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

An Attempt to Analyze the Motion of Wind-Blowing Sand Grains by a High Speed Digital Imaging Camera

藤澤秀行¹·久保田進²·香取完和³

Hideyuki FUJISAWA, Susumu KUBOTA and Sadakazu KATORI

The motion of wind-blowing sand grains was photographed by a high speed digital imaging camera in a large windtunnel under the realistic conditions. Well-sorted sands taken from a natural beach and sieved with median diameter of 0.15, 0.25, 0.52, 0.68 mm were employed. The vertical distribution of wind speed and the horizontal component of flying sand grains velocity were followed by the logarithmic law. Then the vertical distribution of the ratios for the horizontal component and wind speed also followed by logarithmic law and the gradient of curves was almost the same for four kinds of sand. For the sand with median diameter of 0.68 mm, obtained were approximate values of 2.0 m/s and 10-20 degrees for the falling velocity and angle and approximate values of 1.0 m/s and 20-50 degrees for rebound velocity and angle.

1. はじめに

飛砂は掃流, 跳躍, 浮遊の 3 つの形態で移動しており, その多くは跳躍による(例えば堀田, 1985)とされてい る.しかしながらその運動機構には未だ不明な点が多い. 過去に飛砂運動を測定,解析しようとした例としては土 屋ら(1971)の高速度カメラによる実験,Zouら(2001) による高速フラッシュ撮影による実験がある.最近の研 究として,Yangら(2007)のレーザー光照射とCCDカ メラ撮影,Kangら(2008)のPDPA(ドップラー式レー ザー粒子分析計)等による実験がある.これらにより細 砂の場合の砂面近傍の飛砂水平速度が砂面上で対数則に 従うことが示されている.本研究では,高性能の高速度 カメラを用いて,細砂から粗砂に至る範囲の飛砂風洞実 験における飛砂の跳躍運動を調べた.

2. 実験の概要

実験に用いた風洞は幅1.0m,高さ1.1m,長さ20mの吹き出し型風洞である.風洞底部に厚さ10cmに砂を敷きならすことにより断面1.0m×1.0mが確保される.実験に用いた砂は,鹿島海岸の砂を篩い分け調整して粒径を極力均一化したものであり,中央粒径d₅₀は0.15mm,0.25mm,0.52mm,0.68mmの4種類である.これら砂粒子の密度は2.702g/cm³である.砂の敷設に当たっては特別な締め固めは行っていない.各粒径につき風洞内の風の強さを変えて数ケースの実験を行った(表-1).後で示す通り,風速は砂面上約30cm以上でほぼ一定となって

いることから、風の強さを示す実験条件として砂面から 高さ30cm ~ 60cmにおける平均風速Uを用いた。風速の 測定には熱線風速計アレイを使用し、風速計センサーを 砂面上高さ2.5cm ~ 約60cmの間に15台設置した.風洞の 側面片側はガラス張りになっており、この外側に照明と 高速度カメラを据えて風洞内部の飛砂を撮影した.風洞 内部には砂面からの高さを示すための標識を取り付け、 これを基準に高さ約6cm,幅約10cmの範囲(図-1)を、 砂面から高さ5cmごとに肉眼で飛砂が確認できる高さま で撮影を行った.撮影速度は2000fps,撮影時間は約6.5s である.

表-1 実験のケース一覧

		砂面から高さ30 cm~60 cmにおける 平均風速U (m/s)		
砂の中央 粒径d ₅₀ (mm)	0.15	11.7	15.6	19.4
	0.25	12.1	—	—
	0.52	13.0	20.1	—
	0.68	11.8	16.0	19.7



図-1 撮影範囲と撮影画像

 ¹ 学生会員
 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻

 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
 工修
 (有) ラボコスタ取締役

3. 風速及び飛砂速度

撮影した映像をプロジェクターで拡大投影し,明瞭に 写っている飛砂粒子を追跡して軌跡図を作成し,飛砂粒 子の移動速度を求めた.一つの撮影映像(2000fps×6.5s ;約13000コマ)につき50~70個,1粒子につき約10コ マ分(1/200s)を追跡した.図-2は作成した軌跡図の一 例で,中央粒径が0.52mm,Uが13.0m/sのケースである. 砂面付近では遅く,砂面から離れるにつれて速く移動し ていることがわかる(藤澤・久保田, 2008).

図-3に一例として中央粒径が0.15mmおよび0.68mmの 場合の風速U₂と飛砂の水平方向の速度u_sの鉛直分布を示 す.U₂は飛砂が発生しているときの時間平均風速である. u_sは飛砂が標識を通過する前後10コマから算出した水平 速度である.縦軸を対数表示にしており,砂面から高さ 30cm付近までは風の対数則が成立していることが分か る.30cm以上では風速はほぼ一定となっている.よって 本実験では砂面から高さ約30cmまでは現地海岸と同様 の風速分布とみなすことができる.飛砂量が大きい砂面 近傍(z:0~3cm付近)では照明によりハレーションが 発生し映像がぼやけてしまったため読み取りが困難であ った.そのためプロット数が少なくなっている.

飛砂速度は全般的に小さい粒径 $(d_{50}: 0.15 \text{ mm})$ のほ うが大きい粒径 $(d_{50}: 0.68 \text{ mm})$ より風速に近い値にな っている.また、大きい粒径のほうが高いところまで飛 砂が生じている.

図-4は、高さ1cmごとにu_sを平均した値をU_sとして示 したものである.なお、砂面付近については飛砂速度の データ数が少ないことと風速データを欠くことにより、 砂面上2.5cm以下のデータを載せなかった.いずれのケ ースにおいてもU_zと飛砂水平速度の平均値U_sの速度差は 対数則を満たす範囲では高さによらずほとんど一定で ある.







