18m/s、約23m/sとなる。

(3) 測定方法

風速測定には熱線風速計を用いた。熱線風速計は14本

図-4 熱線風速計プローブ配置図

写真-1 高速度カメラによる撮影状況

図-5 圧電飛砂計

のプローブを用いて、風速の鉛直分布を測定した（図-4）。飛砂水平速度は、藤澤ら（2009）と同様に、高速度カメラを用いて、飛砂の移動状況を撮影し、得られた画像から飛砂粒子の移動中の平均水平速度を求めた（写真-1）。飛砂量は、圧電飛砂計により砂面からの高さ5cm～35cmにおける飛砂計のセンサー部に衝突する飛砂粒子数を計測し飛砂量に換算した（Hosaka・Kubota（2011））。圧電飛砂計はプローブ直径が12mmのものを3本使用した（図-5）。

風洞測定部分の風の吹き出し口から下手約15m地点に測定機器を配置し、その地点を含む風上側に各ケース毎で所定の長さの砂面を10cmの厚さで敷設した。砂面風上端から風の吹き出し口までは砂面と同じ高さ10cm厚の床板を敷設した。風速計は測定時間間隔1秒で1分間、データ数61個、高速度カメラは、D25のケースでは2,000fpsで4秒間の撮影、D52のケースでは8,000fpsで約

14秒間撮影, 圧電飛砂計は測定時間間隔 1/8,000秒で1分間, データ数480,001個である.

(4) データの解析

飛砂速度の解析にはPC画面上で飛砂を自動追尾するシステム(アルファソフト社製)を用いた. 画面上で飛砂粒子を追跡し, その結果から個々の飛砂粒子の移動中の平均高さや平均水平速度を算出した. 圧電飛砂計のデータは, 0~±5Vの電圧値の時系列データを始めの4秒間のみ解析した. 飛砂量の算出は, センサー部に飛砂が衝突する個数を求め, 砂を球形と仮定して比重2.702(実験砂の比重)を乗じることによる. 衝突を判定する閾値はD25では1.2V, D52では2.1Vである. なお圧電飛砂計は, 1粒の砂が衝突する際に衝突信号が振動しつつ減衰するため, 衝突後に連続して衝突信号と同等の大きな信号が発生する場合がある. そのような場合の誤計数を避けるために, 衝突後の信号値が2個連続して, 閾値未満となるまで計数を止めることとした(Hosaka・Kubota (2011)).

3. 実験結果・考察

(1) 風速分布

①砂面長さが長くなるほど(風下に向かうほど)砂面近傍(砂面上約20cm以下)の風速が減少してその上部(約20-30cm以上)ではほぼ一定の風速となっている(図-6). 砂面近くの風速減少の傾向について, 砂の粒径の違いによる変化は認められない.

②境界層厚さとして, ここでは風速の鉛直分布において対数則が成立している高さで想定した. この高さは風下に向かって高くなる分布を示しており, D25の場合は風下8m地点で上限になるように見られるが, D52の場合は風下15m地点においても上限に達していないように見える(図-7).

③境界層内部での風の摩擦速度 u_* は, D25では風下砂面2m地点で最大値を示し, D52では風下砂面4m地点で最大値を示した. それぞれその風下側ではほぼ一定となった(図-8).

④摩擦速度 u_* と砂面上10cmの風速 u_{10} との関係は, 対数則が成立している範囲では, ほぼ比例関係にある. D25では砂面長さ2m以上でほぼ同様となり, D52では砂面長さとともに比が大きくなる方向に変化する(図-9). 図-6, 図-9から確認できるように, 摩擦速度 u_* が同程度の場合に u_{10} の風速は風下に向かうほど小さくなっている. ここで, 摩擦速度は境界層内の風速分布の傾きから求めている.

(2) 飛砂速度分布

①境界層内の飛砂の平均水平速度は砂面からの高さが高いほど大きくなり風速に近づく. 風下方向ではばらつ

図-6 風速の鉛直分布の例 ($U_{50}=15.0\text{m/s}$ の場合)

図-7 砂面長さや境界層高さ

図-8 砂面長さや摩擦速度の関係

 図-9 摩擦速度 u_* と砂面上10cmの風速 u_{10} との関係

 図-10 飛砂速度鉛直分布 ($U_{50}=15.0\text{m/s}$ の場合)

きがやや大きいものの、いずれの地点でもほぼ同様の分布形状となっている(図-10)。飛砂粒子は空中で風のエネルギーにより加速されるため、風下の方が飛砂速度分布は速くなると考えられたが、風速分布の結果より風速が風下に向かうほど小さくなっていることから見ても、砂面の摩擦や飛砂の存在により飛砂速度が相殺されているものと考えられる。

②後に示すように風下ほど飛砂量が増加していることと併せて考えると、平衡状態に達する要因としては、砂面から跳び出す砂量(空中を移動する飛砂濃度)が風下

図-11 飛砂量鉛直分布

ほど増加し、次第に安定するということが考えられる。

(3) 飛砂量分布

①どちらの粒径の場合も砂面近傍ほど飛砂量が増大しており、風下に向かうほど多くなっている(図-11)。久保田ら(2006)は同じ風洞装置を使って、砂面長さ15mの条件で鉛直分布型捕砂器による測定を行っている。これらの測定結果のうち摩擦速度の類似したケースの分布と比較したところ、D25、D52いずれの粒径においてもL15の場合に良く一致した。

②D25の場合、 U_{50} が11m/sでは、風下1m地点では飛砂がほとんど発生しなかったが、その風下では砂面上20cm以下の範囲で顕著に飛砂が発生し、風下砂面2m以降では飛砂量は平衡状態となっている。 U_{50} が15m/s、19m/sと大きくなるに従って、飛砂量は砂面上部方向にも、風下方向にも増大している。飛砂量が平衡状態になるのは、 U_{50} が15m/sでは風下砂面8m付近と推定される(図-11、図-12)。

一方、D52の場合、 U_{50} が11m/s、15m/sでは飛砂量分布が8m地点で15m地点の分布にほぼ一致しており、捕砂器データともよく一致している。 U_{50} が19m/sでは、風下に向かうほど15m地点の飛砂量分布に近づいていく傾向は見られるが、飛砂量が多くなり $0.1\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}$ に近づくと飛砂計の測定限界を超えるために、必ずしも平衡状態に達する距離を判断することができない(図-11、図-12)。

4. 結論

本研究の成果を以下の通りまとめる。

- ①風速分布は風下に向かうほど砂面付近の風速が小さくなる。摩擦速度 u_* はD25の場合で風下2m地点、D52の場合で風下4m地点においてほぼ一様となる(図-8)。境界層厚さ(対数則が成立している高さ)は、D25の場合は風下8m地点で上限になるが、D52の場合は風下15mまでの範囲内に上限となる地点は確認できなかった(図-7)。
- ②飛砂水平速度は、ばらつきが大きいものの砂面長さの差異による有意な変化は認められない(図-10)。
- ③飛砂が平衡状態になる風下砂面長さについて、D25の場合は U_{50} が15m/s以下の条件であれば砂浜長さが約8m以上で飛砂は平衡に達する(図-11、図-12)。堀田ら(2004)が細砂に対して行った実験では砂面長さ10m、15m、20mで飛砂量に有意な差異は見られないこと(表-1)と今回の結果から推して、このような細砂に対する飛砂量の平衡砂面長さは8m～10mとなる。
- ④風速 U_{50} が15m/s以上の場合やD52の場合については、さらに砂面長さ15m以上の測定を行うことが必要となる。また今回の圧電飛砂計による測定には飛砂濃度が

※D25の $U_{50}=19\text{m/s}$ の砂面15mケースは欠測のため、捕砂器による砂面15mケースの実験結果を図示した。

図-12 砂面長さ と 飛砂量の関係

高い場合の測定に限界があるため、計器の改良等を行い、実験により確かめる必要がある。

謝辞：実験およびデータの解析には、平成22年度、23年度の日本大学理工学部土木工学科海浜研究室の学生の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 岩垣雄一 (1950)：海岸地における飛砂について、京都防災研究所報告, 3, pp.31-35.
- 河村龍馬 (1951)：飛砂の研究、東京大学理工学研究所報告, 第5巻, pp.95-112.
- 久保田 進・保坂幸一・鶴飼正志・堀田新太郎 (2006)：風洞実験データに基づく飛砂量鉛直分布予測法の確立、海岸工学論文集, 第53巻, pp.431-435.
- 藤澤秀行・久保田 進・香取完和 (2009)：高速度デジタルイメージカメラによる飛砂粒子運動解明の試み、土木学会論文集B2 (海岸工学) Vol.B2-65, No.1, pp.541-545.
- 堀田新太郎・久保田 進・竹澤三雄 (2004)：粒径の小さい砂の飛砂量について、海岸工学論文集, 第51巻, pp.556-560.
- 堀田新太郎 (2012)：砂質海岸における飛砂現象 物理量の数表的表示とその適用限界、地形, 33巻, 3号, pp.259-280 (印刷中)
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田 進・香取完和 (1983)：トレンチトラップによる飛砂量の現地観測, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.303-307.
- Andreotti, B., P. Claudin and O. Pouliquen (2010) Measurements of aeolian sand transport saturation length: Geomorphology, 123, pp.343-348
- Bagnold, R.A.(1936): The Movement of Desert Sand, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A157, pp.211-235.
- Bagnold, R.A.(1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes: Methuen & Co. Ltd., London, p.265.
- Dong, Z., H. Wang, X. Liu, and X. Wang (2004): The blown sand flux over a sandy surface a wind tunnel investigation on the fetch effect Geomorphology, 57, pp.117-127.
- Hosaka, K. and S. Kubota (2011): Experimental Verification of a Wind-Blown Sand Flux Meter with a Ceramic Piezo-Electric Sensor, Coastal Sediments 2011, pp.768-781.
- Svasek, J. N. and J. H. Terwindt (1974): Measurement of sand transport by wind on a natural beach, Sedimentology, 21, pp.311-322.