図-5は対数則が成立している高さ2.5cm ~ 30cmについ て、高さ1cmごとに $U_s \geq U_z$ の比をとってプロットしたも のである.砂面から離れるにつれ U_s / U_z が大きくなって いる. U_s / U_z の風速毎の分布形状は中央粒径が0.52mmの 場合に関しては若干ずれているものの、他の粒径の場合 には差が見られない.また、任意の高さにおける U_s / U_z の大きさも中央粒径が0.52mmの場合は若干異なっ ているものの、中央粒径が0.15mm、0.68mmの両ケース とも風速Uによらず一致している.

図-5中の直線(最小二乗法による近似直線)を式で示 すと以下の通りとなる.式の傾きは中央粒径0.52mmの 場合がやや小さいが,ほぼ同様であり,切片の値は粒径 の大きなケースほど小さい(表-2).

 $\frac{U_s}{U_z} = a \ln(z) + b \cdots (1)$

図-6は砂面からの高さzを中央粒径d₅₀で除して無次元









表示にしたもので縦軸を対数表示としている. 粒径毎の 近似直線は,中央粒径0.52mmの直線にずれが見られる ものの大局的には一致している. これより,式(1)を まとめて式(2)を得る.

$\frac{U_s}{U_z} = 0.16 \ln \left(\frac{z}{d_{50}}\right)$)+0.25
--	--------

4. 砂面近傍の砂の動き

中央粒径が0.68mm, Uが11.8m/sのケースについては, 砂面付近を撮影した映像約13000コマのうち,明瞭に写 っていて,かつ砂面への衝突前後5~10コマ程度を追跡 可能な飛砂粒子の読み取りを行った.跳躍状態にあるお よそ100粒の砂粒子の読み取りができ,落下角度および 飛び出し角度(図-7)と速度の分布を調べた.他ケース については飛砂量が多くハレーションによるぼやけが強 かったため読み取りが困難であった.

図-8は落下角度と落下速度の分布である. 落下速度は 砂粒子の進行する方向の速度である. 落下角度は10~20 度付近が最も多く, 落下速度は落下角度によらず2m/s前 後であった. ほとんどの砂は落下して砂面に衝突した後, 跳ね返って再び跳躍運動へと移る. また, 衝突時に砂面 上にある他の砂粒子を弾き飛ばしながら跳躍していく砂 も一部に見られた.

図-9は飛び出し角度と飛び出し速度の分布である.飛び出し速度は砂粒子の進行方向の速度である.落下して 砂面に衝突後に跳ね返った砂の多くが10~50度の間に分 布しており,落下してきた砂によって弾き飛ばされて空 中へと飛び出す砂は50度以上の角度で多く分布してい



る.中には90度以上の角度で(風上側へ)飛び出してい く砂も少数ながら見られた.飛び出し速度は1m/s前後で ある.

図-11および図-12は砂粒子の落下速度・角度とその砂 粒子が砂面に衝突して空中へと跳ね返るときの跳び出し 速度・角度の関係(図-10で太線のような軌道を示す砂 粒子の砂面衝突前後の速度・角度の関係)である.落下 角度は10~20度が多く,跳び出し角度は10~50度の広 い範囲に分布している.落下角度と跳び出し角度の相関 性は見出せなかった.速度に関しては,跳ね返るときの 速度は落下速度の約1/2となっている砂粒子が多い.

5. 結論

高速度カメラを用いることにより細砂から粗砂に至る 範囲の粒径における飛砂の移動速度を求めることができ た.また、粒径の大きい中央粒径が0.68mmの砂に限り 砂面付近の動きを調べることができた.以下に結論を述

表-2 係数 a と b



べる.

①粒径が小さいほど飛砂の水平速度は大きくなる.

- ②風の対数則が成立する領域においては, *U_sとU₂の差は* 砂面からの高さによらずほぼ一定である.
- ③*U_s*/*U_z*で定義される無次元飛砂速度は砂面からの高さ *z*/*d*₅₀により式(2)で与えられる.
- ④砂面から飛び出す砂の多くは落下してきた砂が砂面に 衝突後に跳ね返ったものであり、他の飛砂粒子によっ て弾き飛ばされるものは少ない。
- ⑤砂面への落下角度は10~20度が多く,飛び出し角度は 20~50度が多い.砂面への落下速度は約2m/sであり, 飛び出し速度は約1m/sとなっている.

謝辞:本研究は日本大学理工学研究所測量実習センター の研究費の一部を使用した.実験と解析にあたっては堀 田新太郎元日本大学総合科学研究科教授にご指導を受け るとともに,日本大学土木工学科海浜研究室の卒研生の 協力を得た.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 河村龍馬(1950):飛砂の研究,東京大学理工学研究所報告, Vol. 5, pp. 95-112
- 土屋義人・河田恵昭(1971) :飛砂における砂粒のsaltationの 特性について,第18回海講論文集, pp. 359-364
- 藤澤秀行・久保田進(2008):土木学会第63回年次学術講演 会講演集,II-3,2-162(CD版)
- 堀田新太郎(1985):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
- Kang, L., L.Guo, Z.Gu and D.Liu (2008) : Wind tunnel experimental investigation of sand velocity in aeolian sand transport, Geomorphology, Vol.97, pp. 438-450.
- Yang, P., Z. Dong, G. Qian, W. Luo and H. Wang (2007) : Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by Particle Image Velocimetry, Geomorphology, vol.89, pp. 320-334.
- Zou, X.Y., Z. L. Wang, Q. Z. Hao, C. L. Zhang, Y. Z. Liu and G. R. Dong (2001) : The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel, Geomorphology, vol.36, pp. 155-165.